INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
Fluminense

MINISTÉRIO DA
EDUCAÇÃO

PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MODALIDADE PROFISSIONAL

ANÁLISE DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA *OFFSHORE* NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL: UM NOVO CAMINHO DE DESENVOLVIMENTO

THIAGO RIBEIRO CORIOLANO

MACAÉ-RJ

2021

THIAGO RIBEIRO CORIOLANO

ANÁLISE DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA *OFFSHORE* NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL: UM NOVO CAMINHO DE DESENVOLVIMENTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, área de concentração Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação.

Orientador(a): Dr. Jader Lugon Junior
Coorientador(a): Dr. Marcos Antonio Cruz Moreira

MACAÉ-RJ

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C484a Coriolano, Thiago Ribeiro, 1995-.
Análise do potencial de geração de energia eólica *offshore* na região Sudeste do Brasil: um novo caminho de desenvolvimento. / Thiago Ribeiro Coriolano. — Macaé, RJ, 2021.
x, 42 f.: il. color.

Orientador: Jader Lugon Junior, 1962-.
Coorientador: Marcos Antonio Cruz Moreira, 1965-.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Macaé, RJ, 2021.
Inclui referências.
Área de concentração: Sustentabilidade Regional.
Linha de Pesquisa: Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação.

1. Energia - Fontes alternativas - Brasil, Sudeste. 2. Energia eólica - Fatores climáticos - Brasil. 3. Desenvolvimento econômico sustentável. 4. ERA5 - reanálise atmosférica. 5. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. I. Lugon Junior, Jader, 1962-, orient. II. Moreira, Marcos Antonio Cruz, 1965-. III. Título.

CDD 333.79 (23. ed.)

Bibliotecário-Documentalista |Daviane da Silva Ribeiro | CRB-7/ 6441

Dissertação intitulada **ANÁLISE DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA *OFFSHORE* NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL: UM NOVO CAMINHO DE DESENVOLVIMENTO**, elaborada por **Thiago Ribeiro Coriolano** e apresentada, publicamente perante a Banca Examinadora, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal Fluminense - IFFluminense, na área concentração Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação.

Aprovado em 22 de outubro de 2021.

Banca Examinadora:

Jader Lugon Junior, Doutor em Modelagem Computacional / Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Federal Fluminense (IFFluminense) – Orientador

Marcos Antonio Cruz Moreira, Doutor em Engenharia Elétrica / Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE UFRJ), Instituto Federal Fluminense (IFFluminense) – Coorientador

Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva, Doutora em Engenharia Mecânica / Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE UFRJ), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF)

Natáia Tasso Signorelli, Mestre em Ciências (Oceanografia) / Universidade de São de Paulo (USP) e Especialista em Ciências Atmosféricas, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (Fugro e UENF)

scientia potentia est

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, por me conduzir nesta trajetória e por me dar forças para seguir em frente.

Ao Instituto Federal Fluminense – Campus Macaé, pelo ensino gratuito e de qualidade.

Ao orientador Prof. Jader Lugon Junior e ao coorientador Prof. Marcos Cruz pela contribuição técnica e cientifica neste projeto, pela paciência e dedicação exemplar no desenvolvimento da ciência.

A minha família, minha mãe Maria Margereth, meu pai Everson Coriolano e meus quatro irmãos que me conduziram e me aconselharam a seguir um caminho de retidão e honestidade com seus exemplos.

A minha amada companheira Andreza Alves por me apoiar e ser uma fortaleza em minha vida.

A todos que de alguma forma contribuíram no desenvolvimento deste trabalho.

Muito obrigado.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO CIENTÍFICO 1

Figura 1: Acréscimo anual na capacidade eólica *offshore* global (em MW) período de 2011 a 2019 ..5
Figura 2: Potencial Eólico do Brasil. Cruzes pretas: parques eólicos instalados.....6
Figura 3: Modelo de aerogerador com 3 pás e rotor na horizontal. 7
Figura 4: Custo relativo da estrutura *offshore* de acordo com a tecnologia.....8
Figura 5: Ferramentas computacionais utilizadas. 16
Figura 6: Potencial eólico *offshore* na região sudeste do Brasil, blocos de exploração e campos de produção de petróleo. 17
Figura 7: Velocidade média do vento *offshore* na região sudeste do Brasil. 18
Figura 8: Região com velocidade do vento superior a 7 m/s e cota batimetria menor que 20m na região *offshore* sudeste do Brasil. 19

ARTIGO CIENTÍFICO 2

Figure 1: Points of interest and *offshore* wind farm projects. 32
Figure 2: Wind Power Density Median [W·m−2] at 100 m from 1981 to 2020. 33
Figure 3: Wind Power Density Anomalies [%] at 100 m from 1990 to 2010, relative to the decade of 1980.....33
Figure 4: Decadal Wind Power Density Distribution at 100 m from 1980 to 2010, for P1 to P4. 34
Figure 5: Wind Frequency Distribution at 100 m [%] of the Decades of 1980 and 2010. 35
Figure 6: Wind Power Density Trend [W·m−2·y−1] from 1979 to 2020. 36

LISTA DE TABELAS

ARTIGO CIENTÍFICO 1

Tabela 1: Comparação do potencial teórico *offshore* no Brasil. 11
Tabela 2: Estudos e avaliações regionais de potencial eólico *offshore* no Brasil. 12
Tabela 3: Parques eólicos em fase de licenciamento ambiental no Brasil. 12
Tabela 4: Comparação do potencial teórico *offshore* no Brasil. 20

ARTIGO CIENTÍFICO 2

Table 1: Points of Interest. 31
Table 2: Wind Power Density [$W \cdot m^{-2}$] at 100 m over the Decades of 1980 and 2010 for P_1 to P_4....34
Table 3: Frequency Distribution of Wind Records at 100 m [%] for the Decades of 1980 and 2010, grouped by Speed [$m \cdot s^{-1}$] and Direction. 36
Table 4: Wind Power Density Linear Trend at 100 m [$W \cdot m^{-2} \cdot y^{-1}$] from 1979 to 2020, for P_1 to P_4. 37

LISTA DE ABREVITURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CDO – *Climate Data Operators*

CEO – Complexos Eólicos *Offshore*

EIA – Estudo de Impacto Ambiental

GEBCO – *General Bathymetric Chart of the Oceans*

GWEC – *Global Wind Energy Council*

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IEA – *International Energy Agency*

RAS – Relatório Ambiental Simplificado

RIMA – Relatório de Impacto Ambiental

UTC – *Coordinated Universal Time*

ZEE – Zona Econômica Exclusiva

ANÁLISE DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA *OFFSHORE* NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL: UM NOVO CAMINHO DE DESENVOLVIMENTO

RESUMO

A demanda de energia tem aumentado globalmente balizada pela industrialização e a globalização. A produção de energia contudo, tem assumido novas faces, com a promoção de fontes de energia renováveis que tem como fundamental patrocinador as políticas e acordos energéticos internacionais e nacionais. No âmbito das energias renováveis, a energia eólica tem sido destaque no mundo e no Brasil. O Brasil atualmente ocupa a 8ª colocação entre os países com as maiores capacidades eólicas instaladas do mundo. Apesar do proeminente crescimento da indústria eólica *offshore* no mundo, que traz reflexos no interesse de empreendedores aos recursos eólicos disponíveis no Brasil, ainda é necessário consolidar análises mais amplas no espectro das estimativas de potencial eólico disponível. A região sudeste se posiciona como um local de destaque para o desenvolvimento de projetos dessa natureza e demanda estudos do seu potencial eólico, aliados a avaliações que contemplem análises dos impactos das mudanças recentes na circulação atmosférica global nas estimativas de potencial de geração de energia, visto que estas mudanças impõe alterações relevantes nos principais fenômenos meteorológicos da região e, consequentemente, no regime de ventos. A avaliações do potencial eólico *offshore* foram conduzidas a partir de dados de reanálise ERA5, compreendidos no período de 1979-2019, publicados pelo ECMWF. O potencial eólico *offshore* para região sudeste do Brasil totalizou 904 GW até o limite da ZEE. Deste potencial, 92% está localizado em região com profundidades superiores a 100 m. Nas regiões com profundidades menores que 100 m, o potencial é de 73 GW, que representa mais do que 5 vezes a capacidade instalada da usina hidroelétrica de Itaipu, que com seus 14 GW, fornece 11,3% da energia consumida no Brasil. Além disso, a partir da análise da variação temporal do potencial eólico *offshore* no sudeste do Brasil, foi observada uma redução na frequência dos ventos de baixa velocidade ($\leq 7{,}5\ m \cdot s^{-1}$) e um aumento da frequência na faixa de alta velocidade ($>7{,}5\ m \cdot s^{-1}$) que afetaram as estimativas do potencial eólico *offshore* na região de estudo, principalmente relacionado à intensificação e expansão da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) nos últimos 40 anos. Exceto para o litoral de São Paulo e do sul do Rio de Janeiro, houve um aumento consistente na densidade de potência eólica ao longo das décadas. Os quatro pontos analisados na costa da região sudeste apresentaram um aumento de 8,2% a 11,2% na mediana da densidade potência eólica.

Palavras-chave: Análise. Potencial Eólico *Offshore*. Sudeste. Brasil. Desenvolvimento.

ANALYSIS OF THE *OFFSHORE* WIND ENERGY POTENTIAL IN THE SOUTHEAST REGION OF BRAZIL: A NEW DEVELOPMENT PATH

ABSTRACT

The demand for energy has increased globally aligned with industrialization and globalization. The energy generation profile, however, has changed over the last years due to the promotion of renewable energy sources mainly caused by the influence of international and national energy policies and agreements. In the scope of renewable energies, wind energy has been highlighted in the world and in Brazil. Brazil currently ranks 8th among the countries with the largest installed wind capacity in the world. Despite the prominent growth of the offshore wind industry in the world, which reflects the interest of entrepreneurs in the wind resources available in Brazil, it is still necessary to consolidate analyses regarding the wind potential estimates. The Southeast region is positioned as a prominent place for the development of projects of this nature and demands studies of its wind potential, combined with assessments that include analyses of the impacts of recent changes in global atmospheric circulation on energy generation potential estimates, as that these changes impose relevant changes in the main meteorological phenomena in the region and, consequently, in the wind regime. Assessments of offshore wind potential were conducted based on ERA5 reanalysis data, covering the period 1979-2019, published by the ECMWF. Offshore wind potential for southeastern Brazil totalled 904 GW up to the EEZ limit. Of this potential, 92% is located in a region with depths greater than 100 m. In regions with depths less than 100 m, the potential is 73 GW, which represents more than 5 times the installed capacity of the Itaipu hydroelectric plant, which with its 14 GW, supplies 11.3% of the energy consumed in Brazil. Furthermore, from the analysis of the temporal variation of the offshore wind potential in southeastern Brazil, a reduction in the frequency of low speed winds (≤7.5 m·s−1) and an increase in frequency in the high range were observed. speed (>7.5 m·s−1) that affected the estimates of offshore wind potential in the study region, mainly related to the intensification and expansion of the South Atlantic Subtropical Height (SASH) in the last 40 years. Except for the coast of São Paulo and south of Rio de Janeiro, there has been a consistent increase in wind power density over the decades. The four points analyzed on the coast of the Southeast region presented an increase of 8.2% to 11.2% in the median of the wind power density.

***Keywords**: Analyze. Offshore Wind Potential. Southeast. Brazil. Development.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS vi
LISTA DE TABELAS vi
LISTA DE ABREVITURAS E SIGLAS vii
RESUMO viii
ABSTRACT ix
APRESENTAÇÃO 1
ARTIGO CIENTÍFICO 1 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA OFFSHORE NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL A PARTIR DE DADOS DE REANÁLISE ERA5

1. INTRODUÇÃO 5
2. REVISÃO DA LITERATURA 7
2.1. Recurso Eólico 7
2.2. Energia Eólica e o Desenvolvimento Sustentável 8
2.3. Estimativa do Potencial 9
2.4. Potencial Eólico *Offshore* no Mundo 10
2.5. Potencial Eólico *Offshore* na ZEE do Brasil 11
2.6. Potencial Eólico *Offshore* Regional no Brasil 12
2.7. Projetos de Parques Eólicos *Offshore* no Brasil 12
2.8. Impactos Ambientais dos Projetos de Parques Eólicos *Offshore* 13
3. METODOLOGIA 15
3.1. Base de Dados 15
3.2. Ferramentas Computacionais 15
3.3. Região de Interesse 16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 17
5. CONCLUSÃO 21
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 22
ARTIGO CIENTÍFICO 2 STUDY OF THE TEMPORAL VARIATION OF OFFSHORE WIND ENERGY POTENTIAL IN SOUTHEAST BRAZIL

1. INTRODUCTION 29
2. MATERIALS AND METHODS 31
3. RESULTS AND DISCUSSION 33
4. CONCLUSION 38
5. ACKNOWLEDGMENTS 39
6. REFERENCES 40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DA DISSERTAÇÃO 43

APRESENTAÇÃO

A energia é elemento fundamental no desenvolvimento humano e sua demanda tem aumentado globalmente balizada pela industrialização e a globalização. A produção de energia contudo, tem assumido novas faces, com a promoção de fontes de energia renováveis que tem como fundamental patrocinador as políticas e acordos energéticos internacionais e nacionais (ERVINE, 2015; MICHAELIDES, 2012).

No âmbito das energias renováveis, a energia eólica tem sido destaque no mundo e no Brasil. Segundo dados publicados no Boletim Anual de Geração Eólica (2019), o Brasil terá em 2024 aproximadamente 19 GW de capacidade eólica instalada em sua área continental. O Brasil atualmente ocupa a 8ª colocação entre os países com as maiores capacidades eólicas instaladas do mundo (GWEC, 2018), porém possui apenas parques eólicos na região terrestre e não há nenhum parque eólico em sua região marítima. Esta realidade não tem sido mesma ao redor do mundo, que já em 2010 alcançou incremento na capacidade eólica *offshore* superior a 1 gigawatt (GW), tendo passado de 3,3 GW em 2011 para 27,2 GW em 2019, alcançando crescimento anual superior a todas as outras fontes de eletricidade, salvo a energia solar fotovoltaica (IEA, 2019).

Esse cenário tende a mudar no Brasil, visito que a partir de 2016, o IBAMA começou a receber os primeiros pedidos de licenciamento ambiental para empreendimentos eólicos *offshore* no Brasil. Movido pelo interesse de empreendedores neste segmento, o IBAMA deu início ao desenvolvimento do termo de referência para empreendimentos dessa natureza, promovendo consultas públicas e a integração com a União Europeia na busca por referências, o que resultou na publicação, em 2020, do primeiro termo de referência para parques eólicos *offshore*. Atualmente, existem 23 projetos em fase de licenciamento ambiental do IBAMA, totalizando mais de 46GW de capacidade. Na região sudeste, mais especificamente os estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo, estão localizados 5 dos 23 projetos em fase de licenciamento ambiental no Brasil.

Na esteira do desenvolvimento de estudos relacionados ao potencial eólico *offshore* no Brasil, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), publicou em 2020 o primeiro estudo (*roadmap)* das eólicas *offshore* no Brasil.

Apesar do proeminente crescimento da indústria eólica *offshore* no mundo, que traz reflexos no interesse de empreendedores aos recursos eólicos disponíveis no Brasil, ainda é necessário

consolidar análises mais amplas no espectro das estimativas de potencial eólico disponível. A região sudeste se posiciona como um provável local para o desenvolvimento de projetos dessa natureza e demanda estudos do seu potencial eólico, associados a avaliações que contemplem as possíveis variações na geração de energia atreladas as recentes mudanças na circulação atmosférica global.

Dessa forma, este trabalho foi organizado em duas seções, onde os artigos científicos 1 e 2 foram apresentados. O primeiro artigo produzido visou estimar o potencial de geração de energia eólica *offshore* na região sudeste, com a utilização de uma base de dados de reanálise ERA5 com escala temporal de 40 anos e ferramentas de processamento. Esta estimativa, associada a produção de mapas que representem as localidades de maior interesse para geração de energia eólica tem como objetivo contribuir com a construção de bases de conhecimento sólidas no âmbito da energia eólica *offshore*. Os resultados indicaram um potencial de 904 GW, sendo que 92% deste potencial se encontra em regiões com profundidades superiores a 100 m, porém, o potencial nas regiões com profundidades abaixo dos 100 m foi de 73 GW, valor expressivo no âmbito da geração de energia no Brasil.

O segundo artigo, busca aprofundar a análise do potencial de energia eólica *offshore* na região sudeste do Brasil no âmbito de sua variação temporal associada as mudanças recentes na circulação atmosférica global. Foram utilizadas as saídas horárias da reanálise ERA5 de 1979 a 2020 e partir de ferramentas computacionais de alto nível (linguagem de programação Python e CDO e software de SIG) e mecanismos de análise estatística consolidados a análise foi desenvolvida. Foi observada uma redução na frequência dos ventos de baixa velocidade ($\leq 7{,}5\ m \cdot s^{-1}$) e um aumento da frequência na faixa de alta velocidade ($>7{,}5\ m \cdot s^{-1}$) que afetaram as estimativas do potencial eólico *offshore* na região de estudo, principalmente relacionado à intensificação e expansão da ASAS (alta subtropical do atlântico sul) nos últimos 40 anos. Exceto para o litoral de São Paulo e do sul do Rio de Janeiro, houve um aumento consistente na densidade de potência eólica ao longo das décadas.

ARTIGO CIENTÍFICO 1

ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA *OFFSHORE* NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL A PARTIR DE DADOS DE REANÁLISE ERA5

ESTIMATE OF OFFSHORE WIND ENERGY POTENTIAL IN THE SOUTHEAST REGION OF BRAZIL FROM ERA5 REANALYSIS DATA

Thiago Ribeiro Coriolano - IFFluminense/PPEA
Jader Lugon Junior - IFFluminense/PPEA
Marcos Antonio Cruz Moreira - IFFluminense/PPEA

RESUMO

O acréscimo da demanda global de energia vem crescendo associado a políticas e acordos energéticos que promovem o uso de fontes de energia renováveis com o objetivo de reduzir ou eliminar os impactos ambientais negativos inerentes aos métodos tradicionais de produção de energia. A energia eólica *offshore* se posiciona como uma área nova e promissora para o desenvolvimento de energia renovável no mundo. Existem, atualmente no Brasil, 9 projetos em fase de licenciamento ambiental, 3 destes localizados na região sudeste, desta forma, a estimativa e análise do potencial eólico nessa região se faz necessária no âmbito da contribuição científica às perspectivas de exploração do recurso eólico e desenvolvimento regional. A estimativa do potencial eólico *offshore* foi conduzida a partir de dados de reanálise ERA5, compreendidos no período de 1979-2019, publicados pelo ECMWF. O potencial eólico *offshore* para região sudeste do Brasil totalizou 904 GW até o limite da ZEE. Deste potencial, 92% está localizado em região com profundidades superiores a 100 m. Nas regiões com profundidades menores que 100 m, o potencial é de 73 GW, que representa mais do que 5 vezes a capacidade instalada da usina hidroelétrica de Itaipu, que com seus 14 GW, fornece 11,3% da energia consumida no Brasil.

Palavras chave: Potencial Eólico *Offshore*. Sudeste. Brasil. ERA5.

ABSTRACT

The increase in global energy demand has been growing associated with energy policies and agreements that promote the use of renewable energy sources in order to reduce or eliminate the negative environmental impacts inherent to traditional methods of energy production. Offshore wind energy is positioned as a new and promising area for the development of renewable energy in the world. There are currently 9 projects in the environmental licensing phase in Brazil, 3 of which are located in the southeastern region, thus, the estimation and analysis of the wind potential in that region is necessary within the scope of the scientific contribution to the prospects for the exploitation of the wind resource and development regional. The estimation of offshore wind potential was conducted using ERA5 reanalysis data, from 1979-2019, published by ECMWF. The offshore wind potential for southeastern Brazil totaled 904 GW up to the limit of the EEZ. Of this potential, 92% is located at depths greater than 100 m. At depths less than 100 m, the potential is 73 GW, which represents more than 5 times the installed capacity of the Itaipu hydroelectric plant, which with its 14 GW, provides 11.3% of the energy consumed in Brazil.

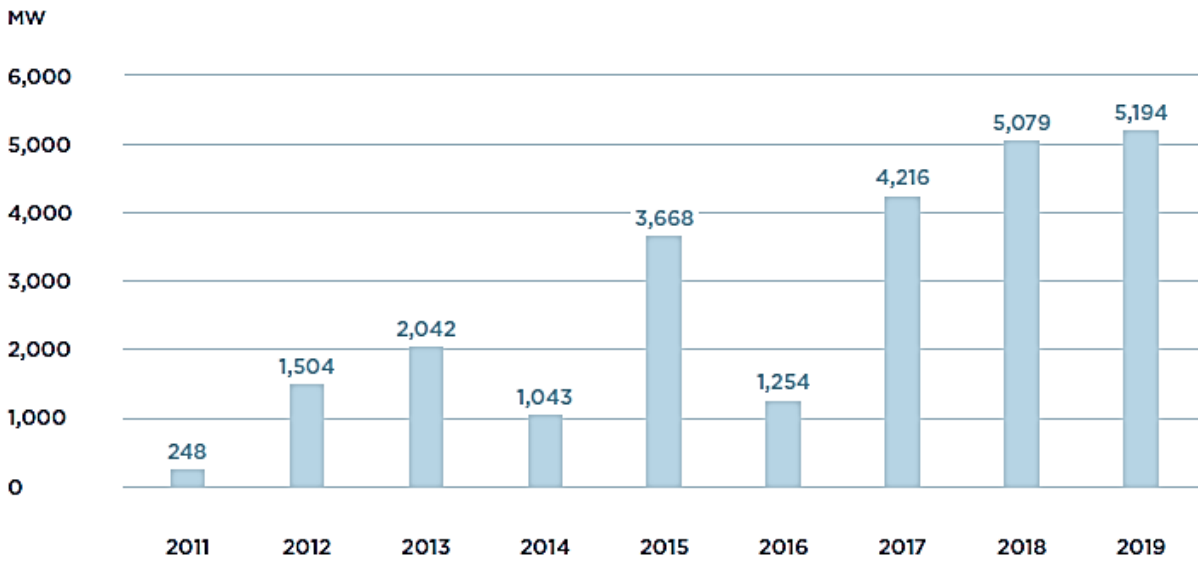
Keywords: *Offshore Wind Potential. Southeast. Brazil. ERA5.*

1. INTRODUÇÃO

A demanda global de energia vem crescendo em paralelo com o processo de industrialização e a globalização. Políticas e acordos energéticos internacionais e nacionais estão promovendo o uso de fontes de energia renováveis, com o objetivo de reduzir ou eliminar os impactos ambientais negativos inerentes aos métodos tradicionais de produção de energia (ERVINE, 2015; MICHAELIDES, 2012).

Neste contexto, uma área nova e promissora para o desenvolvimento de energia renovável é a energia eólica *offshore*. Em 2010, ocorreu um aumento mundial superior a 1 gigawatt (GW) na capacidade de geração de energia eólica *offshore* pela primeira vez. Já no ano de 2019, o maior valor em toda série histórica foi alcançado, com 5,2 GW de nova capacidade eólica no mundo, conforme apresenta a Figura 1. A capacidade eólica *offshore* instalada passou de 3,3 GW em 2011 para 27,2 GW em 2019, alcançando aproximadamente 30% de aumento anual, valor que supera todas as outras fontes de eletricidade, exceto a energia solar fotovoltaica. Ao redor do mundo, em 2019, 17 países já possuíam turbinas eólicas *offshore*, contabilizando mais de 5.500 turbinas *offshore* conectadas a rede elétrica (IEA, 2019).

Figura 1: Acréscimo anual na capacidade eólica offshore global (em MW) período de 2011 a 2019.

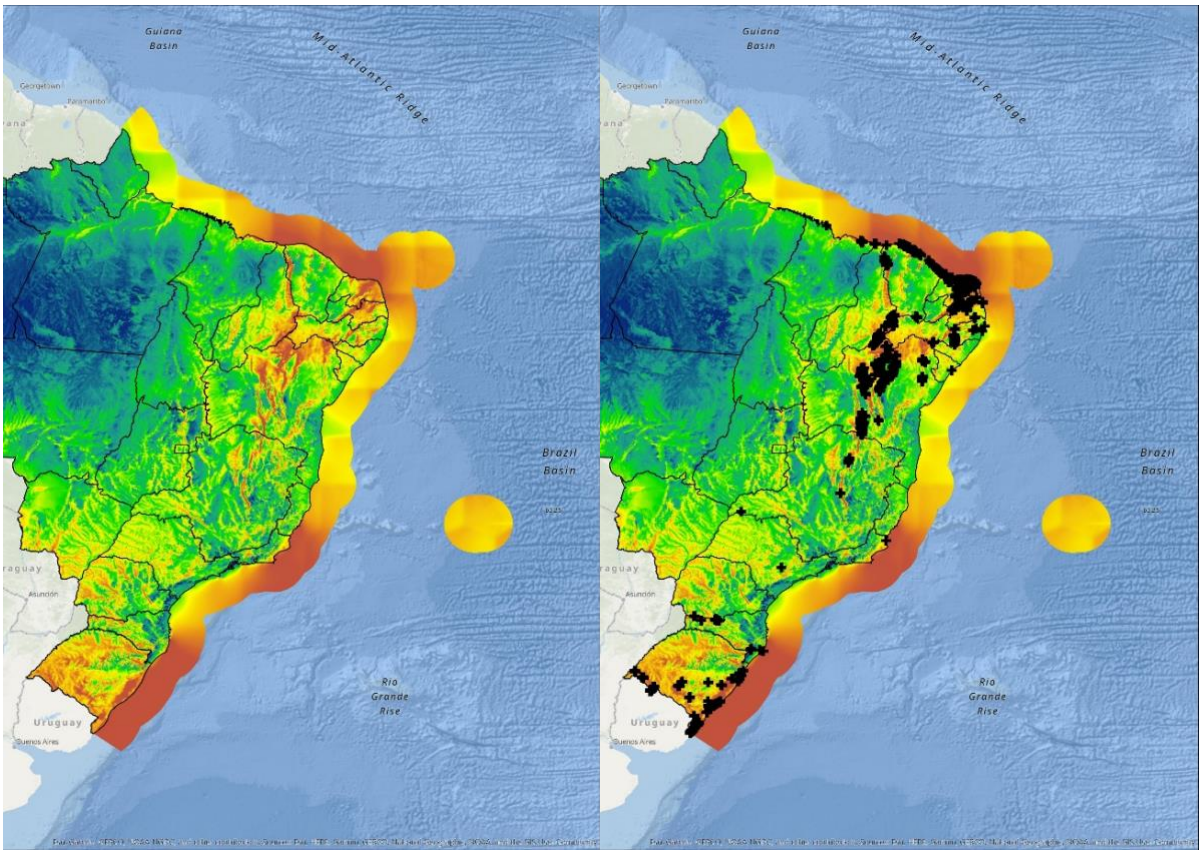


Fonte: WORLD FORUM OFFSHORE WIND (2020).

No Brasil, a energia eólica tem se consolidado na matriz elétrica brasileira, segundo dados do Balanço Energético Nacional de 2019, a energia eólica representava 7,6% de toda matriz brasileira (EPE, 2019).

O crescimento e protagonismo do Brasil são corroborados a partir dos dados publicados pelo GWEC (Global Wind Energy Council), que em 2018, identificou o Brasil como o país com a oitava maior capacidade eólica instalada do mundo. Contudo, essa capacidade eólica está apenas na região continental e não há nenhum parque eólico *offshore* construído ou em fase de construção (Figura 2).

Figura 2: Potencial Eólico do Brasil. Cruzes pretas: parques eólicos instalados.



Fonte dos dados: ANEEL; DTU; WORLD BANK GROUP; ESMAP (2020). Elaborado pelo Autor (2020).

A plena expansão do aproveitamento da energia eólica na região continental do Brasil, com a construção parques nas regiões com ventos mais intensos e favoráveis, conforme representam as cruzes pretas na Figura 2, introduzem perspectivas de exploração do potencial eólico *offshore*. O IBAMA abriu em 2019 consulta pública para formulação do termo de referência para os estudos de impacto ambiental dos empreendimentos eólicos *offshore*. Existem, atualmente, 9 projetos em fase de licenciamento ambiental, 3 destes localizados na região sudeste IBAMA (2020). Sob esta perspectiva, faz-se necessário entender as perspectivas de exploração do recurso eólico e as estimativas de potencial no âmbito regional da extensa costa brasileira.

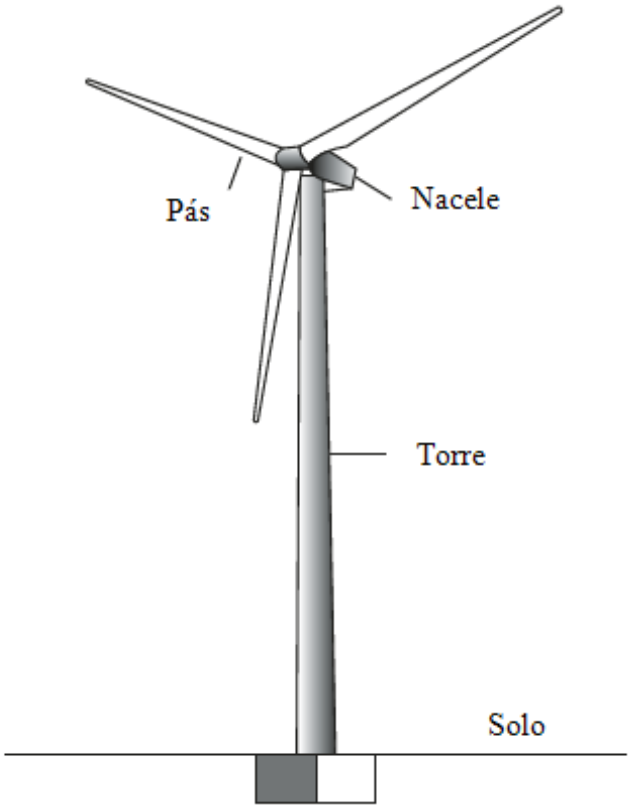
2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Recurso Eólico

O recurso eólico é proveniente do vento, que pode ser definido como o movimento do ar proporcionado pelas diferenças de pressão na atmosfera. A força que promove o movimento das massas de ar de uma região de alta pressão para uma região de baixa pressão é originada por este gradiente de pressão, enquanto a direção do movimento é influenciada pela rotação da Terra (WALLACE; HOBBS, 2006).

O aproveitamento do recurso eólico possui como premissa a mesma referência das demais fontes de energia a partir do movimento rotativo, que é a utilização de um mecanismo rotativo associado a um gerador. No caso da energia eólica, o modelo de aerogerador mais consolidado é o de 3 pás com rotor na horizontal conforme apresenta a Figura 3 (BREEZE, 2019).

Figura 3: Modelo de aerogerador com 3 pás e rotor na horizontal.

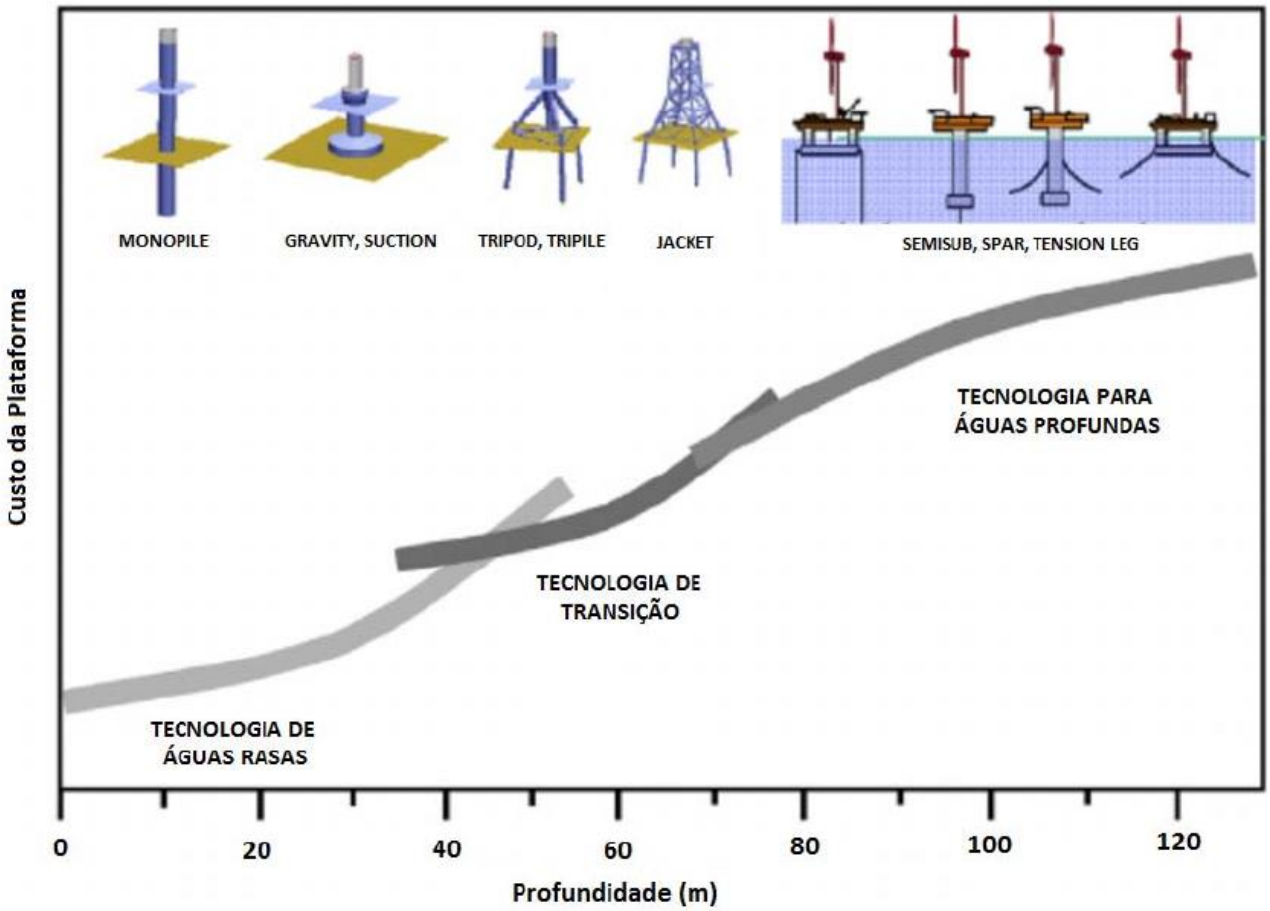


Fonte: (BREEZE, 2019)

No ambiente *offshore*, a principal mudança ocorre na interface da torre com o solo, que varia de acordo com a profundidade de instalação do aerogerador. Conforme a Figura 4, o custo desta

estrutura *offshore* está diretamente relacionado com a profundidade de construção do parque eólico, o que introduz importância particular as cotas batimétricas da região onde se pretende instalar aerogeradores *offshore* (EPE, 2020).

Figura 4: Custo relativo da estrutura offshore de acordo com a tecnologia.



Fonte: (EPE, 2020)

2.2. Energia Eólica e o Desenvolvimento Sustentável

A energia eólica é definida como uma energia renovável, pois é proveniente de ciclos naturais de conversão da radiação solar, fonte primária de quase toda energia disponível na Terra e, por isso, são praticamente inesgotáveis e não alteram o balanço térmico do planeta (PACHECO, 2006).

No contexto global, existem inúmeros obstáculos na busca do desenvolvimento sustentável, que se materializam na desigualdade social proeminente que afeta bilhões de pessoas que vivem em situação de extrema pobreza, além disso, o mundo se deparada com a fadiga dos recursos naturais e os reflexos da degradação ambiental, que se estabelecem nas mudanças climáticas (ONU, 2015).

A Organização das Nações Unidas, em conjunto com diversos países, realizou uma proposta com 17 objetivos no intuito de reverter o cenário acima descrito. Dos 17 objetivos, é possível verificar

plena relação entre o objetivo de número 7 e o desenvolvimento da energia eólica, objeto deste trabalho. O objetivo de número 7 tem como propósito estabelecer metas para garantia do acesso à energia limpa e renovável a todos. Dentre as metas deste objetivo é possível destacar as 2 a seguir:

> 7.2 Até 2030, aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global.
>
> 7.a Até 2030, reforçar a cooperação internacional para facilitar o acesso a pesquisa e tecnologias de energia limpa, incluindo energias renováveis, eficiência energética e tecnologias de combustíveis fósseis avançadas e mais limpas, e promover o investimento em infraestrutura de energia e em tecnologias de energia limpa (ONU, 2015).

2.3. Estimativa do Potencial

Para a estimativa do potencial de geração de energia eólica é necessário determinar duas variáveis que irão pautar o cálculo. A primeira dessas variáveis é a velocidade do vento média mínima (*cutoff*), que é definida como a menor velocidade do vento em que a geração eólica *offshore* é viável e se baseia na limitação dos aerogeradores comerciais. Não há pleno consenso na determinação deste valor e há variações entre 6,0 e 8,0 m/s (SILVA, 2019). O valor estabelecido na condução deste trabalho foi de 7,0 m/s e está em linha com as recomendações do NREL (*National Renewable Energy Laboratory)* conforme descreve Beiter e Musial (2016).

O valor da densidade de potência, também denominado taxa de ocupação do parque, é representada em MW/km² e é obtida considerando uma distribuição espacial regular de turbinas com a mesma especificação técnica. Contudo, é preciso esclarecer que o valor da densidade de potência representa uma aproximação, visto que possui dependência direta com a turbina escolhida e a distribuição das turbinas na área de interesse (SILVA, 2019).

Os valores de densidade de potência também divergem em diferentes publicações científicas. O NREL, através de Beiter e Musial (2016), consideravam a densidade de potência em 5,0 MW/km², porém o valor foi revisado por eles para 3,0 MW/km² em concordância com a evolução tecnológica dos aerogeradores que tem apresentado maiores pás e consequentemente necessitam de maior espaçamento entre eles. Neste trabalho, o valor considerado foi de 3,0 MW/km².

O potencial de geração de energia eólica é obtido a partir da aplicação do critério de velocidade média mínima do vento que resulta na área útil, ou seja, a região onde a velocidade possui valores superiores ao critério. Considera-se então uma taxa de ocupação para esta área, definida como densidade de potência e, portanto, obtém-se o potencial de geração de energia eólica para região.

Outros critérios podem ser aplicados, como a definição de cotas batimétricas de interesse, que possuem relevância para viabilidade técnica dos projetos (BEITER; MUSIAL, 2016; SILVA, 2019; EPE, 2020).

2.4. Potencial Eólico *Offshore* no Mundo

Acerca dos estudos para determinação do potencial eólico *offshore* no mundo, diversos estudos foram realizados, sob o aspecto regional e nacional, com o objetivo de consolidar a capacidade de geração de energia eólica e alguns destes, consideraram outros critérios como faixas batimétricas de interesse.

Para a Europa, estudos foram conduzidos pela Agência de Meio Ambiente Europeia (EEA) e pela WindEurope, com abordagem do potencial eólico *offshore* acompanhada de multicritérios para sua correta delimitação e mensuração (EEA, 2009; HUNDLEBY; FREEMAN, 2017).

Já nos Estados Unidos, o Laboratório Nacional de Energias Renováveis americano (NREL), publicou um estudo abrangendo o potencial de geração de energia eólica para região *offshore* (MUSIAL *et al.*, 2016). O estudo de Dhanju; Whitaker; Kempton (2008) avaliou o cenário do potencial eólico *offshore* para o estado americano de Delaware, utilizando critérios de profundidade e ordenamento do espaço marítimo. Ainda nos Estados Unidos, Dvorak; Archer; Jacobson (2010) e Magar; Gross; González-García (2018) realizaram estudos sobre essa temática para a região da Califórnia.

Para o Reino Unido, pesquisadores em 2016 promoveram um estudo do potencial considerando critérios de limitação econômica (CAVAZZI; DUTTON, 2016). Já para China, considerando toda sua ZEE, em 2011, um estudo tendo como base critérios de limitação técnica, espacial e econômica foi realizado (HONG; MÖLLER, 2011).

Além destes, outros estudos também foram produzidos para diferentes países, como: Coréia do Sul (KIM, Choong-Ki; JANG; KIM, 2018; KIM, Taeyun; PARK; MAENG, 2016), Egito (MAHDY; BAHAJ, 2018), Ilhas Canárias (SCHALLENBERG-RODRÍGUEZ; GARCÍA MONTESDEOCA, 2018), Índia (NAGABABU; KACHHWAHA; SAVSANI, 2017), Países Bálticos (CHAOUACHI; COVRIG; ARDELEAN, 2017), Chile (MATTAR; GUZMÁN-IBARRA, 2017), Japão (YAMAGUCHI; ISHIHARA, 2014) e Tailândia (WAEWSAK; LANDRY; GAGNON, 2015).

2.5. Potencial Eólico *Offshore* na ZEE do Brasil

O potencial eólico *offshore* no Brasil foi objeto de diversos estudos e publicações. Este capítulo tem como objetivo sumarizar os principais trabalhos publicados nesta temática recentemente.

Os estudos mais recentes a certa deste tema são de Coriolano (2020), EPE (2020) e Silva (2019), além do trabalho pioneiro mais relevante de Ortiz e Kampel (2011). Os trabalhos guardam importantes diferenças metodológicas, como base de dados, período e critérios de cálculo.

A partir de observações feitas pelo radar de microondas a bordo do satélite QuikSCAT, Ortiz e Kampel (2011) estimaram 1.789 GW de potencial eólico para a ZEE. Para estimar o potencial, os autores consideram a intensidade do vento a 80 m de altura e turbinas geradoras AREVA Wind M5000, espaçadas em cerca de 600 m no eixo meridional e em cerca 1.200 m no eixo zonal.

Segundo Silva (2019), a ZEE brasileira tem um potencial eólico teórico de 10.800 GW. O modelo atmosférico utilizado para fazer as estimativas cobria apenas 15,6% da área da ZEE. Desta forma, os valores foram calculados para esta área e os resultados foram extrapolados para compreender toda a ZEE.

Tabela 1: Comparação do potencial teórico offshore no Brasil.

Fonte	Base de dados	Período	Resolução Espacial [km]	Potencial Teórico [GW]
Coriolano (2020)	ERA5 (ECMWF)	1979-2019	30	6.243
Silva (2019)	BRAMS (CEPEL)	2013	5	10.800
EPE (2020)	ERA5 (ECMWF)	2000-2017	30	6.767
Ortiz e Kampel (2011)	QuikSCAT	1999-2009	25	1.789

Fonte: Autor

Os resultados publicados pela EPE (2020) apresentam um potencial eólico teórico de 6.767 GW. A EPE utilizou dados compreendidos no período de 2000 até 2017 e, além disso, estabeleceu a densidade de potência em 3,75 MW/km² para as regiões Norte e Nordeste e em 2,6 MW/km² para as regiões Sudeste e Sul.

O trabalho publicado por Coriolano (2020) apresentou um resultado de potencial eólico de 6.243 GW. A base de dados utilizada foi a mesma da EPE, contudo o período foi maior (1979-2019), além de considerar 3,00 MW/km² para toda a costa.

A utilização de diferentes bases de dados e a aplicação de diversas metodologias limitam a análise comparativa destes resultados e ainda evidenciam a complexidade de se realizar estimativas desta natureza.

2.6. Potencial Eólico *Offshore* Regional no Brasil

No que tange a estimativa do potencial eólico *offshore* e a análise das alternativas viáveis a instalação de parques eólicos marítimos a nível regional no Brasil, diversos trabalhos foram publicados. A Tabela 2 apresenta os principais trabalhos publicados e especifica a região analisada.

Tabela 2: Estudos e avaliações regionais de potencial eólico offshore no Brasil.

Fonte	**Região**
Pimenta *et al*. (2008)	Região Sul
CHRISTÓFARO (2010)	Paraná
CAMARGO SCHUBERT ENGENHEIROS ASSOCIADOS (2013)	Bahia
CAMARGO SCHUBERT ENGENHEIROS ASSOCIADOS (2014)	Rio Grande do Sul
LIMA (2015)	Ceará
SANTOS (2015)	Norte do Espírito Santo
GOMES (2018)	Região Sudeste
CHRISLAINE DO BOMFIM MARINHO *et al.* (2019)	Bahia
TUCHTENHAGEN (2019)	Região Sul
FERREIRA (2019)	Região Nordeste e Sul
EPE (2020)	Região Norte, Nordeste, Sudeste e Sul

Fonte: Autor

2.7. Projetos de Parques Eólicos *Offshore* no Brasil

No contexto dos parques eólicos *offshore* no Brasil, existem nove projetos em fase de licenciamento ambiental que são apresentados na Tabela 3. Contudo, não há nenhum aerogerador instalado ou em fase de instalação na costa brasileira.

A região sudeste, mais especificamente os estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo, possuem 3 dos 9 projetos em fase de licenciamento ambiental, todos se localizam nas proximidades da costa do município de São Francisco de Itabapoana e o Porto do Açu.

Tabela 3: Parques eólicos em fase de licenciamento ambiental no Brasil.

Nome	**Potência Total**	**UF**	**Início do licenciamento ambiental**	**Tipo de estudo**
Parque Eólico *Offshore* Caucaia Parazinho - Iparana	310 MW	Ceará	2016	EIA/RIMA
Complexo Eólico Marítimo Asa Branca I	400 MW	Ceará	2017	EIA/RIMA
Planta Piloto de Geração Eólica *Offshore*	5 MW	Rio Grande do Norte	2018	RAS
Complexo Eólico Marítimo	3 GW	Ceará	2019	EIA/RIMA

Nome	Potência Total	UF	Início do licenciamento ambiental	Tipo de estudo
Jangada				
Complexo Eólico Maravilha	3 GW	Rio de Janeiro	2019	EIA/RIMA
Complexo Eólico Marítimo Águas Claras	3 GW	Rio Grande do Sul	2019	EIA/RIMA
Parque Eólico *Offshore* Camocim	1,2 GW	Ceará	2020	EIA/RIMA
Aracatu I	2 GW	Rio de Janeiro / Espírito Santo	2020	EIA/RIMA
Aracatu II	2 GW	Rio de Janeiro / Espírito Santo	2020	EIA/RIMA

Fonte: adaptado de EPE ; IBAMA (2020)

2.8. Impactos Ambientais dos Projetos de Parques Eólicos *Offshore*

Em contraste com os combustíveis fósseis e a energia nuclear, as turbinas eólicas não poluem nossa atmosfera com gases de efeito estufa, nem causam problemas para as gerações futuras com resíduos radioativos. Assim, a energia eólica é considerada ambientalmente benigna, porém os efeitos potenciais de longo prazo, embora menores, não podem ser ignorados. No entanto, os impactos das turbinas eólicas em nosso meio ambiente não foram bem estabelecidos e permanecem em debate (BAILEY; BROOKES; THOMPSON, 2014).

As principais preocupações ambientais relacionadas aos desenvolvimentos eólicos *offshore* são o aumento dos níveis de ruído, impactos visuais, risco de colisões, prejuízos a fauna e flora, alterações nas redes alimentares e poluição causada pelo aumento do tráfego de embarcações ou liberação de contaminantes nos sedimentos do fundo do mar. Contudo, o impacto inerente das turbinas eólicas em seu ambiente é sempre limitado às imediações. O ruído causado pela operação de turbinas eólicas em terra, e seu impacto visual, podem ser um grande incômodo na vida das pessoas. As turbinas eólicas causam ruído de duas maneiras principais: ruído mecânico e ruído aerodinâmico. Quanto ao impacto visual, as avaliações possuem caráter mais subjetivo e normalmente se aplicam métodos como o de análise multicritério. Estudos relevantes mostraram que mais de 70% das pessoas no Reino Unido não têm uma opinião negativa sobre o impacto visual das turbinas eólicas, porém ao avaliar a opinião de funcionários do turismo, foi possível identificar que a maioria identifica aspectos negativos em relação ao impacto visual e prejuízo das turbinas eólicas ao turismo local (LEUNG; YANG, 2012; SILVA, 2019).

Em relação as aves, publicações científicas mostram que as aves locais podem aprender rapidamente a evitar obstáculos e, portanto, as turbinas eólicas não seriam um problema sério para

elas, porém estudos dessa natureza ainda são escassos. Desta forma, algumas medidas têm sido implementadas para proteger as aves das turbinas eólicas, como por exemplo, um projeto eólico no Texas - EUA, radares aviários foram instalados e configurados para detectar pássaros na área e parar as turbinas eólicas se houver um perigo potencial de colisão para os pássaros. Para a vida marinha, estudos apontam que alguns mamíferos marinhos sensíveis podem perceber ruídos no processo de perfuração das estacas a uma distância considerável durante a construção e operação de turbinas eólicas. No entanto, as informações nesta área ainda são raras, e mais estudos precisam ser feitos em decorrência do aumento de projetos eólicos *offshore* (LEUNG; YANG, 2012).

No Brasil, inciativas regulatórias tem sido conduzidas pela Diretoria de Licenciamento Ambiental do IBAMA, que desde 2019 propõe uma agenda para capacitação técnica e definição de normas e procedimentos para o licenciamento ambiental de Complexos Eólicos *Offshore* (CEOs) (IBAMA, 2019a). Como resultado desta agenda, o IBAMA publicou, em 2019, uma nota técnica Nº 2/2019/NLA-RS/DITEC-RS/SUPES-RS que descreve a experiência o compartilhamento de experiências entre Brasil e Europa no que tange o planejamento e avaliação de impacto ambiental de projetos eólicos *offshore*.

Em janeiro de 2020, o IBAMA abriu consulta pública para consolidação do Termo de Referência para Complexos Eólicos *Offshore*, com prazo de participação até abril do mesmo ano (IBAMA, 2019b). O escopo deste Termo de Referência inclui as unidades geradoras de energia eólica; a rede conectora submarina; a subestação marítima; a rede de transmissão de energia, incluindo seu trecho submarino e seu trecho terrestre subterrâneo, assim como o segmento aéreo até a conexão com o Sistema Interligado Nacional (SIN); a subestação terrestre e as áreas de apoio exclusivas para a obra.

3. METODOLOGIA

A base metodológica deste trabalho se estabeleceu com a realização de uma revisão bibliográfica através de palavras chaves do tema de interesse, utilizando o portal Periódicos da Capes e demais base de dados associadas como Scielo e Scopus. O objetivo desta revisão foi a obtenção das publicações relevantes associadas ao potencial eólico *offshore* e definição da região de interesse..

A partir desta revisão, a estratégia para estimativa do potencial eólico *offshore* na região de interesse foi definida, compreendendo a obtenção dos dados de reanálise e batimetria e a utilização de ferramentas computacionais como linguagem de programação e *softwares* livres. A obtenção dos dados foi conduzida através das plataformas digitais das instituições mantenedoras. A representação dos resultados foi obtida com o auxílio de *software* de sistemas de informações geográficas (SIG).

3.1. Base de Dados

A base de dados utilizada para obtenção dos dados de vento que subsidiam a estimativa do potencial eólico foi o ERA5, que tem como provedor o ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*). Os dados obtidos são relativos ao período de 1979 até 2019 (40 anos).

Os dados do ERA5 possuem saídas horárias de diversas variáveis atmosféricas e terrestres, além de médias mensais de variáveis oceânicas. O ERA5 inclui informações sobre incertezas para todas as variáveis, com resoluções espaciais e temporais reduzidas. Para estimativa de potencial eólico, foram utilizados os dados de vento zonal e meridional para a altura de 100 m disponibilizados pelo ERA5 (HENNERMANN, 2019).

Os dados de batimetria foram obtidos da base pública da CPRM (Serviço Geológico do Brasil) que é proveniente de um Acordo de Cooperação Técnica entre a CPRM e a ANP. Este acordo tem como objetivo propiciar a comunidade científica uma batimetria de parte do Atlântico Sul que abrange a ZEE do Brasil (CPRM, 2013).

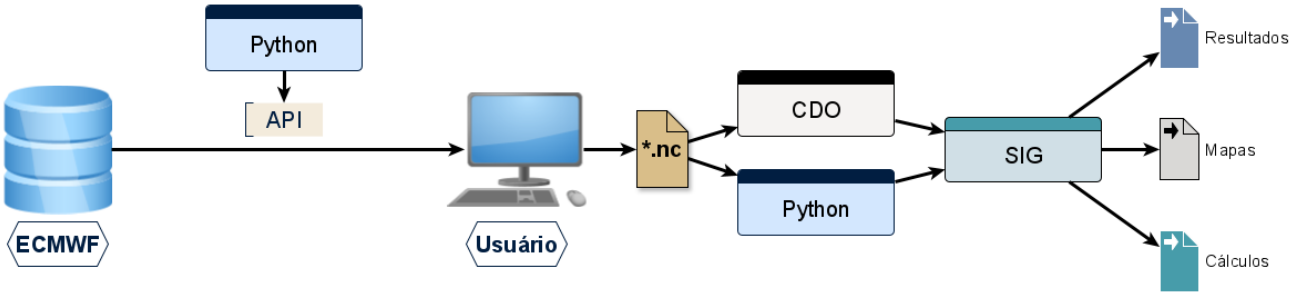
3.2. Ferramentas Computacionais

Para obtenção dos dados do ECMWF de forma automatizada, a linguagem de programação *python* foi utilizada e um *script* foi desenvolvido para acessar a API (*Application Programming Interface*) disponibilizada pelo próprio ECMWF. O processamento e manuseio dos dados de reanálise, em formato netCDF, utilizados neste trabalho foram conduzidos a partir de um conjunto de linhas de

comando designado CDO (*Climate Data Operators*) que é mantido pelo MPIMET (*Max-Planck-Institute für Meteorologie*).

Conforme apresentado pela Figura 5, a linguagem de programação *python* foi utilizada para auxiliar no download automatizado dos dados e também como ferramenta para realizar cálculos e agregação dos arquivos com o objetivo de tornar o seu manuseio mais ordenado e simples.

Figura 5: Ferramentas computacionais utilizadas.



Fonte: Autor

Complementarmente, o geoprocessamento e integração dos dados foram conduzidos a partir de softwares livres de sistemas de informações geográficas (SIG).

3.3. Região de Interesse

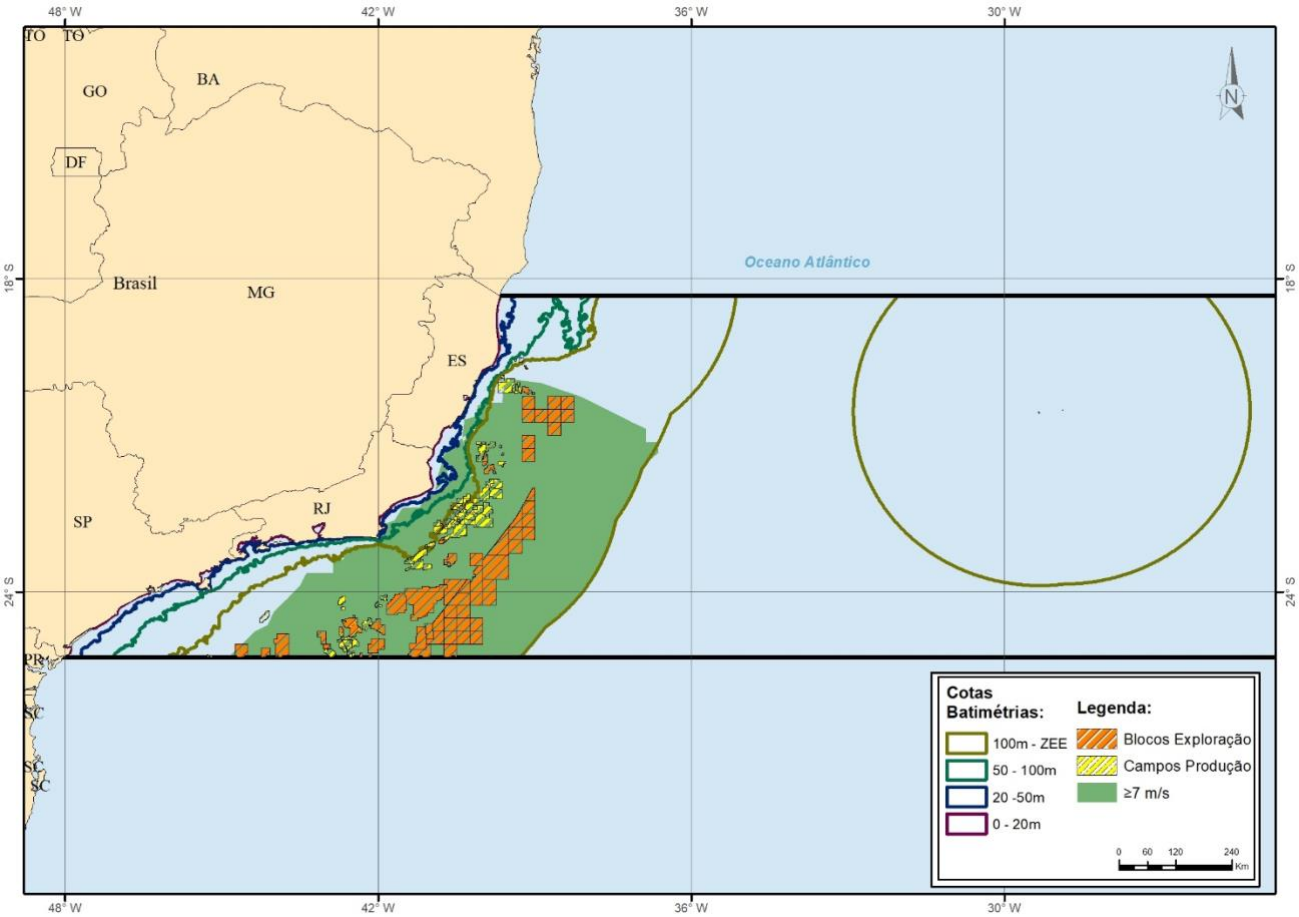
O projeto tem como região de interesse a costa sudeste do Brasil, compreendendo os estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo. A região marítima será limitada pela Zona Econômica Exclusiva (ZEE) que é limitada em 200 milhas marítimas a partir da linha de costa. Nesta região, a Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM), estabelecida no Decreto Nº 99.165, concede ao Brasil soberania para exploração e aproveitamento, conservação e gestão dos recursos naturais (BRASIL, 1990).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos dados de reanálise do ERA5 para o período de 1979-2019, foi realizada a estimativa do potencial eólico *offshore* para região sudeste. A velocidade média do vento mínima considerada foi de 7,0 m/s. Conforme apresenta a Figura 6, para essa velocidade do vento, as regiões ao sul do Estado do Rio de Janeiro e ao longo da costa do estado de São Paulo não possuem condições de vento nessa velocidade em cotas batimétricas abaixo de 100m. A região norte da costa do Espírito Santo não apresenta ventos com velocidade média superior a 7,0 m/s.

A partir da costa do Município de Cabo Frio (Rio de Janeiro) até aproximadamente o Município de Linhares (Espírito Santo) é possível observar que a velocidade do vento é igual ou superior a 7,0 m/s em regiões mais próximas a costa e com cotas batimétricas mais rasas, o que sugere esse trecho como o mais atraente em primeiro momento sob a perspectiva de menor complexidade e custo dos projetos devido a profundidade.

Figura 6: Potencial eólico offshore na região sudeste do Brasil, blocos de exploração e campos de produção de petróleo.

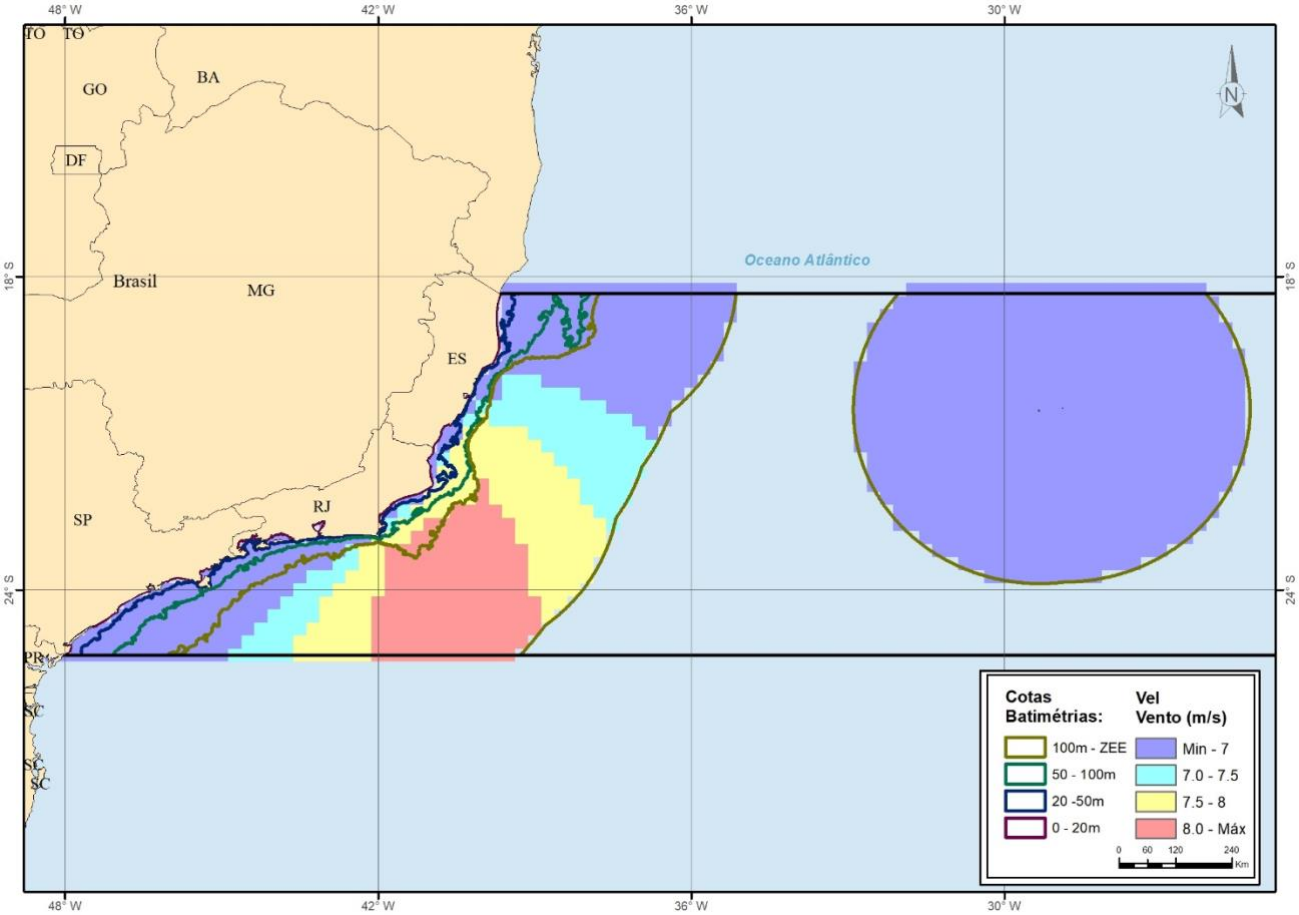


Fonte: Autor

A Figura 6 ainda apresenta os polígonos de interesse para exploração de Óleo e Gás *offshore*, que possuem relevância no contexto econômico e social local. É possível observar que há uma coincidência entre a região representada em verde (velocidade do vento ≥ 7,0 m/s) e os Blocos de Exploração e os Campos de Produção de petróleo.

Com o propósito de avaliar a região onde o vento foi superior a 7,0 m/s, uma subdivisão foi realizada considerando intervalos de 0,5 m/s entre 7,0 m/s e 8,0 m/s. Na Figura 7, é possível notar que as regiões de ventos mais intensos, com velocidade superior a 8,0 m/s, representadas pela cor vermelha, se encontram mais afastadas e se encontram a nordeste do Estado do Rio de Janeiro e em sentido sul. Ventos com intensidades entre 7,0 m/s e 8,0 m/s se estendem, em relação a região de ventos mais intensos, nos sentidos nordeste, sudeste e ligeiramente para noroeste, se aproximando da costa nordeste do Estado do Rio de Janeiro e a região marítima sudeste do Estado do Espírito Santo.

Figura 7: Velocidade média do vento offshore na região sudeste do Brasil.

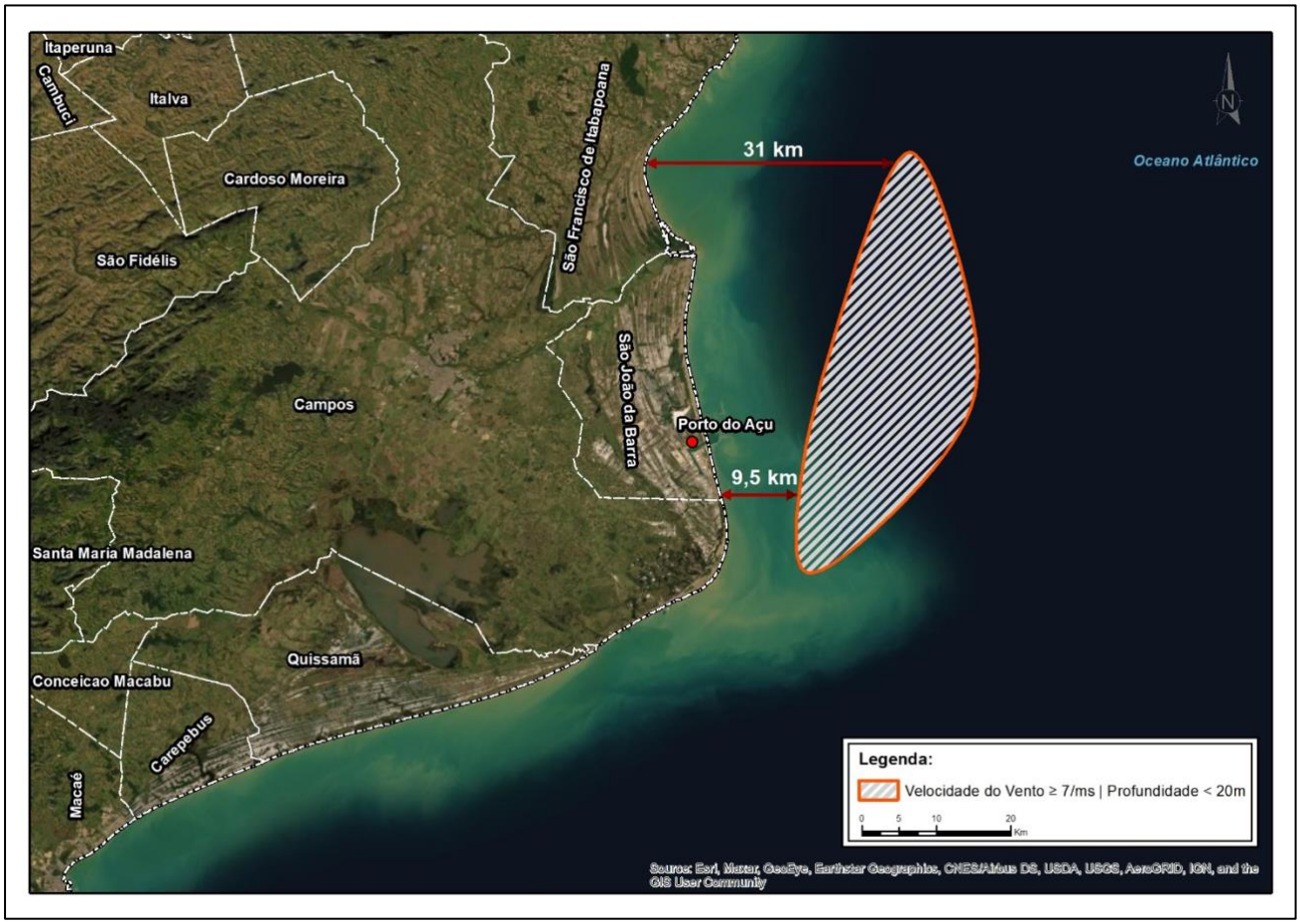


Fonte: Autor

Tendo como base a área da região onde a velocidade do vento foi superior a 7,0 m/s e considerando uma densidade de potência de 3,0 MW/km², o potencial eólico para região sudeste foi obtido, totalizando 904 GW para toda costa até o limite da ZEE.

Conforme apresenta a Tabela 4, o potencial também foi calculado para 4 cotas batimétricas distintas. Pode-se observar uma relação do aumento do potencial nas faixas mais profundas, enquanto as faixas mais rasas apresentaram menor potencial, sendo a faixa de 0 até 20m de profundidade a região com menor potencial, 3 GW. Todo esse potencial do Estado do Rio de Janeira na cota batimétrica até 20 m está localizado em uma única região no extremo nordeste do estado do Rio de Janeiro, próximo à divisa com o Espírito Santo, ocupando uma área de aproximadamente 1000 km². A Figura 8 apresenta esta região, que fica em sua fronteira mais distante a aproximadamente 31 km do Município de São Francisco de Itabapoana e a em seu contorno mais próximo à costa, está a 9,5 km do Município de São João da Barra, que possuí uma importante infraestrutura portuária do Estado do Rio de Janeiro, o Porto do Açu.

Figura 8: Região com velocidade do vento superior a 7 m/s e cota batimetria menor que 20m na região offshore sudeste do Brasil.



Fonte: Autor

A partir da Tabela 4 é possível verificar que o potencial eólico na Região Sudeste está com sua maior parte, em torno de 92%, localizada em região com profundidades superiores a 100 m, região onde os desafios tecnológicos e o custo de desenvolvimento de empreendimentos eólicos são maiores.

Contudo, os 8% de potencial que se localizam nas cotas batimétricas inferiores a 100 m possuem grande relevância e introduzem oportunidade de desenvolvimento e aproveitamento do recurso eólico. Nas regiões com profundidades menores que 100 m, o potencial é de 73 GW, que representa mais do que 5 vezes a capacidade instalada da usina hidroelétrica de Itaipu, que com seus 14 GW, fornece 11,3% da energia consumida no Brasil.

Tabela 4: Comparação do potencial teórico offshore no Brasil.

Cota Batimétrica	**Potencial [GW]**	
	Autor	**EPE (2020)**
0 - 20 m	3	10
20 - 50 m	27	37
50 - 100 m	43	36
100 - limite ZEE	831	1035

Fonte: Autor

De forma complementar, a Tabela 4 apresenta os resultados publicados pela EPE (2020) que utilizaram a base de dados ERA5, porém com um período menor, apenas entre 2000 e 2017. Além disso, a densidade de potência considerada foi de 2,6 MW/km². A comparação dos resultados sugere um resultado mais otimista para a base de dados com menor período e mais recente, 17 anos ao invés de 40 anos e entre 2000 e 2017 contra 1979 até 2019.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho resultou na estimativa do potencial eólico *offshore,* dentro do Zona Econômica Exclusiva brasileira, para região sudeste do Brasil, que compreende os estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo. O potencial eólico da região foi significativo, alcançando a marca de 904 GW, o que sugere a indústria eólica como mais uma competência energética para região, que já conta com a consolidada indústria petrolífera *offshore*.

Na perspectiva deste potencial em relação as cotas batimétricas da região, foi possível observar que a maior parte (92%) se encontra em regiões com profundidades superiores a 100 m, contudo a exploração deste recurso a longo prazo é perfeitamente viável com o desenvolvimento de novas tecnologias, dentre elas, fundações flutuantes. Associadas as novas tecnologias, também se consolidará a redução de custos dos projetos em regiões mais profundas.

O potencial nas regiões com profundidades abaixo dos 100 m foi de 73 GW e indica um importante recurso regional disponível para produção de energia eólica. Este recurso tem primordial relevância na inicialização da indústria eólica *offshore*, visto que a menor profundidade irá propiciar menor custo e maior atratividade de investimentos.

Já na cota batimétrica até 20 m, uma única região foi identificada com potencial eólico de 3 GW no extremo nordeste do estado do Rio de Janeiro, próximo à divisa com o Espírito Santo, ocupando uma área de aproximadamente 1000 km². A região fica em sua fronteira mais distante a aproximadamente 31 km do Município de São Francisco de Itabapoana e a em seu contorno mais próximo à costa, está a 9,5 km do Município de São João da Barra, que possuí uma importante infraestrutura portuária do Estado do Rio de Janeiro, o Porto do Açu.

Finalmente, a utilização de dados de reanálise atmosférica se mostrou um importante recurso para estimativas desta natureza. A comparação dos resultados de diferentes trabalhos demonstra que o método e a base de dados utilizados podem resultar em diferenças numéricas na estimativa do potencial eólico.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAILEY, Helen; BROOKES, Kate L.; THOMPSON, Paul M. Assessing environmental impacts of *offshore* wind farms: lessons learned and recommendations for the future. **Aquatic Biosystems**, v. 10, n. 1, p. 8, 14 set. 2014. https://doi.org/10.1186/2046-9063-10-8.

BEITER, Philipp; MUSIAL, Walt. **Terminology Guideline for Classifying *Offshore* Wind Energy Resources**, n. NREL/TP-6A20-65431. Denver West Parkway: Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2016.

BOLETIM ANUAL DE GERAÇÃO EÓLICA. . Boletim. Brasil: ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica, 2019. Disponível em: http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/05/Boletim-Anual_2018.pdf. Acesso em: 20 nov. 2019.

BRASIL. Convenção das Nações Unidas sobre o direto do mar. **99.165**, 1990.

BREEZE, Paul. Chapter 11 - Wind Power. *In*: BREEZE, Paul (org.). **Power Generation Technologies (Third Edition)**. [*S. l.*]: Newnes, 2019. p. 251–273. DOI 10.1016/B978-0-08-102631-1.00011-0. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081026311000110. Acesso em: 17 nov. 2019.

CAMARGO SCHUBERT ENGENHEIROS ASSOCIADOS. **Atlas Eólico: Bahia**. [*S. l.*: *s. n.*], 2013.

CAMARGO SCHUBERT ENGENHEIROS ASSOCIADOS. **Atlas Eólico: Rio Grande do Sul**. [*S. l.*: *s. n.*], 2014.

CAVAZZI, S.; DUTTON, A. G. An *Offshore* Wind Energy Geographic Information System (OWE-GIS) for assessment of the UK's *offshore* wind energy potential. **Renewable Energy**, v. 87, p. 212–228, 1 mar. 2016. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.021.

CHAOUACHI, Aymen; COVRIG, Catalin Felix; ARDELEAN, Mircea. Multi-criteria selection of *offshore* wind farms: Case study for the Baltic States. **Energy Policy**, v. 103, p. 179–192, 1 abr. 2017. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.01.018.

CHRISLAINE DO BOMFIM MARINHO; GEORGYNIO YOSSIMAR ROSALES AYLAS; ERICK GIOVANI SPERANDIO NASCIMENTO; DAVIDSON MARTINS MOREIRA. Estudo do Potencial Eólico *Offshore* no Estado da Bahia utilizando Modelagem Computacional. , p. 3, 2019. .

CHRISTÓFARO, Bruno Ramos. **Estudo do Potencial Eólico *Offshore* para a geração de energia elétrica no Litoral do Paraná**. 2010. 99 f. Monografia – UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, PONTAL DO PARANÁ, 2010.

CORIOLANO, Thiago Ribeiro. **Estudo do Potencial de Geração de Energia Eólica *Offshore* no Brasil**. 2020. 52 f. Monografia (Pós-Graduação) – UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO, Macaé, 2020.

CPRM. Projeto Batimetria. 2013. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/publique/Geologia/Geologia-Marinha/Projeto-Batimetria-3224.html.

DHANJU, Amardeep; WHITAKER, Phillip; KEMPTON, Willett. Assessing *offshore* wind resources: An accessible methodology. **Renewable Energy**, v. 33, n. 1, p. 55–64, 1 jan. 2008. https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.03.006.

DTU; WORLD BANK GROUP; ESMAP. Global Wind Atlas 3.0. 2020. Disponível em: https://globalwindatlas.info.

DVORAK, Michael; ARCHER, Cristina; JACOBSON, Mark. California *offshore* wind energy potential. **Renewable Energy**, v. 35, p. 1244–1254, 1 jun. 2010. https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.022.

EEA. **Europe's onshore and *offshore* wind energy potential : An assessment of environmental and economic constraints**, n. ISBN 978-92-9213-000-8. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities: European Environment Agency, 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/40909366_Europe's_onshore_and_*offshore*_wind_energy_potential_An_assessment_of_environmental_and_economic_constraints. Acesso em: 8 set. 2020.

EPE. Balanço Energético Nacional 2019. 2019. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf.

EPE. **Roadmap Eólica *Offshore* Brasil**, n. No NT-EPE-PR-001/2020-r1. Rio de Janeiro - Brasil: EPE, 2020.

ERVINE, Cowan. Directive 2004/39/Ec of the European Parliament and of the Council of 21 April 2004. *In*: ERVINE, Cowan**Core Statutes on Company Law**. London: Macmillan Education UK, 2015. p. 757–759. DOI 10.1007/978-1-137-54507-7_21. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-1-137-54507-7_21. Acesso em: 27 ago. 2020.

FERREIRA, Eduardo Moura da Silva. **Energia Eólica *Offshore*: Tratamento de Dados e Avaliação de Aproveitamento em Áreas de Grande Potencial no Brasil**. 2019. 113 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/Eduardo_Moura_da_Silva_Ferreira._MESTRADO-2019.pdf. Acesso em: 23 ago. 2020.

GOMES, Mateus Sant'Anna de Sousa. Proposta de uma metodologia para utilização de energia eólica *offshore* no litoral Sudeste do Brasil. 26 fev. 2018. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/10122. Acesso em: 23 ago. 2020.

HENNERMANN, Karl. ERA5 data documentation - Copernicus Knowledge Base - ECMWF Confluence Wiki. 5 nov. 2019. **ERA5 data documentation**. Disponível em: https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5+data+documentation. Acesso em: 20 nov. 2019.

HONG, Lixuan; MÖLLER, Bernd. *Offshore* wind energy potential in China: Under technical, spatial and economic constraints. **Energy**, v. 36, n. 7, p. 4482–4491, 1 jul. 2011. https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.071.

HUNDLEBY, Giles; FREEMAN, Kate. **Unleashing Europe's *offshore* wind potential**. [*S. l.*]: WindEurope, BVG Associates, 2017. Disponível em: https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/Unleashing-Europes-*offshore*-wind-potential.pdf. Acesso em: 8 set. 2020.

IBAMA. NOTA TÉCNICA Nº 2/2019/NLA-RS/DITEC-RS/SUPES-RS. *In*: WORKSHOP INTERNACIONAL DE AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS DE COMPLEXOS EÓLICOS *OFFSHORE*, 2019a. **NOTA TÉCNICA Nº 2/2019/NLA-RS/DITEC-RS/SUPES-RS** [...]. Brasília - Brasil: INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS, 2019. p. 14. . Acesso em: 22 nov. 2019.

IBAMA. Sistema Eletrônico de Informações. 2020. Disponível em: https://sei.ibama.gov.br/controlador_externo.php?acao=usuario_externo_logar&id_orgao_acesso_externo=0.

IBAMA. TERMO DE REFERÊNCIA - Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental EIA/Rima - Tipologia: COMPLEXOS EÓLICOS MARÍTIMOS. 2019b. Disponível em: https://www.ibama.gov.br/phocadownload/consultapublica/2020/SEI_IBAMA-6708691-TR.pdf.

IEA (Org.). *Offshore* Wind Outlook 2019: World Energy Outlook Special Report. ***Offshore* Wind**, , p. 98, 2019. .

KIM, Choong-Ki; JANG, Seonju; KIM, Tae Yun. Site selection for *offshore* wind farms in the southwest coast of South Korea. **Renewable Energy**, v. 120, p. 151–162, 1 maio 2018. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.081.

KIM, Taeyun; PARK, Jeong-Il; MAENG, Junho. *Offshore* wind farm site selection study around Jeju Island, South Korea. **Renewable Energy**, v. 94, p. 619–628, 1 ago. 2016. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.083.

LEUNG, Dennis Y. C.; YANG, Yuan. Wind energy development and its environmental impact: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 1031–1039, 1 jan. 2012. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.024.

LIMA, Danielle Kely Saraiva de. Modelagem de alta resolução para estimativa do potencial eólico *offshore* da costa do Ceará. 31 ago. 2015. Disponível em: http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/16338. Acesso em: 23 ago. 2020.

MAGAR, V.; GROSS, M. S.; GONZÁLEZ-GARCÍA, L. *Offshore* wind energy resource assessment under techno-economic and social-ecological constraints. **Ocean & Coastal Management**, v. 152, p. 77–87, 1 fev. 2018. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.10.007.

MAHDY, Mostafa; BAHAJ, AbuBakr S. Multi criteria decision analysis for *offshore* wind energy potential in Egypt. **Renewable Energy**, v. 118, p. 278–289, 1 abr. 2018. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.021.

MATTAR, Cristian; GUZMÁN-IBARRA, María Cristina. A techno-economic assessment of *offshore* wind energy in Chile. **Energy**, v. 133, p. 191–205, 15 ago. 2017. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.099.

MUSIAL, Walt; HEIMILLER, Donna; BEITER, Philipp; SCOTT, George; DRAXL, Caroline. ***Offshore* Wind Energy Resource Assessment for the United States**, n. NREL/TP-5000-66599. [*S. l.*]: National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 1 set. 2016. DOI 10.2172/1324533. Disponível em: https://www.osti.gov/biblio/1324533. Acesso em: 8 set. 2020.

NAGABABU, Garlapati; KACHHWAHA, Surendra Singh; SAVSANI, Vimal. Estimation of technical and economic potential of *offshore* wind along the coast of India. **Energy**, v. 138, p. 79–91, 1 nov. 2017. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.032.

ONU. **Transformando nosso mundo: A agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável.** Nova York: [*s. n.*], 2015. Disponível em: https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2015/10/agenda2030-pt-br.pdf. Acesso em: 9 mar. 2020.

ORTIZ, G; KAMPEL, M. Potencial de energia eólica *offshore* na margem do Brasil. **Potencial de energia eólica *offshore* na margem do Brasil**, v. Santos, SP, Brasil, n. V Simpósio Brasileiro de Oceanografia, p. 4, 2011. .

PACHECO, Fabiana. Energias Renováveis: breves conceitos. **Conjuntura e Planejamento**, v. 149, p. 4–11, 2006. .

PIMENTA, F; KEMPTON, W; GARVINE, R. Combining meteorological stations and satellite data to evaluate the *offshore* wind power resource of Southeastern Brazil. **Renewable Energy**, v. 33, n. 11, p. 2375–2387, 2008. .

SANTOS, Karla Rossini Gomes. **Um estudo sobre a Viabilidade Técnico-Financeira de Instalação de um Parque Eólico *Offshore* na Região Norte do Espírito Santo**. 2015. 130 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Espírito Santo, SÃO MATEUS, 2015. Disponível em: http://repositorio.ufes.br/bitstream/10/5348/1/tese_9154_Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Karla%20Rossini%20-%20vers%C3%A3o%20Final.pdf. Acesso em: 23 ago. 2020.

SCHALLENBERG-RODRÍGUEZ, Julieta; GARCÍA MONTESDEOCA, Nuria. Spatial planning to estimate the *offshore* wind energy potential in coastal regions and islands. Practical case: The Canary Islands. **Energy**, v. 143, p. 91–103, 15 jan. 2018. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.084.

SILVA, Amanda. **Potencial Eólico *offshore* no Brasil: localização de áreas nobres através de análise multicritério**. 2019. 102 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Brasil, 2019. Disponível em: http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/Dissert_AJVCSilva.pdf.

(STATHIS) MICHAELIDES, Efstathios E. Environmental and Ecological Effects of Energy Production and Consumption. *In*: MICHAELIDES, Efstathios E. (Stathis) (org.). **Alternative Energy Sources**. Green Energy and Technology. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. p. 33–63. DOI 10.1007/978-3-642-20951-2_2. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-642-20951-2_2. Acesso em: 27 ago. 2020.

TUCHTENHAGEN, Patrícia Nunes. Variabilidade do vento e potencial para energia eólica *offshore* no litoral Sul do Brasil. 1 nov. 2019. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/28376. Acesso em: 23 ago. 2020.

WAEWSAK, Assoc.Prof.Dr.Jompob; LANDRY, Mathieu; GAGNON, Yves. *Offshore* wind power potential of the Gulf of Thailand. **Renewable Energy**, v. 81, p. 609–626, 1 set. 2015. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.069.

WALLACE, John M.; HOBBS, Peter V. **Atmospheric Science an Introductory Survey**. 2. ed. University of Washington, Seattle, U.S.A: Academic Press, 2006. v. 92, . Disponível em: https://www.elsevier.com/books/atmospheric-science/wallace/978-0-12-732951-2. Acesso em: 31 mar. 2020.

WORLD FORUM *OFFSHORE* WIND. **Global *Offshore* Wind Report 1st half 2020**. Alemanha: WFO, 2020. Disponível em: www.wfo-global.org. Acesso em: 20 ago. 2020.

YAMAGUCHI, Atsushi; ISHIHARA, Takeshi. Assessment of *offshore* wind energy potential using mesoscale model and geographic information system. **Renewable Energy**, v. 69, p. 506–515, 1 set. 2014. https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.02.024.

ARTIGO CIENTÍFICO 2

ESTUDO DA VARIAÇÃO TEMPORAL DO POTENCIAL EÓLICO *OFFSHORE* NA REIGÃO SUDESTE DO BRASIL

STUDY OF THE TEMPORAL VARIATION OF OFFSHORE WIND ENERGY POTENTIAL IN SOUTHEAST BRAZIL

Thiago Ribeiro Coriolano - IFFluminense/PPEA
Natália Tasso Signorelli - UENF
Jader Lugon Junior - IFFluminense/PPEA
Marcos Antonio Cruz Moreira - IFFluminense/PPEA
Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva - UENF

RESUMO

O consumo global de energia tem crescido ao longo dos anos marcado pelo desenvolvimento tecnológico e industrialização. As fontes renováveis ganharam destaque devido à urgência climática e aos acordos internacionais que visam reduzir as emissões de CO2 em todo o planeta. Nesse sentido, a energia eólica, já consolidada na região continental (onshore), evoluiu para regiões marítima (*offshore*). No Brasil, há um crescente interesse em projetos eólicos *offshore*. e diversos se encontram em fase de licenciamento ambiental, inclusive na região sudeste do país, onde há um potencial de energia eólica relevante. O principal meteorológico da região, a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), tem sido afetado por mudanças recentes na circulação atmosférica global. Este trabalho tem como objetivo avaliar a variação temporal do potencial eólico *offshore* no sudeste do Brasil. As saídas horárias da reanálise ERA5 de 1979 a 2020 foram processadas por meio de ferramentas computacionais de alto nível (linguagem de programação Python e CDO e software de SIG) e mecanismos de análise estatística consolidados. Neste sentido, foi observada uma redução na frequência dos ventos de baixa velocidade (≤7,5 m·s−1) e um aumento da frequência na faixa de alta velocidade (>7,5 m·s−1) que afetaram as estimativas do potencial eólico *offshore* na região de estudo, principalmente relacionado à intensificação e expansão da ASAS nos últimos 40 anos. Exceto para o litoral de São Paulo e do sul do Rio de Janeiro, houve um aumento consistente na densidade de potência eólica ao longo das décadas. Os quatro pontos analisados apresentaram aumento de 1,55 W·m−2·y-1

para 1,89 W·m−2·y-1, o que corresponde a um aumento de 8,2% a 11,2% na mediana da densidade potência eólica.

Palavras chave: Energias renováveis. Reanálise ERA5. Fazendas Eólicas Marítimas.

ABSTRACT

Global energy consumption has grown over the years marked by technological development and industrialization. Renewable sources have gained prominence due to climate urgency and international agreements that aim to reduce CO2 emissions across the planet. In this regard, wind energy, already consolidated in the onshore region, has evolved offshore regions. In Brazil, there is a growing interest in offshore wind projects. Many of these projects are currently through the environmental licensing process, mostly in the southeastern region of the country. It is known that this area has a relevant wind energy potential. This area is dynamically dominated by the South Atlantic Subtropical Height, the main meteorological phenomenon in the region, which has been affected by recent changes in the global atmospheric circulation. This work aims to evaluate the temporal variation of offshore wind potential in southeastern Brazil. ERA5 reanalysis hourly outputs from 1979 to 2020 were evaluated through high-level computational tools (python and CDO programming languages and GIS software) and consolidated statistical analysis mechanisms. A general decrease in the frequency of low wind speed records (≤7.5 m·s−1) and a raise in the higher wind speed range (>7.5 m·s−1), mainly related to the intensification and expansion of the South Atlantic Subtropical Height (SASH) over the past 40 years, were observed and affected the estimates of offshore wind potential over the analyzed region. Apart from the coast of São Paulo and the south coast of Rio de Janeiro, there was a consistent increase in the wind power density over decades. The four analyzed points presented an increase of 1.55 W·m−2·y−1 to 1.89 W·m−2·y−1, which corresponds to an increase of 8.2% to 11.2% in the median wind power density.

Keywords: *Renewable Energy. ERA5 reanalysis. Offshore Wind Farms.*

1. INTRODUCTION

The demand for energy is increasing, primarily associated with services to meet social and economic development needs and improve human health and well-being. The global use of fossil fuels has gained prominence in energy supply, leading to rapid growth of carbon dioxide (CO2) emissions since 1850 (EDENHOFER et al., 2012).

Despite the recent historical events, such as the 2008 crisis and the Covid-19 pandemic in 2020-2021, the global electricity consumption per capita has increased over 1000 kWh in the past 15 years, mainly motivated by technological development and industrialization, which drive global electricity demand (RITCHIE; ROSER, 2021).

In the present scenario of urgent climate crises and increasing energy demand, the search for new renewable energy sources has become essential. Among the currently available renewable sources, the expansion of wind power energy has been noteworthy worldwide (SANTOS et al., 2015).

Globally, *offshore* wind farms have been a reality for many years. The total installed capacity increased from 3.3 GW in 2011 to 27.2 GW in 2019. An annual growth superior to all other sources of electricity, excepting the photovoltaic solar energy (IEA, 2019).

Currently, Brazil ranks 7th among the countries with the largest installed wind energy production capacities (GWEC, 2019). The country's onshore capacity (about 15.9 GW) is expected to reach 32.2 GW by 2030. *Offshore* wind farms, however, are still unprecedented.

The first *offshore* projects in Brazil were submitted to IBAMA (Brazilian Institute for the Environment and Renewable Natural Resources) in 2016. Driven by the increasing interest of entrepreneurs on this subject, the Energy Research Office (EPE) published the Brazilian *Offshore* Wind Roadmap in January 2020. It identifies potential challenges for the development of this sector in Brazil, including the lack of legal and regulatory scopes (EPE, 2020) also discussed by Santestevan (2019) and Souza et al. (2021). According to these authors, even though *offshore* wind farm entrepreneurs need to contact at least eight different public agencies to obtain authorizations for their developments, their legal security is not yet guaranteed. In this sense, the law project PL 11.247/18 seeks to build the legal framework for *offshore* wind farms. Currently under discussion in the Brazilian Senate, however, it still needs further development and approval to become a valid law in the country. Besides, IBAMA published the first term of reference for environmental licensing of wind farms later in 2020.

To date, 19 projects have been registered by investors who wish to obtain environmental licensing of their projects. Five of them are located in the region of interest of this paper: the coastal region of the States of Rio de Janeiro and Espírito Santo in Brazil (SEI/IBAMA, 2021).

Next to the country's most populated areas and largest economic centers, this region is one of the promising locations for *offshore* wind power generation within the Exclusive Economic Zone (EEZ) of Brazil, with an averaged wind energy potential of 83 GW for water depths below 100 m and 1118 GW for the whole EEZ (EPE, 2020; CORIOLANO, 2020).

Nascimento (2020) also shows that the wind energy potential varies seasonally, mainly in response to the South Atlantic Subtropical Height (SASH), the major atmospheric system affecting the region, source of the north and northeastern winds that dominate this location. According to the author, in April, at the weakest point of SASH (KAPALA; MÄCHEL; FLOHN, 1998; DEGOLA, 2013; SIGNORELLI, 2017) the region has half the capacity of generating wind energy than it does in September (500 W·m−2, at 100 m height) when SASH is both, more intense and closer to the region.

Several studies also show that the strength and position of the SASH have been affected by recent changes in the global atmospheric circulation (SEIDEL et al., 2008; HUDSON, 2012; VIZY; COOK, 2016, among others). According to Signorelli (2017) and Reboita et al. (2019), the SASH has expanded, intensified, and moved southward in the past decades. This poleward shift of the SASH has also been verified in different future scenarios (HE et al., 2017; REBOITA; AMARO; DE SOUZA, 2018).

Few studies address the changes in the wind power generation in the Brazilian coastal areas. Recently, Pereira et al. (2013) and Reboita, Amaro and De Souza (2018) analyzed the potential impacts of the different future climate scenarios described by the IPCC. According to the authors, the overall the impact of the global climate changes on the wind power might be favorable to the profitability of existing and future wind projects, especially in the Northeast and South regions of Brazil. However, the historical data were used mainly to validate the climate models. The recent changes of wind power generation *offshore* Southeast Brazil was not assessed and is currently unknown.

In this sense, this present article proposes to analyze the last 40 years of wind data to assess the impacts of recent changes in the global atmospheric circulation in the wind energy potential in Brazil's southeastern region, comprising a multi-decadal wind power density and wind frequency distribution, anomalies, and trends analysis.

2. MATERIALS AND METHODS

In this study, ERA5 reanalysis hourly outputs from 1979 to 2020 (C3S, 2017, p. 5; HERSBACH et al., 2020) were used to assess the recent changes in wind energy potential *offshore* Brazil. This reanalysis is consolidated and widely used in academia and industry for wind potential modeling (OLAUSON, 2018).

The monthly-averaged Wind Power Density (WPD) time series was obtained according to Equation (1) (SOARES; LIMA; NOGUEIRA, 2020):

$$\mathrm{WPD} = \frac{1}{2}\rho v_z^3 \qquad [\mathrm{W/m^2}] \qquad (1)$$

where: ρ is the density of the air, v_z is the wind speed at 100 m. Air density (ρ) is considered constant and equal to 1.22 kg·m−3, according to International Organization for Standardization, (ISO, 1975), standard atmosphere.

The area of study is shown in Figure 1. Four additional points (P1 to P4, Table 1) were defined considering a less complex and costly *offshore* wind farm project as defined by EPE (2020): high energy generation potential (GOMES, 2018; CORIOLANO, 2020; NASCIMENTO, 2020), proximity to the coast and lower water depth. All points were defined within the 200 nautical miles from coast line that define the country's exclusive economic zone (EEZ) (BRASIL, 1990). The selected points are within a region of broad interest in the development of *offshore* wind farm projects, emphasized by the location of the five projects currently being processed for environmental licensing (Figure 1).

	Latitude [S]	**Longitude [W]**
P_1	21.50°	40.50°
P_2	22.00°	40.50°
P_3	22.25°	40.75°
P_4	22.75°	41.50°

Table 1: Points of Interest.

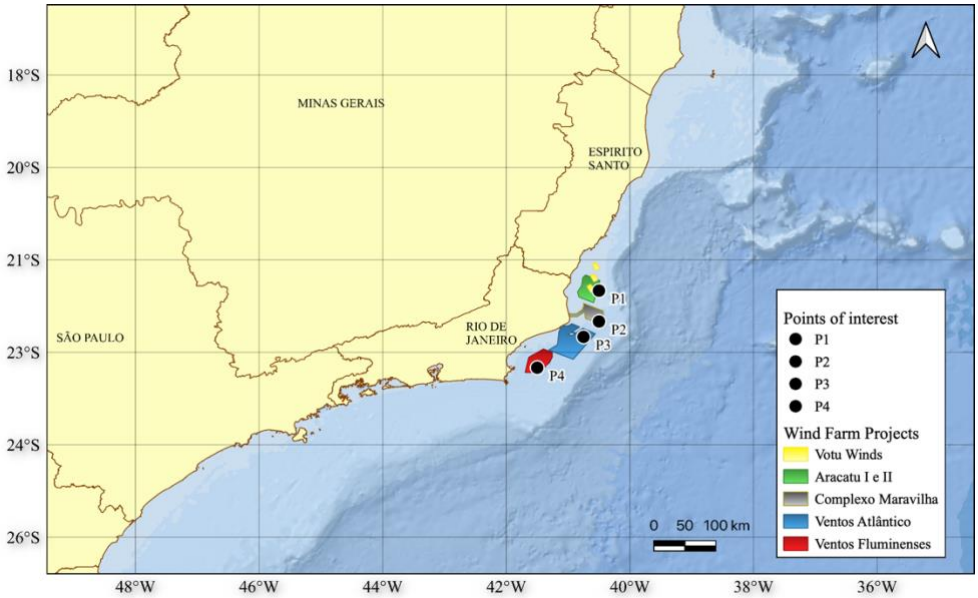


Figure 1: Points of interest and offshore wind farm projects.

To verify the effects of recent changes in the global atmospheric circulation in the WPD in the area, a multi-decadal analysis was performed. Decades from 1990 to 2010 were compared to 1980. As wind speeds are generally not normally distributed, the Mann-Whitney non-parametric test (GIBBONS; CHAKRABORTI, 2020) was applied. Same approach was applied in wind resource analysis papers (CARVALHO; GÓMEZ-GESTEIRA; SILVA SANTOS, 2017). The one-sided test was used to verify if data from 1980 were stochastically smaller, with a confidence level of 95%.

To better assess the interannual and decadal variabilities, a boxcar filter of 12 months was applied to remove the seasonal variation from the monthly time series of WPD. Then, the linear trend was calculated using the Kendall-Theil robust line estimator (GRANATO, 2006), considering a 95% significance.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The geospatial distribution of the power density decades median from 1981 to 2020 is presented in Figure 2. The anomalies, relative to the 1980s, are shown in percentage in Figure 3. Already discussed in the literature (GOMES, 2018; CORIOLANO, 2020; NASCIMENTO, 2020), the area between the northeast coast of Rio de Janeiro and the south of Espírito Santo is a region of high energy generation potential. Results also show that there was an increase in the WPD (up to 12%) over the decades.

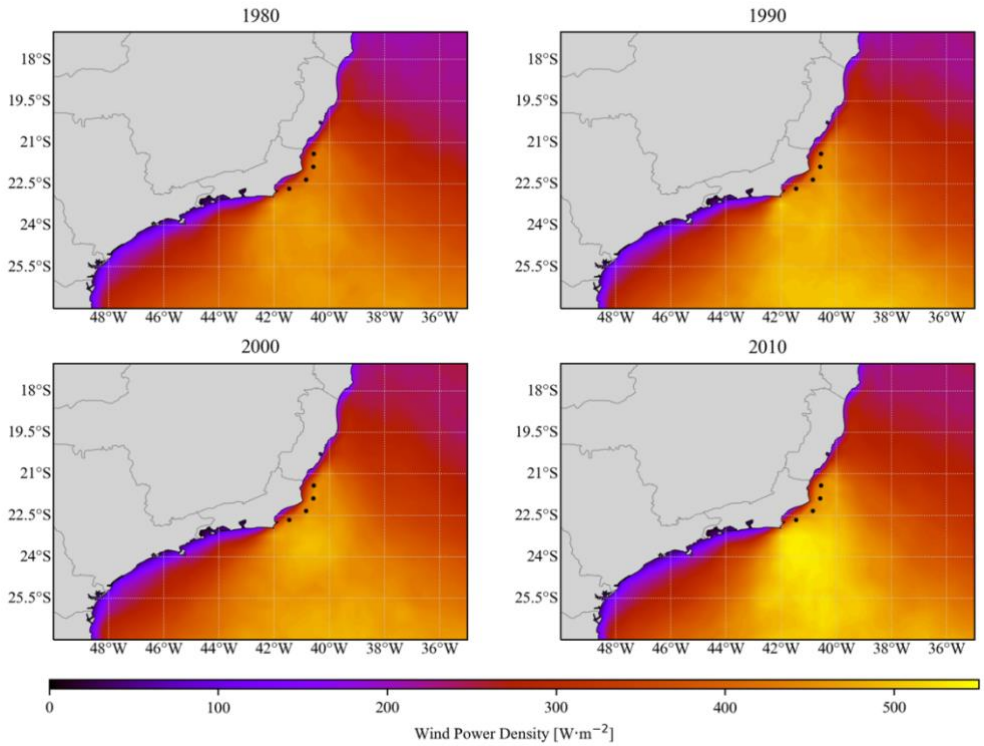


Figure 2: Wind Power Density Median [W·m−2] at 100 m from 1981 to 2020.

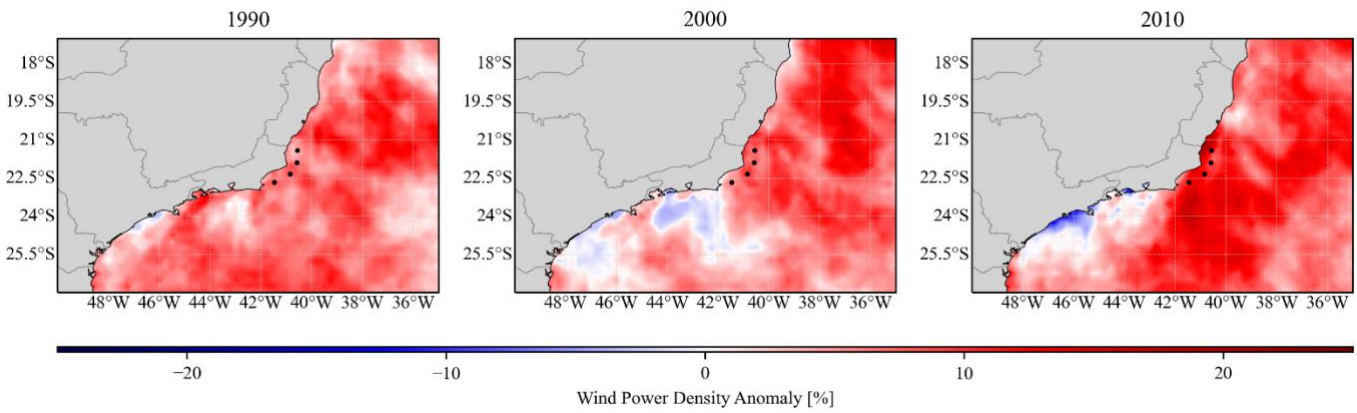


Figure 3: Wind Power Density Anomalies [%] at 100 m from 1990 to 2010, relative to the decade of 1980.

The comparison between 1980 and 2010 median values (Table 2) shows an increase of 8.2% (P1), 9.8% (P2), 11.2% (P3) and 10.8% (P4).

	Median [W·m^{-2}]		Mann-Whitney Test Results
	1980	2010	P-value
P_1	421.8	435.1	0.013
P_2	429.7	458.8	0.025
P_3	408.1	443.3	0.018
P_4	426.2	459.1	0.033

Table 2: Wind Power Density [W·m−2] at 100 m over the Decades of 1980 and 2010 for P1 to P4.

Figure 4 also shows a shift in the distribution of the monthly WPD within each decade, with an increasing dissimilarity between the first and third quantiles. The maximum wind power density was observed in 2010, exceeding 1100 W·m−2 at all four points. Comparatively, the 1980 maximum WPD at all four points did not reach 1000 W·m−2 and were marked as outliers. The Mann-Whitney test results show that those differences are statistically significant at 95% (Table 2).

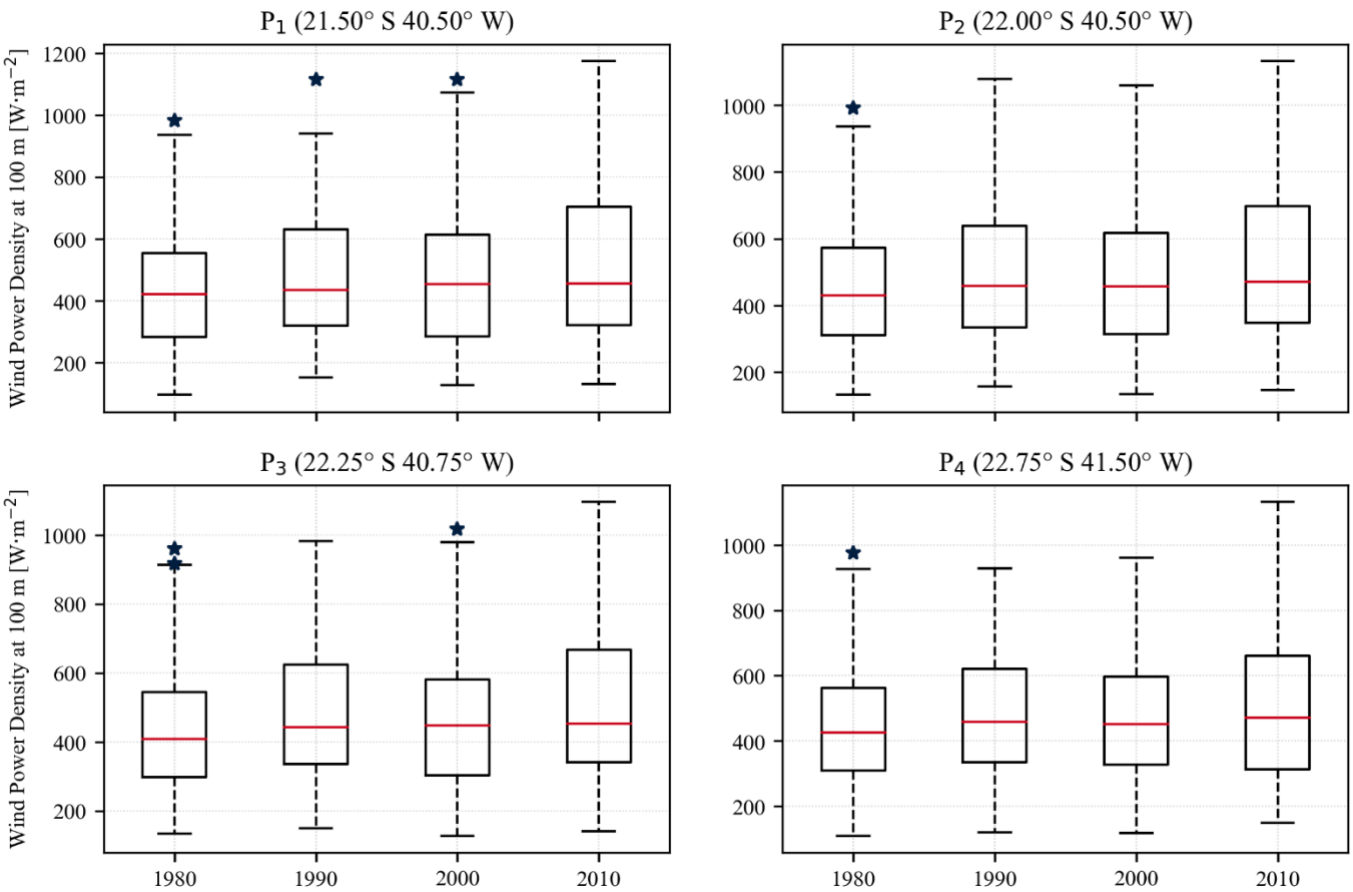


Figure 4: Decadal Wind Power Density Distribution at 100 m from 1980 to 2010, for P1 to P4.

As expected, changes over the WPD reflect the shift in the distribution of the hourly wind speed records over the area. It is possible to observe a general decrease in the frequency of low wind speed records (0 to 7.5 m·s−1) whereas the higher wind speed range (>7.5 m·s−1) increased over the decades (Figure 5). Between 1980 and 1990, the frequency of the wind speed >7.5 m·s−1 raised about 4%. On average, there was an increase of 0.7% (P4) to 1.7% (P1) per decade. The contribution of wind speed above 15 m·s−1 alone changed from 1.3% (1.3%) in 1980 to 2.5% (1.8%) in 2010 at P1 (P4).

No significant changes were found in the frequency distribution of the wind direction over the analyzed period (not shown). The north and northeast winds, related to the presence of the SASH, corresponded to 53-58% of the observations (Table 3).

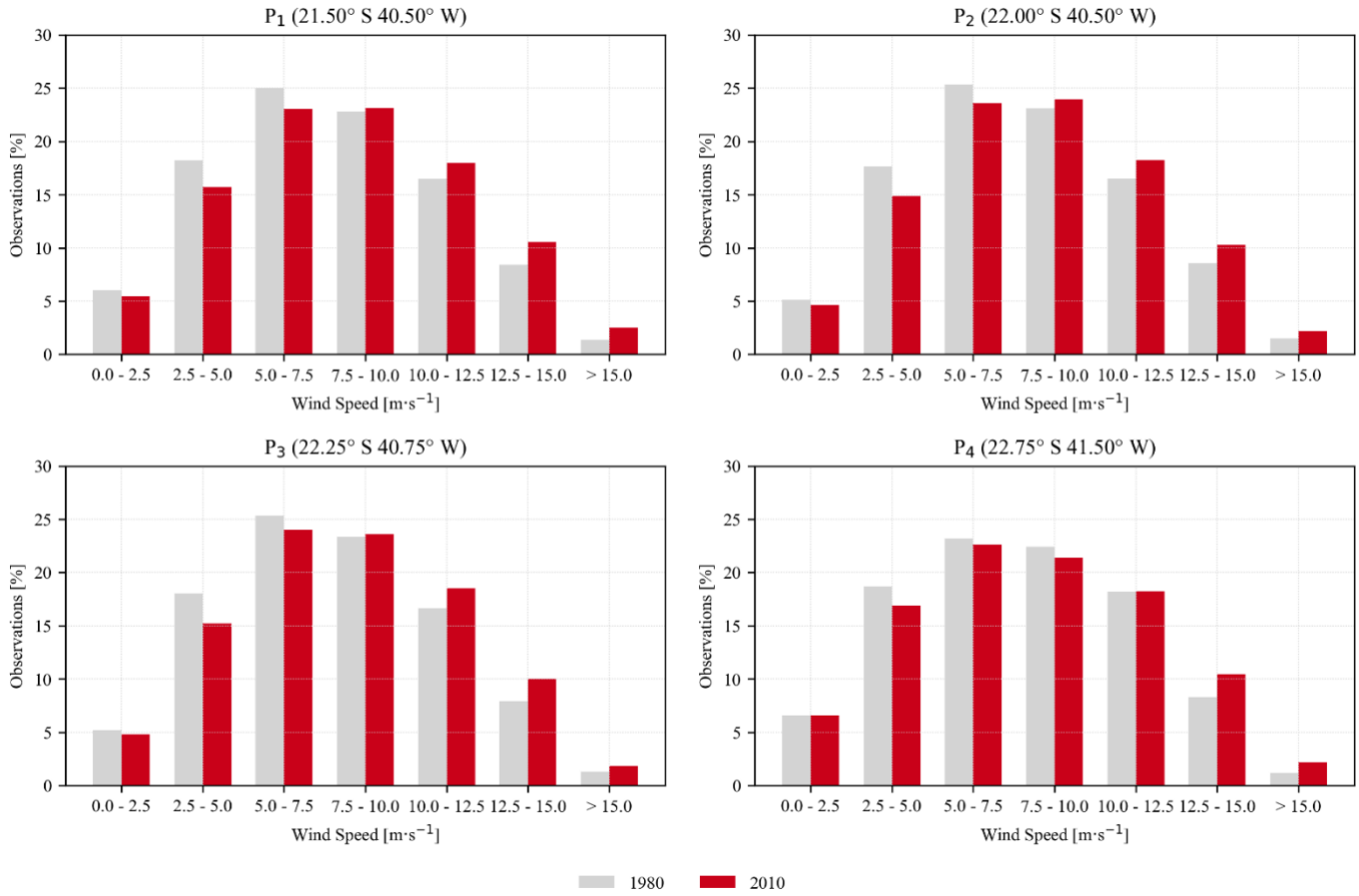


Figure 5: Wind Frequency Distribution at 100 m [%] of the Decades of 1980 and 2010.

As stated in Table 3, most of the observed wind speed increase was related to the north and northeast winds from the SASH, suggesting a strengthening of the high-pressure system over the region, as described by Signorelli (2017).

Direction [From]	Wind Intensity	P_1 1980	P_1 2010	P_2 1980	P_2 2010	P_3 1980	P_3 2010	P_4 1980	P_4 2010
N, NE	≤7.5 m·s^{-1}	19.1%	16.1%	18.1%	15.5%	17.9%	15.6%	16.2%	15.6%
	>7.5 m·s^{-1}	37.9%	42.1%	37.5%	41.5%	37.3%	41.3%	37.2%	39.6%
E to NW	≤7.5 m·s^{-1}	30.2%	28.1%	30.0%	27.7%	30.7%	28.4%	32.3%	30.5%
	>7.5 m·s^{-1}	11.2%	12.0%	12.1%	13.2%	11.9%	12.6%	12.9%	12.7%

Table 3: Frequency Distribution of Wind Records at 100 m [%] for the Decades of 1980 and 2010, grouped by Speed [m·s−1] and Direction.

Wind speeds above 25 m·s−1 were not observed in any of the four points analyzed, which is beneficial for wind energy production since it is the cut-off limit (the speed that the turbine shuts down to avoid damage) for most of the *offshore* wind turbine models available. Future scenarios need to be evaluated, considering that future climate change scenarios can further change the wind frequency distribution, especially at the higher speed ranges.

The wind power density trend from 1979 to 2020 is presented in Figure 6. Considering 95% significance, positive trends were observed in almost the entire analyzed area, except for the coast of São Paulo and the south coast of Rio de Janeiro, where smaller negative changes were found (−0.5 W·m−2·y−1).

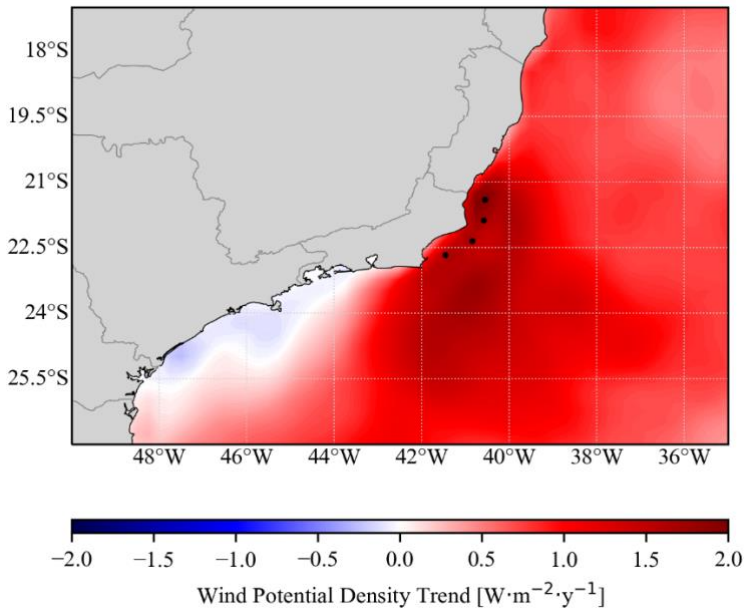


Figure 6: Wind Power Density Trend [W·m−2·y−1] from 1979 to 2020.

The points of interest are located in a region of a rapid increase in wind power density, with trends ranging from 1.55 W·m−2·y−1 to 1.89 W·m−2·y−1 (Table 4).

	Linear Trend [W·m^{-2}·y^{-1}]	95% Confidence Interval [W·m^{-2}·y^{-1}]	
P_1	1.89	1.53	2.25
P_2	1.55	1.20	1.88
P_3	1.56	1.24	1.88
P_4	1.60	1.26	1.92

Table 4: Wind Power Density Linear Trend at 100 m [W·m−2·y−1] from 1979 to 2020, for P1 to P4.

This fast increase in energy supply may not continue in the foreseeable future. As discussed by Schaeffer et al. (2012), the analysis of the climate impacts on wind energy production must consider the frequency distribution of wind speeds. From the wind energy production perspective, the intensification of the wind is positive for the development, since the turbines can generate more energy, following their power curve. However, considering the main *offshore* wind turbine models available on the market, there is no increase in the energy production for wind speeds higher than 15 m·s−1. Thus, climate change scenarios in which higher frequencies of wind above this threshold are expected need to be evaluated during the planning of the wind farms.

4. CONCLUSION

The analysis of the last 40 years of wind data showed an overall positive impact of in the global atmospheric circulation in the wind energy potential in Brazil's southeastern region.

Apart from the coast of São Paulo and the south coast of Rio de Janeiro, a statistical increase in the WPD was observed over the decades which can be translated into a growth of about 10 in the median wind power density, peaking to more than 20% in some areas.

These changes are mainly related to the intensification of the north and northeast winds, due to the strengthening and expansion of the SASH. A general decrease in the frequency of low wind speed records (0 to 7.5 $m \cdot s^{-1}$) and a raise in the higher wind speed range (>7.5 $m \cdot s^{-1}$) were verified.

As discussed, a frequency raise of wind speeds from 7 to 15 $m \cdot s^{-1}$ is generally beneficial to wind farm developments. However, for the major *offshore* wind turbine models available in the market, there will not be any significant increase in energy production if wind speeds above 15 $m \cdot s^{-1}$ become more recurrent. Although not observed in any of the four analyzed points, a constant strengthening of wind over the area might lead to speeds above the cut-off limit of those turbines (25 $m \cdot s^{-1}$) in the future.

In this sense, a more detailed assessment of the wind distribution variations, using hourly wind data fit to the Weibull distribution, would refine the estimates of wind energy production by accounting for the effects of the turbines power curves. The same methodology, when applied to different carbon emission scenarios, would contribute to better identify the consequences of climate change in the future of the wind energy production in the area.

5. ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge the financial support provided by CAPES, Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (Finance Code 001), CNPq, National Council for Scientific and Technological Development, and FAPERJ, Carlos Chagas Filho Foundation for Supporting Research in the State of Rio de Janeiro.

6. REFERENCES

ALAYDI, Juma Yousuf. A Survey on the Assessment of Wind Energy Potential in Gaza Strip. **Wind Engineering**, v. 34, n. 5, p. 531–541, 1 out. 2010. https://doi.org/10.1260/0309-524X.34.5.531.

ASAKEREH, Abbas; OMID, Mahmoud; ALIMARDANI, Reza; SARMADIAN, Fereydoon. Investigating Potential of Wind Energy in Mahshahr, Iran. **Wind Engineering**, v. 39, n. 4, p. 369–384, 2015. .

BRASIL. Convenção das Nações Unidas sobre o direto do mar. **99.165**, 1990.

C3S. ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. 2017. Disponível em: https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home. Acesso em: 1 dez. 2020.

CARVALHO, David; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; SILVA SANTOS, Carlos. Potential impacts of climate change on European wind energy resource under the CMIP5 future climate projections. **Renewable Energy**, v. 101, p. 29–40, 1 fev. 2017. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.036.

CORIOLANO, Thiago Ribeiro. **Estudo do Potencial de Geração de Energia Eólica *Offshore* no Brasil**. 2020. 52 f. Monografia (Pós-Graduação) – UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO, Macaé, 2020. Disponível em: https://www.lamet.uenf.br/copia-especializacao-em-clima-agua-1.

DEGOLA, Thiago Souza Dias. **Impactos e variabilidade do anticiclone subtropical do atlântico sul sobre o Brasil no clima presente e em cenários futuros**. 2013. 112 f. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: https://www.iag.usp.br/pos/sites/default/files/d_thiago_s_d_degola_corrigida.pdf. Acesso em: 22 nov. 2019.

EDENHOFER, O.; R. PICHS-MADRUGA; Y. SOKONA; K. SEYBOTH; P. MATSCHOSS; S. KADNER; T. ZWICKEL; P. EICKEMEIER; G. HANSEN; S. SCHLÖMER; C. VON STECHOW. Renewable energy sources and climate change mitigation: special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Choice Reviews Online**, v. 49, n. 11, p. 49-6309-49–6309, 1 jul. 2012. https://doi.org/10.5860/CHOICE.49-6309.

EPE. **Roadmap Eólica *Offshore* Brasil**, n. No NT-EPE-PR-001/2020-r1. Rio de Janeiro - Brasil: EPE, 2020.

GIBBONS, Jean Dickinson; CHAKRABORTI, Subhabrata. **Nonparametric Statistical Inference**. [*S. l.*]: CRC Press, 2020.

GOMES, Mateus Sant'Anna de Sousa. Proposta de uma metodologia para utilização de energia eólica *offshore* no litoral Sudeste do Brasil. 26 fev. 2018. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/10122. Acesso em: 23 ago. 2020.

GRANATO, Gregory E. **Kendall-Theil Robust Line (KTRLine—version 1.0)—A Visual Basic Program for Calculating and Graphing Robust Nonparametric Estimates of Linear-Regression Coefficients Between Two Continuous Variables**. [*S. l.*: *s. n.*], 2006. v. chap. A7, (4). Disponível em: https://pubs.usgs.gov/tm/2006/tm4a7/. Acesso em: 30 maio 2021.

GWEC. **Global Wind Report 2019 | Global Wind Energy Council**. [*S. l.*: *s. n.*], 2019. Disponível em: https://gwec.net/global-wind-report-2019/. Acesso em: 30 maio 2021.

HE, Chao; WU, Bo; ZOU, Liwei; ZHOU, Tianjun. Responses of the Summertime Subtropical Anticyclones to Global Warming. **Journal of Climate**, v. 30, n. 16, seç. Journal of Climate, p. 6465–6479, 15 ago. 2017. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0529.1.

HERSBACH, Hans; BELL, Bill; BERRISFORD, Paul; HIRAHARA, Shoji; HORÁNYI, András; MUÑOZ-SABATER, Joaquín; NICOLAS, Julien; PEUBEY, Carole; RADU, Raluca; SCHEPERS, Dinand; SIMMONS, Adrian; SOCI, Cornel; ABDALLA, Saleh; ABELLAN, Xavier; BALSAMO, Gianpaolo; BECHTOLD, Peter; BIAVATI, Gionata; BIDLOT, Jean; BONAVITA, Massimo; … THÉPAUT, Jean-Noël. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 730, p. 1999–2049, 2020. https://doi.org/10.1002/qj.3803.

HUDSON, R. D. Measurements of the movement of the jet streams at mid-latitudes, in the Northern and Southern Hemispheres, 1979 to 2010. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 12, n. 16, p. 7797–7808, 30 ago. 2012. https://doi.org/10.5194/acp-12-7797-2012.

IEA (Org.). *Offshore* Wind Outlook 2019: World Energy Outlook Special Report. ***Offshore* Wind**, , p. 98, 2019. .

ISO. ISO 2533:1975. 1975. **ISO**. Disponível em: https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/00/74/7472.html. Acesso em: 31 maio 2021.

JIANG, Yingni. Research on Wind Energy Potential at Karamay. **Wind Engineering**, v. 39, p. 229–236, 1 jun. 2015. https://doi.org/10.1260/0309-524X.39.3.229.

KAPALA, A.; MÄCHEL, H.; FLOHN, H. Behaviour of the centres of action above the Atlantic since 1881. Part II: Associations with regional climate anomalies. **International Journal of Climatology**, v. 18, n. 1, p. 23–36, 1998. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199801)18:1<23::AID-JOC226>3.0.CO;2-7.

NASCIMENTO, Mariana Ximenes do. **Estudo do Potencial da Energia Eólica *Offshore* nas Bacias do Sul e Sudeste do Brasil**. 2020. 60 f. Monografia (Pós-Graduação) – UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO, Macaé, 2020. Disponível em: https://www.lamet.uenf.br/copia-especializacao-em-clima-agua-1.

OLAUSON, Jon. ERA5: The new champion of wind power modelling? **Renewable Energy**, v. 126, p. 322–331, 1 out. 2018. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.056.

PEREIRA, Enio B.; MARTINS, Fernando R.; PES, Marcelo P.; DA CRUZ SEGUNDO, Eliude I.; LYRA, André de A. The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil. **Renewable Energy**, Selected papers from World Renewable Energy Congress - XI. v. 49, p. 107–110, 1 jan. 2013. https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.053.

REBOITA, Michelle Simões; AMARO, Tatiana Rocha; DE SOUZA, Marcelo Rodrigues. Winds: intensity and power density simulated by RegCM4 over South America in present and future climate. **Climate Dynamics**, v. 51, n. 1, p. 187–205, 1 jul. 2018. https://doi.org/10.1007/s00382-017-3913-5.

REBOITA, Michelle Simões; AMBRIZZI, Tércio; SILVA, Bruna Andrelina; PINHEIRO, Raniele Fátima; DA ROCHA, Rosmeri Porfírio. The South Atlantic Subtropical Anticyclone: Present and

Future Climate. **Frontiers in Earth Science**, v. 7, 2019. DOI 10.3389/feart.2019.00008. Disponível em: https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2019.00008/full. Acesso em: 5 jun. 2021.

RITCHIE, Hannah; ROSER, Max. World per capita electricity consumption. 2021. Disponível em: https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-electricity-consumption. Acesso em: 29 jan. 2021.

SANTESTEVAN, William Hornburg. **A ZONA ECONÔMICA EXCLUSIVA BRASILEIRA E OS PARQUES EÓLICOS *OFFSHORE*: ASPECTOS LEGAIS**. 2019. 49 f. Trabalho Conclusão do Curso – Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/203257/A%20ZONA%20ECON%c3%94MICA%20EXCLUSIVA%20BRASILEIRA%20E%20OS%20PARQUES%20E%c3%93LICOS%20*OFFSHORE*%20ASPECTOS%20LEGAIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 23 ago. 2020.

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, 1 mar. 2015. https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.026.

SCHAEFFER, Roberto; SZKLO, Alexandre Salem; PEREIRA DE LUCENA, André Frossard; MOREIRA CESAR BORBA, Bruno Soares; PUPO NOGUEIRA, Larissa Pinheiro; FLEMING, Fernanda Pereira; TROCCOLI, Alberto; HARRISON, Mike; BOULAHYA, Mohammed Sadeck. Energy sector vulnerability to climate change: A review. **Energy**, v. 38, n. 1, p. 1–12, 1 fev. 2012. https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.056.

SEIDEL, Dian J.; FU, Qiang; RANDEL, William J.; REICHLER, Thomas J. Widening of the tropical belt in a changing climate. **Nature Geoscience**, v. 1, n. 1, p. 21–24, jan. 2008. https://doi.org/10.1038/ngeo.2007.38.

SEI/IBAMA. Sistema Eletrônico de Informações - SEI/IBAMA. 2021. Disponível em: http://www.ibama.gov.br/sei.

SIGNORELLI, Natália Tasso. **Um estudo da variabilidade da alta subtropical do atlântico sul usando reanálises**. 2017. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Macaé, 2017.

SOARES, Pedro M. M.; LIMA, Daniela C. A.; NOGUEIRA, Miguel. Global *offshore* wind energy resources using the new ERA-5 reanalysis. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 10, p. 1040a2, out. 2020. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb10d.

SOUZA, Laise Novellino Nunes de; ALVES, Alexsandro da Silva; JUNIOR, Jader Lugon; PINTO, Augusto Eduardo Miranda. Legal challenges for the implementation of a wind farm in the city of Macaé, Rio de Janeiro – Brasil. **Revista de Direito da Cidade**, v. 13, p. 1081–1099, 2021. .

VIZY, Edward K.; COOK, Kerry H. Understanding long-term (1982–2013) multi-decadal change in the equatorial and subtropical South Atlantic climate. **Climate Dynamics**, v. 46, n. 7, p. 2087–2113, 1 abr. 2016. https://doi.org/10.1007/s00382-015-2691-1.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DA DISSERTAÇÃO

BOLETIM ANUAL DE GERAÇÃO EÓLICA. **Boletim Brasil**: ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica, 2019. Disponível em: http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/05/Boletim-Anual_2018.pdf. Acesso em: 20 Nov. 2020.

GWEC. Global Wind Energy Council. **Global Wind Report.** 2018. Disponível em: https://gwec.net/tag/global-wind-report/. Acesso em: 20 Nov. 2020.

ERVINE, Cowan. Directive 2004/39/**Ec of the European Parliament and of the Council** of 21 April 2004. In: ERVINE, CowanCore Statutes on Company Law. London: Macmillan Education UK, 2015. p. 757–759. DOI 10.1007/978-1-137-54507-7_21. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-1-137-54507-7_21. Acesso em: 27 ago. 2020.

EPE. **Roadmap Eólica *Offshore* Brasil**, n. No NT-EPE-PR-001/2020-r1. Rio de Janeiro - Brasil: EPE, 2020.

IBAMA. **Sistema Eletrônico de Informações**. 2020. Disponível em: https://sei.ibama.gov.br/controlador_externo.php?acao=usuario_externo_logar&id_orgao_acesso_externo=0.

IEA (Org.). ***Offshore* Wind Outlook 2019**: World Energy Outlook Special Report. *Offshore* Wind, , p. 98, 2019.

(STATHIS) MICHAELIDES, Efstathios E. **Environmental and Ecological Effects of Energy Production and Consumption**. In: MICHAELIDES, Efstathios E. (Stathis) (org.). Alternative Energy Sources. Green Energy and Technology. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. p. 33–63. DOI 10.1007/978-3-642-20951-2_2. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-642-20951-2_2. Acesso em: 27 ago. 2020.