

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO

THIAGO RIBEIRO CORIOLANO

ESTUDO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA *OFFSHORE* NO
BRASIL

Macaé, junho de 2020

THIAGO RIBEIRO CORIOLANO

ESTUDO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA *OFFSHORE* NO
BRASIL

Monografia apresentada ao Laboratório de Meteorologia do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a conclusão do Curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* em Clima, Água e Energia: uma Abordagem Técnica e Integrada.

Orientadora: DSc. Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva
Coorientadora: MSc. Natália Tasso Signorelli

Macaé, junho de 2020

FICHA CATALOGRÁFICA PREPARADA PELA BIBLIOTECA DO CAMPUS DE MACAÉ

333.92
C798e
2020

Coriolano, Thiago Ribeiro

Estudo do potencial de geração de energia eólica *offshore* no Brasil / Thiago Ribeiro Coriolano. --- Macaé: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Laboratório de Meteorologia, 2020.

52 f. : il.

Monografia (Pós-Graduação *Lato Sensu* em Clima, Água e Energia: uma Abordagem Técnica e Integrada)

Orientadora: Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva.

Coorientadora: Natália Tasso Signorelli.

Bibliografia: f. 49-52

1. Potencial eólico *offshore* - Brasil 2. Zona Econômica Exclusiva 3. Energia renovável 4. Análise mensal 5. ERA5 I. Título.

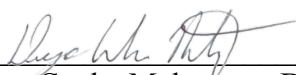
THIAGO RIBEIRO CORIOLANO

ESTUDO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA *OFFSHORE* NO
BRASIL

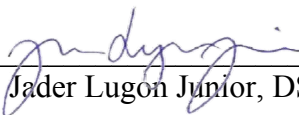
Monografia apresentada ao Laboratório de Meteorologia do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a conclusão do Curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* em Clima, Água e Energia: uma Abordagem Técnica e Integrada.

Aprovado em 25 de junho de 2020.

BANCA EXAMINADORA



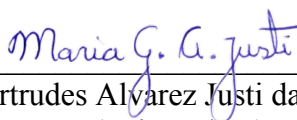
Prof. Diego Cunha Malagueta, DSc., UFRJ



Prof. Jader Lugon Junior, DSc., IFF



Natália Tasso Signorelli, MSc., Fugro
(Coorientadora)



Prof.ª Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva, DSc., UENF
(Orientadora)

scientia potentia est

AGRADECIMENTOS

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

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro e a Universidade Federal do Rio de Janeiro, pelo ensino gratuito e de qualidade.

À orientadora Prof.^a Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva e à coorientadora Natália Tasso Signorelli pela contribuição técnica e científica 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.

RESUMO

O aproveitamento da energia eólica *offshore* tem apresentado importante crescimento ao redor do mundo e tem se consolidado com uma fonte de energia relevante no âmbito das renováveis, este cenário promove a busca pela avaliação do recurso eólico no território brasileiro. Neste estudo, avalia-se o potencial eólico *offshore* ao longo de costa do Brasil, com o objetivo de determiná-lo sob a perspectiva teórica e técnica. Os dados de velocidade do vento a 100 metros foram obtidos a partir do conjunto de dados de reanálise atmosférica denominado ERA5, publicado pelo ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*). O processamento destes dados foi realizado com a utilização de *softwares* de geoprocessamento de sistemas de informações geográficas (SIG), *softwares* livres e linguagem de programação de alto nível. O potencial teórico para Zona Econômica Exclusiva (ZEE) do Brasil foi determinado como sendo de 6.243 GW e para o potencial técnico até a cota batimétrica de 100 m obteve-se o valor de 780 GW. Na perspectiva da análise mensal, os meses de janeiro a junho possuem menor capacidade de geração em relação a média, enquanto os meses de junho a dezembro a ultrapassam.

Palavras-chave: Potencial Eólico *Offshore*. Zona Econômica Exclusiva. Energia Renovável. Brasil. Análise mensal. ERA5.

ABSTRACT

The use of offshore wind energy has shown significant growth worldwide and has consolidated itself as a relevant energy source in the scope of renewable energies, this scenario promotes the search for the evaluation of the wind resource in the Brazilian territory. In this study, the offshore wind potential along the entire coast of Brazil is assessed, with the objective of determining it from a theoretical and technical perspective. The wind speed data at 100 meters was obtained from the atmospheric reanalysis ERA5, published by ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts). The data processing was performed using GIS software and high-level programming language. The estimated theoretical potential for the Brazilian Exclusive Economic Zone was 6243 GW. The technical potential, from the coast to the depth of 100 meters was 780 GW. From the seasonal point of view, the wind power generation capacity was smallest from January to June while the months from June to December exceed the annual averaged values.

Keywords: Offshore Wind Potential. Exclusive Economic Zone. Renewable energy. Brazil. Monthly analysis. ERA5.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Acréscimo anual na capacidade eólica <i>offshore</i> global (em GW) período de 2010 a 2018.....	14
Figura 2: Mapa dos países com parques eólicos <i>offshore</i> (azul) e os 3 dentre os 10 maiores em capacidade eólica instalada que ainda não possuem parques eólicos offshore (verde).....	15
Figura 3: Evolução da capacidade eólica instalada no Brasil, em MW, entre 2005 e 2019 e valores previstos até 2024.....	15
Figura 4: Capacidade de geração energia eólica acumulada no mundo em 2018.	16
Figura 5: Esquemático da formação do recurso eólico, no Hemisfério Norte.	18
Figura 6: Representação esquemática da circulação geral da atmosfera.....	19
Figura 7: Variação da ZCIT ao longo do ano.....	21
Figura 8: Campo de intensidade ($m.s^{-1}$) e direção do vento. Climatologia para o período de 1989 a 2010 para (A) maio, (B) setembro.	22
Figura 9: Variação sazonal da intensidade (a) e da posição (b) e da extensão (c) da ASAS a partir dos campos médios de pressão ao nível do mar.	23
Figura 10: Configuração da ASAS, a partir da pressão ao nível do mar, para os meses de fevereiro (a,b) e julho (c,d) nas reanálises NCEP (a,c) e ERAI (b,d).....	23
Figura 11: Valores médios mensais da intensidade do vento ($m.s^{-1}$), convertidos para uma altura de 10 m, no horário de 12 Z em unidades marítimas na região sudeste (P-40; PCE-1; PPG-1A; SBEC; SBGP) e reanálises ERA-Interim e NCEP/NCAR.	24
Figura 12: Partes que compõe uma turbina eólica.....	27
Figura 13: Fundações de turbinas eólicas <i>offshore</i>	27
Figura 14: Fundações ancoradas de turbinas eólicas <i>offshore</i>	28
Figura 15: Cotas batimétricas de referência na ZEE do Brasil.....	32

Figura 16:Diagrama das ferramentas de processamento utilizadas.....	37
Figura 17: Velocidade de <i>cutoff</i> na ZEE do Brasil.....	39
Figura 18: Resultado do potencial técnico na ZEE do Brasil.....	41
Figura 19: Potencial eólico <i>offshore</i> no Brasil: análise mensal.....	42
Figura 20: Velocidade média do vento (m/s) nos meses de abril e setembro.	43
Figura 21: Velocidade média do vento (m/s) nos meses de janeiro a dezembro.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Potencial eólico técnico <i>offshore</i> : estudos publicados.	26
Tabela 2: Parques eólicos em fase de licenciamento ambiental no Brasil.	29
Tabela 3: Comparação do potencial teórico <i>offshore</i> no Brasil.....	40
Tabela 4: Comparação do potencial técnico <i>offshore</i> no Brasil.	41

LISTA DE 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

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	JUSTIFICATIVA	14
3.	OBJETIVOS	17
4.	REVISÃO DA LITERATURA	18
4.1	RECURSO EÓLICO	18
	4.1.1 Circulação Geral da Atmosfera.....	19
	4.1.2 Circulação Atmosférica na Costa Brasileira	20
	4.1.3 Limitações do Recurso Eólico	24
4.2	ESTUDOS E PUBLICAÇÕES NO BRASIL	25
4.3	ASPECTOS DE ENGENHARIA	26
4.4	PROJETOS DE PARQUES EÓLICOS NO BRASIL.....	29
4.5	REQUISITOS AMBIENTAIS	29
	4.5.1 Impactos Ambientais.....	29
	4.5.2 Regulação Ambiental	30
5.	METODOLOGIA	31
5.1	REGIÃO DE INTERESSE.....	31
5.2	DADOS DE BATIMETRIA	32
5.3	REANÁLISE DE DADOS ATMOSFÉRICOS	33
5.4	LEI DE BETZ	34
5.5	VELOCIDADE MÉDIA MÍNIMA E DENSIDADE DE POTÊNCIA	36
5.6	POTENCIAL EÓLICO TEÓRICO E TÉCNICO	37

5.7	FERRAMENTAS DE PROCESSAMENTO.....	37
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
6.1	POTENCIAL TEÓRICO	39
6.2	POTENCIAL TÉCNICO	40
6.3	ANÁLISE MENSAL	42
7.	CONCLUSÃO	48

1. INTRODUÇÃO

A produção de energia elétrica a partir do vento tem se tornado importante fonte no que se refere a matriz de energia renovável no Brasil e no Mundo. Este crescimento vem associado à necessidade da realização de estudos direcionados à caracterização de áreas com potencial para o desenvolvimento de parques eólicos.

No território continental brasileiro, os projetos têm se consolidado e composto a matriz elétrica nacional de forma evidente. Contudo, na região marítima (*offshore*), a caracterização do potencial eólico expande os horizontes do planejamento energético e de desenvolvimento, visto que a implantação de parques eólicos *offshore* possui como indústria de base para execução dos projetos de engenharia a indústria de óleo e gás, já que esta possui domínio das técnicas de construção marítima de estruturas. A utilização deste *know-how*, associado a uma caracterização de possíveis parques eólicos com dados de reanálises atmosféricas mais modernas e técnicas computacionais mais robustas, poderá proporcionar uma sequência ao desenvolvimento da produção de energia elétrica renovável no Brasil à medida que os locais ótimos em terra se tornarem escassos.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo determinar o potencial eólico *offshore* no Brasil utilizando dados de reanálise atmosférica. Além disto, busca-se determinar o potencial técnico baseado nas cotas batimétricas que se adequem a métodos de construção marítima menos onerosos. De forma complementar, visa apresentar uma análise da variação da geração eólica mensal e discorrer sobre o impacto desta variabilidade no planejamento energético.

2. JUSTIFICATIVA

O aproveitamento do vento *offshore* na geração de energia elétrica emergiu como uma das tecnologias mais dinâmicas no cenário energético global. Em 2010, a capacidade de geração de energia eólica *offshore* aumentou mundialmente em mais de 1 gigawatt (GW) pela primeira vez. Já no ano de 2018, o acréscimo foi de 4,3 GW (Figura 1). A capacidade eólica *offshore* instalada passou de 3 GW em 2010 para 23 GW em 2018, um crescimento anual de quase 30%, superior ao de todas as outras fontes de eletricidade, com exceção da energia solar fotovoltaica. Em meados de 2019, havia mais de 5.500 turbinas *offshore* conectadas a rede elétrica em 17 países. O apoio político, por meio de incentivos ao desenvolvimento tecnológico, inclusão de energia eólica *offshore* no planejamento marítimo, apoio financeiro e esforços regulatórios (IEA, 2019), foi fundamental para essa expansão.

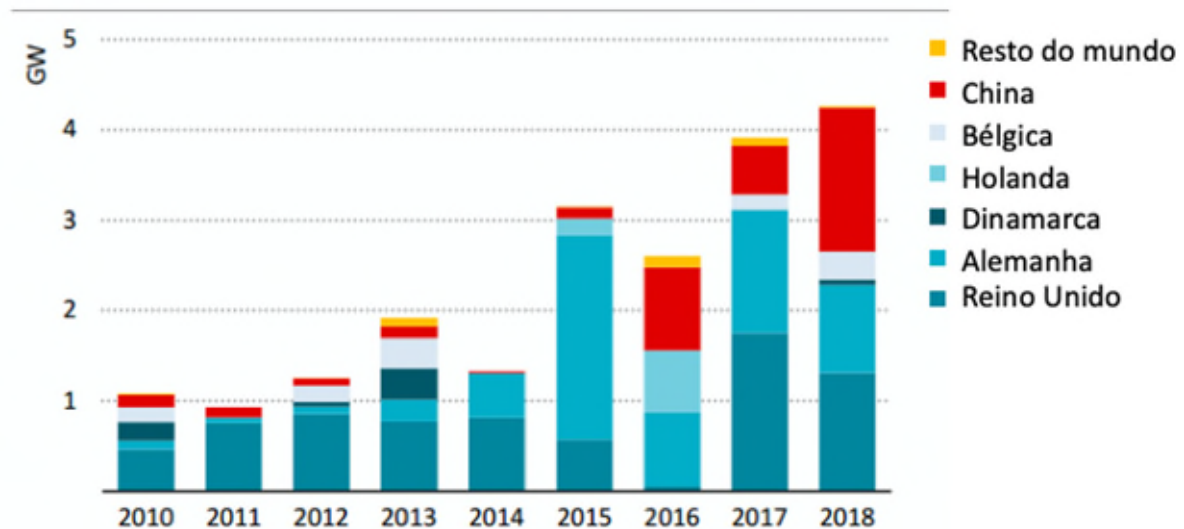


Figura 1: Acréscimo anual na capacidade eólica *offshore* global (em GW) período de 2010 a 2018. (Fonte: IEA, 2019)

O uso da energia eólica *offshore* começou a acelerar no final da primeira década do século XXI. No final de 2017, a capacidade global já era superior a 18.800 MW. Atualmente, a maior parte da capacidade está na Europa (84%), embora o desenvolvimento em outros lugares esteja avançando. A China começou a construir parques eólicos *offshore*, assim como a Coreia do Sul, Vietnã e Taiwan. Já o Japão está explorando seu uso como um potencial substituto para a capacidade nuclear (BREEZE, 2019).

A Figura 2 apresenta um mapa representativo onde os países que possuem parques eólicos offshore estão representados na cor azul. Complementarmente, a partir da lista dos 10 países com maior capacidade eólica instalada, foram marcados em verde os países desta lista que ainda não possuem parques eólicos em regime *offshore*, sendo estes Brasil, Canadá e Índia.

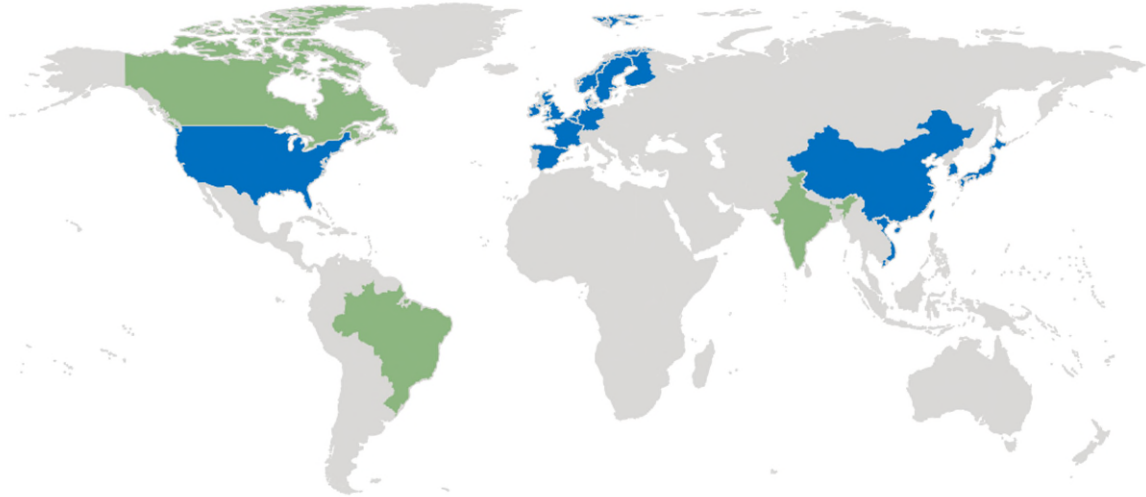


Figura 2: Mapa dos países com parques eólicos *offshore* (azul) e os 3 dentre os 10 maiores em capacidade eólica instalada que ainda não possuem parques eólicos offshore (verde). (Fonte: Autor, a partir dos dados do GWEC; IEA, 2019)

No Brasil, conforme descreve o Boletim Anual de Geração Eólica (2019), a capacidade instalada vem apresentando crescimento substancial desde 2009. A previsão é atingir mais de 19.000 MW até 2024 (Figura 3).



Figura 3: Evolução da capacidade eólica instalada no Brasil, em MW, entre 2005 e 2019 e valores previstos até 2024. (Fonte: ANEEL/ABEEólica, 2019)

O crescimento e protagonismo do Brasil podem ser verificados a partir dos dados publicados pelo GWEC (*Global Wind Energy Council*). Em 2018, o Brasil ocupava a oitava colocação entre os países com capacidade eólica acumulada (Figura 4).

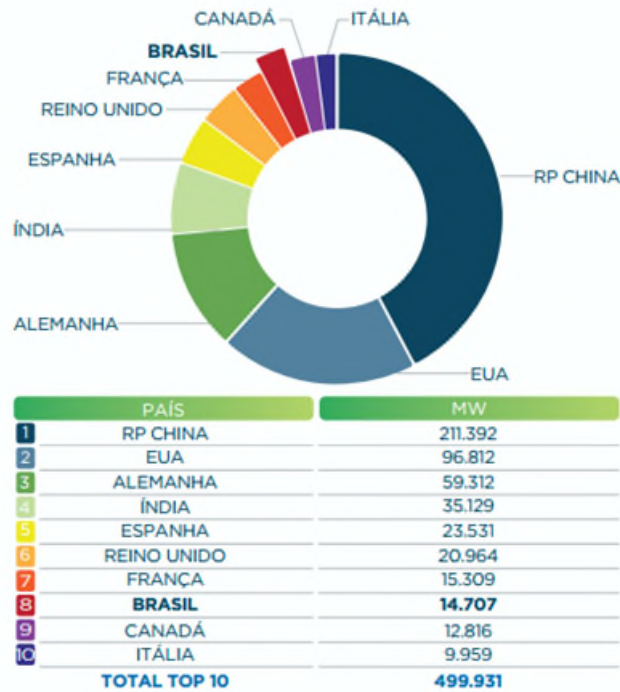


Figura 4: Capacidade de geração energia eólica acumulada no mundo em 2018. (Fonte: GWEC, 2018)

Contudo, a capacidade eólica no Brasil é apenas continental e não há nenhum parque eólico *offshore* construído ou em fase de construção. Sob essa perspectiva, os estudos que buscam determinar o potencial eólico *offshore*, as regiões mais favoráveis e as limitações do desenvolvimento de parques eólicos nessas regiões encontram um ambiente propício no que tange à contribuição científica para que o Brasil possa se posicionar de forma consolidada e assertiva em seu planejamento energético.

3. OBJETIVOS

Revisar o potencial eólico *offshore* no Brasil a partir de dados de reanálise atmosférica de domínio público utilizando sistemas de informações geográficas (SIG), *softwares* livres e linguagem de programação de alto nível para a análise estatística de dados.

Objetivos específicos:

- a) Calcular o potencial teórico: estimar o potencial eólico *offshore* no Brasil no território que compreende a Zona Econômica Exclusiva (ZEE);
- b) Calcular o potencial técnico: estimar o potencial eólico *offshore* no Brasil nos intervalos de cotas batimétricas tecnicamente mais favoráveis;
- c) Comparar os resultados obtidos com as estimativas de potencial conduzidas por outras universidades e instituições;
- d) Desenvolver análises do potencial de geração de energia eólica *offshore* sob a perspectiva sazonal.

4. REVISÃO DA LITERATURA

A seção aborda os aspectos teóricos do recurso eólico e suas limitações. Além disso, contempla os principais estudos e publicações no que compete à estimativa do potencial eólico, aos aspectos de engenharia envolvidos no aproveitamento do vento, aos projetos de parques eólicos no Brasil e aos requisitos ambientais.

4.1 RECURSO EÓLICO

O vento é o movimento do ar em resposta às diferenças de pressão na atmosfera. Este gradiente gera a força que faz com que as massas de ar se movam de uma região de alta para uma de baixa pressão, enquanto a rotação da Terra influencia a direção do movimento (Figura 5). As alterações na pressão atmosférica são causadas principalmente pelos efeitos diferenciais de aquecimento do Sol na superfície terrestre. Assim, a energia eólica pode ser considerada primariamente outra forma de energia proveniente do Sol (BREEZE, 2019).

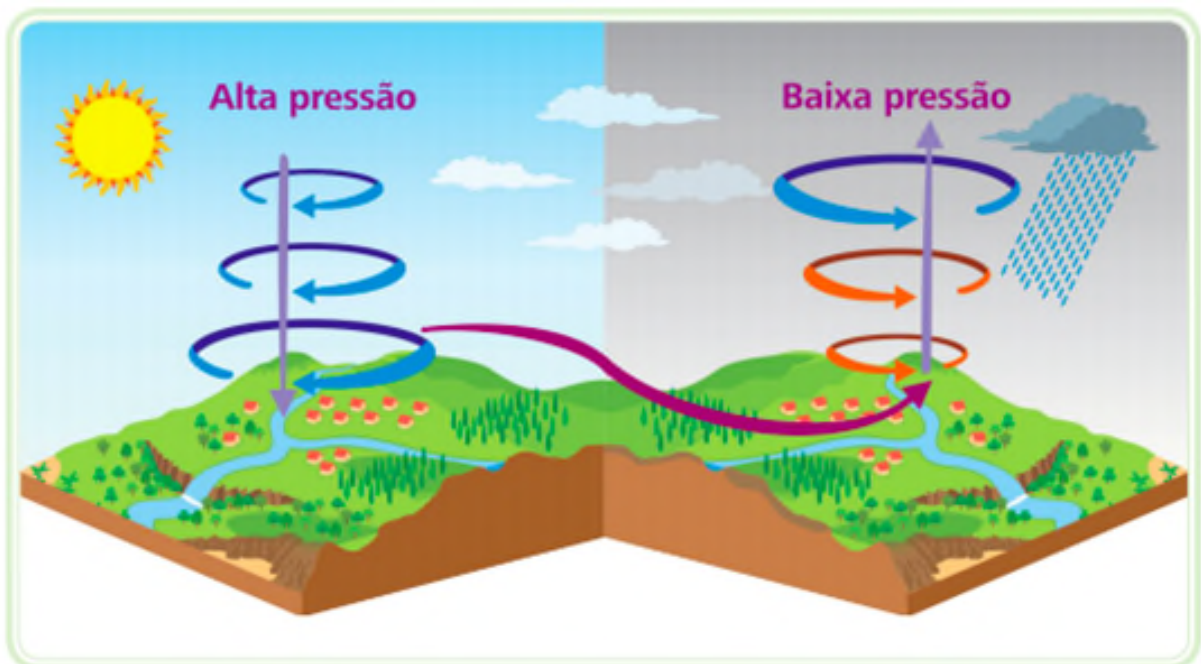


Figura 5: Esquemático da formação do recurso eólico, no Hemisfério Norte. (Fonte: OLIVEIRA, 2014)

4.1.1 Circulação Geral da Atmosfera

O aquecimento desigual da Terra entre as latitudes altas e baixas dá origem a um gradiente de temperatura que motiva o transporte de energia do equador para os polos e da superfície terrestre para cima. Isso ocorre, portanto, para garantir o equilíbrio radiativo da Terra em escala global (WALLACE; HOBBS, 2006).

Para Holton (2004), do ponto de vista termodinâmico, a atmosfera pode ser considerada uma "máquina de calor" que converte a energia potencial proveniente dos gradientes de temperatura em energia cinética, com dissipações promovidas pelo atrito.

Conforme descrito por Silva (2006), as três células de circulação meridional que atuam na troposfera, representadas na Figura 6, são:

- a) Célula de Hadley: localizada na faixa tropical, com ramo ascendente nas proximidades do equador, onde o maior aquecimento ocorre, gerando uma região de baixa pressão devido ao ar quente possuir menor densidade. O seu ramo descendente estaria a cerca de 30° de latitude.
- b) Célula de Ferrel: estabelecida na faixa das latitudes médias, com o ramo subsidente em torno de 30° e ramo ascendente na faixa dos 60° de latitude.
- c) Célula Polar: evidentemente, localizada na região polar.

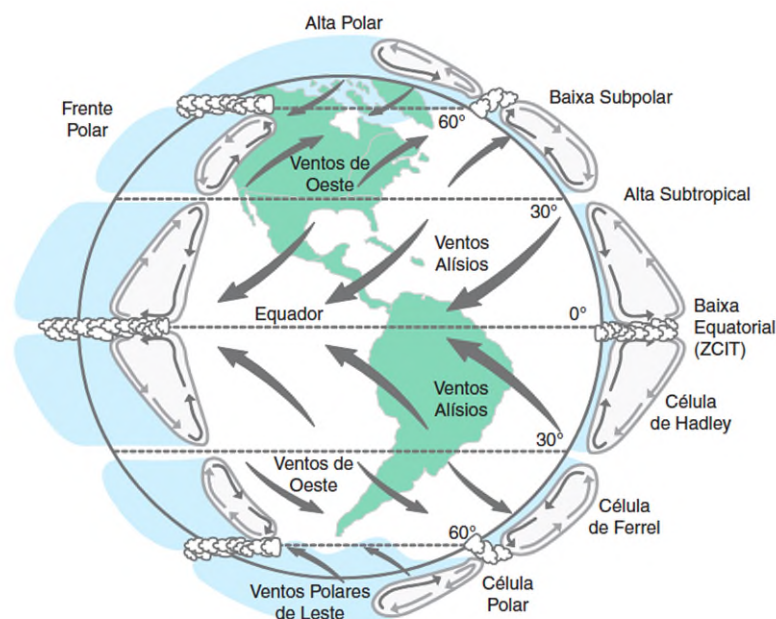


Figura 6: Representação esquemática da circulação geral da atmosfera. (Fonte: DEREZYNSKI; MENEZES, 2015)

Na região tropical (entre 30° N e 30° S), convergem em superfície os ventos alísios de sudeste (Hemisfério Sul) e de nordeste (Hemisfério Norte). O transporte de ar para equador proporcionado pelos ventos alísios ocorre acompanhado da evaporação da água do mar ocasionando um aumento da umidade. Na zona equatorial ocorre a elevação do ar, que se resfria, diminuindo sua umidade por condensação e precipitação. Na sequência, ele ganha novamente altitude e se desloca para zona temperada (contra-alísios), onde descende, aumentando sua temperatura e perdendo umidade para abastecer novamente os alísios. Este movimento norte-sul e leste-oeste é denominado Célula de Hadley-Walker (DERECZYNSKI; MENEZES, 2015).

A região de encontro dos alísios de nordeste (Hemisfério Norte) com os de sudeste (Hemisfério Sul) é denominada Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). A ZCIT é um setor de baixa pressão e instabilidade atmosférica, que promove a formação de intensas correntes ascendentes, que conduzem à geração de nuvens responsáveis pela precipitação. A ZCIT se posiciona, em média, na faixa latitudinal de 5° N, posição justificada pela maior área continental no Hemisfério Norte, que, por conseguinte, proporciona uma transferência de calor superior para a atmosfera (SILVA, 2006).

Próximo a latitude de 60° (zonas temperadas), na região de intersecção entre as células de Ferrel e Polar, ocorre a convergência dos ventos de sudeste (quente e úmido) e noroeste (frio e seco) no Hemisfério Sul e de nordeste e sudoeste no Hemisfério Norte. Neste setor de baixa pressão (Zona de Convergência Extratropical) se originam os sistemas frontais. O encontro destes ventos promove a elevação do ar que se move novamente em direção à zona dos cinturões anticiclônicos (célula de Ferrel) e em direção às calotas polares (célula Polar). É importante destacar que a célula de Ferrel possui um comportamento de circulação indireta, uma vez que o ar sobe frio e desce quente (WALLACE; HOBBS, 2006; DERECZYNSKI; MENEZES, 2015).

4.1.2 Circulação Atmosférica na Costa Brasileira

Sob a ótica sinótica, nas regiões Norte e Nordeste, a ZCIT (abordada no Capítulo 4.1.1) é um dos principais componentes responsáveis pela variação da velocidade do vento. A Figura 7 apresenta a posição aproximada da ZCIT nos meses de julho e janeiro.

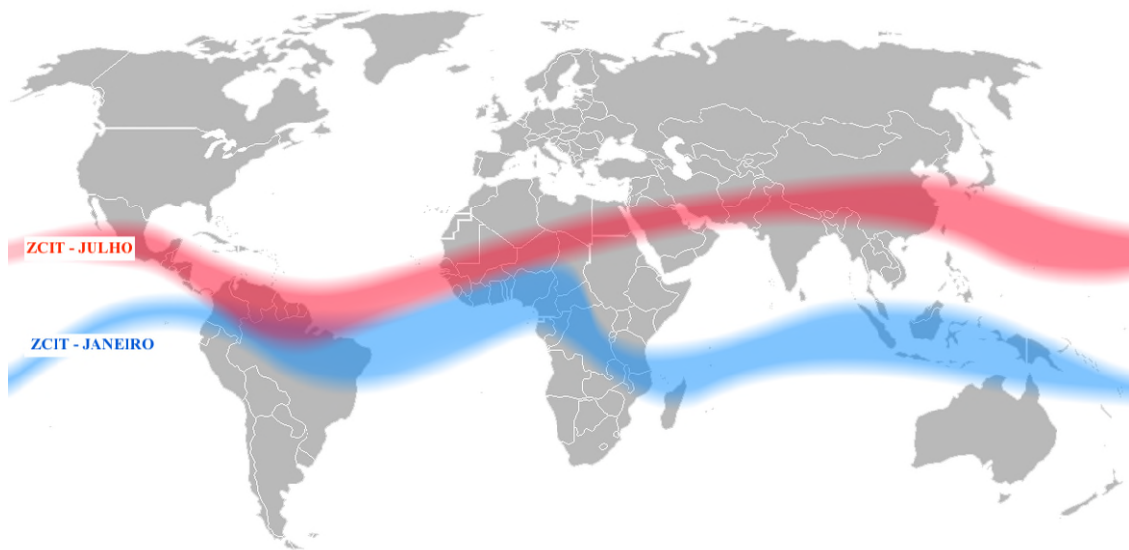


Figura 7: Variação da ZCIT ao longo do ano. (Fonte: <https://www.ilmeteo.it>, adaptado)

Nos meses de junho a novembro, a ZCIT se posiciona mais ao norte, em resposta à temperatura superficial mais elevada no Hemisfério Norte e à mudança de temperatura na superfície do Atlântico Sul, causada pelo aquecimento diferenciado da Terra, que intensifica os gradientes térmicos entre continente e o oceano, favorecendo os alísios de sudeste na região nordeste. Outro fenômeno que surge do diferencial térmico é a brisa, que se soma aos ventos alísios, promovendo assim, uma intensificação do vento atuantes nesta região. De forma oposta, no período de dezembro a março, ocorre o deslocamento para sul da ZCIT, aproximando-se da costa norte do continente sulamericano, o que resulta em uma redução na intensidade da velocidade dos ventos (HOLTON, 2004; NUNES, 2012).

Para as regiões Sul e Sudeste, e de forma mais significativa para a região Sudeste, o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) possui destaque no que se refere à variabilidade da intensidade do vento como aponta o estudo produzido por DEREZYNSKI; MENEZES (2015). Segundo os autores, climatologicamente, a intensidade média dos ventos é alterada pela posição do ASAS que varia sazonalmente.

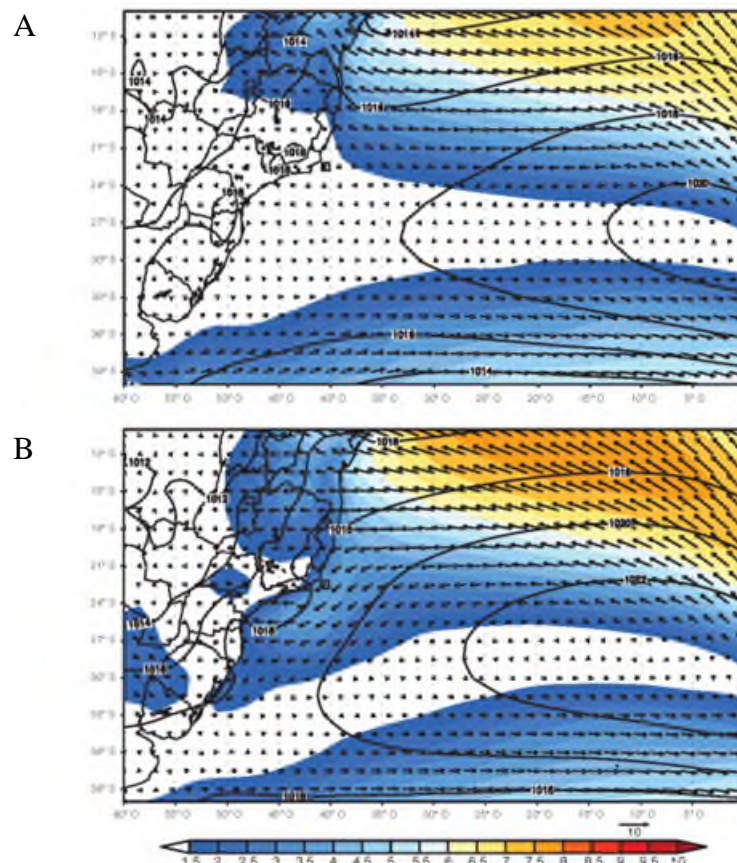


Figura 8: Campo de intensidade (m.s^{-1}) e direção do vento. Climatologia para o período de 1989 a 2010 para (A) maio, (B) setembro. (Fonte: DERECZYNSKI; MENEZES, 2015)

Ao analisar a Figura 8 é possível verificar a variação da posição do ASAS. No mês de maio (A), ela se posiciona aproximadamente em 28°S e 5°O, gerando ventos de baixa intensidade nas regiões Sudeste e Sul. À medida que o centro do ASAS se desloca para noroeste, em direção ao continente, ocorre um aumento do gradiente de pressão que proporciona ventos mais intensos nas regiões Sudeste e Sul em setembro (B).

Este comportamento do ASAS também foi constatado por Signorelli (2017) durante seu trabalho sobre variabilidade da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) usando reanálises. A Figura 9 apresenta variação sazonal da intensidade (a) e da posição (b) e da extensão (c) da ASAS a partir dos campos médios de pressão ao nível do mar. É possível verificar uma maior intensidade no segundo semestre do ano, além disso, sua posição se altera no sentido das latitudes mais baixas, principalmente entre junho e setembro.

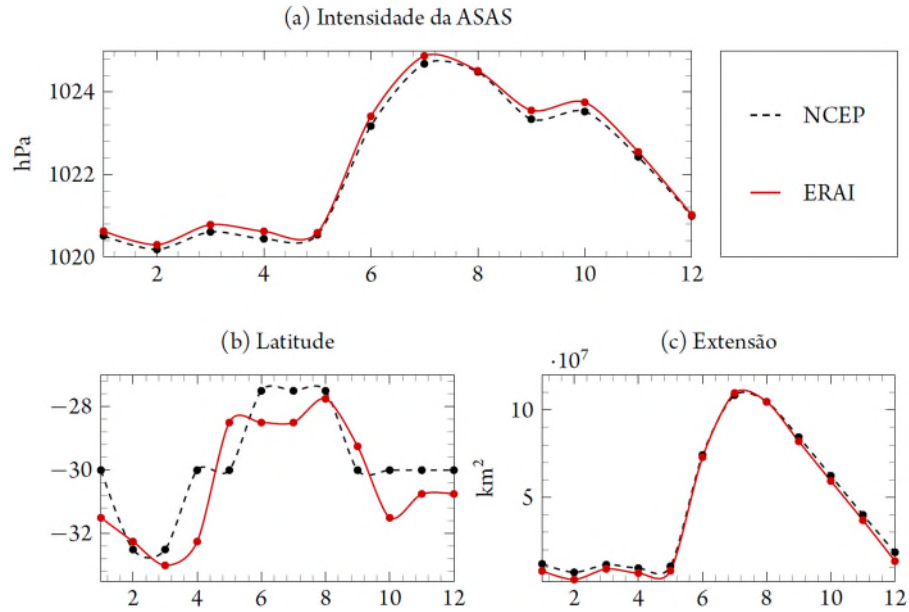


Figura 9: Variação sazonal da intensidade (a) e da posição (b) e da extensão (c) da ASAS a partir dos campos médios de pressão ao nível do mar. (Fonte: SIGNORELLI, 2017)

Na Figura 10, que apresenta a configuração dessa Alta a partir do campo da pressão ao nível do mar, é possível verificar que nos dados provenientes das duas diferentes reanálises (ERA-Interim e NCEP) o comportamento no que se refere a posição e intensidade do ASAS fica mais destacado e corrobora com o que foi descrito anteriormente.

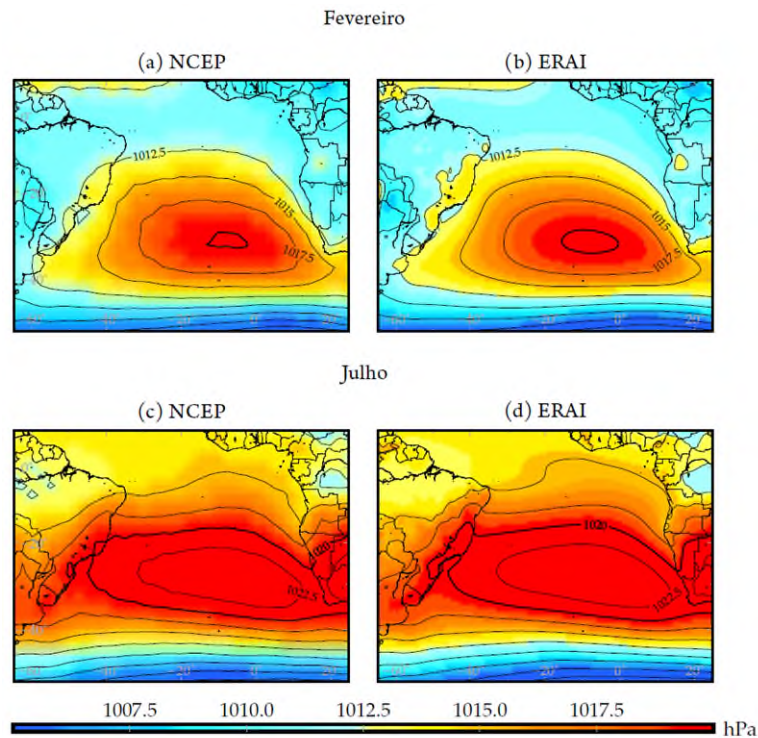


Figura 10: Configuração da ASAS, a partir da pressão ao nível do mar, para os meses de fevereiro (a,b) e julho (c,d) nas reanálises NCEP (a,c) e ERAI (b,d). (Fonte: SIGNORELLI, 2017)

Ainda no contexto da ASAS e sua influência no regime de ventos, é possível verificar na Figura 11, que apresenta valores médios mensais da intensidade do vento em unidades marítimas e a partir de dados de reanálises na costa da região Sudeste, uma variação na velocidade do vento ao longo dos meses que coincide com a movimentação da ASAS constatada nas análises dos campos de pressão.

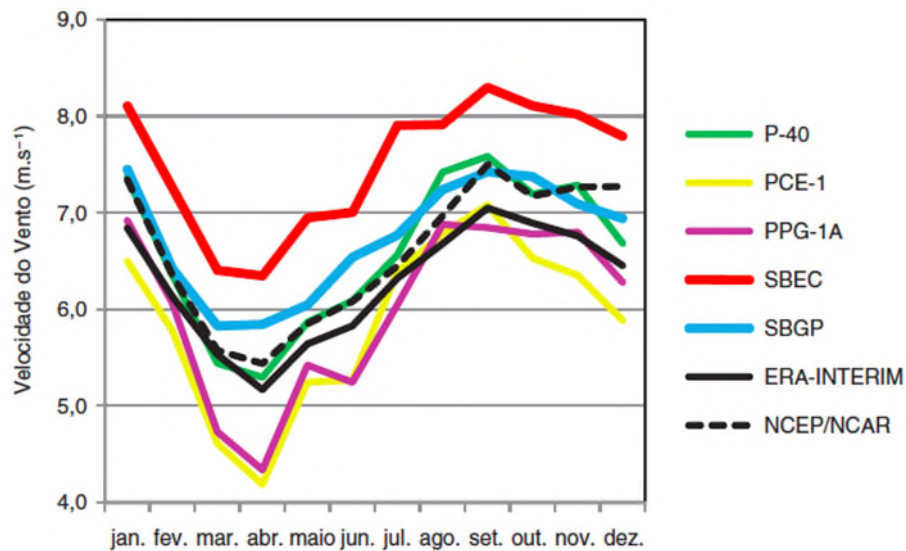


Figura 11: Valores médios mensais da intensidade do vento ($m.s^{-1}$), convertidos para uma altura de 10 m, no horário de 12 Z em unidades marítimas na região sudeste (P-40; PCE-1; PPG-1A; SBEC; SBGP) e reanálises ERA-Interim e NCEP/NCAR. (Fonte: DERECHYNSKI; MENEZES, 2015)

Corrêa (2018), durante seu estudo sobre climatologia dos ventos e potencial eólico *offshore* de Santa Catarina, atestou que a principal influência sobre os ventos de superfície na região Sul do Brasil é o sistema de alta pressão do Atlântico Sul. Do ponto de vista sazonal, o movimento do sistema ao longo do ano no oceano Atlântico Sul interfere no deslocamento dos sistemas frontais na costa brasileira, e determina, portanto, a intensidade do vento em baixos níveis na costa brasileira. Por esta razão, o outono e inverno são as estações que apresentam ventos com maior intensidade, justificado também pelas massas de ar polar, associadas às frentes frias, que atingem a região.

4.1.3 Limitações do Recurso Eólico

Previsões da produção de energia a partir da matriz eólica são necessárias no planejamento energético para que se torne possível o equilíbrio da carga entre as várias fontes

disponíveis, como gás, carvão, nuclear e hidrelétrica. Um fator desafiador para as empresas de energia eólica são os “eventos de rampa” (*ramp events*) do vento que não são previstos apropriadamente. Nesses casos, a velocidade do vento aumenta ou diminui vertiginosamente devido, por exemplo, à passagem de um sistema frontal, à variação na altura da zona de cisalhamento abaixo de um jato de baixo nível ou ondas estacionárias orograficamente forçadas (WARNER, 2010).

À medida que a energia eólica ganha protagonismo no suprimento total de energia, as previsões de modelos associados a estimativas energéticas devem se tornar cada vez mais precisas para evitar (1) desabastecimento (quedas de energia) se a velocidade do vento diminuir inesperadamente e (2) desperdício de combustíveis fósseis, liberando gases de efeito estufa desnecessariamente, se a velocidade do vento aumentar inesperadamente. Estes eventos se tornam desafiadores devido ao caráter de mesoescala de muitos dos processos meteorológicos citados acima e, ao fato de que os locais vantajosos para parques eólicos estão em terrenos e em zonas litorâneas complexos (WARNER, 2010).

4.2 ESTUDOS E PUBLICAÇÕES NO BRASIL

Os estudos e publicações que possuem como ponto em comum a estimativa do potencial eólico *offshore* no Brasil são apresentados a seguir.

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.

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 consideraram 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.

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.

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.

Do ponto de vista do potencial eólico técnico, alguns estudos e publicações foram realizadas para região *offshore* no Brasil. A Tabela 1 apresenta os principais trabalhos publicados, especificando a região analisada e a faixa de profundidade do mar usada em cada estimativa.

Tabela 1: Potencial eólico técnico *offshore*: estudos publicados.

Fonte	Região	Profundidade [m]	Potencial [GW]
CAMARGO SCHUBERT ENGENHEIROS ASSOCIADOS (2013)	Bahia	10-50	77,4
CAMARGO SCHUBERT ENGENHEIROS ASSOCIADOS (2014)	Rio Grande do Sul	10-50	114,2
(PIMENTA; KEMPTON; GARVINE, 2008)	Região Sul e Sudeste	0-100	115,0

4.3 ASPECTOS DE ENGENHARIA

As turbinas eólicas para uso *offshore* possuem como base a tecnologia desenvolvida para unidades *onshore*. No entanto, as turbinas *offshore* precisam de maior robustez devido ao ambiente mais severo. Além disso, as turbinas eólicas *offshore* podem ser significativamente maiores do que aquelas usadas em terra, o que é uma vantagem competitiva na compensação dos custos de um projeto marítimo (BREEZE, 2019).

A Figura 12 apresenta os principais componentes de uma turbina eólica de forma generalista, contudo, a depender do modelo, fabricante e capacidade, a presença ou não de alguns componentes apresentados na figura pode variar.

As principais fabricantes de aerogerados no mundo são: Siemens Gamesa (Alemanha) com 53% do mercado, seguida por MHI Vestas (Dinamarca) que possui 17% e em terceiro lugar a GE Wind (Estados Unidos da América) com 16% de participação (EPE, 2020).



Figura 12: Partes que compõe uma turbina eólica. (Fonte: OLIVEIRA, 2014)

Há uma variedade de estruturas que podem ser usadas para estabelecer a fundação de uma turbina eólica *offshore* (Figura 13).

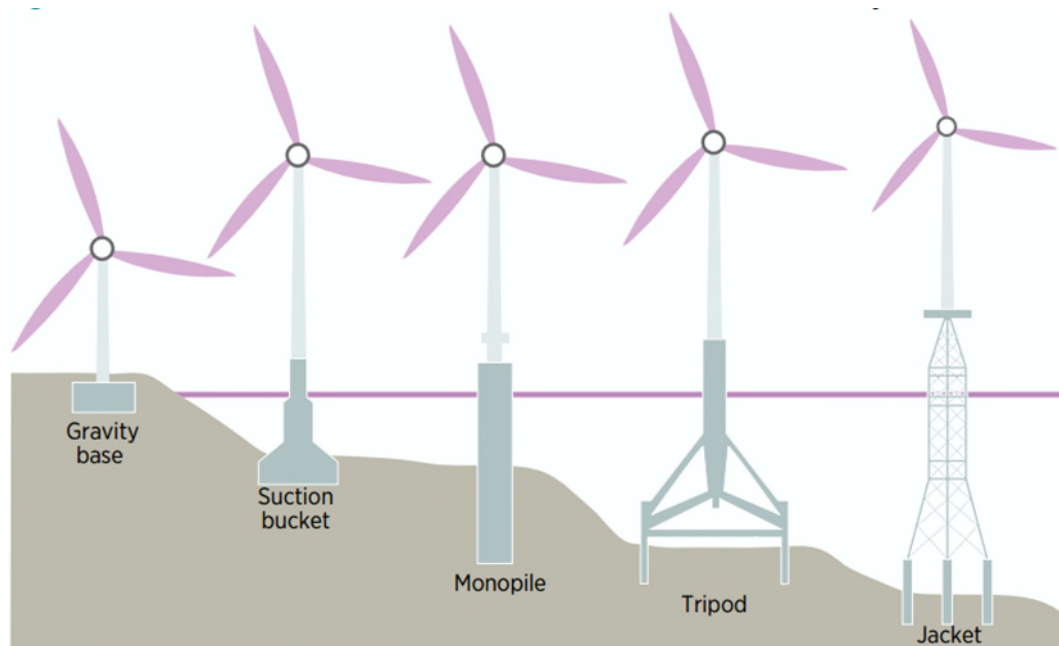


Figura 13: Fundações de turbinas eólicas *offshore*. (Fonte: IRENA, 2018)

Conforme descrito por EPE (2020), os pontos mais importantes durante a determinação do tipo de fundação que será utilizada são:

- a) Profundidade da locação;
- b) Condições do solo marinho;
- c) Características da turbina;
- d) Massas do rotor e da nacela (compartimento que abriga o gerador, eixo e controlador);
- e) Velocidade do rotor;
- f) Experiência e capacidade da cadeia de suprimentos (construção submarina).

Apesar de diversas opções construtivas, os projetos eólicos *offshore* tem majoritariamente optado pela estrutura *monopile* que concentra 80% dos projetos, seguido pela estrutura *tripod* com 6% e *gravity base* com 5%. (EPE, 2020)

Para águas mais profundas, é possível usar uma variedade de bases que irão operar ancoradas no fundo do mar para fornecer uma base ampla e estável. A estabilização de uma turbina eólica *offshore* em profundidades de água superiores a 60 m se torna cada vez mais cara, e a essa profundidade a única solução real é com a utilização de suporte flutuante (BREEZE, 2019). A Figura 14 apresenta as fundações que operaram ancoradas e podem ser utilizadas em projetos em águas mais profundas.

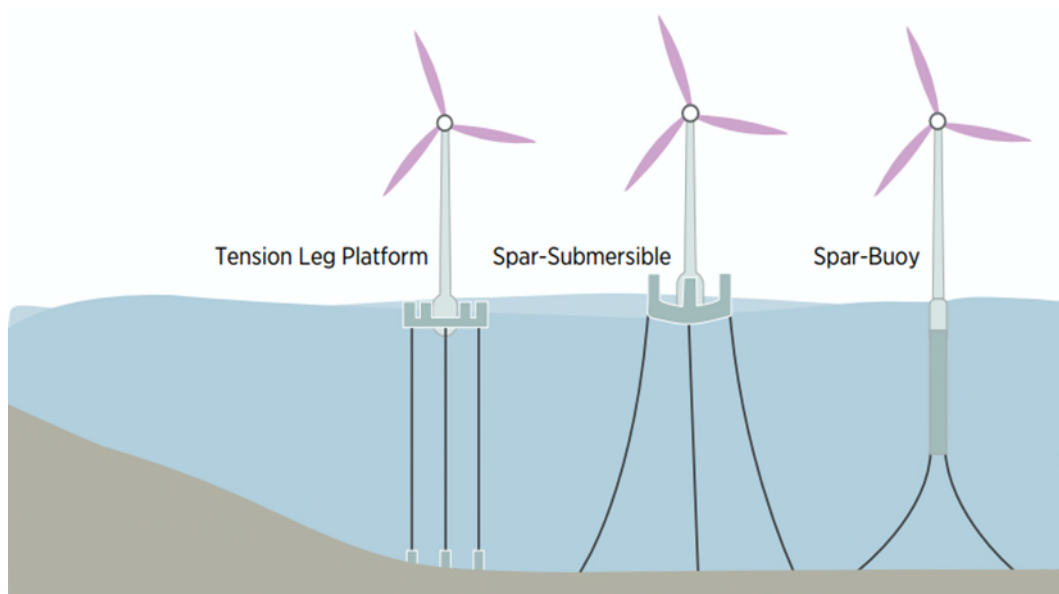


Figura 14: Fundações ancoradas de turbinas eólicas *offshore*. (Fonte: IRENA, 2018)

4.4 PROJETOS DE PARQUES EÓLICOS NO BRASIL

No contexto dos parques eólicos *offshore* no Brasil, existem seis projetos em fase de licenciamento ambiental que são apresentados na Tabela 2. Contudo, não há nenhum aerogerador instalado ou em fase de instalação na costa brasileira.

Tabela 2: Parques eólicos em fase de licenciamento ambiental no Brasil. (Fonte: adaptado de EPE, 2020)

Nome	Potência Total	UF	Início do licenciamento ambiental	Tipo de estudo
Parque Eólico <i>Offshore</i> 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 <i>Offshore</i>	5 MW	Rio Grande do Norte	2018	RAS
Complexo Eólico Marítimo Jangada	3 GW	Ceará	2019	EIA/RIMA
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

4.5 REQUISITOS AMBIENTAIS

4.5.1 Impactos Ambientais

Conforme descrito por Silva (2019), apesar da energia eólica ser uma fonte renovável, existem diversas externalidades negativas associadas a sua implementação em larga escala. No que compõe a conjuntura ambiental, os fatores abaixo podem ser considerados:

- Impacto Visual
- Impacto Sonoro
- Impactos sobre a fauna e flora
 - Aves e morcegos
 - Peixes
 - Mamíferos marinhos

4.5.2 Regulação Ambiental

Uma iniciativa com propositivas regulatórias tem sido conduzida em esfera nacional, inserida no contexto da agenda proposta pela Diretoria de Licenciamento Ambiental do IBAMA para capacitação técnica e definição de normas e procedimentos para o licenciamento ambiental de Complexos Eólicos *Offshore* (CEOs) (IBAMA, 2019).

Neste contexto, o IBAMA publicou uma nota técnica descrevendo os últimos movimentos relacionados à regulação ambiental no Brasil. A Nota Técnica Nº 2/2019/NLA-RS/DITEC-RS/SUPES-RS descreve a experiência europeia no planejamento e avaliação de impacto ambiental de parques eólicos *offshore*, as sugestões para o licenciamento no Brasil e a percepção de diversos setores e órgãos intervenientes nacionais sobre o tema.

5. METODOLOGIA

A seção descreve a região de interesse, os dados de reanálise atmosférica e de batimetria utilizados, os aspectos teóricos do aproveitamento do recurso eólico e os parâmetros que devem ser determinados previamente ao cálculo do potencial eólico.

A metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho é composta por revisão bibliográfica, aquisição de dados disponibilizados digitalmente, cálculos e processamento de dados, além de análise quantitativas e qualitativas de forma a determinar a capacidade de geração de energia eólica *offshore* no Brasil.

5.1 REGIÃO DE INTERESSE

A região de estudo deste trabalho compreende a Zona Econômica Exclusiva (ZEE) brasileira, que é área compreendida em 200 milhas marítimas a partir da linha de costa. Nesta região, a Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM), promulgada no Decreto N° 99.165, determina no artigo 56, parágrafo 1, que o país costeiro possui:

- a) direitos de soberania para fins de exploração e aproveitamento, conservação e gestão dos recursos naturais, vivos ou não vivos das águas sobrejacentes ao leito do mar, do leito do mar e seu subsolo, e no que se refere a outras atividades com vista à exploração e aproveitamento da zona para fins econômicos, como a produção de energia a partir da água, das correntes e dos ventos. (BRASIL, 1990, p. 5169).

Inseridas nos limites da ZEE, ainda foram determinadas as cotas batimétricas de interesse, como apresenta a Figura 15. Essas cotas foram determinadas em obediência aos requisitos de interesse técnico e construtivo dos aerogerados conforme descrito no Capítulo 5.6.

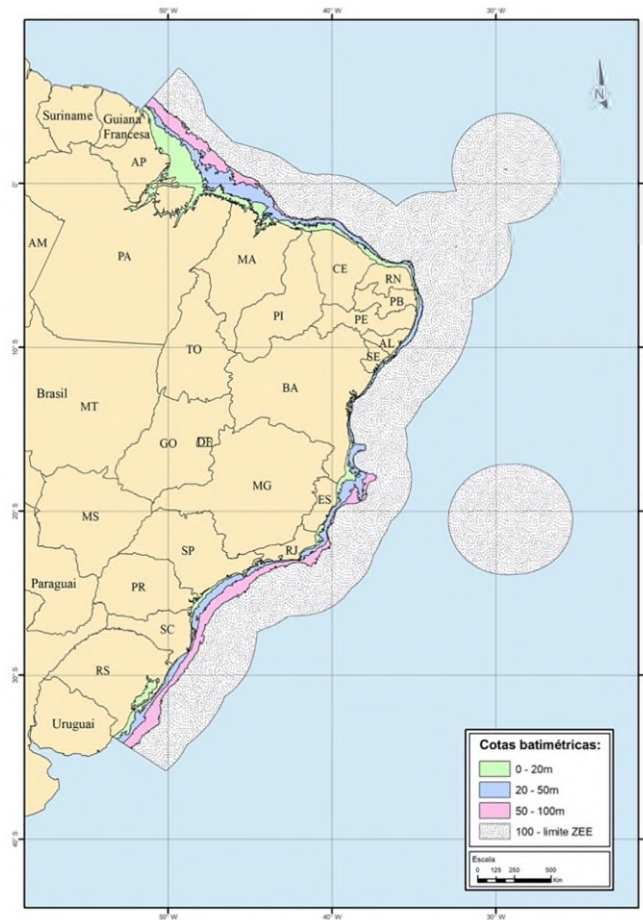


Figura 15: Cotas batimétricas de referência na ZEE do Brasil. (Fonte: Autor)

5.2 DADOS DE BATIMETRIA

De forma a obter uma análise mais detalhada do potencial eólico *offshore* brasileiro, foram utilizados dados de batimetria para demarcação de áreas de interesse a partir das cotas batimétricas (Figura 15). Essa divisão se deu no contexto da limitação construtiva e da fundação dos aerogeradores, conforme descreve o Capítulo 4.3.

Neste trabalho foi utilizado o conjunto de dados batimétricos em grade do GEBCO que é um modelo global de batimetria para oceano e áreas emersas em intervalos de 15 segundos de arco. Os dados podem ser obtidos diretamente no endereço eletrônico da organização: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/.

O objetivo do GEBCO é fornecer a batimetria mais atualizada e disponível ao público. A organização opera sob controle da Organização Hidrográfica Internacional (IHO) e da

Comissão Oceanográfica Intergovernamental (IOC da UNESCO) (GEBICO COMPILATION GROUP, 2019).

5.3 REANÁLISE DE DADOS ATMOSFÉRICOS

O conjunto de dados de reanálise utilizado neste trabalho foi o ERA5, desenvolvido pelo ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*).

O ERA5 fornece saídas horárias de um grande número de 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.

Os dados foram produzidos utilizando a assimilação de dados 4D-Var, conforme descreve o documento CY41R2 do Sistema (IFS) de Previsão Integrada (ECMWF, 2016), com 137 níveis na vertical, sendo 0,01 hPa o nível superior. Os dados atmosféricos estão disponíveis nesses níveis, em 37 níveis interpolados de pressão, em 16 de temperaturas potenciais e em 1 nível de vorticidade. O conjunto de dados ERA5 utiliza uma grade (31 km) de alta resolução (HRES) e um conjunto de dez membros de resolução reduzida (EDA). Os dados estão disponíveis em uma frequência sub-diária e mensal e consistem em análises e previsões curtas (18 horas), inicializadas duas vezes ao dia a partir das análises às 06 e 18 UTC (HENNERMANN, 2019, p. 5).

Para estimativa de potencial eólico, foram utilizados os dados de vento zonal e meridional para a altura de 100 m disponibilizados pelo ERA5. Para adquirir os dados, o ECMWF disponibiliza o *download* direto através do endereço eletrônico a seguir: <https://cds.climate.copernicus.eu/#!/search?text=ERA5&type=dataset>. Alternativamente, o ECMWF ainda disponibiliza uma API (*Application Programming Interface*) que pode ser requisitada a partir de um *script* em linguagem de programação *python*, neste caso, a aquisição dos dados será realizada de acordo com o que foi previamente indicado no *script* de forma automatizada. Esta última opção, utilizando um *script* em linguagem de programação *python*, foi a alternativa utilizada neste trabalho.

5.4 LEI DE BETZ

Para avaliar o desempenho dos aerogeradores, pode-se comparar a potência útil com a energia cinética que flui através de uma área hipotética perpendicular à direção do vento, que é igual à área circular que compreende o rotor do aerogerador. Conforme descrito por Betz (2013), com um diâmetro de rotor \mathcal{D} , a área é $F = \frac{D^3\pi}{4}$ e, se a velocidade do vento for v , a energia que flui por segundo através dessa área é:

$$E = \frac{\rho}{2} F v^3 \quad (5.1)$$

onde ρ denota a densidade do ar.

A relação entre a potência útil no eixo do motor e a energia é:

$$\eta_F = \frac{2L}{\rho F v^3} \quad (5.2)$$

que pode ser definido como parâmetro de eficiência de energia em toda a área.

Considerando a velocidade w que está fluindo através da área rotor, a velocidade do vento que interage com a região frontal do rotor é v e como resultado do aproveitamento da energia, a velocidade pode diminuir para um valor de v_1 . Definindo m a massa de ar por segundo que flui através de uma porção da área do rotor ΔF ; consequentemente, essa massa exerce uma força axial no aerogerador igual a:

$$\Delta P = m(v - v_1) \quad (5.3)$$

onde a massa deve ser desacelerada pela ação da força oposta equivalente por segundo em uma quantidade igual à diferença de velocidade $(v - v_1)$.

A velocidade do ar que flui através da área é w , e o vento realiza o trabalho por segundo definido por:

$$\Delta L = \Delta P \cdot w = m(v - v_1)w \quad (5.4)$$

Mas este trabalho é evidente a partir da redução da energia cinética, que diminui de $\frac{1}{2}mv^2$ para $\frac{1}{2}mv_1^2$. Ao igualar o trabalho realizado e a energia cinética perdida, obtemos:

$$w = \frac{1}{2}m(v + v_1) \quad (5.5)$$

A partir das equações anteriores é possível obter o trabalho que é convertido pela área ΔF :

$$\Delta L = \rho \cdot \Delta F \cdot \frac{v^2 - v_1^2}{2} \cdot \frac{v + v_1}{2} \quad (5.6)$$

Considerando o quanto é preciso aumentar a velocidade v_1 do ar que interage atrás do rotor para maximizar a energia convertida por uma porção específica da área ΔF a uma dada velocidade do vento v , utiliza-se $\frac{\partial \Delta L}{\partial v_1}$ para obter:

$$v_1 = \frac{v}{3} \quad (5.7)$$

E então:

$$w = \frac{2}{3}v \quad (5.8)$$

Ao inserir o valor de v_1 na equação anterior, obtemos a energia máxima que pode ser convertida pela área ΔF :

$$\Delta L_{m\acute{a}x} = \frac{8}{27}\rho\Delta Fv^3 \quad (5.9)$$

Desta forma a maior potência teórica para um rotor eólico é definida por:

$$L_{m\acute{a}x} = \frac{8}{27}\rho Fv^3 \quad (5.10)$$

onde F denota novamente toda a área circular varrida pelo rotor.

Se agora inserirmos esse valor na definição do parâmetro de eficiência de energia, obteremos seu limite superior teórico:

$$\eta_{Fm\acute{a}x} = \frac{2L_{m\acute{a}x}}{\rho Fv^3} = \frac{16}{27} \text{ (59\%)} \quad (5.11)$$

Desta forma, obtemos o valor percentual limite de aproveitamento do recurso eólico, isto é, apenas 59% do vento que transpassa um aerogerador pode ser convertido em energia. É importante ressaltar que esta parte aproveitável da energia ainda estará sujeita as condições de eficiência do gerador e dos componentes eletromecânicos do sistema.

5.5 VELOCIDADE MÉDIA MÍNIMA E DENSIDADE DE POTÊNCIA

Para realização do cálculo do potencial de geração de energia eólica duas variáveis devem ser estabelecidas: a velocidade do vento média mínima e a densidade de potência.

A velocidade do vento média mínima (*cutoff*) é uma restrição imposta que tem como base as limitações das turbinas comerciais. Conforme descrito por Silva (2019), há divergência entre diversos estudos no que se refere a definição do valor de velocidade do vento média mínima, com valores que variam entre 6,0 e 8,0 m/s.

Neste trabalho, baseado na recomendação do NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), consolidada por Beiter e Musial (2016), o valor de 7,0 m/s foi utilizado.

O valor da densidade de potência ou taxa de ocupação do parque é um valor que representa a distribuição espacial uniforme de turbinas com especificações técnicas iguais. Este valor é utilizado como referência para o cálculo do potencial eólico e considera as limitações de eficiência descritas no Capítulo 5.4.

Este valor, na prática, representa uma aproximação pois é dependente da turbina escolhida e da distribuição das turbinas na área do parque (SILVA, 2019).

Assim como na mínima velocidade média do vento, a densidade de potência utilizada também possui valores diferentes em diversas publicações científicas. Neste trabalho, foi utilizado como referência o NREL, conforme Beiter e Musial (2016), que determinou a densidade de potência como 3,0 MW/km² em sua última avaliação. É importante destacar que estes autores alteraram este valor de 5,0 para 3,0 MW/km², pois foi considerada a evolução nos diâmetros dos aerogeradores que conseqüentemente necessitarão de maior espaçamento entre as turbinas.

5.6 POTENCIAL EÓLICO TEÓRICO E TÉCNICO

O potencial eólico teórico é definido como o potencial de geração de energia eólica considerando uma taxa de ocupação uniforme, com aerogeradores idênticos em toda a área de interesse, e a mínima velocidade média do vento (conforme estabelecida no Capítulo 5.5). A partir da aplicação do critério de velocidade média mínima do vento, obtém-se a área útil, isto é, a área onde a velocidade do vento é superior ao critério estabelecido. Para obter o potencial teórico, basta multiplicá-la pelo valor de densidade de potência (BEITER; MUSIAL, 2016; SILVA, 2019).

$$\text{Potencial teórico} = \text{área útil} \times \text{densidade de potência} \quad (5.12)$$

O potencial técnico utiliza as mesmas premissas definidas no potencial teórico, porém introduz uma limitação respaldada nas cotas batimétricas de interesse técnico. O potencial técnico, é, portanto, o potencial eólico compreendido nas faixas de profundidade mais econômica e tecnicamente viáveis.

5.7 FERRAMENTAS DE PROCESSAMENTO

Os dados de reanálise utilizados neste trabalho foram disponibilizados pelo ECMWF em formato netCDF e para prosseguir com o seu processamento (obtenção de médias, compilação e recorte da área de interesse) foi utilizado um conjunto de linhas de comando designado CDO (*Climate Data Operators*) que é mantido pelo MPIMET (*Max-Planck-Institute für Meteorologie*).

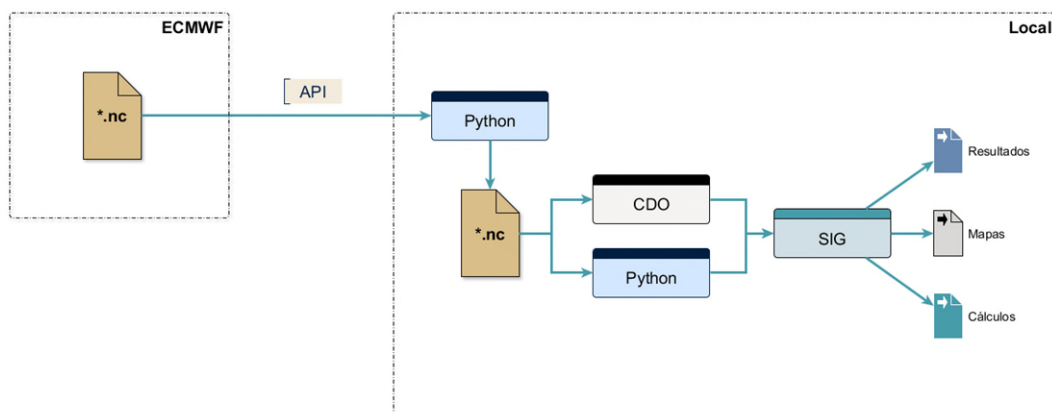


Figura 16: Diagrama das ferramentas de processamento utilizadas. (Fonte: Autor)

De forma complementar, conforme apresentado pela Figura 16, a linguagem de programação *python* foi utilizada para auxiliar no *download* automático dos dados, bem como em operações estatísticas e agregação de arquivos para facilitar a sua utilização.

Além disso, *softwares* livres de sistemas de informações geográficas (SIG) foram empregados nas etapas de geoprocessamento dos dados, isso inclui a integração dos dados cartográficos, batimétricos e de reanálise. Posterior a isto, foram empregadas ferramentas internas do *software* de SIG para cálculo das áreas de interesse e produção dos mapas.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da metodologia proposta, foram obtidos os resultados das estimativas de potencial eólico *offshore* sob a perspectiva teórica e técnica, cujos valores são apresentados neste capítulo.

6.1 POTENCIAL TEÓRICO

O primeiro passo no desenvolvimento da metodologia para o cálculo do potencial teórico é a obtenção dos limites, dentro da área de estudo, onde a velocidade média do vento é superior a 7,0 m/s. A Figura 17 apresenta o resultado da utilização deste critério e é possível identificar em verde as áreas onde a velocidade média do vento é superior a 7,0 m/s.

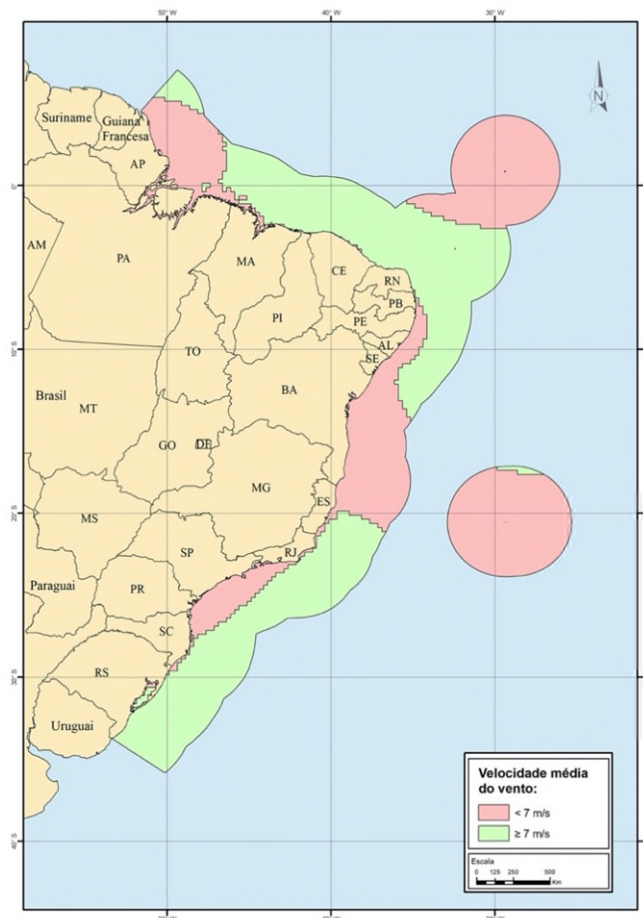


Figura 17: Velocidade de *cutoff* na ZEE do Brasil. (Fonte: Autor)

Em função da área onde o valor da velocidade média do vento foi superior a 7,0 m/s e considerando a densidade de potência em 3,0 MW/km², o potencial teórico para toda Zona Econômica Exclusiva (ZEE) do Brasil obtido foi de 6.243 GW. Em termos comparativos, a usina de Itaipu, por exemplo, possui 14 GW de potência instalada.

Ainda é possível, a partir da Figura 17, elencar os locais onde a velocidade média do vento foi superior a 7,0 m/s, desde a costa até o término da ZEE, e que conseqüentemente se apresentam como regiões em que estudos mais aprofundados podem ser conduzidos, sendo estes: Maranhão, Ceará, Rio Grande do Norte, norte da Paraíba e o sul Rio Grande do Sul. Outras regiões como sul do Espírito Santo, norte do Rio de Janeiro e sul de Santa Catarina apresentam condições de vento favorável, porém com restrições nas proximidades da costa.

A Tabela 3 apresenta a comparação entre o resultado obtido neste trabalho e os valores encontrados por outros autores.

Tabela 3: Comparação do potencial teórico *offshore* no Brasil. (Fonte: Autor)

Fonte	Base de dados	Período	Resolução Espacial [km]	Potencial Teórico [GW]
Autor	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

No cálculo do potencial teórico para a ZEE do Brasil, Silva (2019) obteve 10.800 GW e EPE (2020) calculou o potencial eólico em 6.767 GW. Ambos os trabalhos utilizaram 7,0 m/s como velocidade mínima, altura de referência em 100 m e dados provenientes de reanálise de dados atmosféricos.

Além destes, Ortiz e Kampel (2011) estimou o valor de 1.789 GW para o potencial eólico utilizando dados de velocidade do vento estimadas por satélite e altura de referência em 80 m.

6.2 POTENCIAL TÉCNICO

Tendo como base os resultados obtidos no Capítulo 6.1, a análise prosseguiu no âmbito das limitações impostas pelas cotas batimétricas de interesse ao longo de toda costa brasileira.

O potencial eólico para a faixa de 0 até 20 m de profundidade foi de 190 GW, seguido por 256 GW para a faixa de 50 até 100 m. A faixa de 20 até 50 m foi a que apresentou maior potencial para as faixas abaixo de 100 m, contabilizando 334 GW conforme ilustra a Figura 18.

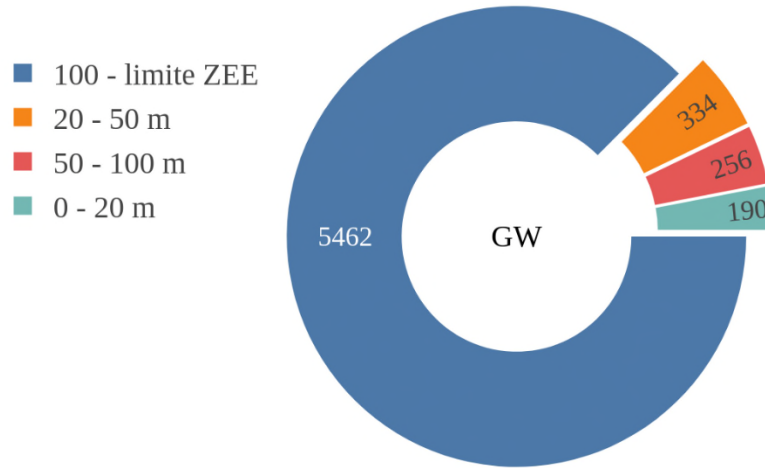


Figura 18: Resultado do potencial técnico na ZEE do Brasil (Fonte: Autor)

No contexto de publicações que visam determinar o potencial eólico técnico, a Tabela 4 apresenta os resultados obtidos por EPE (2020) e Ortiz e Kampel (2011).

Tabela 4: Comparação do potencial técnico *offshore* no Brasil. (Fonte: Autor)

Cota Batimétrica	Potencial [GW]		
	Autor	EPE Roadmap (2020)	Ortiz, G. Kampel, M. (2011)
0 - 20 m	190	276	176
20 - 50 m	334	421	223
50 - 100 m	256	237	207
100 - limite ZEE	5462	5833	1.174

Os valores obtidos neste trabalho estão em maior concordância com os publicados por EPE (2020), que também utilizou a base de dados ERA5, porém com um período menor (2000 até 2017). Já Ortiz e Kampel (2011) utilizou de metodologia e base de dados totalmente distinta da empregue neste trabalho, o que inviabiliza qualquer análise comparativa mais profunda no que tange as diferenças entre os resultados.

6.3 ANÁLISE MENSAL

Os mesmos critérios foram utilizados para determinar o potencial eólico para cada mês, isto é, velocidade mínima de 7,0 m/s e densidade de potência de 3,0 MW/km².

A partir da análise da Figura 19 é possível verificar que existe uma variabilidade significativa ao longo do ano que é função do regime de ventos. No mês de abril, a estimativa de geração é de apenas 2.000 GW, enquanto o mês de setembro alcança a marca dos 10.000 GW.

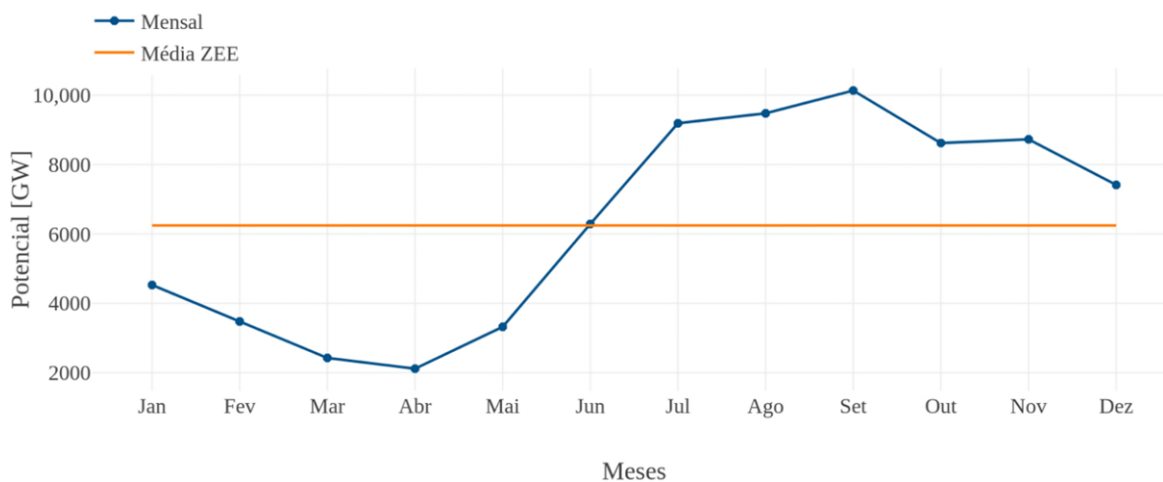


Figura 19: Potencial eólico *offshore* no Brasil: análise mensal. (Fonte: Autor)

No que se refere ao planejamento energético, análises de natureza sazonal, como a apresentada acima, agregam informações importantes principalmente quando é necessário realizar a combinação de diversas fontes de energia para atender a demanda da população, sem a ocorrência de desperdício ou desabastecimento. A Figura 19 apresenta um resultado do ponto de vista macro e subsidia uma análise para toda a costa brasileira, contudo, análises como esta podem ser replicadas em regiões menores e específicas onde se pretende desenvolver um projeto de parque eólico.

Prosseguindo na análise dos resultados expostos acima, propõe-se uma verificação dos dados de velocidade média do vento que subvencionaram as estimativas de potencial eólico. A partir da avaliação da Figura 20, que apresenta a velocidade média do ventos nos meses de abril (A) e setembro (B), é possível notar a mobilidade da área hachurada (intensidade média do vento ≤ 7 m/s). Em abril (A), é possível atestar que a área hachurada preenche a costa brasileira

em porção expressiva, excetuando-se apenas o sul do Rio Grande do Sul e o norte do Rio Grande do Norte. Já em setembro (B), verifica-se que a área hachurada se retrai comprometendo apenas a costa do Amapá e trechos menores na costa da Bahia, São Paulo e Paraná. Diante do exposto, os dados de ventos representados na Figura 20 respaldam os resultados de potencial eólico mensal obtidos neste trabalho.

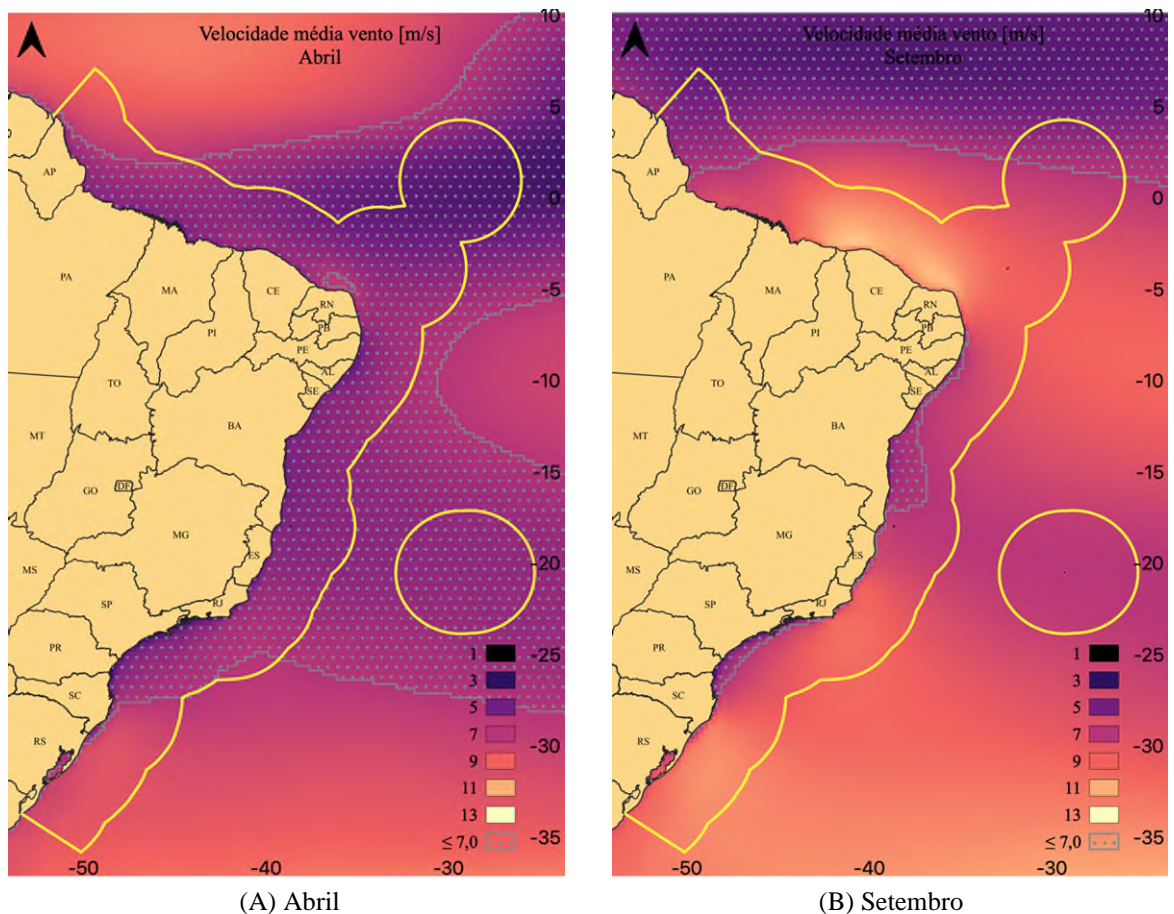


Figura 20: Velocidade média do vento (m/s) nos meses de abril e setembro. (Fonte: Autor)

Para além do exposto acima, é possível estender a análise para a Figura 21A–L, e nota-se que as únicas regiões que se mantêm com velocidade média do vento acima de 7,0 m/s durante todos os meses do ano são: sul do Rio Grande do Sul e o norte do Rio Grande do Norte. Desta forma, ambas localidades se destacam como menos suscetíveis aos impactos da variabilidade sazonal da velocidade do vento.

Para obter uma análise mais concisa dos resultados obtidos sob a perspectiva mensal é preciso abordar o regime de circulação geral da atmosfera e quais fenômenos atmosféricos afetam a velocidade do vento na costa brasileira ao longo dos meses do ano. É preciso destacar que há um conjunto complexo de fenômenos meteorológicos em diferentes escalas no âmbito da

dinâmica de ventos que atuam na costa brasileira, não sendo a abordagem detalhada destes o escopo do trabalho em questão.

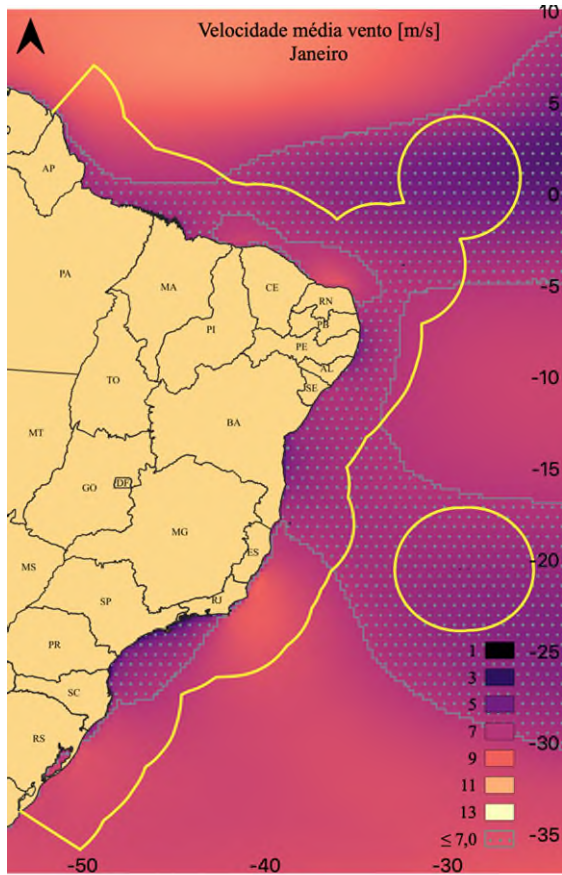
Nota-se que há um aumento expressivo das áreas hachuradas (em que a intensidade média do vento é inferior a 7 m/s) nos meses de fevereiro (Figura 21B) a maio (Figura 21E), especialmente nas regiões Norte, Nordeste e Sudeste. Como apresentado no Capítulo 4.1.1, a queda na intensidade do vento nas regiões Norte e Nordeste é consequente do deslocamento para sul da ZCIT, que ocorre no período de dezembro a março (HOLTON, 2004; NUNES, 2012).

Além disso, conforme apresenta a Figura 9, entre fevereiro e março, a ASAS encontra-se em sua posição mais austral, o que favorece a incidência de vento de intensidade baixa na região Sudeste (SUN; COOK; VIZY, 2017; DEGOLA, 2013; DEREZYNSKI; MENEZES, 2015).

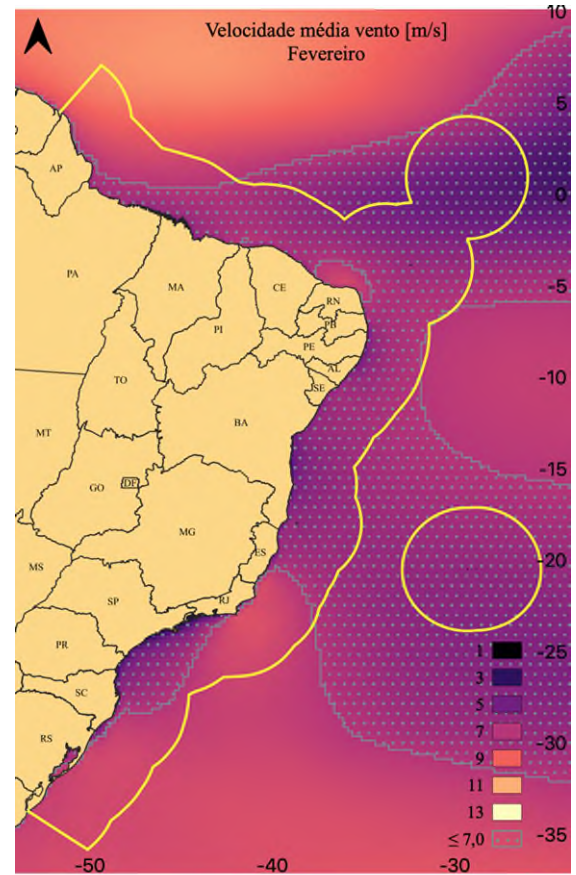
Entre julho (Figura 21F) e novembro (Figura 21K), entretanto, há uma queda na extensão das áreas hachuradas nestas regiões. Nas regiões Norte e Nordeste o vento se intensifica a medida que a ZCIT migra para norte (HOLTON, 2004; NUNES, 2012). Na região Sudeste, observa-se que a ASAS se intensifica e se movimenta para norte neste período (Figura 9), o que favorece o aumento do gradiente de pressão, e consequentemente, da velocidade do vento (SUN; COOK; VIZY, 2017; DEGOLA, 2013; DEREZYNSKI; MENEZES, 2015).

A variação da intensidade do vento descrita acima corrobora com as estimativas mensais de produção eólica encontradas no presente trabalho. De forma complementar, ao analisar a Figura 11, que apresenta os valores médios de intensidade do vento em unidades marítimas na região Sudeste e de dados de reanálises, é possível notar que a variabilidade mensal coincide com o resultado da estimativa de geração eólica apresentada na Figura 19.

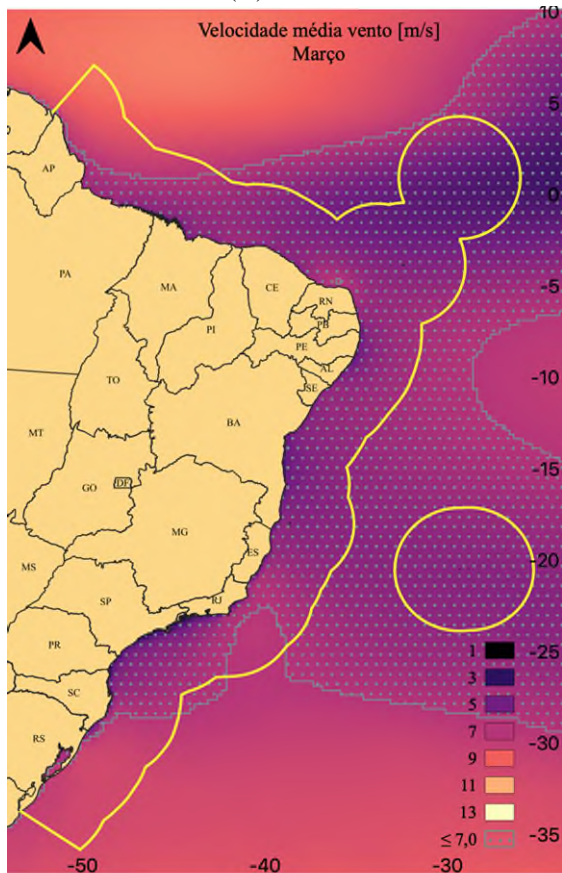
Embora a região Sul também seja bastante afetada pela atuação da Alta Pressão do Atlântico Sul, uma vez que ela determina a entrada, mais ou menos intensa, dos ventos em baixos níveis na costa brasileira (CORRÊA, 2018), é possível notar que a área hachurada (velocidade média mínima < 7,0 m/s) não apresenta variação relevante ao longo dos meses (Figura 21A–L). Ainda sim, nota-se o aumento na intensidade média do vento nos meses de outono e inverno, associado à passagem de frentes frias pela região.



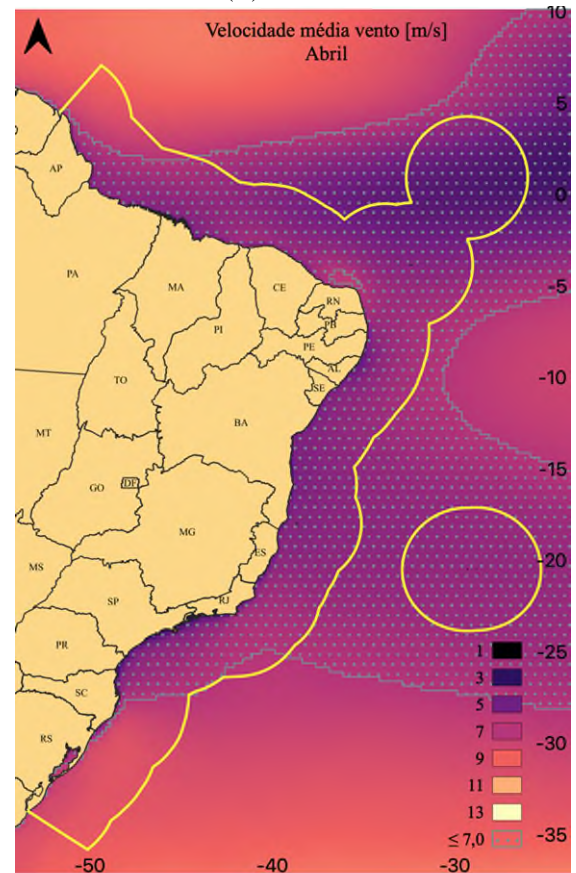
(A) Janeiro



(B) Fevereiro

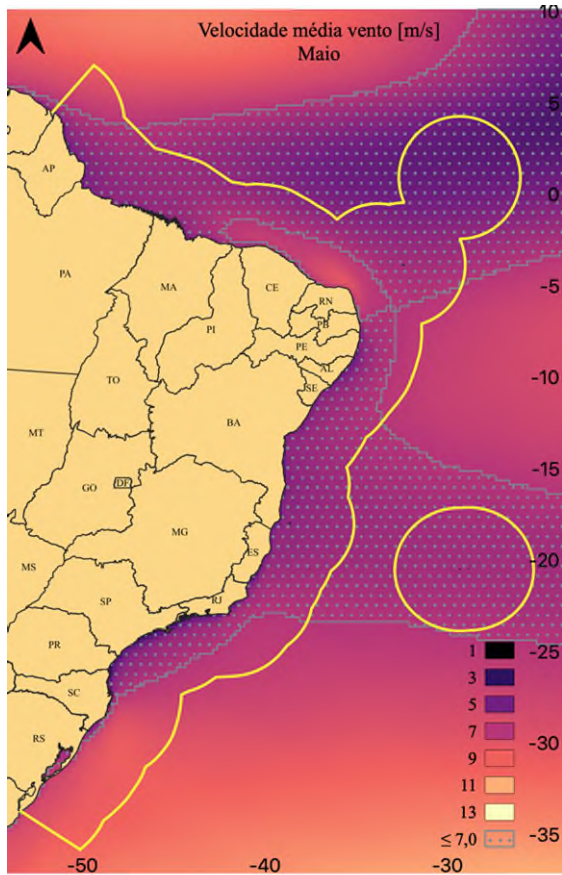


(C) Março

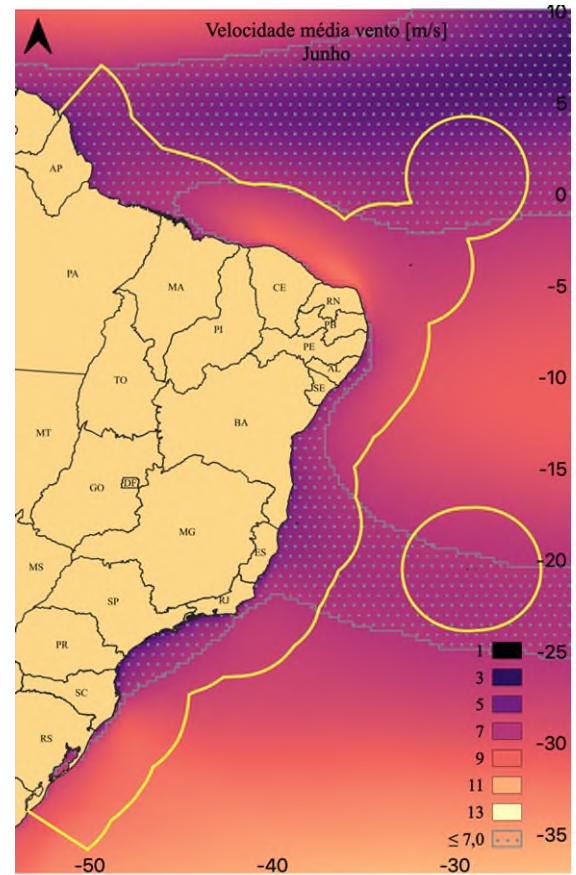


(D) Abril

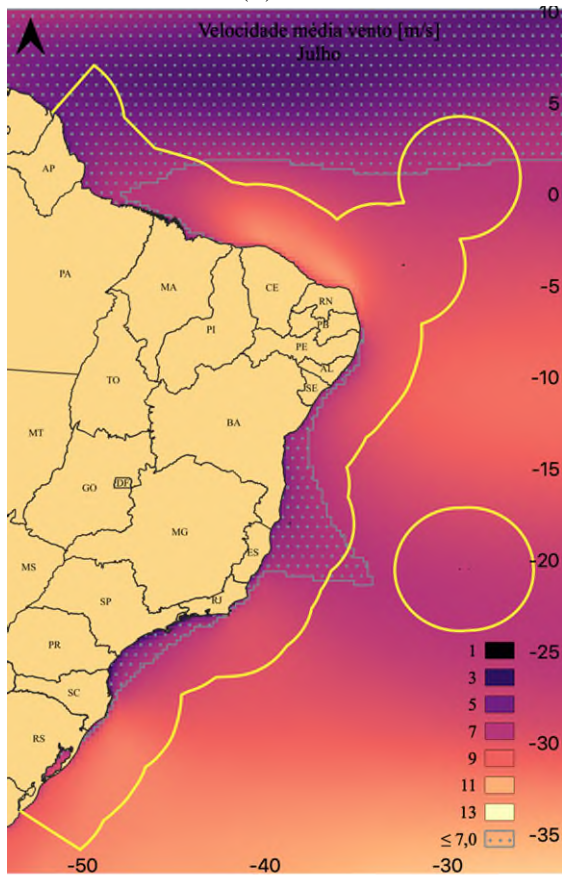
Figura 21: Velocidade média do vento (m/s) nos meses de janeiro a dezembro. (Fonte: Autor) - Continua.



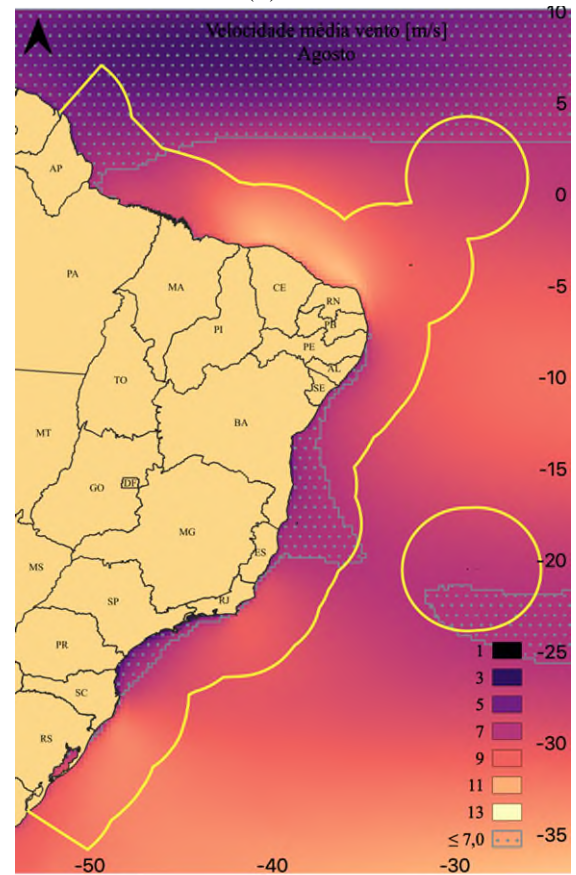
(E) Maio



(F) Junho

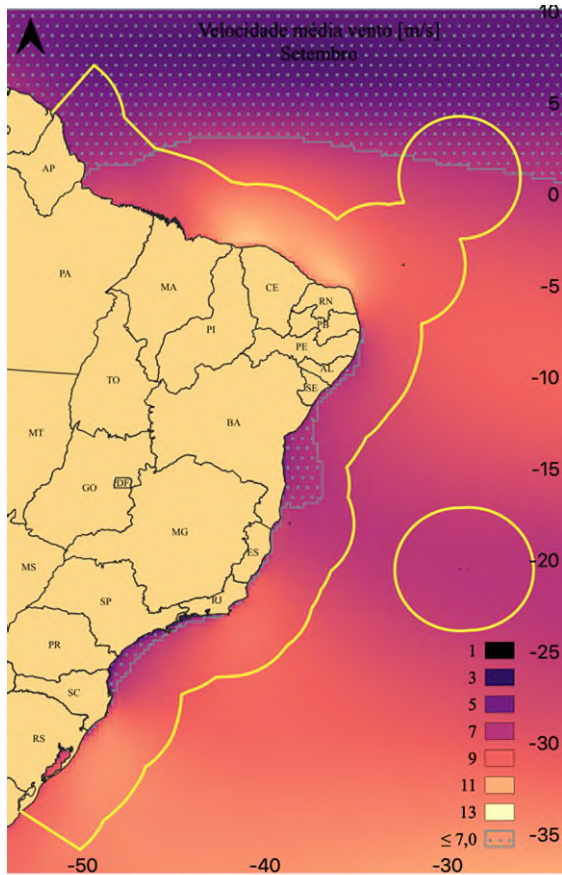


(G) Julho

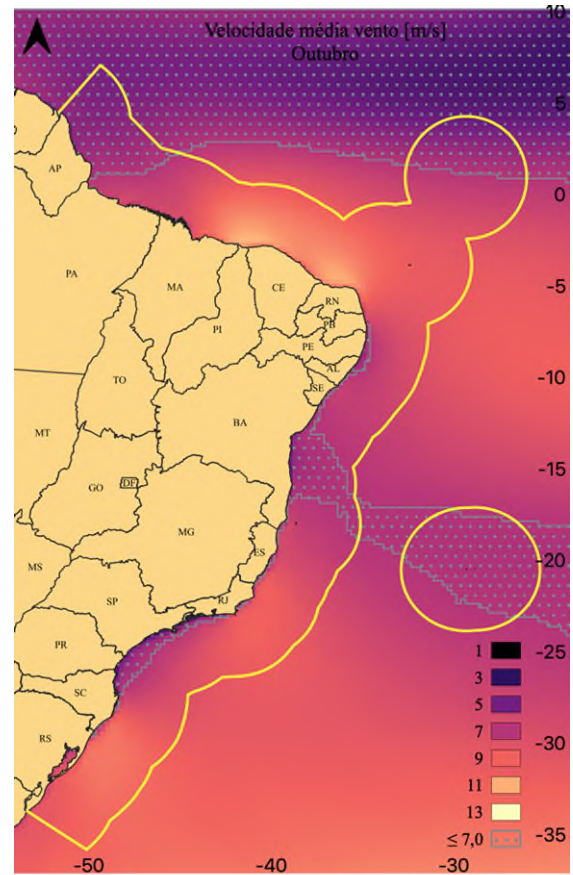


(H) Agosto

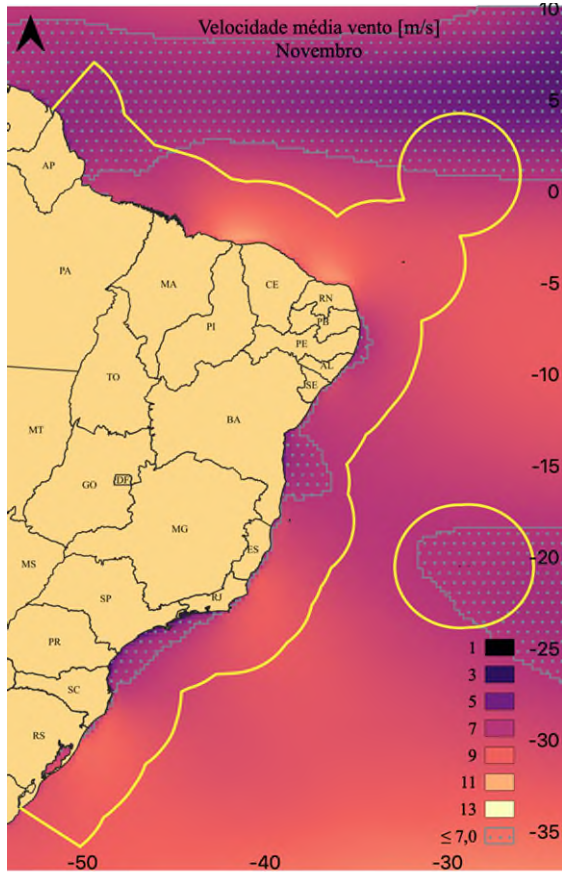
Figura 21: Velocidade média do vento (m/s) nos meses de janeiro a dezembro. (Fonte: Autor) - Continua.



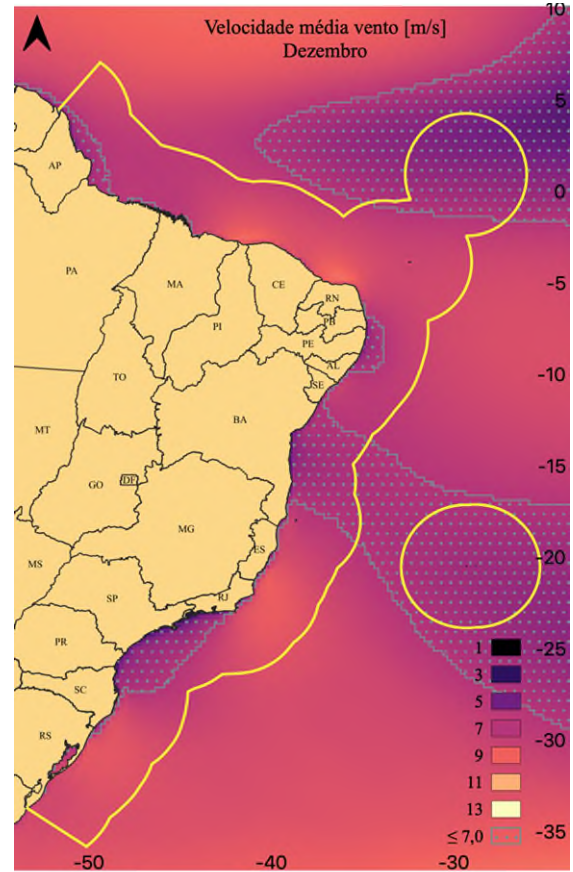
(I) Setembro



(J) Outubro



(K) Novembro



(L) Dezembro

Figura 21: Velocidade média do vento (m/s) nos meses de janeiro a dezembro. (Fonte: Autor)

7. CONCLUSÃO

No presente trabalho foi possível calcular o potencial eólico *offshore* na Zona Econômica Exclusiva brasileira, que se mostrou significativo, demonstrando que este recurso motiva iniciativas para mais estudos científicos e a elaboração de projetos para o desenvolvimento de fazendas eólicas em especial em áreas de maior potencial técnico.

Do ponto vista do potencial teórico, o Maranhão, Ceará, Rio Grande do Norte, norte da Paraíba e o sul Rio Grande do Sul apresentaram a velocidade média do vento superior a 7,0 m/s, desde a costa até o término da ZEE, o que indica estes locais como mais promissores, sob a ótica da velocidade média do vento, ao desenvolvimento de parques para o aproveitamento da energia eólica. Além disso, outras regiões como sul do Espírito Santo, norte do Rio de Janeiro e sul de Santa Catarina também apresentam condições de vento favorável, porém com restrições nas proximidades da costa.

A análise comparativa entre os resultados obtidos neste trabalho com outros publicados previamente, demonstra que o método e a base de dados utilizados podem proporcionar diferenças relevantes na estimativa do potencial eólico.

No que tange a análise mensal, é possível verificar que a variação no potencial eólico é decorrente da variação na intensidade do vento ao longo dos meses, conforme mostrado nos campos da Figura 21A–L, nas quais foram usados os dados de vento do ERA5 para o período de 1979-2019. Ainda sob esta perspectiva, foi possível constatar que as únicas regiões que se mantêm com velocidade média do vento acima de 7,0 m/s durante todos os meses do ano são: sul do Rio Grande do Sul e o norte do Rio Grande do Norte. Desta forma, ambas localidades se destacam como menos suscetíveis aos impactos da variabilidade sazonal da velocidade do vento.

As variações observadas na intensidade do vento têm como base a gênese e o deslocamento de sistemas meteorológicos, sendo destacados neste trabalho apenas os que se enquadram na escala sinótica, tais como a Zona de Convergência Intertropical, o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul e o deslocamento dos sistemas frontais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- BETZ, A. The Maximum of the Theoretically Possible Exploitation of Wind by Means of a Wind Motor. **Wind Engineering**, vol. 37, no. 4, p. 441–446, Aug. 2013. <https://doi.org/10.1260/0309-524X.37.4.441>.
- BOLETIM ANUAL DE GERAÇÃO EÓLICA. . Boletim. Brasil: ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica, 2019. Available at: http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/05/Boletim-Anual_2018.pdf. Accessed on: 20 Nov. 2019.
- BRASIL. Convenção das Nações Unidas sobre o direito do mar. **99.165**, 1990.
- BREEZE, Paul. Chapter 11 - Wind Power. In: BREEZE, Paul (ed.). **Power Generation Technologies (Third Edition)**. [S. l.]: Newnes, 2019. p. 251–273. DOI 10.1016/B978-0-08-102631-1.00011-0. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081026311000110>. Accessed on: 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.
- CORRÊA, Ana Garcia. **Climatologia dos ventos e potencial eólico offshore de Santa Catarina**. 2018. 85 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. Available at: https://movlidar.paginas.ufsc.br/files/2018/03/Ana_Correa2018-1.pdf. Accessed on: 15 Dec. 2019.
- 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. Available at: https://www.iag.usp.br/pos/sites/default/files/d_thiago_s_d_degola_corrigeida.pdf. Accessed on: 22 Nov. 2019.
- DERECZYNSKI, Claudine Pereira; MENEZES, Wallace Figueiredo. 1 - METEOROLOGIA DA BACIA DE CAMPOS. In: MARTINS, Renato Parkinson; GROSSMANN-MATHESON, Guisela Santiago (eds.). **Meteorologia e Oceanografia**. Rio de Janeiro: Campus, 2015. p. 1–54. DOI 10.1016/B978-85-352-6208-7.50008-8. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9788535262087500088>. Accessed on: 2 Apr. 2020.
- ECMWF. **IFS Documentation CY41R2**. [S. l.]: ECMWF, 2016(IFS Documentation).
- EPE. **Roadmap Eólica Offshore Brasil**, n. No NT-EPE-PR-001/2020-r1. Rio de Janeiro - Brasil: EPE, 2020.

GEBCO COMPILATION GROUP. **GEBCO Compilation Group (2019) GEBCO 2019 Grid**, vol. GEBCO 2019 Grid, 2019. DOI 10.5285/836f016a-33be-6ddc-e053-6c86abc0788e. Available at: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/. Accessed on: 22 Nov. 2019.

HENNERMANN, Karl. ERA5 data documentation - Copernicus Knowledge Base - ECMWF Confluence Wiki. 5 Nov. 2019. **ERA5 data documentation**. Available at: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5+data+documentation>. Accessed on: 20 Nov. 2019.

HOLTON, James R. **An Introduction to Dynamic Meteorology**. 4th ed. Department of Atmospheric Sciences - University of Washington - Seattle, Washington: Elsevier Academic Press, 2004. vol. 88, .

IBAMA. NOTA TÉCNICA Nº 2/2019/NLA-RS/DITEC-RS/SUPES-RS. *In*: WORKSHOP INTERNACIONAL DE AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS DE COMPLEXOS EÓLICOS OFFSHORE, 2019. **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. . Accessed on: 22 Nov. 2019.

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

IRENA. **Renewable energy benefits: Leveraging local capacity for offshore wind**, n. ISBN 978-92-9260-063-1. Abu Dhabi: IRENA, 2018.

NUNES, Hugo Miguel Pedro. **Avaliação do potencial eólico ao largo da costa nordeste do Brasil**. 2012. 132 f. Dissertação de Mestrado – UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB, Brasília, 2012. Available at: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/10950/1/2012_HugoMiguelPedroNunes.pdf. Accessed on: 20 Dec. 2019.

OLIVEIRA, Evaldo Vieira de. **Meteorologia Aplicada**. [S. l.]: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, 2014(O48m).

ORTIZ, G; KAMPEL, M. Potencial de energia eólica offshore na margem do Brasil. **Potencial de energia eólica offshore na margem do Brasil**, vol. Santos, SP, Brasil, no. V Simpósio Brasileiro de Oceanografia, p. 4, 2011. .

PIMENTA, F; KEMPTON, W; GARVINE, R. Combining meteorological stations and satellite data to evaluate the offshore wind power resource of Southeastern Brazil. **Renewable Energy**, vol. 33, no. 11, p. 2375–2387, 2008. .

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.

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. Available at: http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/Dissert_AJVCSilva.pdf f.

SILVA, Mário Adelmo Varejão. **Meteorologia e Climatologia**. Versão Digital 2. Recife, Pernambuco - Brasil: [s. n.], 2006(Versão Digital 2).

SUN, Xiaoming; COOK, Kerry; VIZY, Edward. The South Atlantic Subtropical High: Climatology and Interannual Variability. **Journal of Climate**, vol. 30, 10 Jan. 2017. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0705.1>.

WALLACE, John M.; HOBBS, Peter V. **Atmospheric Science an Introductory Survey**. 2nd ed. University of Washington, Seattle, U.S.A: Academic Press, 2006. vol. 92, . Available at: <https://www.elsevier.com/books/atmospheric-science/wallace/978-0-12-732951-2>. Accessed on: 31 Mar. 2020.

WARNER, Thomas Tomkins. **Numerical Weather and Climate Prediction**. [S. l.]: Cambridge University Press, 2010(, 10.1017/CBO9780511763243). Available at: </core/books/numerical-weather-and-climate-prediction/48312A47D19038F6503BB4E69D3B03A6>. Accessed on: 30 Mar. 2020.