

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

**AVALIAÇÃO DOS POTENCIAIS TEÓRICOS EÓLICO E DAS ONDAS PARA A
REGIÃO SUDOESTE DO OCEANO ATLÂNTICO SUL A PARTIR DA REANÁLISE
ERA5**

ANA CAROLINA FERREIRA DA COSTA

Orientador: Prof.º D. Sc. Luiz Paulo de Freitas Assad

Coorientador: D. Sc. Milad Shadman

Rio de Janeiro, RJ

Dezembro, 2024

AVALIAÇÃO DOS POTENCIAIS TEÓRICOS EÓLICO E DAS ONDAS PARA A
REGIÃO SUDOESTE DO OCEANO ATLÂNTICO SUL A PARTIR DA REANÁLISE
ERA5

ANA CAROLINA FERREIRA DA COSTA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Orientador: Prof.º D. Sc. Luiz Paulo de Freitas Assad

Coorientador: D. Sc. Milad Shadman

Rio de Janeiro, RJ

Dezembro, 2024

AVALIAÇÃO DOS POTENCIAIS TEÓRICOS EÓLICO E DAS ONDAS PARA A
REGIÃO SUDESTE DO OCEANO ATLÂNTICO SUL A PARTIR DA REANÁLISE
ERA5

Ana Carolina Ferreira da Costa

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM METEOROLOGIA.

Examinada por:

Prof. D. Sc. Luiz Paulo de Freitas Assad

D. Sc. Milad Shadman

Prof. Dr. Alessandro Filippo

Profa. D. Sc. Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira

Prof. D.Sc. Luiz Cláudio Gomes Pimentel

Rio de Janeiro, RJ

Dezembro, 2024

RESUMO

A matriz energética no mundo, assim como no Brasil, tem como principal matéria-prima o petróleo e seus derivados. Porém em relação ao mundo, o Brasil se destaca na geração de energia elétrica mediante a utilização de fontes renováveis, como insumo, se sobressaindo a utilização de hidroelétricas. No entanto, o Brasil sofre com seguidas crises hídricas, portanto aspirando uma diversificação na matriz energética, e conseqüentemente na matriz elétrica, é necessário o estudo de outras fontes de energia renovável disponíveis no país. O objetivo desta dissertação é através da reanálise *ECMWF Fifth Global Reanalysis (ERA5)*, quantificar os potenciais teóricos eólico e das ondas, e sua possível complementariedade energética. A região de estudo abrange a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul, incluindo o litoral brasileiro das Regiões Sudeste e Sul, dentro do domínio da Zona Econômica Exclusiva. Foram utilizados dados com resolução temporal mensal, para o período 1991-2020. Para o cálculo da magnitude dos ventos a 100 m acima da superfície, utilizou-se a Lei do Perfil Logarítmico, e os resultados mostraram que anualmente, a Região Sul, no litoral entre os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul (30° - 36° S, 045° - 055° W), possui o maior potencial energético a partir dos ventos. Sazonalmente, destaca-se o inverno como estação mais energética, e mensalmente, o mês de setembro. A análise do potencial teórico das ondas, mostrou que a Região Sul possui o maior potencial energético a partir das ondas. Destacando-se, sazonalmente, o inverno como estação mais energética, e mensalmente, o mês de setembro. Por fim, os valores máximos de Densidade de Potência das Ondas encontrados, foram superiores aos limiares mínimos determinados ($P_{min} = 5$ kW/m), observando-se que a geração de energia a partir das ondas é sempre capaz de complementar a geração de energia eólica. Enquanto a geração eólica mostrou baixa capacidade em complementar a geração das ondas, quase que nula em toda a região de estudo.

Palavras-chave: Potencial energético eólico; Potencial energético das ondas; Complementariedade Energética; Regiões Sudeste e Sul do Brasil.

ABSTRACT

The energy matrix in the world, as well as in Brazil, has oil and its derivatives as its main raw material. However, in relation to the world, Brazil stands out in the generation of electrical energy through the use of renewable sources as input, with the use of hydroelectric plants standing out. However, Brazil suffers from repeated water crises, therefore aspiring to diversify the energy matrix, and consequently the electrical matrix, it is necessary to study other sources of renewable energy available in the country. The objective of this dissertation is, through the ECMWF Fifth Global Reanalysis (ERA5), to quantify the theoretical wind and wave potentials, and their possible energetic complementarity. The study region covers the Southwest Region of the South Atlantic Ocean, including the Brazilian coast of the Southeast and South Regions, within the domain of the Exclusive Economic Zone. Data with monthly temporal resolution were used, for the period 1991-2020. To calculate the magnitude of winds at 100 m above the surface, the Logarithmic Profile Law was used, and the results showed that annually, the South Region, on the coast between the states of Santa Catarina and Rio Grande do Sul (30° - 36° S, 045° - 055° W), has the greatest energy potential from winds. Seasonally, winter stands out as the most energetic season, and monthly, the month of September. The analysis of the theoretical potential of waves showed that the South Region has the greatest energy potential from waves. Seasonally, winter stands out as the most energetic season, and monthly, the month of September. Finally, the maximum values of Wave Power Density found were higher than the minimum thresholds determined ($P_{min} = 5$ kW/m), observing that the generation of energy from waves is always capable of complementing the generation of energy wind. While wind generation showed a low capacity to complement wave generation, almost zero throughout the study region.

Keywords: Potential wind energy; Potential of waves energy; Energy Complementarity; Southeast and South regions of Brazil.

AGRADECIMENTOS

Ao Anderson Elias Soares que participou, diretamente no desenvolvimento dos resultados desta pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado.

Vale ressaltar que esta dissertação é parte de um projeto de pesquisa de bolsa CAPES 2020/2022.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1. A Matriz Energética e a Matriz Elétrica no Mundo e no Brasil	1
1.2. Motivações	4
1.3. Potenciais de Eficiência Energética	10
1.4. Objetivo	12
1.4.1. Objetivos Específicos	12
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Climatologia dos Ventos sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul	13
2.1.1 Energia Eólica e o seu Potencial Energético	17
2.2 Climatologia das Ondas sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul	25
2.2.1 Energia das Ondas e o seu Potencial Energético	28
2.3. Complementariedade Energética entre os recursos naturais Eólico e das Ondas sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul	32
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA	33
3.1 Região de Estudo	33
3.2 Conjuntos de dados da Reanálise ERA5	34
3.3 Estimativas dos Ventos	34
3.3.1 Cálculo da Magnitude dos Ventos	34
3.3.2 Avaliação do Potencial Teórico Eólico <i>Offshore</i>	36
3.4 Avaliação do Potencial Teórico das Ondas	36
3.5 Complementariedade Energética entre os recursos naturais Eólico <i>Offshore</i> e das Ondas	37
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS	39
4.1 Climatologia dos Ventos sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul	39
4.1.1 Potencial Teórico Eólico	49
4.1.2 Potencial Teórico das Ondas	54
4.2 Complementariedade dos recursos naturais Eólico e das Ondas sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul	60
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	66
CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
ANEXO	75

LISTA DE SIGLAS

<i>ABEEólica</i>	Associação Brasileira de Energia Eólica
<i>ASAS</i>	Alta Subtropical do Atlântico Sul
<i>ASCAT</i>	<i>Advanced Scatterometer</i>
<i>BEM</i>	Balanço Energético Nacional
<i>BRAMS</i>	<i>Brazilian Regional Atmospheric Modelling System</i>
<i>CFSv2</i>	<i>Climate Forecast System Version 2</i>
<i>DEV</i>	Densidade de Energia do Vento (W/m^2)
<i>DJF</i>	Dezembro, Janeiro e Fevereiro
<i>ECMWF</i>	<i>European Centre for Medium - Range Weather Forecasts</i>
<i>EPE</i>	Empresa de Pesquisa Energética
<i>ERA5</i>	<i>ECMWF Reanalysis Version 5</i>
<i>ERA-Interim</i>	<i>ECMWF Reanalysis - Interim</i>
<i>g</i>	Aceleração da gravidade ($g = 9,806 \text{ m/s}^2$)
<i>GEE</i>	Gases do Efeito Estufa
<i>GWEC</i>	<i>Global Wind Energy Council</i>
<i>H_s</i>	Altura Significativa das Ondas a partir da combinação de vagas e marulhos (m)
<i>IEA</i>	<i>International Energy Agency</i>
<i>IRENA</i>	<i>International Renewable Energy Agency</i>
<i>JJA</i>	Junho, Julho e Agosto
<i>LACE</i>	Custo Evitado Nivelado de Energia [\$/MWh]
<i>LCOE</i>	Custo Nivelado de Energia [\$/MWh]
<i>M₁₀₀</i>	Magnitude do vento (m/s) a 100 m, acima da superfície
<i>MAM</i>	Março, Abril e Maio
<i>MetOp</i>	Satélite <i>Meteorological Operational</i>
<i>MERRA2</i>	<i>Modern - Era Retrospective Analysis for Research and Applications Version 2</i>
<i>NetCDF</i>	<i>Network Common Data Form</i>
<i>NTH</i>	Número total de horas do período analisado (h)
<i>OAS</i>	Oceano Atlântico Sul

<i>OVC</i>	Complementariedade do recurso das ondas na geração de energia eólica (%)
<i>P</i>	Densidade de Potência das Ondas (kW/m)
<i>PIRATA</i>	<i>Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic</i>
<i>PNBOIA</i>	Programa Nacional de Boias
ρ_{ar}	Densidade do Ar ($\rho_{ar} = 1,225 \text{ kg/m}^3$)
ρ_{mar}	Densidade do Mar ($\rho_{mar} = 1025 \text{ kg/m}^3$)
<i>SON</i>	Setembro, Outubro e Novembro
T_e	Período médio das ondas (s)
u_{100}	Vento Zonal a 100 m, acima da superfície (m/s)
\underline{u}_{100}	Média da componente Zonal do vento (m/s)
v_{100}	Vento Meridional a 100 m, acima da superfície (m/s)
\underline{v}_{100}	Média da componente Meridional do vento (m/s)
$v(Z)$	Velocidade do Vento na Altura Desejada (m/s)
v_{ref}	Velocidade do Vento na Altura de Referência (Z_{ref})
<i>VCO</i>	Complementariedade do recurso eólico na geração de energia das ondas (%)
Z	Altura Desejada ($Z = 100 \text{ m}$)
Z_{ref}	Altura de Referência ($Z_{ref} = 10 \text{ m}$)
Z_*	Coefficiente de Rugosidade da Superfície ($Z_* = 0,2 \text{ mm}$)
<i>ZEE</i>	Zona Econômica Exclusiva

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1a:** Matriz Energética Mundial no ano de 2019. Fonte: Adaptado do *International Energy Agency*, 2022. **2**
- Figura 1.1b:** Matriz Energética Brasileira no ano de 2021. Fonte: Adaptado do Balanço Energético Nacional da Empresa de Pesquisa Energética, 2022. **2**
- Figura 1.2a:** Matriz Elétrica Mundial no ano de 2019. Fonte: Adaptado do *International Energy Agency*, 2022. **4**
- Figura 1.2b:** Matriz Elétrica Brasileira no ano de 2021. Fonte: Adaptado do Balanço Energético Nacional da Empresa de Pesquisa Energética, 2022. **4**
- Figura 1.3:** Divisão por região geográfica da demanda elétrica do Brasil para o ano de 2021. Fonte: Adaptado do Anuário Estatístico de Energia Elétrica da Empresa de Pesquisa Energética, 2022. **6**
- Figura 1.4:** Região de Estudo. Zona Econômica Exclusiva (Linhas e círculos sólidos pretos) e Batimetria (Linhas sólidas coloridas) [m]. **6**
- Figura 1.5:** Fluxograma da categorização dos Potenciais de Eficiência Energética *offshore* para a geração de energia renovável. Adaptado de Musial *et al.*, 2016. **11**
- Figura 2.1** Representação esquemática da circulação geral da atmosfera (Dereczynski, C.P., Menezes, W.F. 2015). **13**
- Figura 2.2:** Direção e velocidade do vento (m/s) na altura de 10 m para a reanálise atmosférica ERA5 para o período de 2011–2018. Linha sólida preta representa a Zona Econômica Exclusiva (Tavares, 2020). **14**
- Figura 2.3a:** Campo de pressão atmosférica (hPa) ao nível médio do mar: valores médios para o período de 1989 a 2010 para Verão – Dezembro/Janeiro/Fevereiro (Dereczynski, C.P., Menezes, W.F., 2015). **15**
- Figura 2.3b:** Campo de pressão atmosférica (hPa) ao nível médio do mar: valores médios para o período de 1989 a 2010 para Inverno – Junho/Julho/Agosto (Dereczynski, C.P., Menezes, W.F., 2015). **15**

Figura 2.4a: Isolinhas de frequência de ciclogêneses para Verão – Dezembro/Janeiro/Fevereiro (Gan e Rao, 1991).	16
Figura 2.4b: Isolinhas de frequência de ciclogêneses para Inverno – Junho/Julho/Agosto (Gan e Rao, 1991).	16
Figura 2.5: Densidade de ciclogêneses (10–4 km ⁻²) no período de verão nos anos de 1990 a 1999 (Dereczynski, C.P., Menezes, W.F., 2015). Adaptado de Reboita (2008), indicando zonas preferenciais para ciclogênese. O núcleo verde entre as latitudes de 25°S e 30°S mostra uma nova região ciclogênética de destaque, além das anteriormente destacadas por Gan (1992).	17
Figura 2.6: Representação de geração de energia eólica <i>onshore</i> e <i>offshore</i> . Fonte: Adaptado de Musial e Ram, 2010.	18
Figura 2.7a: Novas instalações <i>offshore</i> no mundo para o ano de 2021. Fonte: Adaptado do <i>Global Wind Energy Council</i> , 2022.	19
Figura 2.7b: Total de instalações <i>offshore</i> no mundo para o ano de 2021. Fonte: Adaptado do <i>Global Wind Energy Council</i> , 2022.	19
Figura 2.8a: Tipos de fundações fixas do tipo monopilar para turbinas eólicas <i>offshore</i> em águas rasas. Fonte: <i>International Renewable Energy</i> <i>Agency</i> , 2016.	21
Figura 2.8b: Tipos de fundações fixas do tipo jaqueta para turbinas eólicas <i>offshore</i> em águas intermediárias. Fonte: <i>International Renewable</i> <i>Energy Agency</i> , 2016.	21
Figura 2.8c: Tipos de fundações flutuantes para turbinas eólicas <i>offshore</i> em águas profundas. Fonte: <i>International Renewable Energy Agency</i> , 2016.	21
Figura 2.9: Distribuição de frequência das ondas no oceano por classificação (informações em vermelho) e força geradora (informações em verde). Fonte: Adaptada de Munk (1950).	26
Figura 2.10: Esquema de geração de vagas e marulhos. Ponto (A) representa as ondulações transformando-se em vagas devido ao vento (indicado pela seta roxa), ponto (B) representa um mar completamente desenvolvido e o ponto (C) representa a transformação em marulho. O ponto (D) indica o tamanho da pista de geração das ondas e a seta amarela a direção de deslocamento das ondas.	27

- Figura 2.11:** Representação da geração de energia das ondas *onshore*, *nearshore* e *offshore*. Fonte: Adaptado de De Freitas Assad e Shadman, 2021. 29
- Figura 2.12:** Distribuição Mundial da Densidade Energética das Ondas. Fonte: Plano Nacional de Energia 2030 (2007) da Empresa de Pesquisa Energética. 30
- Figura 3.1:** Fluxograma da metodologia aplicada nesta pesquisa, sendo  Condições Iniciais  Conjunto de dados da reanálise ERA5  Parametrização  Conjunto de dados da reanálise ERA5 após parametrização  Potencial Teórico  Resultados. 33
- Figura 4.1:** Climatologia Anual da direção (linhas de corrente) e velocidade do vento (colorido) (m/s) a 100 m da superfície a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020. Linha e círculos sólidos preto demarcam a Zona Econômica Exclusiva. 41
- Figura 4.2:** Climatologia Sazonal da direção (linhas de corrente) e velocidade do vento (colorido) (m/s) a 100 m da superfície a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020: A. Verão; B. Outono; C. Inverno; D. Primavera. Linha e círculos sólidos preto demarcam a Zona Econômica Exclusiva. 43
- Figura 4.3:** Climatologia Mensal da direção (linhas de corrente) e velocidade do vento (colorido) (m/s) a 100 m da superfície a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020: A. Janeiro, B. Fevereiro, C. Março, D. Abril, E. Maio, F. Junho, G. Julho, H. Agosto, I. Setembro, J. Outubro, K. Novembro e L. Dezembro. Linha e círculos sólidos preto demarcam a Zona Econômica Exclusiva. 48
- Figura 4.4:** Densidade Média de Energia do Vento (colorido/contorno) (W/m^2) Anual a 100 m da superfície a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020. Linha sólida branca demarca a Zona Econômica Exclusiva. 50
- Figura 4.5:** Densidade Média de Energia do Vento (colorido/contorno) (W/m^2) Sazonal a 100 m da superfície a partir da reanálise ERA5 sobre a 51

Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020: A. Verão; B. Outono; C. Inverno; D. Primavera. Linha sólida branca demarca a Zona Econômica Exclusiva.

- Figura 4.6:** Densidade Média de Energia do Vento (colorido/contorno) (W/m^2) Mensal a 100 m da superfície a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020: A. Janeiro, B. Fevereiro, C. Março, D. Abril, E. Maio, F. Junho, G. Julho, H. Agosto, I. Setembro, J. Outubro, K. Novembro e L. Dezembro. Linha sólida branca demarca a Zona Econômica Exclusiva. **53**
- Figura 4.7:** Densidade Média de Potência das Ondas (colorido/contorno) (kW/m) Anual a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020. Linha sólida branca demarca a Zona Econômica Exclusiva. **56**
- Figura 4.8:** Densidade Média de Potência das Ondas (colorido/contorno) (kW/m) Sazonal a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020: A. Verão; B. Outono; C. Inverno; D. Primavera. Linha sólida branca demarca a Zona Econômica Exclusiva. **57**
- Figura 4.9:** Densidade Média de Potência das Ondas (colorido/contorno) (kW/m) Mensal a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020: A. Janeiro, B. Fevereiro, C. Março, D. Abril, E. Maio, F. Junho, G. Julho, H. Agosto, I. Setembro, J. Outubro, K. Novembro e L. Dezembro. Linha sólida branca demarca a Zona Econômica Exclusiva. **59**
- Figura 4.10:** Complementariedade total (colorido/contorno) (%) Anual da geração das ondas pela geração eólica (VCO) (a) e da geração eólica pela geração das ondas (OCV) (b) a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020. Linha sólida branca demarca a Zona Econômica Exclusiva. **61**
- Figura 4.11:** Complementariedade total (colorido/contorno) (%) Sazonal da geração das ondas pela geração eólica (VCO) a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 **62**

e 2020: A. Verão; B. Outono; C. Inverno; D. Primavera. Linha sólida branca demarca a Zona Econômica Exclusiva.

Figura 4.12: Complementariedade total (colorido/contorno) (%) Sazonal da geração eólica pela geração das ondas (OCV) a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020: A. Verão; B. Outono; C. Inverno; D. Primavera. Linha sólida branca demarca a Zona Econômica Exclusiva. **62**

Figura 4.13: Complementariedade total (colorido/contorno) (%) Mensal da geração das ondas pela geração eólica (VCO) a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020: A. Janeiro, B. Fevereiro, C. Março, D. Abril, E. Maio, F. Junho, G. Julho, H. Agosto, I. Setembro, J. Outubro, K. Novembro e L. Dezembro. Linha sólida branca demarca a Zona Econômica Exclusiva. **64**

Figura 4.14: Complementariedade total (colorido/contorno) (%) Mensal da geração eólica pela geração das ondas (OCV) a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020: A. Janeiro, B. Fevereiro, C. Março, D. Abril, E. Maio, F. Junho, G. Julho, H. Agosto, I. Setembro, J. Outubro, K. Novembro e L. Dezembro. Linha sólida branca demarca a Zona Econômica Exclusiva. **65**

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1:	Produtos eólicos utilizados por Paiva <i>et al.</i> (2021).	9
Tabela 2.1:	Estudos Revisados que mapearam o potencial teórico de geração de energia eólica <i>offshore</i> sobre o Oceano Atlântico Sul.	25
Tabela 3.1:	Características do conjunto de dados da reanálise ERA5 utilizados. Fonte: Hersbach <i>et al.</i> , 2018.	34
Tabela 4.1a:	Climatologia Anual da Velocidade dos Ventos para a Região Sudeste. Fonte: Adaptado de Tavares (2020) e Nascimento (2022).	39
Tabela 4.1b:	Climatologia Anual da Velocidade dos Ventos para a Região Sul. Fonte: Adaptado de Tavares (2020) e Nascimento (2022).	40
Tabela 4.2a:	Climatologia Mensal da Velocidade dos Ventos para a Região Sudeste (16°-26°S, 035°-045°W).	44
Tabela 4.2a:	Climatologia Mensal da Velocidade dos Ventos para a Região Sul (26°-36°S, 045°-055°W).	45

LISTA DE EQUAÇÕES

<i>Equação 3.1:</i>	Magnitude do vento (m/s) a 100 m, acima da superfície.	35
<i>Equação 3.2:</i>	Lei do Perfil Logarítmico	36
<i>Equação 3.3:</i>	Densidade de Energia do Vento.	36
<i>Equação 3.4:</i>	Densidade de Potência das Ondas.	37
<i>Equação 3.5:</i>	Complementariedade do recurso eólico na geração de energia das ondas.	38
<i>Equação 3.6:</i>	Complementariedade do recurso das ondas na geração de energia eólica.	38

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1. A Matriz Energética e a Matriz Elétrica no Mundo e no Brasil

A matriz energética é o conjunto de fontes de energia disponíveis para suprir diferentes demandas antropogênicas, necessária para a sobrevivência humana e, utilizada em diversas atividades do dia a dia.

No Brasil, de acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN, 2022) da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), no ano de 2021, o líder em termos de consumo energético foi o setor de transporte de carga e de passageiros (32,5%). Acompanhado das indústrias (32,3%), somando aproximadamente 65% do consumo total. Seguido das residências (10,9%), do setor energético (9,5%), da agropecuária (5,0%), dos serviços (4,8%) e dos usos não energéticos (5,1%).

Os recursos energéticos são quaisquer recursos naturais que possam ser aproveitados para a obtenção de energia. Dividem-se em recursos naturais não-renováveis, que são esgotáveis, isto é, que não podem ser renovados pelo próprio ambiente após a sua exploração; e recursos naturais renováveis, que são inesgotáveis, isto significa, que após a sua exploração, podem retornar aos níveis anteriores de estoque por processos naturais de crescimento ou reposição (*Glossary of Environment Statistics*, 1997).

A produção de energia renovável, por exemplo, pode ocorrer oriunda de recursos naturais como a matéria orgânica de origem animal ou vegetal, chamada Energia de Biocombustíveis (Biomassa), além dos ventos (Energia Eólica), do sol (Energia Solar), das ondas, das marés, do calor proveniente do interior do planeta Terra (Energia Geotérmica), entre outras.

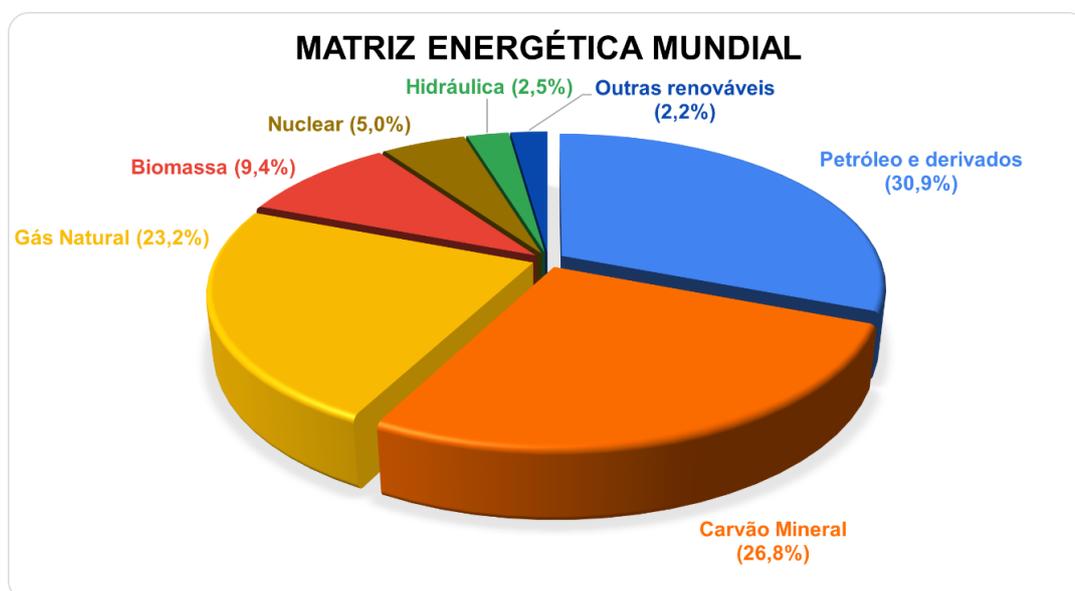
Estudos sobre energias renováveis vêm ganhando cada vez mais espaço, devido à possível escassez do petróleo e de seus derivados. Estes são a principal matéria-prima da matriz energética mundial com 30,9% de acordo com a *International Energy Agency* (IEA, 2022) [Figura 1.1a] e brasileira com 34,4% (BEN, 2022) [Figura 1.1b]. E, devido a questões ambientais, em que as mudanças climáticas, em consequência das atividades antropogênicas estão associadas ao aumento da emissão dos gases do efeito estufa (GEE) no planeta Terra. De acordo com o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (2023), a concentração atmosférica de Dióxido de Carbono equivalente, em 2019, aumentou 12% em relação a 2010, e se comparado a 1990, o aumento foi de 54%.

Mundialmente, somando-se à participação de recursos renováveis como, a biomassa (9,4%), a hidráulica (2,5%) e outras fontes renováveis (2,2%) em 2019, a matriz energética mundial foi composta por uma parcela total de apenas 14,1% (IEA, 2022) [Figura 1.1a].

Porém, na matriz energética brasileira, utilizam-se mais recursos renováveis que no resto

do mundo, como a biomassa de cana (16,4%), a hidráulica (11,0%), a lenha e o carvão vegetal (8,7%), a eólica (2,1%) e outras renováveis (6,6%), totalizando em 2021, uma parcela de 44,7% (BEN, 2022) [Figura 1.1b].

a)



b)

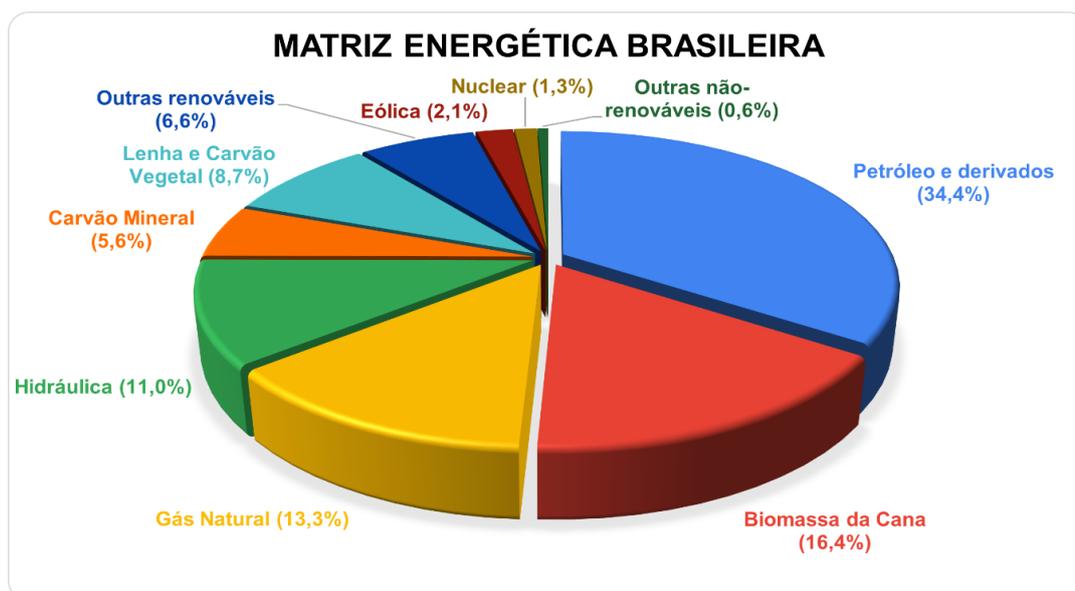


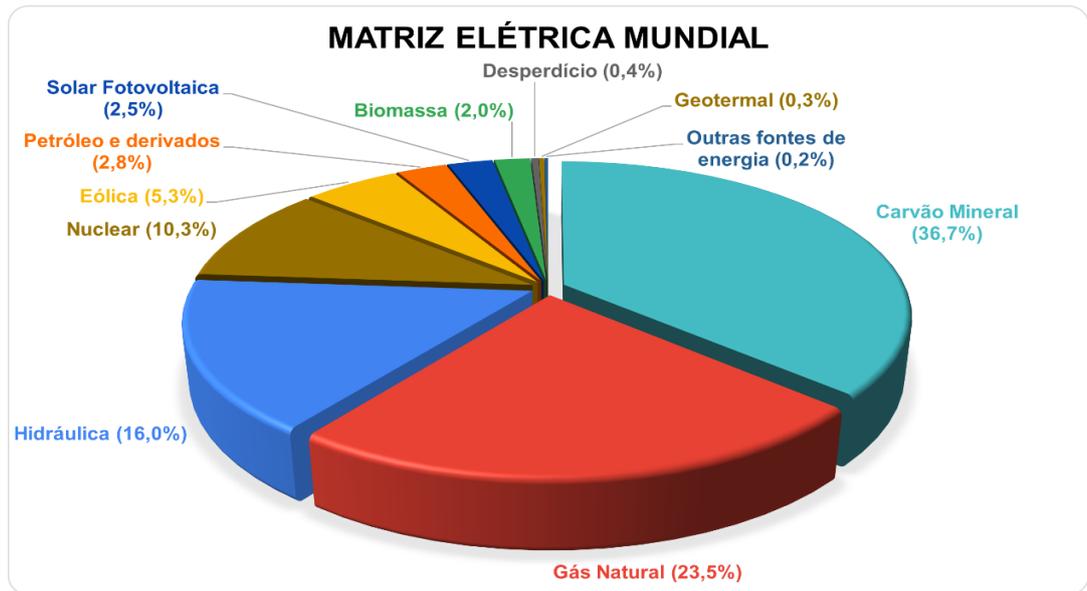
Figura 1.1. a) Matriz Energética Mundial no ano de 2019. Fonte: Adaptado do *International Energy Agency*, 2022. b) Matriz Energética Brasileira no ano de 2021. Fonte: Adaptado do *Balanco Energético Nacional da Empresa de Pesquisa Energética*, 2022.

A matriz elétrica é o conjunto de fontes de energia disponíveis apenas para a geração de energia elétrica. E o grande estímulo para a geração de energia elétrica a partir de recursos renováveis, foi a crise do petróleo na década de 1970 (Costa, Casotti e Azevedo, 2009; Aragão, 2019).

Mundialmente, a geração de energia elétrica ainda é baseada na utilização dos combustíveis fósseis. Como, carvão mineral (36,7%), gás natural (23,5%) e petróleo e derivados (2,8%), nas usinas termoelétricas, totalizando em 2019, uma parcela de 63,0% (IEA, 2022) [Figura 1.2a].

O Brasil, se destaca em relação ao mundo no quesito geração de energia elétrica através de recursos renováveis, pois a sua matriz elétrica é composta em sua maioria por usinas hidroelétricas, com uma oferta de 53,4%. Além de eólica (10,6%), biomassa (8,2%), solar (2,5%) e outras fontes renováveis (3,4%) adquirida através da importação, totalizando em 2021, uma parcela de 78,1% (BEN, 2022) [Figura 1.2b].

a)



b)

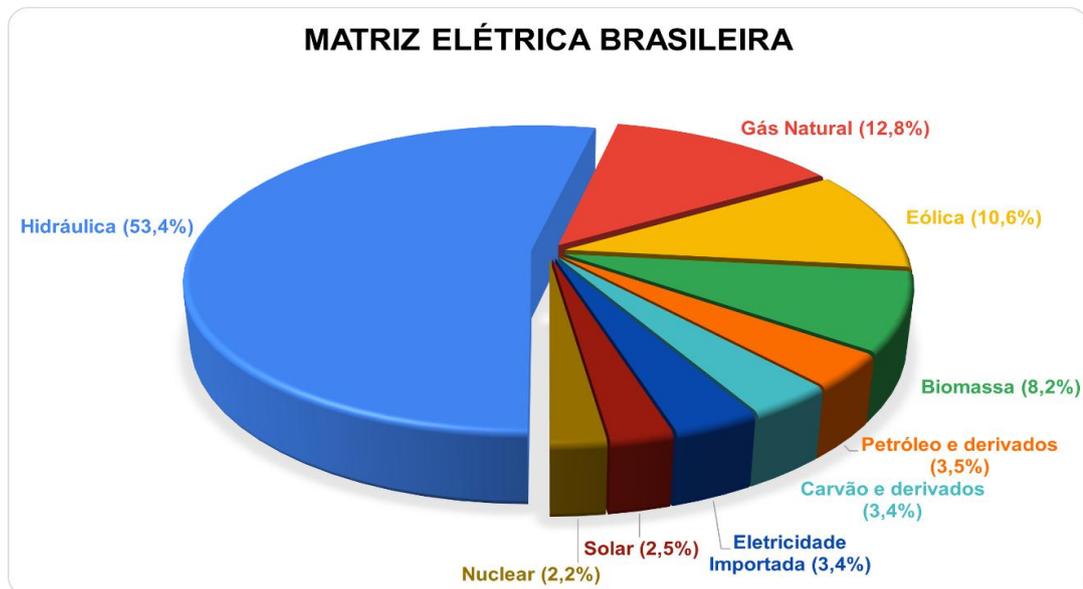


Figura 1.2. a) Matriz Elétrica Mundial no ano de 2019. Fonte: Adaptado do *International Energy Agency*, 2022. b) Matriz Elétrica Brasileira no ano de 2021. Fonte: Adaptado do Balanço Energético Nacional da Empresa de Pesquisa Energética, 2022.

1.2. Motivações

O Brasil sofre com sequenciais crises hídricas, onde as hidroelétricas são dependentes do regime de precipitação nas bacias hidrográficas. E nos anos em que o volume das chuvas é insuficiente para suprir a demanda, são utilizadas como alternativas as termoelétricas, que aumentam tanto o custo final da energia quanto a emissão dos GEE na atmosfera.

No ano de 2021, por exemplo, a escassez das chuvas ocorrida ao longo do ano, provocou uma redução no nível dos reservatórios das principais hidroelétricas do país. Conseqüentemente

houve uma restrição da oferta de hidroeletricidade, diminuindo a geração de energia elétrica de 60,7% em 2020 para 53,4% em 2021 (BEN, 2022).

Silva, Neto e Seifert (2016), afirmaram que normalmente no Brasil, a sazonalidade influencia na geração de energia elétrica por meio das hidroelétricas, em que entre dezembro e março, é caracterizado o período chuvoso, e entre abril e novembro, o período seco. Mas de acordo com os autores, as secas interanuais, como a ocorrida entre 2014 e início de 2015, também podem afetar a geração de energia elétrica.

Logo, visando uma diversificação na matriz energética brasileira, e conseqüentemente na matriz elétrica, estudos sobre outros recursos renováveis se tornam essenciais. Além disso, a utilização desses recursos renováveis no país, reduziria a emissão dos GEE, sendo possível uma mitigação das mudanças climáticas. Além de uma maior oferta de acesso à energia em regiões remotas, uma garantia na segurança energética e o cumprimento das metas de descarbonização.

Com o objetivo de analisar regiões viáveis para a implantação de projetos eólicos *offshore* na costa brasileira, Dos Reis *et al.* (2021), afirmaram que sobre o litoral com limite batimétrico de até 50 metros de profundidade, a região com maior potencial eólico *offshore* é a Região Nordeste, entre os estados do Maranhão e Rio Grande do Norte. Seguidas da Região Sudeste, entre o norte do estado do Rio de Janeiro e o sul do Espírito Santo, e Região Sul, entre Santa Catarina e Rio Grande do Sul, mas o diferencial é que ambas são próximas aos principais centros consumidores de energia do país.

De acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica (2022) da EPE, para o ano de 2021, por região geográfica, as Regiões Sudeste e Sul lideraram a demanda por eletricidade no Brasil, com um consumo total de 48,5% e 18,6%, respectivamente. Seguidas das Regiões Nordeste com consumo total de 17,5%, Centro-Oeste com 8,0% e Norte com 7,3% (Figura 1.3).

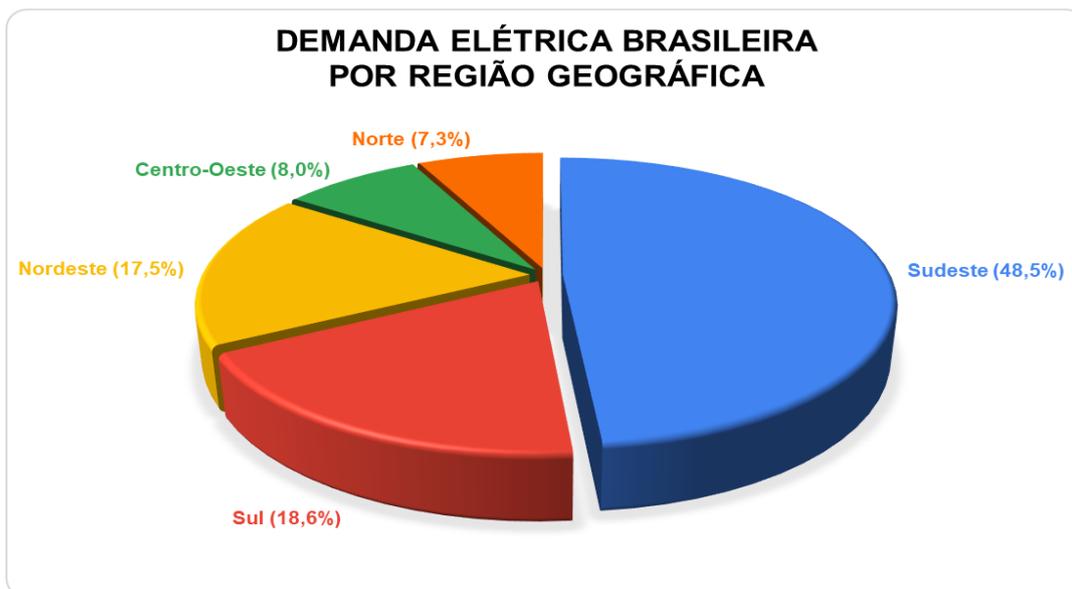


Figura 1.3: Divisão por região geográfica da demanda elétrica do Brasil para o ano de 2021. Fonte: Adaptado do Anuário Estatístico de Energia Elétrica da Empresa de Pesquisa Energética, 2022.

Desta forma, devido a importância das Regiões Sudeste e Sul do Brasil, esta pesquisa abrange a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul (OAS) [18°-34°S, 036°-055°W], incluindo o litoral brasileiro dessas regiões, dentro do domínio da Zona Econômica Exclusiva (ZEE) [Figura 1.4].

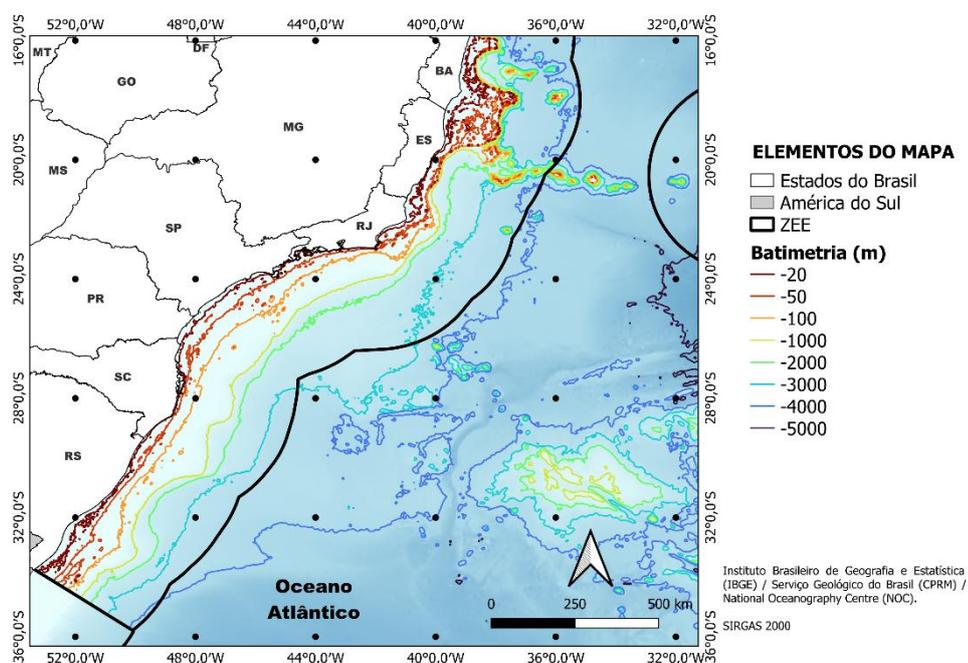


Figura 1.4: Região de Estudo. Zona Econômica Exclusiva (Linhas e círculos sólidos pretos) e Batimetria (Linhas sólidas coloridas) [m].

Além disso, vale ressaltar que o padrão sazonal das fontes renováveis representa um dos principais problemas na geração de energia elétrica, uma vez que, embora as estações do ano apresentem regularidade, suas características podem ser significativamente influenciadas pela variabilidade climática. Com isso, a complementariedade energética, chamada nesta pesquisa apenas de complementariedade, utiliza duas ou mais fontes de energia para garantir a segurança energética. Ou seja, uma fonte de energia deve necessariamente ser capaz de complementar a outra em seu período de intermitência. Assim, uma produção de energia elétrica que antes era bastante variável torna-se mais previsível.

Diversos estudos sobre complementariedade foram feitos entre fontes de energia intermitentes no Brasil. Alguns desses, contemplaram a região de estudo, sendo complementariedade hídrico-eólico (Molnár *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2016; Cantão *et al.*, 2017), hídrico-solar (Beluco *et al.*, 2008), hídrico-eólico-solar (Rosa *et al.*, 2017; Rosa *et al.*, 2019) e eólico-solar (Nascimento, 2022; Nascimento *et al.*, 2022).

Durante esta pesquisa não foram encontrados registros de trabalhos que tenham realizado o processo de complementariedade eólico-ondas, não somente para a Região Sudoeste do OAS, como para todo o litoral brasileiro.

Sendo assim, esta pesquisa, quantifica a produção máxima de energia *offshore*, a partir dos recursos renováveis eólico e das ondas, além da análise de suas possíveis complementariedades. Por intermédio do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), os recursos renováveis serão abordados através do conjunto de dados oriundos da reanálise *ECMWF Reanalysis Version 5* (ERA5).

De acordo com Barboza *et al.* (2020), a ERA5 resulta de uma compilação de diferentes fontes de dados observados e estimados. Sendo considerada como o melhor conjunto de dados pós-processados para a representação dos ventos, em diferentes escalas espaciais e/ou temporais em domínio global.

Estudos foram conduzidos para comparar o desempenho da ERA5 na representação dos ventos tanto em relação a observações *in situ*, como em relação a outras reanálises. Assim como, outros estudos, foram dirigidos na representação das ondas. A seguir, serão citados alguns desses, que contemplaram a região de estudo.

Tavares (2020), avaliou a direção e a velocidade dos ventos a 10 m de altura, anualmente, nas Regiões Sudeste e Sul do Brasil, utilizando as bases de dados das reanálises *Climate Forecast System Version 2* (CFSv2) do *National Center for Environmental Prediction*, ERA5 e *Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications Version 2* (MERRA2) do *National Aeronautics and Space Administration*. Tais dados foram confrontados com

observações *in situ* de cinco boias meteoceanográficas do Programa Nacional de Boias (PNBOIA), entre 2011 e 2018, através de métricas estatísticas. Seus resultados mostraram que a ERA5 apresentou o melhor desempenho na representação da velocidade dos ventos em ambas as regiões.

Fernandes *et al.* (2021), compararam a ERA5 com observações de ventos *in situ* a 100 m de altura, em três locais diferentes no Brasil, incluindo dois na mesma região de interesse. Sendo a primeira, a costa de Santa Catarina, na Região Sul, com dados observados do *Light Detection and Ranging*, utilizando o período entre janeiro de 2017 e dezembro de 2018, com resolução temporal de 10 minutos. A segunda são observações *in situ* obtidas da plataforma de petróleo da Petrobrás, localizada na Bacia de Santos (26.7667°S, 046.7833°W), em um período de 90 dias, inverno de 1998, com resolução temporal horária. Os resultados demonstraram que a ERA5 é adequada para análises em escala mensal da velocidade dos ventos nestas regiões.

Com o objetivo de analisar a capacidade de diferentes conjuntos de dados eólicos *offshore* em descrever os ventos superficiais na margem continental brasileira. Paiva *et al.* (2021), compararam estatisticamente seis produtos (Tabela 1.1) com medições *in situ* de quinze boias meteoceanográficas. Sendo sete do PNBOIA, incluindo quatro na região de estudo e oito do *Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic* (PIRATA).

Tabela 1.1: Produtos eólicos utilizados por Paiva *et al.* (2021).

Produto	Descrição	Resolução Temporal	Período
MetOp A	Sensoriamento Remoto através do <i>Advanced Scatterometer (ASCAT)</i> a bordo dos satélites	Diariamente são concluídos cerca de 14 ciclos orbitais em torno do Globo Terrestre, totalizando cerca de 3-5 faixas/dia sobre a margem continental brasileira	08/2010 a 10/2018
MetOp B	<i>Meteorological Operational (MetOp A e B)</i>		10/2012 a 10/2018
MetOp CDR			01/2007 a 03/2014
<i>Brazilian Regional Atmospheric Modelling System (BRAMS)</i>	Simulações de modelagem numérica	Horário	2013 a 2015
<i>Cross-Calibrated MultiPlatform</i>	Compilado de dados de satélite, <i>in situ</i> e simulações de modelagem numérica	6 horas	01/1998 a 12/2018
ERA5	Reanálise	Horário	01/2000 a 12/2017

Os autores concluíram que as estimativas de ventos na superfície oceânica brasileira, obtidas através do ASCAT foram as que melhor representaram a velocidade dos ventos *in situ*. Mas a ERA5 também apresentou uma boa comparação estatística com as medições das boias.

Considerando a resolução temporal relativamente maior dentre os produtos utilizados (1 hora) e a extensão das séries temporais disponíveis (> 30 anos), os autores recomendaram a utilização da ERA5, para a elaboração de uma climatologia regional, analisando a variabilidade espaço-temporal dos ventos na margem continental brasileira.

Com o objetivo de determinar uma reanálise que representasse o clima da Bacia de Santos, entre as Regiões Sudeste e Sul do Brasil, Carvalho (2022), avaliou a direção e a velocidade dos ventos a 10 m de altura, utilizando bases de dados das reanálises CFSv2, *ECMWF Reanalysis - Interim* (ERA-Interim) do ECMWF, ERA5 e MERRA2. Esses dados, somados aos dados coletados via sensoriamento remoto pelo ASCAT a bordo do Satélite MetOp A, foram

relacionados com observações *in situ* de uma boia meteoceanográfica do PNBOIA, entre 2011 e 2017, por meio de métricas estatísticas.

Em seguida, as reanálises que apresentaram maior destaque pontualmente foram relacionadas espacialmente com os dados coletados pelo ASCAT, entre 2009 e 2017. Concluiu-se que a ERA5 se destacou de forma positiva para estudos relacionados à climatologia, sendo recomenda a sua utilização para a representação dos ventos sobre o OAS.

Com o objetivo de avaliar o grau de exposição às ondas do litoral sul do Espírito Santo, na Região Sudeste do Brasil, Eguchi & Albino (2022) utilizaram o modelo numérico OLUCA-MC, para simular o padrão energético de ondas sobre a costa. Para a simulação dos cenários das ondas, foram inseridos dados da ERA5 validados com observações *in situ* de dois Perfiladores Hidroacústico de Correntes, através de métricas estatísticas, entre 2006 e 2008 e em 2018. Os resultados mostraram que a ERA5 representou bem o padrão das ondas na região.

Com o objetivo de caracterizar o clima das ondas de tempestades, definidas pelos autores como aquelas ondas com alturas superiores ou iguais à média dos 5% das ondas mais altas do banco de dados, no litoral do Brasil, utilizando a ERA5 entre os anos de 1979 e 2020, Branco & Klumb-Oliveira (2023), corroborarão os dados com observações *in situ* de oito boias meteoceanográficas do PNBOIA, incluindo cinco boias na região de estudo, através de métricas estatísticas. Concluiu-se que a ERA5 representou o padrão de ondas medido *in situ* de maneira satisfatória.

1.3. Potenciais de Eficiência Energética

De acordo com Musial *et al.* (2016), os potenciais de eficiência energética *offshore*, no âmbito de energias renováveis, podem ser classificados da seguinte forma:

- a. Potencial Total: o potencial máximo de energia disponível, que pode ser obtido, a partir de um determinado recurso renovável em toda a região *offshore* mundial, independente se há disponibilidade de tecnologia para a geração de energia a partir de dado recurso, ou até mesmo, se há disponibilidade de mercado para a comercialização da energia elétrica gerada.
- b. Potencial Teórico: o potencial máximo de energia disponível, que pode ser obtido, a partir de um determinado recurso renovável dentro dos limites da ZEE de cada país;
- c. Potencial Técnico: o potencial máximo de energia disponível, que pode ser obtido, a partir de um determinado recurso renovável, através da tecnologia atual e após a aplicação de restrições técnicas, ambientais e sociais que limitam o aproveitamento do potencial teórico;

Para o cálculo do potencial técnico do recurso eólico *offshore*, uma restrição técnica e ambiental a ser referenciada, que inviabiliza a utilização da tecnologia eólica *offshore* em uma região, é a necessidade de se excluir áreas onde a velocidade média dos ventos seja inferior a 7 m/s (Musial *et al.*, 2016).

- d. Potencial Econômico: verifica-se a viabilidade financeira do projeto através da diferença entre o Custo evitado nivelado de energia (LACE) [\$/MWh] e o Custo nivelado de energia (LCOE) [\$/MWh]. Do ponto de vista econômico, se $LACE > LCOE$ (valor líquido positivo), o investimento é vantajoso, caso contrário, não é vantajoso.
- e. Desenvolvimento: quantidade final de energia elétrica fornecida a partir de um determinado recurso renovável.

A Figura 1.5 apresenta uma categorização dos potenciais de eficiência energética propostos para estudos de geração de energias renováveis, podendo ser utilizado tanto na abordagem da geração de energia eólica *offshore* quanto na de energia das ondas.

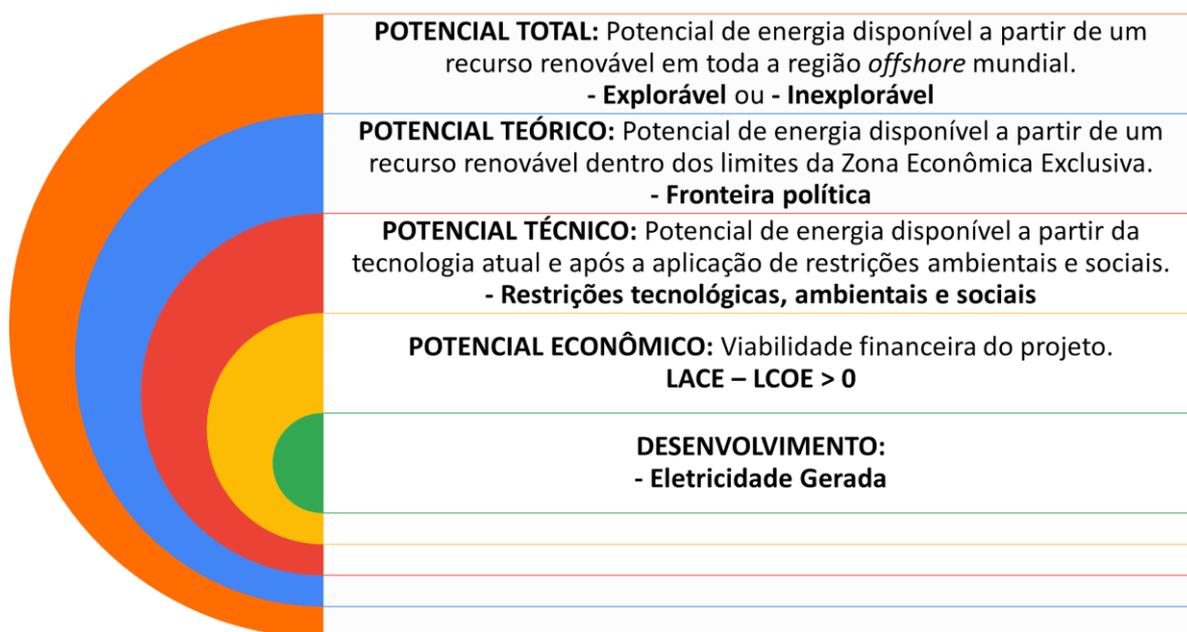


Figura 1.5 - Fluxograma da categorização dos Potenciais de Eficiência Energética *offshore*. Adaptado de Musial *et al.*, 2016.

Nesta pesquisa, foi considerado apenas o potencial teórico, assim a análise limitou-se a estudar a influência dos fatores meteorológicos, na possibilidade de geração de energia a partir dos recursos naturais eólico *offshore* e das ondas na região de estudo.

1.4. Objetivo

O objetivo principal nesta pesquisa, é através da reanálise ERA5, quantificar os potenciais teóricos eólico *offshore* e das ondas, e analisar suas possíveis complementariedades. Na Região Sudoeste do OAS, incluindo o litoral brasileiro das Regiões Sudeste e Sul, dentro do domínio da ZEE.

1.4.1. Objetivos Específicos

Buscando atingir esse objetivo principal, estabeleceu-se uma série de objetivos específicos. Sendo:

1. Climatologia da direção e magnitude dos ventos (m/s) a 100 m acima da superfície;
2. Cálculo do potencial teórico eólico *offshore* (W/m^2) a 100 m acima da superfície;
3. Cálculo do potencial teórico das ondas (kW/m); e
4. Análise da possível complementariedade (%) entre os recursos naturais eólico *offshore* e das ondas.

Além do primeiro Capítulo de introdução, esta pesquisa está organizada em mais cinco partes. O Capítulo 2 apresentará uma revisão bibliográfica sobre a circulação atmosférica local e o clima das ondas, contextualizará a energia eólica e a energia das ondas e, por fim, relatará o breve comportamento de uma geração de energia híbrida.

No Capítulo 3, encontra-se a metodologia utilizada na elaboração desta pesquisa. No capítulo seguinte, os resultados obtidos estão divididos da seguinte forma, a climatologia dos ventos a 100 m da superfície, os potenciais teóricos da geração de energia eólica *offshore* e das ondas, e a complementariedade entre esses recursos naturais renováveis.

As conclusões se encontram no Capítulo 5 e para finalizar, as referências bibliográficas citadas são listadas no Capítulo 6.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Climatologia dos Ventos sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul

Localizada em uma região subtropical, a distribuição dos ventos na Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul (OAS) resulta da interação de diversos sistemas meteorológicos de diferentes escalas espaciais e temporais.

O padrão dos ventos na região é influenciado sinoticamente pela Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Definida como um sistema de alta pressão atmosférica semipermanente sobre o sul do Oceano Atlântico. A ASAS é gerada pela circulação atmosférica geral, associada ao ramo descendente da célula de Hadley. Estabelecendo em aproximadamente 35°-30°S, o Cinturão de Alta Pressão Subtropical do Hemisfério Sul, juntamente com o Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul e o Anticiclone Subtropical do Índico (Figura 2.1).

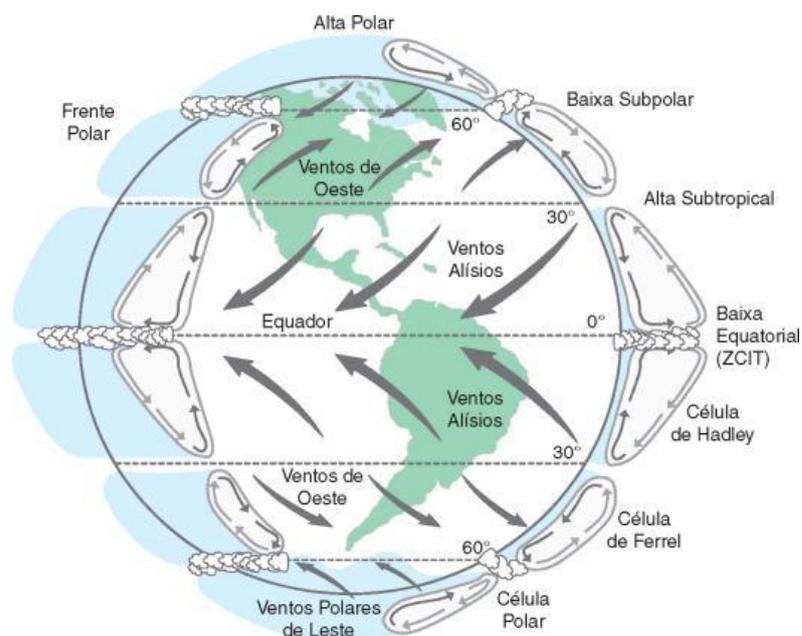


Figura 2.1: Representação esquemática da circulação geral da atmosfera (Dereczynski, C.P., Menezes, W.F. 2015).

Além disso, os Ciclones Subtropicais e os Extratropicais, estes últimos associados aos Sistemas Frontais, também influenciam no padrão dos ventos na Região Sudoeste do OAS.

Degola (2013), descreveu a ASAS através das variáveis Pressão Atmosférica ao Nível Médio do Mar e vento a 10 m acima da superfície, utilizando os dados da reanálise ERA-Interim no período 1989-2010. Seus resultados mostraram que anualmente, o centro do anticiclone situa-se, sobre o oceano, próximo de 30°S-005°W. Os ventos médios mais intensos são observados nas porções norte, leste e sul. Enquanto a oeste, atuando sobre as regiões costeiras brasileiras, os ventos médios são mais fracos e a influência se dá na forma de ventos de direção leste e nordeste.

Através da ERA5, durante o ano, Tavares (2020), observou-se que os ventos de nordeste dominam a circulação sobre o oceano a 10 m da superfície, dado como padrão associado à ASAS. Além disso, foram identificadas duas regiões de alta velocidade dos ventos, um núcleo no estado do Rio de Janeiro (21° - 26° S, 040° - 044° W), com valores de velocidade dos ventos superiores a 7,25 m/s. E um núcleo ao longo do litoral de Santa Catarina e Rio Grande do Sul (28° - 34° S, 048° - 052° W) que se estende pelo OAS, com valores de velocidades dos ventos maiores que 7,75 m/s (Figura 2.2).

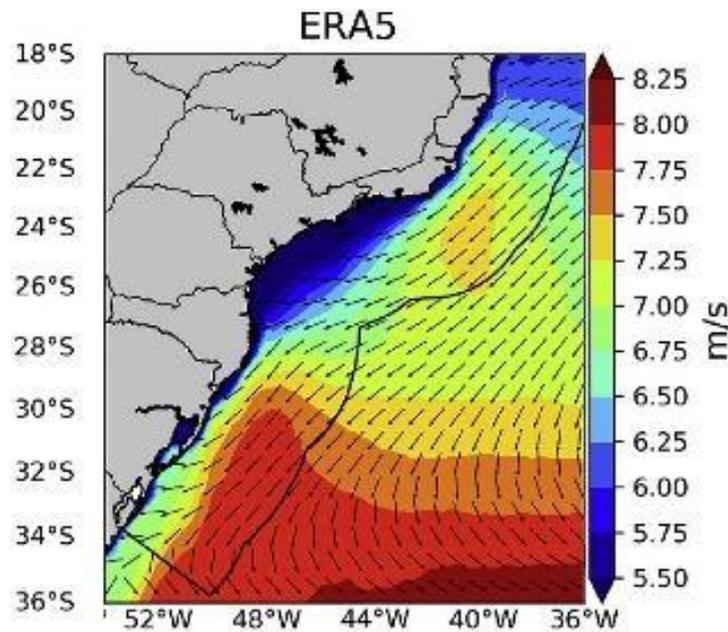


Figura 2.2: Direção e velocidade do vento (m/s) na altura de 10 m para a reanálise atmosférica ERA5 para o período de 2011–2018. Linha sólida preta representa a Zona Econômica Exclusiva (Tavares, 2020).

Sazonalmente, o posicionamento e a intensidade do centro da ASAS, apresentam variações que afetam a direção e a intensidade dos ventos sobre a superfície do oceano, principalmente sobre as regiões costeiras (Sun *et al.*, 2017).

Dereczynski e Menezes (2015), descreveram a ASAS através da variável Pressão Atmosférica ao Nível Médio do Mar, utilizando os dados da reanálise ERA-Interim no período 1989-2010. Os autores observaram que nos meses de verão (Figura 2.3a), o centro da ASAS encontra-se próximo a 32° S- 005° W, mais afastado do continente sul-americano do que no inverno (Figura 2.3b), onde o centro da ASAS está localizado aproximadamente em 27° S- 008° W.

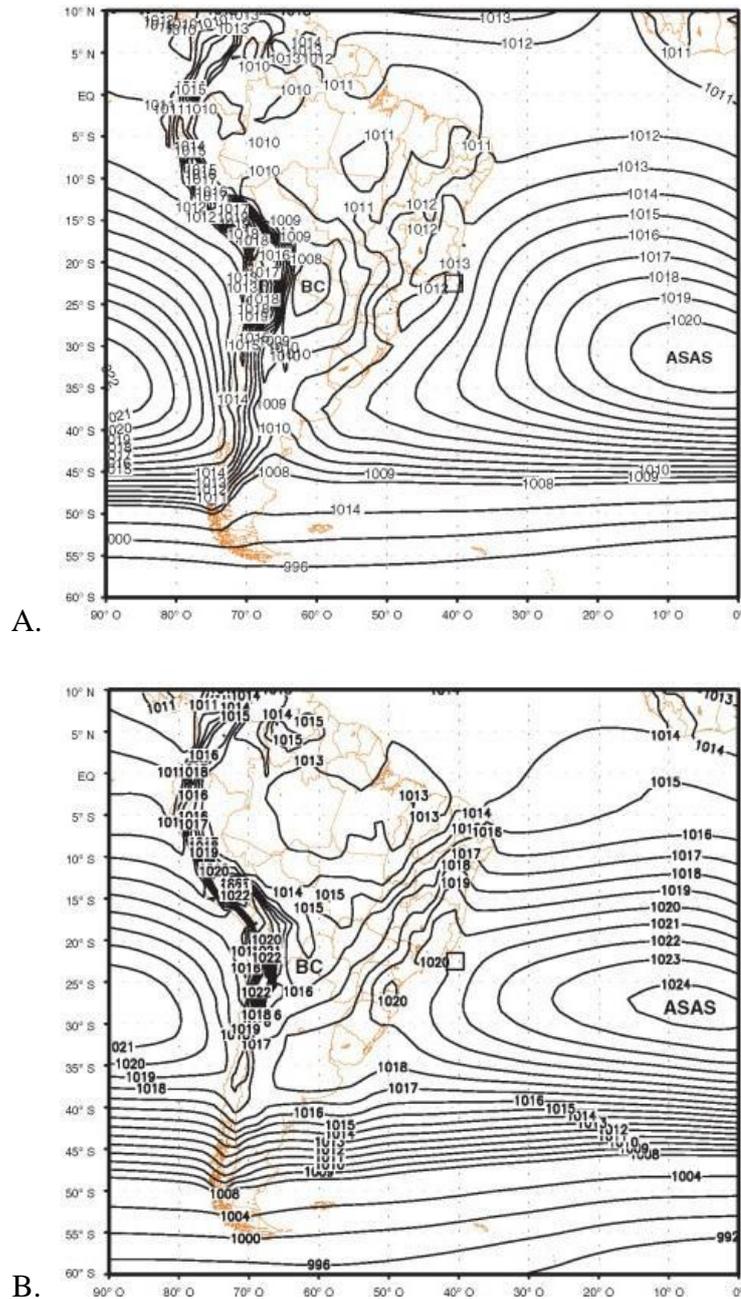


Figura 2.3: Campo de pressão atmosférica (hPa) ao nível médio do mar: valores médios para o período de 1989 a 2010 para (A) Verão – Dezembro/Janeiro/Fevereiro e (B) Inverno – Junho/Julho/Agosto (Dereczynski, C.P., Menezes, W.F., 2015).

Sendo assim, sobre a Região Sudeste do Brasil, Rodrigues e Lorenzetti (2001), afirmaram que durante a primavera e o verão, os ventos são predominantes de nordeste. Castelao e Barth (2006), afirmaram que durante o inverno, devido ao aumento da passagem de frentes frias, se tornam frequentes os ventos de sudoeste. Paiva *et al.* (2021), afirmaram que predominam os ventos de direção nordeste, sendo mais constantes durante a primavera e o verão.

Pimenta *et al.* (2008), afirmaram que no verão, na região compreendida entre 15°-35°S, os ventos predominantes são de direção leste e nordeste. E no inverno, estes ventos predominam na região compreendida entre 20°-25°S, e na região mais ao sul prevalecem os ventos de oeste e sudoeste.

Gan e Rao (1991) descreveram a região ao redor do Uruguai (31.5°S, 055°W), como a região que possui maior frequência de formação de ciclones na América do Sul no inverno. No verão, a região sobre o Golfo de San Matias, na Argentina (42.5°S, 062.5°W), é mais intensa (Gan e Rao, 1991) [Figura 2.4].

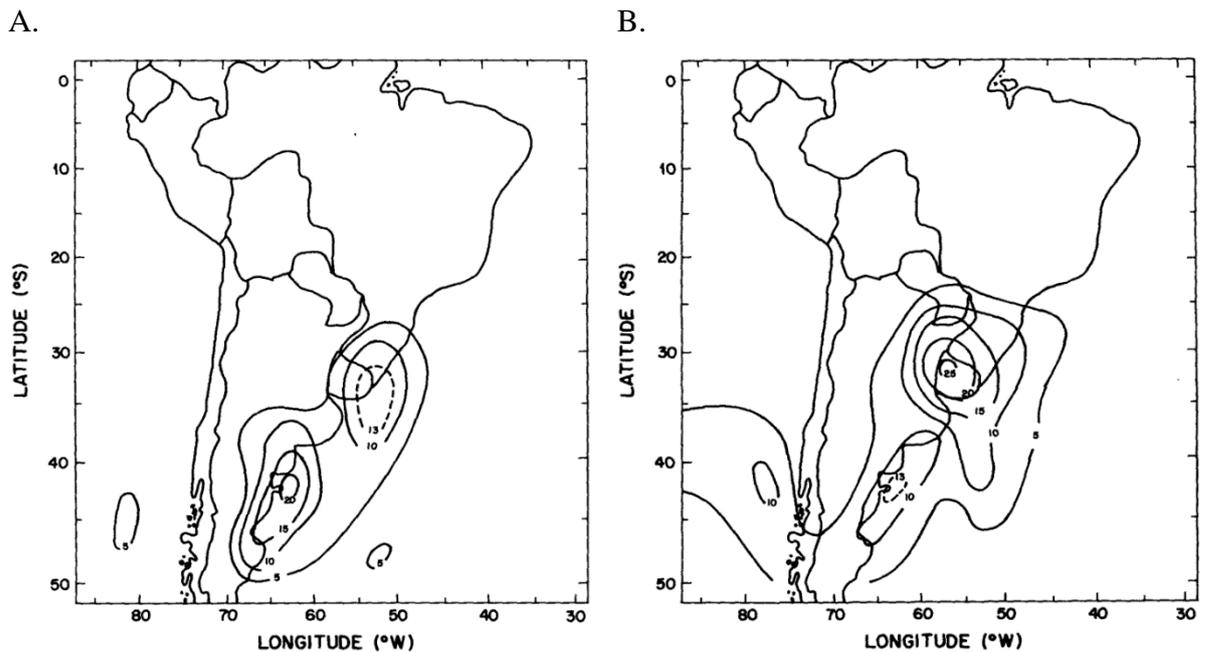


Figura 2.4: Isolinas de frequência de ciclôgeneses para (A) Verão – Dezembro/Janeiro/Fevereiro e (B) Inverno – Junho/Julho/Agosto (Gan e Rao, 1991).

Reboita *et al.* (2008), identificou, no verão, áreas similares aos autores e ainda acrescentou a região à leste do estado de São Paulo, na Região Sudeste do Brasil e o Paraná e Santa Catarina, na Região Sul.

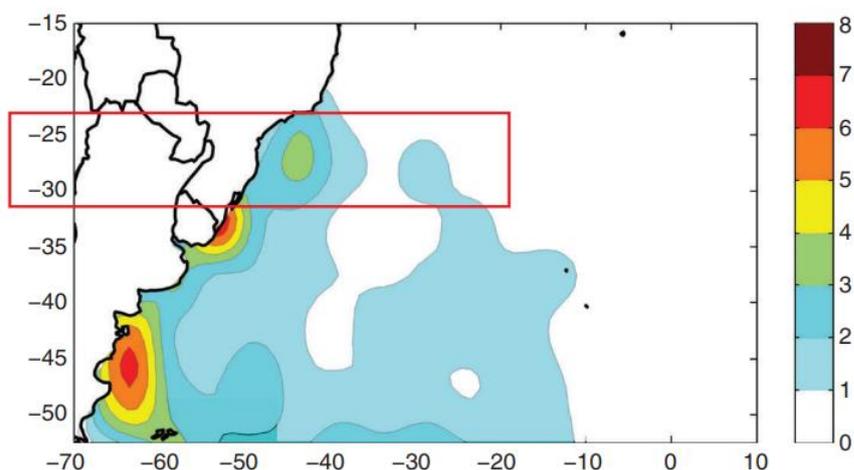


Figura 2.5: Densidade de ciclogêneses (10^{-4} km^{-2}) no período de verão nos anos de 1990 a 1999 (Dereczynski, C.P., Menezes, W.F., 2015). Adaptado de Reboita (2008), indicando zonas preferenciais para ciclogênese. O núcleo verde entre as latitudes de 25°S e 30°S mostra uma nova região ciclogênética de destaque, além das anteriormente destacadas por Gan (1992).

Ademais, Cavalcanti *et al.* (2009), afirmaram que durante o inverno o cinturão de ciclones do Hemisfério Sul encontra-se mais ao norte de sua posição climatológica, aumentando significativamente a passagem de Sistemas Frontais. Enquanto no verão, o cinturão está mais deslocado para sul.

Mensalmente, entre os meses de maio e outubro, ocorrem a passagem de frentes frias em maior número, caracterizando-se, ventos mais frequentes do quadrante sul sobre o Hemisfério Sul (Cavalcanti *et al.*, 2009).

2.1.1 Energia Eólica e o seu Potencial Energético

A energia eólica provém da conversão da energia cinética dos ventos, que ocorrem através do giro das pás dos aerogeradores, em energia mecânica. Utilizada há mais de 3000 anos pela humanidade, iniciou-se através de moinhos de vento em atividades agrícolas, para moagem de grãos e o bombeamento de água, e foi de grande valia no desenvolvimento da navegação (Martins *et al.*, 2008).

Devido à procura por uma forma possível de conversão da energia através dos ventos, eficiente e economicamente viável, foram desenvolvidas diferentes tecnologias. Por definição, a energia eólica *onshore*, é o aproveitamento dos ventos sobre o continente, e *offshore*, sobre corpos d'água. Está última, sendo subdividida em águas rasas, onde o aproveitamento dos ventos ocorre a uma profundidade do fundo oceânico menor que 30 m, águas intermediárias (entre 30 e 60 m) e águas profundas (> 60 m) [Figura 2.6].

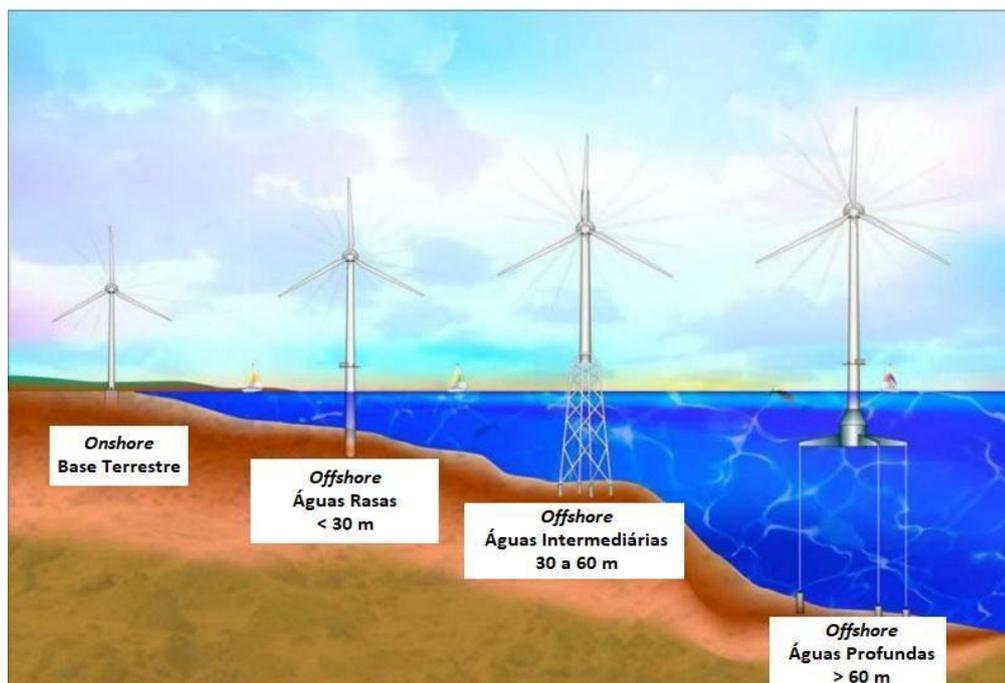


Figura 2.6 - Representação de geração de energia eólica *onshore* e *offshore*. Fonte: Adaptado de Musial e Ram, 2010.

Alves (2010), afirmou que desde o final do século XIX registram-se experiências para a geração de energia elétrica a partir dos ventos. Sendo a Dinamarca, o país pioneiro na utilização de aerogeradores para a geração de energia elétrica desde 1890 (Costa, Casotti e Azevedo, 2009). Em 1976, foi comercializada na Dinamarca a primeira turbina eólica *onshore* para a rede elétrica pública (Costa, Casotti e Azevedo, 2009; Alves, 2010).

Sobre o oceano, a primeira turbina eólica, para geração de energia, foi instalada na Suécia em 1990 (Esteban *et al.*, 2011), mas o primeiro parque eólico *offshore* foi instalado na Dinamarca em 1991, conhecido como *Vindeby Offshore Wind Park* (Vinhoza, 2019).

Através de uma parceria entre o Centro Brasileiro de Energia Eólica e a Companhia Energética de Pernambuco com o instituto de pesquisas dinamarquês *Folkecenter*, o primeiro aerogerador no Brasil foi instalado em 1992, no arquipélago de Fernando de Noronha, não estando mais em operação atualmente. Tavares *et al.* (2020), afirmaram que no Brasil, atualmente, a exploração da energia eólica se dá exclusivamente na forma *onshore*.

De acordo com o relatório elaborado pelo *Global Wind Energy Council* (GWEC), em 2021, a China foi líder mundial na geração de energia eólica *onshore*. E reitera, através do Boletim Anual (2021) da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), que no *ranking* mundial que contabiliza especificamente a nova capacidade instalada no ano, o Brasil aparece em

terceiro lugar pelo segundo ano consecutivo. Além disso, nosso país subiu para a sexta posição no *ranking* mundial de capacidade eólica *onshore* acumulada (Boletim Anual, 2021).

Se tratando da energia eólica *offshore* no mundo, de acordo com o GWEC (2021), um total de 21,1 GW foram gerados a partir de novas instalações. Sendo a China responsável pela maior parte desses projetos instalados com 18 GW, correspondendo a 80% [Figura 2.7a].

Totalizando uma geração de 57,2 GW de instalações mundiais, China, Reino Unido e Alemanha foram as nações líderes na geração de energia eólica *offshore* mundial com 28 GW (48%), 13 GW (22%) e 8 GW (13%), respectivamente (Figura 2.7b) [GWEC, 2021].

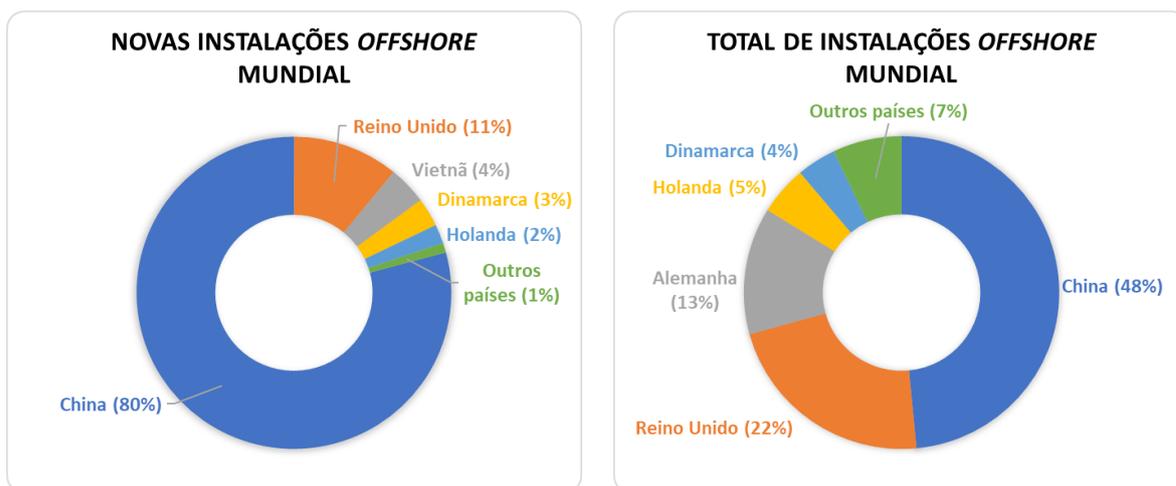


Figura 2.7. a) Novas instalações *offshore* no mundo para o ano de 2021. Fonte: Adaptado do *Global Wind Energy Council, 2022*. b) Total de instalações *offshore* no mundo para o ano de 2021. Fonte: Adaptado do *Global Wind Energy Council, 2022*.

Esteban *et al.* (2011), afirmaram que as modalidades de instalação *offshore* dos parques eólicos possuem vantagens como, uma maior velocidade e uniformidade dos ventos em alto mar, reduzindo os efeitos de turbulência, que consecutivamente aumentam a vida útil do gerador. Além disso, devido às características da camada de ar turbulenta adjacente à superfície do mar, a turbina eólica *offshore* pode ser montada mais baixa que uma *onshore* equivalente.

Os autores ainda asseguraram que outra vantagem, seria uma maior disponibilidade de áreas livres sobre o mar, levando a instalações de maiores parques eólicos. E ainda como bônus, devido à distância das áreas populacionais, haveria a redução de ruídos e dos impactos visuais causados pelas turbinas eólicas.

Vinhoza (2019), afirmou que por serem mais distantes da costa, os parques eólicos *offshore* são visualmente mais bem aceitos, se comparados aos *onshore*.

Porém, de acordo com Esteban *et al.* (2011), as modalidades de instalação *offshore* dos parques eólicos possuem desvantagens como, altos custos nos processos de licenciamento e engenharia e das fases de construção e operação.

Os autores ainda asseguraram outras desvantagens como:

- A construção de redes elétricas para a transmissão aos centros consumidores ou reforço das infraestruturas existentes;
- A necessidade de uma tecnologia mais desenvolvida nos aerogeradores, nas fundações e nas operações marítimas, devido às restrições de acessibilidade e as dificuldades existentes para se trabalhar neste ambiente durante as fases de construção e operação; e
- A análise dos recursos naturais eólicos *offshore* são mais complexos e caros se comparados aos *onshore*.

Vinhoza (2019), afirmou que uma desvantagem, dos parques eólicos *offshore*, são os impactos ambientais causados a fauna e a flora. Como por exemplo, a intensificação dos casos de fatalidade à avifauna, o prejuízo à comunidade bentônica¹ e os impactos sonoros da operação das turbinas causados aos peixes e aos mamíferos marinhos.

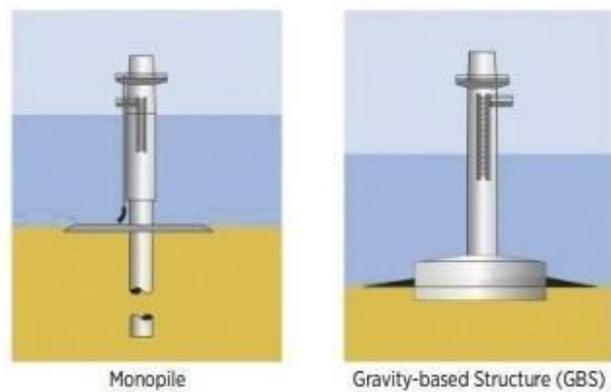
Atualmente, outra desvantagem é o desenvolvimento de tipos de fundações de turbinas eólicas *offshore*. De acordo com o *Roadmap Eólica Offshore Brasil (2020)* da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), as estruturas que compõem as turbinas eólicas *offshore* possuem duas partes distintas: a primeira, situada sobre o nível do mar, e a segunda, chamada de fundação, situada em profundidade. Logo, a fundação é definida como toda a estrutura de sustentação abaixo do nível do mar, que oferece suporte para a instalação das turbinas eólicas *offshore*.

Os principais fatores que direcionam a escolha do tipo da fundação em um parque eólico *offshore* são: profundidade local, condições do leito oceânico, potência da turbina eólica, peso da estrutura, velocidade do rotor, e a própria capacidade de fabricação e instalação das estruturas (*International Renewable Energy Agency, IRENA, 2016*).

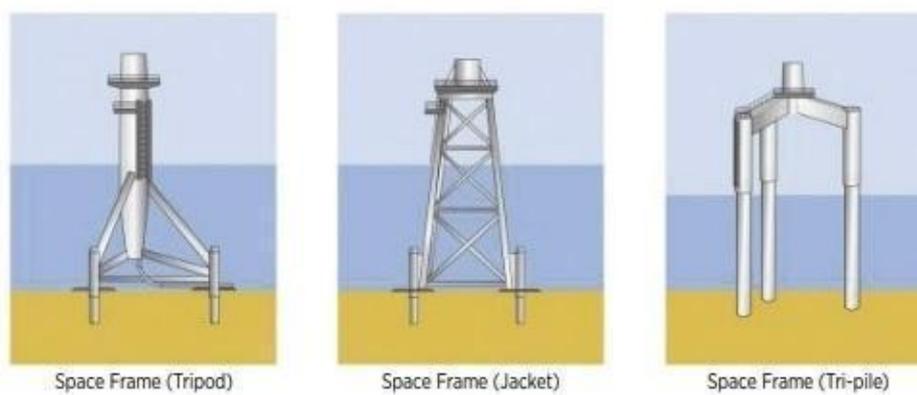
Os principais tipos de fundações utilizadas nas turbinas eólicas *offshore* são: do tipo fixas, subdivididas em monopilar, utilizadas em águas rasas (Figura 2.8a) e jaqueta, em águas intermediárias (Figura 2.8b). E do tipo flutuantes, em águas profundas (Figura 2.8c) [Cavazzi e Dutton, 2016].

¹ Organismos que vivem no fundo do mar.

a)



b)



c)

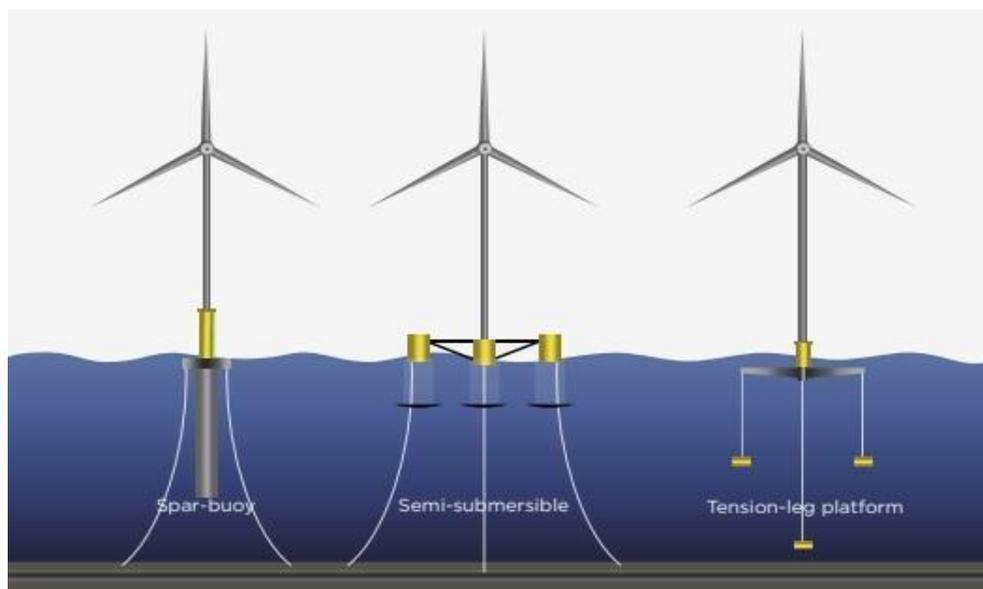


Figura 2.8: a) Tipos de fundações fixas do tipo monopilar para turbinas eólicas *offshore* em águas rasas. Fonte: *International Renewable Energy Agency*, 2016. b) Tipos de fundações fixas do tipo jaqueta para turbinas eólicas *offshore* em águas intermediárias. Fonte: *International Renewable Energy Agency*, 2016. c) Tipos de fundações flutuantes para turbinas eólicas *offshore* em águas profundas. Fonte: *International Renewable Energy Agency*, 2016.

De acordo com o IRENA (2016), os parques eólicos *offshore* têm sido instalados em águas com profundidade inferior a 50 m, utilizando-se fundações de turbinas eólicas *offshore* fixas.

Porém, vários protótipos em escala real, de fundações de turbinas eólicas *offshore* flutuantes, para águas mais profundas, foram implantados. Sendo o primeiro protótipo *Spar-buoy* na Noruega em 2009, o segundo *Semi-submersible* em Portugal em 2011, seguido de três protótipos *Spar-buoy* e *Semi-submersible* no Japão entre 2011 e 2015. Nenhuma fundação do tipo *Tension-leg platform* foi implantada até o momento.

Mostrando assim uma área de inovação com alta aptidão de desenvolvimento, que futuramente poderia oferecer acesso a locais com ventos mais intensos e mercados potencialmente grandes. Como, por exemplo, Japão e Estados Unidos, que possuem poucos locais disponíveis em águas rasas.

Tavares (2020), demonstrou que 86% do potencial técnico eólico *offshore* nas Regiões Sudeste e Sul do Brasil, estavam localizados em águas profundas. Implicando assim, na importância de pesquisas e o desenvolvimento de sistemas flutuantes para o aproveitamento desses recursos naturais nessas regiões.

O Brasil possui recursos *offshore* de forma abundante para a geração de energia a partir dos ventos, em regiões relativamente próximas à costa de cidades grandes e populosas (Pimenta *et al.*, 2008; Shadman *et al.*, 2019; Tavares, 2020).

Shadman *et al.* (2023), afirmaram que atualmente há cerca de 46 publicações científicas sobre eólica *offshore* no Brasil. Alguns estudos foram conduzidos para mapear o potencial teórico de geração de energia eólica *offshore* sobre o OAS.

Pimenta *et al.* (2008), mapearam o potencial teórico eólico *offshore* para as Regiões Sudeste e Sul do Brasil, combinando dados de satélite QuikSCAT com duas estações meteorológicas *offshore*. Sendo a primeira localizada, a 78 m acima do nível do mar, em uma plataforma de petróleo (46.78°S, 026.76°W) da Petrobrás e a segunda uma boia meteorológica (50.80°S, 032.90°W) mantida pelo Centro Hidrografia da Marinha do Brasil, para o período de agosto de 1999 a junho de 2007.

Os autores verificaram que, anualmente, nas alturas de 10 e 80 m, duas regiões apresentaram maior produtividade. Sendo um núcleo localizado ao norte do estado do Rio de Janeiro (19°-23°S), Região Sudeste, e um núcleo localizado na Região Sul (28°-33°S), tendo este acesso a três portos brasileiros: Rio Grande, Imbituba e Itajaí.

Ortiz e Kampel (2011), avaliaram o potencial teórico eólico *offshore* para todo o litoral brasileiro dentro da Zona Econômica Exclusiva (ZEE), utilizando dados do satélite QuikSCAT,

para o período de agosto de 1999 a dezembro de 2009. Os autores verificaram que, anualmente, na altura de 80 m, a média da magnitude dos ventos *offshore* no Brasil variou entre 7 e 12 m/s. E três regiões apresentaram alta magnitude dos ventos, dentre elas, à costa dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, na Região Sul. A região que apresentou as menores magnitude dos ventos foi à costa próxima de São Paulo, na Região Sudeste.

Silva, Cataldi, Dragaud (2016), avaliaram o potencial teórico eólico *offshore* na costa dos municípios de Cabo Frio e Arraial do Cabo, estado do Rio de Janeiro, na Região Sudeste do Brasil. Através de dados *in-situ* de uma boia meteoceanográfica (23.00°S, 042.12°W) do Programa Nacional de Boias (PNBOIA) para o período de julho de 2013 a outubro de 2015.

Os autores verificaram que na altura de 90 m, os recursos do vento local propícios para a geração de energia eólica *offshore*, foram sazonalmente mais fortes nas estações inverno e primavera. Mensalmente, os ventos foram maiores (menores) em setembro (abril), com velocidade média máxima de 8,07 m/s (5,45 m/s).

Silva *et al.* (2016), utilizaram para o período 1989-2009, os dados *Blended Sea Winds* (BSW)² desenvolvidos pela *National Oceanic and Atmospheric Administration*. Um banco de dados montado a partir de várias leituras de satélite da velocidade dos ventos oceânico, utilizados para o mapeamento espacial e análise temporal de pontos em alto mar.

Os autores estimaram o potencial teórico eólico do território marítimo do Brasil. Seus resultados mostraram que na altura de 100 m, a Região Sul se destacou como uma das regiões com forte potencial eólico *offshore*, onde os maiores (menores) índices ocorreram no inverno e na primavera (verão).

Vinhoza (2019), avaliou o potencial teórico eólico *offshore* próximo à costa brasileira. Através dos dados de velocidades médias anuais dos ventos *offshore* em 2013, obtidos junto ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. A autora verificou que, anualmente, na altura de 100 m, na Região Sudeste, destacou-se o norte do estado do Rio de Janeiro, com valores máximos entre 8,0 e 9,5 m/s. Do restante do Litoral Fluminense até o Paraná, os valores máximos foram menores que 8,0 m/s. Na Região Sul, entre Santa Catarina e o Rio Grande do Sul, observou-se junto à costa, valores máximos entre 7,0 e 8,0 m/s, e à medida que se afasta do litoral, observaram-se valores máximos entre 8,0 e 9,5 m/s.

Tavares (2020), avaliou a velocidade dos ventos, anualmente, na altura de 100 m, através da reanálise ERA5 para o período 2011-2018. Identificou-se duas regiões de alta velocidade dos ventos, um núcleo no estado do Rio de Janeiro (21°-26°S, 040°-044°W), com valores máximos de velocidade dos ventos de 9,0 m/s. E um núcleo ao longo do litoral de Santa Catarina e o Rio Grande do Sul (28°-34°S, 048°-052°W) que se estende pelo OAS, com valores máximos

de velocidades dos ventos de 9,5 m/s. O autor estimou que o potencial teórico eólico *offshore*, apresentou valores máximos de 450 W/m², para o núcleo à sudeste e 525 W/m², para o núcleo mais ao sul.

Ao longo do litoral brasileiro, na altura de 100 m, através da reanálise ERA5 para o período 1990-2019, Nascimento (2022), mostrou que, anualmente, há um potencial teórico eólico *offshore* significativo, ao longo da costa Sudeste, destacando-se a região entre os estados do Espírito Santo e São Paulo (20°-25°S), com valores entre 100 e 600 W/m², aumentando à medida que se distancia do litoral. Já na costa Sul, o autor destacou o litoral do Rio Grande do Sul (30°-35°S), com valores máximos variando entre 600 e 1000 W/m².

Mensalmente, o autor observou que nas Regiões Sudeste e Sul, os maiores valores do potencial teórico eólico *offshore*, ocorreram entre julho e outubro. Alcançando, em setembro, 700 W/m² na Região Sudeste. Ao Sul, os valores máximos ocorreram entre agosto e setembro, atingindo os 800 W/m². Entre novembro e junho, há uma redução dos valores máximos, registrando entre fevereiro e março os menores valores máximos na Região Sul.

Observa-se na Tabela 2.1, um resumo dos estudos revisados que mapearam o potencial teórico de geração de energia eólica *offshore* sobre o OAS.

Tabela 2.1: Estudos Revisados que mapearam o potencial teórico de geração de energia eólica *offshore* sobre o Oceano Atlântico Sul.

Estudos Revisados	Altura				Periodicidade			Região	
	10 m	80 m	90 m	100 m	Anual	Sazonal	Mensal	Sudeste	Sul
Pimenta <i>et al.</i> (2008)	•	•			•			•	•
Ortiz e Kampel (2011)		•			•			•	•
Silva, Cataldi, Dragaud (2016)			•			•	•	•	
Silva <i>et al.</i> (2016)				•		•		•	•
Vinhoza (2019)				•	•			•	•
Tavares (2020a)				•	•			•	•
Nascimento (2022)				•	•		•	•	•

Importante ressaltar que Nascimento (2022), ainda demonstrou a média horária do potencial teórico eólico *offshore*.

2.2 Climatologia das Ondas sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul

No Brasil, em geral, a formação das ondas é caracterizada pelos sistemas meteorológicos atuantes, sendo na região de estudo, ASAS, Ciclones Subtropicais e Extratropicais, Sistemas Frontais e o Anticiclone Polar Migratório, *cf.* seção 2.1, entre outros.

Observa-se que no oceano, o intervalo de frequência associado às forças externas é amplo e a resposta da superfície do oceano contém um intervalo de períodos de onda associado (Figura 2.9). Nesta pesquisa serão abordadas ondas com período de 1 a 30 s, conhecidas como ondas de gravidade superficial, chamadas nesta pesquisa apenas de ondas, que são geradas pelos ventos.

Os processos de geração destas ondas dependem fundamentalmente de 3 fatores:

1. A velocidade dos ventos;

2. A duração dos ventos; e
3. A pista (área sobre o oceano onde os ventos atuam transferindo energia).



Figura 2.9: Distribuição de frequência das ondas no oceano por classificação (informações em vermelho) e força geradora (informações em verde). Fonte: Adaptada de Munk (1950).

Além disso, estas ondas podem ser classificadas, conforme Figura 2.10, como:

- Vagas: ondas geradas localmente, que estão recebendo diretamente energia dos ventos que as gerou com período inferior a 8 s; e
- Marulhos: ondas que se propagam após a zona de geração, e não sofrem mais influência dos ventos com período superior a 8 s.

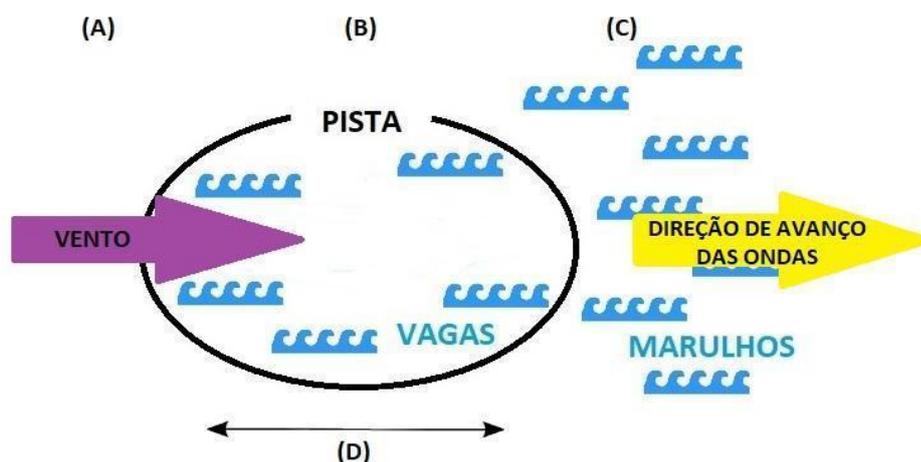


Figura 2.10: Esquema de geração de vagas e marulhos. Ponto (A) representa as ondulações transformando-se em vagas devido ao vento (indicado pela seta roxa), ponto (B) representa um mar completamente desenvolvido e o ponto (C) representa a transformação em marulho. O ponto (D) indica o tamanho da pista de geração das ondas e a seta amarela a direção de deslocamento das ondas.

Diferentes estudos sobre climatologia das ondas, contemplam a região de estudo. Utilizando-se observações *in situ* de boias meteoceanográficas, na Bacia de Campos, que abrange o norte do estado do Rio de Janeiro, destacam-se Violante-Carvalho (1998), Parente (1999), Pinho (2003) e Parente *et al.* (2014). Definindo quatro categorias principais de estado do mar:

- Bom Tempo: ocorre sobre predomínio da ASAS na região, gerando ventos de octante nordeste e um mar local na mesma direção dos ventos;
- Bom Tempo com Marulhos: ocorre quando há uma combinação no mar local de ondas de direção nordeste com ondulações distantes vindas da Região Sul;
- Mau Tempo – Tempestade de sudoeste: ocorre durante a passagem de Sistemas Frontais, onde o mar local é caracterizado por ondas de direção sudoeste e sul;
- Mau Tempo – Tempestade de sudeste: ocorre quando o Anticiclone Polar Migratório atua na circulação dos ventos na região, após a passagem de Sistemas Frontais, onde o mar local é caracterizado por ondas de direção sudeste.

Nascimento (2013), averiguou a Bacia de Santos, entre as Regiões Sudeste e Sul do Brasil, classificando os estados do mar de acordo com os sistemas meteorológicos que dominam a circulação dos ventos na região. E dividiu-os em três categoriais principais: Situação de Bom Tempo, caracterizado por ondas de direção de quadrante norte e leste, associadas ao posicionamento da ASAS sobre o oceano; Situação de Mau Tempo de sudoeste, associados a

passagem de Ciclones Subtropicais e os Extratropicais e Mau Tempo de sudeste, associada ao posicionamento do Anticiclone Migratório Pós-frontal.

Nogueira (2014), descreveu o clima de ondas na Bacia do Espírito Santo, costa sudeste do Brasil, utilizando 15 anos (1996 - 2010) de simulações com o modelo numérico de ondas *WAVEWATCH III*. Tais resultados se mostraram representativos do estado de mar na região quando confrontados com dados de uma boia meteo-oceanográfica fundeada durante o período de 12/10/2006 a 25/12/2006. Observando duas direções preferenciais para as ondas na região, sendo a mais recorrente de leste, seguida da direção sul. Sazonalmente, o verão apresentou os menores valores de Altura Significativa das Ondas e Períodos, com predomínios de ondas de direção de leste. Nos meses de abril, maio e junho foram encontrados valores de Altura Significativa das Ondas acima de 3,5 m.

Cotrim, Semedo e Lemos (2022), descreveram com base na reanálise ERA-5 e no *hindcast* de ondas de alta resolução, o ERA-5H, ambos desenvolvidos pelo *ECMWF*, que entre 1979-2020, a Altura Significativa das Ondas, apresentou em média, valores inferiores a 2 m, anualmente, entre as latitudes 30°S e 30°N. Além disso, os autores afirmaram que por mais que a costa brasileira apresente baixos valores de Altura Significativa das Ondas, anualmente, é possível observar ondas mais altas vindas do Oceano Antártico. Próximos à costa, as ondas tendem a diminuir sua Altura Significativa das Ondas.

Avaliando as vagas, Cotrim, Semedo e Lemos (2022), observaram que Altura Significativa das Ondas, atingiram valores máximos próximos a 2,5 m (40°S, 040°W). Enquanto na avaliação dos marulhos, o valor médio máximo não ultrapassou 1,5 m. Além disso, na região de estudo, as direções médias das ondas, em ambos os cenários, sofreram uma maior contribuição das ondas de sudeste.

Na Bacia de Campos, sazonalmente, Piumbini (2009), avaliou que no verão, a direção predominante das ondas se dá de nordeste. Enquanto no outono, inverno e primavera a direção predominante é de sudeste. Campos (2009), constatou que as maiores ondulações que atingem a região, são geradas por Ciclones Subtropicais e os Extratropicais, incidindo principalmente no inverno e outono, seguido pela primavera e verão.

2.2.1 Energia das Ondas e o seu Potencial Energético

Como consequência do efeito dos ventos sobre a superfície do oceano, é possível a extração da chamada energia das ondas. Onde geração de energia das ondas *onshore*, é quando os dispositivos estão fixos ou incorporados à linha da costa (Figura 2.11).

Geração de energia das ondas *nearshore*, é quando os dispositivos são instalados em regiões

de águas rasas ou intermediárias, em geral em águas com profundidades próximas a 15 m e não superior a 50 m. E *offshore*, é quando os dispositivos são instalados em regiões oceânicas de águas profundas, em locais com profundidade superior a 50 m (Figura 2.11).

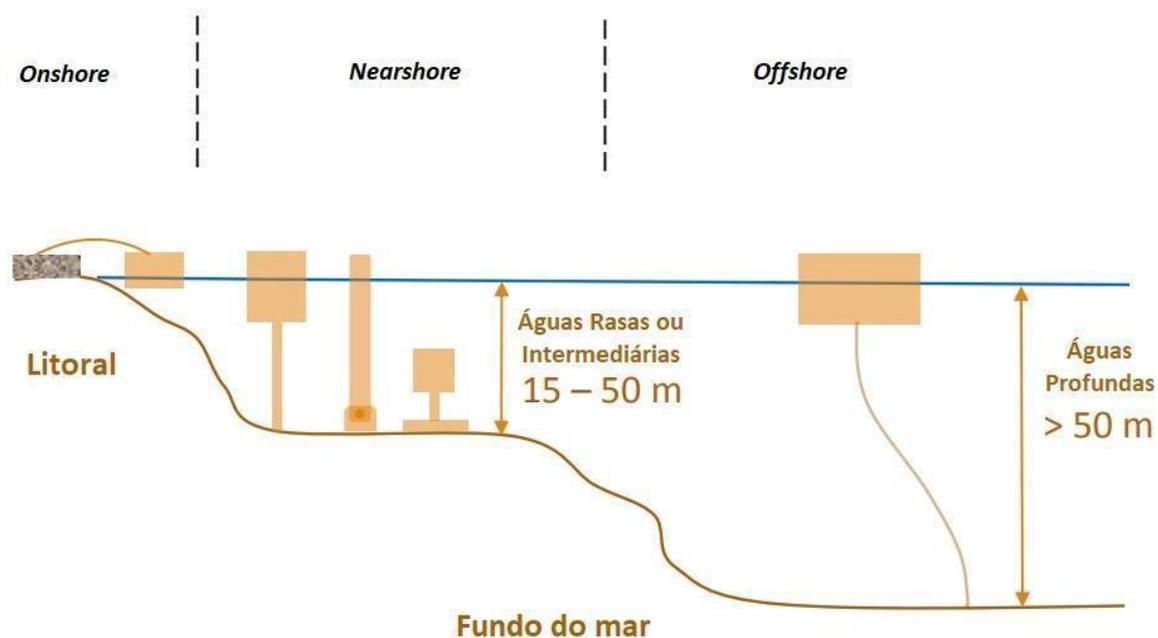


Figura 2.11 - Representação da geração de energia das ondas *onshore*, *nearshore* e *offshore*. Fonte: Adaptado de De Freitas Assad e Shadman, 2021.

Existem relatos que as primeiras ideias, de extração da energia das ondas, tenham sido patenteadas no final do século XVIII. Atualmente, países como Dinamarca, Noruega, Portugal, Reino Unido e Suécia, na Europa, Estados Unidos da América, na América e China, Índia e Japão, na Ásia, vem investindo na geração de energia através das ondas (Cruz e Sarmento, 2004).

De acordo com o Plano Nacional de Energia 2030 (2007) da EPE, dada a tecnologia de transformação em energia elétrica, a energia das ondas seria capaz de suprir aproximadamente 16% da demanda anual mundial de energia elétrica.

As ondas de maior potencial energético concentram-se ao sul da América do Sul, nos países da Europa banhados pelo Atlântico Norte, particularmente o Reino Unido, e na Austrália. O principal destaque se dá, ao sudoeste da Nova Zelândia, com valores médios estimados em até 100 kW/m. As regiões das ondas pobres em energia, ou seja, com menor potencial energético incluem a América Central, costa sudeste dos Estados Unidos e América do Sul, oeste da África, sudeste asiático e Japão, onde a densidade energética média das ondas apresenta valores entre 10 e 20 kW/m (Figura 2.12).

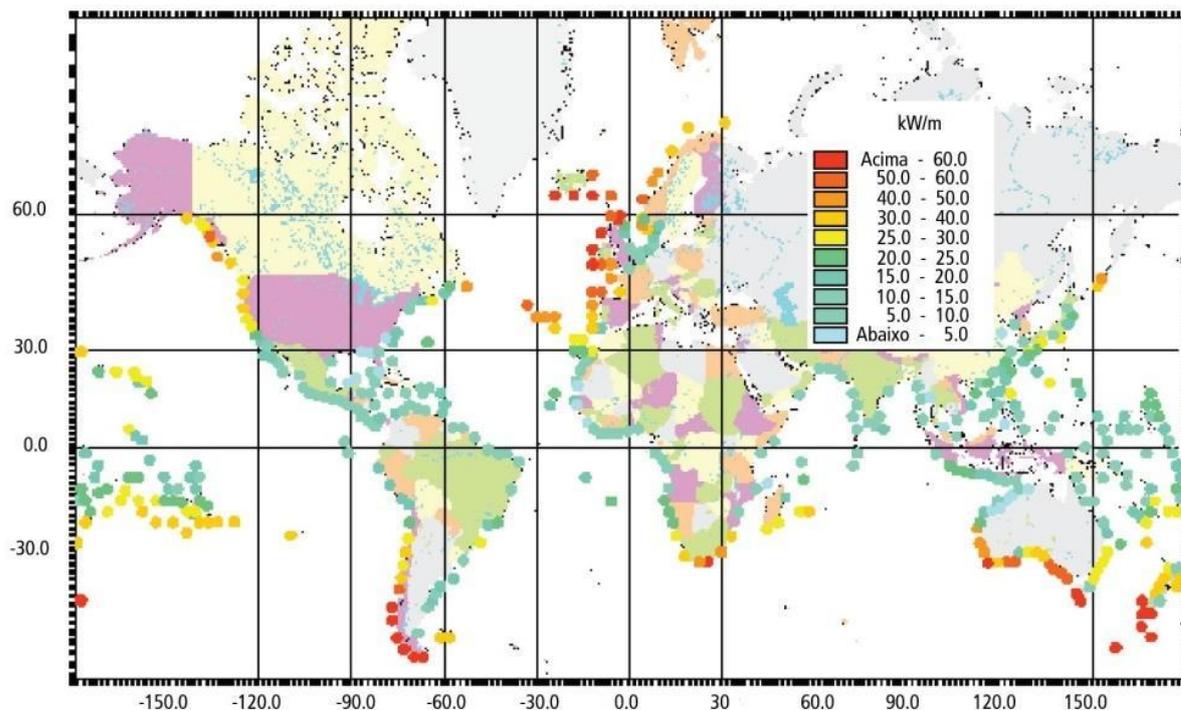


Figura 2.12 : Distribuição Mundial da Densidade Energética das Ondas. Fonte: Plano Nacional de Energia 2030 (2007) da Empresa de Pesquisa Energética.

Ainda de acordo com o Plano Nacional de Energia 2030 (2007), algumas vantagens de extração de energia das ondas são:

- Não há consumo de combustível;
- Disponibilidade em abundância;
- Um dos sistemas de geração de energia elétrica mais seguros;
- Criação de postos de trabalho com a implantação, operação e manutenção dos equipamentos; e
- Contribuição para o desenvolvimento socioeconômico permitindo acesso à energia elétrica de comunidades isoladas do sistema elétrico interligado.

Além disso, as tecnologias voltadas para a extração de energia das ondas *onshore* possuem a permanência em terra dos equipamentos de geração, facilitando manutenção e evitando a instalação de cabos de transmissão submarinos. E as tecnologias *offshore*, possibilitam o aproveitamento das ondas de maior potência, não atenuadas pelo atrito com o fundo do mar.

Porém, uma desvantagem da extração de energia das ondas através de tecnologias *onshore* é o custo maior na construção, devido à aquisição do terreno para a instalação da usina, e as restrições socioambientais, relacionadas ao ruído, poluição visual e interferência com a flora, fauna e atividades turísticas. E as tecnologias *offshore* possuem restrições socioambientais,

relacionadas a interferência com a flora, fauna e com as atividades turísticas e pesqueiras, além, do risco à navegação.

Aragão (2019), afirmou que a instalação de parques de geração de energia através das ondas possui desvantagens em áreas costeiras, como o impacto visual, além do impacto dos ruídos, que pode influenciar no afastamento das aves e produzir perda de *habitat* de espécies marinhas.

A autora ainda levantou a hipótese de outro impacto negativo, que seriam os acidentes com grandes navios. Porém, esses acidentes iriam gerar mais danos ao dispositivo do que ao meio ambiente, pois os sistemas de energia das ondas contêm pequenas quantidades de óleo de lubrificação (*Wave Energy Centre*, 2004).

No Brasil, há diferentes projetos de conversão da energia das ondas conhecidos. Porém poucos foram efetivamente testados em protótipos, pois as tecnologias ainda estão em estágio pré-comercial. Necessitando pesquisas e aprimoramentos, para redução dos custos de investimento e desenvolvimento tanto da eficiência da conversão quanto da confiabilidade operacional (Plano Nacional de Energia 2030, 2007).

O Brasil foi pioneiro, sendo o primeiro país da América Latina a instalar um protótipo de conversão de energia das ondas em escala real (Shadman *et al.*, 2023). Sendo um projeto elaborado pelo Laboratório de Tecnologia Submarina em parceria com o LabOceano, ambos do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da UFRJ.

O Conversor Hiperbárico para extração da energia das ondas e geração de eletricidade está localizado no Porto do Pecém, na costa do estado do Ceará. Sua principal vantagem é possibilitar a simulação de elevadas quedas d'água sem que para isso seja necessário ocupar áreas de grande extensão, como exigem as hidroelétricas (Sesmil, 2013).

De acordo com Shadman *et al.* (2023), na Região Sudeste do Brasil, atualmente, em fase de pesquisa e desenvolvimento, podemos destacar o conversor de energia das ondas *nearshore*. Desenvolvido para instalação na costa do Rio de Janeiro, em águas relativamente rasas de 25 a 30 m, com capacidade alcançada de 50 kW.

Shadman *et al.* (2023), afirmaram que as pesquisas sobre energia das ondas no Brasil começaram nos anos 2000. Alguns estudos foram conduzidos para mapear o potencial das ondas sobre o OAS.

De acordo com o Plano Nacional de Energia 2030 (2007), anualmente, na costa brasileira, observaram-se valores de densidade energética média das ondas de 15 a 25 kW/m, porém na costa da Região Sul, observaram-se valores de 25 a 30 kW/m. Sazonalmente, foram registradas no inverno, as ondas que carregam maior quantidade de energia.

Shadman *et al.* (2019), mapearam o potencial teórico das ondas ao longo da costa brasileira

compreendida dentro da ZEE, utilizando modelos globais de resolução horizontal de $1/12^\circ$ (~9 km) para o período 2015-2017. Foi observado que as áreas que possuem as ondas mais energéticas, estão localizadas próximas as costas das Regiões Sul e Sudeste, com valores anuais de densidade média de potência das ondas entre 20 e 25 kW/m. Sendo intensificados, durante as estações de outono e inverno.

Cotrim, Semedo e Lemos (2022), afirmaram que, no geral, os valores de potência das ondas, encontrados no OAS, são relativamente baixos.

2.3. Complementariedade Energética entre os recursos naturais Eólico e das Ondas sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul

De acordo com Kardakaris, Boufidi e Soukissian (2021), uma solução plausível para compensar os elevados custos de instalação e manutenção da geração de energia eólica *offshore*, é o investimento no desenvolvimento de sistemas híbridos de energia.

Os autores citaram como exemplo, a combinação da geração de energia através dos ventos com uma fonte de energia renovável marinha, como a energia gerada através das ondas. Além disso, afirmaram que nos estudos de viabilidade para o desenvolvimento destes parques híbridos de energia, a complementariedade é um dos aspectos mais importantes.

Portanto, a exploração conjunta da energia eólica *offshore* e da energia das ondas, parece ser uma solução promissora para compensar a crescente procura de energia e os elevados custos da energia eólica *offshore*.

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

Na Figura 3.1 é apresentado o fluxograma da metodologia aplicada nesta pesquisa para chegar aos objetivos geral e específicos. Inicialmente, foi definida a região de interesse, à Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul (OAS), incluindo o litoral brasileiro das Regiões Sudeste e Sul, dentro do domínio da Zona Econômica Exclusiva (ZEE), e o período a ser estudado, 1991-2020, além da reanálise a ser utilizada, à reanálise ERA5.

Na segunda etapa, após definir as condições iniciais, a obtenção dos dados se deu através da ERA5, e a magnitude dos ventos foi calculada na altura de 100 m acima da superfície. Então, na terceira etapa, em posse de todas as variáveis que seriam utilizadas, a climatologia da direção e magnitude dos ventos na altura de 100 m foi estimada. Seguida, dos potenciais teóricos eólico *offshore* e das ondas. Por fim, em posse dos potenciais teóricos, avaliou-se as complementariedades entre os recursos naturais eólico *offshore* e das ondas.

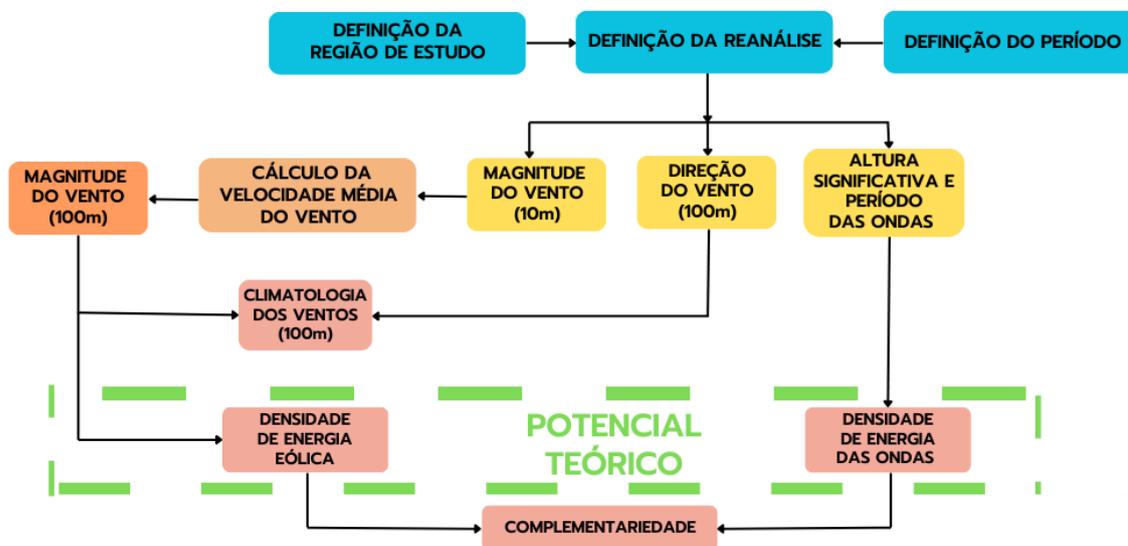


Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia aplicada nesta pesquisa, sendo ● Condições Iniciais ● Conjunto de dados da reanálise ERA5 ● Parametrização ● Conjunto de dados da reanálise ERA5 após parametrização ● Potencial Teórico ● Resultados.

3.1 Região de Estudo

A região de estudo (*cf.* Figura 1.4) está localizada sobre o OAS (18° - 34° S, 036° - 055° W), compreendendo o litoral brasileiro das Regiões Sudeste, contemplando a costa dos estados Espírito Santo, Rio de Janeiro e São Paulo, entre as latitudes $18^{\circ}20'$ e $25^{\circ}18'S$. E Sul, incluindo a costa do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, entre as latitudes $25^{\circ}18'$ e $33^{\circ}44'S$, dentro do domínio da ZEE.

3.2 Conjuntos de dados da Reanálise ERA5

A reanálise ERA5 possui cobertura temporal desde 1940 até o presente, frequência horária de variáveis climáticas atmosféricas, terrestres e oceânicas, domínio global com resolução espacial de 30 km e 137 níveis isobáricos desde a superfície até uma altura de 80 km (Hersbach *et al.*, 2018).

Na Tabela 3.1, apresentam-se as características do conjunto de dados da ERA5 consideradas nesta pesquisa para o período de 01 de janeiro de 1991 até 31 de dezembro de 2020 (30 anos).

Tabela 3.1: Características do conjunto de dados da reanálise ERA5 utilizados. Fonte: Adaptado de Hersbach *et al.*, 2018.

Reanálise	Resolução horizontal	Resolução horizontal	Resolução temporal
	atmosférica	oceânica	
ERA5	0,25° X 0,25°	0,5° X 0,5°	Mensal

Ressalta-se que, foram gerados campos médios recorrendo-se ao *software Grads*, e a utilização de dados da ERA5 com resolução temporal mensal, se deu com o intuito de reduzir o grande esforço computacional requerido pelos dados com resolução temporal horária. Além disso, as médias mensais da ERA5 disponíveis são elaboradas a partir de todos os dados horários daquele mês de acordo com o *ERA5 online data documentation*.

Todos os resultados obtidos nesta pesquisa foram apresentados em escala anual, sazonal e mensal. Destaca-se que nos campos médios sazonais, considerou-se:

- Verão (dezembro, janeiro e fevereiro) [DJF];
- Outono (março, abril e maio) [MAM];
- Inverno (junho, julho e agosto) [JJA]; e
- Primavera (setembro, outubro e novembro) [SON].

3.3 Estimativas dos Ventos

Para as estimativas da direção e magnitude dos ventos *offshore* e do Potencial Teórico Eólico *Offshore*, na altura de 100 m, foram utilizadas as seguintes variáveis no formato *Network Common Data Form (NetCDF)*:

- Vento Zonal (u_{100}) [m/s] e Vento Meridional (v_{100}) [m/s] a 100 m, acima da superfície;
- Velocidade do Vento (v_{ref}) [m/s] a 10 m, acima da superfície.

3.3.1 Cálculo da Magnitude dos Ventos

Em aplicações da energia eólica *offshore*, são de interesse as propriedades dos ventos na

altura do rotor dos aerogeradores, que normalmente se encontram entre 70 e 100 m, variando de acordo com a configuração do equipamento (Silva *et al.*, 2016).

A utilização da Equação 3.1 para cálculo da magnitude dos ventos a 100 m da superfície (M_{100}), a partir das componentes u_{100} e v_{100} do vento, resulta em valores errôneos.

$$M_{100} = \sqrt{\overline{u_{100}^2} + \overline{v_{100}^2}} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Onde,

M_{100} = Magnitude do vento (m/s) a 100 m, acima da superfície;

$\overline{u_{100}}$ = Média da componente Zonal do vento (m/s);

$\overline{v_{100}}$ = Média da componente Meridional do vento (m/s).

A velocidade média mensal do vento é calculada a partir da magnitude do vento em cada instante durante o mês, seguida pela média desses valores. No entanto, a magnitude média do vento difere da magnitude das componentes médias do vento (Equação 3.1). Por exemplo, considere um vento com magnitude de 10 m/s para oeste durante metade do mês e para leste na outra metade. Embora a velocidade média do vento seja de 10 m/s, a velocidade das componentes médias do vento resulta em zero (*ERA5 online data documentation*).

Barboza *et al.* (2020), afirmaram que na Lei do Perfil Logarítmico (Pimenta *et al.*, 2008; Silva, Cataldi, Dragaud, 2016; Silva *et al.*, 2016; Tavares, 2020; Barboza *et al.*, 2020; Nascimento, 2022) é considerada a estabilidade neutra da atmosfera, além da utilização do coeficiente de rugosidade da superfície, tomado por um valor padrão.

Salienta-se que os autores alegaram que essa parametrização representa erros na estimativa da velocidade de fricção que, conseqüentemente, propagam erros na estimativa da velocidade dos ventos em diferentes alturas.

No entanto, a Lei do Perfil Logarítmico apresenta uma modelagem simplificada que facilita sua implementação, permitindo o cálculo da variação do vento nas camadas próximas à superfície terrestre, onde a resistência do solo e a rugosidade são fatores críticos para a dinâmica do vento.

Através dessa parametrização, é possível obter estimativas confiáveis sem a necessidade de modelos atmosféricos complexos, dependendo apenas de parâmetros como a velocidade do vento em uma altura de referência, a altura de interesse e a rugosidade da superfície.

Portanto, nesta pesquisa, optou-se por utilizar a Lei do Perfil Logarítmico (Equação 3.2) para o cálculo da magnitude dos ventos a 100 m da superfície.

$$v(Z) = v_{ref} \frac{\ln\left(\frac{Z}{Z_*}\right)}{\ln\left(\frac{Z_{ref}}{Z_*}\right)} = 1,2v_{ref} \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde,

$v(Z)$ = Velocidade do Vento na Altura Desejada;

v_{ref} = Velocidade do Vento na Altura de Referência (Z_{ref});

Z = Altura Desejada ($Z = 100$ m);

Z_{ref} = Altura de Referência ($Z_{ref} = 10$ m);

Z_* = Coeficiente de Rugosidade da Superfície ($Z_* = 0,2$ mm).

3.3.2 Avaliação do Potencial Teórico Eólico *Offshore*

O cálculo da Densidade de Energia do Vento (DEV), representa o fluxo de energia cinética dos ventos por unidade de área. Resultando em uma medida teórica para análise da capacidade de geração de energia eólica para uma dada região a uma determinada altura. Ou seja, DEV representa o Potencial Teórico Eólico.

A DEV foi calculada a 100 m da superfície (Equação 3.3), considerando o valor da densidade do ar (ρ_{ar}) de aproximadamente $1,225 \text{ kg/m}^3$ (Pimenta *et al.*, 2008; Silva *et al.*, 2016; Tavares, 2020; Nascimento, 2022).

$$DEV = \frac{1}{2} \rho_{ar} v(Z)^3 = 0,6v(Z)^3 \quad (\text{Equação 3.3})$$

Onde,

DEV = Densidade de Energia do Vento (W/m^2);

ρ_{ar} = Densidade do Ar ($\rho_{ar} = 1,225 \text{ kg/m}^3$);

$v(Z)$ = Velocidade do Vento na Altura Desejada (m/s).

3.4 Avaliação do Potencial Teórico das Ondas

Para as estimativas das ondas, foram utilizadas as seguintes variáveis no formato *NetCDF*:

- Altura Significativa das Ondas (H_s) [m] a partir da combinação de vagas e marulhos; e
- Período médio das ondas (T_e) [s].

O cálculo da Densidade de Potência das Ondas (P), representa o fluxo de energia de onda disponível (Zheng *et al.*, 2015). Resultando em uma medida teórica para análise da capacidade de geração de energia das ondas para uma dada região. Ou seja, P representa o Potencial Teórico das Ondas.

A P foi calculada através da Equação 3.4, considerando o valor da densidade do mar (ρ_{mar}) de aproximadamente 1025 kg/m^3 (Zheng *et al.*, 2015; Shadman *et al.*, 2019).

$$P = \frac{\rho_{mar}g^2}{64\pi} H_s^2 T_e = 0,49H_s^2 T_e \quad (\text{Equação 3.4})$$

Onde,

P = Densidade de Potência das Ondas (kW/m);

ρ_{mar} = Densidade do Mar ($\rho_{mar} = 1025 \text{ kg/m}^3$);

g = Aceleração da gravidade ($g = 9,806 \text{ m/s}^2$);

H_s = Altura Significativa das Ondas a partir da combinação de vagas e marulhos (m); e

T_e = Período médio das ondas (s).

3.5 Complementariedade Energética entre os recursos naturais Eólico *Offshore* e das Ondas

Além dos valores médios de densidade potencial usados para descrever o potencial teórico em uma determinada região, é essencial entender como o recurso renovável se comporta temporariamente.

De acordo com Nascimento (2022), a complementariedade entre dois ou mais recursos, pode ser abordada a partir de múltiplos métodos, incluindo as análises de coerência, gráfica, de frequência e de *cluster*. Além da utilização dos métodos de correlação, sendo os mais utilizados, o de Pearson, de Kendall e de Spearman.

Nesta pesquisa, foi empregada uma abordagem diferente das citadas anteriormente. O objetivo foi estimar a complementariedade entre ambos os recursos naturais renováveis em função da sua disponibilidade; ou seja, períodos nos quais os potenciais teóricos eólico *offshore* e das ondas se igualam ou superam os limiares mínimos adotados.

Essa metodologia foi utilizada por autores como Kardakaris, Boufidi e Soukissian (2021), cujo objetivo foi identificar locais favoráveis a instalação de sistemas híbridos de geração de energia, a partir de recursos naturais eólico *offshore* e das ondas, através da ERA5, sobre os mares gregos. E Onea e Rusu (2022), cujo objetivo foi identificar as complementariedades entre os recursos naturais solar, eólico e das ondas, através da ERA5, sobre região oceânica de Portugal. Além de Nascimento (2022) e Nascimento *et al.* (2022), cujo objetivo foi analisar possíveis complementariedades entre os recursos eólico e solar *offshore*, através da ERA5, sobre a costa brasileira.

Com o objetivo de considerar conjuntamente os potenciais teóricos e a sua persistência a longo prazo, foram determinados limiares mínimos para o funcionamento do aerogerador eólico e da usina alimentada pelo movimento das ondas.

Para avaliar a disponibilidade do recurso eólico, o limite inferior mínimo adotado foi $DEV_{min} = 210 \text{ W/m}^2$, equivalente à potência gerada pelo vento 100 m de altura com velocidade igual a 7 m/s (Musial *et al.*, 2016). E para avaliar a disponibilidade do recurso das ondas, foi

considerado $P_{min} = 5 \text{ kW/m}$ (Kardakaris, Boufidi e Soukissian, 2021; Onea e Rusu, 2022).

A geração de energia das ondas complementada pela geração de energia eólica (do inglês *Wind Complements Wave – WCW*) chamado nesta pesquisa de VCO (Vento Complementa Onda) [%], foi calculada pela razão entre o número de horas em que $DEV \geq DEV_{min}$ e $P < P_{min}$ e o número total de horas do período analisado (Equação 3.5).

$$VCO = \frac{N^{\circ}horas (DEV \geq DEV_{min} e P < P_{min})}{NTH} \text{ (Equação 3.5)}$$

Onde,

VCO = Complementariedade do recurso eólico na geração de energia das ondas (%); e

NTH = Número total de horas do período analisado (h).

O valor de VCO pode variar entre 0 e 1, sendo 1 a representação de uma região onde a geração de energia eólica é 100% eficaz no complemento à geração das ondas.

Analogamente, foi possível obter o percentual de horas em que a geração de energia das ondas complementa à geração eólica, chamado nesta pesquisa de OCV (Onda Complementa Vento) [%], calculado a partir da razão entre o número de horas em que $DEV < DEV_{min}$ e $P \geq P_{min}$ e o número total de horas do período analisado (Equação 3.6).

$$OCV = \frac{N^{\circ}horas (DEV < DEV_{min} e P \geq P_{min})}{NTH} \text{ (Equação 3.6)}$$

O valor de OCV pode variar entre 0 e 1, sendo 1 a representação de uma região onde a geração de energia das ondas é 100% eficaz no complemento à geração eólica.

Onde,

OCV = Complementariedade do recurso das ondas na geração de energia eólica (%); e

NTH = Número total de horas do período analisado (h).

Cabe ressaltar que foi necessária a interpolação linear da variável $v(Z)$ com resolução horizontal atmosférica de $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ para a grade de resolução horizontal $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$, mesma grade que já se encontravam as variáveis oceânica H_s e T_e .

Assim, a partir de VCO e OCV torna-se possível compreender o comportamento de uma geração híbrida, considerando com maior fidelidade as características de intermitência dos ventos e das ondas, em diferentes escalas de tempo.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS

4.1 Climatologia dos Ventos sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul

Com base na análise climatológica dos campos de vento, foi possível reconhecer o predomínio da direção e as regiões com máximos de velocidade dos ventos sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul (OAS), dentro do domínio da Zona Econômica Exclusiva (ZEE). A Figura 4.1, apresenta a distribuição espacial média anual da direção e da magnitude dos ventos, na altura de 100 metros acima da superfície, entre 1991 e 2020, obtida a partir da reanálise ERA5. As Figuras 4.2 e 4.3, apresentam a distribuição sazonal e a distribuição mensal, respectivamente.

Analisando o campo de linhas de corrente, observou-se que anualmente (Figura 4.1), o centro da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) situa-se em, aproximadamente, 28°-32°S e 010°W-0°, próximo à costa do continente africano. Conseqüentemente, sobre a região de estudo, os ventos são predominantemente de octante nordeste (NE), padrão associado à circulação do anticiclone.

Os resultados aqui encontrados sobre a climatologia anual da direção dos ventos, correspondem aos apresentados por Degola (2013), Tavares (2020) e Nascimento (2022).

Ainda é possível constatar na Figura 4.1, que os menores valores da velocidade média dos ventos estão próximos ao núcleo da ASAS. Em sua porção norte, identificou-se que os ventos médios anuais da ASAS atingem valores máximos inferiores a 7,0 m/s, se estendendo entre 24°-30°S e 020°W-0°.

Além disso, na Região Sudeste, anualmente, destaca-se uma região de alta velocidade dos ventos, em relação ao seu entorno, um núcleo mais ao norte do estado do Rio de Janeiro e o sul do Espírito Santo (22°-26°S, 035°-045°W), com valores de velocidade média dos ventos superiores a 8,5 m/s.

Tabela 4.1a: Climatologia Anual da Velocidade dos Ventos para a Região Sudeste. Fonte: Adaptado de Tavares (2020) e Nascimento (2022).

Autor	Reanálise	Local	Resultados
Tavares (2020a)	ERA5	21°-26°S, 040°-044°W	Superiores a 9,0 m/s
Nascimento (2022)	ERA5	20°-30°S, 026°-050°W	Superiores a 8,0 m/s
Costa (2024)	ERA5	22°-26°S, 035°-045°W	Superiores a 8,5 m/s

Na Região Sul, anualmente, destaca-se uma região de alta velocidade dos ventos, em relação ao seu entorno, um núcleo no litoral entre os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul (30°-36°S, 045°-055°W), que se estende pelo OAS (045°W-005°E), com valores de

velocidade dos ventos superiores a 9,0 m/s.

Tabela 4.1b: Climatologia Anual da Velocidade dos Ventos para a Região Sul. Fonte: Adaptado de Tavares (2020) e Nascimento (2022).

Autor	Reanálise	Local	Resultados
Tavares (2020a)	ERA5	28°-34°S, 048°-052°W	Superiores a 9,5 m/s
Nascimento (2022)	ERA5	30°-36°S, 044°-050°W	Superiores a 10,0 m/s
Costa (2024)	ERA5	30°-36°S, 045°-055°W	Superiores a 9,0 m/s

Os resultados aqui encontrados sobre a climatologia anual da velocidade dos ventos, na altura de 100 m acima da superfície, correspondem aos apresentados por Tavares (2020) e Nascimento (2022), *cf.* Tabelas 4.1a e 4.1b.

Vinhoza (2019), utilizou dados de velocidade dos ventos simulados através do modelo numérico *Brazilian Regional Atmospheric Modelling System* (BRAMS). A autora observou, a 100 m de altura, valores máximos de velocidade dos ventos entre 8,0-9,5 m/s, na região norte do Rio de Janeiro e sul do Espírito Santo. Além disso, identificou valores máximos entre 7,0-8,0 m/s nas proximidades da costa de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, com valores entre 8,0-9,5 m/s à medida que se afastam da costa. Coincidindo com os resultados obtidos nesta pesquisa.

Ressalta-se que, na região de estudo, os valores mínimos de velocidade dos ventos ocorrem entre os litorais Fluminense e Catarinense (22°-28°S, 040°-050°W), com valores de velocidade dos ventos inferiores a 7,0 m/s.

Os valores mínimos de velocidade dos ventos nessa região podem estar relacionados à configuração geográfica do continente, que permite a penetração dos ventos de nordeste. À medida que esses ventos avançam sobre o continente, sua intensidade diminui antes de retornarem ao oceano (Tavares *et al.*, 2020).

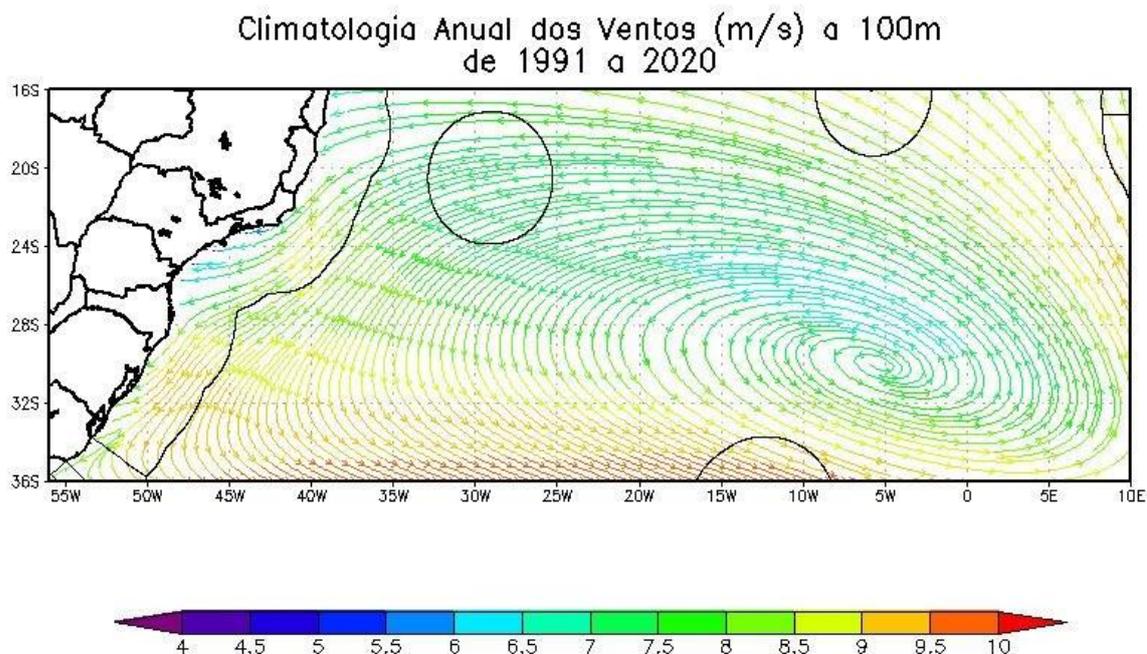


Figura 4.1 - Climatologia Anual da direção (linhas de corrente) e velocidade do vento (colorido) (m/s) a 100 m da superfície a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020. Linha e círculos sólidos preto demarcam a Zona Econômica Exclusiva.

A Figura 4.2a representa o verão, as Figuras 4.2b, 4.2c e 4.2d, representam o outono, inverno e primavera, respectivamente. Identificou-se que sazonalmente, durante o verão (Figura 4.2a), outono (Figura 4.2b) e primavera (Figura 4.2d) permanece o predomínio da circulação dos ventos de quadrante norte-leste (N-E) sobre a região de estudo.

Os resultados aqui encontrados sobre a climatologia sazonal da direção dos ventos, na altura de 100 m acima da superfície, correspondem aos apresentados por Rodrigues e Lorenzetti (2001), Paiva *et al.* (2021) e Pimenta *et al.* (2008).

De acordo com Degola (2013) e Reboita *et al.* (2019), no inverno, o centro da ASAS se encontra em latitudes mais ao norte e a oeste da sua posição climatológica. Coincidindo com os resultados aqui encontrados, onde o centro da ASAS está mais próximo da América do Sul (26°-30°S, 005°-015°W), observando-se ventos de direção leste-nordeste (16°-28°S, 035°-050°W). E devido a maior ocorrência de passagens de sistemas frontais, de direção oeste-noroeste no litoral mais ao sul (28°-36°S, 045°-055°W).

Nos meses da primavera, a ASAS se afasta latitudinalmente e longitudinalmente do continente sul-americano, apresentando deslocamento para sudoeste de sua posição climatológica.

E no verão, a ASAS encontra-se mais ao sul da sua posição climatológica (Degola, 2013; Sun *et al.*, 2017; Reboita *et al.*, 2019). Condizendo com os resultados aqui encontrados, onde

no verão, o centro do anticiclone se situa mais próximo a latitude de 32°S. Observando-se na porção oeste, sobre a região de estudo, um forte gradiente de pressão horizontal em ambas as estações do ano.

No outono, são observadas posições intermediárias e transitórias entre o verão e o inverno. Caracterizando-se como a única estação com velocidades médias dos ventos menores que 7,0 m/s na região de estudo, no litoral do Espírito Santo (18°-22°S, 035°-040°W), desconsiderando-se do litoral Fluminense ao Catarinense. E no inverno, o centro do anticiclone se situa mais próximo a latitude de 28°S.

Destacando-se, no verão, o núcleo no norte do estado do Rio de Janeiro e sul do Espírito Santo, com valores de velocidade dos ventos superiores a 8,5 m/s muito próximos à costa. No outono, a velocidade dos ventos é reduzida para 7,0 m/s, aumentando no inverno para 8,5 m/s. Na primavera, a velocidade dos ventos atinge valores superiores a 9,0 m/s.

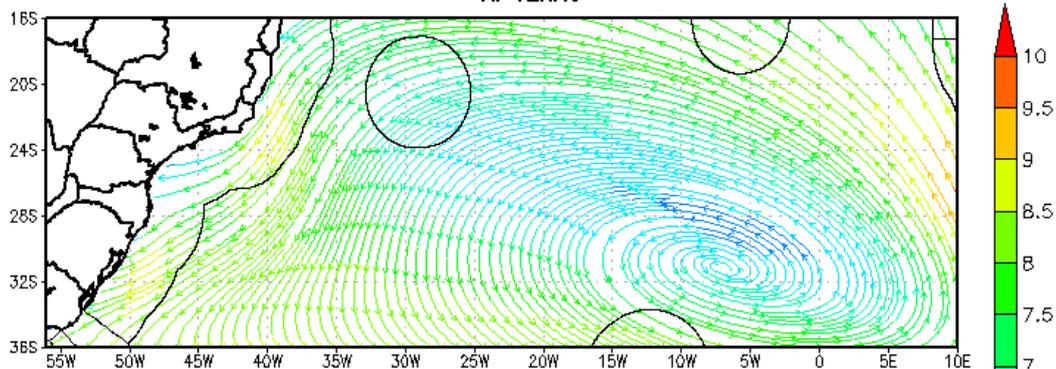
A região ao longo do litoral dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, atinge a velocidade máxima dos ventos durante o inverno com valores superiores a 10,0 m/s. A velocidade máxima dos ventos é reduzida para 9,5 m/s na primavera e 8,5 m/s no verão, aumentando para 9,0 m/s no outono.

Os valores obtidos por Silva, Cataldi, Dragaud (2016), identificaram que, à 90 m de altura, os ventos médios mais fortes ocorrem no inverno e na primavera, na região costeira do estado do Rio de Janeiro, Região Sudeste do Brasil. Correspondendo parcialmente com os resultados encontrados, onde identificou-se que na Regiões Sudeste os ventos mais fortes ocorrem também no inverno.

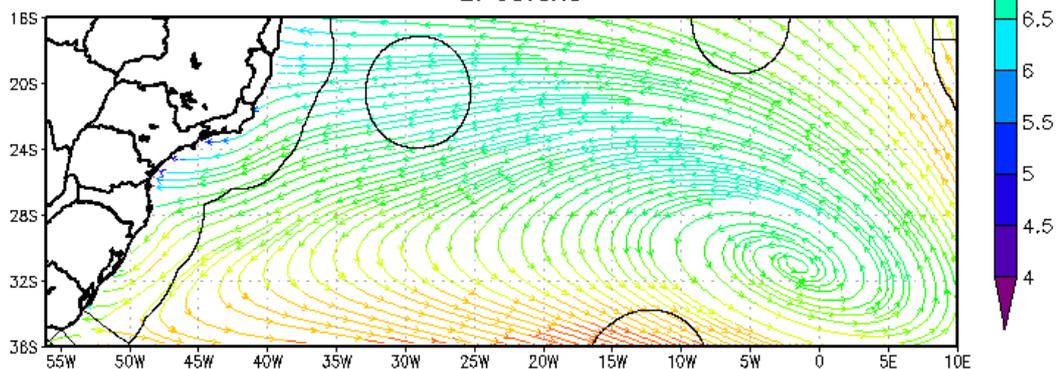
Silva *et al.* (2016), afirmaram que, à 100 m de altura, na Região Sul, os maiores (menores) índices ocorreram no inverno e na primavera (verão). Condizendo com os resultados encontrados.

Climatologia Sazonal dos Ventos (m/s) a 100m de 1991 a 2020

A. VERAO

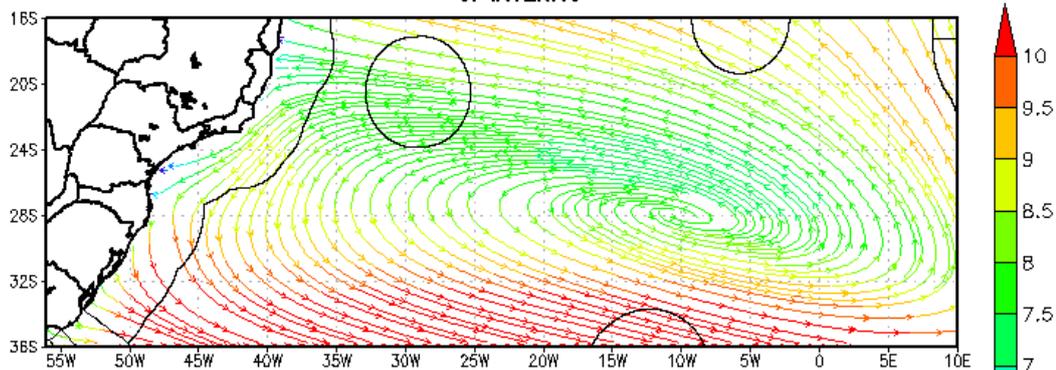


B. OUTONO



Climatologia Sazonal dos Ventos (m/s) a 100m de 1991 a 2020

C. INVERNO



D. PRIMAVERA

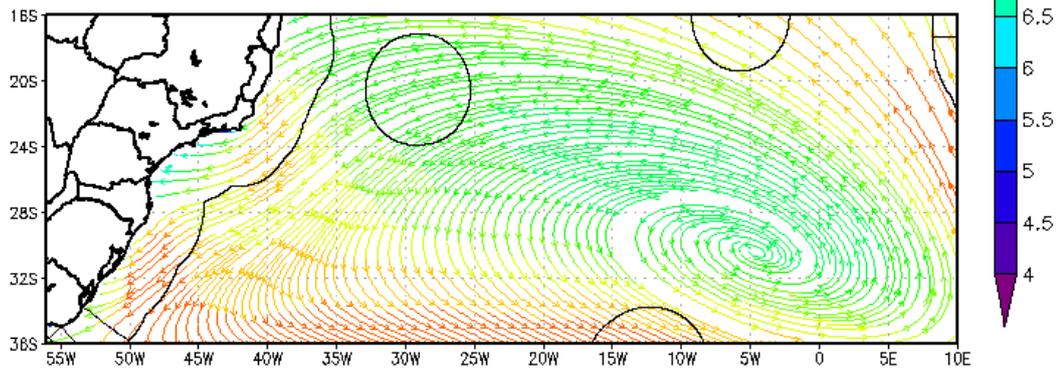


Figura 4.2 - Climatologia Sazonal da direção (linhas de corrente) e velocidade do vento (colorido) (m/s) a

100 m da superfície a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020: A. Verão; B. Outono; C. Inverno; D. Primavera. Linha e círculos sólidos preto demarcam a Zona Econômica Exclusiva.

As Figuras 4.3a a 4.3l, representam os meses do ano de janeiro a dezembro. Identificou-se que mensalmente, permanece a atuação dos ventos de quadrante N-E sobre a região de estudo. Com exceção do litoral sul, onde a partir de abril (Figura 4.3d) começam a predominar os ventos de noroeste-sudoeste, permanecendo até o mês de agosto (Figura 4.3h).

Concordando parcialmente com Cavalcanti *et al.* (2009), que afirmaram que a passagem de sistemas frontais foi maior entre os meses de maio a outubro nesta região.

Para o núcleo no estado do Rio de Janeiro, o mês de abril se destaca com as menores velocidades médias dos ventos, atingindo valores superiores a 7,0 m/s. Enquanto o mês com as maiores velocidades médias é setembro, atingindo valores superiores 9,5 m/s.

Tabela 4.2a: Climatologia Mensal da Velocidade dos Ventos para a Região Sudeste (16°-26°S, 035°-045°W).

Mês	Resultados	Mês	Resultados
Janeiro	Superiores a 9,0 m/s	Julho	Superiores a 8,5 m/s
Fevereiro	Superiores a 8,5 m/s	Agosto	Superiores a 9,0 m/s
Março	Superiores a 7,5 m/s	Setembro	Superiores a 9,5 m/s
Abril	Superiores a 7,5 m/s	Outubro	Superiores a 9,0 m/s
Maio	Superiores a 8,0 m/s	Novembro	Superiores a 9,0 m/s
Junho	Superiores a 8,0 m/s	Dezembro	Superiores a 9,0 m/s

Coincidindo com Silva, Cataldi, Dragaud (2016), que afirmaram que, à 90 m de altura, a velocidade média dos ventos mensal máxima (mínima), na costa do estado do Rio de Janeiro, Região Sudeste do Brasil, ocorre em setembro (abril).

Os meses encontrados nesta pesquisa discordam de Barboza *et al.* (2020), que demonstraram que à 89,5 m e 118 m, na Baía de Campos, o mês com as menores (maiores) velocidades médias é maio (outubro).

Barboza *et al.* (2020), demonstraram que à 89,5 m e 118 m, na Baía de Santos, que abrange do norte do Rio de Janeiro até costa norte de Santa Catarina, o mês com as menores (maiores) velocidades médias foi junho (outubro). Divergindo dos resultados encontrados, onde identificou-se que os ventos mais fortes (fracos), na Baía de Santos, ocorrem em setembro (abril).

Na região ao longo do litoral dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, o mês de fevereiro se destaca com as menores velocidades médias dos ventos, atingindo valores máximos superiores a 8,0 m/s. Enquanto o mês com as maiores velocidades também é setembro,

atingindo valores máximos superiores a 10,5 m/s.

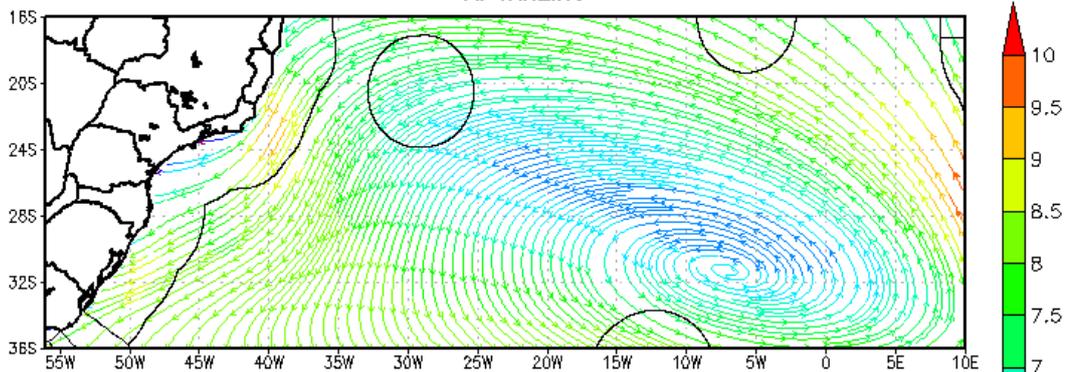
Tabela 4.2b: Climatologia Mensal da Velocidade dos Ventos para a Região Sul (26°-36°S, 045°-055°W).

Mês	Resultados	Mês	Resultados
Janeiro	Superiores a 8,5 m/s	Julho	Superiores a 10,0 m/s
Fevereiro	Superiores a 8,0 m/s	Agosto	Superiores a 10,0 m/s
Março	Superiores a 8,5 m/s	Setembro	Superiores a 10,5 m/s
Abril	Superiores a 9,0 m/s	Outubro	Superiores a 9,5 m/s
Maio	Superiores a 9,5 m/s	Novembro	Superiores a 9,0 m/s
Junho	Superiores a 10,0 m/s	Dezembro	Superiores a 8,5 m/s

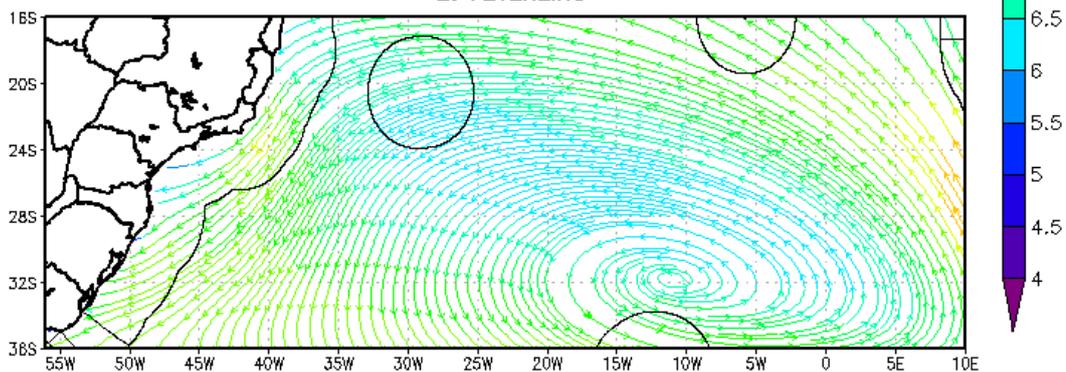
Os resultados aqui encontrados concordam parcialmente com Nascimento (2022), que afirmou que, à 100 m de altura, os máximos valores de velocidade média dos ventos, ocorreram entre julho e outubro, no litoral das Regiões Sudeste e Sul do Brasil.

Climatologia Mensal dos Ventos (m/s) a 100m de 1991 a 2020

A. JANEIRO

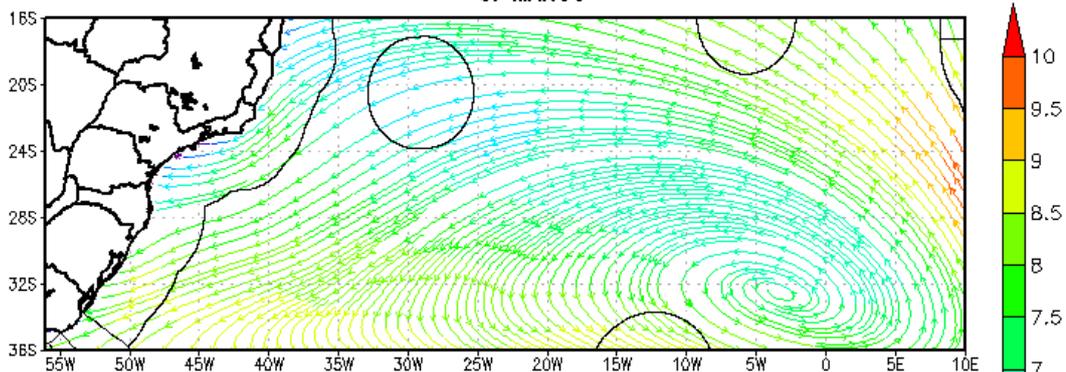


B. FEVEREIRO

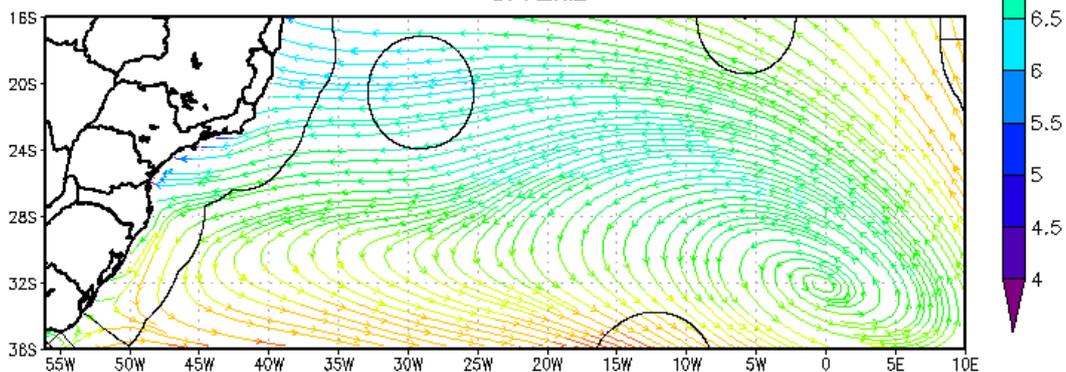


Climatologia Mensal dos Ventos (m/s) a 100m de 1991 a 2020

C. MARÇO

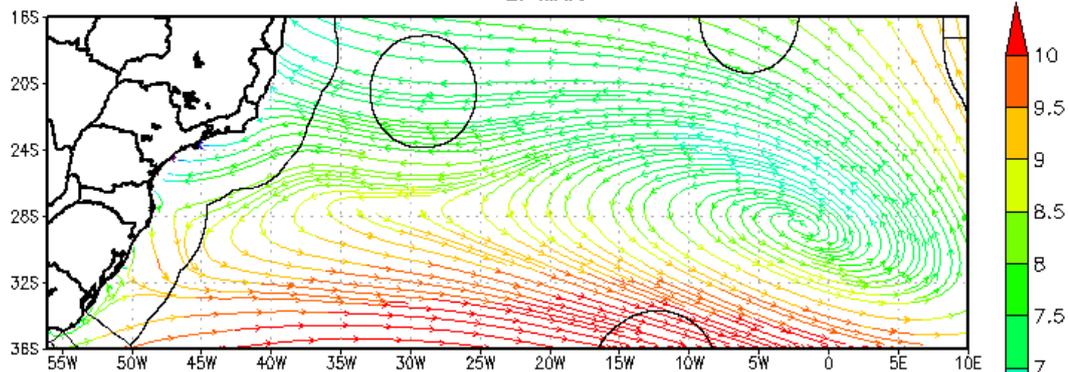


D. ABRIL

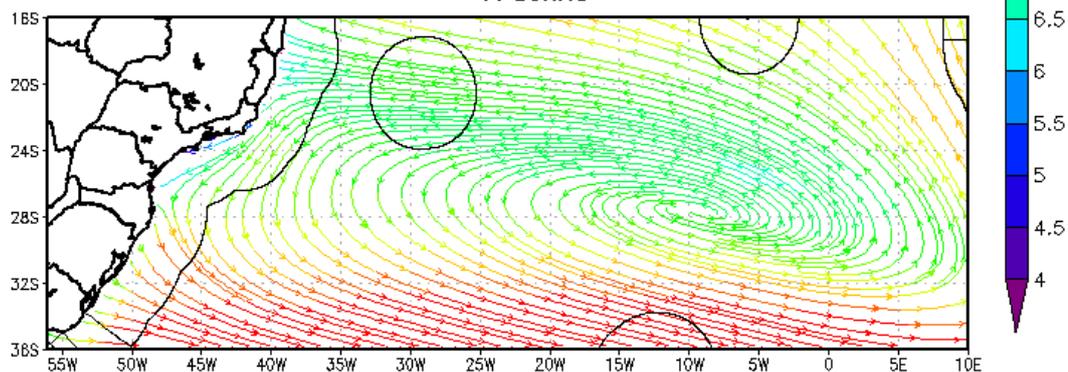


Climatologia Mensal dos Ventos (m/s) a 100m de 1991 a 2020

E. MAIO

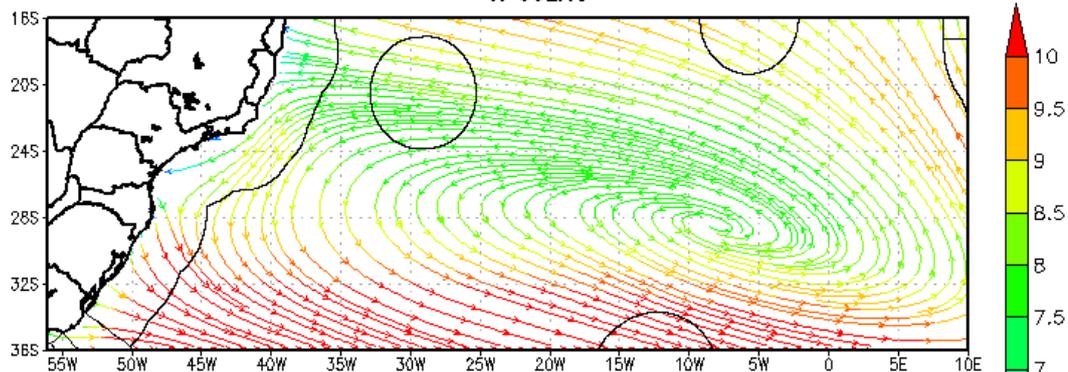


F. JUNHO

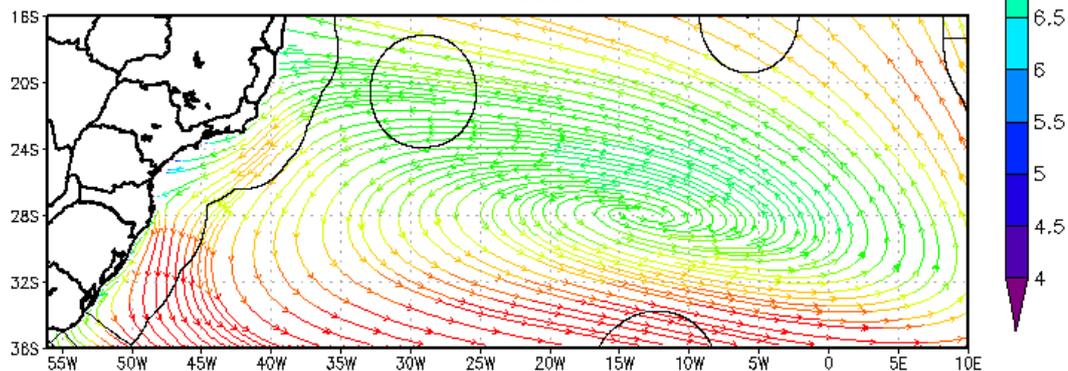


Climatologia Mensal dos Ventos (m/s) a 100m de 1991 a 2020

G. JULHO

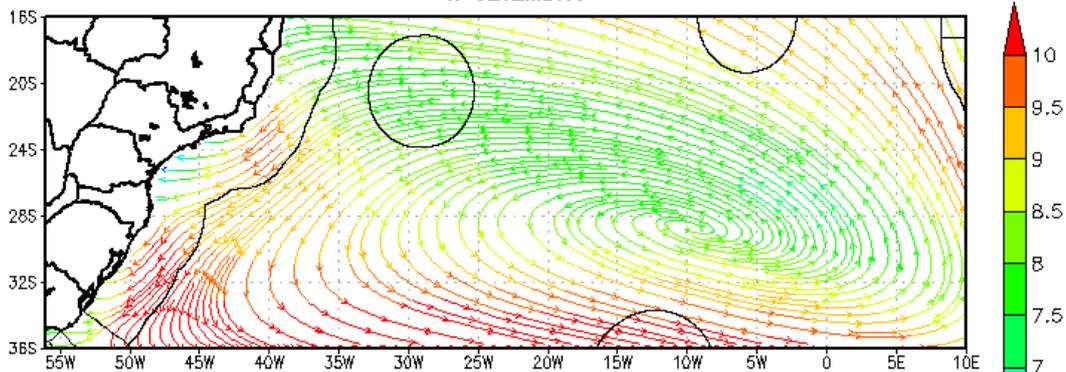


H. AGOSTO

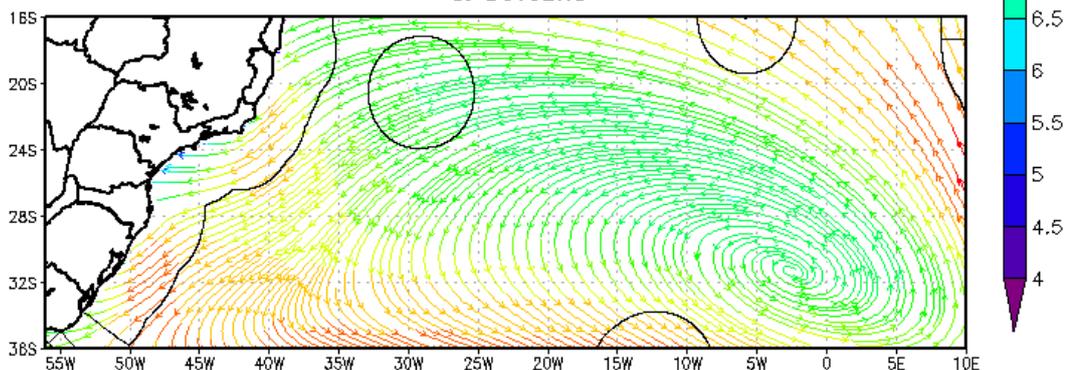


Climatologia Mensal dos Ventos (m/s) a 100m de 1991 a 2020

I. SETEMBRO

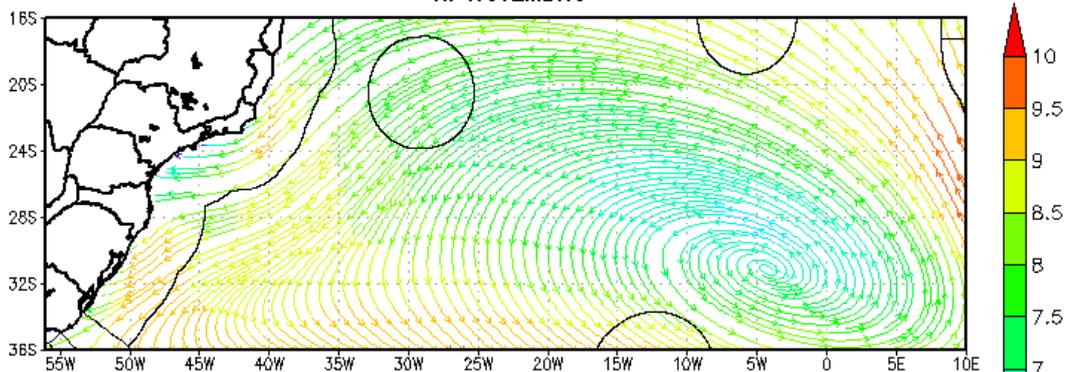


J. OUTUBRO



Climatologia Mensal dos Ventos (m/s) a 100m de 1991 a 2020

K. NOVEMBRO



L. DEZEMBRO

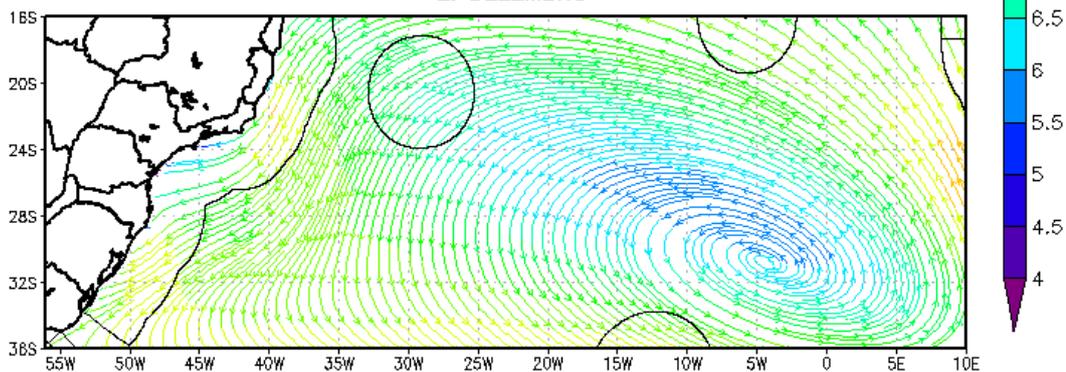


Figura 4.3 - Climatologia Mensal da direção (linhas de corrente) e velocidade do vento (colorido) (m/s) a 100m da superfície a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020:

A. Janeiro, B. Fevereiro, C. Março, D. Abril, E. Maio, F. Junho, G. Julho, H. Agosto, I. Setembro, J. Outubro, K. Novembro e L. Dezembro. Linha e círculos sólidos preto demarcam a Zona Econômica Exclusiva.

4.1.1 Potencial Teórico Eólico

Espera-se através da Densidade de Energia do Vento (DEV) obter-se o potencial teórico eólico para a construção de parques eólicos *offshore* sobre a Região Sudoeste do OAS, dentro do domínio da ZEE. A Figura 4.4, apresenta a distribuição espacial anual da DEV, na altura de 100 m da superfície, entre 1991 e 2020, obtida a partir da reanálise ERA5. As Figuras 4.5 e 4.6, apresentam a distribuição sazonal e a distribuição mensal, respectivamente.

Como mostrado na Equação 3.3, o cálculo da DEV se dá a partir de uma função cúbica da magnitude do vento. Portanto, espera-se que os campos médios gerados sigam o mesmo padrão espacial da magnitude dos ventos obtidos anteriormente.

Na Figura 4.4, observou-se que o núcleo no estado do Rio de Janeiro e o sul do Espírito Santo, apresenta anualmente valores máximos de DEV superiores a 350 W/m^2 . Enquanto na região ao longo do litoral de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, o valor máximo de DEV apresentado anualmente é superior a 400 W/m^2 , podendo chegar a 500 W/m^2 próximo a região $30^\circ\text{-}32^\circ\text{S}$, $048^\circ\text{-}050^\circ\text{W}$.

Concluiu-se que anualmente, na altura de 100 m da superfície, a partir da ERA5, a Região Sul é a que possui o maior potencial energético a partir dos ventos, em comparação com a Região Sudeste.

Correspondendo com Tavares (2020) e Nascimento (2022), que demonstraram que a 100 m da superfície, a densidade de potencial eólico é maior na Região Sul, em comparação com a Região Sudeste.

Densidade Média de Energia do Vento (W/m^2) Anual a 100m de 1991 a 2020

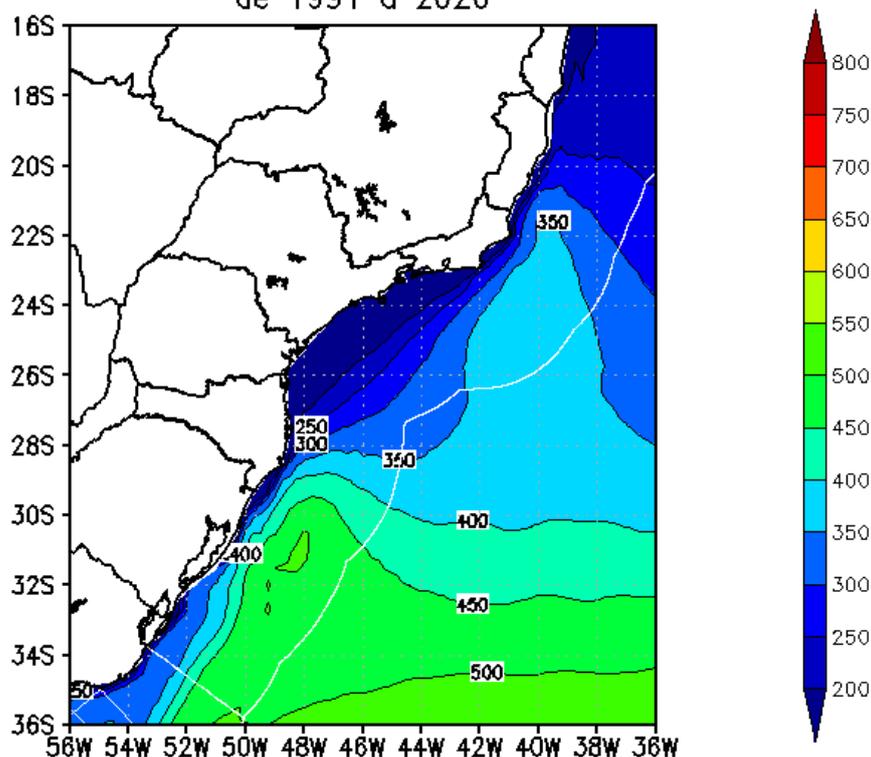


Figura 4.4 – Densidade Média de Energia do Vento (colorido/contorno) (W/m^2) Anual a 100 m da superfície a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020. Linha sólida branca demarca a Zona Econômica Exclusiva.

A Figura 4.5a representa o verão, as Figuras 4.5b, 4.5c e 4.5d, representam o outono, inverno e primavera, respectivamente. Observou-se que o núcleo no norte do estado do Rio de Janeiro e sul do Espírito Santo, apresenta valores mais energéticos de DEV na primavera, atingindo valores máximos superiores a $500 \text{ W}/\text{m}^2$ e valores menos energéticos no outono, atingindo valores máximos menores que $300 \text{ W}/\text{m}^2$. No verão e inverno, os valores máximos superam os $400 \text{ W}/\text{m}^2$.

A região ao longo do litoral dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, apresenta valores mais energéticos de DEV no inverno, atingindo valores máximos superiores a $650 \text{ W}/\text{m}^2$, seguido da primavera, superando os $550 \text{ W}/\text{m}^2$. Os valores menos energéticos ocorrem no verão, atingindo valores máximos superiores a $350 \text{ W}/\text{m}^2$. No outono, os valores máximos superam os $450 \text{ W}/\text{m}^2$.

Concluiu-se que sazonalmente, na altura de 100 m da superfície, a partir da ERA5, o maior potencial energético a partir dos ventos ocorre na Região Sul em comparação com a Região Sudeste. Além disso o inverno se destaca como estação mais energética, seguido da primavera,

e por fim, do verão/outono.

Densidade Média de Energia do Vento (W/m^2) Sazonal a 100m de 1991 a 2020

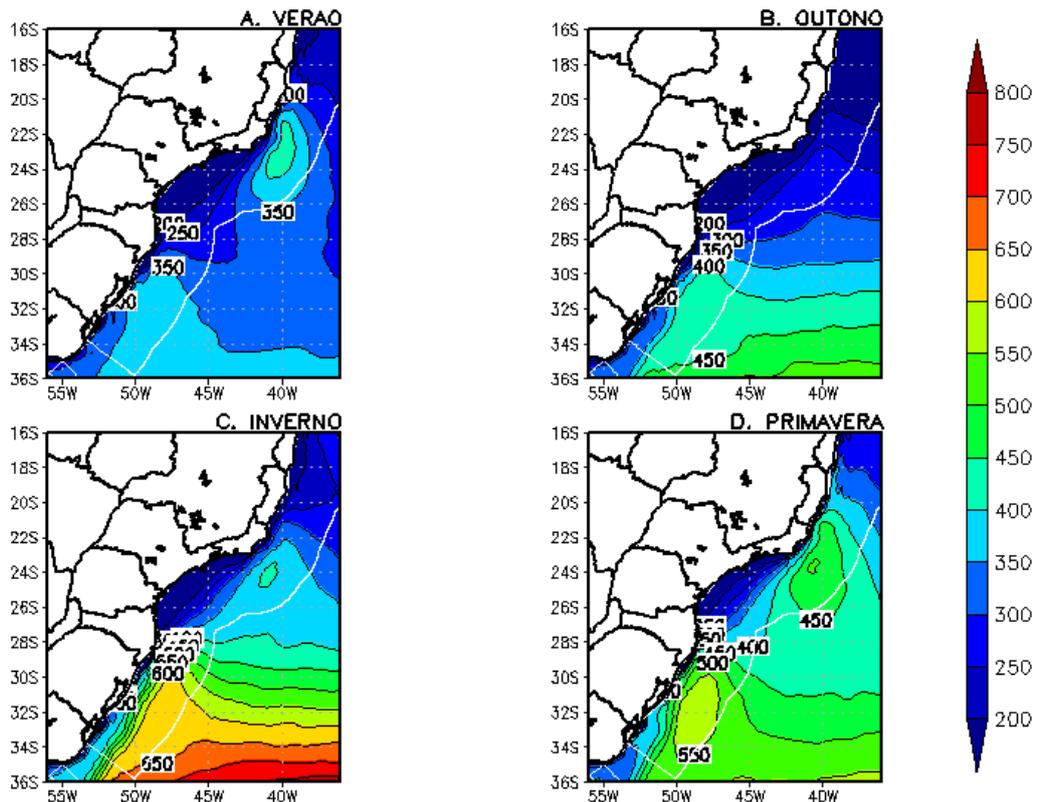


Figura 4.5 – Densidade Média de Energia do Vento (colorido/contorno) (W/m^2) Sazonal a 100 m da superfície a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020: A. Verão; B. Outono; C. Inverno; D. Primavera. Linha sólida branca demarca a Zona Econômica Exclusiva.

As Figura 4.6a a 4.6l, representam os meses do ano de janeiro a dezembro. Observou-se que no núcleo no estado do Rio de Janeiro, os meses de março e abril, se destacam como os meses menos energéticos, os valores máximos de DEV atingido são menores que $300 W/m^2$. Enquanto o mês mais energético é setembro, atingindo o valor máximo de DEV superior a $550 W/m^2$.

Condizendo com Nascimento (2022), que demonstrou que à 100 m da superfície, os maiores valores de DEV, na Região Sudeste do Brasil, ocorrem no mês de setembro.

Ressalta-se que foi observado uma persistência de DEV com valores mais elevados, em relação ao seu entorno, na Bacia de Campos (20° - 27° S, 042° - 036° W), permanecendo acima de $400 W/m^2$, de agosto a janeiro.

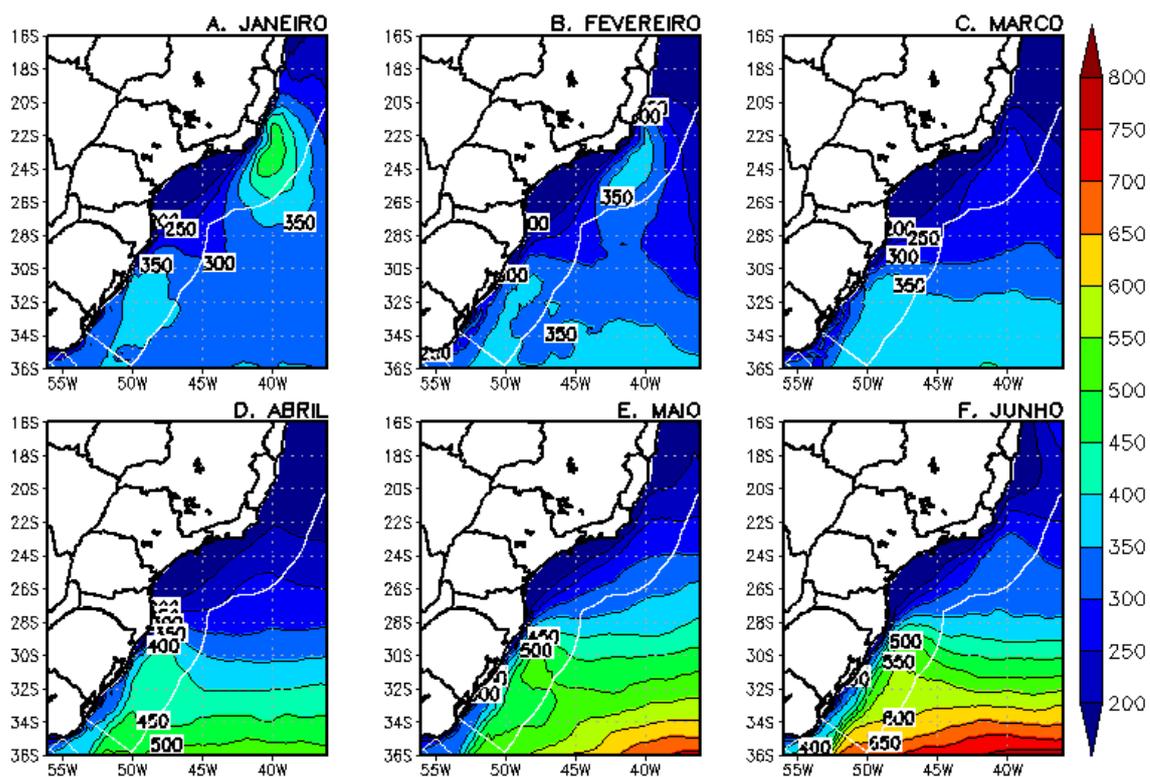
Na região ao longo do litoral dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, os meses entre janeiro e março se destacam como os meses menos energéticos atingindo os valores máximos de DEV de $350 W/m^2$. Os meses de junho a setembro se apresentam como os mais

energéticos, onde o valor máximo de DEV apresentado mensal é superior a 650 W/m^2 .

Coincidindo parcialmente com Nascimento (2022), que demonstrou que à 100 m da superfície, os menores (maiores) valores de DEV, na Região Sul do Brasil, ocorrem nos meses de fevereiro e março (agosto e setembro).

Concluiu-se que mensalmente, na altura de 100 m da superfície, a partir da reanálise ERA5, o maior potencial energético a partir dos ventos ocorre na Região Sul em comparação com a Região Sudeste. Além disso setembro se destaca como o mês mais energético, e janeiro, fevereiro e março são os meses menos energéticos.

Densidade Média de Energia do Vento (W/m^2) Mensal a 100m de 1991 a 2020



Densidade Média de Energia do Vento (W/m^2) Mensal a 100m de 1991 a 2020

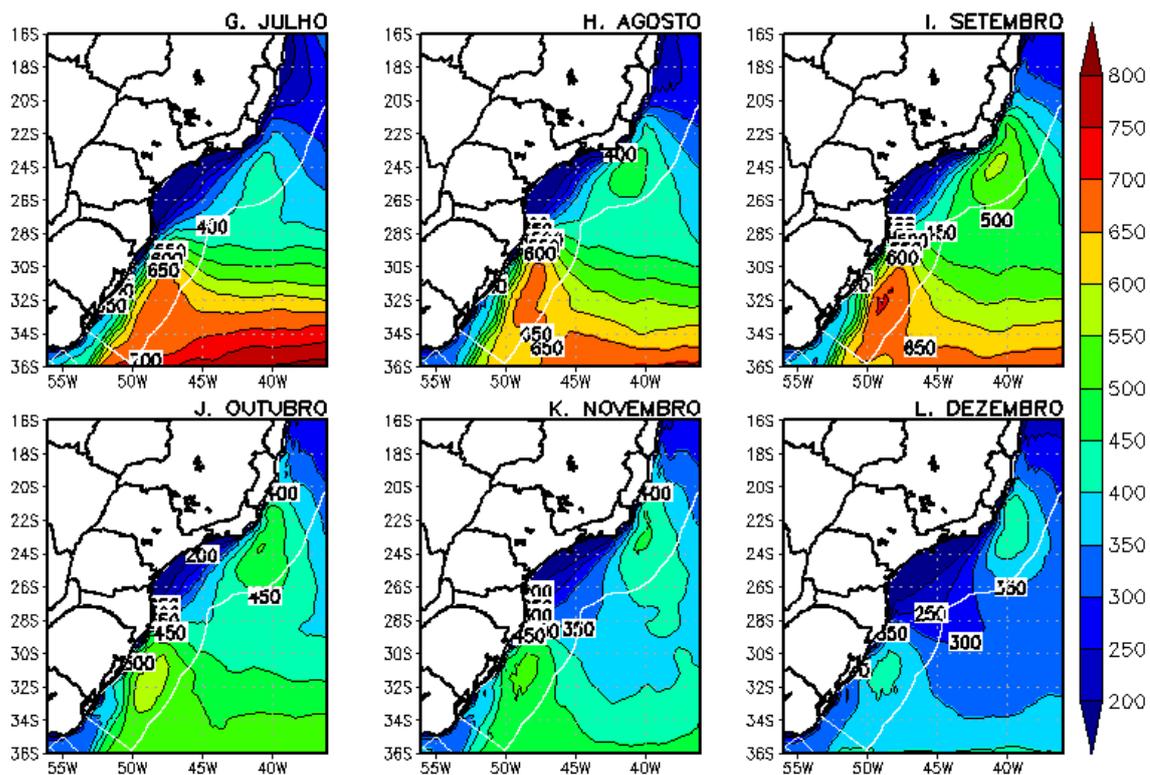


Figura 4.6 - Densidade Média de Energia do Vento (colorido/contorno) (W/m^2) Mensal a 100 m da superfície a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020: A. Janeiro, B. Fevereiro, C. Março, D. Abril, E. Maio, F. Junho, G. Julho, H. Agosto, I. Setembro, J. Outubro, K. Novembro

e L. Dezembro. Linha sólida branca demarca a Zona Econômica Exclusiva.

4.1.2 Potencial Teórico das Ondas

A fim de se construir parques para a geração de energia através das ondas na região sudoeste do OAS, espera-se através da Densidade de Potência das Ondas (P) obter-se o potencial teórico das ondas. A Figura 4.7, apresenta a distribuição espacial anual da P , na Região Sudoeste do OAS, entre 1991 e 2020, obtida a partir da reanálise ERA5, as Figuras 4.8 e 4.9, apresentam a distribuição sazonal e a distribuição mensal, respectivamente.

Como mostrado na Equação 3.4, o cálculo da P se dá a partir de uma função quadrática da altura significativa das ondas junto ao período médio das ondas. Portanto, espera-se que os campos médios gerados sigam o mesmo padrão espacial dessas variáveis. Uma vez que a análise da distribuição espacial de Altura Significativa das Ondas a partir da combinação de vagas e marulhos (H_s) e do Período médio das ondas (T_e) não são objetivos específicos desta pesquisa, estes resultados estão apresentados em anexo.

Na área que compreende a região costeira entre os estados Rio Grande do Sul e o sul de Santa Catarina (28° - 32° S, 045° - 050° W), o valor máximo de P apresentado anualmente é superior a 20 kW/m (Figura 4.7).

De acordo com Carvalho (2010), os valores anuais de P nessa região resultam da atuação dos sistemas de ondas provenientes de direções sul e nordeste. Como dito anteriormente, o padrão de circulação atmosférica nas Regiões Sudeste e Sul do Brasil está sob regime do campo de ventos da ASAS, frequentemente alterado quando há a passagem de Ciclones Subtropicais e Extratropicais e Sistemas Frontais, *cf.* seção 2.2.

Cotrim, Semedo e Lemos (2022), afirmaram que por mais que a costa brasileira apresente baixos valores de H_s , anualmente, é possível observar ondas com maior altura significativa se propagando do Oceano Antártico.

Nota-se que apesar da influência dos sistemas meteorológicos citados, é perceptível que P se propaga de leste e sul em direção a América do Sul, devido as ondas que se formam na porção sul da ASAS.

Os resultados aqui encontrados, apresentam valores máximos de P superiores aos apresentados por Carvalho (2010), que observou uma média anual de 15,14 kW/m nesta região, através do modelo numérico de ondas *WAVEWATCH III*.

Na área que compreende a região costeira central de Santa Catarina até o sul do Rio de Janeiro (23° - 28° S, 045° - 050° W), o valor máximo de P apresentado anualmente é superior a 16 kW/m.

De acordo com Carvalho (2010), os valores anuais de P nessa região continuam consistindo na soma de ondas das direções sul e nordeste. Porém, o autor identificou uma diminuição na média anual de P, com valores máximos de 12,73 kW/h. Os resultados aqui encontrados, apresentam valores máximos de P superiores aos apresentados pelo autor, mas também houve essa redução nos valores máximos obtidos.

Na área que compreende a região costeira central do Rio de Janeiro até o Espírito Santo (18°-26°S, 036°-045°W), o valor máximo de P apresentado anualmente é superior a 18 kW/m.

De acordo com Carvalho (2010), os valores anuais de P nessa região consistem em ondas de direção sul. O autor identificou um aumento na média anual de P, com valores máximos de 13,1 a 13,9 kW/h. Os resultados aqui encontrados, continuam apresentando valores máximos de P superiores aos apresentados pelo autor, mas também houve esse ligeiro aumento nos valores máximos obtidos.

Os valores máximos aqui encontrados na região de estudo, coincidem com os resultados de Shadman *et al.* (2019).

Conclui-se que anualmente, a partir da ERA5, a Região Sul é a que possui o maior potencial energético a partir das ondas, em comparação com a Região Sudeste. Principalmente, no litoral entre os estados do Rio Grande do Sul e o sul de Santa Catarina.

Ressalta-se que os valores máximos de P próximos ao litoral da Região Sul, poderiam ser ainda mais elevados, no entanto a plataforma continental é mais larga nessa região, como pode ser observado na Figura 1.4, resultando na dissipação de energia antes da chegada à costa.

Densidade Média de Potência das Ondas (kW/m) Anual de 1991 a 2020

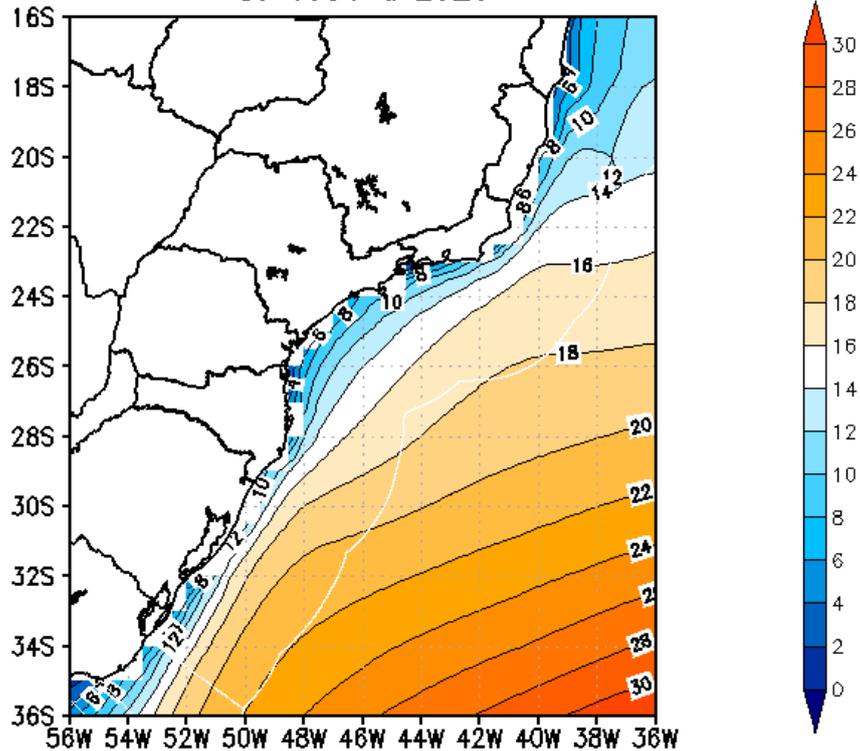


Figura 4.7 - Densidade Média de Potência das Ondas (colorido/contorno) (kW/m) Anual a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020. Linha sólida branca demarca a Zona Econômica Exclusiva.

A Figura 4.8a representa o verão, as Figuras 4.8b, 4.8c e 4.8d, representam o outono, inverno e primavera, respectivamente. Observou-se que o litoral da Região Sudeste, apresenta valores mais energéticos de P no inverno, atingindo valores máximos de 20 kW/m e valores menos energéticos no verão, atingindo valores máximos de 12 kW/m.

O litoral da Região Sul, também apresenta valores mais (menos) energéticos de P no inverno (verão), atingindo valores máximos de 28 kW/m (14 kW/m).

As regiões com maior frequência de formação de ciclones na América do Sul, citadas por Gan e Rao (1991), Reboita *et al.* (2010) e Cavalcanti *et al.* (2009), validam o aumento nos valores máximos de H_s e T_e , e consecutivamente de P no inverno, *cf.* seção 2.1.

Sendo o outono e a primavera, períodos de transição entre o verão e o inverno.

Campos (2009), afirmou que, as ondas mais altas, na Região Sudeste do Brasil, ocorrem principalmente no outono e inverno. Condizendo com os resultados encontrados nesta pesquisa.

Dias da Silva (2013), afirmou que, a média sazonal do fluxo de energia da onda, nas Regiões Sudeste e Sul do Brasil, atingiu valores máximos (mínimos) no inverno (verão). Shadman *et al.* (2019), afirmaram que as estações do ano mais energéticas são outono/inverno. Condizendo

com os resultados encontrados nesta pesquisa.

Concluiu-se que sazonalmente, a partir da ERA5, o maior potencial energético a partir das ondas ocorre na Região Sul em comparação com a Região Sudeste, além disso o inverno se destaca como estação mais energética, seguidos da primavera/outono, e por fim, do verão.

Densidade Média de Potência das Ondas (kW/m) Sazonal de 1991 a 2020

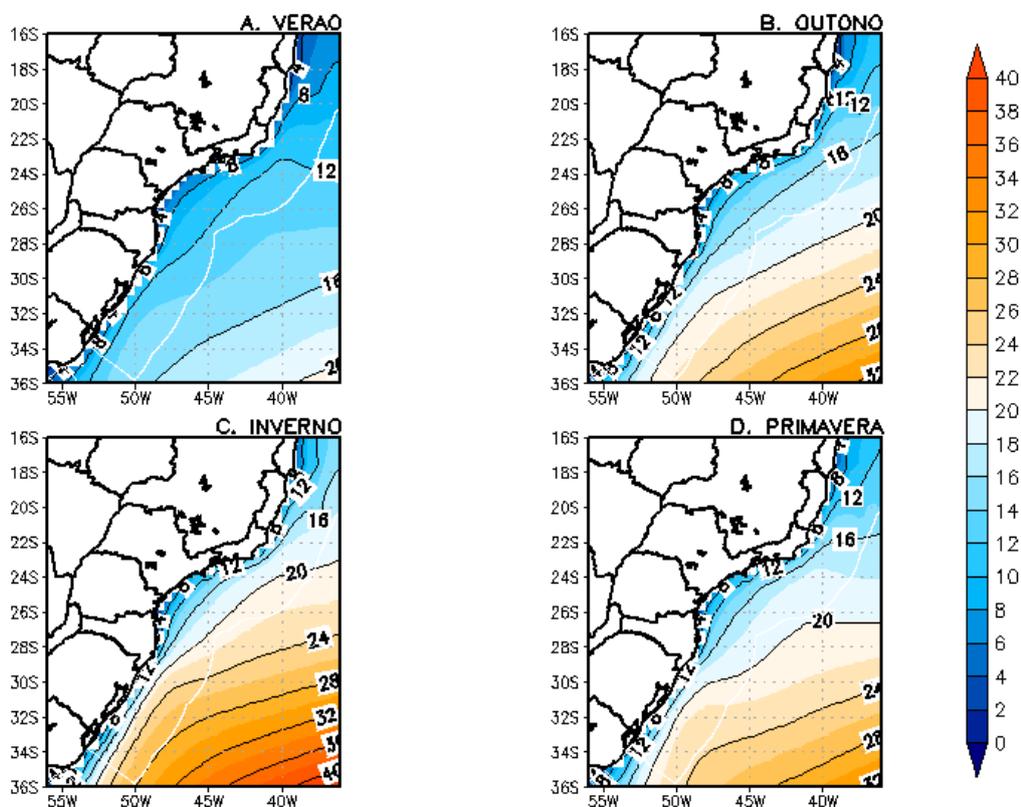


Figura 4.8 - Densidade Média de Potência das Ondas (colorido/contorno) (kW/m) Sazonal a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Dudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020: A. Verão; B. Outono; C. Inverno; D. Primavera. Linha sólida branca demarca a Zona Econômica Exclusiva.

As Figura 4.9a a 4.9l, representam os meses do ano de janeiro a dezembro. Observou-se que no litoral da Região Sudeste, os meses de janeiro e fevereiro se destacam como os meses menos energéticos, o valor máximo de P atingido é de 12 kW/m, enquanto o mês mais energético é setembro, atingindo o valor máximo de P de 22 kW/m.

De acordo com Carvalho (2010), na Região Sudeste, os meses de maio a setembro foram os meses que atingiram os maiores valores máximos de P. Além disso, de acordo com o autor foi possível identificar que o período entre os meses de janeiro a março, ocorreram os menores valores máximos de P. Condizendo com os resultados encontrados nesta pesquisa.

No litoral da Região Sul, os meses de janeiro, fevereiro e dezembro se destacam como os meses menos energéticos, o valor máximo de P atingido é de 14 kW/m, enquanto o mês mais

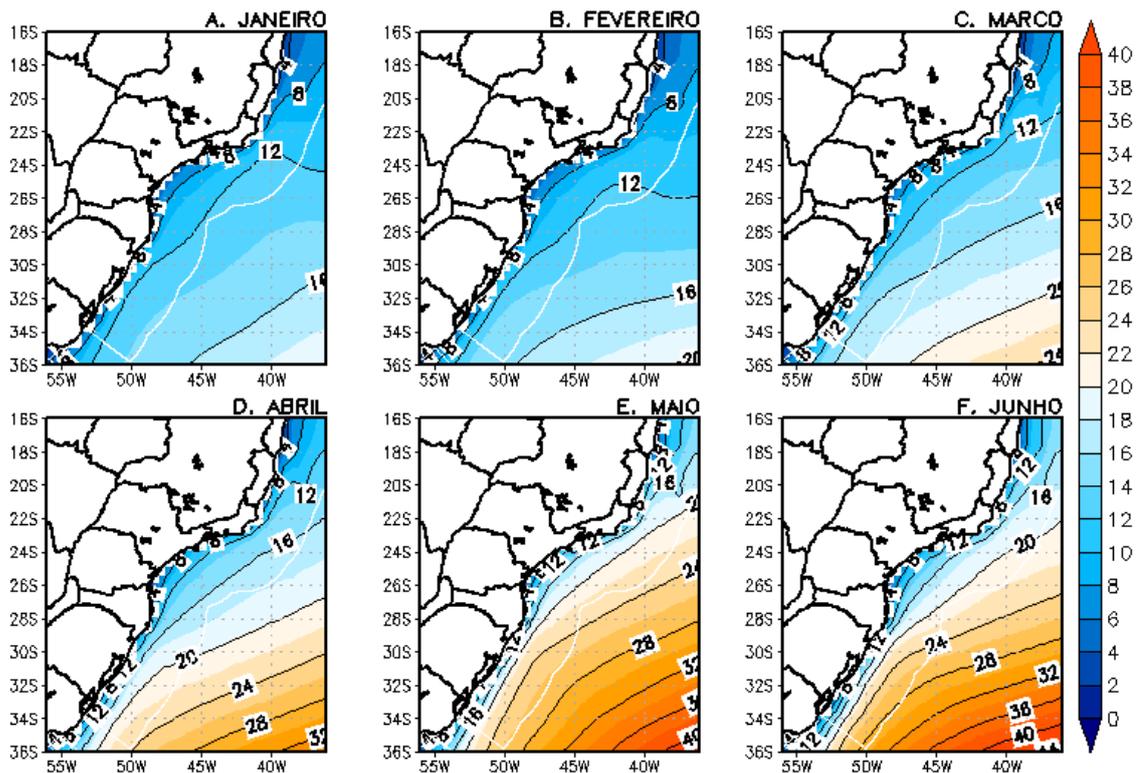
energético também é setembro, atingindo o valor máximo de P de 28 kW/m.

De acordo com Carvalho (2010), na Região Sul, os meses de maio e setembro foram os meses que atingiram os maiores valores máximos de P. Condizendo parcialmente com os resultados aqui encontrados, pois os valores máximos foram progredindo até o mês de Setembro, não sendo identificado esse máximo ocorrendo também em Maio.

O autor também destacou que na região foi possível identificar que o período entre os meses de abril a outubro, ocorreram os maiores valores máximos de P. Também observados nos resultados aqui encontrados.

Concluiu-se que mensalmente, a partir da reanálise ERA5, o maior potencial energético a partir das ondas ocorre na Região Sul em comparação com a Região Sudeste, além disso setembro se destaca como o mês mais energético, e janeiro, fevereiro e dezembro são os meses menos energéticos.

Densidade Média de Potência das Ondas (kW/m) Mensal de 1991 a 2020



Densidade Média de Potência das Ondas (kW/m) Mensal de 1991 a 2020

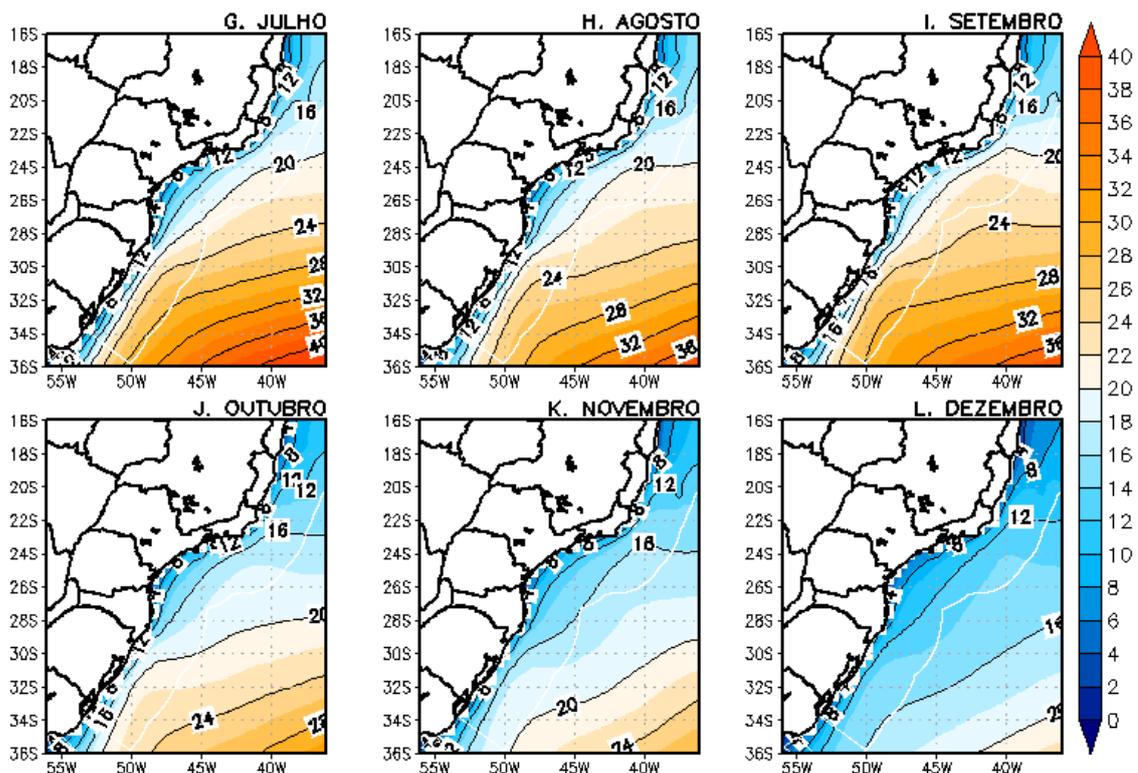


Figura 4.9 - Densidade Média de Potência das Ondas (colorido/contorno) (kW/m) Mensal a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020: A. Janeiro, B. Fevereiro, C. Março, D. Abril, E. Maio, F. Junho, G. Julho, H. Agosto, I. Setembro, J. Outubro, K. Novembro e L. Dezembro. Linha

sólida branca demarca a Zona Econômica Exclusiva.

4.2 Complementariedade dos recursos naturais Eólico e das Ondas sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul

A seguir são apresentadas as complementariedades entre os recursos naturais eólico *offshore* e das ondas, espera-se através destas obter-se parâmetros para a construção de parques híbridos eólico-ondas sobre a Região Sudoeste do OAS, dentro do domínio da ZEE. A Figura 4.10, apresenta a distribuição espacial anual, entre 1991 e 2020 a partir da reanálise ERA5. As Figuras 4.11 e 4.12, apresentam a distribuição sazonal, e as Figuras 4.13 e 4.14, a distribuição mensal.

De acordo com a Figura 4.10a, a VCO, ou seja, a geração de energia eólica que complementa a das ondas, ocorre de maneira ínfima, na Região Sudeste, no litoral do Espírito Santo (18° - 20° S; 038° - 042° W), atingindo valores superiores a 40%.

Isso ocorre pois, anualmente nessas regiões, a P atinge valores menores que o limiar $P_{min} = 5$ kW/m enquanto DEV , atinge valores iguais ou superiores aos limiares mínimos determinados.

Nas regiões em que foram encontrados valores máximos de DEV , abaixo dos limiares mínimos determinados, como do Litoral Fluminense até a Região Sul, a VCO anual é quase que nula, atingindo valores próximos dos 10%, pois a condição $DEV \geq DEV_{min}$ não é respeitada. Logo, a partir destes resultados, observou-se que anualmente, a geração de energia das ondas é autossuficiente, apresentando poucos momentos de intermitência.

A complementariedade total oposta, OCV, ou seja, a geração de energia das ondas complementando a eólica, apresenta valores muito mais elevados (Figura 4.10b). Os valores máximos da OCV atingem valores superiores a 80% na região entre os litorais Fluminense e Catarinense. Conforme mostrado nas Figuras 4.4 e 4.7, embora os valores máximos de DEV sejam inferiores a DEV_{min} , anualmente, os valores de P são majoritariamente superiores a P_{min} durante este período, respeitando a condição $P \geq P_{min}$.

Por isso, a partir destes resultados, observou-se que anualmente, há uma alta complementariedade na energia eólica a partir da energia gerada pelas ondas. Portanto, a geração de energia das ondas é suficiente para complementar a geração de energia eólica, anualmente, nos momentos em que a mesma apresente qualquer intermitência.

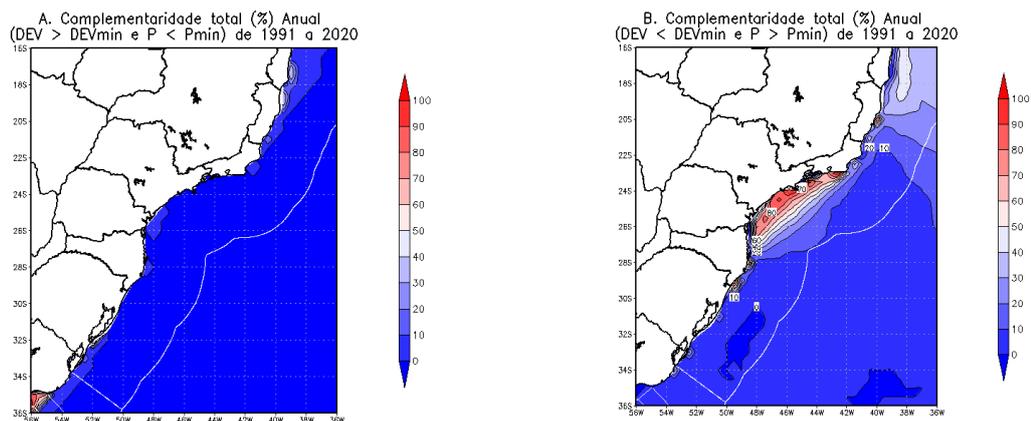


Figura 4.10 – Complementariedade total (colorido/contorno) (%) Anual da geração das ondas pela geração eólica (VCO) (a) e da geração eólica pela geração das ondas (OCV) (b) a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020. Linha sólida branca demarca a Zona Econômica Exclusiva.

Sazonalmente, observa-se que a VCO (Figura 4.11a), ocorre apenas em uma região pequena próximo ao litoral norte do Rio de Janeiro e o Espírito Santo, porém atingindo valores próximos muito baixos.

Na Figura 4.12, observa-se que a OCV ocorre em toda a região analisada, onde no verão e no outono (Figuras 4.12a e 4.12b), a complementariedade atinge valores superiores a 80% entre os litorais Fluminense e Catarinense. No outono, também se destaca essa complementariedade entre o norte do Rio de Janeiro e o Espírito Santo.

Complementaridade total (%) Sazonal ($DEV > DEV_{\min}$ e $P < P_{\min}$) de 1991 a 2020

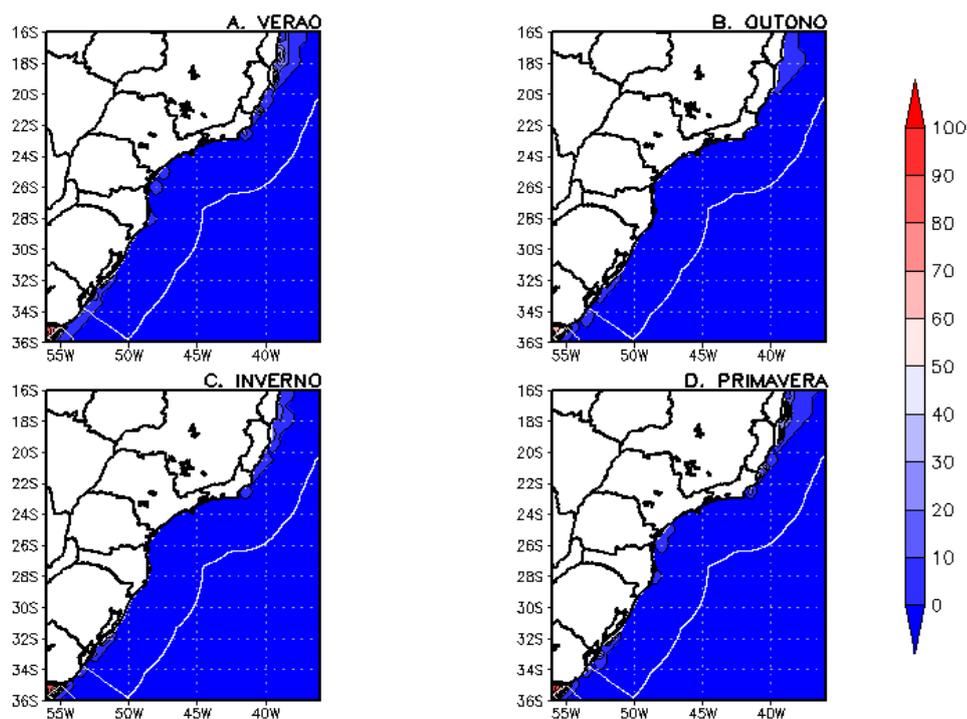


Figura 4.11 – Complementariedade total (colorido/contorno) (%) Sazonal da geração das ondas pela geração eólica (VCO) a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020:

A. Verão; B. Outono; C. Inverno; D. Primavera. Linha sólida branca demarca a Zona Econômica Exclusiva.

Complementariedade total (%) Sazonal ($DEV < DEV_{\min}$ e $P > P_{\min}$) de 1991 a 2020

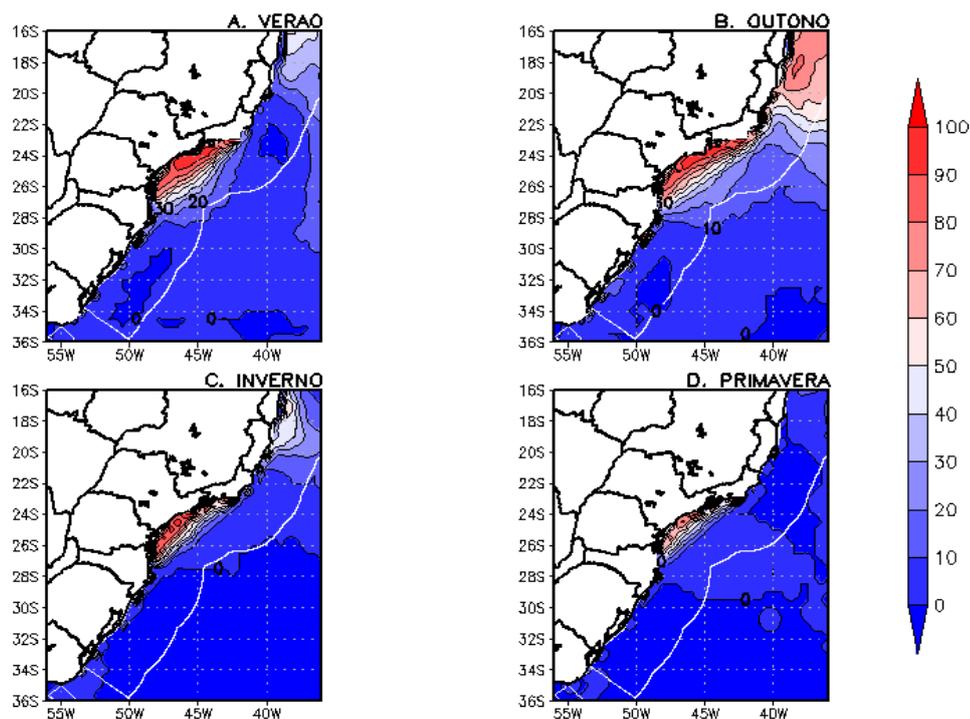
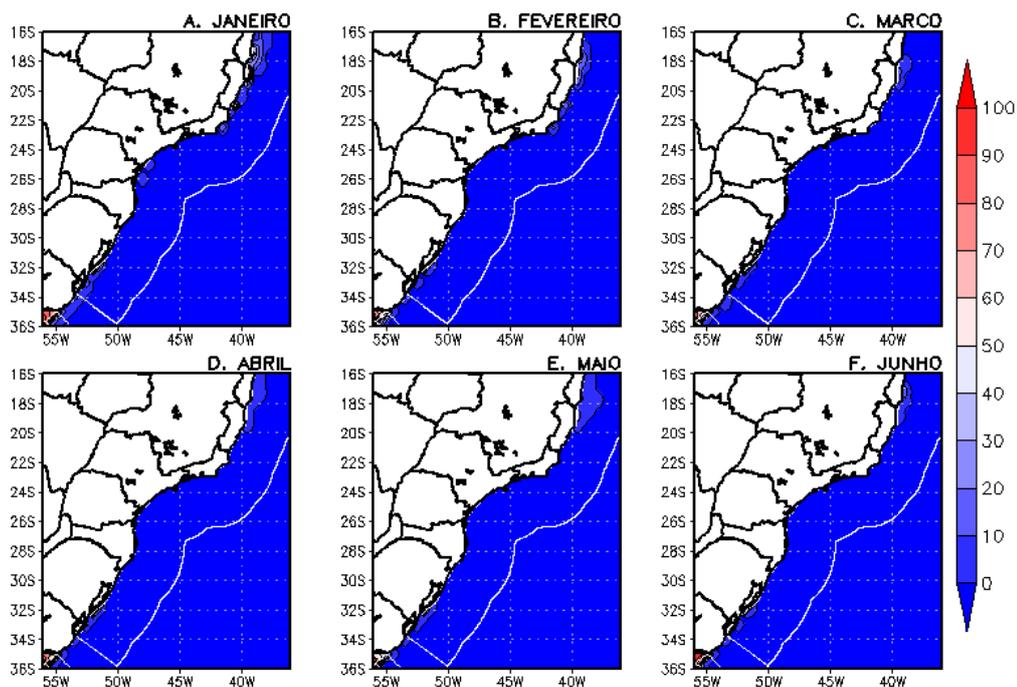


Figura 4.12 – Complementariedade total (colorido/contorno) (%) Sazonal da geração eólica pela geração das ondas (OCV) a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020:

A. Verão; B. Outono; C. Inverno; D. Primavera. Linha sólida branca demarca a Zona Econômica Exclusiva.

Mensalmente, observa-se que a geração de energia através das ondas continua sendo autossuficiente e apresentando ínfima insuficiência (Figura 4.13a-1). Entre fevereiro e junho (Figura 4.14a-1), a OCV no litoral norte do Rio de Janeiro até o Espírito Santo, apresenta valores superiores a 50%. Enquanto nos outros meses (Figura 4.13b - 1), essa complementariedade é mais baixa.

Complementaridade total (%) Mensal (DEV > DEVmin e P < Pmin) de 1991 a 2020



Complementaridade total (%) Mensal (DEV > DEVmin e P < Pmin) de 1991 a 2020

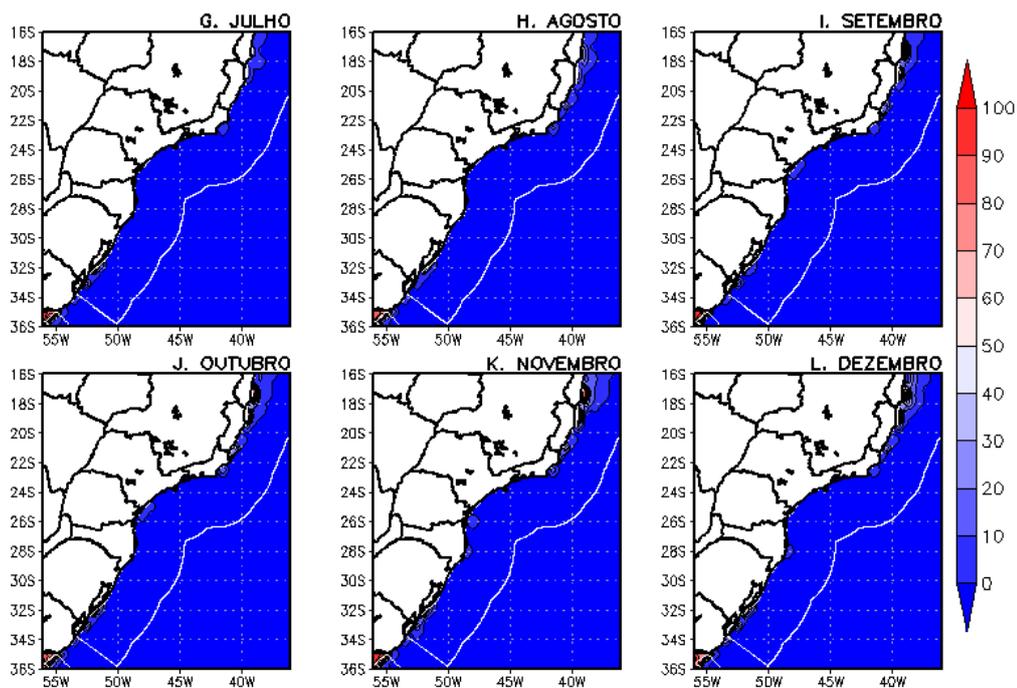
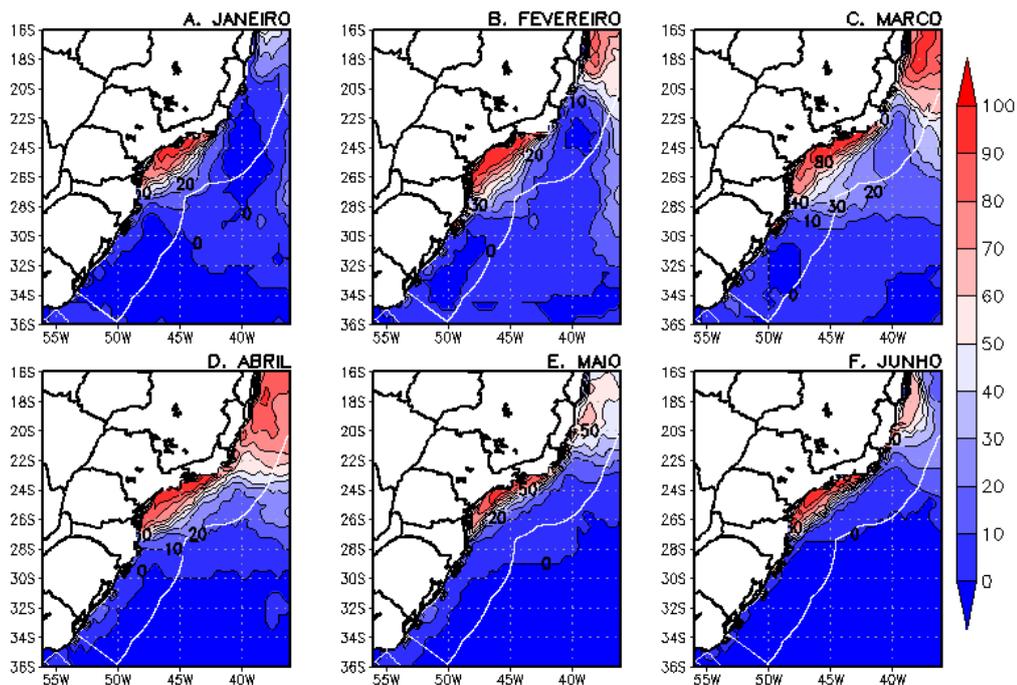


Figura 4.13 – Complementariedade total (colorido/contorno) (%) Mensal da geração das ondas pela geração eólica (VCO) a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020: A. Janeiro, B. Fevereiro, C. Março, D. Abril, E. Maio, F. Junho, G. Julho, H. Agosto, I. Setembro, J. Outubro, K. Novembro e L. Dezembro. Linha sólida branca demarca a Zona Econômica Exclusiva.

Complementaridade total (%) Mensal (DEV < DEVmin e P > Pmin) de 1991 a 2020



Complementaridade total (%) Mensal (DEV < DEVmin e P > Pmin) de 1991 a 2020

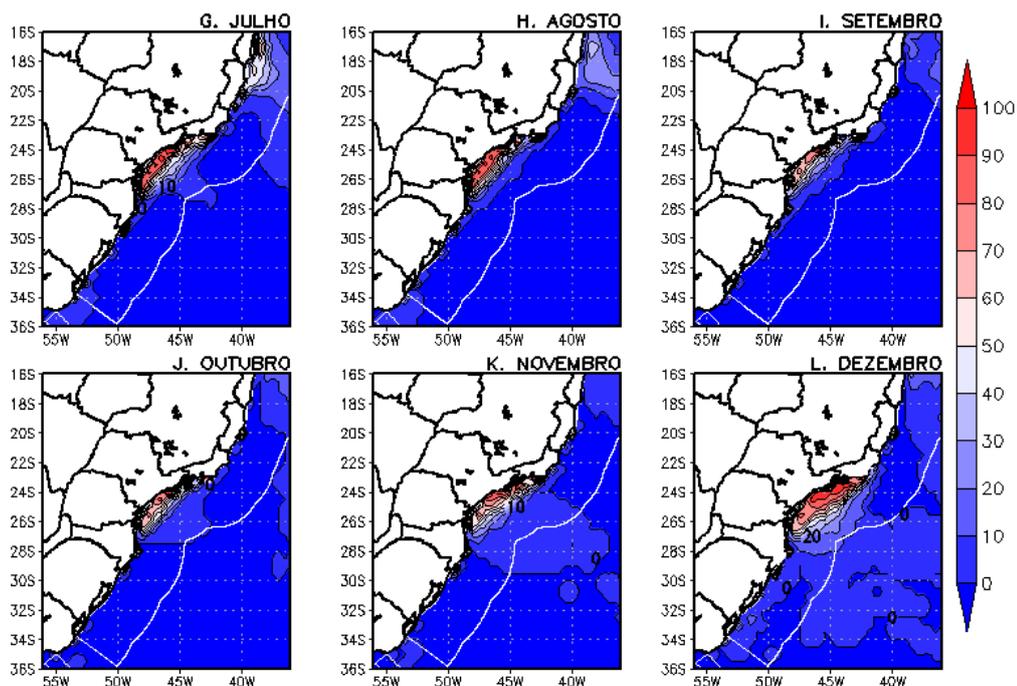


Figura 4.14 – Complementariedade total (colorido/contorno) (%) Mensal da geração eólica pela geração das ondas (OCV) a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020: A. Janeiro, B. Fevereiro, C. Março, D. Abril, E. Maio, F. Junho, G. Julho, H. Agosto, I. Setembro, J. Outubro, K. Novembro e L. Dezembro. Linha sólida branca demarca a Zona Econômica Exclusiva.

Concluiu-se que através da metodologia sugerida nesta pesquisa, a geração de energia através das ondas é capaz de complementar a eólica anualmente, sazonalmente e mensalmente em toda a região de estudo. Porém, a geração de energia eólica capaz de complementar a energia das ondas é ínfima.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve por objetivo principal quantificar os potenciais teóricos eólico *offshore* e das ondas, e analisar as suas possíveis complementariedades. Inicialmente investigou o comportamento da direção e magnitude dos ventos *offshore* na altura de 100 m, além da altura significativa das ondas a partir da combinação de vagas e marulhos e o período médio das ondas. Seguidas das estimativas dos Potenciais Teóricos Eólico *Offshore* e das Ondas. Por fim, analisou-se uma possível complementariedade energética da energia eólica *offshore* e das ondas através da avaliação do potencial teórico de ambos os recursos.

Os recursos renováveis citados foram avaliados através da reanálise *ECMWF Reanalysis Version 5* (ERA5) em um período de 30 anos (1991-2020), na Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul (OAS), incluindo o litoral brasileiro das Regiões Sudeste e Sul, dentro do domínio da Zona Econômica Exclusiva (ZEE).

Com relação a climatologia dos ventos, o mesmo foi abordado considerando a magnitude dos ventos a 100 m acima da superfície, a partir da aplicação da Lei do Perfil Logarítmico. Os resultados mostraram que anualmente, na altura de 100 m da superfície, a Região Sul, no litoral entre os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul (30° - 36° S, 045° - 055° W), apresentou o maior potencial energético eólico, comparando-se com a Região Sudeste, ao norte do estado do Rio de Janeiro e o sul do Espírito Santo (22° - 26° S, 035° - 045° W).

Sazonalmente, na Região Sul, destacou-se o inverno como estação mais energética, quando o centro do Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) se encontrou-se em latitudes mais ao norte e a oeste da sua posição climatológica (26° - 30° S, 005° - 015° W). E devido a maior ocorrência de passagens de sistemas frontais, de direção oeste-noroeste no litoral mais ao sul da região de estudo (28° - 36° S, 045° - 055° W).

Na Região Sudeste, destacou-se a primavera, quando o centro da ASAS se afasta latitudinalmente e longitudinalmente da América do Sul, apresentando deslocamento para sudoeste de sua posição climatológica. Observando-se na sua porção oeste, um forte gradiente de pressão horizontal sobre a região de estudo. E mensalmente, o mês mais energético foi setembro em ambas as regiões.

Com relação ao potencial eólico, o cálculo da Densidade de Energia do Vento (DEV), que

se dá a partir de uma função cúbica da magnitude do vento, espera-se que os campos médios gerados sigam o mesmo padrão espacial da magnitude desses ventos obtidos anteriormente. Os resultados mostraram que anualmente, na altura de 100 m da superfície, a Região Sul apresentou o maior potencial energético eólico, comparando-se com a Região Sudeste. Sazonalmente, na Região Sul, destacou-se o inverno como estação mais energética, já na Região Sudeste, destacou-se a primavera. E mensalmente, o mês mais energético foi setembro.

A análise do potencial teórico das ondas, mostrou que a Região Sul foi a que possui o maior potencial energético a partir das ondas, em comparação com a Região Sudeste. Principalmente, no litoral entre os estados do Rio Grande do Sul e o sul de Santa Catarina.

Sazonalmente, o litoral da Região Sul, que possui maior frequência de formação de ciclones na América do Sul, apresentou valores mais energéticos de P no inverno, atingindo valores máximos de 28 kW/m. Sendo setembro, o mês que apresentou os maiores valores de P .

Por último, embora os valores de Densidade de Energia do Vento (DEV) encontrados tenham sido inferiores aos limites mínimos determinados ($DEV_{min} = 210 \text{ W/m}^2$) em regiões como o norte do Espírito Santo e a região entre os litorais Fluminense e Catarinense, os valores de Densidade de Potência das Ondas (P) são majoritariamente superiores ($P_{min} = 5 \text{ kW/m}$).

Foi verificado que a geração de energia a partir das ondas foi sempre capaz de complementar a geração de energia eólica. Enquanto a geração eólica se mostrou com capacidade baixa, em parte da região de estudo, em complementar a geração das ondas.

De maneira geral, os objetivos, principal e específicos, foram alcançados. No entanto, ressalta-se a necessidade de abordar outras linhas de pesquisa acerca do tema, pois como citado aqui a Lei do Perfil Logarítmico pode propagar erros na estimativa da velocidade dos ventos em diferentes alturas. Além disso, a avaliação da disponibilidade do recurso das ondas, considerou $P_{min} = 5 \text{ kW/m}$, conforme literatura utilizada para representar P sobre mares europeus.

CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. J. A. “Análise regional da energia eólica no Brasil. Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional”, [S. l.], v. 6, n. 1, 2010. DOI: 10.54399/rbgdr.v6i1.266.

“Anuário Estatístico de Energia Elétrica da Empresa de Pesquisa Energética” (2022). Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 07 de julho de 2022.

ARAGÃO, JÉSSICA DA SILVA. “Estudo do uso de energia renovável nas zonas costeiras por ondas, marés e ventos”. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade de Oceanografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

BARBOZA, D. V.; Teixeira, M. A. ; CATALDI, M. ; MEIRINO, M. J. . “Avaliação da Geração Eólica como Alternativa ao Descomissionamento de Plataformas Petrolíferas Fixas nos Mares Brasileiros”. ANUÁRIO DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS (UFRJ. IMPRESSO), v. 43, p. 455-466, 2020.

BELUCO, A., DE SOUZA, P. K., KRENZINGER, A. “A *dimensionless index evaluating the time complementarity between solar and hydraulic energies*”. *Renewable Energy* 33, 10 (2008), 2157–2165.

BEN. “Balanco Energético Nacional” (2022). Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>>. Acesso em: 07 de julho de 2022.

“Boletim Anual 2021 da Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias”. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>>. Acesso em: 13 de setembro de 2022.

MATEUS, BRANCO & KLUMB-OLIVEIRA, LEONARDO. (2023). “Clima de ondas de tempestades na costa brasileira utilizando 41 anos de dados da reanálise ECMWF ERA5”. *Revista Brasileira de Climatologia*. 32. 10.55761/abclima.v32i19.16156.

CAMPOS, R. M. Análise dos extremos de onda no Rio de Janeiro associados a ciclones extratropicais no Atlântico Sul. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

CANTÃO, M. P., BESSA, M. R., BETTEGA, R., DETZEL, D. H., LIMA, J. M. “*Evaluation of hydro-wind complementarity in the brazilian territory by means of correlation maps*”. *Renewable Energy* 101 (2017), 1215–1225.

CARVALHO, J.T. 2010. “Simulação da distribuição de energia das ondas oceânicas ao largo do Litoral Brasileiro”. São José dos Campos, 169p. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

OLIVEIRA DE CARVALHO, NATASHA. “AVALIAÇÃO DE DIFERENTES CONJUNTOS DE DADOS METEOROLÓGICOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DA BACIA DE SANTOS” / Natasha Oliveira de Carvalho. Rio de Janeiro, 2022. 108 f

CASTELAO, R. M., AND J. A. BARTH (2006), “*Upwelling around Cabo Frio, Brazil: The importance of wind stress curl, Geophys*”. *Res. Lett.*, 33, L03602, doi:10.1029/2005GL025182.

CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; JUSTI DA SILVA, M.G.A. & SILVA DIAS, M.A.F. (Eds.). “Tempo e Clima no Brasil”. 1 ed. 2009, Oficina de Textos, cap. 9, pp. 135–148, São Paulo. ISBN: 978-85-86238-92-5.

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, 2016.

COSTA RA, CASOTTI BP, AZEVEDO RLS. “Um panorama da indústria de bens de capital relacionados a energia eólica”. Tech. rep.. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social; 2009.

COTRIM, C.D.S.; SEMEDO, A.; LEMOS, G. “Brazil Wave Climate from a High-Resolution Wave Hindcast”. *Climate* 2022, 10, 53. <https://doi.org/10.3390/cli10040053>

CRUZ, J. M. B. P., SARMENTO, A. J. N. A. (2004). “Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais”, Ed. Instituto do Ambiente, Portugal, Amadora. (in Portuguese). Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/352939093/05-Energia-dasondas-introducao-aos-aspectos-tecnologicos-economicos-e-ambientais-pdf>>.

DEGOLA, T. S. D., (2013), “Impactos e variabilidade do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul sobre o Brasil no clima presente e em cenários futuros”. Dissertação de mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, p. 92.

DERECZYNSKI, C.P., MENEZES, W.F. 2015. “Meteorologia da Bacia de Campos”. In: Martins, R.P., Grossmann-Matheson, G.S., editores. *Meteorologia e Oceanografia*. Rio de Janeiro: Elsevier. Habitats, v. 2. p. 1-54.

DIAS DA SILVA, PHILIPP EDSON. “Caracterização do padrão de ondas na costa do Brasil por meio de modelagem numérica”. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

EGUCHI, B.; ALBINO, J. . “Metodologia para determinação do grau de exposição às ondas utilizando energia de ondas e respostas de perfis praias, aplicada ao litoral sul do Espírito Santo”. *Pesquisas em Geociências*, v. 49, n. 2, p. e115485, 21 dez. 2022

ERA5 *online data documentation*. Disponível em: <<https://confluence.ecmwf.int/display/CKB>>. Acesso em: 14 de maio de 2024.

ESTEBAN, M. D., DIEZ, J. J., LOPEZ, J. S., et al. “*Why offshore wind energy?*” *Renewable Energy*, v. 36, n. 2, pp. 444–450, 2011.

FERNANDES, I. G. et al. “Offshore validation of era5 reanalysis with hub height wind observations of brazil”. In: IEEE. 2021 IEEE PES innovative smart grid technologies conference-Latin America (ISGT Latin America). [S.l.], 2021. p. 1–5.

DE FREITAS ASSAD LUIZ PAULO, SHADMAN M (2021). Tópicos Especiais em Meteorol. Material de apoio à disciplina de Tópicos Especiais em Meteorol, lecionada na Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ.

GAN, M. A. 1992. “Ciclogêneses e ciclones sobre a América do Sul” [Tese]. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

GAN, M. A., RAO, B. V. "Surface Cyclogenesis Over South America", Mon. Wea. Rev., 119, 293-302., 1991.

“Glossary of Environment Statistics” (1997). Studies in Methods, Series F, No. 67. United Nations, New York, 1997. Disponível em: <<https://digitallibrary.un.org/record/232808>>. Acesso em: 16 de outubro de 2021.

GWEC. *Global Wind Energy Council*. “Global wind report 2022”. Disponível em: <<https://gwec.net/global-wind-report-2022/>>. Acesso em: 03 de outubro de 2022.

HERSBACH, H, DE ROSNAY, P, BELL, B, SCHEPERS, D, SIMMONS, A, SOCI, C, ABDALLA, S, ALONSO-BALMASEDA, M, BALSAMO, G, BECHTOLD, P, BERRISFORD, P, BIDLOT, J-R, DE BOISSÉSON, E, BONAVITA, M, BROWNE, P, BUIZZA, R, DAHLGREN, P, DEE, D, DRAGANI, R, DIAMANTAKIS, M, FLEMMING, J, FORBES, R, GEER, AJ, HAIDEN, T, HÓLM, E, HAIMBERGER, L, HOGAN, R, HORÁNYI, A, JANISKOVA, M, LALOYLAUX, P, LOPEZ, P, MUNOZ-SABATER, J, PEUBEY, C, RADU, R, RICHARDSON, D, THÉPAUT, J-N, VITART, F, YANG, X, ZSÓTÉR, E, ZUO, H. “Operational global reanalysis: progress, future directions and synergies with NWP”. Disponível em: <<https://www.ecmwf.int/en/elibrary/18765-operational-global-reanalysis-progress-future-directions-and-synergies-nwp>>.

IEA. “International Energy Agency”. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=ElecGenByFuel>>. Acesso em: 26 de setembro de 2021.

Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers. In: “*Climate Change 2023: Synthesis Report*”. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

IRENA. “*Innovation Outlook: Offshore Wind*” (2016). do International Renewable Energy Agency. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2016/oct/innovation-outlook-offshore-wind>. Acesso em: 29 de março de 2023.

KARDAKARIS, K.; BOUFIDI, I.; SOUKISSIAN, T. “Offshore Wind and Wave Energy Complementarity in the Greek Seas Based on ERA5 Data”. *Atmosphere* 2021, 12, 1360. <https://doi.org/10.3390/atmos12101360>

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. (2008). “O aproveitamento da Energia Eólica”. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 30(1): 1304.

MOLNÁR, P., CAMARGO, L. S., RAMOS, D. “*Applying copulas functions for wind and hydro complementarity evaluation: A brazilian case*”. Em 2015 12th International Conference on the European Energy Market (EEM) (2015), IEEE.

MUNK WH. “Origin and generation of waves. In: Proceedings of first conference on coastal engineering”; 1950. Long Beach, CA.

MUSIAL, W.; RAM, B. “Large-Scale Offshore Wind Power in the United States”. NREL/National Renewable Energy Laboratory, 2010.

MUSIAL, W. et al. “*2016 Offshore Wind Energy Resource Assessment for the United States*”. NREL/TP-5000-66599. NREL/National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, US, 2016.

NASCIMENTO, M. X. “Análise das Condições Meteo-Oceanográficas na região da Baía de Santos”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.

NASCIMENTO, MARCOLINO MATHEUS DE SOUZA. “Avaliação do potencial energético eólico e solar offshore no Brasil” / Marcolino Matheus de Souza Nascimento. – Rio de Janeiro: UFRJ/IGEO, 2022, 97p.

DE SOUZA NASCIMENTO, M.M.; SHADMAN, M.; SILVA, C.; DE FREITAS ASSAD, L.P.; ESTEFEN, S.F.; LANDAU, L. “*Offshore wind and solar complementarity in Brazil: A theoretical and technical potential assessment*”. *Energy Convers. Manag.* 2022, 270, 116194.

NOGUEIRA, IZABEL CHRISTINA MARTINS. “Caracterização do Clima de Ondas na Baía do Espírito Santo através de Modelagem Numérica”/ Izabel Christina Martins Nogueira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014. XVII, 128 p.: il.; 29,7 cm. Orientador: Carlos Eduardo Parente Ribeiro Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2014. Referências Bibliográficas: p. 122-128.

ONEA, F.; RUSU, E. “An Evaluation of Marine Renewable Energy Resources Complementarity in the Portuguese Nearshore”. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 1901. <https://doi.org/10.3390/jmse10121901>

ORTIZ, G. P.; KAMPEL, M. “Potencial de energia eólica offshore na margem do Brasil”. V Simpósio Brasileiro de Oceanografia. *Oceanografia e Políticas Públicas*. Santos, SP, Brasil, 2011.

PAIVA, V.; KAMPEL, M.; CAMAYO, R. “*Comparison of Multiple Surface Ocean Wind Products with Buoy Data over Blue Amazon (Brazilian Continental Margin)*”. *Advances in Meteorology*, [s. l.], v. 2021, p. 19, 2021.

PARENTE, C. E. “Uma Nova Técnica Espectral para análise Direcional de Ondas”. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 1999.

PARENTE, C.E.; NOGUEIRA, I.C.M.; MARTINS, R.P; RIBEIRO, E.O. “Climatologia de Ondas”. In: Martins, R.P. & Matheson, G.S.G, editores. *Caracterização Ambiental Regional da Bacia de Campos, Atlântico Sudoeste: Meteorologia e Oceanografia*. Rio de Janeiro: Elsevier, in press (Série Habitats), 2014.

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, pp. 2375-2387, 2008.

PINHO, U. F. *Caracterização dos Estados de Mar na Bacia de Campos*. Tese M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, Brasil, 2003.

PIUMBINI, P. P. “Clima de Ondas de Gravidade e Estado de Agitação Marítima em Ambientes Marinhos no Espírito Santo”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.

“Plano Nacional de Energia 2030 da Empresa de Pesquisa Energética (2007)”. <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-PNE-2030>>. Acesso em: 12 de setembro de 2022.

REBOITA, M. S. “Ciclones Extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação Climática e Experimentos de Sensibilidade”. Tese de Doutorado em Meteorologia, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG–USP, 359 pg., 2008.

REBOITA MS, AMBRIZZI T, SILVA BA, PINHEIRO RF AND DA ROCHA RP (2019) “The South Atlantic Subtropical Anticyclone: Present and Future Climate”. *Front. Earth Sci.* 7:8. doi: 10.3389/feart.2019.00008

DOS REIS, M.M.L.; MAZETTO, B.M.; DA SILVA, E.C.M. “*Economic analysis for implantation of an offshore wind farm in the Brazilian coast. Sustain*”. Energy Technol. Assessments 2021, 43, 100955.

“*Roadmap Eólica Offshore Brasil da Empresa de Pesquisa Energética*” (2020). <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/roadmap-eolica-offshore-brasil>>. Acesso em: 28 de março de 2023.

RODRIGUES, R. R., AND J. A. LORENZZETTI (2001), “*A numerical study of the effects of bottom topography and coastline geometry on the Southeast Brazilian coastal upwelling*”, Cont. Shelf Res., 21, 371 – 394. Smith, R. L. (1968), Upwelling, Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev., 6, 11 – 46

DE OLIVEIRA COSTA SOUZA ROSA, C., COSTA, K. A., DA SILVA CHRISTO, E., BERTAHONE, P. B. “*Complementarity of hydro, photovoltaic, and wind power in rio de janeiro state*”. Sustainability 9, 7 (2017), 1130.

CAROLINE DE OLIVEIRA COSTA SOUZA ROSA. “*Estudo de complementaridade entre as energias hidrelétrica, eólica e fotovoltaica nas regiões Sudeste e Centro-Oeste*”. / Caroline de Oliveira Costa Souza Rosa; Eliane da Silva Christo, orientadora; Kelly Alonso Costa, coorientadora. Volta Redonda, 2019. 156 f. : il. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGMCCT.2019.m.13332433750>

SESMIL, E. L. F. (2013). “*Energia Maremotriz: Impactos Ambientais e Viabilidade Econômica no Brasil*”. Monografia, Programa de Pós-Graduação Lato Sensu em Fontes Alternativas de Energia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

SHADMAN M, SILVA C, FALLER D, WU Z, DE FREITAS ASSAD LP, LANDAU L, LEVI C, ESTEFEN SF. “*Ocean renewable energy potential, technology, and deployments: a case study of Brazil*”. Energies 2019;12:3658. <https://doi.org/10.3390/en12193658>.

SHADMAN M., ROLDAN-CARVAJAL M., PIERART F.G., HAIM P.A., ALONSO R., SILVA C., OSORIO A.F., ALMONACID N., CARRERAS G., MAALI AMIRI M., ARANGO-ARAMBURO S., ROSAS M.A., PELISSERO M., TULA R., ESTEFEN S.F., PASTOR M.L., SAAVEDRA O.R. “*A review of offshore renewable energy in South America: Current status and future perspectives*” Sustainability, 15 (2) (2023), [10.3390/su15021740](https://doi.org/10.3390/su15021740)

A.J.V.D.C. SILVA, M. CATALDI, I.C.D.V. DRAGAUD. “*Avaliação do potencial de geração eólica offshore na região costeira dos municípios de Cabo Frio e Arraial do Cabo, estado do Rio de Janeiro.*” XIV ENEEAmb, II Fórum Latino e I SBEA – Centro-Oeste (2016), pp. 432-439.

SILVA, A. R., PIMENTA, F. M., ASSIREU, A. T., et al. “*Complementarity of Brazil hydro and offshore wind power*”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 56, pp. 413–427, 2016.

SILVA, R. C. da; NETO, I. de M.; SEIFERT, S. S. “*Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in brazil*”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 59, p. 328–341, 2016.

SUN, X., COOK, K. H., VIZY, E. K. “*The South Atlantic subtropical high: Climatology and interannual variability*”, *Journal of Climate*, v. 30, n. 9, pp. 3279-3296, 2017.

TAVARES, LUIZ FILIPE DE ASSIS (2020). “Energia eólica offshore: Uma avaliação do potencial técnico das regiões sul e sudeste brasileiras a partir de três reanálises atmosféricas e do modelo WRF”. Dissertação (mestrado) - UFRJ/IGEO/Programa de Pós-graduação em Meteorologia, 2020.

LUIZ FILIPE DE ASSIS TAVARES, MILAD SHADMAN, LUIZ PAULO DE FREITAS ASSAD, CORBINIANO SILVA, LUIZ LANDAU, SEGEN F. ESTEFEN (2020). “*Assessment of the offshore wind technical potential for the Brazilian Southeast and South regions*”. *Energy* (2020), Volume 220, 117097. DOI 10.1016/j.energy.2020.117097.

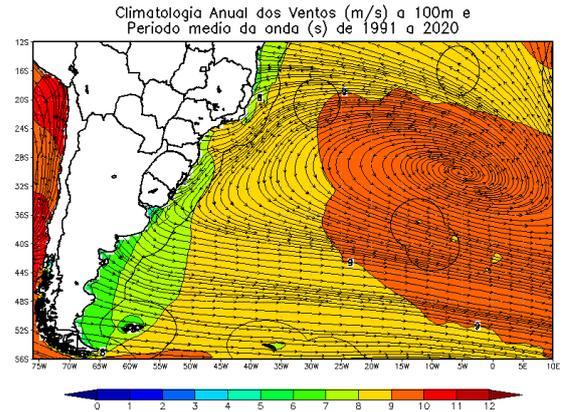
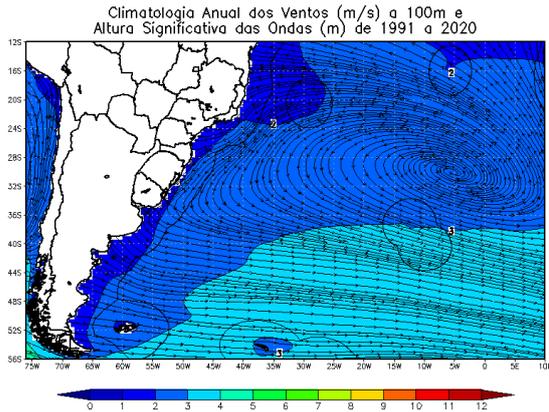
Wave Energy Centre – Centro De Energia Das Ondas. 2004. “Potencial e Estratégia de desenvolvimento da energia das ondas em Portugal”, 70p.

VINHOZA, A. J. C. S. “Potencial Eólico Offshore no Brasil: Localização de Áreas Nobres através de Análise Multicritério”. 2019.

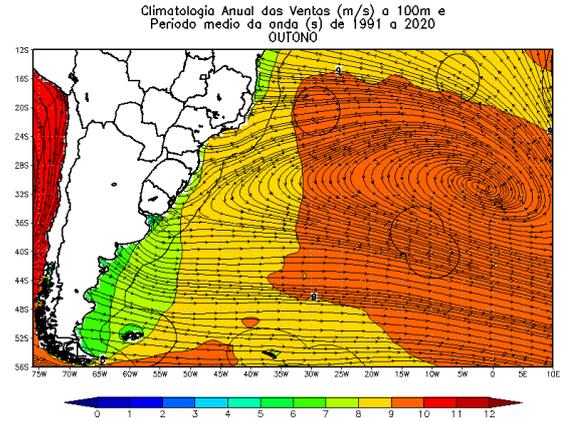
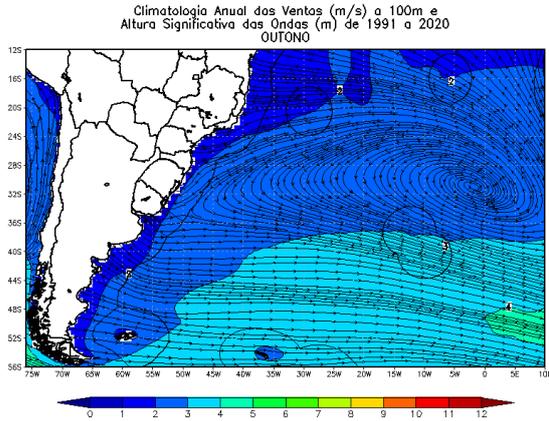
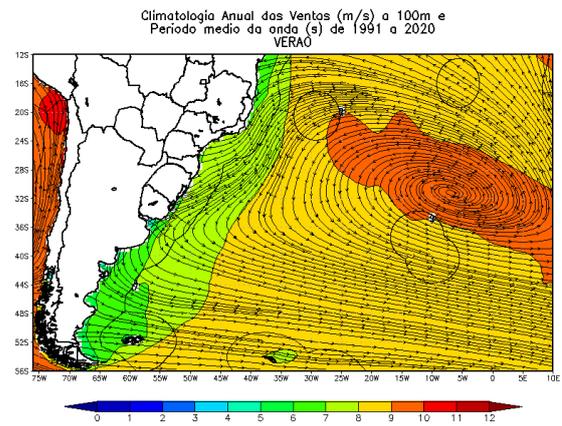
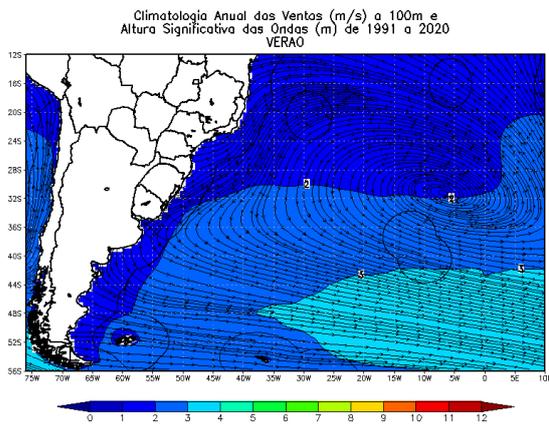
VIOLANTE-CARVALHO, N. “Investigação sobre a evolução do clima de ondas na Baía de Campos e a correlação com as situações meteorológicas associadas”. Dissertação de Mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1998.

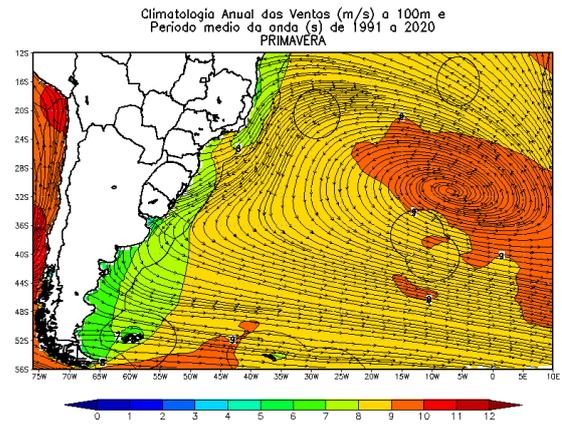
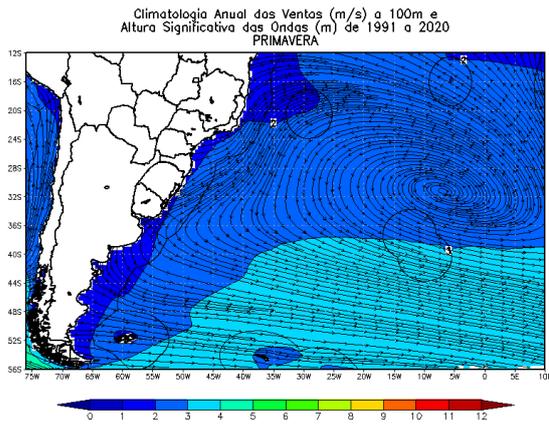
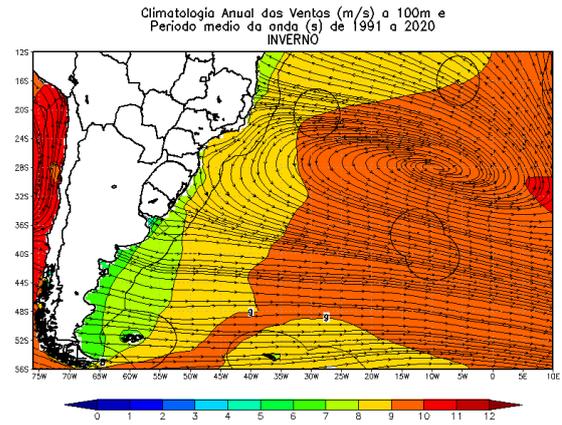
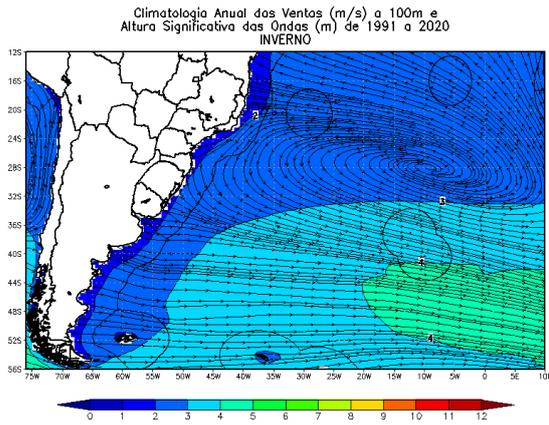
ZHENG CW, LI CY. “Variation of the wave energy and significant wave height in the China Sea and adjacent waters”. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;43: 381e7. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.001>.

ANEXO

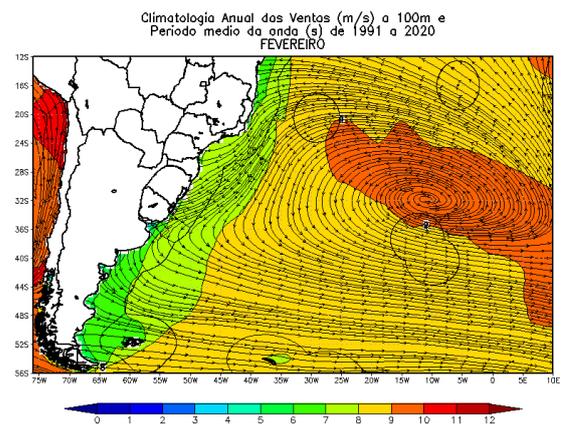
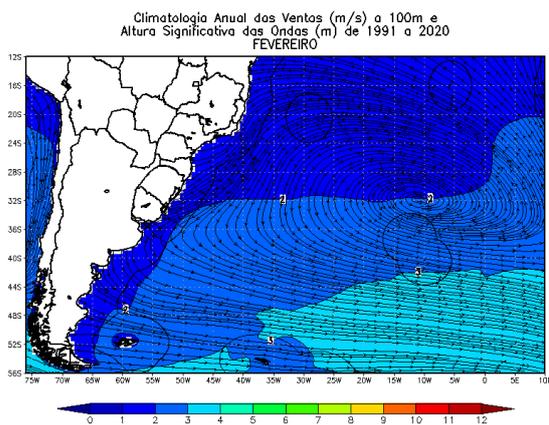
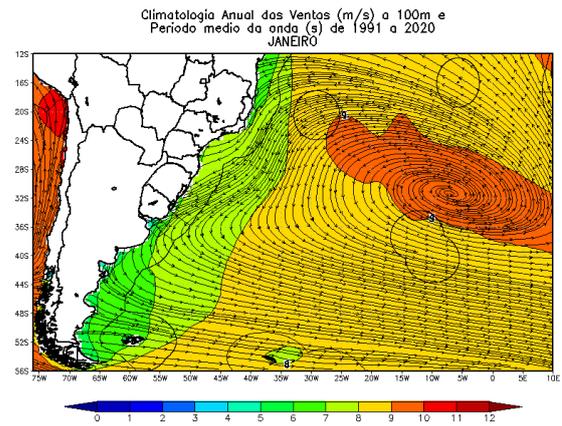
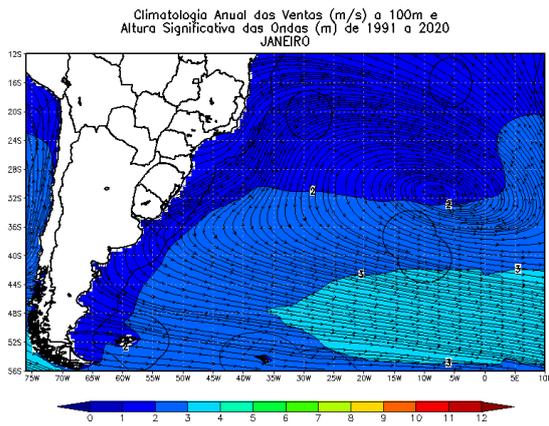


Altura Significativa das Ondas (colorido/contorno) (m) e Período Médio das Ondas (s) Anual a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020. Linha sólida preta representa a Zona Econômica Exclusiva.

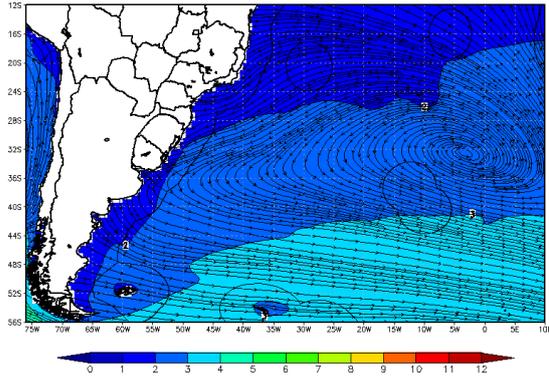




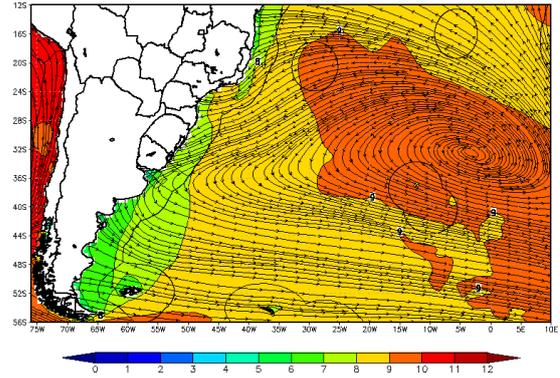
Altura Significativa das Ondas (colorido/contorno) (m) e Período Médio das Ondas (s) Sazonal a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020: Verão, Outono, Inverno e Primavera. Linha sólida preta representa a Zona Econômica Exclusiva.



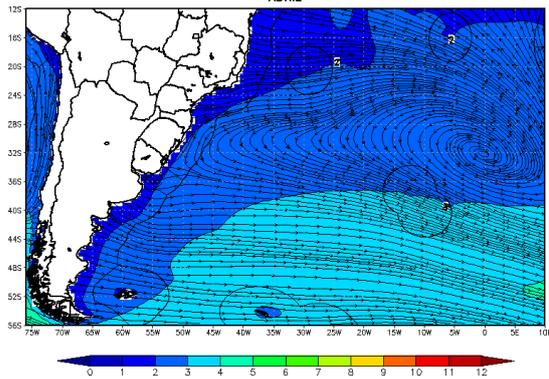
Climatologia Anual das Ventas (m/s) a 100m e
Altura Significativa das Ondas (m) de 1991 a 2020
MARÇO



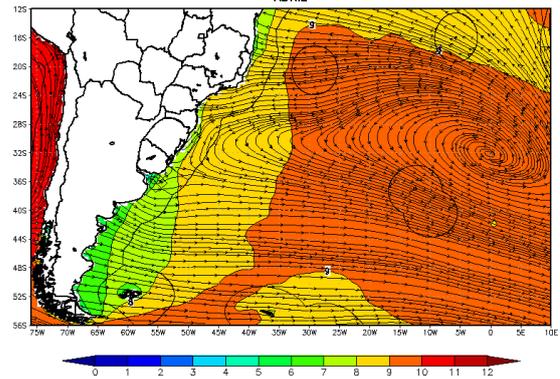
Climatologia Anual das Ventas (m/s) a 100m e
Período medio da onda (s) de 1991 a 2020
MARÇO



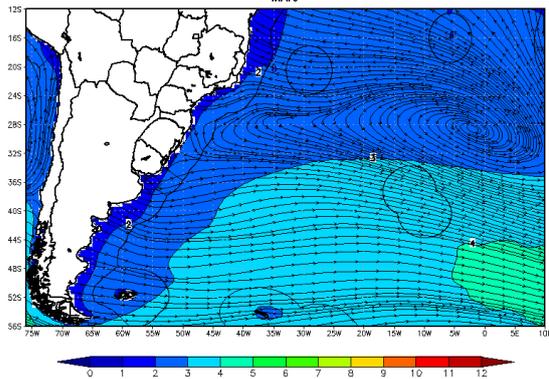
Climatologia Anual das Ventas (m/s) a 100m e
Altura Significativa das Ondas (m) de 1991 a 2020
ABRIL



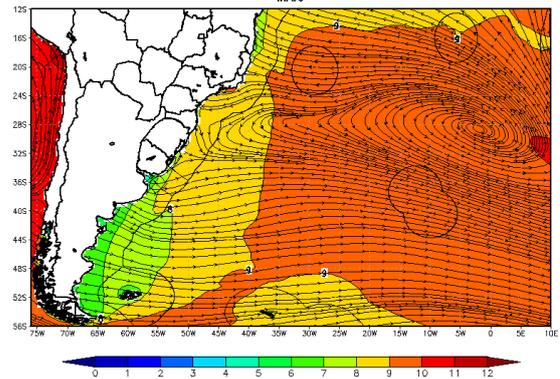
Climatologia Anual das Ventas (m/s) a 100m e
Período medio da onda (s) de 1991 a 2020
ABRIL



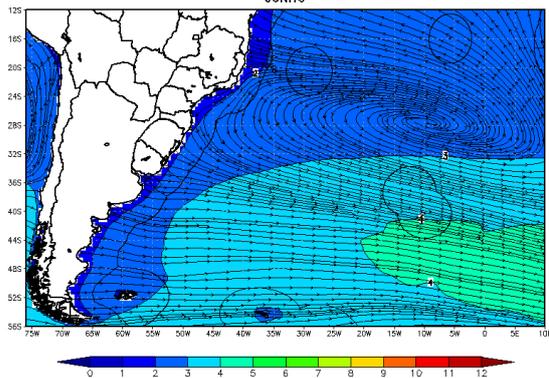
Climatologia Anual das Ventas (m/s) a 100m e
Altura Significativa das Ondas (m) de 1991 a 2020
MAIO



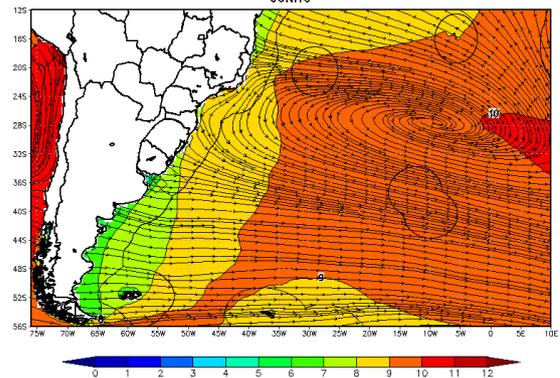
Climatologia Anual das Ventas (m/s) a 100m e
Período medio da onda (s) de 1991 a 2020
MAIO



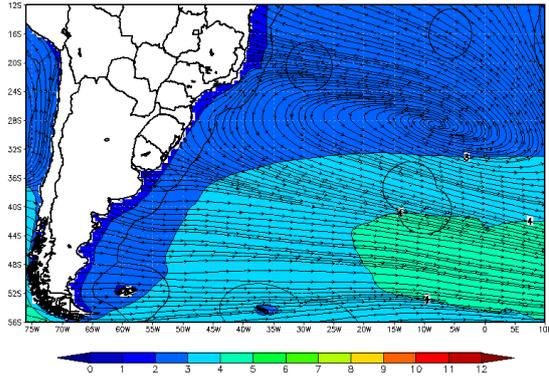
Climatologia Anual das Ventas (m/s) a 100m e
Altura Significativa das Ondas (m) de 1991 a 2020
JUNHO



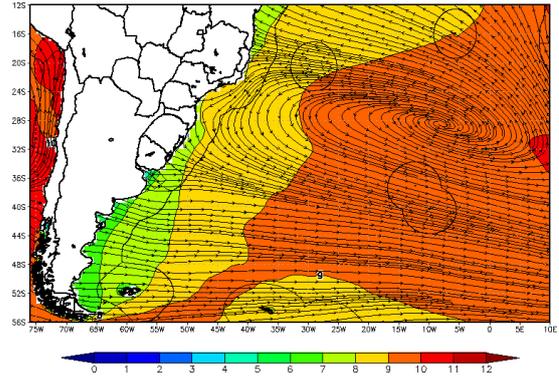
Climatologia Anual das Ventas (m/s) a 100m e
Período medio da onda (s) de 1991 a 2020
JUNHO



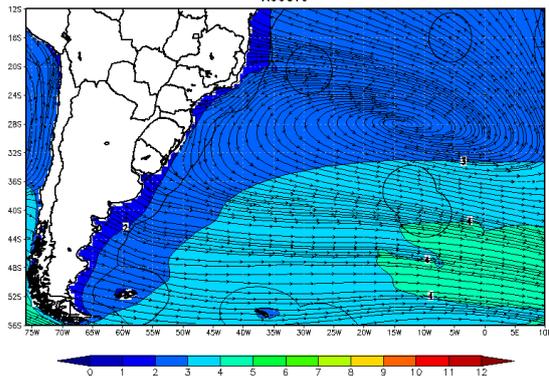
Climatologia Anual das Ventas (m/s) a 100m e
Altura Significativa das Ondas (m) de 1991 a 2020
JULHO



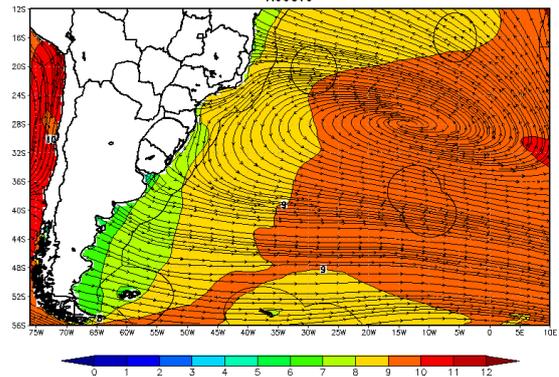
Climatologia Anual das Ventas (m/s) a 100m e
Período medio da onda (s) de 1991 a 2020
JULHO



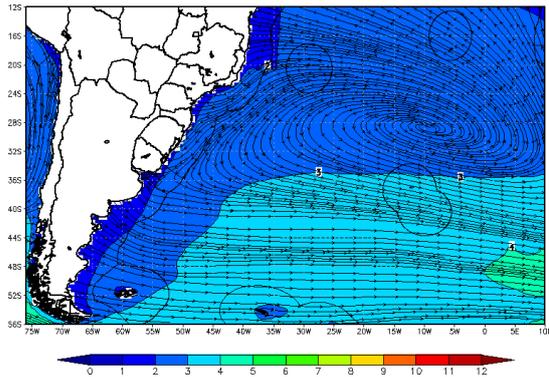
Climatologia Anual das Ventas (m/s) a 100m e
Altura Significativa das Ondas (m) de 1991 a 2020
AGOSTO



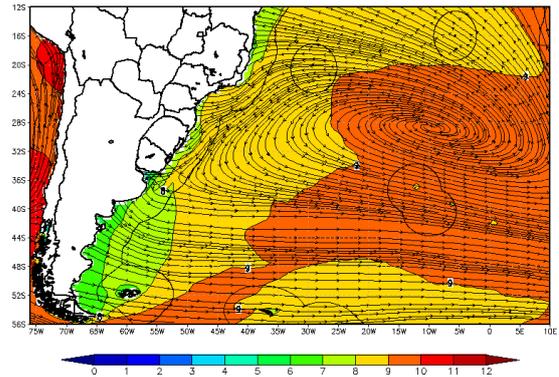
Climatologia Anual das Ventas (m/s) a 100m e
Período medio da onda (s) de 1991 a 2020
AGOSTO



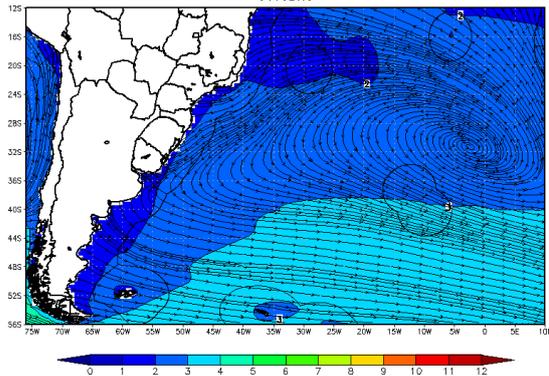
Climatologia Anual das Ventas (m/s) a 100m e
Altura Significativa das Ondas (m) de 1991 a 2020
SETEMBRO



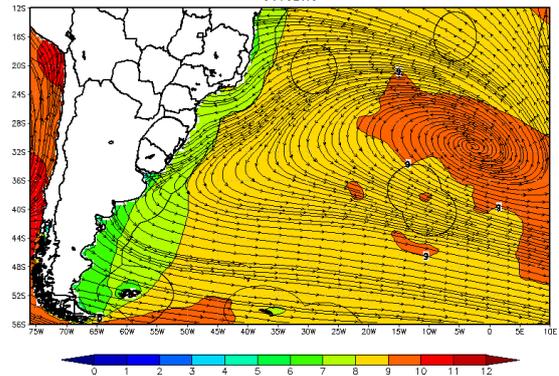
Climatologia Anual das Ventas (m/s) a 100m e
Período medio da onda (s) de 1991 a 2020
SETEMBRO

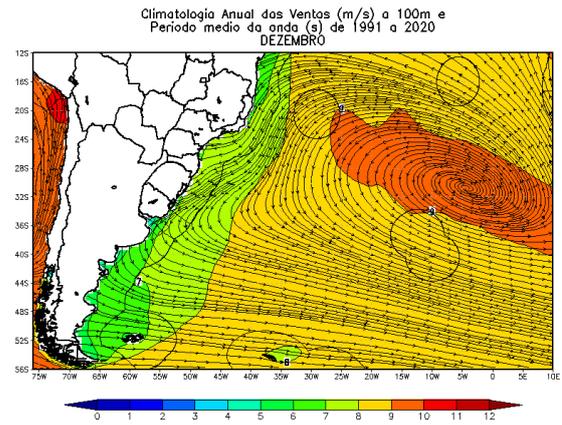
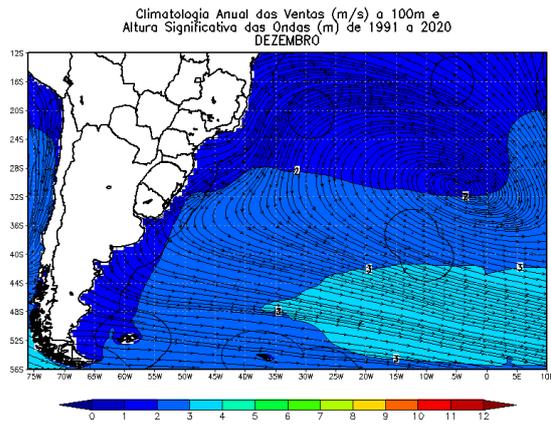
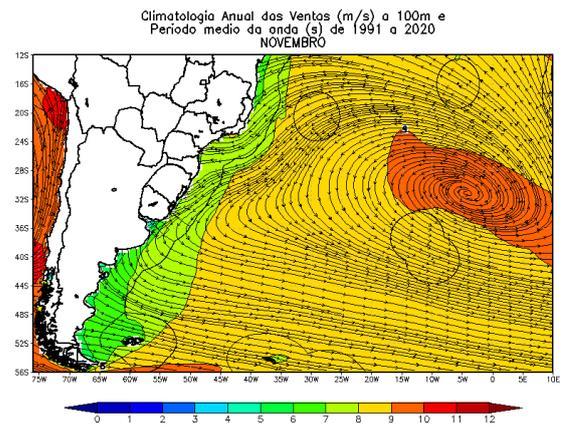
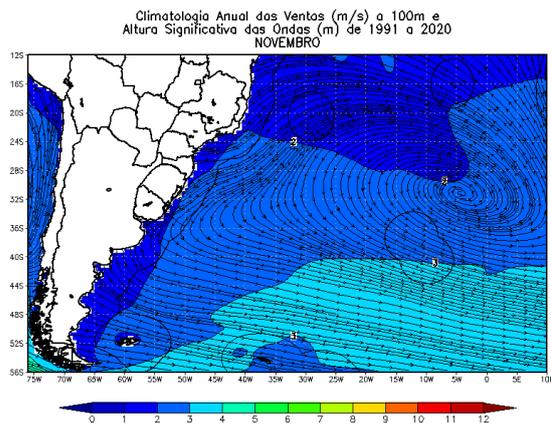


Climatologia Anual das Ventas (m/s) a 100m e
Altura Significativa das Ondas (m) de 1991 a 2020
OUTUBRO



Climatologia Anual das Ventas (m/s) a 100m e
Período medio da onda (s) de 1991 a 2020
OUTUBRO





Altura Significativa das Ondas (colorido/contorno) (m) e Período Médio das Ondas (s) Mensal a partir da reanálise ERA5 sobre a Região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul entre 1991 e 2020: Janeiro, Fevereiro, Março, Abril, Maio, Junho, Julho, Agosto, Setembro, Outubro, Novembro e Dezembro. Linha sólida preta representa a Zona Econômica Exclusiva.