



Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras

Monografia para Obtenção do Grau de Licenciatura em Oceanografia

Avaliação do Potencial de Energia Eólica Offshore nas Regiões Norte e Sul da Costa de Moçambique



Autor

Bolton dos Anjos Marcelino

Quelimane, Abril de 2025

Avaliação do Potencial de Energia Eólica Offshore nas Regiões Norte e Sul da Costa de Moçambique

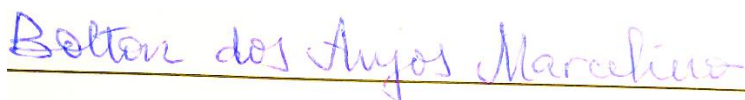
Monografia apresentada na Universidade

Eduardo Mondlane, nas Ciências Marinhas e

Costeiras para a obtenção do grau de Licenciatura em

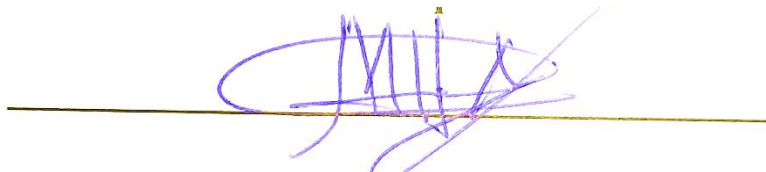
Oceanografia

Autor:



(Bolton dos Anjos Marcelino)

Supervisora:



(Doutora Maria Helena Paulo António)

Avaliador:



(Mestre Humberto S. Mabota)

Presidente de Júri:



(Mestre Banito Bene Magestade)

Quelimane, Abril de 2025

Dedicatória

Aos meus pais, *Marcelino dos Santos Fernando* e *Gilda Paulo Nipuíte*, a minha avó *Jacinta Paulo Mirolé Nipuite*, a memória do meu avo *Paulo de Castro Nipuíte* e a minha avó *Virgínia João*, aos meus irmãos *Gilberto Dias Marcelino*, *Rebelo Cesário Marcelino*, as recém-nascidas *Emily da Gilda Marcelino* e *Emilen da Gilda Marcelino*, e em especial a minha irmã *Leila da Ivénia Marcelino*.

A toda família *Nipuíte*, especialmente tio *Ribeiro Vaz Paulo*, *Nelito Paulo Jacinto Nipuíte*, *Irineu das Dores Matos Nipuite* e a tia *Alice da Graça Paulo Nipuite*.

Com muitas saudades, dedico este trabalho a todos eles.

Agradecimentos

Antes agradecer ao Onnipotente pela vida e a saúde que me tem proporcionado ao longo da minha caminhada. Por me iluminar e conduzir pelos caminhos certos até que fosse formado.

Em especial a minha mãe e ao meu pai, por todo amor e carinho. Que mesmo longe me compreenderam e nunca deixaram de me apoiar incondicionalmente em todas as situações e etapas da minha vida, eu amo vocês.

Agradeço imensuravelmente a minha avó *Jacinta Paulo Mirolé Nipuite*, a minha irmã *Leila da Ivénia Marcelino* e aos meus tios *Nelito Paulo Jacinto Nipuíte*, *Ribeiro Vaz Paulo* e *Alice da Graça Paulo Nipuite*, pelo amor, carinho, apoio e por me acompanharem durante esta trajetória.

A todos os docentes e funcionários da UEM – ESCMC, em especial Mestres *Noca Furaca*, *Teófilo Ferraz*, *Huberto Mabota*, e *Dr. Fialho Nehama*. E a minha supervisora Doutora *Maria Helena Paulo António*, pela orientação, paciência e dedicação durante a realização deste trabalho, e pela confiança depositada nas minhas capacidades académicas.

Um agradecimento especial aos caríssimos *Dércio Cesário Felisberto Serafim*, *Onilio Jordão*, *Ricardino Lucas* e *Cinquenta José Nhavotso* que se tornaram irmãos, grandes amigos e indispensáveis durante a minha formação. Profundamente, muito obrigado.

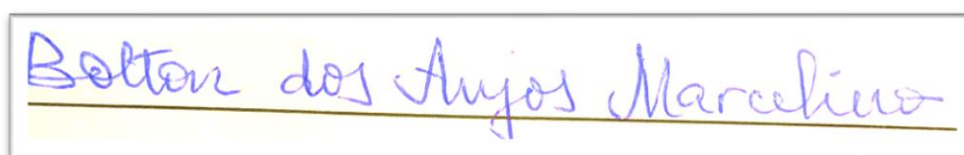
Agradeço a todos colegas que junto começamos os desafios na UEM – ESCMC no ano 2019, especialmente aos colegas da turma de Oceanografia pela partilha de conhecimento, espírito de companheirismo e amizade no decorrer de todo o curso. Meu muitíssimo obrigado a *Sualehé Ceia Andarusse*. Agradeço também a *Alfinete Dramusse*, *Amilton Muhosse*, *Quipa João*, *Acácio Raibo* e *Lacerno Manjate*. E a todos outros colegas que direta ou indiretamente me apoiaram em todo meu percurso.

“Á todos, Assanthe”

Declaração de Honra

Eu, **Bolton Dos Anjos Marcelino**, declaro por minha honra que o presente trabalho de pesquisa é da minha autoria, fruto do meu esforço, dedicação e da minha inteira responsabilidade. Nunca antes foi apresentado em nenhuma parte com a finalidade de obtenção de qualquer grau acadêmico ou outros fins. A informação aqui contida reflete a verdade, as fontes por mim consultadas estão devidamente referenciadas cumprindo parcialmente os requisitos necessários para obtenção do grau de Licenciatura em Oceanografia pela Universidade Eduardo Mondlane (UEM) - Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras (ESCMC).

O autor



(Bolton dos Anjos Marcelino)

“Se você tem um sonho, tem que correr atrás dele. As pessoas às vezes não conseguem vencer na vida e dizem que você também não irá vencer. Se você quer alguma coisa, corra atrás, ponto”.

À Procura de Felicidade

“Às vezes ouço passar o vento;
e só de ouvir o vento passar,
vale a pena ter nascido”.

Fernando Pessoa

Resumo

O uso da energia para acelerar a dinâmica do homem tem sido cada vez maior, pois esta aliada a dependência e uso de fontes não renováveis trazendo consequências, principalmente negativas quando relacionadas às questões climáticas, fomentando-se assim a busca por fontes limpas e renováveis. O presente trabalho objetiva a avaliação do potencial de energia eólica na região norte e sul de Moçambique, visando analisar as principais características deste recurso. Para o efeito, foram adquiridos dados mensais de velocidade e direção do vento na reanálise ERA5 do ECMWF, a uma altura de 10m compreendendo num período de 30 anos (de janeiro de 1993 a dezembro de 2022). Foram analisados os dados usando funções para cálculos estatísticos das médias mensais da velocidade e direção do vento nas duas regiões e um ajuste da Distribuição de Probabilidade de Weibull. Os resultados mostram que na região Norte as velocidades médias mais elevadas são observadas durante os meses de inverno, entre abril e setembro, e a região Sul apresenta um padrão diferente, com velocidades médias mais elevadas durante o verão e, em menor grau, durante o inverno. A direção do vento predominante na região Norte é do quadrante Norte e Nordeste com velocidades mais frequentes sendo as de 5m.s^{-1} . Na região Sul, a direção do vento predominante é do quadrante Sudeste em praticamente todos os meses, especialmente de janeiro a março e de agosto a dezembro, com velocidades de 6m.s^{-1} as que mais ocorrem. E A densidade de potência de energia eólica anual disponível estima-se em 118.51W.m^{-2} para a região Norte e 152.04W.m^{-2} para a região Sul. As duas regiões apresentam velocidades médias moderadas para a geração da energia eólica e direções predominante de vento que podem maximizar a exploração da energia eólica. Destacando-se a região Sul com velocidades médias ligeiramente superiores em comparação com a região Norte. E embora ambas as regiões tenham um potencial eólico moderado, a região sul oferece uma maior consistência ao longo do ano, enquanto a região Norte possui picos significativos durante o inverno.

Palavras-chave: Costa Moçambicana, Velocidade do vento, Energia Eólica Offshore.

Abstract

The use of energy to accelerate human activity has been steadily increasing, particularly through the reliance on and consumption of non-renewable sources. This dependence has led to a range of consequences, most notably negative impacts on climate, thus encouraging the pursuit of clean and renewable energy alternatives. This study aims to assess the wind energy potential in the northern and southern regions of Mozambique, with a focus on analyzing the main characteristics of this resource. To achieve this, monthly wind speed and direction data from the ERA5 reanalysis by the ECMWF were obtained at a height of 10 meters, covering a 30-year period (from January 1993 to December 2022). The data were analyzed using statistical functions to compute monthly averages of wind speed and direction in both regions, along with a fit to the Weibull probability distribution. The results indicate that, in the northern region, higher average wind speeds are observed during the winter months (April to September), whereas the southern region exhibits a different pattern, with higher average wind speeds during the summer and, to a lesser extent, in winter. The predominant wind direction in the North is from the northern and northeastern quadrants, with the most frequent wind speeds around 5 m/s. In the South, the prevailing wind direction is from the southeast quadrant during nearly all months, especially from January to March and from August to December, with wind speeds of around 6 m/s being the most common. The estimated annual wind power density is 118.51 W/m² in the northern region and 152.04 W/m² in the southern region. Both regions exhibit moderate average wind speeds suitable for wind power generation, with dominant wind directions that can enhance the exploitation of wind energy. The southern region stands out with slightly higher average wind speeds compared to the north. While both regions possess moderate wind energy potential, the southern region offers greater consistency throughout the year, whereas the northern region displays significant peaks during the winter months.

Keywords: Mozambican Coast, Wind Speed, Offshore Wind Energy

Lista de Figuras

Figura 1: Modelo conceitual da circulação global atmosférica, indicando as células meridionais e as direções dos ventos próximos à superfície. Fonte: (Martins et al., 2008).	5
Figura 2: Exemplo de um histograma de velocidade do vento (Carneiro, 2014)	6
Figura 3: Representação de dados de direção e intensidade de velocidade do vento (Carneiro, 2014).....	7
Figura 4: Sensibilidade da forma da função de Weibull à variação de k (Fernandes, 2005).....	9
Figura 5: Parques eólicos instalados em Vinderby. Fonte (Castro, 2009).....	10
Figura 6: Evolução da Capacidade Eólica Offshore Acumulada no mundo. fonte (Ferreira E. M., 2019).....	11
Figura 7: O Mapa mostra a localização da área de estudo, na costa Moçambicana, ao longo do Canal de Moçambique. E áreas retangulares na costa de Moçambique indicam as regiões estudadas a Norte e Sul.	13
Figura 8: Comparação de Médias Julianas do Vento entre INAM e ERA5 no ano de 2022 em Quelimane (Latitude: -18.67° e Longitude: 36.67°).	19
Figura 9: Distribuição dos padrões do vento no canal de Moçambique no intervalo de 1993-2022 em todos os 12 meses.	21
Figura 11: Médias Julianas das velocidades do vento ao longo dos 30 anos na região Norte ($\sigma = 1.66\text{m.s}^{-1}$) e Sul ($\sigma = 0.73\text{m.s}^{-1}$) a 10 m de altura.....	22
Figura 12: <i>Distribuição mensal da intensidade e direção dos ventos na região Norte.</i>	24
Figura 13: <i>Distribuição mensal da intensidade e direção dos ventos na região Sul.</i>	25

Lista de Tabelas

Tabela 1: Informações específicas param dados ERA5.	7
Tabela 2: Densidade de potência de energia eólica Juliana e anual, disponível e a que pode ser gerada a 10m de altura na região Norte.....	26
Tabela 3: Densidade de potência de energia eólica Juliana e anual, disponível e a que pode ser gerada a 10m de altura na região Sul.	27

Lista de Abreviaturas

ECMWF	European Center for Medium-Term Weather Forecasts
ERA5	European Atmospheric Reanalysis
INAM	Instituto Nacional de Meteorologia
netCDF	Network Common Data Form
Pd	Potência Disponível
Pg	Potência geravel
K	Parâmetros de forma
C	escala
C _p	coeficiente de potência
V _m	velocidade média
°C	Graus Celsius
m.s ⁻¹	Metros por segundo
km/h	Quilômetros por hora
Kt	Knots
mm	Milímetros
E	Este
N	Norte
S	Sul
ENE	És-nordeste
ESE	És-sudeste
NE	Nordeste
NNE	Nor-nordeste
SE	Sudeste
SSE	Su-sudeste

Índice

Dedicatória	i
Agradecimentos.....	ii
Declaração de Honra	iii
Resumo.....	v
Abstract	vi
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas.....	vii
Lista de Abreviaturas	viii
CAPÍTULO I.....	1
1. Introdução	1
1.1. Problematização	2
1.2. Justificativa.....	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo Geral.....	3
1.3.2. Objetivos Específicos.....	3
CAPÍTULO II: Revisão de Literaturas	4
2. Circulação Geral da Atmosfera.....	4
2.1. Caracterização do vento.....	5
2.1.1. Histogramas de Velocidades do Vento	5
2.1.2. Rosa-dos-ventos	6
2.2. ECMWF ERA5.....	7
2.3. Modelagem estatística da velocidade do vento	7
2.3.1. Distribuição de Probabilidade de Weibull	8
2.4. Energia eólica Offshore	9
2.5.1. Densidade de Potência	11
CAPÍTULO III: Metodologia.....	13
3. Descrição da Área do Estudo	13

3.1.	Caracterização do Clima da Costa Moçambicana	13
3.2.	Materiais e Métodos	14
3.2.1.	Processamento e análise dos dados	14
3.2.2.	Extração e Controle da Qualidade.....	14
3.2.3.	Analises Estatísticas	15
3.2.3.1.	Velocidade e direção do Vento.....	15
3.2.3.2.	Média e Desvio-Padrão	15
3.2.3.3.	Distribuição de Probabilidade de Weibull.....	15
3.2.3.4.	Cálculo do Potencial Energético.....	16
3.2.4.	Validação dos dados	17
3.2.4.1.	Teste t de Student	17
3.2.4.2.	Erro Médio Absoluto (MAE)	18
3.2.4.3.	Coeficiente de Correlação de Person.....	18
CAPÍTULO IV: Resultados		19
4.	Resultados.....	19
4.1.	Validação dos dados	19
4.2.	Variabilidade dos ventos nas regiões offshore do Norte e Sul da Costa de Moçambique ..	20
4.2.1.	Padrões da velocidade média do vento nas regiões offshore Norte e Sul da Costa de Moçambique	22
4.3.2.	Padrões de ventos predominantes nas regiões offshore Norte e Sul da Costa de Moçambique	23
4.3.2.1.	Região Norte.....	23
4.3.2.2.	Região Sul.....	24
4.4.	Estimativa da Densidade de Potencial de Energia Eólica para as Regiões em Estudo através da Distribuição de Weibull a 10m de Altura.....	26
CAPITULO V: Discussão		28
5.	Discussão	28
5.1.	Validação dos Dados	28

5.2. Padrões de ventos predominantes nas regiões offshore do Norte e Sul da costa de Moçambique Sul.....	28
5.3. Potencial de energia eólica offshore disponível nas regiões offshore Norte e Sul da Costa de Moçambique	30
CAPÍTULO VI: Conclusões e Recomendações.....	31
6. Conclusões	31
8.1. Recomendações	32
7. Referencias.....	33

CAPÍTULO I

1. Introdução

Um desafio de significância global enfrentado por várias nações reside na conciliação entre o aumento da demanda energética e a mitigação dos danos ambientais, cujas repercussões incluem alterações climáticas que impactam nas características ambientais do planeta (Costa & Nunes, 2020). Diante desse cenário, o processo de transformação pelo qual passa o setor energético mundial está orientado para a adoção de soluções sustentáveis, que envolvam a crescente participação de fontes limpas e renováveis (Cruz, 2017).

Conforme GWEC (2019), a África gerava cerca de 81% da sua energia a partir de fontes térmicas, com apenas 1% proveniente do vento. Esta dependência excessiva dos combustíveis fósseis torna os fatores de produção de eletricidade, como o petróleo e o gás, suscetíveis aos aumentos globais dos preços das matérias-primas (Letcher, 2017). Todavia, há uma tendência mundial em reduzir o consumo de combustíveis fósseis e aumentar o uso de fontes renováveis, substituindo-os na matriz energética de todo o mundo.

Quando se aborda a contribuição das energias renováveis para a questão energética tem se em conta energias como as energias solar, eólica, hídrica, geotérmica, entre outras. Para amenizar as mudanças climáticas e todas as implicações negativas que advém desse fenómeno torna-se urgente o uso de recursos energéticos alternativos e inesgotáveis não poluentes (Cunha e Onofrei, 2010). De entre várias formas de energias renováveis disponíveis há que ressaltar a energia eólica por ser esta uma das energias renováveis em destaque no panorama internacional (Stüker *et al.*, 2016).

Moçambique possui um vasto potencial energético e não se resume apenas ao carvão ou gás natural. Também existe uma grande diversidade de energias renováveis, desde rios com enorme caudal, ventos fortes e constantes junto ao mar e nas regiões altas do interior, sol ao longo de todo o território nacional, florestas, arrozais, palmares e áreas extensas e com condições ótimas para a produção de cana-de-açúcar, fontes termais com águas com elevadas temperaturas e todas estas fontes podem ser convertidas em energia (Salvador, 2014)

Cerca de 80% da procura energética é satisfeita pela biomassa tradicional, usadas para suprir as necessidades energéticas domésticas, embora uma parte do ramo comercial e industrial também use a biomassa tradicional para gerar calor. Como referência, Moçambique é um dos dez maiores produtores de carvão vegetal do mundo (Woollen *et al.*, citados por Fortes *et al.*, 2020).

Portanto, o presente trabalho tem como objeto de estudo a região Norte e Sul da costa de Moçambique em áreas Offshore (Oceânicas), buscando principalmente elucidar sobre o potencial da energia eólica disponível nestas duas regiões, levando em conta o comportamento dos ventos.

1.1. Problemática

A crescente demanda por fontes de energia sustentáveis e a necessidade de diversificação da matriz energética colocam Moçambique em uma posição de destaque devido à sua extensa linha costeira, onde maior parte da sua população se concentra, enfrentando escassez da disponibilidade elétrica e que abrange regiões com potencial para exploração eólica offshore (IEA, 2021; REN21, 2022). No entanto, apesar desse potencial, o desenvolvimento de projetos eólicos no país ainda é incipiente, especialmente nas áreas offshore, onde o conhecimento sobre as características dos ventos e sua variabilidade ao longo do ano permanece limitado.

Sem uma compreensão clara sobre a distribuição e o comportamento dos ventos nas áreas costeiras de Moçambique, é desafiador prever com precisão a capacidade de geração de energia eólica ao longo do tempo, o que compromete o planejamento de projetos para fornecer uma fonte de energia estável e confiável (Mason *et al.*, 2010).

Além disso, a ausência de estudos aprofundados e de medições contínuas específicas para as regiões offshore limita a capacidade de identificar períodos mais favoráveis para geração eólica e de estimar a viabilidade econômica dos projetos ao longo das diferentes estações do ano (Santos-Alamillos *et al.*, 2015). Dessa forma, surge a seguinte questão de pesquisa:

Qual é o potencial de geração da energia eólica disponível nas regiões offshore Norte e Sul da Costa de Moçambique?

1.2. Justificativa

A energia é um fator determinante para o desenvolvimento econômico e social ao fornecer apoio mecânico, térmico e elétrico às ações humanas (ANEEL, 2008). Similar aos demais países, nos últimos anos, o crescimento da economia moçambicana tem colocado pressão sobre a oferta de energia elétrica no país.

As regiões Norte e Sul da costa moçambicana apresentam condições geográficas e meteorológicas distintas, o que torna essencial uma avaliação precisa do potencial eólico nessas áreas para orientar investimentos e infraestrutura futuros (Manwell *et al.*, 2009).

Dai que, os conhecimentos das condições do vento, do ambiente marinho e de outros fatores relevantes, garantem que os futuros parques eólicos para exploração da energia eólica sejam construídos em locais que maximizem a produção de energia eólica e minimizem os riscos operacionais e os custos de manutenção a longo prazo. Pois as implantações de parques eólicos são muito caras, (Soukissian, 2013).

Ademais, com a identificação das melhores regiões para instalação de parques eólicos offshore em Moçambique, o estudo contribuirá para a otimização do retorno sobre o investimento a ser realizado e para a mitigação de potenciais impactos ambientais e sociais (Filho, 2011). Para além de promover o desenvolvimento sustentável da energia eólica offshore, uma fonte de energia limpa e renovável com potencial para desempenhar um papel significativo na transição para um futuro energético mais sustentável e resiliente.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

- Avaliar o potencial da energia eólica offshore nas regiões costeiras Norte e Sul de Moçambique

1.3.2. Objetivos Específicos

- Analisar a variabilidade dos ventos nas regiões offshore Norte e Sul da costa de Moçambique, num período de 30 anos (1993-2022).
- Identificar os padrões de vento (velocidade e direção) predominantes nas regiões offshore Norte e Sul da costa de Moçambique;
- Determinar o potencial de energia eólica offshore disponível nas regiões offshore Norte e Sul da costa de Moçambique.

CAPÍTULO II: Revisão de Literaturas

2. Circulação Geral da Atmosfera

O Sol é o grande motor da dinâmica da atmosfera e dos oceanos, por meio do aquecimento diferenciado da superfície terrestre que, em função da latitude e do movimento de rotação do planeta, as regiões equatoriais recebem mais energia solar do que as áreas polares, e que no Equador o calor ganho por radiação é maior que o calor perdido, enquanto o inverso ocorre nos polos. O excesso de calor é transportado do equador para os polos, enquanto o excesso de frio dos polos é trazido para as latitudes mais baixas, num movimento contínuo, que tende a manter certo equilíbrio em toda a atmosfera. Esse movimento da atmosfera é denominado Circulação Geral que é a dinâmica da movimentação das massas de ar em nível global. As células atmosféricas são conhecidas como célula de Hadley, célula de Ferrel e a célula Polar (Martins *et al.*, 2008).

A célula de Hadley ocorre nas zonas de baixas latitudes, ou seja, nas regiões localizadas entre a Linha do Equador e os Trópicos de Câncer e de Capricórnio. Ela se origina pelo aquecimento da região próxima à zona equatorial que promove a subida do ar e seu deslocamento em direção aos trópicos, região na qual resfriam e descem, e retornando ao Equador, onde o ciclo se reinicia (Martins, 2008).

A célula de Ferrel ocorre nas zonas de médias latitudes e caracteriza-se por um movimento dos ventos que ocorrem próximos à superfície em direção as áreas polares. Nesse processo, as massas de ar resfriam e sobem, retornando para o seu local de origem completando o ciclo (Teixeira, 2016).

A célula Polar ocorre nas zonas de altas latitudes, mais próximas aos polos. As massas de ar oriundas das outras células, ao chegarem aos polos, tornam-se carregadas de umidade e sofrem uma brusca queda de temperatura, dispersando-se para as regiões tropicais, o que provoca a ocorrência de fenômenos climáticos associados ao frio e à elevada umidade (INMET citada por Jardim *et al.*, 2016).

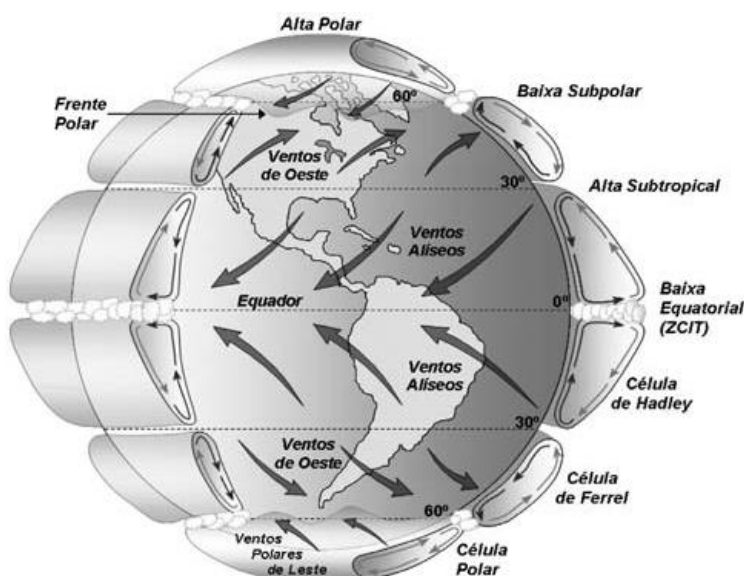


Figura 1: *Modelo conceitual da circulação global atmosférica, indicando as células meridionais e as direções dos ventos próximos à superfície.* Fonte: (Martins *et al.*, 2008).

2.1.Caracterização do vento

Segundo Custódio (2009), o vento é o ar em movimento, provocado pelo aquecimento desigual da Terra. De uma forma simplificada, o aquecimento da superfície através do Sol, de forma desigual, gera o deslocamento das camadas de ar, as quais se deslocam de uma zona de pressão para outra. Esse deslocamento das massas de ar originará a formação dos ventos.

Para a identificação dos ventos é necessário definir três parâmetros distintos: a direção, a velocidade e a frequência. A direção é medida em graus (de 0 a 360), no sentido horário, a partir do Norte. Por exemplo, se a direção predominante do vento é 45°, este indica a direção NE. O módulo de sua velocidade é expresso em m.s^{-1} , em km/h ou em kt. Portanto a partir desses dados são pilotados gráficos com a frequência do comportamento do vento para um determinado local, através de aparelhos chamados de anemômetro (Silva, 2011).

A energia proveniente de fontes eólicas é aquela em que a energia cinética do movimento dos ventos em contato com as pás do aerogerador, ocasiona o movimento delas, originando a energia mecânica que aciona o rotor do aerogerador produzindo energia elétrica (ANEEL, 2008).

Para a obtenção da energia eólica requer a existência de condições naturais específicas e favoráveis. A avaliação do potencial eólico de cada região requer análise e coleta de dados sobre a velocidade e o regime dos ventos. Uma das vantagens é poder operar os parques eólicos em sistema complementar com as usinas hidroelétricas, já que em períodos de estiagem, a velocidade costuma ser maior, garantindo assim, preservar a água dos reservatórios em períodos de poucas chuvas (ANEEL, 2008).

A velocidade do vento é considerada um critério de extrema importância na avaliação financeira de projetos eólicos, dado que a geração elétrica e o fator de capacidade são bastante dependentes dela (Hong e Möller citados por Silva, 2010; DECC, 2011; Ho *et al.*, 2018).

2.1.1. Histogramas de Velocidades do Vento

De acordo com Carneiro (2014), os histogramas de velocidade e direção do vento permitem resumir uma grande quantidade de informações presentes nessas séries. Os histogramas dividem os dados em classes ou intervalos de acordo com a frequência de ocorrência. Normalmente, o tamanho dessas classes é de 1 m.s^{-1} , reduzir o tamanho das classes não aumenta significativamente a precisão, enquanto aumentá-lo torna a análise muito imprecisa.

O que faz com que o uso de histogramas seja uma das maneiras mais práticas e populares de descrever os padrões de vento com base em dados de velocidade do vento. Esses histogramas podem ser combinados com métodos de estimativa da produção média de turbinas eólicas.

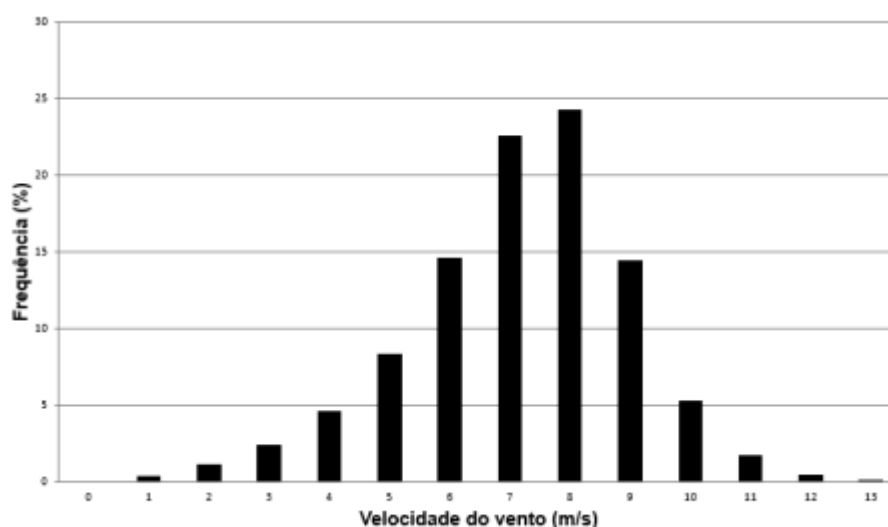


Figura 2: Exemplo de um histograma de velocidade do vento (Carneiro, 2014)

2.1.2. Rosa-dos-ventos

Segundo Fernandes (2005), assim como o histograma de velocidades, a rosa-dos-ventos é criada contando o número de ocorrências dentro de intervalos predefinidos de direção e normalizando pelo número total de ocorrências. Quando representada como um gráfico polar, a rosa-dos-ventos fornece uma visão rápida das direções predominantes do vento.

De acordo com Carneiro (2014), identificar a direção predominante do vento é crucial para determinar a posição das turbinas eólicas.

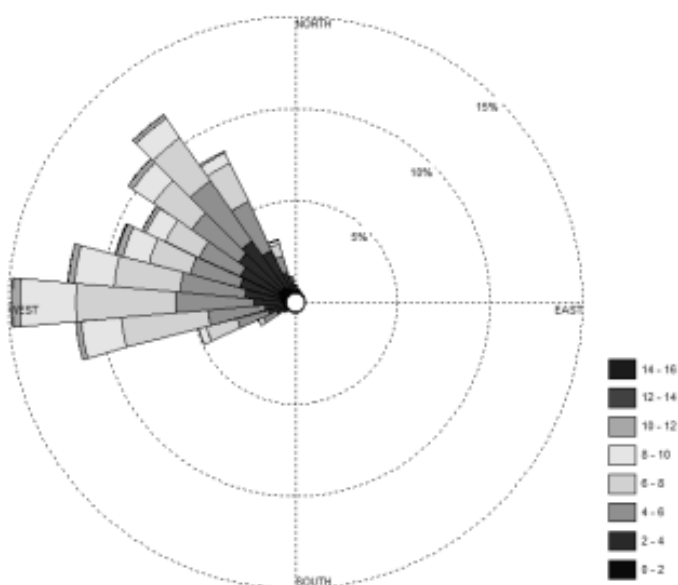


Figura 3: Representação de dados de direção e intensidade de velocidade do vento (Carneiro, 2014).

2.2. ECMWF ERA5

ERA5 (do Climate Data Store <https://cds.climate.copernicus.eu/>.) é a reanálise de quinta geração desenvolvida no ECMWF destinado a substituir o produto ERA-Interim (Olauson, 2018). Ele fornece estimativas horárias para uma grande quantidade de variáveis atmosféricas, de ondas oceânicas e de superfície terrestre (Molina et al, 2020). A série de dados ERA5 fornece dados horários em uma grade com resolução espacial de 0,25°, ou aproximadamente 30km, com campos de análise e previsão disponíveis a cada hora e o sistema de assimilação de dados utilizado para produzir o ERA5 é o IFS Cycle 41r2 4D-Var. Atualmente, o ERA5 cobre o período de 1979 até o presente (Letsch, 2022).

O primeiro lote do conjunto de dados ERA5, produzido pelo ECMWF, foi lançado em julho de 2017 e abrange o período de 2010 a 2016. Posteriormente, o ERA5 abrangerá 1950 até quase o tempo real (Olauson, 2018).

Tabela 1: Informações específicas param dados ERA5.

Tipo de dado	Cobertura Horizontal	Resolução Horizontal	Cobertura Vertical	Resolução Vertical	Cobertura Temporal	Resolução Temporal
Gradeado	Global	0,25° x 0,25°	1000 a 1hPa	37 Níveis	De 1959 até o momento	Horários

2.3. Modelagem estatística da velocidade do vento

Segundo Nunes (2012), o estágio final da avaliação de recursos eólicos envolve a análise e modelagem das séries observadas de velocidade do vento ajustando uma função de densidade de probabilidade. Depois de integrada, essa função fornece a distribuição acumulada, que descreve a probabilidade da velocidade do vento ser igual ou menor que um determinado valor.

Para a geração de energia elétrica, é crucial entender a probabilidade da velocidade do vento estar dentro de uma faixa específica, como entre 4 m/s e 25 m/s. Essa faixa é importante porque está dentro do intervalo em que muitas turbinas eólicas podem gerar eletricidade de forma eficiente (Nunes, 2012).

Fernandes (2005), diz que esta função é teoricamente definida por três parâmetros: o fator de escala, c , o fator de forma, k , e o fator de localização. Porém, para a maior parte dos regimes de vento, é tomada apenas os dois primeiros parâmetros como suficientes para a sua descrição.

São várias as distribuições de probabilidade utilizadas na modelagem de séries observadas de velocidade do vento. As mais usadas na indústria da energia eólica são:

- Distribuição de Weibull.
- Distribuição Normal ou Gaussiana;
- Distribuição de Rayleigh;
- Distribuição Normal Bivariada;
- Distribuição Exponencial;

Dalmaz (2007), Moreira (2010), e Carneiro (2014), sugerem a distribuição de Probabilidade de Weibull como a que mais representa a distribuição de velocidades do vento e suas características, assim como é uma ferramenta para a análise da potência e geração de energia.

2.3.1. Distribuição de Probabilidade de Weibull

A função de densidade de probabilidade de Weibull é a mais aplicada na modelagem de séries (distribuições) observadas de velocidade do vento que, em geral, se ajusta bem a esse tipo de fenômeno e, em especial, a distribuições de velocidade do vento observadas sob superfície oceânica (Pavia et al., 1986, cit. por Nunes, 2012). Essa função foi desenvolvida na década de 1930 pelo físico sueco Waloddi Weibull (Dalmaz, 2007).

A sua função densidade de probabilidade é dada pela seguinte expressão:

$$F(v) = \frac{k}{c} * \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} * e^{\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad \text{Equação 1.}$$

Onde $f(v)$ é a frequência de ocorrência da velocidade de vento; k é um parâmetro de forma (adimensional); c é o parâmetro de escala (m/s) e v é a velocidade média do vento (m/s).

A forma da função de Weibull geralmente está relacionada aos padrões de vento observados em áreas específicas. Uma grande parte dos padrões de vento conhecidos na Europa e na América do Norte são caracterizados por valores de k entre 1,8 e 2,5. Como uma aproximação geral, muitas vezes é usado o valor de k igual a 2 para descrever o padrão de ventos, deixando apenas o parâmetro livre o parâmetro A .

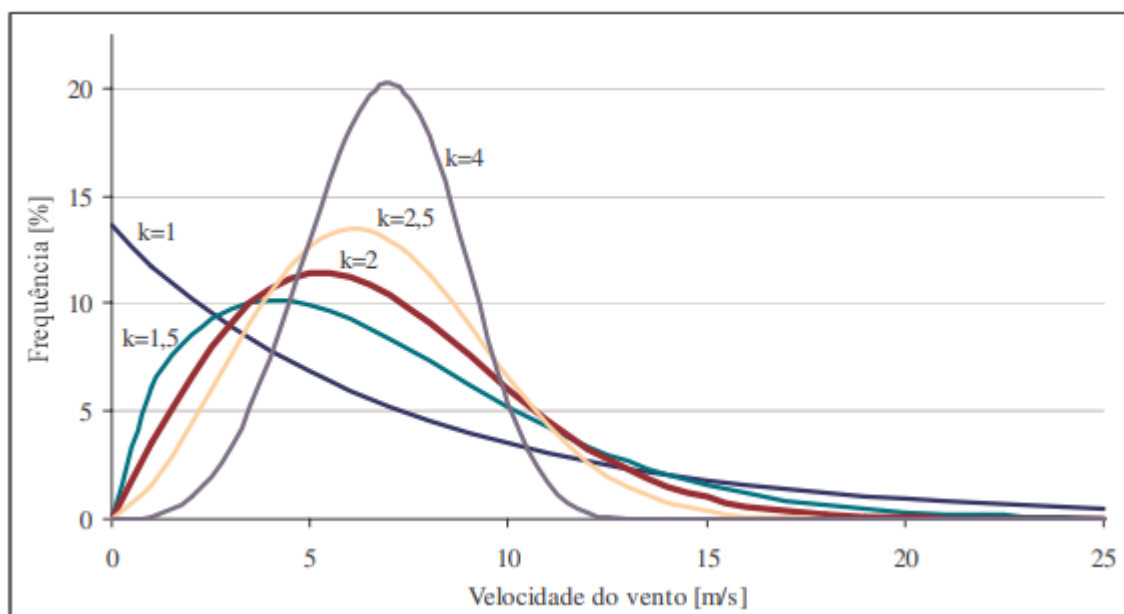


Figura 4: Sensibilidade da forma da função de Weibull à variação de k (Fernandes, 2005)

Dalmaz (2007), diz que o parâmetro de forma k está inversamente relacionado às variações na velocidade do vento. Quanto maior o valor de k , menor a turbulência e o desvio padrão, e mais concentrada é a distribuição de frequência. Analisar esse parâmetro ajuda a compreender a regularidade dos dados de vento em diferentes locais.

2.4. Energia eólica Offshore

Tuchenhagen (2019), explica que a geração de energia eólica offshore consiste no avanço da tecnologia mundial para a geração de energia renovável a serem implementados em grande escala. Tecnologia está que ainda está em desenvolvimento inicial mesmo nos países que já operam projetos de energia eólica offshore.

Para medidas offshore deve-se notar que o “terreno” não tem uma topografia bem definida, pois depende do grau de agitação do mar. Por isso, esta não é a maior influência sobre o vento, mas sim a rugosidade (Z_0), como descrito por (Manwell *et al.*, 2009). Estes autores observaram uma grande variação, dependendo do tipo de cobertura superficial, variando de 0,01 mm para superfícies lisas, como gelo, até 3000 mm para locais com edificações altas.

A superfície dos oceanos é muito lisa, e consequentemente a sua rugosidade é muito baixa, a rugosidade da superfície dos oceanos pertence à classe 0, a menor classe. A baixa rugosidade implicará em uma menor força de cisalhamento entre o vento e a superfície, resultando em uma maior velocidade do vento (Portella, 2007).

2.4.1. Panorama da Energia Eólica Offshore no Mundo

Castro (2009), evidenciou que a Dinamarca tem liderado a instalação offshore: o primeiro parque eólico deste tipo foi o de Vinderby, instalado em 1991, localizado no mar Báltico a cerca de 2 km da costa, constituído por 11 turbinas de 450 kW; em 2002 entrou em operação o parque de Horns Rev, com 160 MW instalados em 80 turbinas de 2 MW, localizadas entre 14 e 20 km de terra.



Figura 5: *Parques eólicos instalados em Vinderby.* Fonte (Castro, 2009)

De acordo com o relatório anual de energia eólica do Global Wind Energy Council (GWEC citada por Silva, 2019), a capacidade instalada offshore no mundo somou mais de 18,8 GW em 2017, distribuídos em 17 países. Pela Figura 5, a capacidade acumulada mais do que quadruplicou entre 2011 e 2017, com taxas anuais de incremento que apresentam uma tendência crescente. Apenas em 2017, foi instalado um número recorde de 4,3 GW de capacidade, em 8 países, representando um crescimento de 95% em relação ao incremento anual de 2016. A Figura 9 destaca os incrementos por país em 2017, bem como o ranking de capacidades acumuladas.

Além do crescimento em termos de capacidade, também vem ocorrendo a expansão para novos mercados, principalmente na América do Norte e na Ásia. Até o final de 2017, 84% da capacidade (15,8 GW) estava concentrada em 11 países da Europa, sendo 36% apenas no Reino Unido, seguido pela Alemanha, com 28,5%. A China ocupava o terceiro lugar do ranking, com uma capacidade equivalente a 15% da mundial. O outro 1% de capacidade fora da Europa se dividia entre Vietnã, Japão, Coreia do Sul, Taiwan e Estados Unidos (GWEC, 2018).

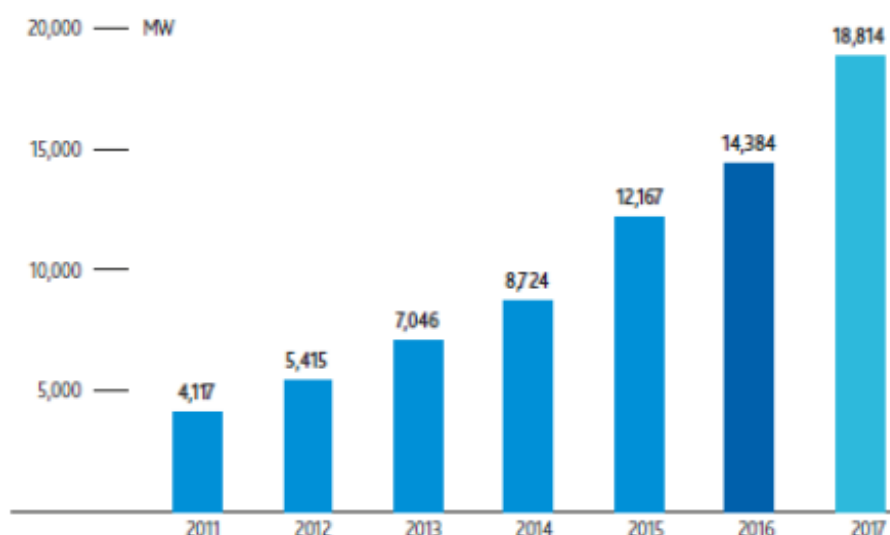


Figura 6: *Evolução da Capacidade Eólica Offshore Acumulada no mundo.* fonte (Ferreira E. M., 2019).

2.5.Caracterização do Potencial de Energia Eólica

Como evidenciado por Carneiro (2014), a variável mais importante para se fazer a avaliação do potencial eólico de uma região é a velocidade do vento. Ainda diz que o potencial eólico disponível esta em função do cubo desta velocidade; se a velocidade do vento dobrar, o potencial aumenta oito vezes. Por essa razão, é o regime dos ventos que determina se o aproveitamento da fonte eólica é atrativo ou não.

Com relação ao processamento e análise de dados de velocidade do vento, deve se analisar diferentes aspetos dos dados:

- Comportamento Anual, Semestral e Diário;
- Variabilidade;
- Frequências de Ocorrências;
- Intensidades de Turbulência;
- Direção predominante do vento;
- Frequências de Ocorrências da Direção;
- Análise Probabilística das séries.

2.5.1. Densidade de Potência

Uma forma de avaliação preliminar, o potencial eólico de uma determinada região é a partir da Densidade de Potência, que é uma maneira de se avaliar o local antes de definir informações dos aerogeradores a serem instalados. Essa análise é feita sem que se leve em consideração quaisquer

características do aerogerador a ser instalado, e sim exclusivamente a potência disponível no vento (Silva, 2011).

A energia contida no vento, ou seja, o fluxo de energia cinética média por unidade de área perpendicular ao escoamento é a densidade de potência. A densidade de potência é medida em $W.m^{-2}$.

Segundo Sansigolo (2005), a potência do vento é diretamente relacionada à sua velocidade por:

$$P_d = \frac{1}{2} * \rho * A * V^3 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

P_d = Potência Disponível (W)

ρ = Densidade do Ar

A = Área varrida pelas pás do rotor (m^2);

V = Velocidade do Vento ($m.s^{-1}$)

Em condições tropicais típicas, ou seja, ao nível médio do mar e, considerando, uma temperatura média de 25° C, a densidade do ar é aproximadamente $1,225 \text{ kg.m}^{-3}$, que normalmente é assumida como constante (Nunes, 2012).

CAPÍTULO III: Metodologia

3. Descrição da Área do Estudo

O estudo foi realizado na região Norte (nas latitudes -10S e -16S; longitudes 40E e 41E) e Sul (nas latitudes -20S e -25S; Longitudes 35E e 36E) da costa de Moçambique (Figura 10).

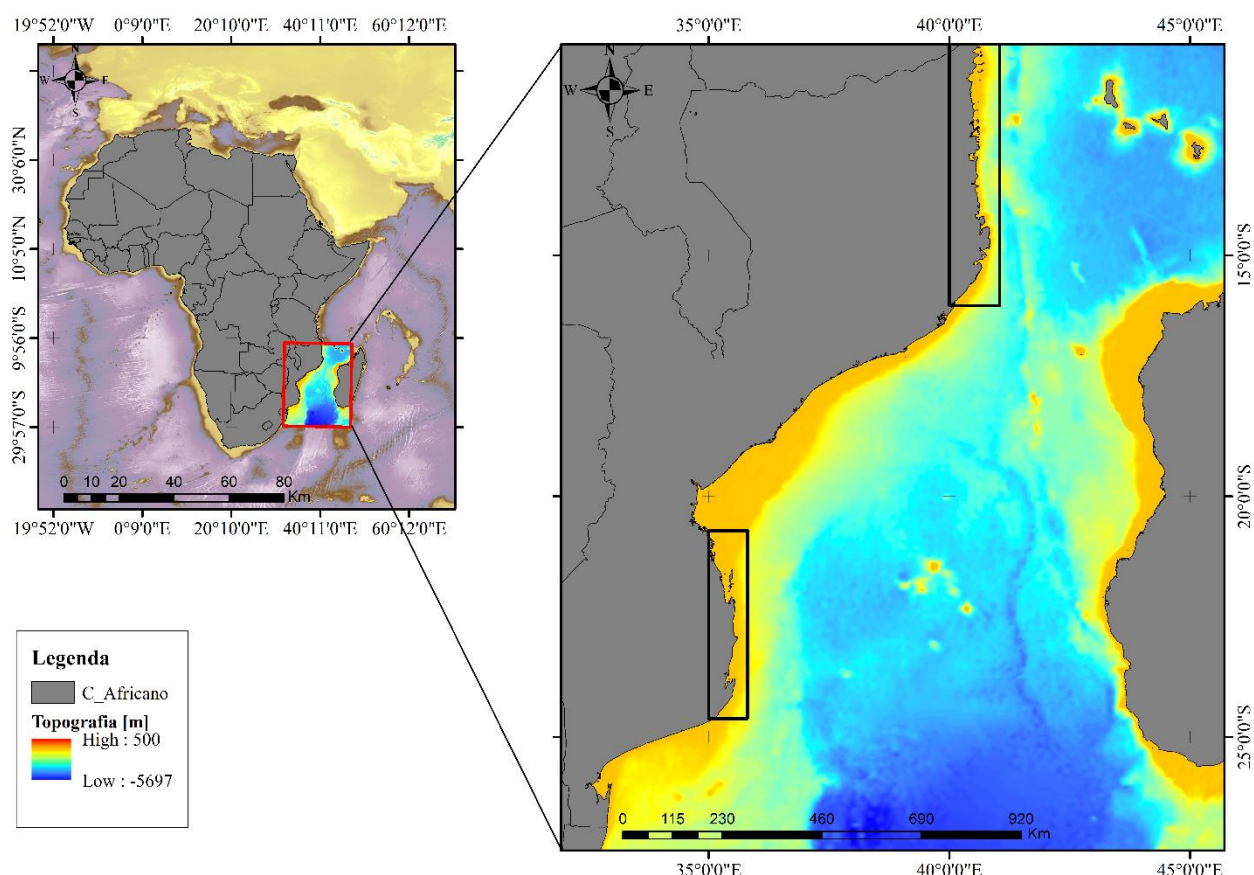


Figura 7: O Mapa mostra a localização da área de estudo, na costa Moçambicana, ao longo do Canal de Moçambique. E áreas retangulares na costa de Moçambique indicam as regiões estudadas a Norte e Sul.

3.1.Caracterização do Clima da Costa Moçambicana

Hoguane (2007), caracteriza o clima da costa de Moçambique como sendo tropical húmido com duas estações diferentes: a seca (ou de inverno) e húmida (ou de verão), com a precipitação média anual de cerca de 1200 mm que ocorre maioritariamente, entre os meses de novembro e abril. Caracteriza-se também pela temperatura média anual entre 22° e 24° C (Langa, 2007).

A circulação atmosférica é caracterizada por zonas de influência de baixas pressões equatoriais com ventos de monção de NE durante o verão, a norte do rio Zambezi e zona de circulação anticiclónica subtropical, a sul do rio Zambezi. A norte de Sofala e ao longo do rio Zambezi encontra-se a zona de transição (Saetre *et al.* citados por Hoguane, 2007). Os ventos na zona sul e central são predominantemente alísios de SE, e na zona norte são influenciados por um regime de monções com

ventos de NE, durante o verão e de SW, durante o inverno. A temperatura do ar atmosférico aumenta com a latitude e com a distância para o interior, sendo a temperatura média anual cerca de 23° C e 26° C, nas zonas costeiras da região sul e norte, respetivamente.

3.2. Materiais e Métodos

Neste trabalho foram utilizados dados de Vento em Componentes U e V obtidos a partir das reanálises do ERA5 da quinta geração do ECMWF, disponibilizados pelo *Climate Data Store* do Copernicus. Esses dados consistem em uma grade de pontos de resolução 0,25° (aproximadamente 30km), com campos de análise e previsão disponíveis a cada hora. No entanto para este trabalho foram utilizadas médias mensais nas componentes do vento, no período compreendido entre 1993-2022 na altura de 10m (correspondente a 30 anos) que em seguida foram realizados cálculos estatísticos para melhor compreender os padrões de vento, assim como, as velocidades médias, as frequências de ocorrências das velocidades totais e por fim determinar o potencial disponível nas regiões em estudo;

3.2.1. Processamento e análise dos dados

O processamento e análise dos dados de vento foi realizada no software Matlab, versão R2018a, seguindo as seguintes etapas:

1. Extração e controle da qualidade dos dados;
2. Análise dos dados usando funções para cálculos estatísticos das médias mensais da velocidade e direção do vento nas áreas selecionadas;
3. Ajuste da função de densidade de Probabilidade das distribuições das médias mensais da velocidade do vento nas regiões offshore do Norte e Sul da costa de Moçambique;
4. Elaboração dos mapas e gráficos;
5. Validação dos dados.

3.2.2. Extração e Controle da Qualidade

Fez-se a extração dos dados do vento do ERA5, na biblioteca NetCDF com recurso ao software Matlab, versão R2018a. Essa etapa incluiu também um controle de qualidade para saber se há valores ausentes, calculando o número total de valores presentes nas componentes das velocidades. Neste trabalho não foram encontrados dados ausentes, o que indica uma boa qualidade dos dados.

3.2.3. Análises Estatísticas

3.2.3.1. Velocidade e direção do Vento

Como o ERA5 fornece as componentes zonal (Este-Oeste, denotada por U) e meridional (Norte-Sul, denotada por V) do vento, foram utilizadas as equações 3 e 4 para obtenção da velocidade resultante (V) e da direção do vento (D) descritas por (Stüker *et al.*, 2016):

$$V = \sqrt{U^2 + V^2} \quad \text{Equação 3}$$

$$D = -\arctg\left(\frac{U}{V}\right) \quad \text{Equação 4}$$

De acordo com Machava (2015), para indicar as direções do vento é feita através dos ângulos pronunciados entre a direção do vento e o Norte Geográfico. Por exemplo, se o vento for originário de Norte, a sua direção será de 360°. Para fins de pesquisa divide-se a rosa-dos-ventos em 8, 12 ou 16 sectores para indicar a direção do vento. E neste estudo será usada a rosa-dos-ventos de 8 sectores, nomeadamente, Norte (N), Nordeste (NE), Este (E), Sudeste (SE), Sul (S), Sudoeste (SO), Oeste (O) e Noroeste (NO).

3.2.3.2. Média e Desvio-Padrão

Machava (2015), afirma que em uma análise estatística da velocidade do vento, os parâmetros mais úteis são a média e o desvio padrão. E a média (V_m) e o desvio padrão (σ) são determinadas pelas fórmulas seguintes:

$$V_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad \text{Equação 5}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - V_m)^2}{n}} \quad \text{Equação 6.}$$

Onde n é o número de dados e V_i é a velocidade de vento observada. O desvio-padrão indica-nos a variabilidade dos dados em torno da média.

3.2.3.3. Distribuição de Probabilidade de Weibull

Machava (2015), acrescenta que os registos da densidade de probabilidade para a posterior estimativa de potência ganham importância se forem descritos por expressões analíticas. Obtida através da equação (1) descrita anteriormente na fórmula da secção 2.4.1.

Semelhante ao Castro (2012), nesta pesquisa os parâmetros forma e de escala foram determinadas através do método da Máxima verossimilhança.

Como evidenciado por Lins (2021), o método da máxima verossimilhança (Maximum Likelihood Estimation - MLE), como estimativa para os parâmetros de Weibull, foi proposto por Stevens e Smulders (1979). O objetivo do método é encontrar valores de parâmetros que maximizem a função de verossimilhança logarítmica dos dados observados, ou seja, os valores que melhor representem os dados. As estimativas são obtidas através das equações 7 e 8:

$$\frac{\partial \ln L(k, c)}{\partial k} = 0 \quad \text{Equação 7.}$$

$$\frac{\partial \ln L(k, c)}{\partial c} = 0 \quad \text{Equação 8.}$$

Onde $\ln L(k, c) = \ln f(v)$ e $f(v)$ é a função densidade probabilidade da distribuição.

Conforme Manwell *et al.* (2009) e Burton *et al.* citados por Nunes (2012), os valores elevados de k , para um determinado valor de c , significam distribuições da velocidade de vento menos dispersas (mais estreitas), isto é, menores são as flutuações de velocidade dos ventos observados. No contexto dos ventos Alísios, ao ajustar as distribuições de Weibull às observações das médias horárias, é possível estimar valores de k que geralmente variam de 2,5 a 3. Esses valores sugerem que há uma concentração maior das observações em torno da média, o que indica a presença de regimes de vento mais constantes. Por outro lado, valores de k mais baixos, geralmente entre 1,5 e 2, indicam uma maior variabilidade em relação à média.

3.2.3.4. Cálculo do Potencial Energético

Como dito por Nunes (2012), acrescentando-se o coeficiente de potência (C_p) à equação 2, utilizada para determinar a densidade de potência disponível, é possível obter uma estimativa simples do potencial energético a ser gerado com a instalação de uma turbina eólica, por meio da seguinte expressão matemática:

$$P_e = \frac{1}{2} * \rho * V^3 * A * C_p \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

$$\rho = 1,225 \text{ kg.m}^{-3}$$

V = Velocidade média do vento (m.s^{-1})

$$A \approx 21,799 \text{ m}^2$$

$$C_p = 0,50$$

A área do rotor (A) considerada é relativa à área varrida pelo rotor da turbina Siemens Gamesa SG 8.0-167 DD.

3.2.4. Validação dos dados

Para fazer a validação dos dados do ERA5 foi necessário extrair dados da velocidade média mensal do ano 2022 e converter no formato csv, visto que os dados fornecidos pelo INAM são mensais e apenas do ano 2022 de Quelimane. De seguida foram plotados gráficos para comparar as velocidades médias mensais entre os dois conjuntos e ver se há diferenças significativas. E por fim foram aplicados 3 testes estatísticos, sendo eles:

3.2.4.1. Teste t de Student

Segundo Gomez citado por Oliveira (2008), o teste t é usado para comparar médias, onde duas médias A e B obtidas de grupos experimentais com r_A e r_B observações respetivamente podem ser comparadas pela relação:

$$t = \frac{A - B}{\frac{S_e^2}{r_A} + \frac{S_e^2}{r_B}} \quad \text{Equação 10}$$

Onde, S_e^2 é a variância do resíduo estimado pela análise de variância.

As médias comparadas por este teste serão diferentes estatisticamente se o valor calculado de t for maior que aquele tabelado segundo os graus de liberdade do erro (Sampaio citado por Oliveira, 2008).

O valor da diferença mínima significativa é determinado pela seguinte equação:

$$DMS = t_\alpha \sqrt{\frac{S_e^2 + S_e^2}{A + B}} \quad \text{Equação 11}$$

Onde $\alpha = 0.05$

A DMS indica o menor valor de diferença entre duas médias que é estatisticamente significativo, ou seja, que pode ser considerado como uma diferença real entre as populações ou fontes de dados.

3.2.4.2. Erro Médio Absoluto (MAE)

O MAE é uma medida de erro absoluto que leva em conta a quantidade total de observações ou previsões, portanto, é expresso nessa mesma unidade de medida; logo, sua principal limitação é que ele não permite a análise comparativa de modelos com unidades de medida diferentes, e ainda, tende a penalizar mais previsões com erros maiores (Carmo e Silva, 2023).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_1 - Y_2|$$

Equação 12

Y_1 = valor da variável analisada;

Y_2 = valor previsto para a variável analisada com base em um modelo;

n = quantidade total de observações referentes a Y_1 e/ou Y_2 ; e;

i = cada observação específica de Y_1 e/ou Y_2 .

3.2.4.3. Coeficiente de Correlação de Person

Filho e Júnior (2009), definem como sendo uma medida de associação bivariada (força) do grau de relacionamento entre duas variáveis. Para Moore (2007), a correlação mensura a direção e o grau da relação linear entre duas variáveis quantitativas. Sua fórmula é a seguinte:

$$r = \frac{1}{n-1} \sum \left(\frac{Xi - Xx}{Sx} \right) \left(\frac{Yi - Yy}{Sy} \right)$$

Equação 13

O coeficiente de correlação Pearson (r) varia de -1 a 1. O sinal indica direção positiva ou negativa do relacionamento e o valor sugere a força da relação entre as variáveis. Uma correlação perfeita (-1 ou 1) indica que o escore de uma variável pode ser determinado exatamente ao se saber o escore da outra. No outro oposto, uma correlação de valor zero indica que não há relação linear entre as variáveis (Filho & Júnior, 2009).

Valores extremos (0 ou 1) dificilmente são encontrados na prática.

CAPÍTULO IV: Resultados

4. Resultados

Os resultados apresentados neste capítulo, são referentes aos processamentos feitos nos dados do vento nas componentes, componentes zonais (direção Este-Oeste) e meridional (direção Norte-Sul), respetivamente, onde se obteve a velocidade total do vento e também a sua validação usando dados do INAM.

4.1. Validação dos dados

A Figura 11 ilustra a comparação entre as séries temporais das velocidades do vento obtidas pelo ERA5 e INAM. Essa comparação revela um padrão de variação semelhante entre ambos os conjuntos de dados, indicando que, apesar das diferenças de magnitude, eles capturam a mesma tendência temporal. Notavelmente, os dados do ERA5 apresentaram intensidades duas vezes maiores que os do INAM, o que levanta questões sobre a resolução espacial e a capacidade do modelo ERA5 em simular com precisão a dinâmica dos ventos em áreas continentais.

O erro médio absoluto de 0.7862 m/s sugere que, embora haja um desvio significativo nas previsões do ERA5 em relação aos dados observados, o modelo ainda pode fornecer uma estimativa útil das tendências gerais de vento, principalmente para análises de longo prazo. O valor de p de 0,0415 indica que a diferença nas médias das velocidades do vento é estatisticamente significativa. A Diferença Mínima Significativa de 0,6920 m/s reforça a relevância estatística das diferenças observadas, sugerindo que ajustes nos dados do ERA5 podem ser necessários para melhorar sua precisão nas previsões de vento em Moçambique.

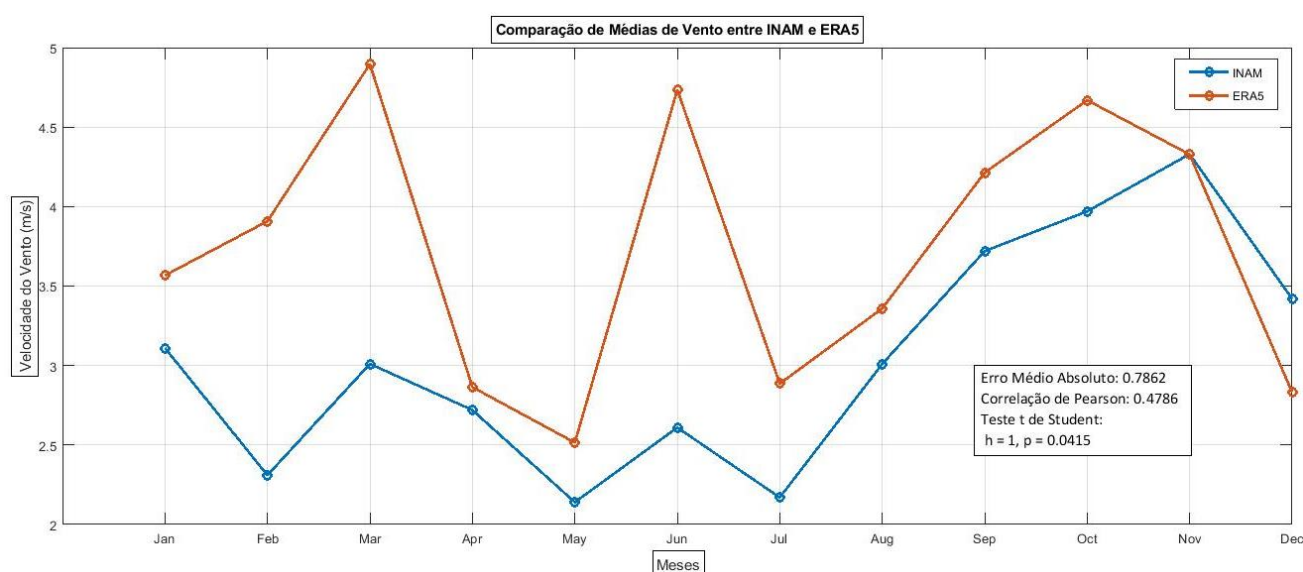


Figura 8: Comparação de Médias Julianas do Vento entre INAM (Latitude: -17.88° e Longitude: 36.88°) e ERA5 (Latitude: -17.88° e Longitude: 37.10°) no ano de 2022.

4.2. Variabilidade dos ventos nas regiões offshore do Norte e Sul da Costa de Moçambique

De forma a compreender a distribuição do vento foram observados todos os meses (de janeiro a dezembro) no Canal de Moçambique, com objetivo essencial de perceber essa variabilidade nas faixas mais próximas a costa Moçambicana onde as profundidades são menores.

Na região Norte, as distribuições dos ventos ao longo dos anos destacam a predominância de ventos de Nordeste e Sudeste, mostrando uma variação sazonal das direções com ventos do Nordeste nos meses de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro, e com ventos do Sudeste nos meses de abril a setembro. As velocidades dos ventos próximos a costa nesta região mostra-se mais intensas em relação a outras regiões chegando a até aproximadamente 6m.s^{-1} principalmente nas regiões offshore mais próximas a costa de Cabo Delgado e Norte de Nampula.

Na região Sul predominam ventos do Sudeste, com velocidades baixas nos meses de maio a setembro, mas os meses de outubro a dezembro e janeiro a abril destacam-se aumentos na velocidade do vento chegando a aproximadamente 6m.s^{-1} .

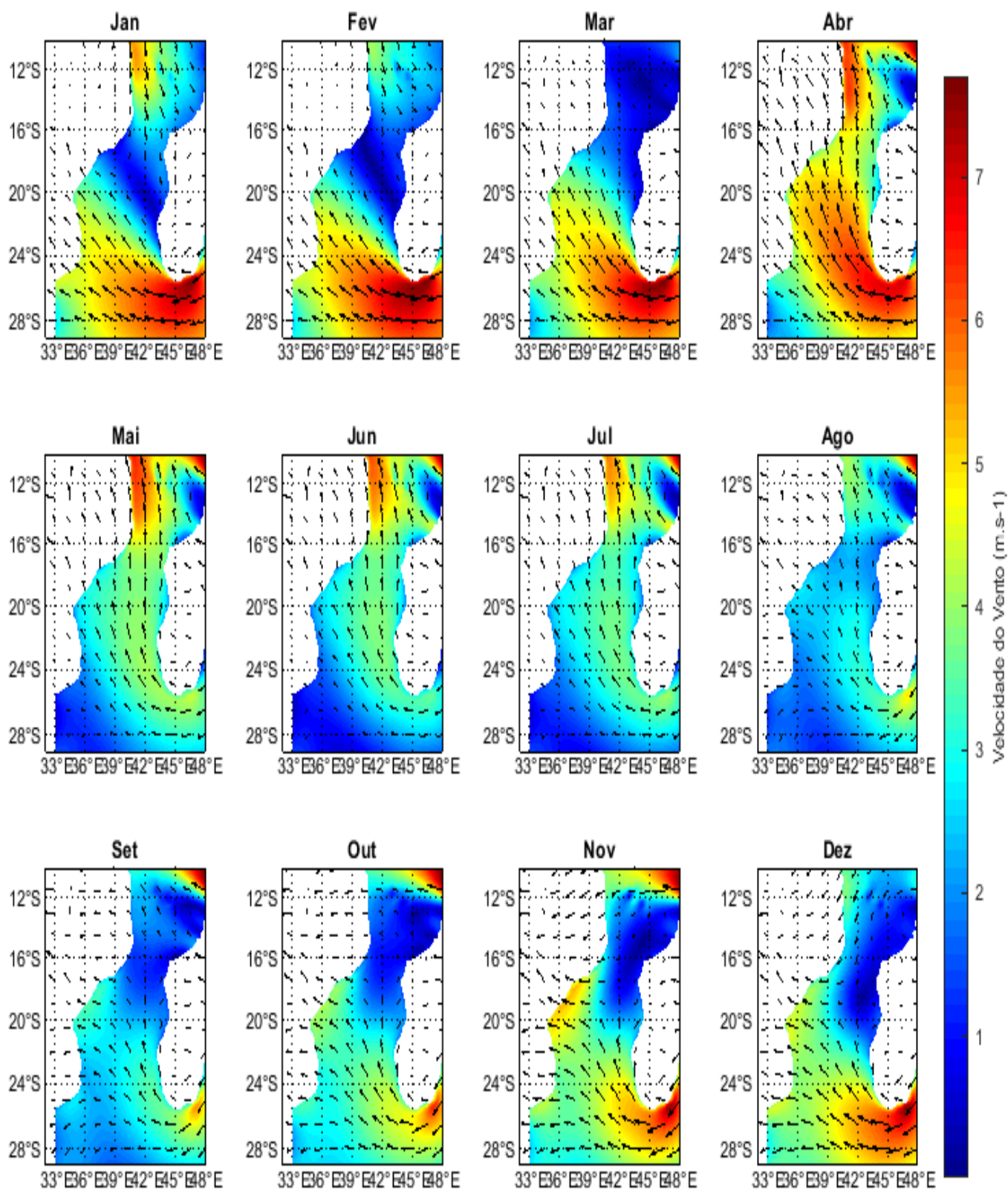


Figura 9: Distribuição dos padrões do vento no canal de Moçambique no intervalo de 1993-2022 em todos os 12 meses.

4.2.1. Padrões da velocidade média do vento nas regiões offshore Norte e Sul da Costa de Moçambique

A Figura 11, apresenta a variação das velocidades médias do vento ao longo dos 12 meses do ano, num período de 30 anos. Analisando o padrão de variabilidade, verifica-se um comportamento oposto nas intensidades de velocidade entre as regiões Norte e Sul. No Norte, registam-se velocidades médias mais elevadas durante o inverno, nos meses de abril a agosto, e valores mais baixos nos restantes meses do ano. Na região Sul, as velocidades médias são mais elevadas no verão.

As velocidades máximas na região Norte atingem cerca de 6.7m.s^{-1} em junho e julho, com o valor mínimo a situar-se em aproximadamente 3.8m.s^{-1} em março. No Sul, o valor máximo registado foi de cerca de 6.5m.s^{-1} em fevereiro, enquanto o valor mínimo foi de aproximadamente 5.4 m.s^{-1} em maio.

De modo geral, a região Norte apresentou maior variabilidade nas velocidades, com valores entre aproximadamente 3.8m.s^{-1} e $6,7\text{m.s}^{-1}$ (amplitude de cerca de 2.9m.s^{-1}) e um desvio padrão de $1,66\text{ m.s}^{-1}$. Na região Sul, a variabilidade foi menor, com uma amplitude de cerca de 1.1 m.s^{-1} (valores entre 5.4m.s^{-1} e $6,5\text{ m.s}^{-1}$) e desvio padrão de $0,73\text{ m.s}^{-1}$.

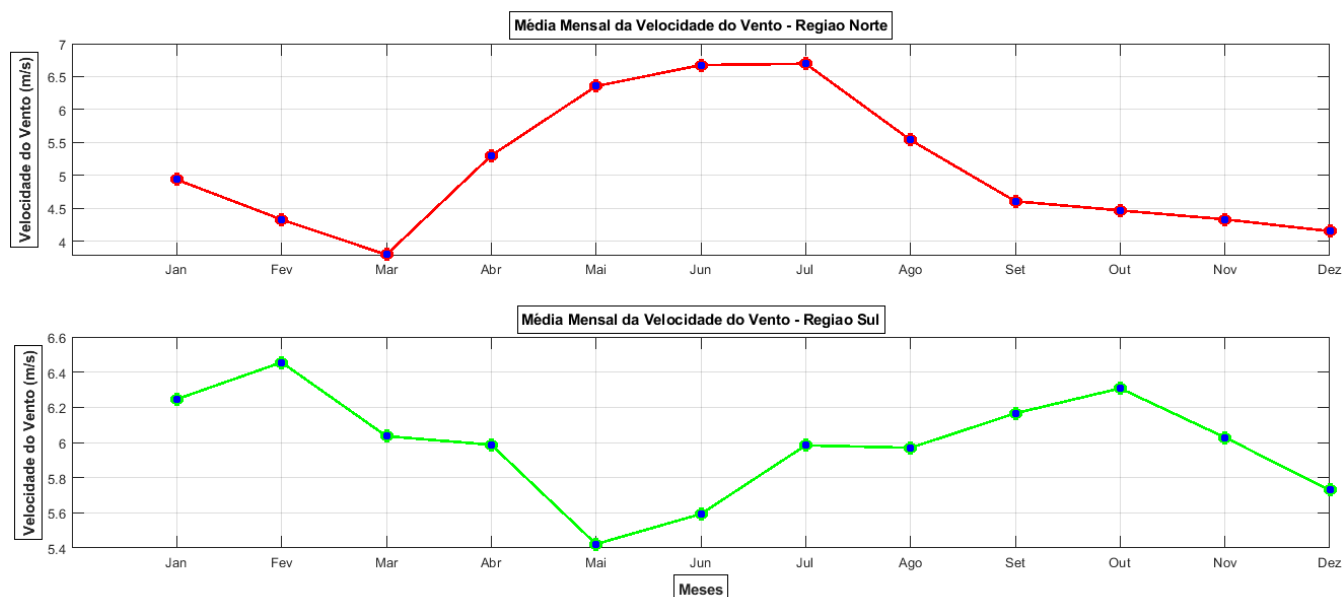


Figura 10: Médias Julianas das velocidades do vento ao longo dos 30 anos na região Norte ($\sigma = 1.66\text{m.s}^{-1}$) e Sul ($\sigma = 0.73\text{m.s}^{-1}$) a 10 m de altura.

4.3.2. Padrões de ventos predominantes nas regiões offshore Norte e Sul da Costa de Moçambique

As figuras 13, 14 e 15, ilustram a intensidade e direção dos ventos na região offshore na região Norte e Sul da costa de Moçambique. As figuras foram produzidas com base nos dados do vento em componentes U e V a 10 m de altura.

4.3.2.1. Região Norte

Na região Norte da costa de Moçambique, os ventos apresentam uma variação sazonal tanto na direção quanto na intensidade ao longo do ano. De janeiro a março, direção predominante é do quadrante NNE (norte-nordeste), com cerca de 72%. Em janeiro, os ventos mais frequentes atingem velocidades de 7m.s^{-1} , enquanto os de 2m.s^{-1} são os menos frequentes. Em fevereiro, as velocidades mais frequentes são as de 6m.s^{-1} , com as velocidades de 2m.s^{-1} sendo os menos frequentes. No mês de março, as velocidades mais frequentes são de 6m.s^{-1} , e os ventos de 1m.s^{-1} são os menos frequentes.

Em abril, os ventos predominantes continuam do quadrante NNE e NE (nordeste), com cerca de 45%. Os ventos mais frequentes na direção NNE são as de 2m.s^{-2} , enquanto no quadrante NE os ventos predominam com velocidades de 6m.s^{-1} e ventos de 1m.s^{-1} são os menos frequentes.

Nos meses de maio e junho, os ventos predominantes são do quadrante N, com cerca de 72%, sendo as velocidades de 6m.s^{-1} as mais frequentes, enquanto os ventos de 1m.s^{-1} são os menos frequentes. Em julho, os ventos ainda são predominantes do quadrante Norte (cerca de 50%), com velocidades mais frequentes de 5m.s^{-1} . Em agosto, os ventos mudam para o quadrante NW (noroeste), com cerca de 50%. Neste mês, ventos de 2m.s^{-1} são os mais frequentes, enquanto os de 6m.s^{-1} são menos comuns.

No mês de setembro, há uma variação entre ventos predominantes do quadrante ENE (és-nordeste), com cerca de 48% com velocidades mais frequentes de 3m.s^{-1} , e os de 1m.s^{-1} são os menos frequentes. Em outubro, os ventos predominantes são os do quadrante E, com velocidades mais frequentes de 6m.s^{-1} , e os do quadrante ESE (és-sudeste), onde os ventos de 3m.s^{-1} são mais frequentes.

Em novembro, os ventos predominantes são do quadrante ESE, com cerca de 40%, sendo os ventos de 5m.s^{-1} os mais frequentes. Em dezembro, os ventos continuam predominantes do ESE, com ventos de 3m.s^{-1} sendo os mais frequentes.

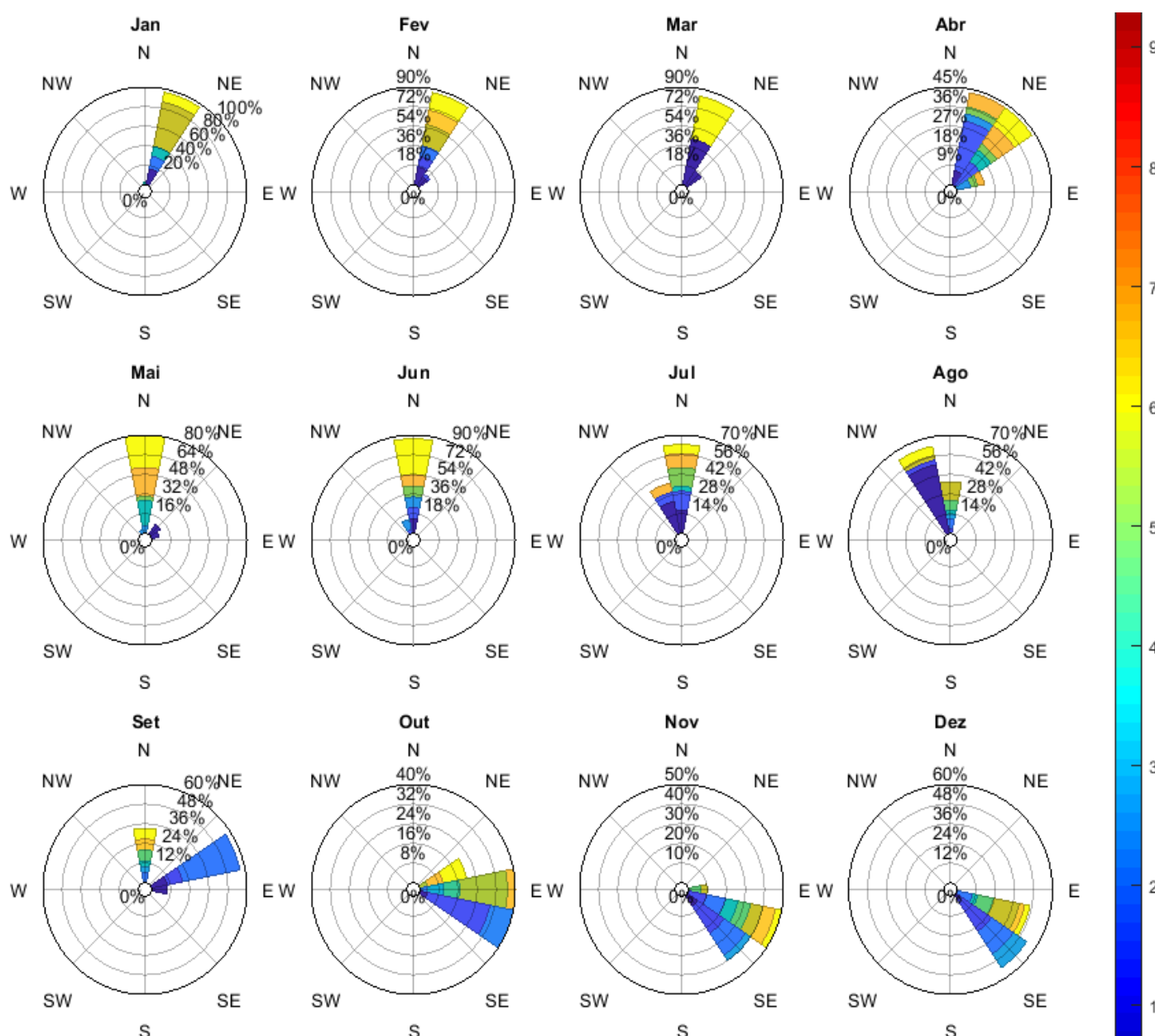


Figura 11: Distribuição mensal da intensidade e direção dos ventos na região Norte.

4.3.2.2. Região Sul

Na região Sul, de janeiro a março, os ventos predominantes são do quadrante ESE (és-sudeste), com cerca de 80%. Em janeiro, as velocidades mais frequentes são de 5m.s^{-1} , enquanto ventos de 1m.s^{-1} são os menos frequentes. Em fevereiro, os ventos de 5m.s^{-1} são os mais frequentes. Em março, a velocidade mais frequente dos ventos são de 6m.s^{-1} , com ventos de 1m.s^{-1} sendo os menos frequentes.

Em abril, os ventos predominantes são do quadrante leste (E), com cerca de 40%, sendo as velocidades de 6m.s^{-1} as mais frequentes, enquanto os ventos de 4m.s^{-1} são os menos frequentes. De maio a julho, os ventos predominam do quadrante SSE (su-sudeste), com cerca de 64%. Em maio,

os ventos de 2m.s^{-1} são os mais frequentes, enquanto em junho e julho, as velocidades mais frequentes são de 5m.s^{-1} e 6m.s^{-1} .

Nos meses de agosto, setembro, outubro e dezembro, os ventos predominantes são do quadrante SE (sudeste), com cerca de 80%. Durante setembro, outubro e dezembro, os ventos mais frequentes são de 5m.s^{-1} , enquanto ventos de 1m.s^{-1} são menos frequentes. Em novembro, as velocidades mais frequentes são de 5m.s^{-1} e 6m.s^{-1} .

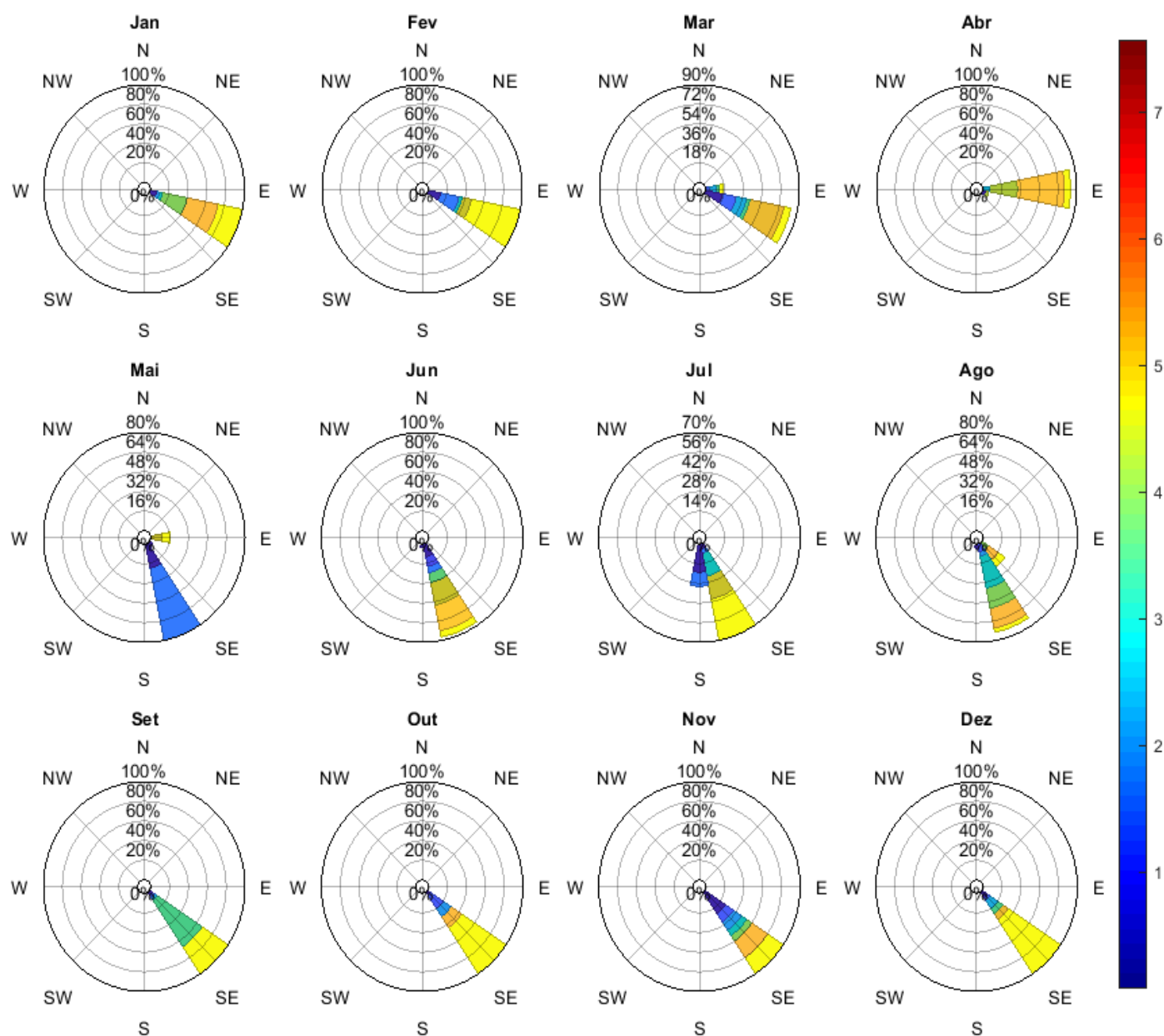


Figura 12: Distribuição mensal da intensidade e direção dos ventos na região Sul.

4.4. Estimativa da Densidade de Potencial de Energia Eólica para as Regiões em Estudo através da Distribuição de Weibull a 10m de Altura.

Os resultados nas tabelas 5 e 6 são referentes a densidade de potencial de energia eólica disponível e que pode ser gerada pela turbina Gamesa SG 8.0-167 DD, potencial esse que foi estimado para cada região em cada mês e determinada a média Juliana e anual.

Tabela 2: Densidade de potência de energia eólica Juliana e anual, disponível e a que pode ser gerada a 10m de altura na região Norte.

Meses	$V_m (m.s^{-1})$	$\sigma (m.s^{-1})$	k	c (m.s ⁻¹)	Pd (W.m ⁻²)	Pg (W.m ⁻²)
Jan	4.93	1.55	3.62	5.48	100.78	60.47
Fev	4.32	1.37	3.52	4.81	68.15	40.89
Mar	3.79	1.02	4.23	4.17	44.40	26.64
Abr	5.29	1.41	4.51	5.82	120.72	72.43
Mai	6.35	1.67	4.83	6.96	206.48	123.89
Jun	6.67	1.74	4.93	7.31	239.22	143.53
Jul	6.69	1.73	4.89	7.33	241.19	144.71
Ago	5.53	1.38	4.87	6.05	135.62	81.37
Set	4.60	1.03	5.18	5.01	77.01	46.21
Out	4.46	0.94	5.51	4.84	61.76	37.06
Nov	4.33	0.85	6.22	4.67	69.44	41.66
Dez	4.15	1.03	4.85	4.54	57.31	34.39
Anual	5.09	1.31	4.88	5.58	118.51	71,10

A densidade de potência da energia eólica disponível nesta região, apresenta uma variação mensal significativa. Em março, a densidade de potência é relativamente baixa, com um valor de 44.40W.m⁻². No entanto, em julho, a densidade de potência atinge o pico de 241.19W.m⁻¹. Ao longo do ano, a densidade média de potência eólica disponível na região é de 118.51W.m⁻².

Similar ao potencial eólico, à energia eólica que pode ser gerada, também apresenta a mesma variação mensal. Em março, a densidade de potência é de 26.64W.m⁻², enquanto em julho, este valor aumenta para 144.71W.m⁻². A densidade média anual de potência eólica que pode ser gerada na região é de 71.10W.m⁻².

Tabela 3: Densidade de potência de energia eólica Juliana e anual, disponível e a que pode ser gerada a 10m de altura na região Sul.

Meses	V_m (m.s ⁻¹)	σ (m.s ⁻¹)	k	c (m.s ⁻¹)	Pd (W.m ⁻²)	Pg (W.m ⁻²)
Jan	6.24	0.82	7.75	6.60	176.06	105.63
Fev	6.45	0.77	8.50	6.80	182.55	109.53
Mar	6.03	0.68	10.25	6.33	155.33	93.19
Abr	5.98	0.62	11.51	6.25	149.51	89.71
Mai	5.42	0.68	8.92	5.72	116..42	69.85
Jun	5.59	0.66	9.08	5.88	124.50	74.70
Jul	5.98	0.74	9.11	6.30	153.13	91.88
Ago	5.96	0.65	10.26	6.26	150.23	90.14
Set	6.16	0.64	10.53	6.45	164.33	98.59
Out	6.30	0.60	12.50	6.57	173.68	104.21
Nov	6.02	0.54	11.36	6.27	150.98	90.59
Dez	5.72	0.46	13.82	5.93	127.70	76.62
Anual	5.42	1.33	10.29	6.28	152.04	91,22

Nesta região, a densidade de potência da energia eólica disponível apresenta uma baixa variação mensal. maio, apresenta a densidade de potência disponível mínima de 116.42W.m⁻² e apresenta a máxima de 182.55W.m⁻² em fevereiro. A densidade média anual de potência eólica disponível na região Sul é de 152.04W.m⁻².

Quanto à energia eólica que pode ser efetivamente gerada na região Sul, observa-se uma densidade de potência de 69.85W.m⁻² em maio, aumentando para 109.53W.m⁻² em fevereiro. A densidade média anual de potência eólica que pode ser gerada na região Sul é de 91.22W.m⁻².

5. Discussão

5.1. Validação dos Dados

O ERA5 é amplamente reconhecido na literatura como uma fonte de dados de reanálise de alta confiabilidade, especialmente para aplicações em ambientes marítimos, devido à sua elevada resolução temporal e espacial e sua capacidade de integrar observações diversas em modelos numéricos (Hersbach et al., 2020).

A discrepância significativa nas magnitudes das velocidades registradas, com o ERA5 apresentando valores aproximadamente duas vezes superiores aos das medições terrestres do INAM de Quelimane deve-se ao facto de que, em ambientes offshore, a ausência de obstáculos físicos, o menor atrito da superfície e uma estrutura atmosférica mais homogênea favorecem velocidades de vento mais elevadas em comparação ao ambiente terrestre (Pryor, Barthelmie, & Shepherd, 2020).

Assim, a divergência identificada não compromete a confiabilidade dos resultados do presente estudo. Pelo contrário, reforça a adequação do uso do ERA5 para a caracterização do regime de ventos offshore, confirmando sua validade para suportar análises de potencial energético e dimensionamentos preliminares de empreendimentos eólicos marítimos. (Hersbach et al., 2020; Pryor, Barthelmie, & Shepherd, 2020).

5.2. Padrões de ventos predominantes nas regiões offshore do Norte e Sul da costa de Moçambique Sul

A análise da variação das velocidades médias do vento ao longo dos anos nas regiões Norte e Sul de Moçambique revela padrões climáticos distintos que são influenciados por fatores geográficos e atmosféricos específicos. Na região Norte, as velocidades médias elevadas observadas durante os meses de inverno, entre abril e setembro, estão associadas a sistemas de alta pressão que predominam nesta época do ano. Estes sistemas são frequentemente responsáveis pela intensificação dos ventos provenientes do quadrante Norte, um padrão que se alinha com o que é descrito por Ferreira *et al.* (2020), que destacam a influência da circulação atmosférica nas regiões tropicais e a relação com a intensidade e a direção do vento.

Por outro lado, a região Sul apresenta um padrão diferente, com velocidades médias mais elevadas durante o verão e, em menor grau, durante o inverno. Estudos de Abiodun *et al.* (2016) indicam que a circulação do vento em regiões subtropicais é caracterizada por uma maior consistência direcional, muitas vezes resultando em ventos predominantes do quadrante Sul. Esta constância pode ser atribuída a uma interação mais estável entre os sistemas de pressão atmosférica e os padrões de circulação oceânica.

As mudanças de direção do vento observadas no Norte, especialmente nos meses de transição como janeiro e setembro, refletem a dinâmica atmosférica complexa que caracteriza a região tropical. Como afirmado por Vigaud *et al.* (2018), as flutuações na posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a migração sazonal dos ventos são fundamentais para entender essas variações. A ZCIT é um importante motor de variação climática na região, afetando diretamente a direção e a intensidade dos ventos.

A análise sazonal das direções e intensidades dos ventos na Costa de Moçambique revela padrões que podem estar associados a fatores climáticos regionais e globais. Na região Norte, a predominância dos ventos de Norte e Nordeste nos primeiros meses do ano, e sua gradual transição para o quadrante noroeste em agosto, sugere uma influência das monções do Oceano Índico e do efeito da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Segundo Reason & Keibel, (2004) as monções e a ZCIT são fatores determinantes para o clima da região, influenciando diretamente os padrões de vento e precipitação, com impactos que podem ser observados em áreas próximas à costa.

Nos meses de inverno, com ventos de $5-6\text{m.s}^{-1}$ em Maio e Junho, a predominância dos ventos do quadrante Norte coincide com padrões climáticos de alta pressão no Oceano Índico, que desviam ventos em direção ao continente africano, conforme observado por Christensen *et al.* (2007) no contexto dos impactos do aquecimento global nas regiões costeiras africanas. Esta variabilidade nas direções e intensidades dos ventos pode também ser explicada pela interação de massas de ar quente e frio ao longo do ano, como apontado por (Harrison, *et al.*, 2020), que destacam a influência das mudanças climáticas nos padrões sazonais de vento, resultando em flutuações mais intensas.

Na região Sul, a dominância dos ventos de Sudeste em praticamente todos os meses, especialmente de janeiro a março e de agosto a dezembro, reflete um padrão de circulação atmosférica característico das zonas de alta pressão subtropicais, que impulsionam ventos de Sudeste a Nordeste ao longo da costa leste Africana. Estes ventos, com intensidades mais altas nos meses de Março e Abril ($5-6\text{m.s}^{-1}$), são também observados na literatura sobre ventos costeiros no Sul da África, que liga a sua intensidade e direção às correntes atmosféricas oceânicas e aos sistemas de alta pressão que se formam no inverno (Tyson & Preston-Whyte, 2000).

5.3. Potencial de energia eólica offshore disponível nas regiões offshore Norte e Sul da Costa de Moçambique

A densidade de potência eólica é um dos principais indicadores de viabilidade. Estudos apontam que uma densidade de potência inferior a 100W.m^{-2} é considerada insuficiente para aplicações comerciais, enquanto valores entre 100 e 300W.m^{-2} são classificados como moderados e valores superiores a 300W.m^{-2} indicam um alto potencial eólico (Manwell *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2021).

Na região Norte de Moçambique, a densidade de potência eólica disponível apresentou uma média anual de 118.51W.m^{-2} , variando entre 44.40W.m^{-2} em março e 241.19W.m^{-2} em julho. Já a densidade de potência que poderia ser efetivamente gerada teve uma média anual de 71.10W.m^{-2} , variando entre 26.64W.m^{-2} e 144.71W.m^{-2} . Esse potencial é relativamente moderado em relação aos critérios internacionais, como observado em áreas de densidade média em regiões costeiras na Europa e nos Estados Unidos, onde valores variam de 150 a 300W.m^{-2} (Pryor & Barthelmie, 2010; Zhou *et al.*, 2020). Portanto, o Norte possui um potencial que poderia ser explorado em projetos de média escala, mas não em larga escala, principalmente devido à variabilidade ao longo do ano.

No Sul, a densidade média de potência disponível foi mais alta, com média anual de 152.04W.m^{-2} , e com menor variação, oscilando entre 116.42W.m^{-2} em maio e 182.55W.m^{-2} em fevereiro. A densidade média de potência gera alcançou 91.22W.m^{-2} , com uma variação de 69.85W.m^{-2} a 109.53W.m^{-2} ao longo do ano. Em comparação, áreas costeiras de países como Marrocos e Senegal apresentam densidades médias que oscilam entre 150 e 350W.m^{-2} em projetos eólicos de porte similar (González-Aparicio *et al.*, 2017; Hoque *et al.*, 2022). Essas características tornam a região Sul mais promissora, embora ainda na faixa moderada, pois o potencial eólico não é tão elevado quanto o encontrado em regiões altamente adequadas, como em partes da costa atlântica dos Estados Unidos, onde densidades de potência superam os 400W.m^{-2} (Dvorak, Archer, & Jacobson, 2010).

Assim, ambas as regiões possuem um potencial moderado para aproveitamento eólico. O Norte, com uma média mais baixa e maior variabilidade mensal, apresenta características adequadas para pequenos projetos de geração distribuída. Em contrapartida, o Sul, com uma média anual mais elevada e menor variação ao longo dos meses, poderia sustentar projetos de média escala. Esse potencial moderado se alinha ao perfil de outros países africanos e algumas regiões costeiras com clima tropical, indicando que Moçambique poderia ampliar o uso de energia eólica de forma gradual, com foco em complementar a matriz energética nacional e contribuir para a sustentabilidade (WBG, 2020).

CAPÍTULO VI: Conclusões e Recomendações

6. Conclusões

De acordo com os resultados constatados na avaliação do potencial da energia eólica offshore nas regiões costeiras do Norte e Sul de Moçambique, pode-se concluir que os objetivos específicos foram alcançados conforme as conclusões que se seguem:

Os padrões de vento nas regiões offshore do Norte e Sul de Moçambique apresentam características distintas. Na região Norte, observou-se uma predominância dos ventos do quadrante NNE durante os primeiros meses do ano, com variações sazonais que indicam a influência de fenômenos climáticos como as monções e a Zona de Convergência Intertropical. Os ventos nesta região apresentaram velocidades mais elevadas durante os meses de inverno, refletindo as condições atmosféricas favoráveis ao seu aumento.

Na região Sul, a predominância dos ventos de Sudeste ao longo do ano, especialmente entre janeiro e março e de agosto a dezembro, destacou uma continuidade nas características climáticas regionais. As velocidades dos ventos foram mais elevadas nos meses de março e abril, evidenciando a consistência dos padrões de vento que influenciam a dinâmica ambiental da costa moçambicana.

O potencial de energia eólica offshore disponível nas regiões Norte e Sul de Moçambique demonstrou variações significativas. Embora a região Norte, apresente um potencial relativamente moderado, ela se caracteriza por uma maior variabilidade, o que pode limitar o desenvolvimento de projetos em larga escala. No entanto, ainda é possível explorar iniciativas de menor porte que se adaptem à dinâmica do vento local.

Por outro lado, a região Sul, mostra-se mais estável e promissora para o desenvolvimento de projetos de energia eólica de média escala. Em comparação com outros países, como Marrocos e Senegal, sugere que possui um potencial que poderia ser melhor explorado e que se alinha a perfis de regiões costeiras com clima tropical.

8.1. Recomendações

De modo a avaliar com maior precisão o recurso eólico offshore na costa de Moçambique, com base nos resultados e nas limitações desta pesquisa, recomendo que:

- Em pesquisas futuras que sejam usadas estações meteorológicas mais próximas as regiões offshore da costa de Moçambique, o que pode resolver as grandes diferenças nas magnitudes encontradas neste estudo quando usados os dados do INAM de Queimante para validar os resultados obtidos usando os dados de reanálise do ERA5.
- Sejam realizados estudos mais aprofundados e investigações locais para maximizar a eficiência do aproveitamento eólico e integrar essas iniciativas na estratégia de energia do país região.
- A realização de estudos detalhados sobre os impactos ambientais da instalação de parques eólicos offshore. Isso incluiria a avaliação dos efeitos sobre a biodiversidade marinha, habitats locais e a pesca, garantindo que as iniciativas de energia eólica sejam sustentáveis e não comprometam os ecossistemas.
- Estudos adicionais que abordem a viabilidade econômica da energia eólica offshore em comparação com outras fontes de energia renovável e não renovável em Moçambique são essenciais. Isso incluiria a análise de custos de instalação, operação e manutenção, bem como o impacto econômico em comunidades locais.

7. Referencias

- Abiodun, B. J. (2016). *he role of atmospheric circulation on wind patterns in the West African region*. Atmospheric Science Letters, 17(3), 196-206.
- Agency, I. E. (2021). *World Energy Outlook 2021*.
- Alemzero, D., & Acheampong, . T. (2021). *Perspectivas de implantação de energia eólica em África: Análise técnica e económica*. Reino Unido: Energias Renovaveis.
- Almeida, P., & Pereira, M. (2018). *Impact of urban morphology on wind patterns: A review*. Urban Climate, 24, 235-248.
- Alvalá, R. C., Machado, L. A., & Rossato, L. &. (2006). *Os satélites meteorológicos de nova geração e suas contribuições para as previsões de tempo e clima* . Brasil: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais .
- Amaral, L. &. (2011). *Otimização do layout do parque eólico offshore em relação aos efeitos de vigília e perdas elétricas*. Portugal: Engenharia Aplicações da Inteligência Artificial.
- Amarante, O. A., & Da Silva, F. J. (2001). *Atlas do Potencial Eolico do Estado da Bahia*. Camargo Schuberg Engenharia Eolica. Brasil.
- ANEEL. (2008). *Atlas de Energia Eletrica do Brasil*. Brasil.
- Archer, C. L., & Jacobson, M. Z. (2005). *Evaluation of global wind power*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 110(D12).
- Bailey, B., McDonald, S., Bernadett, D., Markus, M., & Elsholz, K. (1997). *Wind Resource Assessment Handbook*. New York: AWS Scientific Inc.
- Baker, C. J. (2006). *The impact of surface roughness on wind profiles in urban environments*. Wind Energy, 9(4), 283-292.
- Breitenbach, G. (2016). *ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM SÃO FRANCISCO DE PAULA, RS, UTILIZANDO MÉTODO COMPUTACIONAL WASP*. Brasil.
- Burton, T., Sharpe, D., & Jenkins, N. E. (2001). *Wind Energy Handbook*. Reino Unido: John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
- Carmo, C. R., & Silva, J. R. (2023). *APRENDIZADO DE MÁQUINA E PRESTAÇÃO DE SERVIÇOS DE ARMAZENAMENTO DE DADOS: MÉTRICAS PARA ANÁLISE E VALIDAÇÃO DE ALGORITMOS PREVISORES*. GETEC, v.12, n.38, p.123-144.

- Carneiro, T. C. (2014). *CARACTERIZAÇÃO DE POTENCIAL EÓLICO PARA FINS DE GERAÇÃO EOLIOELÉTRICA: ESTUDO DE CASO PARA MARACANAÚ (CE), PARNAÍBAPARNAÍBA (PI) E PETROLINA (PE)*. Brasil: Universidade Federal do Ceara .
- Casadinho, C. S. (2014). *Base de Dados do Potencial Eólico em Portugal Continental*. Portugal: Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Castro, R. (2012). *Uma Introdução às Energias Renováveis: Eólica, Fotovoltáica e Mini-hídrica*. Portugal: IST Press.
- Castro, R. M. (2009). *Introducao a Energia Eolica - Energias Renováveis e Produção Descentralizada*. Portugal: Universidade Tecnica de Lisboa - Instituto superior Tecnico da Area Cientifica de Energia.
- Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., & Whetton, P. (2007). *Regional climate projections*. In Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., ... & Miller, H. L. *Climate change 2007: The physical science basis*. Cambridge University Press.
- Christofaro, B. R. (2010). *Estudo do Potencial Eolico em Offshore para a Geracao de Enegria Electrica no Litoral do Parana*. Brasil: Universidade Federal do Parana.
- Copel. (2007). *Companhia Paranaense de Energia*. Brasil: tlas do potencial eólico do estado do Paraná.
- Costa, J. P., & Nunes, S. (2020). *Energia Eólica Offshore: Um Estudo de Caso para Análise da Viabilidade Técnico-Econômica de uma Usina Próxima à Costa do Rio Grande do Norte*. Brasil.
- Craden, L., Kalogeri, C., Galanis, M. B., Ingram, D., & Kallos, G. (2016). *Seleção multicritério de locais para plataformas de energia renovável offshore*. Grécia: Energia renovável.
- Cruz, N. S. (2017). *Comportamento do vento e aproveitamento eólico na região central de Alagoas (Craíbas)*. Brasil: Universidade Federal de Alagoas .
- Cunha, J. F., & Onofrei, R. (2010). *Energia Oceânica*. Portugal: Instituto Nacional da Propriedade Industrial.
- Custodio, R. S. (2009). *Energia eólica para produção de energia elétrica*. Brasil: ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás.

- Da Silva, A. B. (2013). *Projeto Aerodinamico de Turbinas Eolicas* . Brasil: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Dalmaz, A. (2007). *ESTUDO DO POTENCIAL EÓLICO E PREVISÃO DE VENTOS PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE EM SANTA CATARINA*. Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina.
- Davis, R. E., Knappenberger, P. C., M. P., & Novicoff, W. M. (2016). *Changing Circulation Patterns and Regional Climate Trends*. *Journal of Climate Research*, 45(2), 105-120.
- Draper, N. R., & Smith, H. (2014). *Applied regression analysis (3rd ed.)*. John Wiley & Sons.
- Driemeier, L. H. (2014). *Estudo sobre o impacto do avanço tecnoloico no potencial eolico do estado do Rio Grande do Sul*. Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Dvorak, M. J., Archer, C. L., & Jacobson, M. Z. (2010). *California offshore wind energy potential*. *Renewable Energy*, 35(6), 1244-1254.
- Elsner, P. (2019). *Avaliação à escala continental do potencial de energia eólica offshore africana: Análise espacial de um recurso energético renovável subestimado*. Reino Unido: Avaliações de energia renovável e sustentável.
- Emílio, C. A. (2020). *Campos de Vento e Circulação Oceânica no Canal de Moçambique: Perspetivas a a Partir de Diferentes Estimativas*. Quelimane: Universidade Eduardo Mondlane.
- Favera, A. C., Luiz, E. W., Schuch, N. E., Martins, F. R., & Pereira, E. B. (2012). *Energia Eólica no Rio Grande do sul – Distribuição Estatística da Velocidade do Eólico na Area Central do Estado*. Brasil: *Rev. Geogr. Acadêmica* v.6, n.1 (xiii.2012).
- Fernandes, P. V. (2005). *Caracterização de Regimes de Ventos Visando seu Aproveitamento Energético*. Portugal: Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Ferreira, E. M. (2019). *Energia Eólica Offshore: Tratamento de Dados e Avaliação de Aproveitamento em Áreas de Grande Potencial no Brasil* . Brasil: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Ferreira, J. F. (2020). *Seasonal wind patterns and their implications for the energy sector in the tropics*. *Renewable Energy*, 146, 2167-2179.

- Filho, D. B., & Júnior, J. A. (2009). *Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r)*. Brasil: Revista Política.
- Filho, O. D. (2011). *Uma Metodoloia Simplificada para Estimativa de Aproveitamento de Eolico Offshore no Litoral Brasileiro, Estudo de Caso: Ilha de Itamaraca/PE*. Brasil: Universidade Federal de Pernambuco.
- Fortes, A. G., Mutenda, F. M., & Raimundo, B. (2020). *Energias Renováveis em Moçambique: disponibilidade, geração, uso e tendências futuras*. Moçambique: Revista Brasileira Multidisciplinar, 23(1), 6-27.
- Friedrich, K. e. (2019). *The importance of data quality in climate data assimilation*. Journal of Climate, 32(12), 3743-3755.
- González-Aparicio, I., Monforti, F., Volker, P., Zucker, A., Careri, F., & Huld, T. (2017). *Simulating European wind power generation applying statistical downscaling to reanalysis data*. Applied Energy, 199, 155-168.
- Group, W. B. (2020). *Offshore wind technical potential in sub-Saharan Africa*. World Bank.
- Gupta, A., & Biswas, A. (2018). *Performance analysis of offshore wind energy systems*. Energy Reports, 4, 100-111.
- GWEC. (23 de Maio de 2024). *Conselho Global de Eneria Eolica*. Obtido de Manual de Energia Eolica na Africa: <https://gwec.net/africa-wind-energy-handbook/>
- Harrison, L., Ciruolo, M., & Gupta, R. (2020). *Wind patterns and potential for wind energy in coastal East Africa*. Africa: Energy Reports, 6, 845–858.
- Harrison, S. P., Kutzbach, J. E., Prentice, I. C., Behling, P., & Sykes, M. T. (2020). *The Impact of Climate Change on Wind Patterns and Seasonal Wind Variability*. Climatic Change, 63(3), 281-292.
- Hersbach, H., Bill, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Sabater, M. J., . . . Schepers, D. (2020). *A reanálise global ERA5*. Reino Unido: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.
- Hoque, M. M., Hassan, M. S., Ali, A., & Ghafoor, A. (2022). *Wind power potential assessment for selected sites in Bangladesh and Senegal using Weibull distribution function*. Energy Reports, 8, 2022-2032.

- Huguane, A. M. (2007). *Perfil Diagnóstico da Zona Costeira de Moçambique*. Mcambique: Revista de Gestão Costeira Integrada 7(1):69-82 (2007).
- Jardim, J. P., Ferreira, A. P., & Piuzana, D. (2016). *CIRCULAÇÃO GERAL DA ATMOSFERA: proposta da construção de um globo terrestre como prática de ensino*. Brasil: Revista Eletrônica Geoaraguaia. Barra do Garças-MT. V 6, n.1, p. 57 a 70.
- Joyner, T. A., J., F. C., Rohli, R. V., Treviño, A. M., Massarra, C., & Paulus, G. (2015). *Cross-correlation modeling of European windstorms: a kriging approach for optimizing surface wind estimates*. . United States : Spatial Statistics, v. 13, p. 62-75.
- Jury, M. (2014). *Seasonal prediction of the Southern African climate: The contribution of the Indian Ocean*. In *Climate Change and Variability in Southern Africa* (pp. 43-66).
- Karimirad, M. (2014). *Offshore Energy Structures: For Wind Power, Wave Energy and* . Reino Unido: Springer Science+Business Media.
- Klein, M. e. (2016). *The role of measurement networks in climate monitoring and modeling*. *Environmental Science & Policy*, 64, 35-45.
- Langa, J. V. (2007). *Problemas na zona costeira de Moçambique com ênfase para a costa de Maputo*. Moçambique : Revista de Gestão Costeira Integrada 7(1):33-44 .
- Leary, D., Esteban, M., & Durán, G. (2018). *Offshore wind energy in the Southern Hemisphere: A review*. *Energy Reviews*, 89, 516-527.
- Letcher, T. M. (2017). *Engenaria de Energia Eolica: Um manual para turbinas eolicas Onshore e Offshore*. Reino Unido: Academic Press.
- Letsch, B. L. (2022). *ESTUDO DO IMPACTO DA ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA NO PERFIL VERTICAL DO VENTO E NA VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO, USANDO SÉRIES DE REFERÊNCIA DE REANÁLISE, EM LOCAL COSTEIRO*. Brasil: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL ESCOLA DE ENGENHARIA.
- Li, X., Liu, Z., Wang, H., & Liu, J. (2021). *Analysis of wind power density and its influencing factors based on statistical downscaling*. *Renewable Energy*, 168, 415-429.
- Lins, D. R. (2021). *Comparacao do Desenvolvimento de Diferentes Modelos de Distribuicao de Probabilidade Aplicados a Dados de Velocidade do Vento Onshore e Offshore na Regiao do Nordeste Brasileiro*. Brasil: Universidade Federal do Ceará.
- Lopez, R. A. (2012). *Energia eólica*. Brasil: Artliber.

- Luo, W., Taylor, M. C., & Parker, S. R. (2008). *A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales*. . Inglaterra: Int. J. Climatol. v. 28, p. 947-959.
- Lutjeharms, J. R. (2006). *The inter-ocean exchange of water masses. In The South Atlantic: A Model for the Ocean*. South Africa.
- Mabjaia, V. A. (2019). *Análise Climatológica das Ondas no Canal de Moçambique*. Quelimane: Universidade Eduardo Mondlane.
- Machava, L. I. (2015). *Estudo do Comportamento do vento para implementacao de Tecnologias Eolicas na Costa de Vilankulos*. Gaza: Universidade Pedagogica.
- Mahumane, G. M. (2012). *Energy Outlook for Mozambique 2012-2030 LEAP-based Scenarios for Energy Demand and Power Generation*. In: South Africa: III Conferência Internacional do IESE, Conference Paper no 16.
- Maiolino, P. (2014). *Análise Dinâmica de Turbina Eólica Offshore do Tipo Monocoluna*. Brasil: Universidade Federal do Rio de Janeiro - Instituto Alberto Luis Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia.
- Manwell, J. F., Mcgowan, J. F., & Rogers, A. L. (2009). *Wind energy explained: theory, design, and application*. United States: John Wiley and Sons Ltd.
- Martins, A. C. (2008). *Relação das Anomalias de TSM do Pacífico e Atlântico Tropicais com Anomalias de Temperatura, Umidade e Vento para a América do Sul*. Brasil: Universidade Federal de Campina Grande.
- Martins, F., Guarnieri, R., & Pereira, E. (2008). *O aproveitamento da energia eólica*. Brasil: Rev. Bras.
- Mason, P. J., Fawzy, S., & McDonald, K. (2010). *The importance of understanding wind resource assessment*. USA.
- Mavume, A. F., Rydberg, L., Rouault, M., & Lutjeharms, J. R. (2015). *Wind regime and wind energy potential in coastal southern Africa*. South Africa: Journal of Applied Meteorology and Climatology, 54(10), 2293-2305.
- Mazzarella, L., Carreri, A., & Mazzarella, M. (2020). *The role of land use and land cover in influencing wind speed variability: A case study in a coastal area*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 201, 104153.

- Molina, M. O., Gutiérrez, C., & Sanchez, E. (2020). *Comparação das climatologias de velocidade do vento de superfície ERA5 em Europa com observações do conjunto de dados HadISD*. Espanha: International Journal of Climatology.
- Moore, D. S. (2007). *The Basic Practice of Statistics*. . New York.
- Moreira, M. I. (2010). *Avaliação do potencial eólico em regime de microgeração*. Portugal : Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Moreira, R. I. (2010). *Avaliação do potencial eólico em regime de microgeração*. Brasil.
- Musial, W. e. (2016a). *Avaliação de recursos de energia eólica offshore para os Estados Unidos*. Estados Unidos: National Renewable Energy Laboratory.
- Musial, W. e. (2016b). *Potenciais áreas de energia eólica offshore na Califórnia: uma avaliação de localizações, tecnologia e custos*. California: National Renewable Energy Laboratory, Golden,.
- Naicker, P. &. (2019). *Uma estrutura para seleção de energia renovável em escala de utilidade sustentável na África do Sul*. Africa do Sul: Journal of Cleaner Production.
- Namburete, S. (2013). *ATLAS DAS ENERGIAS RENOVAVEIS DE MOCAMBIQUE*. Mocambique.
- Nicholson, S. E. (2000). *Land surface processes and Sahel climate*. Reviews of Geophysics, 38(1), 117-139.
- Nobre, A. A. (2019). *Análise climatológica das correntes de superfície no sul do canal de Moçambique*. Quelimane: Universidade Eduardo Mondlane.
- Nóbrega, P. R. (2019). *Levantamento do Potencial Eólico no Mar para Geração de Energia Elétrica* . Brasil: Universidade Estadual do Norte Fluminense .
- Nogueira, G. (2019). *Avaliação do Comportamento de Turbinas Eólicas Offshore Fixas do Tipo Monopile*. Brasil: Universidade do Rio de Janeiro-Instituto Alberto Luis Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia.
- Nunes, H. M. (2012). *AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO AO LARGO DA COSTA*. Brasil.
- Nunes, H. M. (2012). *Avaliação do Potencial Eólico ao Largo da Costa Nordeste do Brasil*. Brasil: Universidade de Brasília - Instituto de Geociências.
- OCEANOS, E. D. (2019).

- Olauson, J. (2018). *ERA5: O novo campeão da modelagem de energia eólica*. Suécia: Renewable Energy, doi: 10.1016/j.renene.2018.03.056.
- Oliveira, A. F. (2008). *TESTES ESTATÍSTICOS PARA COMPARAÇÃO DE MÉDIAS*. Portugal: Revista Eletrônica Nutritime.
- Petersen, E. L., Mortensen, N. G., Landberg, L., Højstrup, J., & Frank, H. P. (2014). *Wind power meteorology*. Renewable Energy, 6(4), 59-76.
- Portella, J. R. (2007). *Viabilidade da captação da energia eólica nos oceanos*. Brasil: Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais.
- Pryor, S. C., & Barthelmie, R. J. (2010). *Climate change impacts on wind energy: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(1), 430-437.
- Pryor, S. C., Barthelmie, R. J., & Shepherd, T. J. (2020). *Offshore wind energy development: Impacts on coastal and marine environments*. Oceanography, 33(4), 84-93.
- Raposo, D. M. (2014). *Estudo da solução da Eólica Offshore*. Portugal.
- Reason, C. J., & Keibel, A. (2004). *Tropical cyclone Eline and its unusual penetration and impacts over the southern African mainland*. Africa: Climate Dynamics, 22(6-7), 669-680.
- Reason, C., & Lutjeharms, J. (2000). *Variability of the South Indian Ocean and implications for southern African rainfall*. South Africa: A Model for the Ocean.
- REN21. (2022). *Renewables 2022 Global Status Report*.
- Rodrigues, L. F., Pinto, A. C., & Antonio, C. F. (2020). *ESTIMATIVA DO PERFIL DE VENTO E POTENCIAL EÓLICO OFFSHORE PARA COSTA DE CABO FRIO*. Brasil: Revista S&G.
- Rui, M. G. (2009). *Energias Renováveis e Produção Descentralizada*. Portugal: Instituto Superior Técnico.
- Sansigolo, C. A. (2005). *Distribuições de probabilidade de velocidade e potência do vento*. Brasil: Revista Brasileira de Meteorologia, v.20, n.2, 207-214.
- Santos, I. P., Rocha, P. A., & Carneiro, C. (2017). *Seasonal variability of offshore wind energy resources in the South Atlantic Ocean*. Renewable Energy, 101, 474-485.
- Santos, R. G., Santos, R. F., Santiago, W. E., & Fiorese, D. A. (2009). *Avaliação do*. Brasil: Revista Cultivando o Saber, v. 2, n. 3, p. 136-150.

- Santos-Alamillos, F. J., Pozo-Vázquez, D., Ruiz-Arias, J. A., Lara-Fanego, V., & Tovar-Pescador, J. (2015). *Analysis of spatiotemporal balancing between wind and solar energy resources in southern Spain*. Spain: Journal of Applied Meteorology and Climatology, 54(11), 2540-2558.
- Schallenberg-Rodríguez, J., & Montesdeoca, N. G. (2018). *Ordenamento do território para estimar o potencial de energia eólica offshore em regiões costeiras e ilhas. Caso prático: Ilhas Canárias*. Espanha: Energia.
- Silva, A. J. (2019). *Potencial Eólico Offshore no Brasil: Localização de Áreas Nobres Através de Análise Multicritério*. Brasil: Instituto Alberto Luis Coimbra.
- Silva, A. R. (2011). *CARACTERIZAÇÃO DO VENTO E POTENCIAL EÓLICO NO ESTADO DE ALAGOAS*. Brasil.
- Silva, B. B., Alves, J. J., Cavalcanti, E. P., & Ventura, E. D. (2004). *Variabilidade espacial e temporal do potencial eólico da direção predominante do vento no Nordeste do Brasil*. Brasil: Revista Brasileira de Meteorologia, v. 19, n. 2, p. 189-202.
- Soukissian, T. (2013). *Uso de Distribuicoes Multiparametros para Modelagem de Velocidade de vento Offshore: A distribuicao Johnson SB*. Grecia: Energia Aplicada.
- Stüker, E., Schuster, C. H., Schuster, J. J., Caetano, Santos, D., Medeiros, L. E., . . . Puhales, F. S. (2016). *Comparação entre os dados de vento das reanálises meteorológicas ERA-Interim e CFSR com os dados das estações automáticas do INMET no Rio Grande do Sul*. Brasil: Revista Ciência e Natura, 38: 284-290.
- Stüker, E., Schuster, C. H., Schuster, J. J., Santos, D. C., Medeiros, L. E., Costa, F. D., & Demarco, G. &. (2016). *Comparação entre os dados de vento das reanálises meteorológicas ERA-Interim e CFSR com os dados das estações automáticas do INMET no Rio Grande do Sul*. Brasil: Ciência e Natura.
- Teixeira, R. A. (2016). *PROJETO DE PROTÓTIPO DE TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL*. Brasil: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Teixeira, W. F., & Camelo, H. d. (2013). *ANÁLISE DA DENSIDADE DE POTÊNCIA EÓLICA EM REGIÕES DE SERRA E LITORAL DO ESTADO DO CEARÁ*. Brasil: Revista Ciência e Natura, Santa Maria.
- Tuchenhagen, P. N. (2019). *Variabilidade do Vento e Potencial para Energia Eólica Offshore no Litoral Sul do Brasil*. Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

- Tyson, P. D., & Preston-Whyte, R. A. (2000). *The weather and climate of Southern Africa*. Africa: Oxford University Press.
- Tyson, P. D., & Preston-Whyte., R. A. (2000). *The Weather and Climate of Southern*. South Africa: International Journal of Climatologys.
- Vasileiou, M., Loukogeorgaki, E., & Vagiona, D. G. (2017). *Análise de decisão multicritério baseada em GIS para seleção de locais para sistemas híbridos de energia eólica e das ondas offshore na Grécia*. Grécia: Avaliações de energia renovável e sustentável.
- Vigaud, N. e. (2018). *The role of the Intertropical Convergence Zone in shaping the climate of West Africa*. Africa: Climatic Change, 148(3), 253-267.
- Wanzeler, R. A., Santos, E. B., & Barros, M. F. (2021). *Validação de Dados de Vento da Reanálise Era5-Land para Estimativa de Potencial Eólico no Estado do Rio de Janeiro*. Brasil: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro .
- Zhou, J., Wang, H., Chen, M., Wang, H., & Wang, Z. (2020). *Spatial-temporal variations of wind energy potential and its relation to topography and land use in China*. China: Renewable Energy, 147, 1426-1440.