



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
PRÓ REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO REGIONAL**

**REGINALDO DE OLIVEIRA SILVA**

**PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO REGIME DE VENTO NA PARAÍBA E A  
EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS INDICADORES EÓLICOS NO NORDESTE  
BRASILEIRO**

**CAMPINA GRANDE- PB  
2024**

**REGINALDO DE OLIVEIRA SILVA**

**PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO REGIME DE VENTO NA PARAÍBA E A  
EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS INDICADORES EÓLICOS NO NORDESTE  
BRASILEIRO**

.

Texto da Dissertação apresentado  
ao Programa de Pós-Graduação em  
Desenvolvimento Regional (PPGDR), da  
Universidade Estadual da Paraíba  
(UEPB), como requisito para a obtenção do  
título de Mestre em Desenvolvimento  
Regional.

**Linha de Pesquisa:** Ciência, Tecnologia e  
Inovação.

**Orientador:** Prof. Dr. Hermes Alves de Almeida.

**CAMPINA GRANDE- PB  
2024**

**REGINALDO DE OLIVEIRA SILVA**

**PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO REGIME DE VENTO NA PARAÍBA E  
A EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS INDICADORES EÓLICOS NO NORDESTE  
BRASILEIRO**

Texto da Dissertação apresentado  
ao Programa de Pós-Graduação em  
Desenvolvimento Regional (PPGDR), da  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB),  
como requisito para a obtenção do título de  
Mestre em Desenvolvimento Regional.

**Linha de Pesquisa:** Ciência, Tecnologia e  
Inovação.

Aprovada em: 02 de agosto de 2024

**BANCA EXAMINADORA**

*Hermes Alves de Almeida*

Prof. Dr. Hermes Alves de Almeida  
Orientador  
Universidade Estadual da Paraíba (PPGDR/UEPB)

*Rafael Albuquerque Xavier*

Prof. Dr. Rafael Albuquerque Xavier  
Membro Interno  
Universidade Estadual da Paraíba (PPGDR/UEPB)

*Enio Pereira de Souza*

Prof. Dr. Enio Pereira de Souza  
Membro Externo  
Universidade Federal de Campina Grande (UACA/UFCG)

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

S586p Silva, Reginaldo de Oliveira.

Principais características do regime de vento na Paraíba e a evolução temporal dos indicadores eólicos no Nordeste Brasileiro. [manuscrito] / Reginaldo de Oliveira Silva. - 2024. 84 p. : il. colorido.

Digitado. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional) - Universidade Estadual da Paraíba, Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa, 2024. "Orientação : Prof. Dr. Hermes Alves de Almeida, Departamento de Geografia - CEDUC. "

1. Energia eólica. 2. energia renovável. 3. Avaliação do potencial eólico. 4. Sustentabilidade energética. I. Título

21. ed. CDD 551.6

Dedico este trabalho a minha família e aos  
amigos que sempre me apoiara

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pelo dom da vida e por nos proporcionar mais um momento de alegria e gratidão por essa conquista.

Agradeço aos meus pais, Maria Cândida de Oliveira Silva e Cleginaldo Ananias de Oliveira, por todos os ensinamentos que me transmitiram e pelo apoio incondicional em todos os momentos, mesmos aqueles mais difíceis.

Agradeço a todos os colegas da turma 2022.1 do Mestrado em Desenvolvimento Regional por todos os momentos de aprendizagem que vivenciamos e companheirismo presente em todos os momentos.

Gratidão a todos os professores do Mestrado em Desenvolvimento Regional pelo compartilhamento do conhecimento que contribui decisivamente para minha formação intelectual.

Grato imensamente, ao Professor Dr Hermes Alves de Almeida, meu orientador, que me incentivou nos momentos de dificuldades e contribuiu decisivamente para a realização deste trabalho.

Em tempo, agradeço também aos professores que formaram a banca de avaliação do trabalho, Professores Dr Rafael Albuquerque Xavier e Dr Ênio Pereira da Silva pelas valiosas contribuições e sugestões que engrandeceram esse trabalho

## LISTA DE ABREVIACÕES

**ABEEólica** – Associação Brasileira de Energia eólica.

**ANEEL** – Agência Nacional de Energia Elétrica.

**AP** – Alta Pressão

**AR** – Argônio

**BP** – Baixa Pressão

**BNB** – Banco do Nordeste do Brasil

**BNDES** – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social.

**CEPEL** – Centro de Pesquisa em Energia Eólica.

**CLA** – Camada Limite Atmosférica.

**CLP** – Camada Limite Planetária.

**CNUMAD** – Comissão das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente.

**CHESF** – Companhia Hidrelétrica do Rio São Francisco.

**DPE** – Densidade de Potência eólica.

**EIA** – Estudo de Impacto Ambiental.

**EPE** – Empresa de Pesquisa Energética.

**EUA** – Estados Unidos da América

**FDP**- Função Densidade de Probabilidade

**GD** – Geração Distribuída.

**GWEC** – Associação Global de Energia eólica.

**IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

**IPCC** – Painel Intergovernamental sobre Mudanças climáticas

**KW** – Quilowatts.

**INMET** – Instituto Nacional de Meteorologia.

**MME** – Ministério de Minas e Energia.

**MW** – Megawatts

**NEB** – Nordeste do Brasil

**OCDE** – Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico.

**ODS** – Objetivo do Desenvolvimento Sustentável

**OMM** – Organização Mundial de Meteorologia

**ONU** – Organização das Nações Unidas.

**PCD** – Plataforma de Coleta de Dados.

**PCH** – Pequena Central Hidrelétrica

**PROINFA** – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia.

**RAS** – Relatório Ambiental Simplificado

**RIMA** – Relatório sobre Impacto ao Meio Ambiente.

**ZCIT** – Zona de Convergência Intertropical

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 Vista do modelo de circulação geral da atmosfera                                                                                      | 18 |
| Figura 2 Vistas de turbinas de eixos verticais de Darrieus e Savonius, respectivamente                                                         | 23 |
| Figura 3 Vista do Complexo Eólico Puraú, Rio do Fogo, RN                                                                                       | 24 |
| Figura 4 Vista aérea do parque eólico em Galinhos-RN                                                                                           | 30 |
| Figura 5 Croqui hipsométrico do estado da Paraíba                                                                                              | 37 |
| Figura 6 Médias da velocidade do vento, em intervalos de 6 em 6 horas, sequencialmente, para Areia, Monteiro e Campina Grande.                 | 45 |
| Figura 7 Médias da velocidade do vento, em intervalos de 6 horas em 6 horas, sequencialmente, para Patos, Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalo | 45 |
| Figura 8 Médias mensais da velocidade do vento em Areia, Monteiro e Campina Grande, PB.                                                        | 47 |
| Figura 9 Médias mensais da velocidade do vento em Patos, Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalo, PB                                              | 48 |
| Figura 10 Médias sazonais da velocidade do vento em Areia, Monteiro e Campina Grande                                                           | 49 |
| Figura 11 Médias sazonais da velocidade do vento em Patos, Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalo                                                | 50 |
| Figura 12 Histograma de frequência dos ventos em Areia, Campina Grande e Monteiro.                                                             | 51 |
| Figura 13 Histograma de frequência dos ventos em Patos, Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalo.                                                  | 51 |
| Figura 14 Distribuição de frequência das direções predominantes do vento em Areia, PB                                                          | 53 |
| Figura 15 Distribuição de frequência das direções predominantes do vento em Cabaceiras, PB                                                     | 53 |
| Figura 16 Distribuição de frequência das direções do vento em Campina Grande, PB                                                               | 54 |
| Figura 17 Distribuição de frequência das direções do vento em Camaratuba, PB                                                                   | 54 |
| Figura 18 Distribuição de frequência das direções do vento em Monteiro, PB                                                                     | 55 |
| Figura 19 Distribuição de frequência das direções do vento em Patos, PB                                                                        | 55 |
| Figura 20 Distribuição de frequência das direções do vento em São Gonçalo, PB                                                                  | 56 |
| Figura 21 Médias da velocidade do vento, a 10, 50 e 100 m de altura, em Areia, Campina Grande e Monteiro, PB                                   | 57 |
| Figura 22 Médias da velocidade anual do vento, a 10, 50 e 100 m de altura, em Patos, Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalo.                     | 57 |

|                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 23 Energia cinética (em Joules), a 10, 50 e 100 m de altura, para as cidades de Areia, Campina Grande e Monteiro, PB.Energia cinética (em Joules), a 10, 50 e 100 m de altura, para as cidades de Areia, Campina Grande e Monteiro, PB | 58 |
| Figura 24 Energia cinética (em Joules) a 10, 50 e 100 m de altura, para as cidades de Patos, Cabaceiras, Camaratuba (Mataraca) e São Gonçalo (Sousa)                                                                                          | 59 |
| Figura 25 Relações entre as médias mensais da velocidade do vento (V) e a energia cinética (Ec) a 50 e 100 de altura do solo em Areia, PB                                                                                                     | 60 |
| Figura 26 Relações entre as medianas mensais- médias diárias- da velocidade do vento (V) e a energia cinética (Ec) a 50 e 100 de altura do solo, em Patos, PB                                                                                 | 60 |
| Figura 27 Relações entre as medianas mensais- médias diárias- da velocidade do vento (V) e a energia cinética (Ec) a 50 e 100 de altura do solo, em Campina Grande, PB                                                                        | 61 |
| Figura 28 Relações entre as medianas mensais- médias diárias- da velocidade do vento (V) e a energia cinética (Ec) a 50 e 100 de altura do solo, em Monteiro, PB.                                                                             | 61 |
| Figura 29 Relações entre as medianas mensais - médias diárias - da velocidade do vento (V) e a energia cinética (Ec) a 50 e 100 de altura do solo, em Cabaceiras, PB.                                                                         | 62 |
| Figura 30 Relações entre as medianas mensais - médias diárias - da velocidade do vento (V) e a energia cinética (Ec) a 50 e 100 de altura do solo, em Camaratuba, PB                                                                          | 63 |
| Figura 31 Relações entre as medianas mensais - médias diárias - da velocidade do vento (V) e a energia cinética (Ec) a 50 e 100 de altura do solo, em São Gonçalo, PB                                                                         | 63 |
| Figura 32 Médias das medianas mensais - médias diárias - da energia cinética, a 100 de altura do solo, por estação do ano, em Areia, Patos, Campina Grande e Monteiro, PB                                                                     | 65 |
| Figura 33 Médias das medianas mensais - médias diárias - da energia cinética, a 100 de altura do solo, por estação do ano, em Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalo, PB                                                                        | 65 |
| Figura 34 Médias das densidades de potência eólica (DPE), para intervalos de 6 em 6 horas, a 100 m de altura para as cidades de Areia, Patos, Campina Grande e Monteiro, PB                                                                   | 66 |
| Figura 35 Médias das densidades de potência eólica (DPE), para intervalos de 6 em 6 horas, a 100 m de altura para as cidades de Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalos, PB                                                                     | 67 |
| Figura 36 Médias das medianas mensais - médias diárias - da densidade de potência eólica, a 100 de altura do solo, por estação do ano, em Areia, Patos, Campina Grande e Monteiro, PB                                                         | 68 |
| Figura 37 Médias das medianas mensais - médias diárias - da densidade de potência eólica, a 100 de altura do solo, por estação do ano, em Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalo, PB                                                            | 68 |
| Figura 38 Fontes de energia primária no Brasil, em 2020                                                                                                                                                                                       | 71 |
| Figura 39 Quantidades de parques eólicos nos diferentes estados do Brasil, 2023                                                                                                                                                               | 71 |
| Figura 40 Potência instalada de energia eólica em GW por Unidades da Federação, 2023                                                                                                                                                          | 71 |

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 41 Potência outorgada dos parques eólicos em construção no NE, até agosto de 2023                 | 72 |
| Figura 42 Potência eólica instalada por unidade de área para os diferentes estados do Nordeste do Brasil | 73 |
| Figura 43 Potência eólica per capita instalada/habitantes dos estados do Nordeste.                       | 73 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1. Indicadores das médias, medianas e desvio padrão da chuva (DP), na estação chuvosa, com as respectivas durações e % em relação ao total mediano anual..... | 38 |
| Tabela 2. Pontos cardeais, colaterais e intervalos de direções do vento.....                                                                                         | 40 |
| Tabela 3. Síntese das principais características do regime de ventos, por intervalos horários, de sete localidades paraibanas: médias do período de 2011 a 2020..... | 46 |

## RESUMO

A questão energética é, sem dúvida, uma das maiores preocupações da atualidade. A qualidade de vida e a proteção ambiental exigem a busca de tecnologias renováveis, para aumentar a oferta de energia, sem degradar o meio ambiente. Embora a matriz energética brasileira seja, majoritária, hidráulica, esta segurança depende do regime pluvial. No Nordeste brasileiro, a energia advinda dos ventos vem crescendo mais que as outras fontes renováveis, com grande participação na matriz energética nacional, além de ser uma tecnologia indutora de emprego e renda local. Neste contexto, procurou-se estabelecer as principais características do regime de ventos, em sete localidades do Estado da Paraíba, e diagnosticar a evolução dos indicadores eólicos no Nordeste brasileiro, sendo essas determinações os objetivos principais. Tendo ainda os seguintes objetivos específicos: a) estabelecer o regime temporal e sazonal da velocidade do vento na Paraíba e b) estimar o potencial da velocidade do vento e a densidade de potência eólica a 100 m altura do solo. Para realizar este trabalho foram utilizados dados horários, diários e mensais da velocidade e direção dos ventos, medidos nas estações meteorológicas automática, instaladas a 10 m de altura, nas cidades de Areia, Campina Grande, Cabaceiras, Camaratuba, Monteiro, Patos e São Gonçalo (Sousa), pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia e disponibilizados no site. Os perfis de velocidades horária, diária e mensais foram interpolados, utilizando-se equações próprias, para as alturas de 50 e 100 m, equivalentes à altura da hélice do aerogerador. Os demais indicadores, referentes à energia eólica e/ou outras fontes energéticas, foram extraídos de publicações e/ou diretamente dos sites do Ministério de Minas e Energia, da Agência Nacional de Energia Elétrica, da Associação Brasileira de Energia Eólica, dentre outros. Os dados foram analisados mediante os critérios da estatística descritiva e utilizando-se a planilha Excel. Os principais resultados mostram que os indicadores dos regimes espacial e temporal da velocidade dos ventos, no Estado da Paraíba, têm intensidade, energia cinética e densidade de potência eólica adequadas a geração da energia eólica, especialmente, nos meses do equinócio de primavera e no solstício de verão, sendo maiores no turno vespertino (de 12:00-23:00 h), para as cidades de Areia, Patos, Campina Grande e Monteiro e menores em Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalo. A energia eólica é a segunda fonte renovável mais importante da matriz elétrica nacional e o Nordeste desponta como região promissora e dispõe do maior número de parques eólicos em funcionamento, outorgado e em construção. O critério per capita permitiu estabelecer os indicadores eólicos por habitantes e área territorial. Recomenda-se novas pesquisas, priorizando a evolução tecnológica dos aerogeradores, com redução de impactos socioambientais e a ampliação de usos residencial rural e urbano.

**Palavras-chave:** Energia eólica; energia renovável, avaliação do potencial eólico; sustentabilidade energética.

## ABSTRACT

The energy matter is, without a doubt, one of the biggest concerns nowadays. Quality of life and environmental protection requires search for renewable technologies to increase energy supply without degrading the environment. Although the Brazilian energy matrix is mostly hydraulic, this security depends on the rainfall regime. In the Brazilian Northeast, energy from wind has been growing more than other renewable sources, with a large share in the national energy matrix, in addition to being a technology that induces employment and local income. In this context, we sought to establish the main characteristics of the wind regime, in seven locations in the State of Paraíba, and diagnose the evolution of wind indicators in the Brazilian northeast, with these determinations being the main objectives. We also bring the following specific objectives: a) establish the temporal and seasonal regime of wind speed in Paraíba and b) estimate the potential wind speed and wind power density at 100 m above the ground. To carry out this work, hourly, daily and monthly data on wind speed and direction were used, measured at automatic meteorological stations, installed 10 m high, in the cities of Areia, Campina Grande, Cabaceiras, Camaratuba, Monteiro, Patos and São Gonçalo, belonging to the National Institute of Meteorology and available on the website. The hourly, daily and monthly speed profiles were interpolated, using specific equations, for heights of 50 and 100 m, equivalent to the height of the wind turbine propeller. The other indicators, referring to wind energy and/or other energy sources, were extracted from publications and/or directly from the websites of the Ministry of Mines and Energy, the National Electric Energy Agency, the Brazilian Wind Energy Association, among others. The data were analyzed using descriptive statistics criteria and using the Excel spreadsheet. The main results shows that the indicators of the spatial and temporal regimes of wind speed, in the State of Paraíba, have intensity, kinetic energy and wind power density suitable for generating wind energy, especially in the months of the spring equinox and solstice summer, being larger in the afternoon shift (from 12:00 pm to 11:00 pm), for the cities of Areia, Patos, Campina Grande and Monteiro and smaller in Cabaceiras, Camaratuba and São Gonçalo. Wind energy is the second most important renewable source in the national electricity matrix and the Northeast is emerging as a promising region and has the largest number of wind farms in operation, granted and under construction. The per capita criterion made it possible to establish wind indicators by inhabitants and territorial area. Further research is recommended, prioritizing the technological evolution of wind turbines, reducing socio-environmental impacts and expanding rural and urban residential uses.

**Keywords:** Wind energy; renewable energy, assessment of wind potential; energy; sustainability

## SUMÁRIO

|                                                                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>                                                                                             | <b>14</b> |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                                                                                  | <b>17</b> |
| 2.1 Ventos e circulação geral da atmosfera                                                                      | 17        |
| 2.2 Regime de ventos no Nordeste do Brasil                                                                      | 19        |
| 2.3 Métodos e instrumentos para a medição do vento                                                              | 19        |
| 2.4 Evolução temporal do uso da energia elétrica no Brasil                                                      | 20        |
| 2.5 Sistema de geração eólica                                                                                   | 22        |
| 2.6 Panorama elétrico no Brasil e no Mundo                                                                      | 25        |
| 2.7 Impactos ambientais da energia eólica                                                                       | 29        |
| 2.8 Principais características do regime temporal do vento no Brasil                                            | 31        |
| 2.9 Estudos comparativos entre perfis verticais da velocidade do vento medidos e estimados a diferentes Alturas | 32        |
| 2.10 Energia eólica e desenvolvimento sustentável                                                               | 34        |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>                                                                                    | <b>37</b> |
| 3.1 Localização e caracterização da área de estudo                                                              | 37        |
| 3.2 Procedimentos metodológicos                                                                                 | 39        |
| 3.2.1 <i>Procedimentos de coletas e análises estatísticas</i>                                                   | 39        |
| 3.2.2 <i>Determinação da energia cinética do vento e da densidade de potência eólica</i>                        | 40        |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>                                                                                | <b>42</b> |
| 4.1 Caracterização do regime de vento à superfície no estado da Paraíba                                         | 42        |
| 4.1.1 <i>Regimes temporais (Horários, mensais e sazonais) da velocidade do vento</i>                            | 42        |
| 4.1.2 <i>Principais características da direção do vento no estado da Paraíba</i>                                | 52        |
| 4.1.3 <i>Medidas e estimativas da velocidade do vento a 10, 50 e 100 m de altura</i>                            | 56        |
| 4.1.4 <i>Relação entre a velocidade e a energia cinética do vento a 50 e 100 m de altura</i>                    | 59        |
| 4.1.5 <i>Estimativas da densidade de potência eólica (DPE) a 100 m de altura</i>                                | 66        |
| 4.2 Fontes de energia e potencial eólico no Nordeste do Brasil                                                  | 69        |
| <b>5 CONCLUSÕES</b>                                                                                             | <b>75</b> |
| <b>6 REFERÊNCIAS</b>                                                                                            | <b>77</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um bem de consumo extremamente importante e, por isso, requer estudos de demanda e consumo a fim de atender o pleno desenvolvimento socioeconômico; compreendendo que o crescimento econômico, em geral, requer maior oferta de energia. A cada dia, cresce a demanda de energia para suprir o consumo tanto no segmento industrial quanto nos setores de serviço, comércio e atividades domiciliares.

Grande parte dos países usa fontes de energias não renováveis, oriundas do petróleo, que geram impactos à saúde humana e ao meio ambiente, pois a sua queima libera gases poluentes à atmosfera. Diante disto, há a necessidade de proteger o meio ambiente, e uma alternativa para essa proteção é substituir a fonte não renovável pela renovável. Essa inovação tecnológica já vem ocorrendo, em alguns países como por exemplo a Dinamarca, Espanha, Alemanha, Estados Unidos, Brasil, dentre outros, desde meados do século passado.

De acordo com o relatório do observatório do Clima (2021) o Brasil emitiu 2,4 bilhões de toneladas brutas de gases de efeito estufa (GEE) representando um aumento de 12,2 % em relação a 2020 quando havia emitido 2,1 bilhões de toneladas, essa aceleração é o dobro da prevista para a mundial.

Segundo o observatório do clima o Brasil (2021) foi o sétimo maior emissor de gases de efeitos do mundo com 3% do total mundial ficando atrás de China (25,2%), Estados Unidos da América (12%), Índia (7%), União Europeia (6,6%), Rússia (4,1%) e Indonésia (4%). Dos gases de efeito estufa emitidos pelo Brasil, os setores predominantemente emissores são: mudança no uso da terra e floresta (desmatamento, etc.) com 49% das emissões, agropecuária (25%), energia (18%), resíduos e processos industriais 4% cada. O setor de energia emitiu 435 milhões de toneladas de carbono equivalente (mtCO<sub>2e</sub>).

Aumentar a oferta de energia elétrica já é uma realidade no mundo desenvolvido, compreendendo que toda ação ou efeito relacionado a um crescimento – seja social ou econômico – requer energia; apesar disso, o ambiente precisa ser preservado, ou seja, não se justifica desenvolver degradando à ambiência, mas progredir sem degradá-la.

Neste contexto, urge a necessidade de uma alternativa de fontes de energia renováveis não somente no Estado da Paraíba, mas no mundo, tendo em vista a degradação ambiental e os impactos negativos de uso e/ou da expansão das não renováveis. Por isso, cresce o interesse pelas renováveis, tanto de pequena quanto de média e grande escala. Neste contexto, a energia

eólica, gerada pela força dos ventos, é a mais acessível, cujos avanços tecnológicos têm possibilitado a redução de custos (Urtasun et al., 2013).

No Brasil há alguns parques de produção de energia eólica, incluindo-se os da região Nordeste, onde existem condições favoráveis de ventos e, portanto, para gerar energia elétrica. Este potencial eólico regional, possibilita a geração dessa energia de forma descentralizada, que pode suprir, um dos maiores gargalos enfrentados pela agricultura brasileira atual, com a má distribuição das redes de abastecimento de energia elétrica (Dourado, 2017).

Na visão de Lucon e Goldemberg (2009), às energias renováveis: solar e a eólica são alternativas viáveis porque, além de serem menos poluentes, possibilitam a descentralização da produção de energia. A energia eólica, por exemplo, depende apenas de um recurso natural renovável, limpo e abundante (Moreira Junior, 2009), cujo potencial energético poderá atender cerca de 20% da demanda mundial de energia elétrica até 2050 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011).

O Brasil possui uma matriz elétrica formada, predominantemente, pela fonte hidrelétrica, o que representa mais de 60,0 % de toda a energia gerada no país (Brasil, 2020). Embora acreditava-se, até pouco tempo atrás, que as hidrelétricas eram fontes de energia limpa ou não poluente, sabe-se atualmente que elas causam grandes impactos ambientais, desde a formação dos lagos até a decomposição da vegetação submersa, que dá origem a gases do efeito estufa: metano, gás carbônico e o óxido nitroso.

Diante do crescimento potencial do uso de energia elétrica, na economia brasileira, faz-se necessário planejar o setor elétrico, a fim de garantir o suprimento, com previsibilidade e custo acessível. Dessa forma as energias renováveis têm sido indicadas, como a melhor alternativa energética, principalmente, para o Brasil que possui um grande potencial para a geração de energias renováveis, tais como: eólica, solar, biomassa, entre outras (Gouvêa e Silva, 2018).

Dentre as energias renováveis, a energia eólica é a que vem apresentando maior crescimento na composição da matriz elétrica brasileira, chegando a representar, em 2022, mais de 11,0 % de toda a energia gerada no país (ABEEólica, 2023), além de ter um grande potencial a ser aproveitado.

O estado da Paraíba começa a despontar no aproveitamento da energia eólica, com a instalação de um gigantesco complexo eólico na região de Santa Luzia, localizado no Semiárido paraibano. No entanto, o atlas eólico do estado da Paraíba lançado em 2016 apresenta outros recortes geográficos, tanto do Seridó quanto do planalto da Borborema, que dispõem de áreas promissoras para o aproveitamento eólico (Paraíba, 2016).

Diante da potencialidade da força dos ventos, especialmente no nordeste brasileiro, cresce o interesse da pesquisa para estabelecer as diferentes potencialidades locais do vento, que requer as determinações do regime (velocidade e direção predominante). Essa caracterização requer séries longas, que nem sempre existem, e os quantitativos são condições sine qua non para estabelecer o regime e, portanto, se o local tem viabilidade ou não para a implantação de um empreendimento eólico.

Diante disso, houve a necessidade de se estabelecer as principais características do regime de ventos em sete localidades da Paraíba, além de avaliar a evolução de indicadores eólicos no Nordeste brasileiro, sendo essas determinações os objetivos principais. Tendo ainda, os seguintes objetivos específicos:

- a) Estabelecer o regime temporal e sazonal da velocidade do vento, medido a 10 m de alturas do solo, para as localidades de Areia, Campina Grande, Cabaceiras, Camaratuba, Monteiro, Patos e São Gonçalo;
- b) Estimar o potencial da velocidade do vento e a densidade de potência eólica a 100 m altura, equivalente à altura das hélices dos aerogeradores;
- c) Diagnosticar, avaliar e comparar a evolução temporal do uso da energia eólica do Nordeste brasileiro.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Ventos e circulação geral da atmosfera

Para o estudo da velocidade do vento, com o objetivo de quantificar o potencial para a produção de energia eólica em uma determinada região, faz-se necessário entender de forma básica os movimentos de circulação geral e locais que dão origem ao vento.

A atmosfera é uma camada de ar com algumas centenas de quilômetros de espessura, presa pela força da gravidade, sendo mais densa nas proximidades do solo e mais rarefeita à medida que se afasta da superfície (Almeida, 2016).

Baseado na variação da temperatura do ar com a altitude, que resulta no critério térmico, o perfil vertical da atmosfera terrestre está dividida em sete camadas com características físicas distintas entre si, sendo elas: troposfera, tropopausa, estratosfera, estratopausa, mesosfera, mesopausa e termosfera. A troposfera é a camada mais baixa e onde ocorrem os principais fenômenos atmosféricos, sendo a mais importante para a vida na terra (Almeida, 2016).

A Camada Limite Atmosférica (CLA) é uma faixa que mantém contato direto com a superfície e onde ocorrem os movimentos turbulentos do ar devido à interação superfície-atmosfera. O movimento do ar na CLA tem variação em decorrência da altura, isto significa que quanto mais próximo à superfície, a velocidade do vento diminui. Contrariamente, a velocidade tende a aumentar à medida que se afasta da superfície do solo, além de diminuir o atrito, cujo perfil pode ser descrito como uma função logarítmica da altura (Gegima Júnior, 2021).

Martins, Guarnieri e Pereira (2008) citam que o efeito da rugosidade é decrescente com a altitude até uma determinada altura, ou seja, acima da camada limite. Esse efeito passa a ser desprezível e o vento denomina-se de geostróficos, que é um vento horizontal não acelerado, que sopra ao longo de trajetórias retilíneas e resulta de um equilíbrio entre a força de gradiente de pressão e a força de Coriolis.

De acordo com Castro (2009) os ventos são causados pelas diferenças de pressão atmosférica ao longo da superfície terrestre originadas, principalmente, pelo aquecimento desigual da terra, ou seja, o vento ocorre em virtude da diferença de pressões atmosféricas entre dois pontos.

A pressão atmosférica (PA) pode ser definida de forma simplificada como sendo o peso exercido por uma coluna de ar com secção reta e de área unitária que se encontra acima do observador em um dado instante e local. O vento se movimenta das áreas de maior pressão (A)

para as de menor pressão (B) e o gradiente da PA, indica o sentido do movimento (Varejão-Silva, 2006; Almeida, 2016).

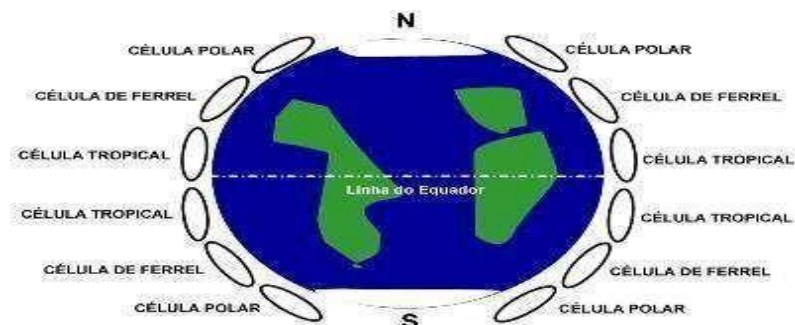
Para Ayoade (1996), além do gradiente de pressão há outros fatores que também influenciam o movimento do ar próximo à superfície da terra, são elas: força de Coriolis, aceleração centrípeta e a força de fricção, esses elementos são responsáveis por influenciar a direção e a intensidade dos ventos.

A força de Coriolis se deve ao movimento de rotação da terra, ou seja, é uma força aparente que desvia as correntes marítima e aérea para a direita no hemisfério norte e para a esquerda, no hemisfério sul (Almeida, 2016). A força de fricção influencia a direção e a velocidade do vento próximo à superfície e se deve aos obstáculos naturais ou artificiais que dificultam a circulação do ar próximo à superfície. Esses obstáculos ajudam a explicar o porquê a velocidade do vento aumenta com a altitude (Almeida, 2016).

De acordo com Varejão-Silva (2006), os movimentos atmosféricos apresentam variações temporais e espaciais, podem ser agrupadas em três escalas: a) Macroescala - ocorre quando as variações são ocasionadas pelos movimentos globais de circulação atmosférica que resultam do aquecimento desigual da terra, são exemplos de movimentos de macroescala os ventos alísios; b) Mesoescala - quando as variações resultam de circulações locais, como, por exemplo, os movimentos diários (dia e noite) oriundos das brisas marítima, terrestre, do vale e de montanha; c) Microescala, quando os movimentos são influenciados por fatores locais, tais como: a rugosidade e os obstáculos artificiais (casas, prédios, etc).

O modelo de circulação geral da atmosfera pode ser visualizado na Figura 1, baseado na alternância de centros de alta e baixa pressão, que formam três células de circulação: a de Hadley localizada na faixa tropical (de 0° a 30° N ou S), com ventos predominantes os Alísios, a de Ferrel, entre 30 e 60° N ou S, com ventos de oeste, e a polar entre 60° e 90° N ou S com ventos predominantes de Leste (Almeida, 2016).

Figura 1. Vista do modelo de circulação geral da atmosfera



Fonte: <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/circulacao-atmosferica.htm>. Acesso em 05/05/2023.

De acordo com Silva (2011), o vento apresenta um comportamento variável, isso significa que a velocidade e a direção podem variar num mesmo local e no intervalo curto de tempo, sendo influenciada pela altitude, rugosidade e o relevo. Essas três características afetam diretamente a velocidade e a direção do vento. O relevo, por exemplo, tem influência marcante no regime de ventos, as colinas, os vales e as depressões podem causar aumento ou diminuição na velocidade do vento.

## **2.2 Regimes de ventos no Nordeste do Brasil**

A região Nordeste do Brasil (NEB) é marcada pela predominância dos ventos alísios. Os alísios provenientes do hemisfério Sul (alísios de Sudeste) se encontram com os alísios vindos do hemisfério Norte (Alísios de Nordeste) formando a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), localizada nas proximidades do equador geográfico (Almeida, 2016).

Embora exista a predominância dos ventos alísios, que faz parte da circulação geral da atmosfera, há outra circulação local, denominada de brisas, que resulta da diferença de temperatura do ar e, consequentemente, da pressão, entre duas configurações distintas, e ocorre exclusivamente, na escala diária (dia e noite). A circulação pode ocorrer entre o oceano e o continente, uma encosta e um vale e uma outra situação distinta de relevo (Almeida, 2016).

O regime de ventos no Nordeste brasileiro tem variação sazonal e temporal. A maioria dos trabalhos relata que os ventos são mais fortes entre setembro e dezembro, condições essas que favorecem maior geração de energia eólica (Lira *et al.*, 2017; Silva e Barbosa, 2022).

Esse regime da força dos ventos é importante para estabelecer o potencial eólico local, além de servir para comparar com o hidrelétrico, principalmente, porque a primavera coincide com o maior potencial de velocidade e a estação seca, ou seja, com os menores níveis de água armazenados nos reservatórios. Assim sendo, a geração de energia eólica tem vários benefícios, principalmente, o de economizar água, cuja economia poderia ser usada para outras finalidades, tais como: o abastecimento humano, dessedentação animal e irrigação complementar (Carneiro, 2014).

## **2.3 - Métodos e instrumentos para a medição do vento.**

A Organização Mundial de Meteorologia (OMM) (Almeida, 2016) preconiza os métodos para medir a direção e a intensidade do vento, utilizando-se anemômetros ( velocidade) ou anemógrafos (direção, velocidade e rajadas), instalados em condições padronizadas.

Os principais tipos de anemômetros são de conchas ou de hélices, do tipo rotativo com três conchas ou hélices. O número de giro das conchas ou das hélices é proporcional ao

deslocamento que dividindo pelo tempo resulta-se na velocidade média (Almeida, 2016)

Os anemógrafos podem ser analógicos e digitais, no primeiro se faz necessário realizar a coleta dos dados de forma manual, já no último os dados são armazenados por um data logger podendo ser acessado remotamente. O anemógrafo universal mede, simultaneamente, a velocidade, a direção e a rajada do vento (Varejão- Silva, 2006).

## **2.4 Evolução temporal do uso da energia elétrica no Brasil**

Os primeiros empreendimentos voltados à exploração de energia elétrica no Brasil, datam-se do final do século XIX. Com a entrada em funcionamento de uma usina térmica para garantir o abastecimento elétrico da cidade de Campos (RJ), em 1883. Somente, em 1889, foi inaugurada a primeira usina hidrelétrica do Brasil; a usina hidrelétrica de Marmelos, no Rio Paraíba, na cidade mineira de Juiz de Fora (Silva, 2015).

De 1890 a 1930, o Brasil teve um crescimento considerável na produção de energia elétrica. Embora esse crescimento ficasse concentrado nas duas maiores cidades do país: São Paulo e Rio de Janeiro. Com a criação de empresas controladas, por capitais internacionais, à exploração do setor elétrico ficou a cargo das empresas LIGHT e Ânfora, reguladas por empresários canadense e americano (Silva, 2015).

A partir da década de 1930, com a revolução que levou ao poder Getúlio Vargas, o governo federal passou a intervir fortemente na economia com o objetivo de fortalecer o processo de industrialização nacional. Dessa forma, o novo governo passou a incentivar o desenvolvimento de setores estratégicos para o desenvolvimento de uma economia industrial como: energia elétrica, siderurgia e petróleo (Silva, 2015).

No período da ditadura militar no Brasil, de 1964 a 1985, o governo continuou com o processo de expansão do setor elétrico brasileiro, aproveitando-se do grande potencial hidroelétrico de grandes usinas. A energia gerada por usinas hidrelétricas acabou se tornando predominante na composição da matriz elétrica brasileira, chegando a representar 90% de toda a energia produzida no País (Silva, 2015)

Com a crise da economia brasileira, na década de 1990, que iniciou na década anterior, o estado perdeu cada vez mais as condições econômicas para continuar no processo de expansão do setor elétrico. Diante disto, surgiram as primeiras tentativas de retirar o Estado da sua atuação no setor elétrico transferindo, gradativamente, para o setor privado, quando se iniciou a venda de empresas estaduais de energia elétrica para a iniciativa privada (Sauer, 2015).

Para esse mesmo autor, a crise no fornecimento de energia elétrica, em 2001, que resultou no racionamento, não foi causada pelo fenômeno natural da falta de chuvas, mas sim

pela ausência de planejamento do setor elétrico brasileiro, ocasionado pela ausência de investimentos, atraso na realização de obras de construção de hidrelétricas, na década anterior.

Por outro lado, a energia eólica no Brasil não se desenvolveu na mesma intensidade que na Europa e Estados Unidos, em virtude de alguns fatores, em especial, ao do imenso potencial hidrelétrico brasileiro, que garantia elevada segurança ao sistema elétrico nacional. Somente na década de 1990, foi instalada a primeira turbina eólica no Brasil, no arquipélago de Fernando de Noronha, em 1992, com o objetivo de gerar energia elétrica, que dispunha de um gerador com potência de 75 kW, rotor de 17 m de diâmetro e torre de 23 m de altura (Oliveira, 2011)

Com a crise de energia, em 2001, a população brasileira teve que se adaptar às medidas restritivas no consumo de energia elétrica, a fim de evitar o desabastecimento. O governo passou a priorizar o desenvolvimento de fontes alternativas para produção de energia. Em 2002 foi criado o PROEÓLICA, através da resolução nº 24 da câmara de Gestão da Crise de Energia elétrica, de 05 de julho de 2001, cujo objetivo era o de contratar 1.050 MW/h até 31 de dezembro de 2003 (Sauer, 2015).

Apesar dos esforços do governo federal, esse programa não conseguiu contratar nenhum projeto de geração eólica, haja vista a existência de uma indústria incipiente e da falta de garantias por parte do governo, para a compra da energia por um longo prazo que minimizasse os riscos financeiros por parte dos investidores. Como não existia, também, um arcabouço para garantir a segurança jurídica de projetos de energia eólica, por serem projetos com investimentos de capital elevados e de retorno a longo prazo (Dutra, 2007)

Após essa tentativa sem sucesso, o governo federal criou, através da lei 10.438 de 15 de abril de 2002, o Programa de Incentivo às Fontes Renováveis (PROINFA), com o objetivo de contratar 3.330 MW de energia proveniente de fontes renováveis. Das quais foram divididas igualmente (1100 MW), entre eólica, biomassa e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), sendo contratados, pelo PROINFA, 1.422 MW de eólica, 685 de biomassa e 1.191 de PCHs.

Em virtude da garantia da compra por parte da ELETROBRÁS dessa energia produzida por um prazo de 20 anos, o PROINFA conseguiu alcançar, em parte, os objetivos pretendidos. Os projetos de geração eólica se concentraram majoritariamente na região Nordeste do Brasil, em especial, nos estados da Bahia, Ceará e Rio Grande do Norte, sendo este o primeiro passo para o desenvolvimento da geração de energia eólica no Brasil (Dutra, 2008).

Os incentivos do PROINFA e o desenvolvimento da indústria eólica mundial levaram a uma drástica redução dos custos da energia eólica no Brasil, fazendo com que existisse competitividade, em relação à energia hidroelétrica, reconhecida como a de menor custo. Com a descontinuidade do PROINFA, a partir de 2009, a contratação da energia passou a ser feita

na modalidade de leilões e o critério da escolha da proposta vencedora, a que oferecesse a menor tarifa para o consumidor.

Os preços da energia eólica caíram drasticamente, em virtude uma série de fatores conjunturais, entre eles: a crise econômica mundial, em 2008, que resultou no declínio no desenvolvimento da energia eólica nos EUA e na Europa, e resultou na transferência das indústrias de aerogeradores e empresas multinacionais para países em desenvolvimento, tais como o Brasil, levando a uma maior competição e a diminuição dos preços de insumos na indústria eólica (Dedecca, 2012).

Nos primeiros leilões realizados, em 2007, a fonte eólica não conseguiu vender nenhum projeto de geração de energia, tendo em vista que não apresentava, ainda, um preço competitivo, quando comparado com os preços praticados por fontes tradicionais, como as hidrelétricas ou mesmo as termelétricas.

A partir dos leilões realizados, em 2009, diversos projetos de geração de energia eólica foram contratados com valores bastante competitivos, ficando em torno de R\$150,00 o MW/h. Nos anos seguintes a energia eólica apresentou um rápido crescimento, aumentando a sua participação na matriz elétrica brasileira e chegando a participar, em 2021, com 10,6% de toda a energia produzida neste país (Brasil, 2022)

O maior potencial e/ou de geração de energia eólico no Brasil localiza-se na região Nordeste, com cerca de 70% de todo o potencial eólico disponível, com destaque para os estados do Rio Grande do Norte, Bahia, Ceará e Piauí, seguidos pela região Sul, onde o Rio Grande do Sul foi pioneiro a instalar parques eólicos, em 2005, com a implantação do complexo eólico de Osório (ABEEólica, 2022).

Para transformar a energia cinética dos ventos em eletricidade, utiliza-se um aerogerador, conhecido também como turbina eólica ou sistema de geração eólica, que consiste de um gerador elétrico que converte a energia cinética do vento em energia elétrica.

## **2.5 Sistema de geração eólica**

O sistema de geração eólica ou simplesmente aerogerador ou turbina eólica é um gerador elétrico integrado ao eixo de um cata-vento e que converte energia eólica em energia elétrica. As turbinas eólicas usam o vento para produzir eletricidade. O vento gira as pás, que giram um eixo, conectado a um gerador, que produz eletricidade. O gerador consiste basicamente de dois ímãs que ao girar um sobre o outro, produzem carga elétrica.

As turbinas eólicas podem ser classificadas em duas categorias, em função do eixo de rotação das pás: a) turbina de eixo vertical e b) turbina de eixo horizontal. A turbina de eixo

vertical (Figura 2) é utilizada para gerar pequenas quantidades de energia, devido às limitações de altura, já que as pás ficam muito próximas ao solo, apresentando menor velocidade do vento e maior turbulência, razão pela qual tem menor vida útil (Pinto, 2018)

Figura 2. Vistas de turbinas de eixos verticais de Darrieus e Savonius, respectivamente



Fonte: Wikipédia, 2023.

As turbinas eólicas de eixo horizontal (Figura 3) são as mais utilizadas para a produção de energia eólica, podendo ter uma ou mais pás. Como as pás ficam direcionadas para o vento, elas têm elevada eficiência, investimento tecnológico e apresentam menor custo benefício.

As turbinas com três pás têm rendimento maior, por isso, são as mais fabricadas pela indústria eólica. Anteriormente, esses equipamentos eram fabricados com potência inferior a 50 KW/h, mas na atualidade, elas têm uma capacidade de geração muito maior, na ordem de 2 MW/h (Pinto, 2018).

Figura 3. Vista do Complexo Eólico Puraú, Rio do Fogo, RN



Fonte: <http://riodofoemfoco.blogspot.com/2014/06/rio-do-fogo-recebera-3-parque-eolico-e.html>.

Além disso, elas também podem ser divididas em relação ao seu tamanho: aerogeradores de grande porte e de pequeno porte. Os aerogeradores de grande porte (Figura 3) são os mais utilizados na indústria eólica e estão presentes nos grandes parques eólicos, por ter capacidade para gerar grande quantidade de energia.

Os aerogeradores de pequeno porte, ainda não estão no mesmo patamar de desenvolvimento dos de grandes portes, que são utilizados para gerar energia elétrica para uma residência na chamada geração distribuída (GD). Nessa modalidade, o consumidor é quem produz a sua própria energia e a disponibiliza na rede da distribuidora, ou seja, deixa reservada a que não foi utilizada. No Brasil, o uso da energia eólica de geração distribuída (GD) ainda é muito pouco quando comparada, por exemplo, com a energia solar fotovoltaica.

Os aerogeradores são formados por um conjunto de partes acopladas, constituídos pela Torre, responsável pela sustentação das outras partes do aerogerador: a) Nacele, refere-se a estrutura montada no alto da torre para abrigar o gerador e a caixa de engrenagens, b) a caixa de engrenagem, que faz a sintonia entre a baixa velocidade da turbina e a alta velocidade do gerador, c) o Cubo, onde são fixadas as pás, utilizadas para captar a energia cinética dos ventos e transformar em energia mecânica e d) o gerador, que é o responsável por transformar a energia mecânica em elétrica, ou seja, dispõe de uma caixa multiplicadora ou redutora de velocidade para sintonizar a diferença de velocidade entre a turbina e o aerogerador.

A maioria das pás de um aerogerador eólico é construída de fibra de vidro e madeira, a fim de diminuir o peso e, conseqüentemente, aumentar a eficiência na conversão de energia,

embora nem toda a potência dos ventos seja transformada em energia elétrica.

De acordo com a lei de Betz, a taxa de aproveitamento do vento que atravessa a área transversal do rotor eólico é de no máximo 59,3 %, além de outras perdas aerodinâmicas que diminui ainda mais a energia elétrica produzida através da força dos ventos (Castro, 2009). Diante disso, a indústria eólica vem procurando aumentar a altura e o diâmetro das hélices dos aerogeradores, visando aproveitar melhor o vento (maior velocidade) que cresce de forma exponencial com a altura, aumentando, portanto, a eficiência na geração eólica (Pinto, 2018).

De acordo com Castro (2009), os quantitativos de energia eólica gerados são diretamente proporcionais às características do vento. Uma pequena variação na velocidade do vento, para mais ou para menos, modifica drasticamente a quantidade de energia produzida. Por isso, há necessidade desses indicadores para o planejamento e a construção de complexos eólicos.

## **2.6- Panorama elétrico no Brasil e no mundo**

A questão energética é um dos temas de maior importância na atualidade. Desde seu início, a humanidade vem buscando mecanismos que facilitem as suas atividades costumeiras, e esses mecanismos requerem o uso e o consumo de energia elétrica.

A partir da Revolução Industrial os combustíveis fósseis como carvão mineral, por exemplo, apresentaram significativa mudança na vida da sociedade da época por ser a principal fonte de energia. Embora exista uma grande preocupação não somente relacionada às perspectivas de esgotamento das reservas de combustíveis fósseis, há também grande preocupação pelos danos ambientais causados, diante do aumento da necessidade de energia para atender a demanda mundial.

Neste contexto é preciso diferenciar, inicialmente, a matriz energética da matriz elétrica, ou seja, aquela que engloba todas as formas de energia utilizadas, desde a energia usada para movimentar veículos, uso doméstico e outras, enquanto que a matriz elétrica, diz respeito às fontes utilizadas na geração de energia elétrica.

As três principais fontes que formam a matriz energética Mundial: petróleo, carvão mineral e gás natural, juntas são responsáveis por cerca de 80% de toda a energia produzida no Mundo. Os 20% restantes são de energia proveniente de fontes renováveis e menos poluentes, que complementam a matriz energética mundial.

De acordo com o último balanço energético nacional (BEN) ( MME, Brasil, 2023), do ano de 2022, a matriz elétrica brasileira continua sendo majoritariamente de fontes renováveis, geradas por fonte hídrica, que supera 3/5 de toda a energia produzida no país. No entanto,

destaca-se os elevados índices de crescimento de outras fontes, tais como a eólica, solar e biomassa.

A fonte eólica já é a segunda mais importante da matriz elétrica nacional, com uma participação de 11,6% e atrás apenas da hidrelétrica, mas com perspectivas de aumento (EPE, 2023). Embora a fonte hídrica ainda seja a mais utilizada, ela vem diminuindo gradativamente a sua participação, em virtude do crescimento acelerado de outras fontes renováveis, até porque os rios com melhores potenciais para a construção de hidrelétricas já foram aproveitados (ABEEólica, 2023).

O Brasil é um país que tem boas condições para reduzir a descarbonização da sua matriz energética e, por isso, ser um dos principais colaboradores no processo de transição energética mundial, optando por uma matriz energética renovável e menos poluentes (Sauer, 2015).

De acordo com a ABEEólica (2023), o Brasil tem, atualmente, 953 parques eólicos em operação e uma potência fiscalizada de 26,92 GW. Mesmo assim, continua em ritmo acelerado de crescimento, tendo em vista que há 634 parques em construção com a possibilidade de aumentar a capacidade instalada em mais 26,44 GW. No Nordeste, os estados do Rio Grande do Norte e da Bahia, por ex., se destacam na quantidade de parques eólicos em fase de construção.

Esse panorama energético tem forçado diversos países a incentivar a transição energética de uma matriz baseada majoritariamente em fontes poluentes e não renováveis para uma matriz energética baseada em fontes sustentáveis e que acarretem menos impactos ambientais.

A dependência mundial de energia proveniente de fontes fósseis tem causado diversos conflitos pelo controle de regiões com elevados potenciais especialmente no Oriente Médio, onde estão localizadas as maiores reservas de petróleo e gás natural (Traldi, 2019).

Apesar dos avanços das energias renováveis nos últimos 20 anos, o mundo inteiro ainda é completamente dependente de energias provenientes de origem fósseis que não são renováveis e podem esgotar num futuro próximo como também são um dos responsáveis por diversos problemas ambientais presentes atualmente.

A matriz elétrica mundial também é formada majoritariamente por fontes não renováveis e poluentes, com destaque para o carvão e o gás natural que juntos correspondem a 58,6% da matriz elétrica do mundo (EPE) Salienta-se, ainda, que a pequena participação das fontes renováveis com a hidrelétrica com uma participação de 16,6%, a nuclear com 10% e as novas fontes renováveis com a eólica responsável por 6%, solar com 3% e a biomassa com 2,5%.

É possível notar a importância da energia elétrica da fonte nuclear, ocupando a quarta maior na formação da matriz elétrica mundial. Destaca-se, entretanto, que a nuclear é considerada uma energia limpa e renovável, o problema que ela possa apresentar é o perigo de contaminação por minerais radioativos caso haja algum acidente. Relata-se que tanto a matriz energética quanto a matriz elétrica mundial são formadas principalmente por fontes não renováveis de energia. Mesmo com o crescimento das fontes renováveis, nos últimos anos, não foi o suficiente, ainda, para promover uma mudança significativa na conversão dessa energia (EPE, 2023).

Com o debate sobre o uso de energias renováveis, nas últimas décadas, foram desenvolvidas diferentes tecnologias, como opções alternativas às tradicionais, como, por exemplo, a conversão da energia solar, eólica, da biomassa e a hidráulica em energia elétrica, das quais a energia eólica tem maior evolução de crescimento, nos últimos anos.

Ao se contabilizar os indicadores de desenvolvimento da energia eólica no mundo, verifica-se que a mesma não apresentou um desenvolvimento uniforme em todos os países, já no início da década de 1990 a Europa já apresentava um grande desenvolvimento da energia eólica sendo responsável por 70% da capacidade instalada de energia dos ventos (Silva, 2015)

Na Europa a energia eólica passou por um rápido desenvolvimento já nos anos 1990 e 2000, países como: Alemanha, Espanha, Reino Unido, França e Dinamarca já apresentavam nessa época um elevado potencial de energia eólica instalada, ficando os quatro primeiros entre os 10 maiores produtores mundiais de energia eólica.

Atualmente, além da Europa, os principais produtores de energia eólica mundial (Figura 11) são: China, maior produtor mundial com capacidade instalada de 310,6 GW, seguido por Estados Unidos da América (EUA) com capacidade instalada de 134,3 GW, o Brasil tem 21,5 GW de capacidade instalada, sendo o sexto maior produtor de energia eólica (GWEC, 2022).

A China é o maior produtor mundial de energia eólica, com capacidade instalada de 310,6 GW, seguido pelo os Estados Unidos da América (EUA), com 134,3 GW e o Brasil, ocupando o sexto lugar, cujos parques eólicos já contribuem com mais de 22 GW na matriz elétrica nacional (GWEC, 2022).

Destaca-se, entretanto, que o crescimento populacional dos dois países mais populosos do mundo (China e Índia), requer a expansão por energia e, portanto, por fontes renováveis, especialmente, a eólica. Esses países têm elevadas demandas de consumo de energia, para atender elevados contingentes populacionais e um rápido processo de crescimento econômico, razão pela qual, nos últimos anos, essa oferta vem sendo suprida, principalmente, pela energia eólica.

Embora o Brasil ocupe o sexto lugar, no uso da energia eólica, quase a metade da matriz energética provém de fontes renováveis, com destaque para as de derivados de cana de açúcar e a hidráulica nas quais já aparecem as fontes eólicas e solares. Cabe destacar que a matriz energética engloba todas as formas de energia e não apenas a energia elétrica (BEN, 2023)

Dessa forma, a energia usada no setor de transporte, por exemplo, seja o principal responsável pela elevada participação do petróleo e derivados na formação da matriz energética brasileira, chegando a representar mais de 35% de toda a energia gerada no país.

Mesmo assim, a matriz elétrica brasileira é considerada uma das mais limpas do mundo, sendo gerada, majoritariamente, em hidrelétricas. No entanto, essa fonte de energia é dependente do regime de chuva, cujas ocorrências de estiagens, secas ou, até mesmo, a irregularidade no regime pluvial reduz e compromete o processo de geração de energia, além de influenciar a produção/produktividade da biomassa.

Os resultados do último balanço energético nacional, apresentado pelo Brasil (MME, 2023), referente ao ano de 2022, mostraram que a matriz elétrica nacional é a que tem a maior participação de fontes de energias renováveis. Dessa participação, destaca-se a fonte hídrica, que supera 60,0 % de toda a energia produzida no país. Mesmo assim, destaca-se, a evolução do crescimento de outras fontes renováveis como a eólica e a solar.

A matriz elétrica brasileira é considerada uma das mais limpas do mundo, sendo, majoritariamente, gerada em hidrelétricas, embora as ocorrências de longos períodos de estiagem possam reduzir não somente a segurança na geração de energia, mas afetar a produtividade da biomassa.

Corroboram a ABEEólica (2023) que, embora a fonte de energia hidrelétrica ainda é majoritária na geração de energia elétrica no Brasil, ela vem, ao longo do tempo, diminuindo gradativamente a sua participação, em virtude do crescimento de outras fontes renováveis, especialmente, a eólica, haja vista o maior impacto ambiental, causado na construção de novas hidrelétricas.

Com referência a descarbonização da matriz energética brasileira, concorda-se com Sauer (2015): o Brasil é um dos países do mundo, com maior potencial para diminuir a descarbonização da sua matriz energética, ou seja, o principal colaborador no processo de transição energética na economia mundial, passando de uma matriz energética baseada em combustíveis fósseis para uma matriz sustentada nas energias renováveis e menos poluentes.

Atualmente, o Brasil tem uma capacidade instalada de energia eólica pequena, quando comparada com o seu potencial e com outros países líderes na geração desta fonte. No entanto, as políticas ambientais e de incentivos para a geração da fonte eólica, vêm começando a

produzir os primeiros resultados e espera-se um crescimento maior da exploração deste recurso nos próximos anos.

Com a evolução da capacidade instalada de energia eólica fica evidente que há necessidade de formação de recursos humanos e de incentivo à pesquisa científica, com a finalidade de dar o suporte necessário à indústria de energia eólica. A maioria dos estudos atuais indica ser uma tecnologia geradora de emprego e renda e, por isso, o domínio dessa tecnologia é tão importante quanto o é a preservação ambiental e a segurança energética.

O aproveitamento energético e rentável requer a instalação de geradores eólicos em locais com ventos constantes, ou seja, com intensidade dos ventos entre moderada e muito forte. Essas condições corroboram-se às relatadas pela CEPEL (2001) que sugeriu a escolha de locais com menor cisalhamento na direção do vento, citados pela Aneel (2020), que destacou o Nordeste brasileiro, como sendo a região do Brasil com maior quantidade de usinas eólicas, haja vista o elevado potencial de geração deste tipo energia, tanto onshore (em terra) quanto offshore (no mar), que dispõe, atualmente, de mais de 950 parques eólicos em operação e potência fiscalizada de mais de 26,92 GW (ABEEólica, 2022).

## **2.7 -Impactos ambientais da energia eólica.**

A geração da energia eólica, embora seja uma fonte renovável e limpa, pode gerar impactos socioeconômico e ambiental negativos, principalmente, devido a perda da biodiversidade, o desmatamento e o desequilíbrio ecossistêmico com a supressão de habitats. Embora esse tipo de energia seja geralmente isento de questionamentos, quanto à sustentabilidade, se não atender a certos requisitos, podem gerar impactos, nem sempre visíveis, nos âmbitos ambiental e social.

De acordo com Brannstrom (2019), o programa brasileiro de energia eólica é uma resposta bem-sucedida do setor público-privado a uma crise do fornecimento de eletricidade, ocorrida em 2001, que criou uma situação atraente para os investidores em energia renovável.

Os parques eólicos, instalados em campos de dunas e outros sistemas ambientais costeiros, criam conflitos, negando o acesso aos recursos que sustentam os meios de subsistência e as identidades culturais de comunidades tradicionais. Esses conflitos de acesso produzem respostas políticas que buscam medidas de mitigação, para o desenvolvimento contínuo da energia eólica (Brannstrom, 2019).

Apesar de a energia eólica ser limpa e sustentável, as energias provenientes de combustíveis fósseis, tais como: petróleo, gás natural e o carvão, ela apresenta alguns impactos socioambientais que necessitam de atenção por parte dos poderes públicos e da sociedade.

Há diversos estudos que relacionam diversos problemas socioambientais com a construção de grandes parques eólicos, particularmente, no Semiárido e no litoral do Nordeste (Traldi, 2019). Gorayeb et al., (2016) cita os principais problemas que podem surgir com a instalação: a) Modificação da paisagem natural em áreas sensíveis como dunas e mangues, b) Conflitos fundiários; c) Injustiças no arrendamento de terras para a instalação.

Hofstaetter (2016) exemplificou alguns dos impactos socioambientais, ocasionados pelos parques eólicos de Galinhos, no Rio Grande do Norte, como mostra a Figura 4.

Figura 4. Vista aérea do parque eólico em Galinhos- RN



Foto: Maxsuell Almeida. Disponível em: [www.g1.com.br](http://www.g1.com.br). Acesso em 02 de setembro de 2023.

A implementação desse tipo de empreendimento requer licença ambiental, por acarretar uma série de problemas à comunidade local, com destaque nas mudanças significativas nas paisagens e na preservação ambiental das dunas e mangues. Neste contexto, há uma grande preocupação dos pesquisadores sobre a energia eólica no que diz respeito a instalação de parques eólicos, por ser de baixo impacto ambiental e, por isso, poderia ser dispensado do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), podendo ser substituído pelo Relatório Ambiental Simplificado (RAS). Essa simplificação pode ser insuficiente para avaliar os impactos ambientais ocasionados pela instalação dos referidos em áreas sensíveis e de proteção ambiental (Staut, 2011).

Outro impacto ocasionado pela construção de parques é o conflito fundiário pela posse legal das terras onde serão instalados os aerogeradores. Em muitos recortes geográficos do Semiárido nordestino ou, até mesmo, no litoral, as comunidades remanescentes de quilombos, por exemplo, por não possuir a escritura legal da propriedade, acabam gerando uma série de

conflitos entre os que têm a posse da terra e grileiros que buscam tomar as terras dos possuidores e arrendarem as terras para a instalação de parques eólicos (Traldi, 2019).

## 2.8 Principais características do regime temporal da velocidade do vento no Brasil

Alguns trabalhos têm avaliado o potencial eólico, destacando-se as principais características do regime de ventos. Ponciano e Back (2022) verificaram que, as características do regime de ventos, em Laguna (SC), utilizando-se dados registrados na estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), instalada no farol de Santa Marta, no período de junho de 2008 a maio de 2021.

Utilizando-se dados horários de velocidade do vento, à 10 m de altura da superfície, nos turnos diurno (07:00 às 19:00 h) e noturno (19:00 às 07:00 h), a velocidade média do vento oscilou entre 5,7 e 7,9 m.s<sup>-1</sup>.

Jacondino et al., (2019) encontraram velocidade média do vento superior a 7,5 m.s<sup>-1</sup>, na cidade de Parazinho, Rio Grande do Norte, utilizando dados horários de dois anemômetros automáticos, instalados em duas torres de 95 m de altura, entre 01 de janeiro de 2017 e 31 de dezembro de 2017. Procedimentos semelhantes foram adotados por Costa e Lyra (2012), para algumas localidades do Estado de Alagoas, entre dezembro de 2007 e novembro de 2008, em anemômetros a 30 m de altura, e encontraram velocidade média entre 5,3 e 7,1 m.s<sup>-1</sup>.

As principais características da velocidade do vento, encontradas por Terassi *et al.*, (2021), em duas cidades do Paraná: Curitiba e Paranaguá, medidas à 10 m de altura, foram, respectivamente, de 2,19 e 2,15 m.s<sup>-1</sup>, sendo confeccionadas as direções predominantes do vento, com o modelo das rosas dos ventos, utilizando-se o software WRPLOT.

Estudos semelhantes foram feitos para algumas localidades de Alagoas, Piauí e outras localidades do Nordeste, por Silva e Barbosa (2022), Lira et al., (2017) e Carneiro (2014), respectivamente. Silva e Barbosa (2022) estudaram o regime de ventos em três cidades de Alagoas: Maceió, Arapiraca e Pão de Açúcar, encontraram direção predominância de vento de Este, entre outubro e abril e de Sudeste (de maio a agosto), associados aos ventos alísios, e com tendência de aumento, na velocidade média mensal, próxima aos meses de verão e redução nos de inverno.

Lira et al., (2017) estabeleceram as principais características do regime de ventos, dentre elas as médias horárias e mensais e a frequência da direção do vento, em oito localidades do estado do Piauí. Os dados foram coletados a uma altura de 10 m e interpolados para as alturas de 50,70 e 90 m, utilizando-se a função logarítmica, com finalidade de estimar o potencial eólico de geradores. Em síntese, os maiores valores de velocidade média horária foram,

respectivamente, de 5,2; 5,5 e 5,7  $\text{m.s}^{-1}$ , a média mensal de 4,6; 4,7; e 5,0  $\text{m.s}^{-1}$ , com direção predominante do Sudeste.

Procedimentos semelhantes foram adotados por Carneiro (2014), para estabelecer o regime de vento e o seu respectivo potencial eólico, em três localidades do Nordeste brasileiro: Maracanaú (Ceará), Parnaíba (Piauí) e Petrolina (Pernambuco). Os principais resultados mostraram que as cidades de Parnaíba e Petrolina têm os maiores potenciais eólicos, com velocidades médias de 7,5 e 6,7  $\text{m.s}^{-1}$ , respectivamente, comparadas com 5,6  $\text{m.s}^{-1}$  para a cidade de Maracanaú.

Albani e Ibrahim (2013) estudaram as características da velocidade média do vento, em nove cidades da Malásia. Utilizaram dados horários de velocidade do vento, coletados, durante em todos os meses de 2011, nas estações meteorológicas pertencentes ao Departamento Meteorológico da Malásia (MMD). As funções de densidade de probabilidade de Weibull e Rayleigh foram utilizadas para o ajuste estatístico dos dados observados.

Verificou-se que o vento nas cidades pesquisadas variam de um mínimo de 1,77  $\text{m.s}^{-1}$ , para a cidade de Tawua, e um máximo de 2,90  $\text{m.s}^{-1}$ , em Mersing. A função de densidade de probabilidade de weibull foi a que melhor representou os dados observados.

Kose *et al.*, (2004), avaliaram os dados de velocidade dos ventos, para estimar o potencial de energia eólica na região de Kutahya, Turquia, coletados na estação meteorológica instalada no Campus da Universidade de Dumlupinar, nas alturas de 10 e 30 m, durante o período de julho de 2001 a fevereiro de 2003, cujos principais resultados da velocidade mensal do vento variaram entre 3,4 e 6,1  $\text{m.s}^{-1}$ , a velocidade média anual de 4,46  $\text{m.s}^{-1}$ , para altura de 10 m e de 4,62  $\text{m.s}^{-1}$  para a de 30 m e a média da densidade de potência eólica foi de 36,62  $\text{W/m}^2$ .

Abdulkarim *et al.*, (2017) realizaram análises estatísticas do vento, para quantificar o potencial, preliminar, de energia elétrica no norte da Nigéria. Utilizaram uma série de um ano e ajustaram as funções de densidade de probabilidade de Weibull, Gama e a dispersão de Rayleigh, para avaliar estatisticamente a velocidade média dos dados observados. Verificou-se que a função de Weibull foi a que melhor se ajustou aos dados observados e a densidade de potência eólica prevista foi de 489  $\text{W/m}^2$ , o que caracteriza um bom potencial para o aproveitamento de energia eólica.

## **2.9 Estudos comparativos entre perfis verticais da velocidade do vento medidos e estimados a diferentes alturas**

O movimento e o sentido do vento, na atmosfera terrestre, se devem ao gradiente

horizontal de pressão, causado pela diferença na temperatura do ar, entre dois pontos ou locais, cuja diferença resulta da incidência da irradiância solar à superfície, a qual gera um gradiente de pressão (Almeida, 2016).

As camadas de ar mais próximas à superfície são desaceleradas devido a influência do atrito, criando-se um perfil vertical de velocidade, com a camada imediatamente superior. Na parte mais baixa da troposfera, próxima ao solo, é a camada mais influenciada pela superfície terrestre, denominando-a de camada Limite Planetária (CLP), cuja espessura pode variar de 1 a 2 km (Wallace; Hobbs, 2006) e acima deste valor, denomina-se de atmosfera livre (Stull, 1988).

Neste contexto, torna-se importante estabelecer o perfil da velocidade do vento com a altura, haja vista que o atrito próximo à superfície reduz a velocidade. Enquanto que, à medida que se distancia da superfície, a velocidade aumenta (cresce) seguindo um perfil logarítmico do vento (Almeida, 2016).

Nas estações meteorológicas padronizadas, a velocidade do vento é medida, utilizando-se anemômetros ou a direção e velocidade, em anemógrafo universal, instalados, respectivamente, a 2 e 10 m de altura.

Para descrever o comportamento da distribuição de frequência de velocidade do vento inúmeros modelos estatísticos têm sido utilizados. Entretanto, a maior atenção vem sendo dada à distribuição de Weibull, cujo modelo apresenta melhor ajuste dos dados de velocidade do vento, como relatou Lun e Lam (2000).

Embora existam diferentes procedimentos para se estabelecer o perfil logarítmico da velocidade do vento, utilizando-se diferentes equações diferenciais e algébricas, nas quais a lei logarítmica possibilita aproximar o perfil de velocidade do vento à camada limite e em condições de neutralidade. No entanto, Dutra (2007) destacou que os métodos mais utilizados, para estimar a variação do vento com a altura, são descritos por dois modelos estatísticos: logarítmica e potência.

Para o referido autor, há duas formas de realizar a extrapolação dos dados de velocidade do vento, coletados a uma altura de referência, para a altura desejada. Para Oliveira (2013), a melhor forma de ajustar os dados de vento a diferentes alturas é a extrapolação dos dados medidos a uma altura de referência para uma altura desejada, utilizando-se a lei de potência.

A lei de potência da velocidade do vento varia com a altura, horário do dia, estação do ano, relevo, temperatura do ar, etc, sendo a correlação com estes parâmetros e o comprimento de rugosidade determinada por (Manwell *et al.*, 2002). De acordo com Silva (2011), uma das formas mais utilizadas para estimar o potencial eólico do aerogerador é pelo cálculo da

densidade de potência eólica (DP, em  $W/m^2$ ), sem considerar as características do aerogerador (Silva, 2011).

Como um dos maiores desafios da humanidade, de repercussão nacional e internacional, na atualidade, são os problemas ambientais. Nesse sentido, a energia eólica, mostra ser uma fonte alternativa, renovável e limpa, por utilizar da força do vento (natural), que diminui os riscos de desastres ambientais causados por fontes poluentes, além de possuir inúmeras vantagens, na questão da sustentabilidade, por não emitir carbono ou gases tóxicos em sua produção e não gera resíduos.

## **2.10 Energia eólica e desenvolvimento sustentável.**

O uso de fontes de energia renováveis vem aumentando no Brasil, haja vista não somente devido o aumento na demanda por eletricidade, mas da necessidade, concomitante, de explorar fontes alternativas de energia, além das habituais, que sejam menos degradante ao meio ambiente, ou seja, de mais energia que possibilite o desenvolvimento sustentável e a geração de empregos e renda.

O aumento de fontes de energia renováveis permite não somente o desenvolvimento deste país, mas o torna um dos pioneiros na produção de energia limpa. A energia eólica é uma fonte inesgotável e, portanto, fundamental para o desenvolvimento sustentável, através de sistema de energia distribuída, eliminando gradualmente as fontes de energia não limpa (Silva *et al.*, 2023).

A energia elétrica é fundamental para o crescimento econômico e está intrinsecamente relacionada com a melhoria da qualidade de vida da população. De acordo com Goldemberg (1998), o consumo per capita de energia nos países desenvolvidos e que compõem a Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e a União Européia chega a ser três vezes maior do que o registrado nos países em desenvolvimento como o Brasil. Sabe-se que a energia é de suma importância para propiciar as melhorias das condições de vida da população.

Wang *et al.*, (2011) avaliaram a relação de causalidade entre o consumo de energia e o crescimento econômico da China, no período de 1972 a 2006, e constataram que o consumo de energia cresceu a uma taxa média de 8,8 % ao ano, enquanto que o crescimento da economia chinesa cresceu a uma taxa de 10,0 %, no mesmo período. Os autores concluíram que o crescimento econômico está positivamente relacionado com o consumo de energia.

Kaplan *et al.*, ( 2011) analisaram se havia relação de causalidade entre o crescimento econômico e o aumento de consumo de energia na Turquia, no período compreendido entre

1971 e 2006 e concluíram que o crescimento econômico e o aumento no consumo de energia são cointegrados, ou seja, o crescimento econômico requer maior oferta de energia e vice-versa.

A necessidade de conciliar o aumento da oferta de energia e ao mesmo diminuir os impactos ambientais, causados pelo aumento do consumo de energia elétrica, fez com que diversos segmentos da sociedade passassem a defender a substituição de combustíveis fósseis por outros recursos naturais menos poluentes na geração de energia elétrica.

Ferreira (2021) relata a preocupação com os impactos ambientais ocasionados por um modelo de desenvolvimento baseado no uso indiscriminado dos recursos naturais, iniciado na década de 1970, a partir da conferência das Nações Unidas sobre o meio ambiente, realizada em 1972, em Estocolmo ( Suécia), intensificando-se a partir dos anos 1980 com a divulgação pela Comissão das Nações Unidas sobre o meio ambiente (CNUMAD) do relatório intitulado *Our Common Future* (Nosso Futuro Comum).

O relatório preconizava a necessidade de se construir alternativas para garantir o desenvolvimento social, ambiental e econômico da geração atual sem colocar em risco o aproveitamento dos recursos naturais pelas futuras gerações. A partir deste, iniciou-se o uso e a discussão do termo desenvolvimento sustentável que em linhas gerais significa a possibilidade de conciliar o desenvolvimento socioeconômico com a preservação dos recursos naturais.

Segundo Sachs (2004), autor do ecodesenvolvimento, que mais tarde foi incorporado pela ideia de desenvolvimento sustentável, o desenvolvimento da sociedade somente é verdadeiro com a inclusão social, que gere melhorias na qualidade de vida, para toda a população, e não apenas no mero crescimento econômico que, na maioria das vezes, gera a concentração de riquezas nas mãos de uma minoria privilegiada, somado com a preservação e o uso racional dos recursos da biosfera.

Com a crescente preocupação por parte de governos e da sociedade civil, com os problemas ambientais, buscou-se formas de diminuir os impactos sobre o uso dos recursos naturais ocasionados por um modelo que privilegia o crescimento da economia em detrimento da sustentabilidade do planeta.

Diversas conferências, como a Rio 92, discutiram medidas para promover a construção de alternativas para a promoção de um desenvolvimento sustentável alicerçado na melhoria da qualidade de vida da população e na sustentabilidade ambiental.

A principal contribuição da conferência Rio 92 foi a criação de um documento conhecido como Agenda 21 que preconiza diversas ações para garantir a sustentabilidade do planeta, entre elas, o uso racional dos recursos naturais, a redução das desigualdades sociais e regionais, o uso de energias renováveis e a educação ambiental, além de estabelecer parâmetros

para promover a avaliação de países em matéria de desenvolvimento sustentável (Ferreira, 2021)

Após a conferência Rio +20, realizada em 2012, houve aprofundamentos e discussões sobre a promoção do desenvolvimento. Em 2015, surgiu a agenda 2030 da ONU, que é um plano global para atingirmos em 2030 um mundo melhor para todos (povos e nações). Os dezessete objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) contemplam 169 metas, das quais buscam erradicar a pobreza, alcançar a segurança alimentar e agricultura sustentável, assegurando padrões de consumo sustentáveis.

Para atingir os indicadores da ODS 7 até 2030, é necessário investir em fontes de energia limpa, como a solar e a eólica, além de melhorar a produtividade energética, para tornar acessíveis a todos em quantidade e em preços. Já que uma parte significativa da população mundial ainda não dispõe de acesso à energia elétrica, ficando marginalizada do processo de desenvolvimento socioeconômico.

O consumo de energia elétrica é uma das variáveis para medir o grau de desenvolvimento de uma nação, segundo Goldemberg (1998) o consumo per capita de energia dos países desenvolvidos é bem superior àquele verificado nos países pobres e em desenvolvimento. Daí a necessidade de se expandir o consumo de energia elétrica nos países mais pobres, como uma forma de alavancar o crescimento econômico e o desenvolvimento social.

Diante da necessidade crescente pelo consumo de energia elétrica e levando em consideração que a maior parte dessa energia que movimenta a economia mundial é proveniente de fontes não renováveis e poluentes, urge a necessidade de diversificar a matriz elétrica mundial, a fim de garantir energia suficiente para alavancar o crescimento econômico com o menor impacto ambiental possível.

A mudança na matriz elétrica mundial, com o crescimento das energias renováveis, pode contribuir para um desenvolvimento mais harmônico entre países, haja vista que em muitos deles, o aumento da energia elétrica, para atender o desenvolvimento, poderá advir de fontes renováveis e menos poluentes.

Neste contexto, o desenvolvimento sustentável passa, necessariamente, não só pela preservação do meio ambiente, como também, pela necessidade de promover um crescimento econômico capaz de diminuir as desigualdades entre regiões e pessoas. A ideia de sustentabilidade social preconiza a importância de juntamente com a preservação dos recursos naturais garantir, a maioria dos habitantes do planeta, condições dignas de existência.

### 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.

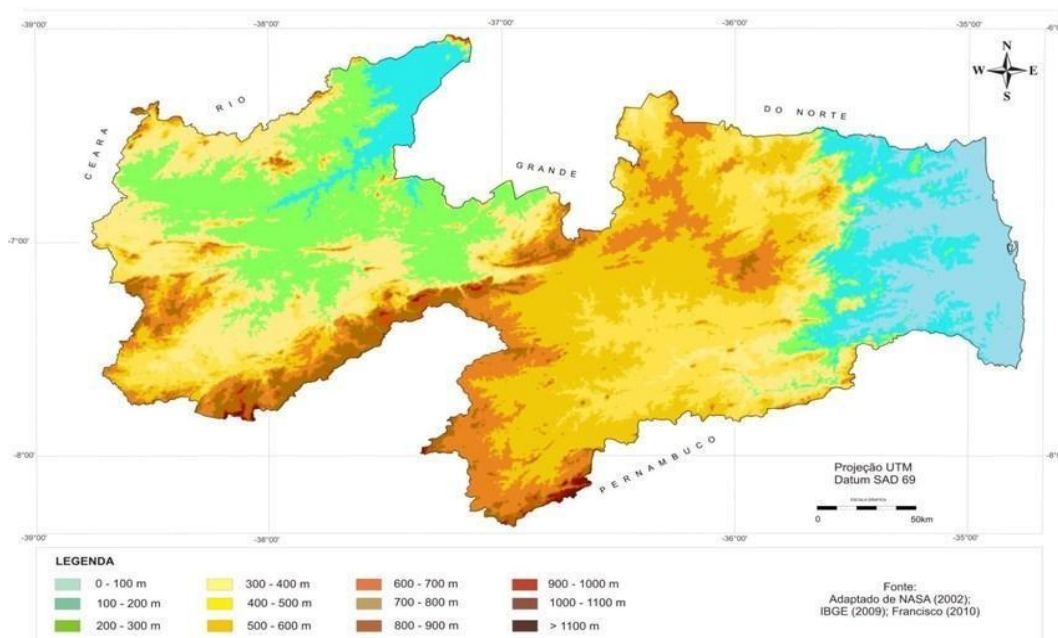
#### 3.1 Localização e caracterização da área de estudo.

A Paraíba é uma das 27 unidades federativas do Brasil, com uma área territorial de 56.467,242 km<sup>2</sup>, população superior a quatro milhões de habitantes, distribuída em 223 municípios, e um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) de 0,658 (IBGE, 2022), limitando-se a leste, com o oceano atlântico, ao norte, com o Rio Grande do Norte, ao sul, com Pernambuco, e a oeste, com o Estado do Ceará.

De acordo com a classificação climática de Koppen, a Paraíba tem vários tipos de climas, especialmente, o clima tropical chuvoso megatérmico (As) e o Semiárido (Bsh), com temperaturas médias do mês mais frio maior que 18 °C e regime pluvial, caracterizado pela irregularidade, na maioria dos meses do ano.

O relevo paraibano é caracterizado por planícies, planaltos e depressões em formas tabulares, embora cerca de 90% do território tenha altitudes abaixo dos 600 m. As maiores elevações ocorrem na parte central do Estado e ao longo do Planalto da Borborema, chegando ultrapassar 1.100 m (Figura 5)

Figura 5. Croqui hipsométrico do estado da Paraíba



Fonte: Francisco et al., 2014

As maiores altitudes do estado (acima de 800 m) ocorrem no compartimento do Planalto da Borborema, destacando-se a faixa do brejo paraibano e também nas divisas da Paraíba com os estados de Pernambuco, Rio Grande do Norte e Ceará. No recorte sertanejo, há relevos formados pela depressão sertaneja, com altitudes baixas (entre 200 e 300 m), como as várzeas

de Sousa (Araújo, 2022).

Na faixa litorânea e na mata paraibana, o relevo é formado por tabuleiros litorâneos, com o predomínio de solos arenosos, com altitude inferior a 200 m. A hidrografia da Paraíba é por onze bacias hidrográficas, sendo a maior a do Piranhas-Açu, com quatro sub-bacias: rios do Peixe, Piancó, Espinharas e Seridó e duas regiões (alto e médio Piranhas), com área de drenagem maior que 26 mil km<sup>2</sup>. A segunda maior bacia hidrográfica paraibana é a do Rio Paraíba, com mais de 20 mil km<sup>2</sup> de área, distribuída em um sub-bacia (rio Taperoá) e três regiões (alto, médio e baixo paraíba).

O município de Areia está localizado na região imediata de Campina Grande- PB apresentando uma população de 22.633 habitantes (Censo, 2022), possui uma área territorial de 269,13 km<sup>2</sup> e localiza-se no planalto da Borborema, com relevo variado formado por morros, vales e várzeas podendo chegar a uma altitude superior a 600 m e com bioma mais importante, a Mata Atlântica.

O referido município possui seis unidades litoestratigráficas: Formação Serra dos Martins, Complexo São Caetano, Suíte Granítica Migmática, Formação Seridó, Complexo Riacho do Forno e Complexo Serrinha Pedro Velho (Barbosa e Furrier, 2008).

Para complementar a caracterização da área de estudo, com a relação entre a velocidade do ventos e a precipitação pluvial, a Tabela 1, mostra, de forma resumida e simplificada, o regime pluvial com os indicadores das médias, medianas e os desvio padrão, exclusivamente, para os meses da estação chuvosa, haja vista que esses locais têm esse período muito curto (menor que seis meses), no qual chove mais de 50% do total de chuva anual.

Tabela 1. Indicadores das médias, medianas e desvio padrão da chuva (DP), na estação chuvosa, com as respectivas durações e % em relação ao total mediano anual.

| Localidades         | Médias<br>(mm) | Medianas<br>(mm) | DP<br>(mm) | Durações<br>(meses) | %<br>(em relação ao total anual) |
|---------------------|----------------|------------------|------------|---------------------|----------------------------------|
| Areia               | 920,0          | 844,0            | 473,0      | mar-jul             | 68,5                             |
| Patos               | 619,0          | 492,0            | 488,0      | fev-mai             | 68,3                             |
| Sousa (São Gonçalo) | 599,0          | 552,0            | 381,0      | fev-mai             | 69,3                             |
| Campina Grande      | 533,0          | 494,0            | 318,0      | mar-jul             | 68,3                             |
| Monteiro            | 349,0          | 269,0            | 339,0      | fev-mai             | 51,1                             |
| Cabaceiras          | 217,0          | 160,0            | 218,0      | mar-jul             | 55,1                             |

Fonte: ALMEIDA, H. A. de. Dados não publicados, em 2021

### 3.2 Procedimentos metodológicos

Para realização do referido trabalho foram extraídos dados publicados em relatórios, artigos científicos, disponibilizados em sites e em outros tipos de periódicos, relacionados com o tema, energia eólica, extraídos de publicações e/ou diretamente dos seguintes sites: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET- <https://portal.inmet.gov.br/>), do Ministério de Minas e Energia (MME- <https://www.gov.br/mme/pt-br>), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL- <https://www.aneel.gov.br/>), Empresa de Pesquisa Energética (EPE- <https://www.epe.gov.br/pt>), da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA- <https://abeeolica.org.br>), Atlas do Potencial Eólica Brasileiro (<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download>), do Laboratório de Energia Eólica (<https://www.pucrs.br/politecnica/laboratorio-de-energia-eolica-lab-eolica>), do Balanço Energético Nacional 2023 (<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos>).

Para analisar o regime e o potencial da energia do vento, utilizou-se os dados medidos de direção e velocidade do vento, cedidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e coletados nas estações meteorológicas automáticas (EMAs), instaladas a 10 m de altura do solo e pertencentes às localidades de cinco regiões geográficas imediatas de: Campina Grande (Campina Grande, Areia e Cabaceiras); Monteiro (Monteiro); Patos (Patos); Sousa (São Gonçalo) e Mamanguape-Rio Tinto (Camaratuba-Mataraca).

Os dados de velocidade do vento foram retirados do banco de dados do INMET, do período de 01.01.2011-31.12.2020, disponíveis no site ([https:// portal.inmet.gov.br/](https://portal.inmet.gov.br/)).

#### 3.2.1 Procedimentos de coleta e análises estatísticas

As coletas dos dados anemométricos foram feitas utilizando-se um módulo de aquisição, processamento e armazenamento de dados (Datalogger), contendo um “software” que fazia a leitura dos sensores e controle dos módulos conectados ao sistema. A extração dos dados e os formatos de saída foram feitos utilizando-se a planilha Excel.

Os dados referem-se às localidades de Areia (6,96° S; 35,70° W e 573 m), Cabaceiras (7,49° S; 36,29° W e 382 m), Campina Grande (7,23° S; 35,88° W e 512 m); Camaratuba (Mataraca- 6,60° S; 35,05° W e 6 m), Monteiro (7,89° S; 37,11° W e 609 m); Patos (7,89° S; 37,11° W e 221 m) e São Gonçalo (Sousa; 6,76 ° S; 38,21° W e 220 m).

As análises dos dados foram feitas, utilizando-se a estatística descritiva, para as escalas temporais e espaciais. Com os dados mensais e anuais foram calculadas a medida de tendência central (média), as variabilidades horárias, mensais e sazonais da velocidade do vento, incluindo-se a energia cinética e a densidade de potência eólica (DPE).

Os gráficos foram confeccionados na forma de histograma de frequência, com análises comparativas e descritivas da variabilidade do regime de ventos no estado da Paraíba com de outros estados.

Com base no conceito da expressão latina (“per capita”) e para tentar uniformizar os indicadores eólicos dos nove Estados nordestinos, adotou-se conceito semelhante, dividindo-os pela área superficial ( $\text{km}^2$ ) ou por habitante de cada Estado, o que resultou no indicador eólico por  $\text{km}^2$  e/ou por habitante.

Os dados de velocidade do vento das sete localidades foram tabulados, organizados e agrupados na planilha Excel, nas escalas horária, mensal e sazonal (por estação), em intervalos de 6 em 6 horas: 00:00-05:00 h; 06:00-11:00 h, 12:00-17:00 h e 18:00-23:00 h.

As médias temporais da velocidade do vento a 10 m de altura foram apresentadas, graficamente, nas escalas diária, mensal e sazonal e posteriormente foram feitas as interpolação para às alturas de 50 e 100 m, por ser estas a altura do aerogerador.

A direção do vento foi determinada utilizando-se a planilha excel, que permitiu elaborar a rosa dos ventos, a partir de dados medidos de direção do ventos, em graus, cujas faixas, com as respectivas direções são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2. Pontos cardeais, colaterais e intervalos de direções do vento.

| Abreviaturas | Direções | Intervalo da direção. |
|--------------|----------|-----------------------|
| N            | Norte    | 337,5° a 22,5°        |
| NE           | Nordeste | 22,5° a 67,5°         |
| E            | Leste    | 67,5° a 112,5°        |
| SE           | Sudeste  | 112,5° a 157,5°       |
| S            | Sul      | 157,5° a 202,5°       |
| SW           | Sudoeste | 202,5° a 247,5°       |
| W            | Oeste    | 247,5° a 292,5°       |
| NW           | Noroeste | 292,5° a 337,5°       |

Fonte: Elaborada pelo autor em 2024

### **3.2.2 Determinação da energia cinética do vento e da densidade de potência**

O perfil horário do vento, na escala horária, foi estabelecido mediante critério estatístico, sendo determinados as médias, medianas e desvio padrão, horários da velocidade do vento ( $V_{10}$ ), a 10 m de altura do solo.

Com as medianas diárias foram determinadas as médias mensais e as equivalentes aos meses das estações do ano. A energia cinética ( $E_c$ ) presente em uma determinada massa de ar ( $m$ ) em movimento a uma velocidade ( $v$ ) foi determinada pela equação simplificada.

$$EC = \frac{1}{2} m V^2 \quad (1)$$

Sendo: EC = Energia cinética (J);

m = massa de ar (kg);

V = Velocidade do vento (m/s).

A energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento), convertendo-a em energia elétrica, utilizando-se aerogeradores nas alturas de 50 e 100 m, que converte o torque em energia elétrica, foi calculada seguindo os procedimentos propostos por Hansen (2016).

As estimativas da velocidade do vento ( $m.s^{-1}$ ), a 50 ( $h_{50m}$ ) e 100 m ( $h_{100m}$ ) de altura do solo, equivalente a altura do gerador, foram determinadas utilizando-se a equação da Lei de Potência, proposta por (Jangamshetti e Rau, 1999), adotando-se o coeficiente da camada limite ( $\alpha$ ) de 0,18; admitindo-se um terreno plano).

$$V_{50m} (m.s^{-1}) = V_{2m} (m.s^{-1}) \times \left( \frac{h_{50m}}{h_{2m}} \right)^\alpha \quad (2)$$

$$V_{100m} (m.s^{-1}) = V_{2m} (m.s^{-1}) \times \left( \frac{h_{100m}}{h_{2m}} \right)^\alpha$$

A densidade de potência eólica (DPE) foi determinada utilizando-se a potência disponível, sem considerar as características do aerogerador, para a altura de 100 m, conforme proposição de Silva (2011) e mediante a expressão proposta por Manwell (2002):

$$DP = 0,5 \times \rho V^3 \quad (3)$$

Sendo: DP = Densidade de potência disponível no vento,  $W.m^{-2}$ ;

P = Massa específica do ar ( $kg/m^3$ );

V = Velocidade do vento (m/s).

Para estimar a densidade do ar, que varia em função da altitude e temperatura, utilizou-se a metodologia proposta por Custódio (2009), mediante a equação:

$$\rho = \frac{353,4 \left( 1 - \frac{z}{45271} \right)^{5,2624}}{273,15 + t} \quad (4)$$

Os cálculos, as análises de todos os dados e elaboração de figuras e tabelas foram feitas utilizando a planilha eletrônica Excel.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterização do regime de vento à superfície no Estado da Paraíba

O vento é ar em movimento causado pelo aquecimento desigual da superfície terrestre, podendo ser definido de maneira simplificada como o movimento de deslocamento das massas de ar de zonas de alta pressão para zonas de baixa pressão.

O vento é extremamente importante na vida humana, influência nas estruturas das cidades, na aviação, navegação, agricultura e na geração de energia limpa. No meio urbano é um elemento importante na dispersão de poluentes na atmosfera.

A crescente conscientização que os combustíveis fósseis geram impactos ambientais negativos, os governos e a sociedade, em geral, clamam pela substituição dessa fonte de energia, considerada não renováveis, por outras fontes de energia com pequena emissão de carbono, das quais a energia eólica, gerada através da força dos ventos, por ser a mais acessível.

Neste contexto, destaca-se que a caracterização do regime de vento é de extrema importância para o planejamento ambiental e, especialmente, para estabelecer as diferentes potencialidades do regime de vento próximo à superfície. Caracterização essa, que concorda-se com a maioria dos autores, dentre eles, Carvalho (2006), no qual o regime de vento influencia na dispersão de poluentes nas cidades e/ou nas regiões metropolitanas, com Sahin et al., (2005) e Gokçek *et al.*, (2007) que a energia dos ventos potencializa a geração de energia eólica na Turquia, como em outros recortes geográficos.

Há disponibilidade de energia dos ventos, na maioria dos estados brasileiros, com destaque para o Nordeste onde se encontra a maior disponibilidade dessa fonte. Este potencial, faz com que a energia eólica descentralizada possa ser uma alternativa para diminuir os gargalos enfrentados na distribuição das redes de abastecimento de energia elétrica.

Essa descrição corrobora-se a Qoaider e Steinbrecht (2010), que a eletrificação rural tem sido um instrumento efetivo para o desenvolvimento sustentável. No entanto, a falta de energia elétrica faz com que o uso de técnicas agrícolas como a irrigação sejam limitadas.

#### 4.1.2 Regimes temporais (horários, mensais e sazonais) da velocidade do vento

Para estabelecer as principais características da velocidade e da direção do vento há necessidade de se conhecer o perfil natural, que varia de acordo com as condições do tempo e das características de rugosidade da superfície. O vento, sob a escala macro meteorológica, pode ser traduzido pelo movimento das massas de ar, as quais se movimentam em função do gradiente de pressão.

Na camada mais próxima a superfície, a velocidade é desacelerada pela rugosidade

superficial, em função do surgimento de uma camada, denominada de camada limite atmosférica, que equivale a uma espessura entre 100 e 3000 m acima do solo. Concorde-se com Moreira *et al.*, (2007) , e outros, que a velocidade do vento aumenta com a altura, em virtude da diminuição do efeito da rugosidade da superfície.

Neste contexto, a velocidade do vento passa a ser diretamente proporcional à altura, cujo aproveitamento para a instalação de usinas de geração eólica, pode ser propício em função dos efeitos crescentes na velocidade do vento proporcionados por elevações topográficas, tais como: cumes e penhascos.

A velocidade e a direção dos ventos têm uma variabilidade temporal, nas escalas horárias, diárias e interanuais. O vento pode ser mais intenso em algumas áreas, aumentar sua intensidade em alguns meses ou estações do ano ou pode aumentar apenas durante algumas horas do dia e assim sucessivamente, condições essas que corrobora-se a Silva (2003).

Durante os dias ensolarados, a superfície do continente se aquece mais rapidamente que a do oceano adjacente. Como consequência surge uma faixa de pressão mais alta sobre o litoral, acarretando o desenvolvimento de correntes convectivas ascendentes sobre o continente, as quais geram nuvens convectivas. Acima do oceano a pressão é elevada, face à menor temperatura da água à superfície. Dessa maneira, se estabelece uma circulação fechada, com movimentos ascendentes na costa e subsidentes sobre o mar.

Corrobora-se a Almeida (2016) que o regime de ventos na região tropical, incluindo-se o Estado da Paraíba é influenciado pelos ventos alísios, os quais fazem parte da circulação global da atmosfera. Próximo ao solstício de inverno, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) migra para o hemisfério norte e, nessa época, os ventos alísios são mais intensos sobre o estado, definindo todo um padrão de circulação local.

Concorde-se que a descrição e o comportamento da velocidade do vento pode ser ajustados pela distribuição de Weibull, cujo modelo apresenta um bom ajuste para os dados de velocidade do vento, como indicado por Lun e Lam (2000); Justus *et al.*, (1978).

Estabelecer o perfil logarítmico do vento, com a finalidade de se obter um prognóstico do vento, torna-se necessário para estimar a velocidade, em diferentes alturas, utilizando-se dados medidos em anemômetros instalados, em estações meteorológicas, a 10 m de altura.

Em virtude disto, a velocidade do vento aumenta à medida que se afasta da superfície, condição essa que concorda com Dutra (2007), da importância de determinar a altura  $h$ , na qual a velocidade é maior, para posicionar a turbina do aerogerador.

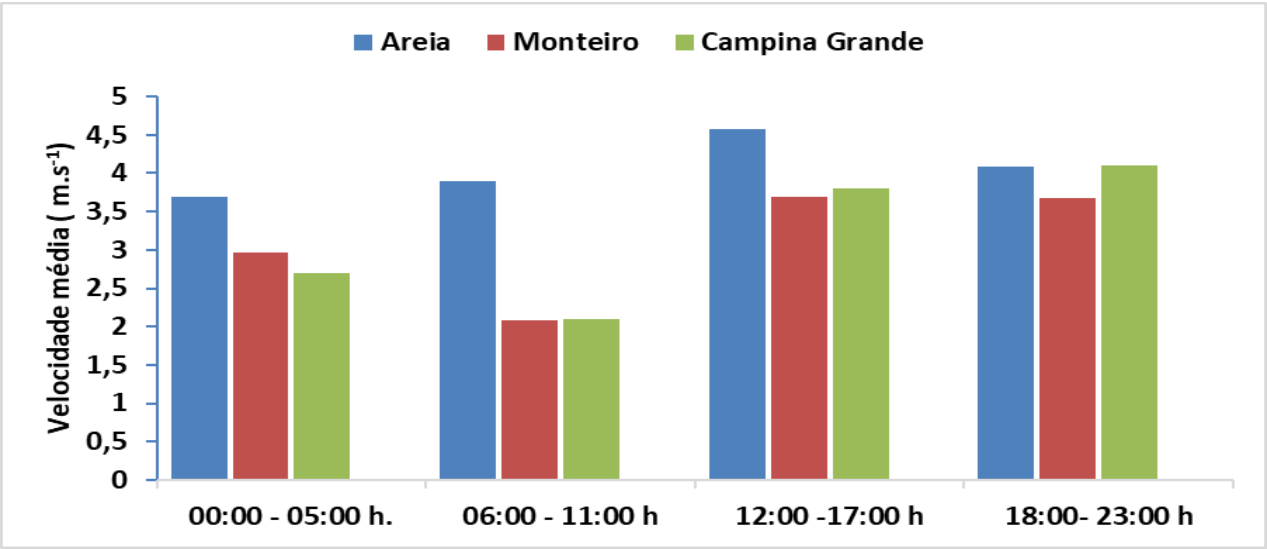
O vento é o ar em movimento decorrente de um aquecimento irregular da atmosfera,

pela irradiância solar. Essa desigualdade espacial e temporal resulta que as regiões tropicais anuais recebem mais energia solar que as polares.

A camada mais próxima à superfície é a mais influenciada pelas trocas de energia e massa e acaba sendo condicionada pela topografia e a rugosidade do solo, que resultam no perfil logaritmo da velocidade do vento.

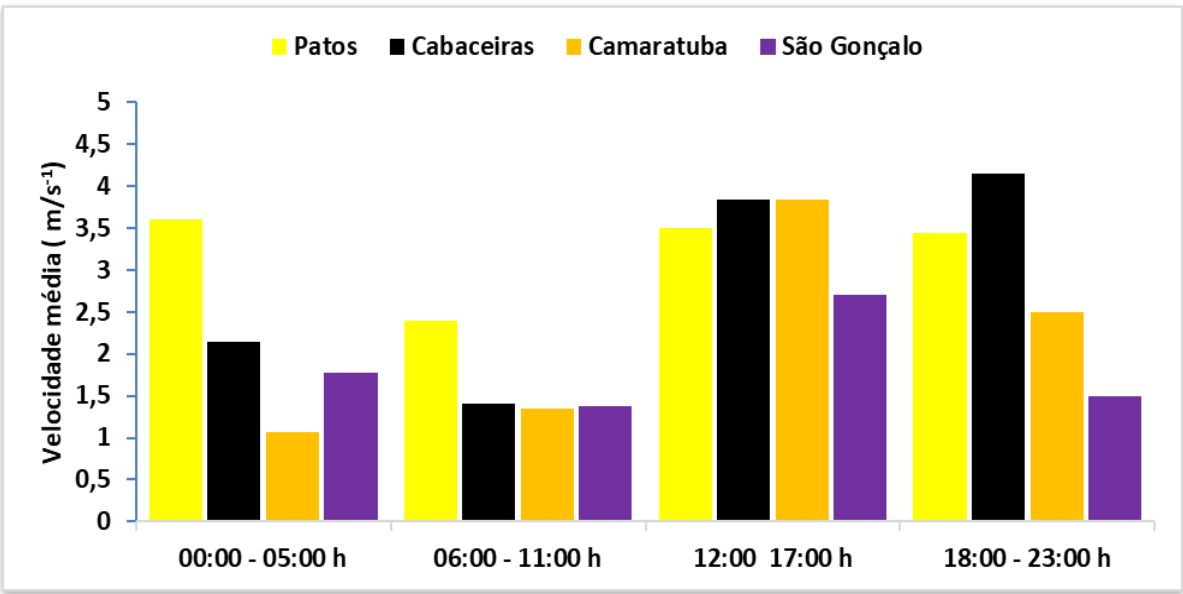
As Figuras 6 e 7 mostram, respectivamente, as médias da velocidade do vento, em intervalos horários de 6 horas, para as localidades de Areia, Cabaceiras, Camaratuba, Campina Grande, Monteiro e Patos e São Gonçalo, referentes ao período: 01.01.2011 a 31.12.2020.

Figura 6. Médias da velocidade do vento, em intervalos de 6 em 6 horas, sequencialmente, para Areia, Monteiro e Campina Grande.



Fonte: dados da pesquisa e elaborada pelo autor em 2024

Figura 7. Médias da velocidade do vento, em intervalos de 6 horas em 6 horas, sequencialmente, para Patos, Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalo.



Fonte: dados da pesquisa e elaborada pelo autor em 2024

Visualiza-se (Figura 6), que as maiores velocidades do vento ocorrem nos períodos entre 12:00 - 17:00h e 18:00 - 23:00h nas cidades de Monteiro e Campina Grande com  $3,4 \text{ m.s}^{-1}$  a cidade de Areia apresenta ventos mais constantes durante todo o dia.

Cabe destacar que em Campina Grande os ventos são mais fortes ( $4,1 \text{ m.s}^{-1}$ ) no período noturno (18:00 - 23:00h), já Areia apresenta ventos mais fortes ( $4,5 \text{ m.s}^{-1}$ ) durante o período vespertino (12:00 - 17:00h). As menores velocidades do vento ocorrem no período matutino (00:00 - 05:00h e 06:00 - 12:00h). Já em Areia os ventos são bastante fortes mesmos nos períodos de menores velocidades ( $3,7$  e  $3,9 \text{ m.s}^{-1}$ ) no período matutino

Mesmo mantendo essa mesma proporcionalidade entre as três cidades, os indicadores de velocidade em Areia são bem maiores, com média geral de  $4,06 \text{ m.s}^{-1}$ , contra  $3,10 \text{ m.s}^{-1}$  em Monteiro e  $3,17 \text{ m.s}^{-1}$  em Campina Grande. Destaca-se, ainda, que os turnos vespertinos e noturnos, as velocidades do vento foram maiores que os do matutino. Esses perfis horários corroboram aos resultados encontrados por Araújo (2022) e Sousa (2020) que constataram que as maiores velocidades médias são encontradas no intervalo horário em que ocorre um maior aquecimento da terra pelo sol.

A variabilidade horária da velocidade do vento para as localidades de Patos, Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalo (Figura 7) permite concluir que as maiores velocidades do vento apresentam-se no período entre 12:00 - 17:00h seguido por o intervalo de 18:00 - 23:00h, destacando-se que na localidade de Patos, observou-se valores maiores de velocidade do vento durante à madrugada (00:00 - 05:00h) e também no período matutino (06:00 - 11:00h).

A localidade de Cabaceiras apresenta elevadas velocidades médias de vento nos períodos vespertino e noturno, já em Patos os ventos são bem distribuídos, apresentando velocidades elevadas no período de 12:00- 17:00 h, apenas no período matutino a velocidade média apresenta um ligeira queda com  $1,41 \text{ m.s}^{-1}$  nesse intervalo horário.

Destaca-se, entretanto, que as maiores velocidades do vento e consequentemente a maior geração de energia eólica ocorrem no período das 12:00- 23:00 h, sendo este o período de maior consumo de energia elétrica segundo a ANEEL. Dessa forma, a produção de energia eólica é de suma importância para garantir o abastecimento nos horários que ocorrem maior consumo.

Para uma melhor compreensão da variação horária da velocidade do vento, a Tabela 3, sumariza, com os horários e os meses com maiores e menores velocidades do vento e as respectivas direções predominantes.

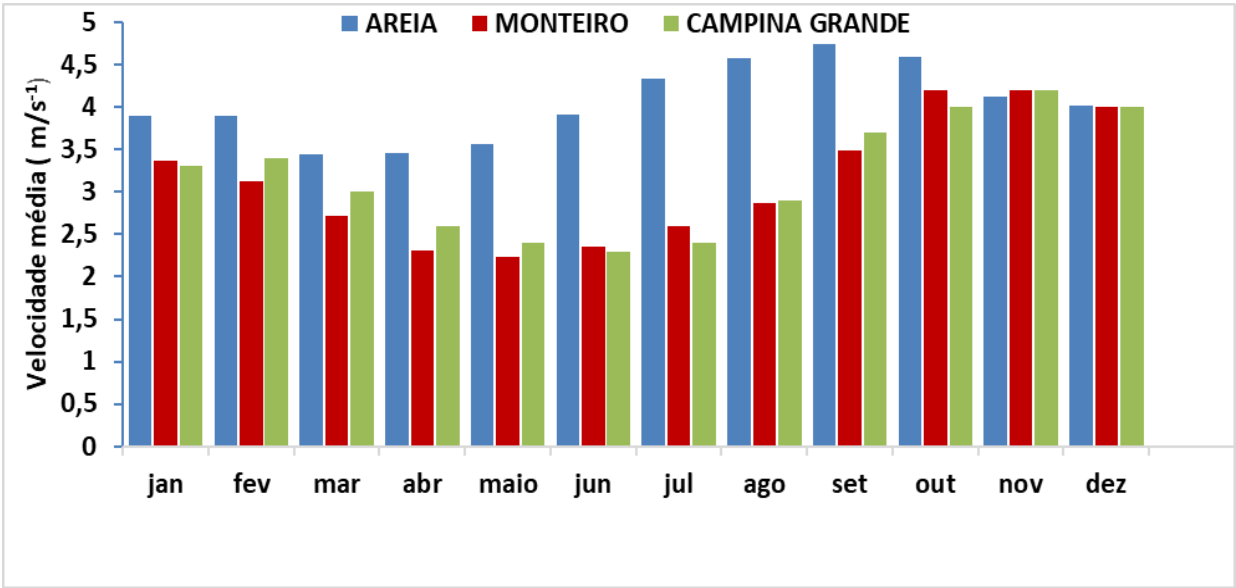
Tabela 3. Síntese das principais características do regime de ventos, por intervalos horários, de sete localidades paraibanas: médias do período de 2011 a 2020.

| Localidades    | Horários Maiores velocidades | Mês      | Horários Menores velocidades | Mês   | Direção predominante |
|----------------|------------------------------|----------|------------------------------|-------|----------------------|
| Areia          | 12-17h                       | setembro | 00 – 05h                     | abril | Sudeste              |
| Campina Grande | 18-23h                       | novembro | 06-11h                       | junho | Sul                  |
| Monteiro       | 12-17h                       | outubro  | 06-11h                       | maio  | Leste                |
| Patos          | 00-05h                       | outubro  | 06-11h                       | abril | Leste                |
| Cabaceiras     | 18-23h                       | outubro  | 06-11h                       | junho | Sul                  |
| Camaratuba     | 12-17h                       | setembro | 00-05h                       | abril | Sudeste              |
| São Gonçalo    | 12-17h                       | setembro | 06-11h                       | abril | Leste                |

Fonte: Elaborada pelo autor em 2024.

As médias mensais da velocidade do vento, para as localidades que compõem a região geográfica imediata de Campina Grande são apresentadas na Figura 8.

Figura 8. Médias mensais da velocidade do vento em Areia, Monteiro e Campina Grande, PB.



Fonte: dados da pesquisa, elaborada pelo autor, em 2024.

Quanto à variabilidade mensal da velocidade do vento verifica-se, que os histogramas de frequência da velocidade do vento tendem a serem crescentes entre maio a agosto e decrescente nos meses seguintes.

Visualizando-se, a Figura 8, percebe-se que as dispersões dos valores observados em relação às medianas mensais são relativamente pequenas. Essa condição se deve a escala

temporal (mês), utilizado no cálculo da média. Mesmo assim, os resultados apresentados mostram uma assimetria no modelo de distribuição, embora a irregularidade seja muito menor do que fosse para a chuva, por exemplo.

Fazendo-se os acumulados diários, para cada mês do ano, o histograma da Figura 14 apresenta as médias diárias mensais, das velocidades medidas a 10 m de altura do solo, nas localidades de Areia, Monteiro e Campina Grande, respectivamente.

As maiores velocidades médias mensais da velocidade do vento ocorrem em Areia no mês de setembro ( $4,85 \text{ m.s}^{-1}$ ), em Monteiro a maior velocidade média é verificada nos meses de outubro e novembro ( $4,2 \text{ m.s}^{-1}$ ), em Campina Grande a maior velocidade média mensal foi encontrada em novembro ( $4,2 \text{ m.s}^{-1}$ ).

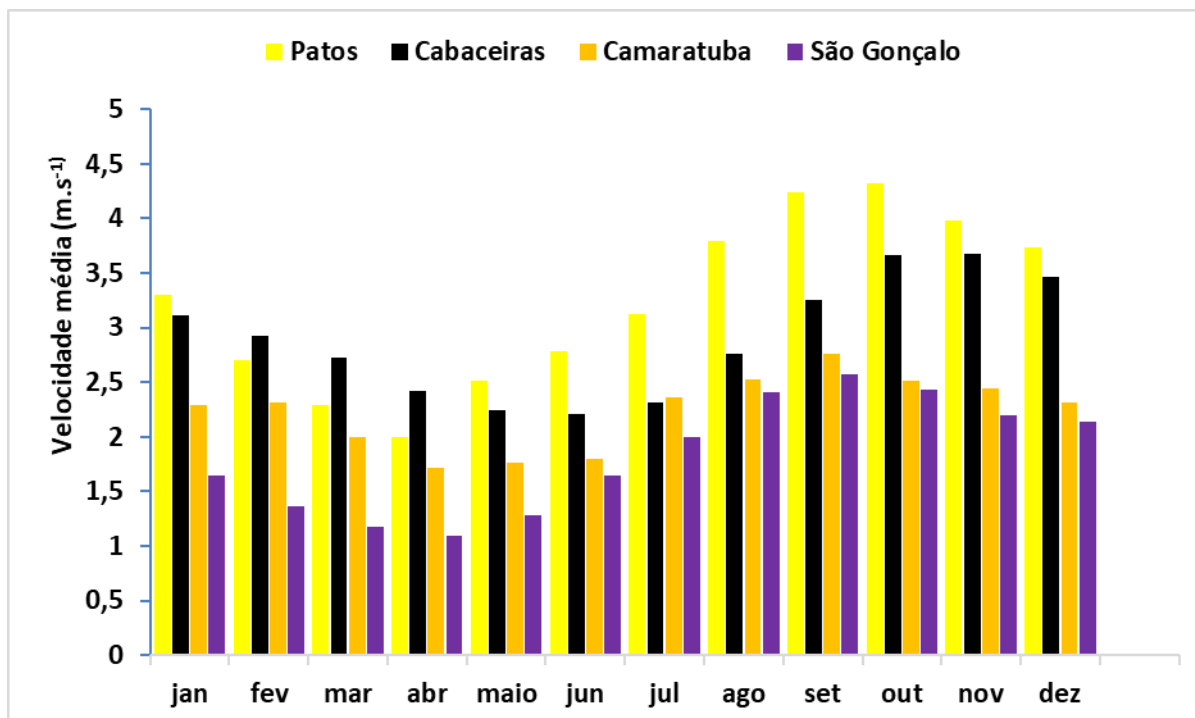
Os menores valores de velocidade média mensais foram verificados em Areia no mês de março ( $3,4 \text{ m.s}^{-1}$ ), em abril, em Monteiro ( $2,3 \text{ m.s}^{-1}$ ) e em junho, em Campina Grande ( $2,3 \text{ m.s}^{-1}$ ). Os dados de velocidade do vento em Areia mostram que no período de agosto a outubro os ventos são bastante fortes com velocidades médias superiores a  $4,5 \text{ m.s}^{-1}$ , todavia os meses de março a maio apresentam baixas velocidades de vento, apresentando médias inferiores a  $3,5 \text{ m.s}^{-1}$ .

Comparando-se os dois perfis de velocidades do vento, verifica-se que as médias mensais- diárias- em  $\text{m.s}^{-1}$ , diferem entre si, oscilando-se entre 3,4 (março) e 4,8 (setembro), em Areia, contra 2,2 (março) e 4,2 (outubro-novembro), em Monteiro, já em Campina Grande os valores oscilam de 2,5 (junho) para 4 e  $4,2 \text{ m.s}^{-1}$  nos meses de outubro, novembro e dezembro.

A comparação em si demonstra que as velocidades dos ventos têm variações espaciais (local) e temporais (dia e mês). Esses resultados concordam, em parte, com os valores encontrados por Lima (2011), para outras localidades do Estado da Paraíba.

A Figura 9 apresenta as médias mensais da velocidade do vento, para as localidades de Patos, Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalo. Observa-se que as maiores velocidades, predominam, na primavera (setembro, outubro e novembro) e os menores, no outono (março, abril e maio).

Figura 9. Médias mensais da velocidade do vento em Patos, Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalo, PB.



Fonte: dados da pesquisa, elaborada pelo autor, em 2024.

Visualiza-se (Figura 9) que as maiores velocidades do vento ocorrem nos meses da primavera e os menores no outono-inverno, com os seguintes indicadores: Patos e São Gonçalo, em abril, com 2,0 e 1,1 m.s<sup>-1</sup>, Cabaceiras, em junho (2,2 m.s<sup>-1</sup>) e Camaratuba, em março (1,7 m.s<sup>-1</sup>).

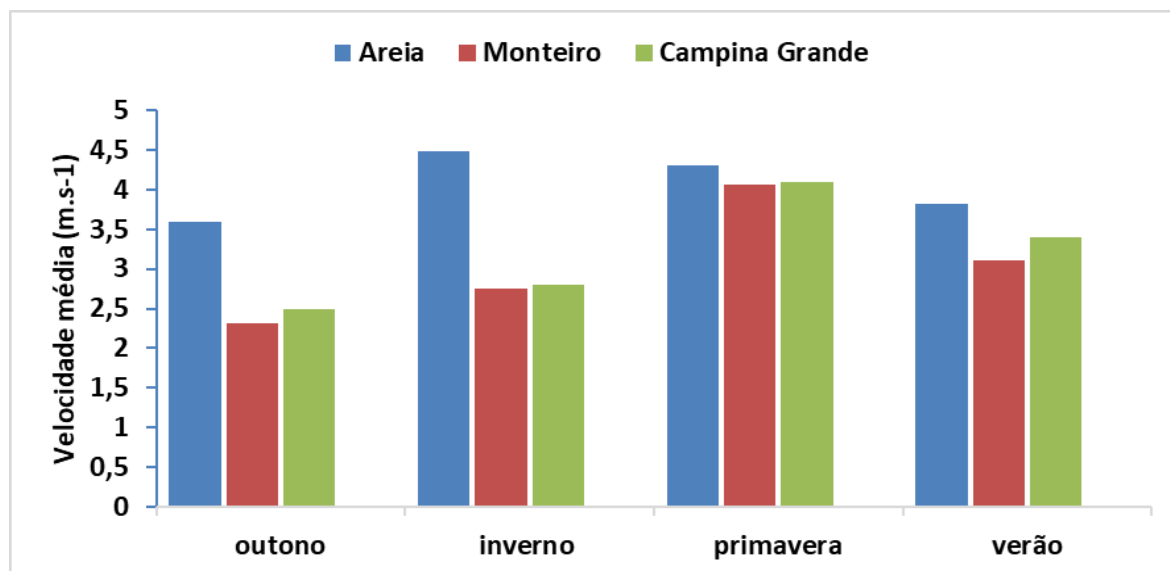
Percebe-se, entretanto, que no segundo semestre do ano as velocidades médias do vento são bem superiores que as do primeiro. Essa característica do vento predominante não apenas ocorre na Paraíba, mas em outros estados do Nordeste. Essa característica pode estar associada ao aumento da irradiância solar e diminuição da chuva, que ocorre entre o final do inverno e a primavera. Esse regime de ventos predominante na Paraíba corrobora aos resultados encontrados para outras localidades do Nordeste do Brasil por Carneiro (2015) e Da Cruz (2017)

Neste contexto, percebe-se (Figuras 8 e 9), que as maiores velocidades do vento ocorrem na primavera, na maioria das localidades pesquisadas, com destaque para Areia, que apresenta velocidades médias de 4,5 m.s<sup>-1</sup>, a 10 m de altura do solo, embora tenha registrado velocidades altas distribuídas em todos os meses do ano.

Percebe-se de uma forma geral que as cidades de Areia, Monteiro e Campina Grande apresentam maiores valores de velocidade média do vento, já os menores valores de velocidade média são encontrados em Camaratuba e São Gonçalo.

De posse das médias mensais da velocidade do vento, possibilitou os respectivos acúmulos por estação do ano, como mostram as Figuras 10 e 11.

Figura 10. Médias sazonais da velocidade do vento em Areia, Monteiro e Campina Grande

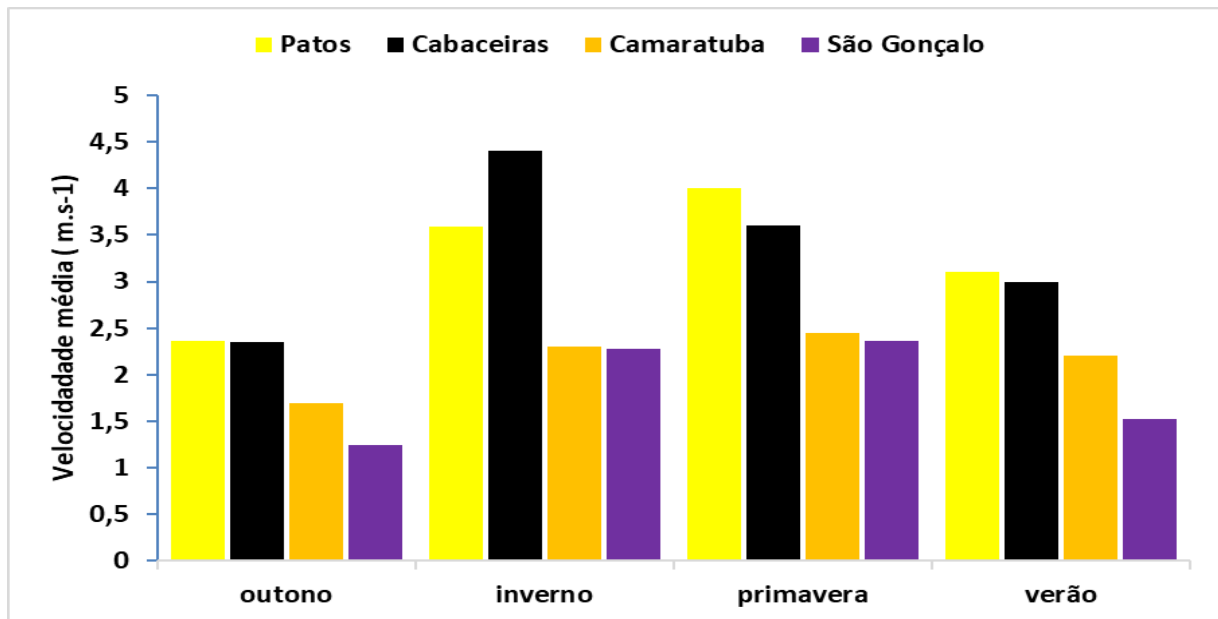


Fonte: dados da pesquisa, elaborada pelo autor, em 2024.

Em relação a variabilidade da velocidade do vento por estações do ano (Figuras 10 e 11) percebe-se que os ventos são mais fortes na primavera em Campina Grande ( $4,1 \text{ m.s}^{-1}$ ) e em Monteiro ( $4 \text{ m.s}^{-1}$ ). Já em Areia os ventos são mais fortes no inverno ( $4,5 \text{ m.s}^{-1}$ ).

Os menores valores de velocidade média ocorrem no outono em todas as cidades (Figura 10) com Areia apresentando uma velocidade média de  $3,6 \text{ m.s}^{-1}$ , Monteiro com  $2,3 \text{ m.s}^{-1}$  e Campina Grande com  $2,5 \text{ m.s}^{-1}$ .

Figura 11. Médias sazonais da velocidade do vento em Patos, Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalo.



Fonte: dados da pesquisa, elaborada pelo autor, em 2024.

Comparando-se as médias da velocidade da Figura 10 com a Figura 11, verifica-se que as maiores médias de velocidade do vento ocorrem na primavera seguida do inverno e verão sendo o outono a estação que apresenta as menores velocidades médias.

Destaca-se que em Cabaceiras os ventos são mais fortes no período do inverno contrastando com a maioria das localidades pesquisadas que apresentam os ventos mais fortes na primavera.

As maiores velocidades de vento (Figura 11) foram encontradas na primavera em Patos, Camaratuba e São Gonçalo com velocidades médias de 4, 2,45 e 2,36 m.s<sup>-1</sup>, respectivamente. Em Cabaceiras a maior velocidade média ocorreu no inverno com 4,4 m.s<sup>-1</sup>.

As menores velocidades para cada cidade ocorreram no outono em Patos (2,36 m.s<sup>-1</sup>), Cabaceiras (2,35 m.s<sup>-1</sup>), Camaratuba (1,7 m.s<sup>-1</sup>) e São Gonçalo (1,25 m.s<sup>-1</sup>).

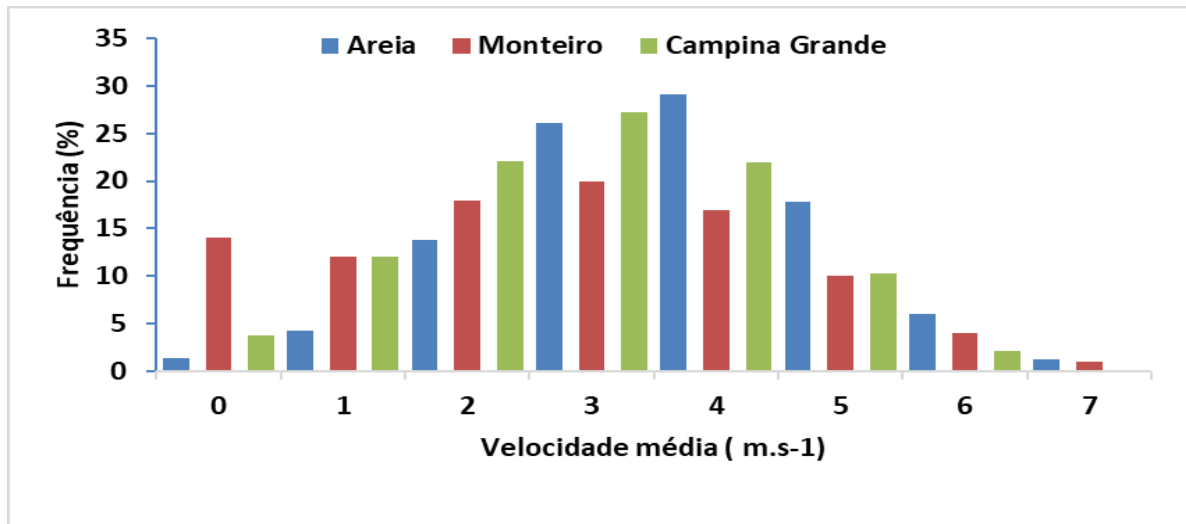
Essa característica sazonal do vento na Paraíba e também em toda a região Nordeste onde os ventos com maiores velocidades ocorrem no segundo semestre do ano, particularmente na primavera é importante na geração de energia eólica com o objetivo de garantir a complementaridade com a geração das hidrelétricas, uma vez que no segundo semestre do ano os reservatórios de água, já estão com baixos níveis de armazenamento de água e consequentemente gerando menos energia elétrica.

Percebe-se que dentre as localidades pesquisadas a que apresenta maior velocidade média de vento é Areia, seguido por Campina Grande, Patos e Monteiro. Esses maiores valores de velocidade do vento podem ser influenciados pelo relevo (maior altitude) do planalto da

Borborema, incluindo-se a Serra de Santa Luzia.

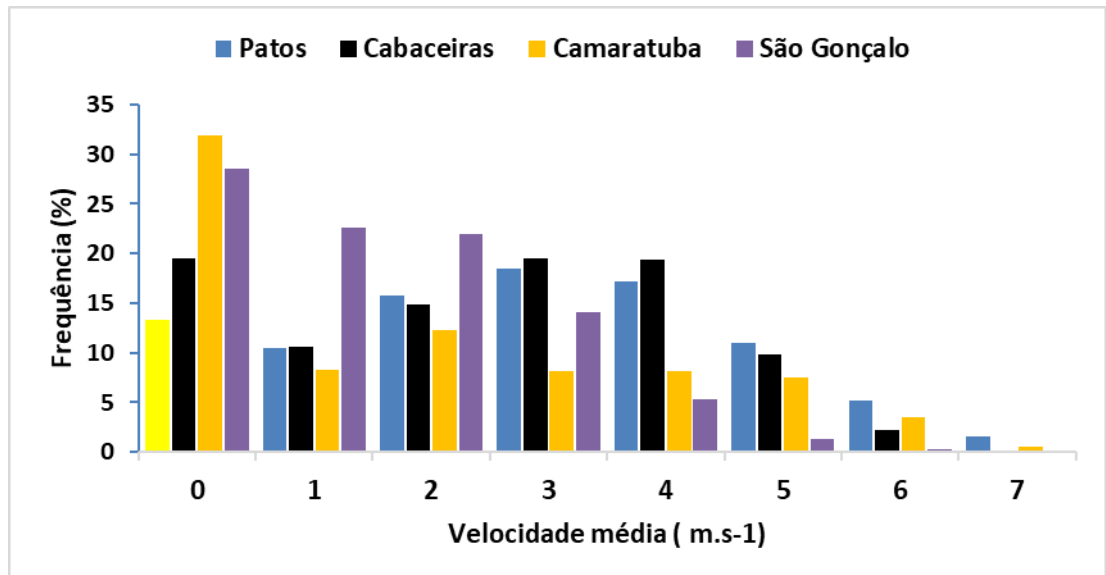
Para quantificar as repetições de velocidade do vento, as Figuras 12 e 13 mostram os histogramas de frequência relativa, para valores individuais de velocidades. Observa-se (Figura 12), que a maioria dos ventos têm velocidade entre 3 a 4 m.s<sup>-1</sup>, com uma frequência relativa de 55%. Isso demonstra, entretanto, que há elevado potencial de velocidade.

Figura 12. Histograma de frequência dos ventos em Areia, Campina Grande e Monteiro.



Fonte: dados da pesquisa, elaborada pelo autor, em 2024.

Figura 13. Histograma de frequência dos ventos em Patos, Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalo.



Fonte: dados da pesquisa, elaborada pelo autor, em 2024.

Destaca-se, ainda, que em Areia, por ex., mais de 20% dos dados analisados de ventos têm velocidades entre 5 e 7 m.s<sup>-1</sup>. Comparando-se com Monteiro e Campina Grande, verificou-se que velocidades do vento iguais ou superiores a 5 m.s<sup>-1</sup> foram em torno de 15% e 12%, respectivamente.

A principal característica observada no regime de ventos em Areia é a constância, durante todo o ano, na qual as médias de velocidade do vento são menores até a faixa de  $3 \text{ m.s}^{-1}$ .<sup>1</sup> Esses resultados coincidem com os mesmos encontrados por Lima (2011).

Numa análise simples e comparativa, verifica-se que em Monteiro, há ausência de ventos em cerca de 14% dos dados observados e menos de 2% têm velocidade superior a  $7 \text{ m.s}^{-1}$ .<sup>1</sup> Embora a maior frequência (56,0%) seja para velocidade entre 3 e  $5 \text{ m.s}^{-1}$ . Já, nas faixas entre 5 e  $6 \text{ m.s}^{-1}$  correspondem a 13% e 14% e superior a  $6 \text{ m.s}^{-1}$  não chegam a representar 5% dos dados analisados.

Na cidade de Campina Grande (Figura 12), a velocidade que ocorre com mais frequência é na faixa entre 3 e  $4 \text{ m.s}^{-1}$ , com mais de 20% e no intervalo de 5 a  $6 \text{ m.s}^{-1}$  têm frequência de ocorrência menor do que em Monteiro e Areia.

De forma geral, o vento nas localidades estudadas apresenta a maior frequência de ocorrência para valores de velocidade no intervalo entre 3 e  $5 \text{ m.s}^{-1}$ , com exceção de Camaratuba e São Gonçalo que apresentam a maior parte de dados de vento entre 1 e  $2 \text{ m.s}^{-1}$ .

Análises semelhantes para as três localidades mostradas na Figura 13, verifica-se uma variação de frequência entre 13 e 32 %, com ausência de vento (velocidade nula), com percentuais máximos para Camaratuba e São Gonçalo. Em Patos e Cabaceiras os ventos mais frequentes são entre 3 e  $4 \text{ m.s}^{-1}$  ( 36% e 38%, respectivamente), Camaratuba e São Gonçalo apresentam ventos mais frequentes entre 1 e  $2 \text{ m.s}^{-1}$  (20% e 43%). Ventos superiores a  $5 \text{ m.s}^{-1}$  são menos frequentes, não chegando a representar 20% dos dados observados.

Em síntese, os maiores valores de velocidade do vento (de 3 a  $4 \text{ m.s}^{-1}$ ) são frequentemente encontrados nas cidades de Areia, Campina Grande, Patos, Cabaceiras e Monteiro, nas demais localidades pesquisadas os ventos mais frequentes são no intervalo de 1 a  $2 \text{ m.s}^{-1}$ . Destaca-se, entretanto, que essas velocidades equivalem à altura de 10 m do solo e não nas alturas dos aerogeradores.

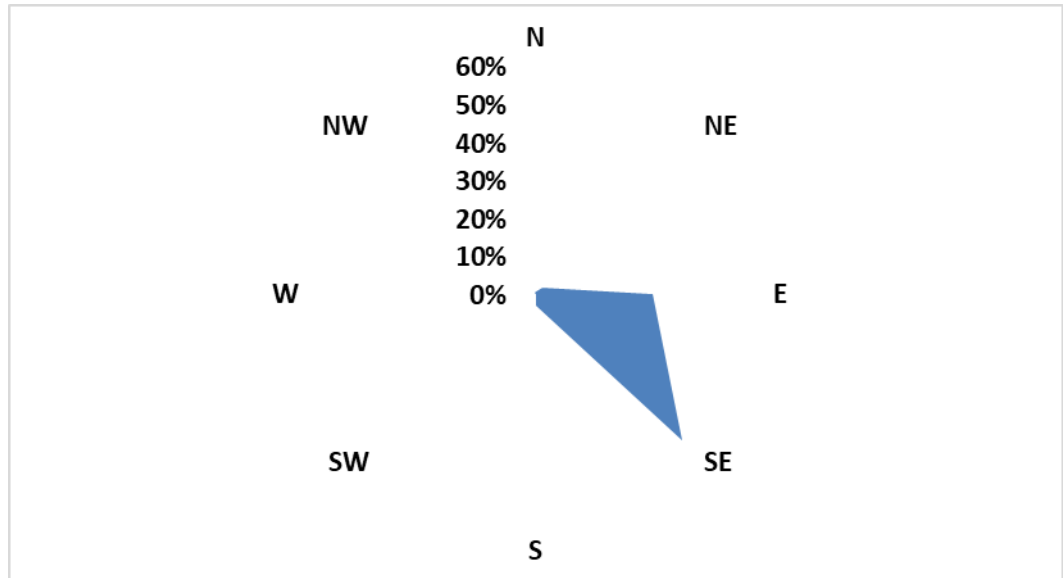
#### **4.1.3 Principais características da direção do vento no Estado da Paraíba.**

Outra variável importante no estudo de potencial eólico local é a direção do vento, porque esse indicativo permite planejar de forma adequada a instalação das turbinas eólicas, afim de maximizar o aproveitamento do vento. Assim sendo, o conhecimento da direção predominante dos ventos pode fornecer adequado subsídio para o aproveitamento eólico como fonte alternativa de energia.

As frequências de direções do vento para as cidades de Areia, Cabaceiras, Campina

Grande, Camaratuba, Monteiro, Patos e São Gonçalo são apresentadas sequencialmente nas Figura 14, 15, 16, 17, 18, 19 e 20.

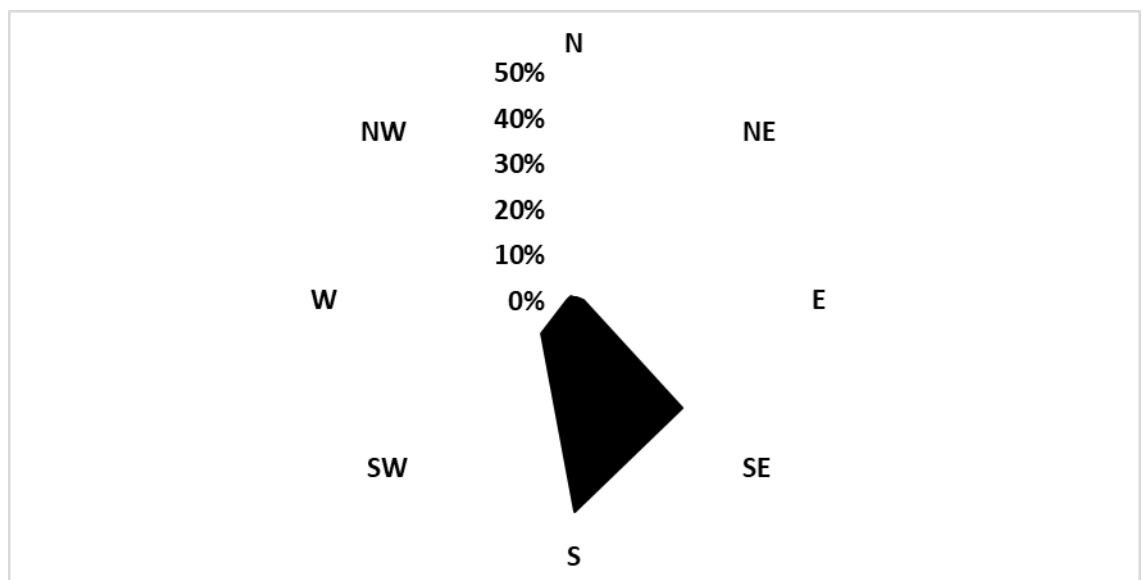
Figura 14. Distribuição de frequência das direções predominantes do vento em Areia, PB.



Fonte: dados da pesquisa, elaborado pelo autor, 2023

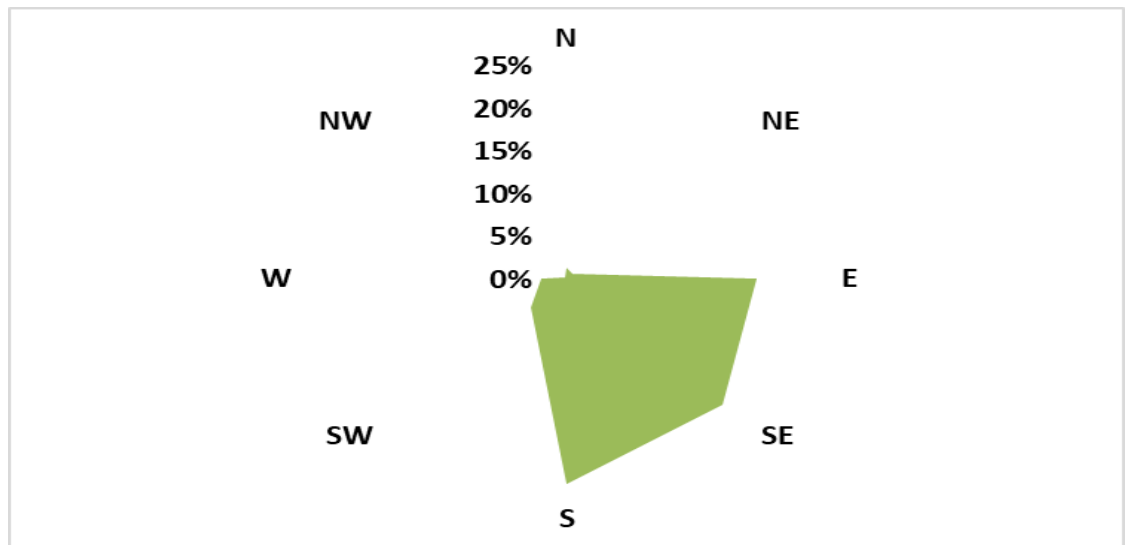
Observa-se que a frequência predominante é de Sudeste, com 54,0 %, seguido de Leste com 31,0%. As demais direções apresentaram valores muito baixos, ficando entre 1 e 3% dos dados observados.

Figura 15. Distribuição de frequência das direções predominantes do vento em Cabaceiras, PB.



Fonte: dados da pesquisa, elaborada pelo autor, em 2023.

Figura 16. Distribuição de frequência das direções do vento em Campina Grande, PB.



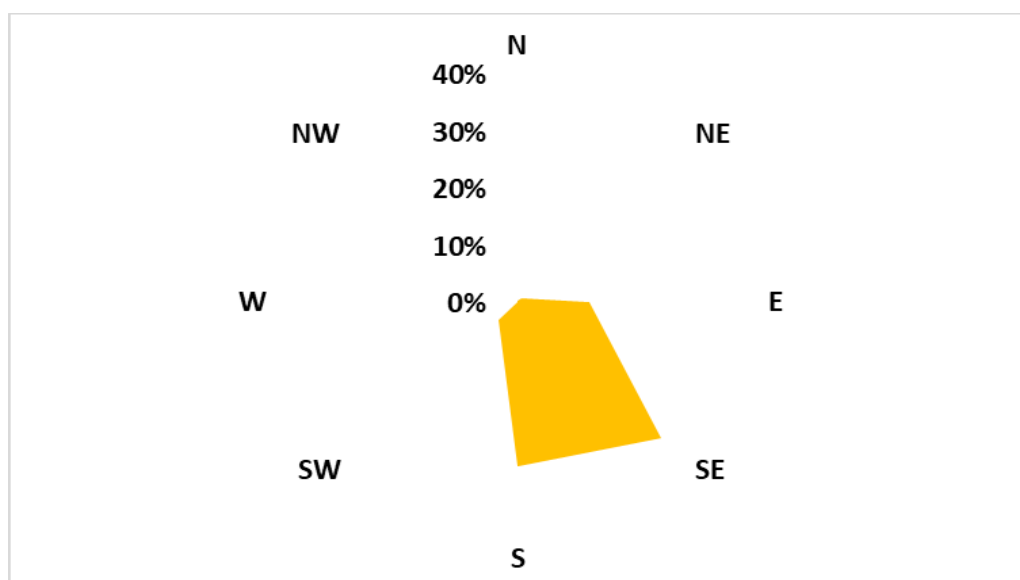
Fonte: dados da pesquisa, elaborada pelo autor, em 2023.

Observa-se (Figura 15), que a frequência da direção do vento para Cabaceiras é no quadrante Sul (S), com 46% , seguido de sudeste (SE), com 31%, e sudoeste com 10%. As demais direções apresentam frequência entre 1 e 5%.

Com relação a cidade de Campina Grande (Figura 16), verifica-se a mesma tendência de Cabaceiras, com direções Sul (24%), SE (21%) e Leste (18%). As outras direções ocorrem com frequência de 1 a 5%.

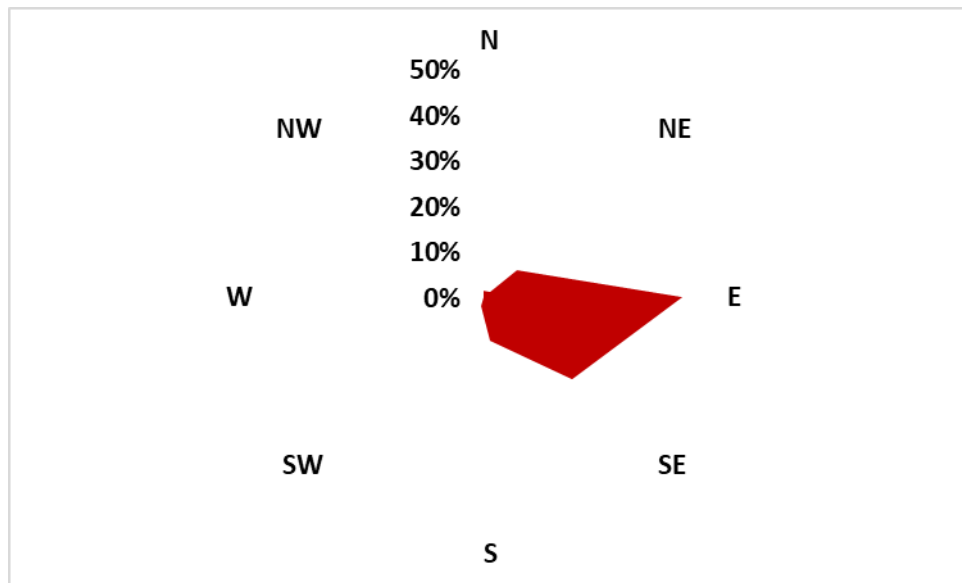
As localidades de Camaratuba (Figura 17) e Monteiro (Figura 18) têm direções predominantes, no quadrante Sudeste (SE) Leste (E). Em Camaratuba, a direção sudeste (SE) ocorre com frequência de 34% , seguido por S com 29% e E com 12%.

Figura 17. Distribuição de frequência das direções do vento em Camaratuba, PB



Fonte: dados da pesquisa, elaborada pelo autor, em 2023.

Figura 18. Distribuição de frequência das direções do vento em Monteiro, PB.

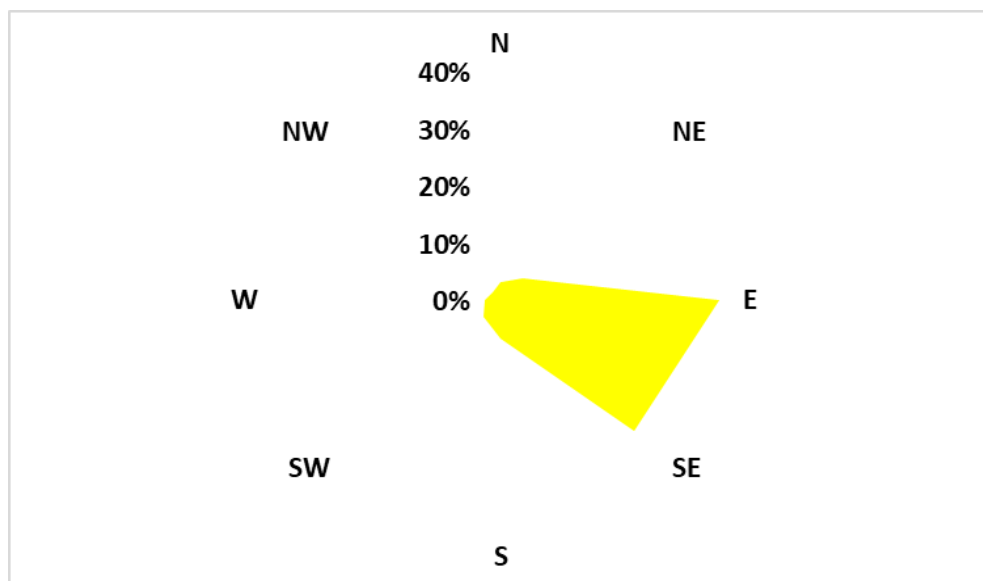


Fonte: dados da pesquisa, elaborada pelo autor, em 2023.

Em contrapartida, em Monteiro, a direção Este (E), ocorreu em 42% dos dados de ventos advindos dessa direção, seguido por SE com 26%. A direção Sul (S) teve cerca de 10% e a Nordeste (NE) com 8%. Nessas duas localidades, as demais direções apresentam valores entre 1 e 3% dos dados observados.

As cidades de Patos (Figura 19) e de São Gonçalo (Figura 20) têm direção predominante Leste (E), com 37,5 % e 34,0 % de frequência dos dados observados, respectivamente. A segunda direção predominante é sudeste (SE), cujas respectivas frequências foram de 32,3% e 30,0 %. Já as direções Sul e Nordeste ocorreram com frequência de 7 e 5% e de 13 e 9 %.

Figura 19. Distribuição de frequência das direções do vento em Patos, PB



Fonte: dados da pesquisa, elaborada pelo autor, em 2023.

Figura 20. Distribuição de frequência das direções do vento em São Gonçalo, PB.



Fontes: dados da pesquisa, elaborada pelo autor em 2023

Comparando-se os resultados das sete localidades paraibanas, constataram que a direção predominante do vento foi a de Sudeste (SE), corroborando às descrições feitas por Almeida (2016), Lima (2010) e outros que esta predominância se deve aos ventos Alísios, que persevera em todos os meses do ano, nesta direção, para o hemisfério sul.

#### **4.1.4 Medidas e estimativas da velocidade do vento e da energia cinética a 10, 50 e 100 m de altura**

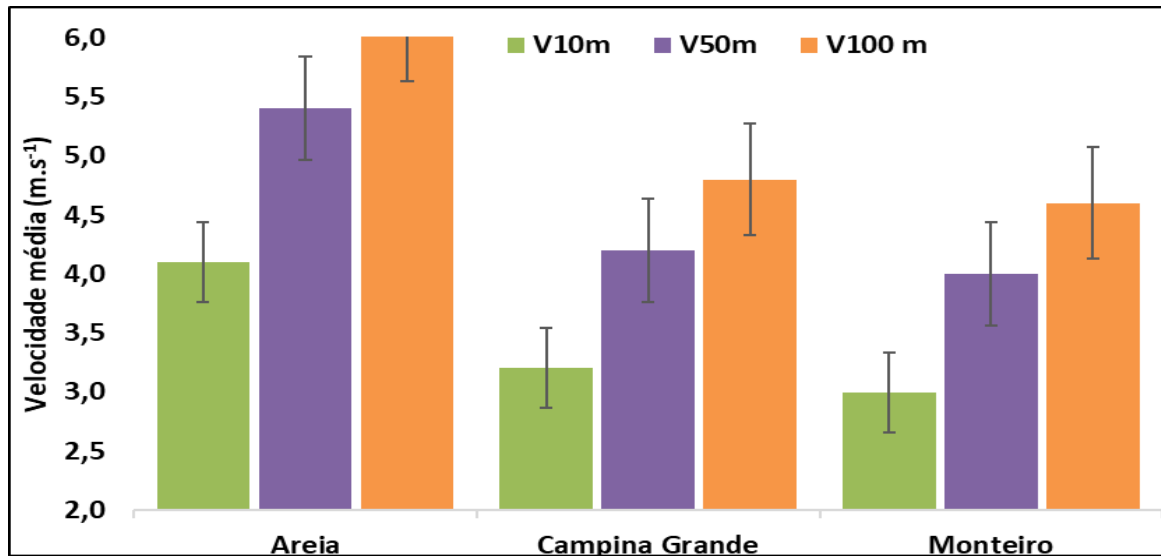
O aumento da população mundial e o uso de fontes de combustíveis fósseis, além de causar impactos ambientais inerentes à queima, estimularam a busca por novas fontes alternativas de energia renováveis. Neste cenário, destaca-se a energia eólica como uma fonte abundante, especialmente, no Nordeste brasileiro onde é alta a incidência dos ventos alísios.

A utilização do vento como energia alternativa, baseia-se no aproveitamento da energia cinética (Ec) gerada a partir de uma massa de ar em movimento. O aerogerador é o sistema responsável por converter a energia cinética, contida na massa de ar que passa por ele, em energia elétrica.

As médias da velocidade do vento, a 10, 50 e 100 m de altura, para as localidades: Areia, Campina Grande e Monteiro, PB são mostradas na Figura 21 e para Patos, Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalo (Figura 22). Comparando-se a velocidade medida a 10 m de altura, em Areia, com as demais localidades verifica-se que é 28,1 e 36,7 % maior que a de Campina

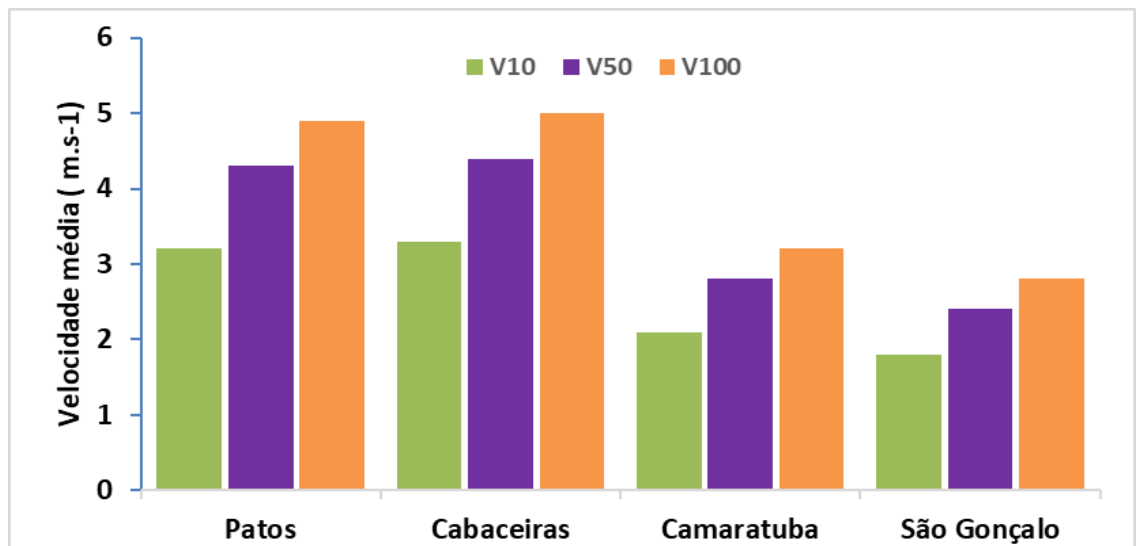
Grande e Monteiro. Já, nesta mesma relação, para a velocidade estimada, a 100 m de altura, esse percentual passa a ser de 48,8 e 50,0 % maior, respectivamente.

Figura 21. Médias da velocidade do vento, a 10, 50 e 100 m de altura, em Areia, Campina Grande e Monteiro, PB.



Fonte: dados da pesquisa e elaborada pelo autor, 2024

Figura 22. Médias da velocidade anual do vento, a 10, 50 e 100 m de altura, em Patos, Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalo.



Fonte: dados da pesquisa elaborada pelo autor, em 2024

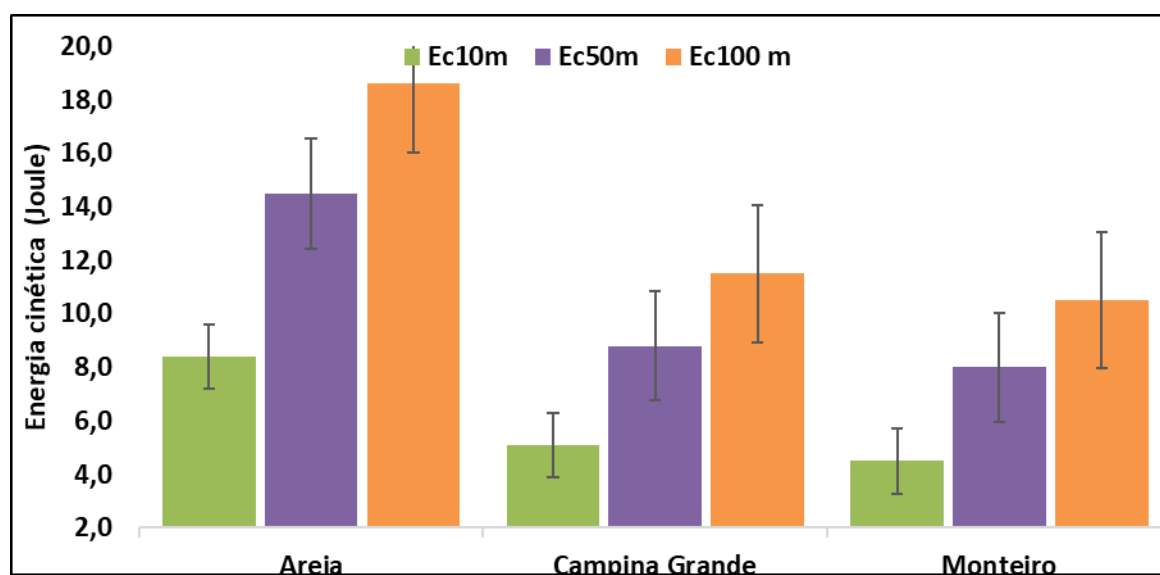
Fazendo-se a mesma comparação entre a cidade de Areia e as quatro outras cidades mostradas na Figura 22, constata-se que a velocidade média do vento, em Areia a 10 m de altura, é sequencialmente maior que 28,1 % (em Patos), 24,2 % (em Cabaceiras), 95,2 % (em Camaratuba) e de 127,8 % (em São Gonçalo). Já a média da velocidade a 100 m de altura em Areia é 63,7 % maior, quando comparado com a de Patos, Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalo.

Visualiza-se na Figura 22, que as menores velocidade do vento, nas três alturas estudadas, é em São Gonçalo. Esse menor valor pode estar associado a altitude mais baixa (cerca de +225 m) que predomina nas várzeas de Sousa. Mesmo Patos distante cerca de 120 km do distrito de São Gonçalo, a média da velocidade do vento a 100 m de altura é 76,4% maior.

A eletricidade gerada pelas células fotovoltaicas, após a captação da energia solar, é convertida em energia cinética, utilizando-se um inversor, que transforma a corrente contínua, gerada pelos painéis solares, em alternada. O movimento de rotação das pás da turbina eólica é transformado em energia mecânica e, finalmente, no gerador, ocorre a geração da energia elétrica.

As Figuras 23 e 24, resumizam, os indicadores de energia cinética (em Joules), estimados utilizando-se as médias da velocidade do vento, medida e estimada, para as alturas equivalentes a 10, 50 e 100 m, para as cidades de Areia, Monteiro, Campina Grande (Figura 23); Patos, Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalo (Figura 24).

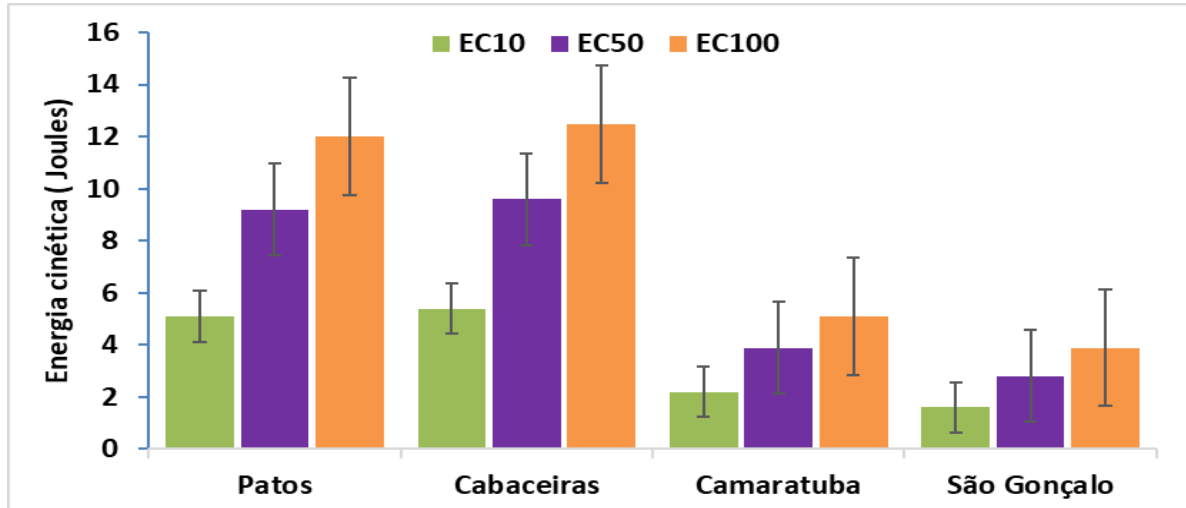
Figura 23. Energia cinética (em Joules), a 10, 50 e 100 m de altura, para as cidades de Areia, Campina Grande e Monteiro, PB.



Fonte: dados da pesquisa e elaborada pelo autor, em 2024

Fazendo-se uma análise comparativa, da cidade de Areia (Figura 23), com as demais, verifica-se que os valores de energia cinética foram sempre maiores, em média, de 63,7 e 81,7 %, quando comparados, com Campina Grande e Monteiro e de 59,1 e 51,8 %, com Patos e Cabaceiras. Já, para os dois recortes geográficos (Camaratuba e no distrito de São Gonçalo), as diferenças percentuais superam 200 e 400 %, cujos valores na altura maior (100 m), por ex., os valores de energia cinética equivalem, respectivamente, a 5,1 e 3,9 Joules.

Figura 24. Energia cinética (em Joules) a 10, 50 e 100 m de altura, para as cidades de Patos, Cabaceiras, Camaratuba (Mataraca) e São Gonçalo (Sousa).



Fonte: dados da pesquisa e elaborada pelo autor em 2024

É importante destacar, que há duas modalidades de instalação de aerogeradores; os localizados em terra (onshore) e no alto mar (offshore). À medida que se afasta da superfície do solo, há uma constância, velocidade e direção do vento, fatores esses primordiais para o melhor aproveitamento dessa energia. Por isso, recomenda-se instalar os aerogeradores entre 50 e 120 m, razão pela qual será descrita, no item seguinte, as relações entre a velocidade do vento e a energia cinética, a 50 e 100 m de altura.

#### 4.1.5 Relação entre a velocidade e energia cinética do vento à 50 e 100 m de altura

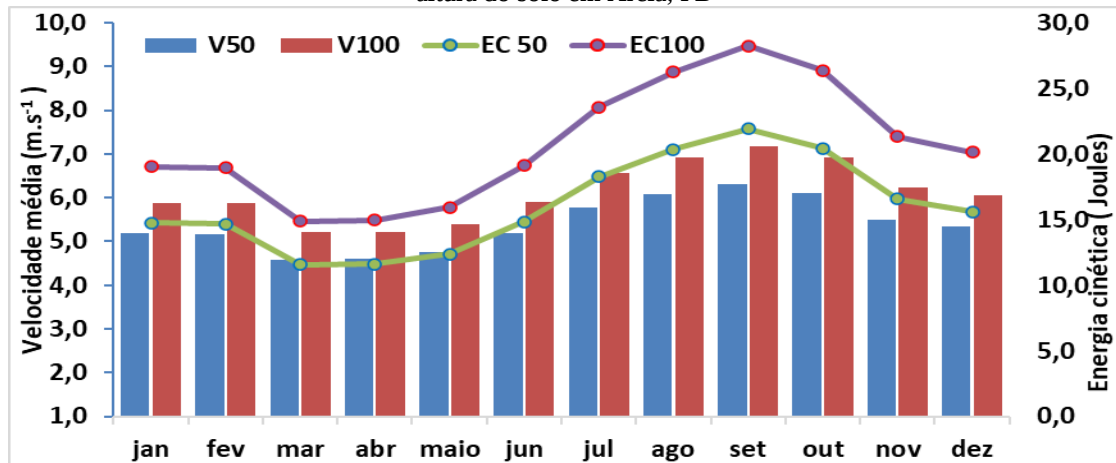
A conversão da energia cinética dos ventos é uma das formas mais antigas da humanidade, sendo utilizada nos moinhos, cataventos e barcos a vela. Atualmente, a energia eólica é uma fonte alternativa e renovável para geração de energia elétrica.

De acordo com o princípio de conservação de energia, um aerogerador converte energia a partir de dois processos: a energia cinética do vento, convertida em energia mecânica e o gerador, o converte em energia elétrica

Para estimar a velocidade do vento a diferente a altura dos geradores, por ex.: torna-se necessário entender que a velocidade do vento aumenta com a altura, em virtude da diminuição do efeito da rugosidade da superfície. Com os dados de vento foram medidos a 10 m de altura do solo, para velocidades as alturas de 50 e 100 m foram estimadas mediante a equação da Lei de Potência, proposta por Jangamshetti e Rau (1999) e, posteriormente transformada em energia

cinética, cujas relações entre si são mostradas individualmente, para as localidades de Areia, Patos, Campina Grande e Monteiro (Figuras 25, 26, 27 e 28) e para Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalo (Figuras 29, 30 e 31).

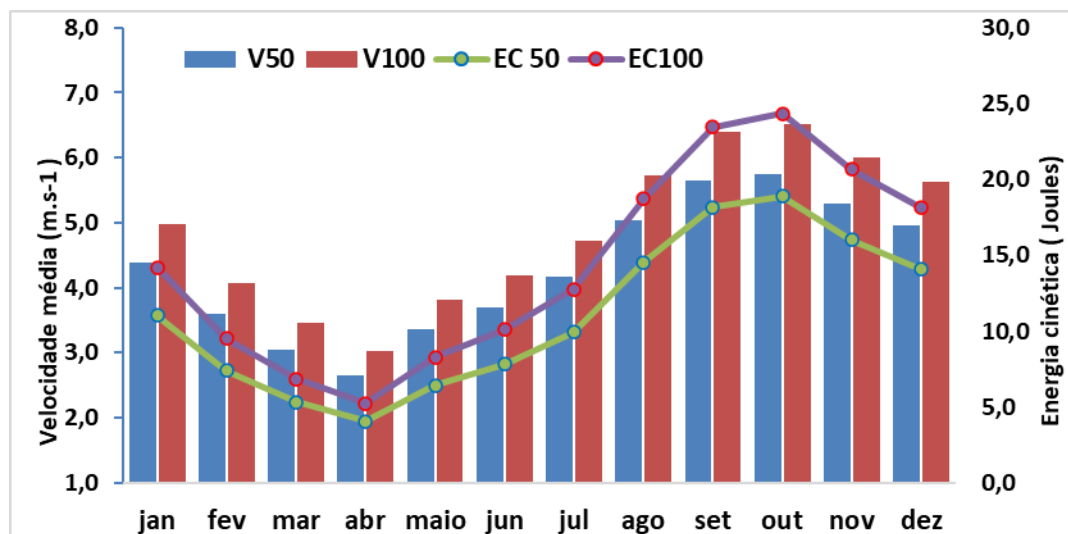
Figura 25. Relações entre as médias mensais da velocidade do vento (V) e a energia cinética (Ec) a 50 e 100 de altura do solo em Areia, PB



Fonte: dados do INMET, elaborada pelo autor, em 2024.

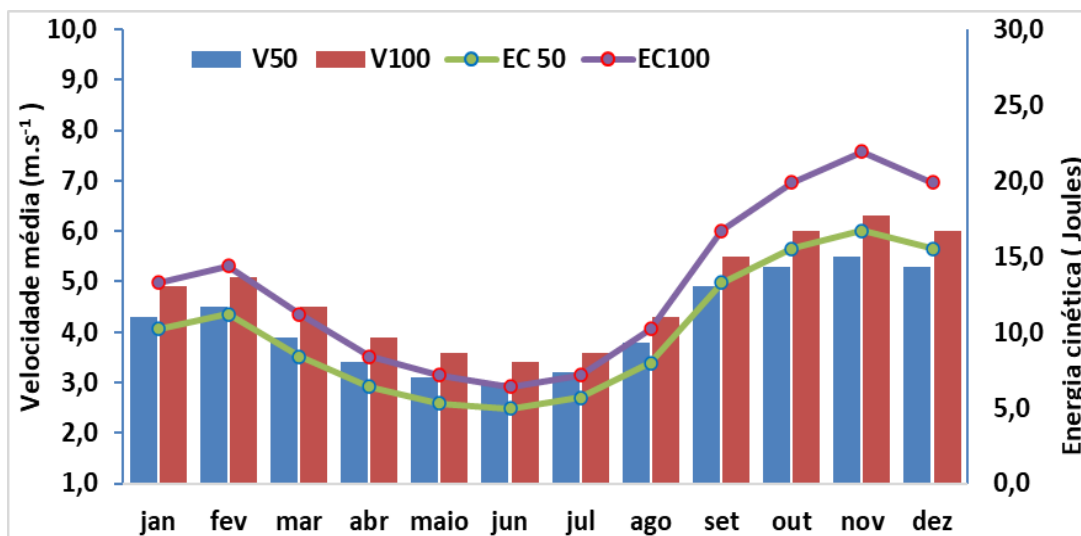
Observa-se (Figura 25) que, que as curvas de energia cinética crescem a partir de junho até setembro, com maiores valores no início da primavera, e decrescem o período o qual apresenta um maior maior valor para a energia cinética a alturas de 50 e 100 m na localidade de Areia é formado pelos meses de agosto, setembro e outubro chegando a apresentar o potencial de energia cinética presente no vento superior a 20 Joules.

Figura 26. Relações entre as medianas mensais- médias diárias- da velocidade do vento (V) e a energia cinética (Ec) a 50 e 100 de altura do solo, em Patos, PB



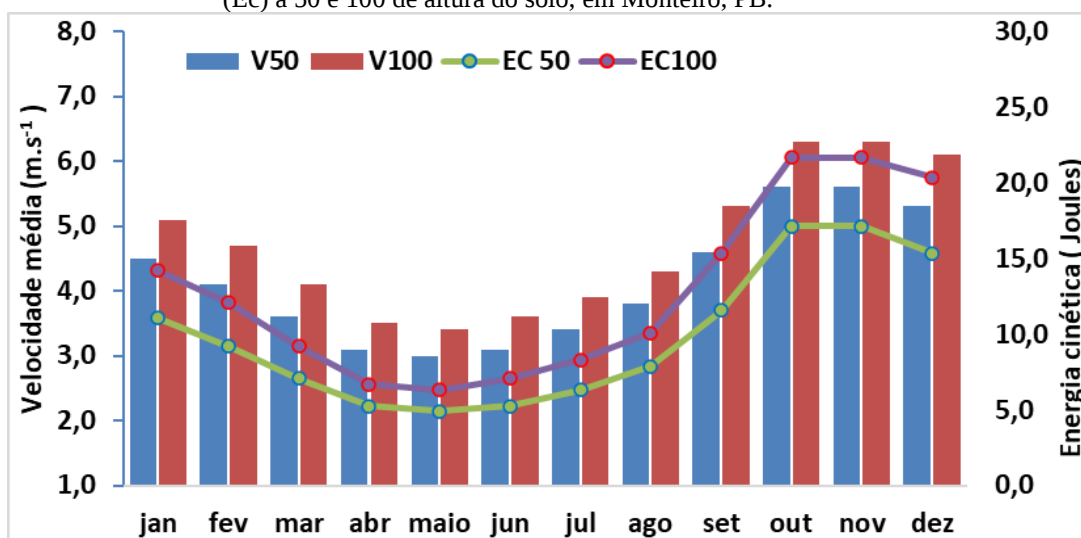
Fonte: dados do INMET, elaborada pelo autor, em 2024.

Figura 27. Relações entre as medianas mensais- médias diárias- da velocidade do vento (V) e a energia cinética (Ec) a 50 e 100 de altura do solo, em Campina Grande, PB.



Fonte: dados do INMET, elaborada pelo autor, em 2024.

Figura 28. Relações entre as medianas mensais- médias diárias- da velocidade do vento (V) e a energia cinética (Ec) a 50 e 100 de altura do solo, em Monteiro, PB.



Fonte: dados do INMET, elaborada pelo autor, em 2024

Já os meses de março e abril têm os menores valores de Ec (< 11 joules), para a altura de 50 m e acima de 13 Joules, para 100 m. Contabilizando-se e comparando-se os semestres, verifica-se que a energia cinética acumulada no segundo semestre equivale a 58,3 %, contra 41,7% do primeiro.

Análises visuais dos histogramas de velocidade do vento e das curvas de energia cinética de Patos, Campina Grande e Monteiro (Figuras 26, 27 e 28) comparados com Areia (Figura 25) mostram que há semelhanças nos respectivos formatos, mas existem diferenças nos respectivos valores.

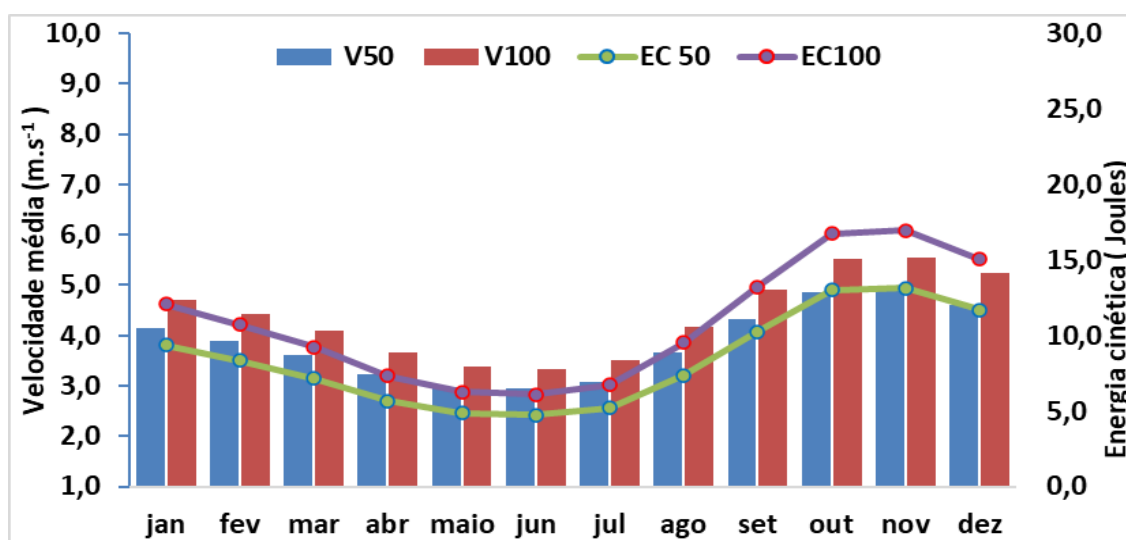
Com relação aos quantitativos, calcula-se que as médias mensais de intensidade do vento e energia de movimento em Patos, Campina Grande e Monteiro, comparando-se com as de Areia são em média, 22,5 e 36,8 %; 25,8 e 50,6 % e 27,0 e 54,3 % menores.

Nota-se ainda, que tanto as médias da velocidade do vento quanto a energia cinética, para as alturas de 50 e 100 m, são maiores nos meses da primavera e os de verão e menores de outono e inverno. Escolhendo-se a altura de 100 m, as médias para os respectivos períodos e locais foram, respectivamente, de 6,4 m.s<sup>-1</sup> e 21,2 J; 5,4 m.s<sup>-1</sup> e 17,4 J; 5,7 m.s<sup>-1</sup> e 17,9 J e 5,7 m.s<sup>-1</sup> e 18,0 J.

Os resultados encontrados para os meses de maior disponibilidade de vento (primavera-verão), são indicativos, pelo menos, a priori, que os referidos locais têm potencial para aproveitar a energia do vento em eólica, corroborando, portanto, aos relatos de Lima (2011), para as respectivas faixas encontradas.

É importante destacar que, as três localidades (Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalos) têm os menores indicadores – médios mensais – de velocidade do vento e de energia cinética, cujas relações entre si são mostradas nas Figuras 29, 30 e 31.

Figura 29. Relações entre as medianas mensais- médias diárias- da velocidade do vento (V) e a energia cinética (Ec) a 50 e 100 de altura do solo, em Cabaceiras, PB.



Fonte: dados do INMET, elaborada pelo autor, em 2024

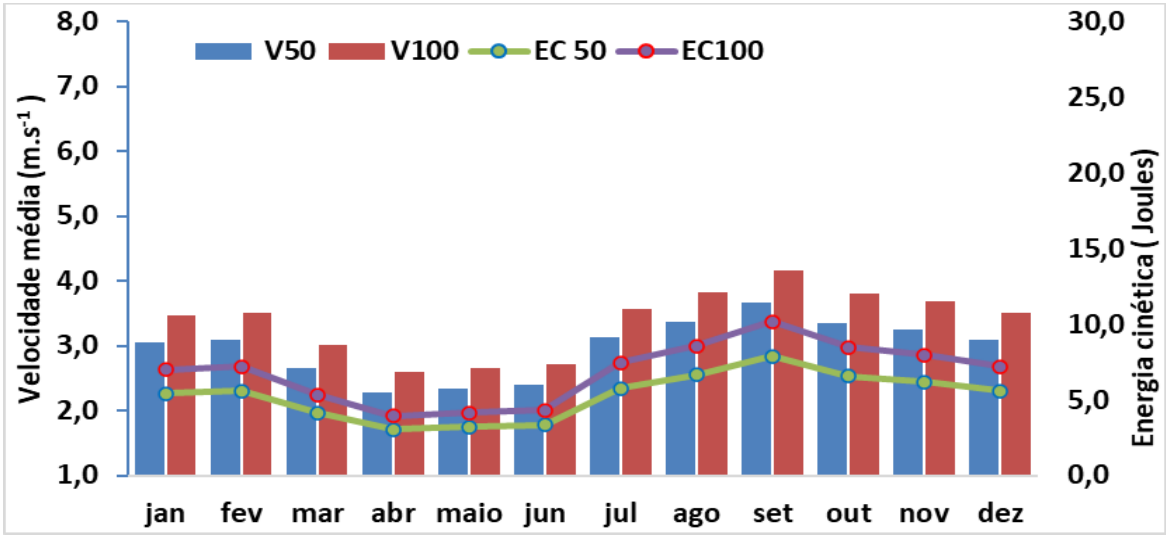
Numa análise visual simples, observa-se que há semelhança entre os formatos dos histogramas de velocidades médias mensais do vento e das curvas de energia cinética, quando se compara um local com outro, mesmo existindo diferença entre valores. No geral, observa-se (Figuras 29, 30 e 31) dois aspectos importantes na curva da energia cinética; ele cresce a partir de junho (inverno) até o final da primavera (novembro) e partir deste decresce até o início do

inverno (junho).

Com relação aos quantitativos, calcula-se que as médias mensais de intensidade do vento e energia de movimento em Campina Grande, comparando-se com as de Cabaceiras, são, em média, 8,9 e 19,5 % maiores. Já comparando-se Areia com Campina Grande, constata-se que os respectivos indicadores da cidade do brejo paraibano são 27,8 e 62,0 % maiores que os da rainha da borborema.

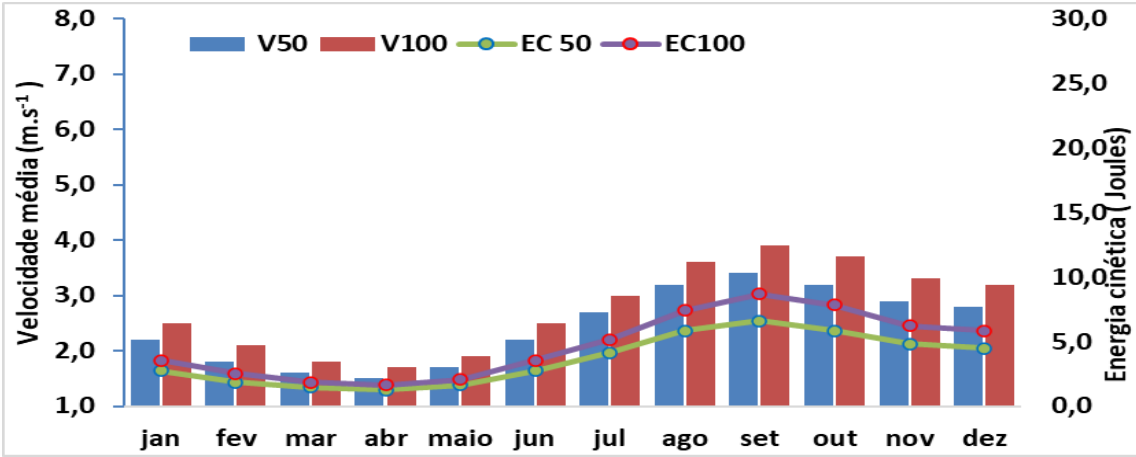
Em Camaratuba (Figura 30) e em São Gonçalo (figura 31), mesmo a uma altura de 100 m, os valores de velocidade do vento e de energia cinética são relativamente mais baixos, 3,6 m.s<sup>-1</sup> e de 7,6 J e 3,0 m.s<sup>-1</sup> e 5,2 J, respectivamente. Mesmo assim, nos meses de setembro e/ou outubro esses valores chegam a ultrapassar 5,0 m.s<sup>-1</sup> e 15,0 J de energia cinética.

Figura 30. Relações entre as medianas mensais- médias diárias- da velocidade do vento (V) e a energia cinética (Ec) a 50 e 100 de altura do solo, em Camaratuba, PB.



Fonte: dados do INMET, elaborada pelo autor, 2024

Figura 31. Relações entre as medianas mensais- médias diárias- da velocidade do vento (V) e a energia cinética (Ec) a 50 e 100 de altura do solo, em São Gonçalo, PB.



Fonte: dados do INMET, elaborada pelo autor, 2024

Em São Gonçalo (Figura 31) as velocidades de vento são relativamente baixas e na sua maioria, a velocidade média não supera  $4 \text{ m.s}^{-1}$ , nem mesmo nos meses com maior intensidade do vento. Com base nos indicadores de velocidade do vento e da energia cinética existente em Camaratuba e São Gonçalo, quando comparado com os demais locais estudados, o potencial de vento é bem menor.

A produção de energia está historicamente no centro de questões ligadas ao desenvolvimento econômico. No entanto, concorda-se com Lucon e Goldemberg (2009), que as energias alternativas, principalmente, a eólica, desponta como opção interessante, por ser menos poluentes, possibilitar a descentralização da produção de energia, além de proporcionar melhores condições sociais e qualidade de vida para a população.

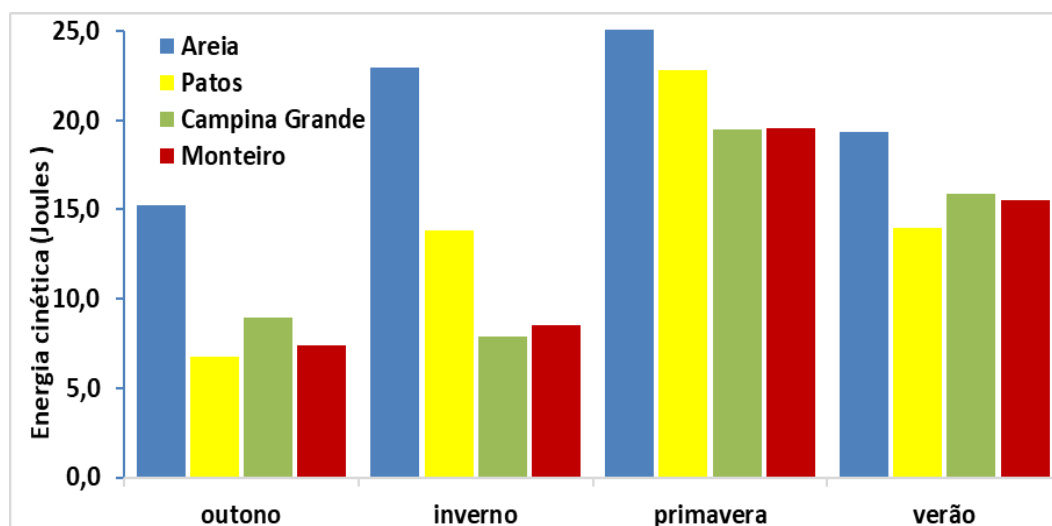
A energia eólica provém da irradiância solar, haja vista que o vento é gerado pelo aquecimento diferencial da superfície terrestre. Concorde-se com a CRESESB (1996), que cerca de 2% da energia solar absorvida pela Terra é convertida em energia cinética dos ventos. Este percentual, embora pequeno, representa centenas de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo.

Em escala global, os ventos que se manifestam em pequena escala são influenciados por diferentes aspectos entre os quais destacam-se a rugosidade do solo, os obstáculos e o relevo.

Com há oscilações nos valores médios da velocidade do vento e da energia cinética ( $E_c$ ), sendo maiores em alguns meses e menores em outros, procurou-se explicitá-los agrupando-os os  $E_c$ , por estação do ano, para 100 m de altura, para as cidades: Areia, Patos, Campina Grande e Monteiro, por disporem de maior potencial eólico, e Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalo, os menores, cujos indicadores são apresentados, respectivamente, nas Figuras 32 e 33.

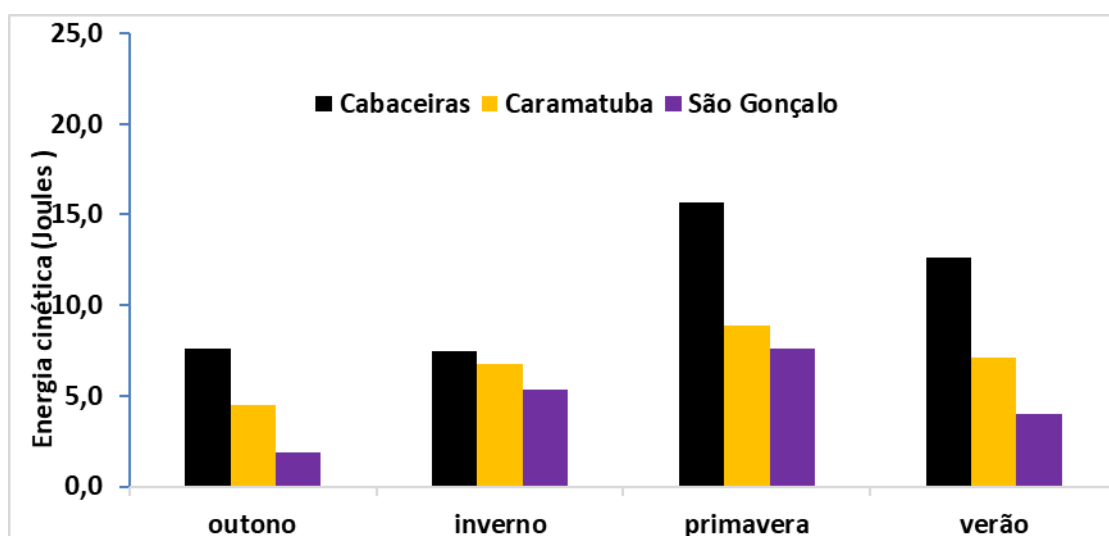
Comparando-se os quantitativos de energia cinética, nas duas condições, apresentadas nas Figuras 32 e 33, verifica-se que nas localidades de maior potencial eólico, o menor potencial é no outono (Figura 32), mesmo assim ainda é igual ou maior, ao observado na primavera e verão dos locais, com menores potenciais eólicos (Figura 33).

Figura 32. Médias das medianas mensais- médias diárias- da energia cinética, a 100 de altura do solo, por estação do ano, em Areia, Patos, Campina Grande e Monteiro, PB.



Fonte: dados do INMET, elaborada pelo autor, 2024

Figura 33. Médias das medianas mensais - médias diárias - da energia cinética, a 100 de altura do solo, por estação do ano, em Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalo, PB.



Fonte: dados do INMET, elaborada pelo autor, 2024

Confrontando e contabilizando-se os valores de energia cinética, para as quatro localidades de maior potencial eólico (Figura 32), por estação, verificam-se que nos meses do outono, espera-se um quantitativo de energia equivalente a 9,6 Joules, contra 13,3, 21,8 e 16,2 J, nos de inverno, primavera e verão, respectivamente. Nessa mesma sequência, para os locais com menor potencial (Figura 33), esses valores são de 4,7, 6,5, 10,7 e 7,9 joules.

Ao comparar a quantidade de energia cinética nos meses de equinócios; primavera

(maior) com os de outono (menor), verifica-se que os percentuais de produção foram de 127,0 e 130,0 % maiores, para os locais com maior e menor potencial eólico, contra 21,5 e 21,1 % no solstício de verão, quando comparado com o de inverno.

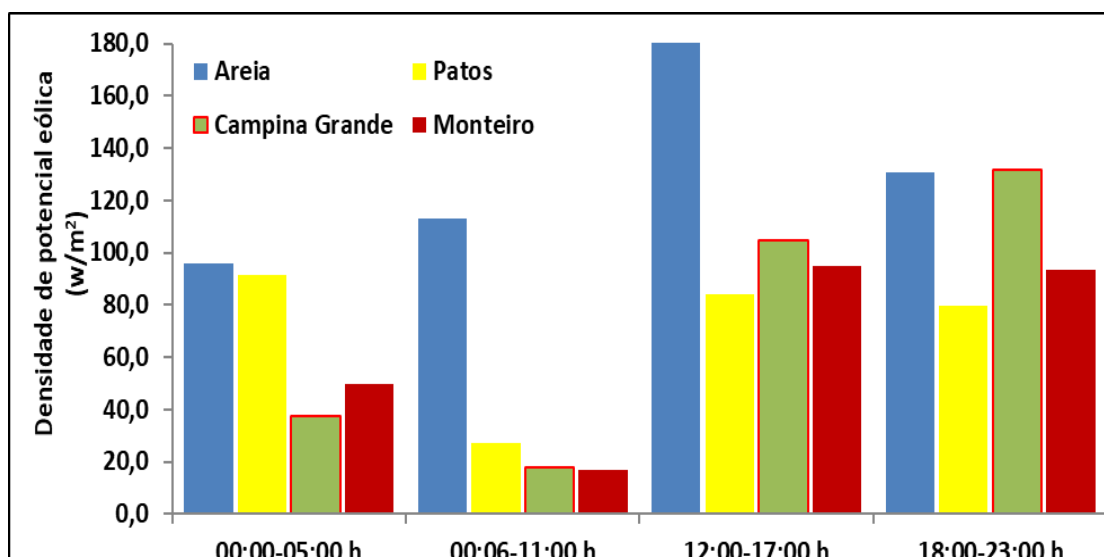
No recorte geográfico do Estado da Paraíba, a direção predominante é de Alísios de sudeste, com intensidades inferiores a 5,0 m/s, para uma altura igual ou inferior a 10 m, contínuo, o que proporciona condições agradáveis na qualidade de vida da população.

#### 4.1. 6 Estimativas da Densidade de Potência Eólica (DPE) a 100 m de altura

A produção e o abastecimento de energia elétrica são os principais desafios da atualidade, porque há necessidade de conciliar o desenvolvimento com a disponibilidade de energia. Neste cenário, uma das variáveis mais importante é a densidade de potência eólica, que pode ser estimada a partir da velocidade do vento, que independe das características dos aerogeradores.

Neste contexto, a caracterização temporal do regime de vento, na escala horária, permite estimar com maior precisão o potencial de energia eólica, nos diferentes horários e/ou grupos de horas diários, condições essas importantes para subsidiar as decisões de implantação de projetos eólicos. As médias horárias das densidades de potência eólica, para as cidades com maior e menor potencial eólico, são mostradas nas Figuras 34 e 35.

Figura 34. Médias das densidades de potência eólica (DPE), para intervalos de 6 em 6 horas, a 100 m de altura para as cidades de Areia, Patos, Campina Grande e Monteiro, PB.



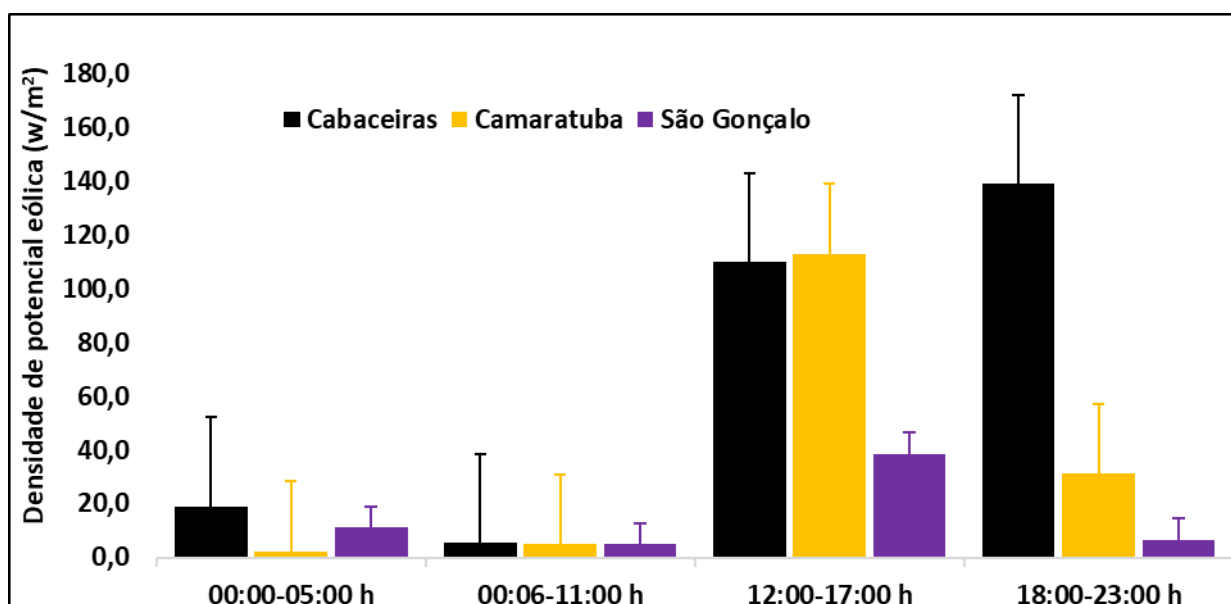
Fonte: dados da pesquisa e elaborada pelo autor, 2024

A opção por escolher a altura de 100 m, em detrimento às demais, para apresentar os indicadores médios de densidade potência eólica, é justificada por ser esta altura a mais usual para a maioria dos aerogeradores modernos.

Fazendo uma análise visual simples da Figura 34 com a Figura 35, observa-se que os

valores numéricos das densidades de potência eólica (DPE), para os quatro intervalos horários, são sempre maiores no primeiro grupo de cidades, com maior potencial eólico, do que no segundo. Em ambas as situações, as DPE são maiores nos turnos vespertino, estendendo-se até às 23:00h, do que nos noturno e matutino.

Figura 35. Médias das densidades de potência eólica (DPE), para intervalos de 6 em 6 horas, a 100 m de altura para as cidades de Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalo, PB.



Fonte: dados da pesquisa e elaborado pelo autor, 2024

As médias das densidades de potência eólica maiores ou iguais a  $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  ocorrem, na maioria das cidades, especialmente, em Areia e Campina Grande, que detêm maior potencial eólico (Figura 34), nos intervalos horários de 12:00 - 17:00 e 18:00 - 23:00 h. Já, no grupo com menor potencial, ocorre apenas em Cabaceiras (Figura 35).

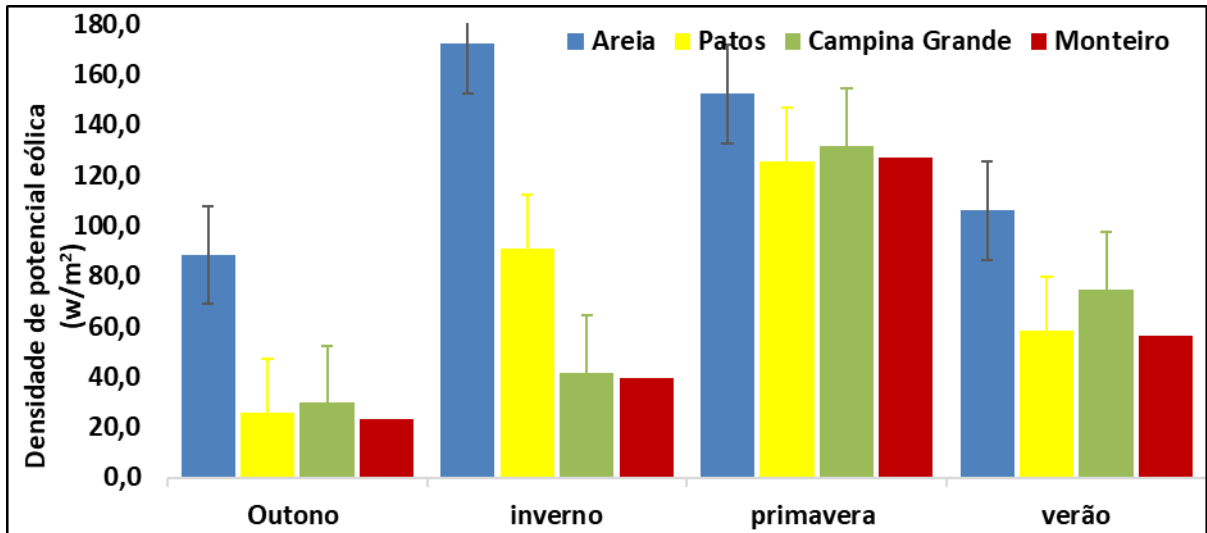
Embora os menores valores de potências eólicas médias ocorram entre 00:00 - 11:00 h, destaca-se que em Areia (Figura 34), a DPE chega a ultrapassar os  $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  de potência. Fazendo-se uma análise comparativa, utilizando-se as médias dos dois grupos (Figuras 34 e 35), no intervalo entre de 12:00- 23:00 h, comparando-se as do primeiro grupo com as do segundo, constata-se que os valores da densidade de potência eólica foram, em média, 54,3 % maiores. Enquanto que, entre 00:00 - 11:00h da manhã, a DPE foi, em média, seis vezes maior.

A densidade de potência eólica é compreendida como a quantidade de energia disponível por unidade de área, varrida pelo rotor de um aerogerador, e, por isso, a sua estimativa é influenciada pela velocidade do vento e a densidade do ar.

Para reduzir os picos nas oscilações horárias, mesmo calculando-se às médias, optou-se por apresentar as disponibilidades das potências eólicas, por estação do ano, para uma altura de

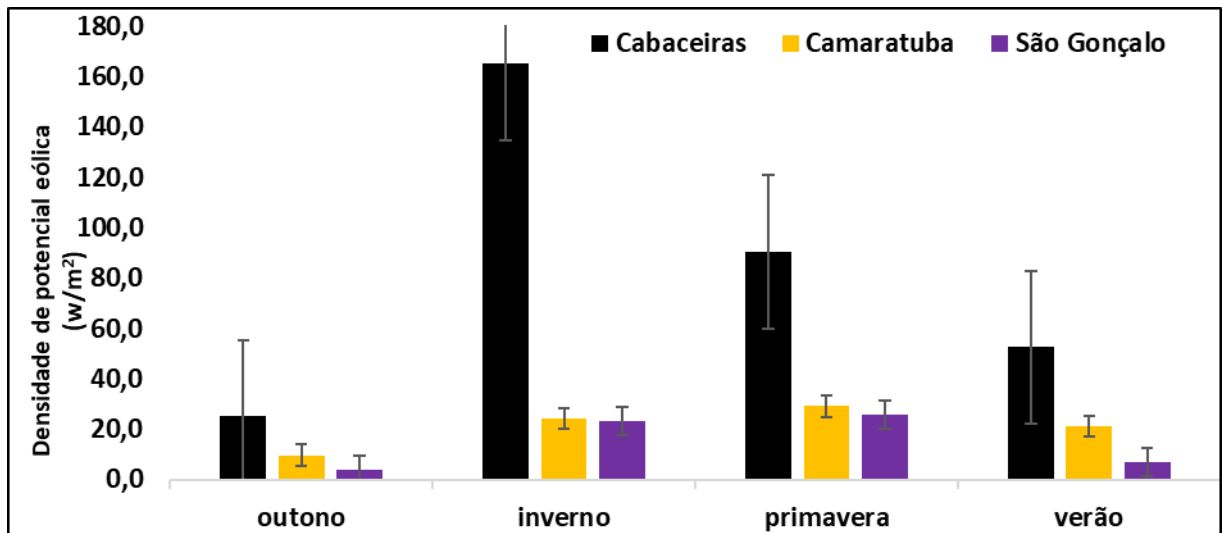
100 m, agrupando-se as cidades, em função do maior e do menor potencial eólico, representadas nas Figuras 36 e 37.

Figura 36. Médias das medianas mensais- médias diárias- da densidade de potência eólica, a 100 de altura do solo, por estação do ano, em Areia, Patos, Campina Grande e Monteiro, PB.



Fonte: dados da pesquisa e elaborada pelo autor, 2024

Figura 37 Médias das medianas mensais- médias diárias- da densidade de potência eólica, a 100 de altura do solo, por estação do ano, em Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalo, PB.



Fonte: dados da pesquisa e elaborada pelo autor, 2024

Como demonstrado anteriormente, o primeiro grupo de cidades (Figura 36) tem maior potencial eólico que as do segundo (Figura 37). Numa simples comparação visual, denota-se a existência de potenciais de energia eólica distintos, quando se compara um solstício e/ou um equinócio com outro. No entanto, destaca-se a cidade de Cabaceiras, no inverno, por tem uma média de densidade de potência eólica praticamente igual a de Areia, com 165,4 e 172,2 W.m<sup>-2</sup>

<sup>2</sup>, respectivamente, além da DPE ser maior do que a de Patos, Campina Grande e Monteiro.

Comparando-se as médias das medianas- da densidade de potência eólica- referentes ao equinócio de primavera e o solstício de verão, verifica-se que a DPE é cerca de 3 vezes maiores nas cidades com maior oferta de vento (Figura 36) do que as de menores (Figura 37).

Fazendo-se a comparação entre a menor DPE, das cidades com os maiores potenciais eólicos (Monteiro), com o maior valor, observado no recorte territorial de Cabaceiras (grupo de menor disponibilidade), mesmo assim, é superior a 28,5%.

Os valores de densidades de potência encontrados, especialmente, os das quatro cidades, com maior potencial de DPE (Figura 36), foram iguais ou superiores aos encontrados para as diferentes regiões geográficas do Estado do Ceará, por Carvalho et al., (2012), considerados por eles ser o referido estado tanto no Litoral quanto na Serra e no Sertão, com elevado potencial para gerar energia elétrica por meio do vento.

## **4.2 Fontes de energia e potencial eólico no Nordeste do Brasil**

As emissões de CO<sub>2</sub> têm sido uma das maiores preocupações mundiais, uma vez que, as maiores economias globais não mostram tendências significativas na redução dos seus níveis de emissão. Com isso, a transição energética mostra ser importante para que as economias dos países emergentes cresçam de forma mais sustentável em relação ao meio ambiente, reduzindo as emissões de carbono.

Apesar da política de carbono zero, defendida por especialistas, é notório que essa realidade ainda mostra-se distante, já que as energias renováveis ainda não conseguem suprir a demanda e o crescimento exponencial do consumo.

As ações antrópicas, ao queimar combustíveis fósseis para desenvolver as atividades econômicas, aumentou as emissões de CO<sub>2</sub>, que é um dos gases do efeito estufa e, portanto, potencializa o efeito estufa numa escala global (aquecimento global).

A descarbonização é o processo de redução de emissões de carbono na atmosfera, especialmente de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), cujo objetivo é alcançar uma economia global com emissões reduzidas para conseguir a neutralidade climática através da transição energética. Assim sendo, requer passar por um processo de transição energética, ou seja, uma mudança estrutural que elimine o carbono na geração de energia.

Consiste em eletrificar a economia mediante energias alternativas limpas que emitam apenas aquilo que o planeta pode absorver. Entender o que é eletrificação, sua importância e como ela ocorre em cada setor é uma tarefa global urgente para reduzir a pegada de carbono

das grandes cidades e dos setores industriais para a mobilidade urbana.

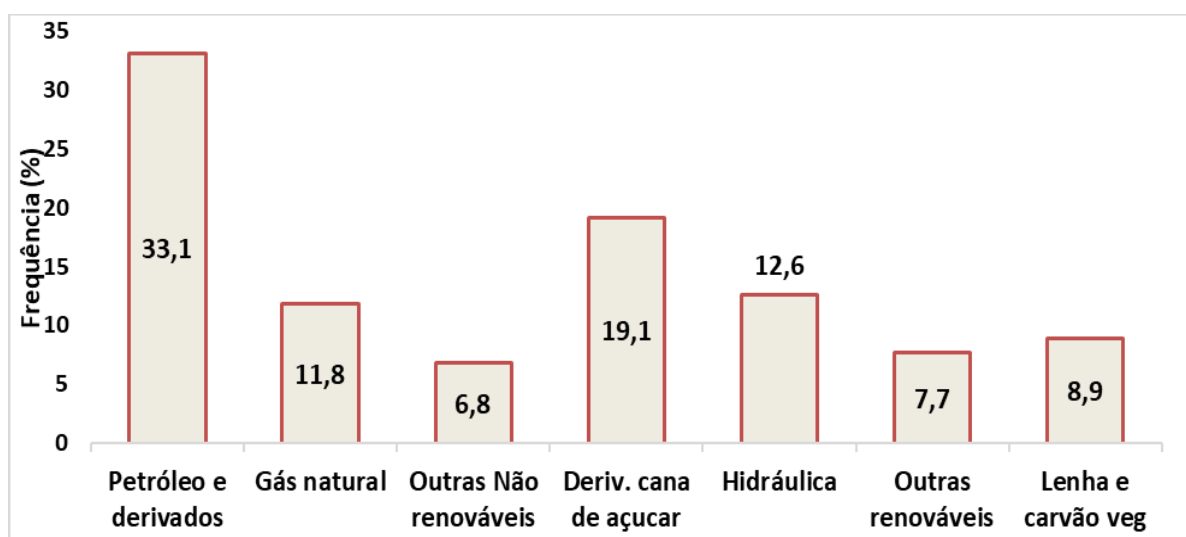
Apesar dos investimentos e políticas em energia renovável no Brasil, desde a década de 1990, a presença de energia oriunda de combustíveis fósseis, ultrapassa a metade da matriz energética primária brasileira ( $\approx 51,8\%$ - Figura 37).

Embora, o Brasil desponta, mundialmente, como um dos países com a matriz mais renovável do mundo, com destaque para a produção hidráulica de energia elétrica e o uso do Etanol, como combustível para automóveis, além de condições privilegiadas para a produção de energia elétrica a partir das fontes solar e eólica.

As energias renováveis são o caminho fundamental para o desenvolvimento sustentável; uma cadeia produtiva de energia menos nociva, das quais destaca-se a energia eólica. Nesse processo de transição energética e de descarbonização, que deve acentuar-se nos próximos anos, com grande oportunidade de crescimento e desenvolvimento social para o Nordeste brasileiro, haja vista, as potencialidades existentes nesta região para a produção de energia de fontes renováveis.

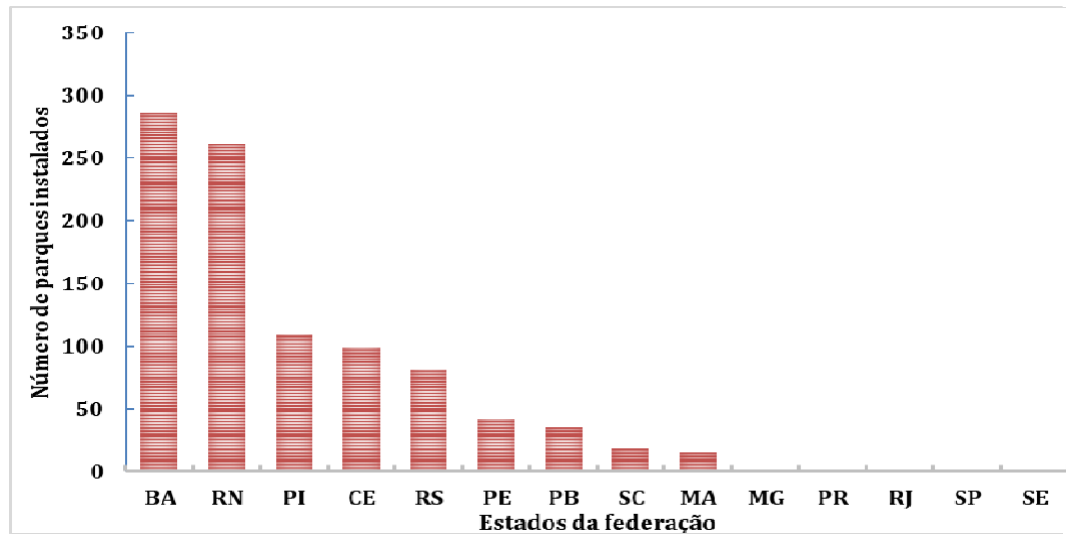
Neste contexto e apenas destacando-se a fonte de energia oriunda do vento, a Figura 38 mostra os percentuais de parques eólicos nos diferentes estados, que ultrapassam 950 parques eólicos em operação e uma potência fiscalizada de mais de 26,92 GW, dos quais cerca de 90% estão instalados nos estados nordestino, especialmente, na Bahia e rio Grande do Norte.

Figura 38. Fontes de energia primária no Brasil, em 2020.



Fonte: BEN, 2021, elaborada pelo autor, 2023

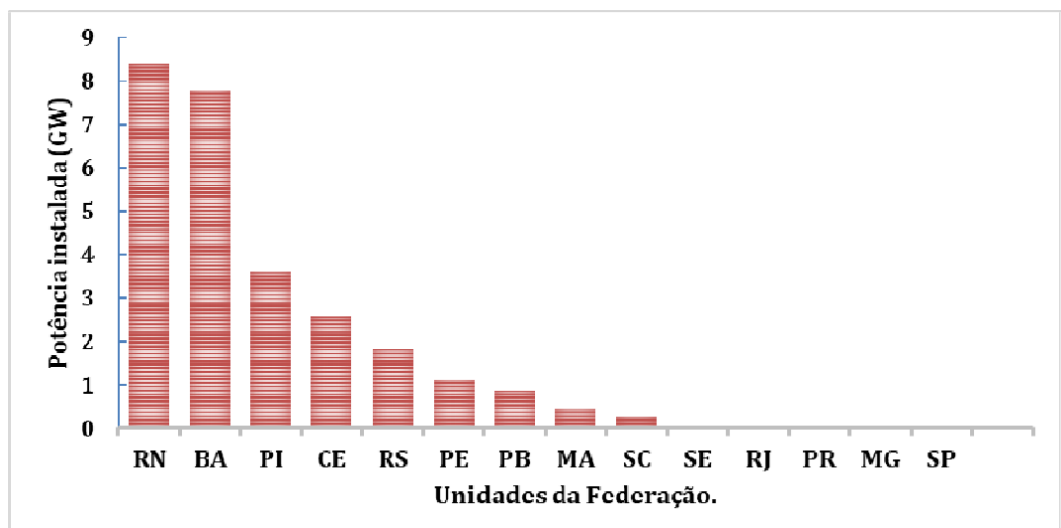
Figura 39. Quantidades de parques eólicos nos diferentes estados do Brasil, em 2022



Fonte: dados da ABEEólica,, elaborada pelo autor, 2023

Embora o estado da Paraíba ocupe a 6ª posição no Nordeste, não somente em termos de quantidade de parques eólicos instalados (Figura 39) e/ou em construção, mas em potência instalada de energia eólica (Figura 40). Este recorte territorial já demonstra a existência de potencial e a região Nordeste, produz mais de 84 % de toda energia eólica produzida no país, especialmente, dos quatros estados: Rio Grande do Norte, Bahia, Piauí e Ceará.

Figura 40. Potência instalada de energia eólica em GW por Unidades da Federação, 2023



Fonte: dados da ABEEólica, elaborada pelo autor, 2023

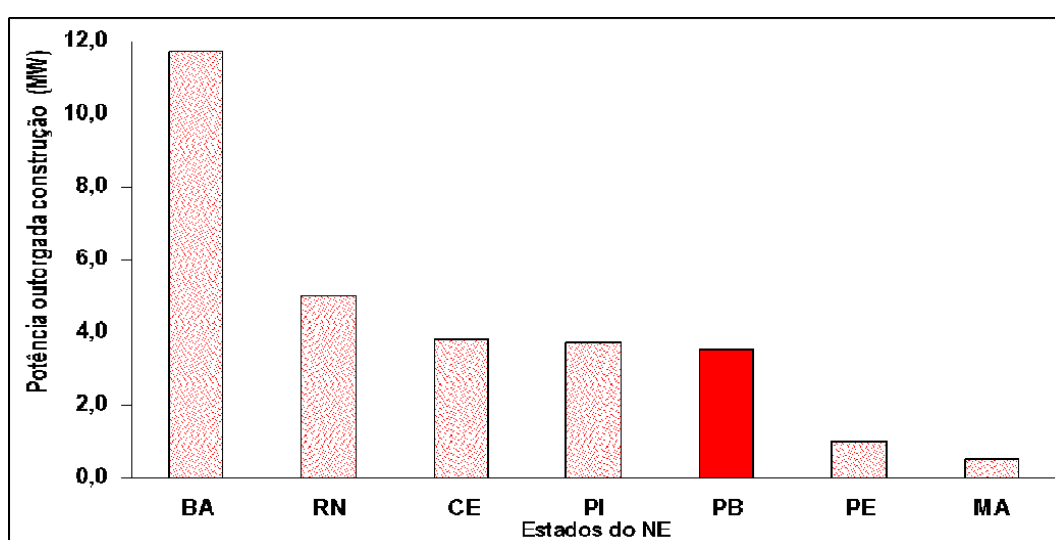
Comparando-se as Figuras 38 com a Figura 39, observa-se que o estado da Paraíba não somente ocupa a sétima posição em número de parques e de produção de energia eólica, mas

há perspectiva de crescimento nos próximos anos, haja vista o interesse crescente por fontes renováveis de energia, em especial a eólica.

Os resultados apresentados (Figuras 38 e 39) demonstram, de forma clara, que o Nordeste brasileiro desponta como uma região promissora para a geração da energia eólica, materializado aqui por possuir maior quantidade de parques eólicos, em funcionamento, outorgados e em fase de construção.

A potência outorgada é capacidade total autorizada, cujos indicadores, para parques eólicos em construção, são apresentados na Figura 41.

Figura 41. Potência outorgada dos parques eólicos em construção no NE, até agosto de 2023

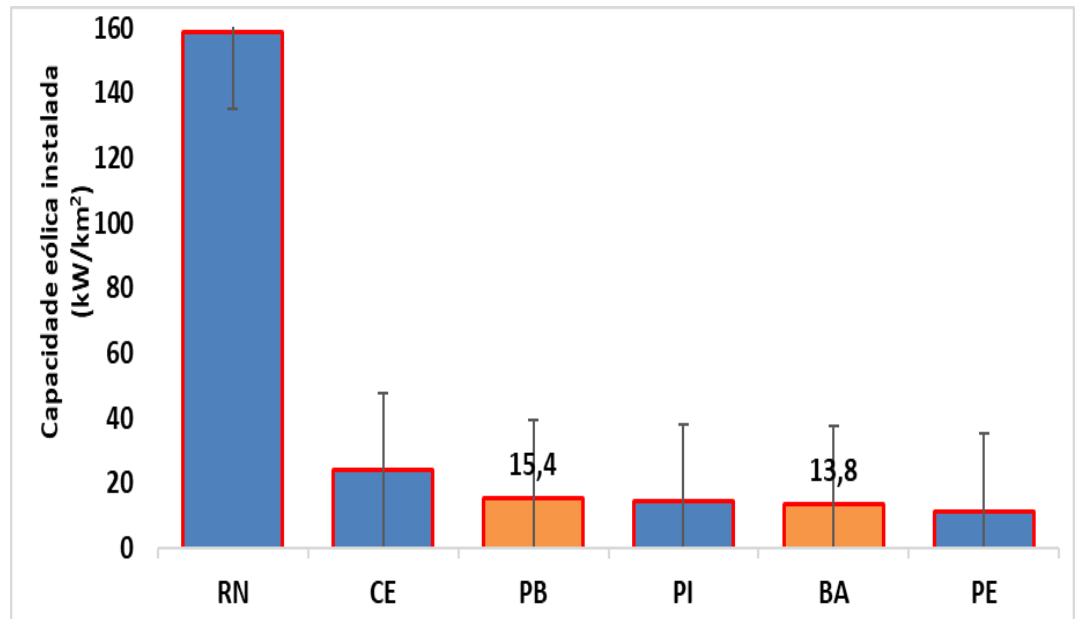


Fonte: dados da ABEEólica, elaborada pelo autor, 2023

Em ritmo muito semelhante ao da Bahia, seguem os Estados do Rio Grande do Norte, seguidos pelo Ceará, Piauí e Paraíba, com processos de expansão, e com potência instalada da ordem de 4 GW.

Para tentar uniformizar os indicadores eólicos dos nove Estados nordestinos, o indicador foi dividido pela área superficial do Estado. Com este critério, a apresentação do quantitativo per capita, ou seja, por unidade de área, passa a ser mais uniforme para comparar o potencial de um estado com outro, como mostra a Figura 42.

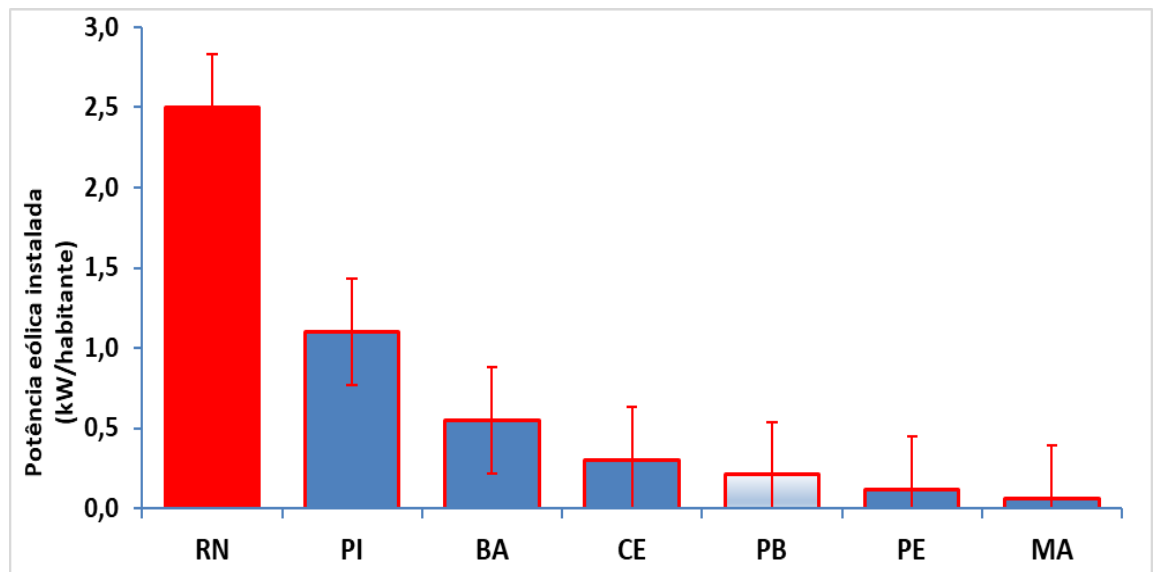
Figura 42. Potência eólica instalada por unidade de área, para os diferentes estados do Nordeste.



Fonte: dados da ABEEólica (2023), elaborado pelo autor, 2023

Comparando-se os indicadores de potência eólica instalada por Estado (Figura 40) com os mesmo indicadores por unidade de área territorial (Figura 43), observa-se que dos sete estados nordestino, com maior capacidade eólica instalada, o da Bahia que tem a segunda maior potência instalada (Figura 40), passa a ocupar a 5ª posição (Figura 43), em virtude da divisão da área do seu extenso território.

Figura 43. Potência eólica per capita instalada/habitantes dos estados do Nordeste.



Fonte: dados de potência eólica da ABEEólica (2023), elaborado pelo autor, 2023

Destaca-se, entretanto, que o critério per capita, ou seja, por unidade de área territorial, faz com que o Estado da Paraíba, destaca-se, no cenário nacional, ao ocupar a 3ª colocação no

quantitativo instalado de energia eólica.

Acrescenta-se, ainda, que a capacidade instalada de energia eólica nos estados de Alagoas e Sergipe não foram apresentados na Figura 42, por apresentarem num processo inicial de implantação de complexos eólicos.

Em relação a capacidade eólica per capita, considerando-se a população de cada estado (Figura 43) temos novamente a liderança do estado do Rio Grande do Norte (RN) com cerca de 2,5 KW de energia eólica por cada habitante, seguido pelo Piauí e a Bahia formando o pódio de maior capacidade eólica.

É importante destacar que, apesar do crescimento da energia eólica nos estados da Bahia, Piauí, Pernambuco e Paraíba, foi no do Rio Grande do Norte onde a expansão da energia eólica se deu de forma mais acentuada já na primeira década do século XXI. Acredita-se que a localização geográfica do RN contribui para que o mesmo apresente as melhores condições naturais para o desenvolvimento da energia eólica. Embora o Rio Grande do Norte apresenta uma grande capacidade instalada de energia eólica, os outros estados do Nordeste, com destaque para o da Paraíba, o qual vem apresentando crescimento expressivo da sua capacidade eólica instalada.

## 5. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados encontrados, conclui-se que: Como a velocidade do vento aumenta à medida que se afasta da superfície, locais com altitudes elevadas ( $> 300$  m) oferecem, a priori, condições melhores para instalar parques eólicos. A velocidade e a direção dos ventos têm variabilidade temporal, nas escalas horária, diária, mensal e interanual.

A velocidade do vento, a energia cinética foram estimadas para as alturas de 50 e 100 m, já a densidade de potência eólica (DPE) foi estimada para a altura de 100 m. As maiores velocidades do vento ocorrem entre 12:00 e 23:00 h e coincidem com o intervalo de maior consumo de energia elétrica. A direção do vento ocorre com maior frequência na direção predominante do Sudeste.

Dos locais analisados, há dois grupos com características distintas do regime de vento: um com maior e outro com menor potencial eólico, representados respectivamente, pelas cidades de Areia, Patos, Campina Grande e Monteiro e o segundo formado por, Cabaceiras, Camaratuba e o distrito de São Gonçalo (Sousa) com velocidades médias menores.

Os perfis de velocidades do vento, para cada altura, e consequentemente, a energia cinética e a densidade de potência eólica são maiores nos meses do equinócio de primavera e nos do solstício de verão e menores nos de outono e inverno. De forma geral, a maioria das velocidades médias de vento no estado da Paraíba situam-se entre o intervalo de 3 a 5  $\text{m.s}^{-1}$  para a altura de 10 m, o que preliminarmente, indica um bom potencial eólico tanto para o aproveitamento em grande escala como também em pequena escala.

Os locais com maior potencialidade para geração de energia eólica foram: Areia, Patos, Campina Grande e Monteiro e os de menor: Cabaceiras, Camaratuba e São Gonçalo. A energia eólica é a segunda fonte renovável mais importante da matriz elétrica nacional e o Nordeste já produz mais de 84 % de toda essa energia, com ritmo contínuo e evolução crescente.

O Nordeste brasileiro desponta como região promissora, na geração de energia eólica, dispõe do maior número de parques eólicos em funcionamento, outorgado e em construção. Os principais estados produtores de energia eólica na região Nordeste são o Rio Grande do Norte e a Bahia. Os estados do Piauí, Ceará, Pernambuco e Paraíba estão em ritmo acelerado de crescimento com a instalação de novos parques eólicos. A capacidade instalada de energia eólica, per capita pela população e/ou por território, o Rio Grande do Norte é o destaque da região Nordeste.

Recomenda-se novas pesquisas, priorizando a evolução tecnológica dos geradores de energia eólica e do aproveitamento dessa fonte energética, para fins de desenvolvimento local

sustentável, com redução de impactos socioambientais e a ampliação dos usos residencial rural e urbano.

Sugere-se, também, novos estudos utilizando-se dados de ventos obtidos para alturas maiores, uma vez que o método de interpolação de dados de ventos não é totalmente preciso tendo em vista os diversos fatores que influenciam no comportamento do vento.

## 6. REFERÊNCIAS

- ALBANI, A; YBRAHIN, M.Z. Statistical Analysis of Wind Power Density Based on the Weibull and Rayleigh Models of Selected Site in Malaysia. **Pak.j.stat.oper.res.** Vol.IX No.4, p.393-406, 2013.
- ABDULKARIM, A; ABDELKADER, S.M; MORROW, D.J; FALADE, A.J and ADEDIRA, Y.A. Statistical analysis of wind speed for electrical power generation in some selected sites in northern Nigeria. **Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH)**, v. 36, n.4, p. 1249-1257, 2017.
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Localização dos Parques Eólicos do Brasil, 2020. <https://sigel.aneel.gov.br/portal/home/webmap/viewer.html?useExisting=> Associação Brasileira de Empresas do Setor Eólico (ABEEólica) disponível em <https://abeeolica.org.br/> Acesso em 15.11.2022.
- ALMEIDA, H. A; **Climatologia aplicada à geografia**. Versão digital. Campina Grande, EDUEPB, 317p. 2016.
- AYOADE, J.O; **Introdução à climatologia para os trópicos**. 4ª ed. Rio de Janeiro, p. 322, 1996.
- APOLINÁRIO, O.K.S; **Análise Geoambiental e Degradação no Município de Cabaceiras-PB**. Dissertação de Mestrado em Geografia. Programa de Pós-graduação em Geografia. Universidade Federal da Paraíba- UFPB. João Pessoa, PB. p.112. 2014
- ARAÚJO, M. O. L. **Análise horária dos elementos climáticos na Paraíba: do descritivo ao geográfico**. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Geografia- PPGeo. UFPB. João Pessoa, p.179, 2022.
- Atlas do potencial eólico brasileiro.Disponível em [https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf](https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf). Acesso em janeiro de 2024.
- BARBOSA, M.E; FOURIER, M; **Caracterização Geológica do Município de Areia, PB**. II Simpósio de Geografia Física do Nordeste: Sustentabilidade e Meio Ambiente no Nordeste Brasileiro, p.11, 2008
- BRANNSTROM, C; GORAYEB, A.; LOUREIRO, C. V.; MENDES, J. S. Processos políticos e impactos socioambientais da energia eólica no litoral cearense. In: **Impactos socioambientais da implantação dos parques de energia eólica no Brasil**. A. Gorayeb, C.

Brannstrom, A.J.A. Meireles (Organizadores): Fortaleza: Edições UFC, 2019, p. 45-60.

CARNEIRO, T. C. Caracterização de potencial eólico para fins de geração eolioelétrica: estudo de caso para Maracanaú (CE), Parnaíba (PI) e Petrolina (PE). **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 6, n. 1, p.1-10, 2015.

CASTRO, R.M.G. **Energias Renováveis e Produção Descentralizada, introdução à energia eólica**. Universidade Técnica de Lisboa, ED. 04, p.93, 2009.

CARVALHO, I. V.; MESQUITA, A. L.; SANTOS, P. G. L.; SANTOS, J. S. **Densidade de potencial eólico nas diferentes regiões do estado do ceará – litoral, Serra, Sertão**. Revista Geonorte, Edição Especial 2, v.2, n.5, p.1317– 1327, 2012.

CARVALHO, V. S. B. **Meteorologia da qualidade do ar no que tange as concentrações de ozônio e dos óxidos de nitrogênio na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**.

Dissertação (Mestrado), Programa de Engenharia Mecânica - COPPE, UFRJ, 134 p, 2006.

COSTA, G. B.; LYRA, R. F. F. Análise dos padrões de vento no estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, n.1, p.31- 38, 2012

CRESESB - Centro de Referência para as energias solar e eólica. Especialistas discutem Energias Alternativas. CRESESB Informe, Rio de Janeiro, v. 2, n. 2, 12p, 1996.

DEDECCA, J. G. **Barreiras à Geração Elioelétrica no Brasil e na Argentina: uma Aplicação do Método de Análise Hierárquica**. Tese de M. Sc. Faculdade de Engenharia Mecânica/Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 136p, 2012.

DUTRA, R. M., **Propostas de políticas específicas para energia eólica no Brasil após a primeira fase do PROINFA**. Tese de Doutorado. UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 415p, 2007.

DUTRA, R. (Org.). **Energia Eólica: Princípios e Tecnologias**. Rio de Janeiro: Centro de Referência de Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, 58p, 2008.

FERREIRA, J.F.C; **Desenvolvimento sustentável:apontamentos sobre o conceito**. Livro eletrônico. Uniedusul. Maringá- PR. p.383; 2021

GEJIMA JÚNIOR, M.Y; **Avaliação do potencial eólico no pico dos dias em Brasópolis, Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado. Programa de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Itajubá, 121p, 2021

GOUVÊA, R.L.P.; SILVA, P.A. **Desenvolvimento do setor eólico no Brasil**. R. BNDES,

Rio de Janeiro, v.25, n.49, p. 81-118. 2018.

GOLDEMBERG, J. Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento. . São Paulo: **EDUSP**. 1998

GOKÇEK, M; BAYULKEN, A.; BEKIDEMIR, S. Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Kirklareli, Turkey, **Renewable Energy**, v. 32, p. 1739-1752, 2007.

GORAYEB, A., BRANNSTROM, C., MENDES, J. de S., MEIRELES, A. J. de A. Definição dos terrenos de marinha como orientação para a implantação de políticas compensatórias em áreas impactadas por projetos de energia eólica no litoral nordeste do Brasil. **Revista Casa da Geografia de Sobral**. v.18, p. 36-55, 2016

GWEC. Global Wind Energy Council. **Global Wind Report 2021**. Bruxelas: GWEC, 2022.<https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/circulacao-atmosferica.htm>. Acesso em 05 de maio de 2023.

HANSEN, M. H. A Modal dynamics of structures with bladed isotropic rotors and its complexity for two-bladed rotors. **Wind Energ. Sci.**, v.1, p. 271-296, 2016

HOFSTAETTER, M. **Energia eólica: entre ventos, impactos e vulnerabilidades socioambientais no Rio Grande do Norte**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Estudos Urbanos e Regionais- PPEUR. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, 176p, 2016.

Intergovernmental on Chanel Climatic Change – IPCC. Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Summary for Policymakers. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN\\_FD\\_SPM\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_FD_SPM_final.pdf). Acesso em: 13 de maio de 2024

JACONDINO, W. D; CALVETTI, L.; NASCIMENTO, A. L.S.; BENETTI, C.A.; DA PAZ, S.R.; JADALL, O.M. Análise estatística do vento em dois parques eólicos do Rio Grande do Norte. **Anuário do Instituto de Geociências** – UFRJ, v 42, n.2, p. 230-244, 2019.

JANGAMSHETTI, S. H.; RAU, V. G. Site matching of wind turbine generators: a case study. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 14, n. 4, p. 1537-1543, 1999.

JUSTUS, C.G.; HARGRAVES, W.R.; MIKHAIL, A.; GRABER, D. Methods for estimating wind speed frequency distributions. **Journal of Applied Meteorology**, v. 17, n. 3, p. 350-353, 1978

- KAPLAN, M; OZTURK, I; KALYONCU, H. Energy consumption and economic growth in Turkey: cointegration and causality analysis. **Romanian Journal of Economic Forecasting**, v. 2, n. 31, p. 31-41, 2011.
- KOSE, R; OZGUR, M.A; ERBAS, O; TUGCU,A; The analysis of wind data and wind energy potential in Kutahya, Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 8, p.277–288, 2004.
- LIRA, M. A. T.; MOITA NETO, J. M.; LOIOLA, J. V. L.; SILVA, E. M.; ALVES, J. M. B. Caracterização do regime de ventos no Piauí para o aproveitamento de energia eólica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 1, 77-88, 2017.
- LOPES, R.F.C; **Efeitos da TSM dos oceanos Atlântico e Pacífico Tropicais sobre o vento no estado da Paraíba**. Dissertação de mestrado (Meteorologia) do Programa de Pós - Graduação em Meteorologia- PPGMet da UFCG. Campina Grande, 56p, 2022.
- LUCON, O; GOLDEMBERG, J; Crise financeira, energia e sustentabilidade no Brasil. **Revista Estudos Avançados**, v. 23. n 65. Universidade de São Paulo, USP. São Paulo, SP. p. 121-130. 2009
- LUN, I. Y. F.; LAM, J. C. A study of Weibull parameters using long-term wind observations. **Renewable Energy**, Denver, v. 20, n. 2, p. 145-153, 2000.
- OLIVEIRA, L.S; **Regras e Boas Práticas para Instalação de Torres Anemométricas Voltadas para Estudo de Potencial Eólico**. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 115p, 2011.
- OLIVEIRA, S.S. de. **Análise do potencial eólico do estado da Paraíba utilizando modelos de mesoescala**. Tese de doutorado (Meteorologia) do Programa de Pós -Graduação em Meteorologia- PPGMet da UFCG. Campina Grande, 127p, 2013.
- MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind energy explained**. New York: Wiley, 569p, 2002.
- MARANHÃO, K.U.A. **Zoneamento Ambiental do Município de Monteiro**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental. Universidade Federal da Paraíba- UFPB. João Pessoa, PB, 96p. 2014
- MARTINS, F. R; GUARNIERI, R.A; PEREIRA, E.B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 1, p.1304-1-1304-13, 2008.

**MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME, 2023.** Balanço Energético Nacional – Ano Base 2022. Disponível em <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/ balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em 05 de outubro de 2022.

**MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME, 2022.** Balanço Energético Nacional – Ano Base 2021. Disponível na Internet em <http://www.mme.gov.br>. Acesso 10 de dezembro de 2023

MOREIRA JÚNIOR, F.D; **Viabilidade técnica/econômica para a produção de energia eólica em grande escala, no Nordeste Brasileiro.** Monografia ( Pós graduação em formas alternativas de energia). Universidade Federal de Lavras- UFLA. Lavras- MG, 41p. 2009

MOREIRA, A. L. ; REIS, R. A. ; RUGGIERI, A. C. ; SARAN JUNIOR, A. J., 2007. Evaluation of cool season forage species irrigated under grazing. **Cienc. Agrotecnol.**, 31 (6) : 1838-1844

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Análises das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil.** Disponível em <https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2023/04/SEEG-10-anos-v5.pdf>. Acesso em 01 de fevereiro de 2024.

[https://auniao.pb.gov.br/noticias/caderno\\_diversidade/pb-quer-se-tornar-polo-regional-em-geracao-de-energia-eolica](https://auniao.pb.gov.br/noticias/caderno_diversidade/pb-quer-se-tornar-polo-regional-em-geracao-de-energia-eolica), acesso em fevereiro de 2024.

PINTO, M. de O; Fundamentos da energia eólica. Livros técnicos e científicos- LTC. Rio de Janeiro- RJ, 368p, 2018.

PONCIANO, A. C.; BACK, A.J. Caracterização do regime de ventos em Laguna, Santa Catarina. **Revista Técnico Científica de Engenharia Civil- CIVILTEC**, v. 7, n. 2, p. 1-14; 2022.

QOAIDER, L.; STEINBRECHT, D. Photovoltaic system: A cost competitive option to supply energy to off-grid agricultural communities in arid regions. **Applied Energy**. v. 87, p. 427-435, 2010.

SACHS, I. **Desenvolvimento: includente, sustentável, sustentado.** Rio de Janeiro: Garamond, 154p, 2004.

SAHIN, B.; BILGILI, M.; AKILLI, H. The wind power potential of the eastern Mediterranean region of Turkey, **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 93, p. 171-183, 2005.

SAUER, I. L. A gênese e a permanência da crise do setor elétrico no Brasil. **Revista USP**. Ed

104, p. 145-174, 2015.

SILVA, A. M. B.; OLIVEIRA, L. B.; FONSECA, L. S. G.; MASSONE, A. C. **Energia eólica no Brasil: uma alternativa para o desenvolvimento sustentável.** Engenharia Elétrica, v. 26, n. 127, p. 1-10, 2023.

SILVA, G. R. **Panorama do potencial eólico no Brasil.** Ed. rev. Brasília: Dupligráfica, 95p, 2003

SILVA, A. R: Caracterização **do vento e potencial eólico no estado de Alagoas.** Dissertação de mestrado em Meteorologia. Instituto de Ciências Atmosféricas- ICAT- Universidade Federal de Alagoas- UFAL, 99 p, 2011

SILVA, G. A. **Impactos do ENOS (El niño – oscilação Sul) no potencial eólico do Nordeste Brasileiro:** uma análise em condições atmosféricas com ou sem a influência do Atlântico Tropical Sul. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) da Universidade Federal de Campina Grande- UFCG. Campina Grande- PB, 78 p, 2021.

SILVA, M. F; BARBOSA, R. V. R. Regime de ventos em cidades de diferentes regiões geográficas de Alagoas a partir de dados meteorológicos recentes. **Revista Brasileira de Climatologia.** Dourados, MS, n.18, v. 31, p.511-538, 2022.

SILVA, N. F **Energias renováveis na Expansão do setor elétrico brasileiro:** o caso da energia eólica. Rio de Janeiro. Synergia, 237p. 2015

SILVA NETO, M. F; **A problemática da salinização do solo no perímetro irrigado de São Gonçalo- PISF- PB.** Dissertação de Mestrado em Geografia- Programa de Pós graduação em Geografia- Universidade Federal da Paraíba- UFPB. João Pessoa, PB; 139p. 2013.

SOBRAL, F. S. B. **Avaliação do potencial eólico para a geração de energia na zona rural do estado de Sergipe.** Dissertação do Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Universidade Federal de Sergipe- UFS, 168 p. 2009

SOUSA, W.G. **Análise da variabilidade do vento no estado da Paraíba.** Dissertação de Mestrado em Meteorologia. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia. UFCG. Campina Grande, 110p, 2020.

STAUT, F. **O processo de implantação de parques eólicos no nordeste brasileiro.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica Salvador, Salvador, BA, 164 f, 2011.

STULL, R. B; Boundary layer clouds. In: An Introduction to Boundary Layer Meteorology.

Dordrecht: Springer Netherlands, 1988. p. 545-585.

TERASSI, P.M de B.; OLIVEIRA- JÚNIOR, J. F. de; GALVANI, E.; CORREIA FILHO, W. L. F.; GÓIS, G. de; SOBRAL, B.S.; BIFFI, V. H. R. Regime de ventos em Curitiba e Paranaguá, Paraná. **Revista Brasileira de Climatologia**. Ano. 15, v.25, p.294-318, 2021.

TRALDI, M. **Acumulação por despossessão**: a privatização dos ventos para a produção de energia eólica no nordeste brasileiro. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Estadual de Campinas- UNICAMP, Campinas- SP, 378p, 2019.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Versão Digital 2, Recife: 2006

ZAPAROLLI, D. 2019, disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/ventos-promissores-a-caminho/> Acesso em 15 de agosto de 2023.

WANG, Y; Y. ZHOU, J., ZHU, X., & LU, G. Energy consumption and economic growth in China: A multivariate causality test. **Energy Policy**, v. 39, n. 7, p. 4399-4406, 2011.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. (2006) **Atmospheric Science**: An Introductory Survey. 2nd Edition, Elsevier, Amsterdam, 352-353, 357, 367-368.