



UNILAB

**Universidade da Integração Internacional
da Lusofonia Afro-Brasileira**

**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-
BRASILEIRA**

**INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS**

DENNYS ALVES FEITOSA DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA NO MUNICÍPIO DE REDENÇÃO, CEARÁ.**

**REDENÇÃO
2021**

DENNYS ALVES FEITOSA DE OLIVEIRA

ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO
MUNICÍPIO DE REDENÇÃO, CEARÁ.

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energias do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energias.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Cunha Costa

REDENÇÃO
2021

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Oliveira, Dennys Alves Feitosa de.

O48a

Análise do potencial eólico para a geração de energia elétrica no município de Redenção, Ceará / Dennys Alves Feitosa de Oliveira. - Redenção, 2022.
51f: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2022.

Orientador: Prof.º Dr.º Alexandre Cunha Costa.

1. Aerogerador. 2. Energia Eólica. 3. Energias renováveis. 4. Maciço de Baturité - Ce. I. Título

CE/UF/BSCA

CDD 621.042

DENNYS ALVES FEITOSA DE OLIVEIRA

ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO
MUNICÍPIO DE REDENÇÃO, CEARÁ.

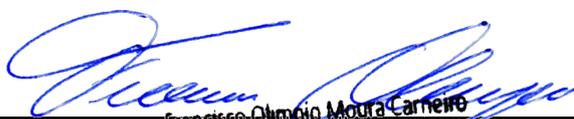
Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energias do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energias.

Aprovado em: 02/02/2022

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Alexandre Cunha Costa (Orientador)
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Prof. Dr. Francisco Olímpio Moura Carneiro
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)
Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável - SIAPE: 1148304



Prof. Dr. Gustavo Alves de Lima Henn
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me guiar todos os dias e por me ajudar a seguir firme em meus propósitos de vida.

A minha mãe Marta e meu pai Valmir, pelo amor e cuidado diário. Aqueles que sempre estiveram e estarão ao meu lado em todos os momentos. Nunca deixaram de acreditar em mim, nada disso teria sido possível sem eles.

À minha turma de entrada na Unilab, 2014.3, por compartilhar os prazeres e desprazeres da trajetória universitária, sempre dividindo os sorrisos e somando as forças.

Aos professores pelo exercício do dom de ensinar.

Ao Prof. Dr. Alexandre Cunha Costa pelas orientações e por todas as contribuições feitas para que os objetivos deste trabalho fossem alcançados.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente me ajudaram a chegar até aqui.

RESUMO

A diversificação da matriz energética é uma realidade no mundo, e a energia eólica é uma solução sustentável que vem se desenvolvendo cada vez mais. Neste trabalho foi analisado o recurso eólico para o município de Redenção no Estado do Ceará. Os dados anemométricos utilizados foram obtidos através de uma base de dados ERA5 a uma altura máxima de 100 m por um período de 10 anos. Também foi realizado o levantamento de todas as informações referentes a rugosidade e topografia da região através de *softwares* de simulação, e utilizadas na construção das estimativas do recurso eólico da região. A partir do recurso eólico do local, foi possível posicionar os aerogeradores nas melhores áreas, respeitando as restrições de declives, corpos d'água e áreas habitadas e extrair as informações de velocidade média, perdas por esteira, energia bruta, energia líquida e fator de capacidade. Onde foi obtido uma energia média anual de 150.130 MW, e um fator de capacidade médio de 19,04%.

Palavras-chave: Aerogerador. Energia eólica. Energias renováveis. Maciço de Baturité.

ABSTRACT

Energy from the energy matrix is a world reality, and sustainable diversification and the energy that comes next is increasingly a solution. In this work, the wind resource for the municipality of Redenção in the state of Ceará was analyzed. The anemometric data used were obtained through a database obtained from ERA5 at a maximum height of 100 m for a period of 10 years. It also carried out a survey of all information regarding the roughness and topography of the region through simulation software, and used in the construction of estimates of the wind resource in the region. Starting from the local energy resource, it was possible to position the efficiency factors, the aerodynamic capacity, the best average energy areas, the average capacity areas, the localized gross energy areas and the efficiency factors, from the capacity. Where an average annual energy of 150.130 MW was obtained, and an average capacity factor of 19.04%.

Keywords: Wind turbine. Wind energy. Renewable energy. Massif of Baturité.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da capacidade instalada.....	14
Figura 2 – Os principais mercados de energia eólica no mundo.....	18
Figura 3 – A Energia Eólica no Mundo.....	19
Figura 4 – Matriz Elétrica Brasileira.....	20
Figura 5 – Construção da usina do Mucuripe.....	21
Figura 6 – Zona de Convergência Intertropical.....	23
Figura 7 – Representação da camada limite atmosférica.....	24
Figura 8 – Distribuição de Weibull.....	25
Figura 9 – Rosa dos Ventos.....	26
Figura 10 – Torre de medição anemométrica exigida pela EPE.....	27
Figura 11 – Esteira de uma Turbina Eólica.....	29
Figura 12 – Sistema físico de um aerogerador.....	31
Figura 13 – Localização da Cidade de Redenção.....	33
Figura 14 – Sistema Elétrico Próximo à Área.....	34
Figura 15 – Ponto de Coleta dos Dados Anemométricos.....	35
Figura 16 – <i>Raster</i> das Curvas de Nível da Região Utilizadas no Mapa Topográfico.....	36
Figura 17 – <i>Raster</i> dos Obstáculos da Região Utilizados no Mapa de Rugosidade.....	37
Figura 18 – Perfil de Velocidade do Vento para a Região.....	41
Figura 19 – Perfil Sazonal da Velocidade do Vento para a Região.....	42
Figura 20 – Perfil Diário da Velocidade do Vento para a região.....	42
Figura 21 – Rosa dos Ventos para a Região.....	43
Figura 22 – Dados de Ventos Para Todo o Período.....	44
Figura 23 – Resultado das Propriedades dos dados de Vento.....	44
Figura 24 – Mapa Com as Declividade do Local.....	38
Figura 25 – Mapa de Rugosidades da Região.....	39
Figura 26 – Mapa de Topografia da Região.....	40
Figura 27 – Mapa de Recurso da Região.....	46
Figura 28 – Curva de Potência do aerogerador V-150.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Usinas eólicas em operação no Ceará.....	22
Tabela 2 – Valores de rugosidade associados a cobertura do solo.....	30
Tabela 3 – Medições obtidas com o ERA5	41
Tabela 3 – Relatório de Produção de Energia.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEÓLICA	Associação Brasileira de Energia Eólica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GWEC	<i>Global Wind Energy Council</i>
MW	<i>Megawatt</i>
GW	<i>Gigawatt</i>
MWH	<i>Megawatt hora</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
WASP	<i>Wind Atlas Analysis and Application Program</i>
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
BEN	Balanco Energético Nacional
CBEE	Centro Brasileiro de Energia Eólica
PIB	Produto Interno Bruto
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
PLAMEG	Plano de Metas do Governo
COELCE	Companhia Energética do Ceará
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
CLA	Camada Limite Atmosférica
MME	Ministério de Minas e Energia
KV	Quilovolt
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i>
WRG	<i>Wind Resource Grid</i>
NEB	Nordeste do Brasil

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 OBJETIVOS.....	14
2.1 Objetivos Gerais.....	14
2.2 Objetivos Específicos.....	14
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
3.1 O Cenário da Energia Eólica.....	15
3.1.1 A Energia Eólica no Mundo.....	15
3.1.2 A Energia Eólica no Brasil.....	17
3.1.3 A Energia Eólica no Ceará.....	18
3.2 Ventos.....	21
3.2.1 Camada Limite Atmosférica.....	21
3.2.2 Distribuição de Weibull.....	23
3.2.3 Sistemas de Medições.....	24
3.2.4 Efeito Esteira.....	26
3.3 Topografia.....	27
3.4 Rugosidade.....	27
3.5 Aero geradores.....	28
3.5.1 Classificação.....	28
3.5.2 Caracterização do Sistema Físico.....	29
4 METODOLOGIA.....	31
4.1 Coleta de Dados.....	31
4.1.1 Área de estudo e Sistema Elétrico.....	31
4.1.2 Topografia.....	34
4.1.3 Rugosidade.....	35
4.2 Análise Estatística dos Dados de Vento.....	36
4.3 Simulação.....	40
4.3.1 Grade de Recurso (<i>Resource Grid</i>).....	40
5 RESULTADOS.....	42
5.1 Dados de Entrada.....	42
5.2 <i>Micrositing</i>	45
5.3 Resultados da Simulação Para a Usina Eólica Redenção.....	46
6 CONCLUSÃO.....	49
7 REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

O cenário energético mundial tem se mostrado cada vez mais importante para o equilíbrio da vida no planeta. Ao longo dos tempos, as matrizes energéticas passaram por diversas mudanças com modernizações, tendendo, atualmente, para uma atuação mais presente das fontes renováveis. Essa preocupação com o meio ambiente, tem feito os países repensarem seu crescimento de forma mais sustentável.

Algumas medidas estão sendo adotadas para que o combate às mudanças climáticas se torne mais efetivas, como os acordos internacionais de redução de emissão de CO₂. Um exemplo desses acordos são os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas (UNICEF, 2022), quando foi criada uma agenda para que se consiga alcançar esses objetivos até 2030. O ODS 7 propõe: “Energia Limpa e acessível” e o ODS 13 propõe: “Ação contra a mudança global do clima”.

A transição energética é de fato muito importante para que essas ações se concretizem. Desse modo, buscam-se ações para aumentar a promoção da eficiência energética, os meios para armazenamento de energia e o estímulo ao uso de fontes que não emitam gases do efeito estufa na sua operação. Assim, é importante o uso das fontes renováveis como eólica, solar, biomassa, hidráulica dentre outras (ABEEólica, 2021).

O Brasil é um exemplo nessa forma de obtenção de energia limpa. Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) para o ano de 2018, de toda geração de energia elétrica nacional 83% dela era advinda de fontes renováveis, enquanto no restante do mundo esse valor era de apenas 25%.

Figura 1 – Evolução da capacidade instalada de energia por fonte eólica



Fonte: ABEEólica (2021)

Dentre as fontes de energias renováveis no Brasil, destaque-se a energia eólica, que ultrapassou a marca de 20 GW de capacidade instalada, representando 11,1% da geração elétrica nacional, espalhados por 751 parques eólicos e mais de 8.800 aerogeradores, essa marca está em expansão uma vez que existem outros 965,89 MW operando em fase de testes. Estima-se que até 2026 essa capacidade será de 32 GW, considerando apenas os contratos já assinados. (ABEEólica, 2021).

O Nordeste do Brasil (NEB) é líder nessa geração de energia. O NEB concentra 80% dos parques eólicos por se localizar em uma posição privilegiada com um dos melhores ventos do mundo para a geração de energia. Os ventos do NEB se caracterizam por serem mais constantes, possuem uma velocidade estável e não mudarem de direção com muita frequência (ABEEólica, 2021). De acordo com os dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), o Ceará ocupa a 3ª posição no ranking nacional de capacidade instalada e número de parques com 2.438,14 MW, 204 parques e 1.107 aerogeradores, atrás do Rio Grande do Norte com 6.082.825 MW e 201 parques e 2.571 aerogeradores, e da Bahia com 5.395,545 MW, 204 parques e 2.287 aerogeradores.

Os ventos são gerados pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre. Esses ventos são influenciados por alguns aspectos, como altura, rugosidade, relevo, dentre outros (Dutra, 2008). O dimensionamento de um parque eólico é fundamentado com base em requisitos técnicos e operacionais para um melhor funcionamento. Alguns softwares, como o *Windographer*®, *Wasp*®, *WindFarmer*® são utilizados para uma estimativa prévia da potência que pode ser gerada, bem como indicar os melhores locais para instalação das turbinas eólicas, de acordo com a disponibilidade e o recurso do local (Breitenbach, 2016). A partir de simulações, com a inserção de informações da região como os dados anemométricos, mapas de rugosidade e altimetria do terreno, curva de potência dos aerogeradores, é possível identificar o perfil do vento em qualquer local, fazendo com que se possa estimar as perdas de esteira para cada turbina no parque eólico, bem como sua produção anual líquida de energia.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral deste trabalho é analisar o potencial eólico da cidade de Redenção-CE e estimar a produção de energia elétrica por um parque eólico.

2.2 Objetivos Específicos

1. Realizar o tratamento estatístico dos dados meteorológicos da ERA-5;
2. Avaliar o terreno na área de instalação dos aerogeradores através da altimetria e da rugosidade;
3. Definir a posição dos aerogeradores (*micrositing*) no terreno, de modo a se obter o melhor resultado na geração de energia;
4. Calcular o fator de capacidade dos aerogeradores, as perdas por esteira e o resultado final de energia gerada pelo projeto.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 O Cenário da Energia Eólica

3.1.1 A Energia Eólica no Mundo

Desde a antiguidade, a humanidade utilizava os ventos para executar uma série de trabalhos. Esse recurso natural foi utilizado para mover barcos, engrenar moinhos e bombear água. Nos dias atuais, uma das principais utilizações do vento tem sido a geração de energia elétrica.

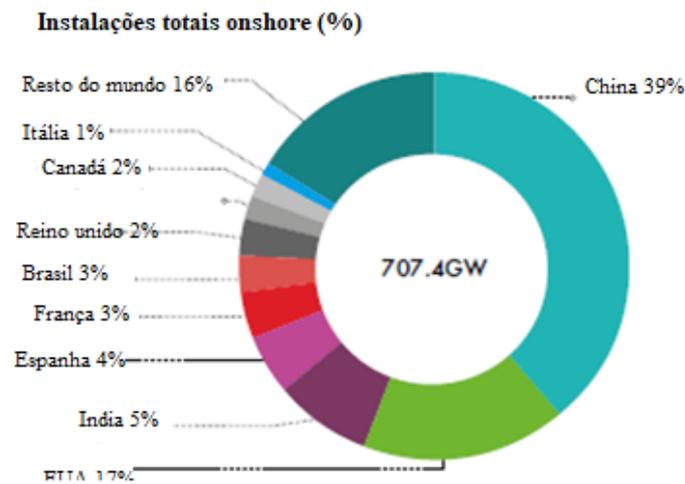
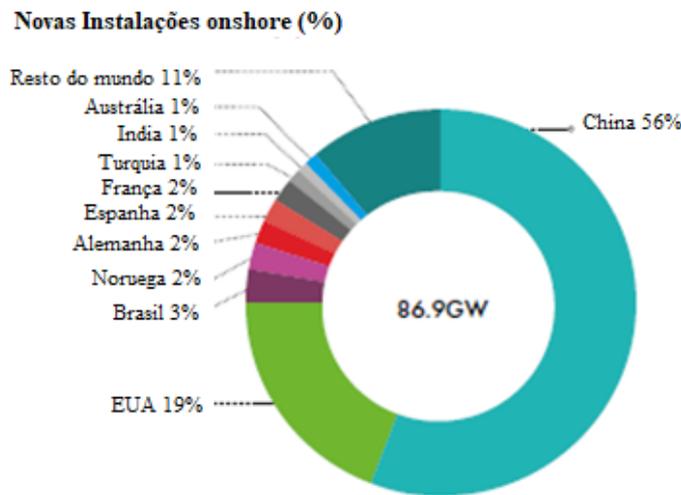
A produção da energia eólica em escala comercial no mundo deu início na década de 1970, devido à crise do petróleo ter atingido seu ápice. Alguns países da Europa e os EUA iniciaram os investimentos em fontes alternativas. Em 1976, na Dinamarca, ocorreu a primeira integração de uma turbina eólica comercial a uma rede pública de energia. (Gerelli, 2017).

As constantes preocupações com o meio ambiente aliadas a um consumo de energia elétrica mais consciente, fizeram com que as fontes de energia renováveis ganhassem destaque no cenário mundial, a prova disso são as conferências sobre as mudanças climáticas que buscam discutir formas de desenvolvimento cada vez mais sustentáveis e a redução nas emissões de gases que causam o efeito estufa e o aquecimento global.

A energia eólica se destaca por possuir recursos praticamente inesgotáveis, ser obtida de fontes não poluentes e ser cada vez mais eficiente com os avanços das tecnologias empregadas no seu desenvolvimento. Ela é eficiente para uma produção de larga escala, podendo ser uma boa alternativa também para os mercados híbridos, já que a energia eólica vem construindo bons resultados, aliando aerogeradores cada vez mais eficientes, com diâmetros dos rotores maiores e torres mais altas. (Ortiz, 2016)

Os principais mercados do mundo em energia eólica são formados por China, Estados Unidos, Alemanha, Índia e Espanha, que são responsáveis por 73% de todo potencial eólico, já para as novas instalações no ano de 2020 (Figura 2), os cinco principais mercados são: China, Estados Unidos, Brasil, Holanda e Alemanha, sendo responsáveis por 80,6% de todas as instalações. (GWEC, 2021).

Figura 2 – Os principais mercados de energia eólica no mundo



Fonte: Adaptado de GWEC (2021)

Segundo o relatório anual divulgado pela *Global Wind Energy Council (GWEC)*, 2020 foi o melhor ano para a energia eólica mundial, com um acréscimo de 93 GW (Figura 3), representando 53% a mais em relação a 2019 e totalizando 743 GW de capacidade instalada, sendo a China e Estados Unidos responsáveis por cerca de 75% dessas novas instalações. Atualmente a energia eólica é responsável por evitar que 1,1 bilhão de dióxido de carbono sejam lançados na atmosfera, sendo equivalente às emissões anuais de toda a América do Sul.

Figura 3 – A Energia Eólica no Mundo



Fonte: Adaptado de GWEC (2021)

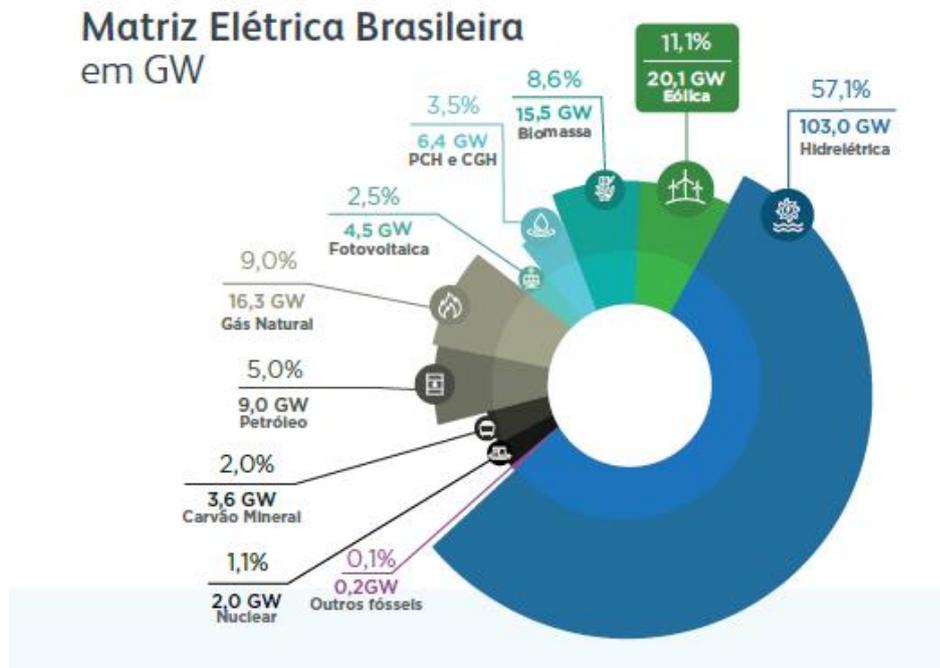
3.1.2 A Energia Eólica no Brasil

A primeira experiência de geração de energia eólica no Brasil ocorreu em 1992, quando o primeiro aerogerador entrou em operação comercial, com 225 KW de potência. Ele foi viabilizado entre a parceria do Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e a Companhia Energética de Pernambuco (CELPE) e financiado pelo instituto de pesquisas dinamarquesas Folkcenter (Gerelli, 2017).

Considerando todas as fontes de geração de energia elétrica brasileira, a que mais cresceu até novembro de 2021 foi a eólica, representando uma participação de 11,1% no cenário nacional, com uma capacidade instalada de 20,1 GW, sendo a segunda maior fonte de energia da matriz elétrica brasileira, ficando atrás apenas das hidrelétricas, que representam 57,1% com 103,0 GW, segundo o INFOVENTO da ABEEólica. Na Figura 4, observam-se as demais fontes de geração de energia elétrica que compõem a matriz brasileira.

Segundo a ABEEólica (INFOVENTO, 2021), para cada MW instalado de energia eólica, 15 postos de trabalho são criados, capacitando a mão de obra local, gerando renda tanto para os funcionários do setor como para os proprietários da terra, que arrendam os terrenos para as instalações das torres e ainda podem seguir com atividades agrícolas de plantações e criações de animais, pois a área ocupada pela turbina é de cerca de 8% da área necessária para a instalação de um aerogerador.

Figura 4 – Matriz Elétrica Brasileira



Fonte: ABEEólica (2021)

De acordo com estudos realizados pela GO Associados (INFOVENTO, 2021), a instalação de parques eólicos contribui para o aumento do Produto Interno Bruto (PIB) e do Índice de Desenvolvimento Humano do Município (IDHM). Os municípios que recebem os parques eólicos tiveram um crescimento de 21,15% no PIB e 20% no IDHM, em comparação aos que não possuem, considerando os períodos de 1999 a 2017 e 2000 a 2010, respectivamente.

A região que mais se destaca na geração da energia eólica é a Nordeste, onde grande parte da energia consumida no subsistema nordeste veio dessa fonte, com uma geração de 11.680 MW médio.

3.1.3 A Energia Eólica no Ceará

O estado do Ceará possui ventos regulares em sua orla, permitindo o seu aproveitamento ao longo dos anos, que tem como símbolo histórico os transportes de jangada para o exercício das atividades econômicas locais, porém alguns registros do século XVIII já mostram outras atividades sendo exercidas com o recurso eólico, como a utilização dos cataventos para o bombeamento de água.

Segundo o Atlas eólico e solar do Ceará (2019), alguns fatos históricos relevantes que contribuíram com o desenvolvimento dessa energia renovável dentre os quais se destacam

a inclusão no planos de metas do governo do Estado (PLAMEG) para avaliar os recursos e a viabilidade energética solar, eólica e biomassa em 1979, a inauguração do parque eólico do Mucuripe (Figura 5), com 4 aerogeradores de 300 KW cada, em 1996 e a realização da 1ª concorrência nacional de energias renováveis pela Companhia Energética do Ceará (COELCE), que teve como resultado nas primeiras usinas eólicas comerciais do país que foram: Prainha (10MW) e Taíba (5 MW), em 1998 (Atlas eólico e solar do Ceará, 2019).

Figura 5 – Construção da usina do Mucuripe



Fonte: Atlas eólico e solar do Ceará (2019)

A energia elétrica produzida no Ceará vem de 129 usinas, com 4.433 MW de potência, sendo esse montante equivalente a 2,7% da capacidade instalada nacional, dentre essas usinas 81 são eólicas. Em 2018 o estado do Ceará produziu 5.736 GWh por fonte eólica, o que equivale a 41% da capacidade do estado, na Tabela 1 estão listadas as principais usinas em operação, o município em que estão instaladas e suas respectivas potências (atlas eólico e solar do Ceará, 2019).

Tabela 1 – Usinas eólicas em operação no Ceará

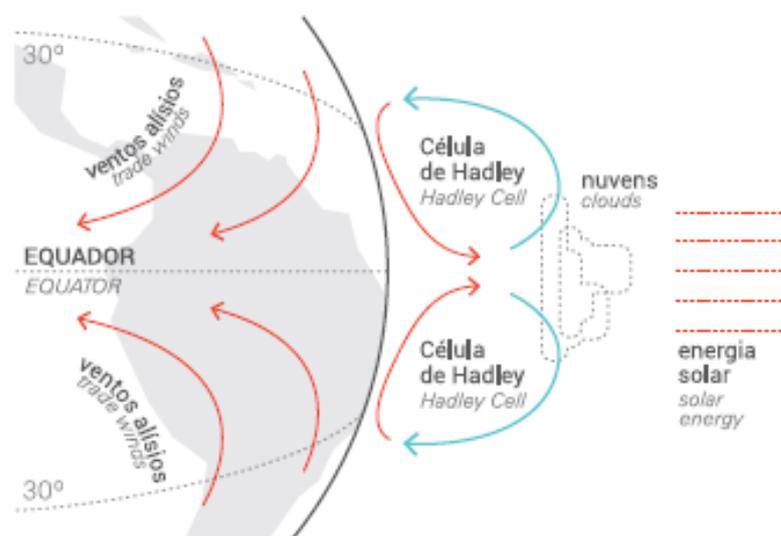
Nome do conjunto ou da usina Group or power plant name	Nº de usinas No of power plants	Município Municipality	Potência (MW) Capacity (MW)
Faixa*	9	Trairi	227,8
Trairi*	8	Trairi	212,6
Itarema V*	9	Itarema	207,0
Icarai*	5	Amontada	140,7
Aracati III*	3	Aracati	138,5
Santa Rosália*	5	Tianguá e Ubajara	130,1
Santo Inácio*	4	Icapuí	98,7
Papagaios*	3	Acaraú e Itarema	87,0
Cacimbas*	5	Ibiapina e Ubajara	86,1
Acaraú II*	2	Acaraú	70,8
Taiiba*	3	São Gonçalo do Amarante	56,7
Pedra Cheirosa*	2	Itarema	48,3
Pitombeira*	5	Aracati	98,7
Beberibe	1	Beberibe	105,0
Eólica Canoa Quebrada	1	Aracati	54,6
Cataventos Acaraú I	1	Acaraú	42,0
Dunas de Paracuru	1	Paracuru	28,8
Enece Pindoretama	1	Pindoretama	28,0
Eólica Taiiba	1	São Gonçalo do Amarante	25,6
Foz do Rio Choró	1	Beberibe	25,5
Icarai	1	Amontada	25,2
Icarazinho	1	Amontada	25,2
Lagoa do Mato	1	Aracati	3,2
Malhadinha I	1	Ibiapina	23,1
Mucuripe	1	Fortaleza	2,4
Paracuru	1	Paracuru	16,8
Praia Formosa	1	Camocim	16,5
Praias de Parajuru	1	Beberibe	10,5
Prainha	1	Aquiraz	10,0
Quixaba	1	Aracati	5,0
Taiiba Albatroz	1	São Gonçalo do Amarante	4,5
TOTAL			2 054,9

Fonte: Atlas eólico e solar do Ceará (2019)

Devido sua localização próxima a linha do Equador o estado do Ceará tem o seu clima influenciado principalmente pela zona de convergência intertropical (ZCIT) em uma escala mais ampla, e pelo oceano Atlântico em uma escala regional, em seus 573 km litorâneos. Há também influência de mesoescala em alguns locais do estado onde a topografia é complexa como na Serra da Ibiapaba e na Chapada do Araripe, como pode ser observado na Figura 6.

Com isso, a posição da ZCIT tem um papel fundamental na geração de precipitação dessa faixa do planeta, pela caracterização da estação chuvosa no estado de fevereiro a maio e a modulação dos ventos alísios, pois quando ela se aproxima do estado a tendência é a redução da velocidade dos ventos, e quando ela se afasta a tendência é intensificá-los, sazonalmente esse efeito ocorre na segunda metade do ano quando a ZCIT se encontra mais ao norte do estado (Atlas eólico e solar do Ceará, 2019).

Figura 6 – Zona de Convergência Intertropical



Fonte: Atlas eólico e solar do Ceará (2019)

3.2 Ventos

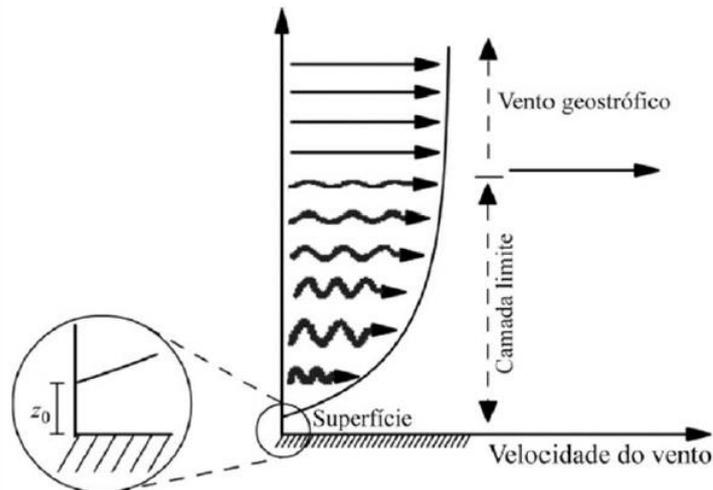
3.2.1 Camada Limite Atmosférica

O vento é ocasionado pela diferença de densidades de camadas de ar frias e quentes, e pelo aquecimento da superfície terrestre ocasionado pela radiação do sol. Esse aquecimento ocorre de forma desigual, provocando o deslocamento das massas de ar. Esses gradientes de pressão se movem em direção a linha do equador para ambos os hemisférios. (Breitenbach, 2016).

Quanto mais próximo da superfície, mais turbulento será o vento. Isso ocorre devido ao atrito que age diminuindo a velocidade dos ventos, devido aos obstáculos na superfície, rugosidade do terreno, coberturas vegetais, elevações, dentre outros fatores (Breitenbach, 2016). A camada limite atmosférica (CLA) é definida em uma determinada altura onde o escoamento do ar não sofre influência da superfície terrestre, denominado de vento

geostrófico (Figura 7). Há também uma região com uma altura infinitesimal do solo onde a velocidade do vento é considerada nula (Ortiz, 2016).

Figura 7 – Representação da camada limite atmosférica



Fonte: Ortiz (2016)

Segundo apresentado por Ortiz (2016), existem dois tipos de modelos utilizados nos cálculos de aproximação do perfil de velocidade na CLA, esses modelos são o exponencial e o logarítmico.

O modelo exponencial é representado pela equação 1:

$$V(z) = V(z_r) \left(\frac{z}{z_r} \right)^n \quad (1)$$

Onde z é a altura onde se deseja determinar a velocidade [m], z_r é a altura de referência [m], V é a velocidade a qual a altura está associada [m/s] e n é o coeficiente de extrapolação [adimensional] e varia conforme a rugosidade do terreno.

O modelo logarítmico é descrito pela equação 2:

$$V_h = \frac{V^*}{k} \ln \left(\frac{h}{z_0} \right) \quad (2)$$

Onde h é a altura de interesse [m], V_h é a velocidade do vento na altura h [m/s], V^* é a velocidade de fricção [m/s], z_0 é o comprimento de rugosidade [m] e k é a constante de Von Kármán (usualmente 0,4) [adimensional].

3.2.2 Distribuição de Weibull

Em 1951, o físico W. Weibull mostrou em seu artigo a distribuição de probabilidade, que posteriormente levou o seu nome. Esse recurso é aplicado na análise da confiabilidade, permitindo apresentar falhas devido ao desgaste, falhas de partida, falhas aleatórias, além de contar com uma simples representação gráfica (Mota, 2019). Nos estudos eólicos, a distribuição de Weibull fornece uma ótima precisão na descrição das circunstâncias do vento, na qual é possível estimar o potencial energético do vento (Mota, 2019).

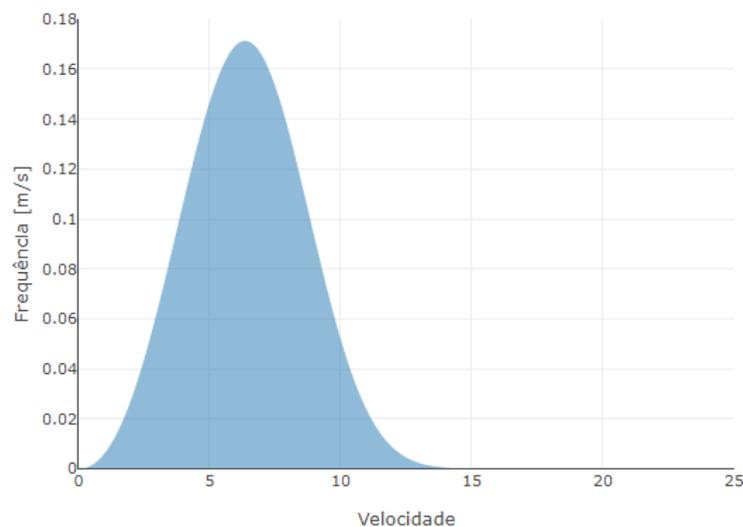
A distribuição de probabilidade de Weibull (Figura 8) é considerada a mais adequada na descrição do regime de ventos de um determinado local ao longo de um ano. Ela é definida pelos fatores de escala c , em m/s e de forma k , adimensional, sendo uma distribuição de frequências biparamétrica (Ortiz, 2016).

A equação de densidade de probabilidade que define a distribuição de Weibull é dada por:

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{n-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (3)$$

Onde a variável c depende da velocidade do vento e k com a variância da velocidade, assim quanto maior for o k , mais alta e estreita será a distribuição, ou seja, o desvio padrão será menor.

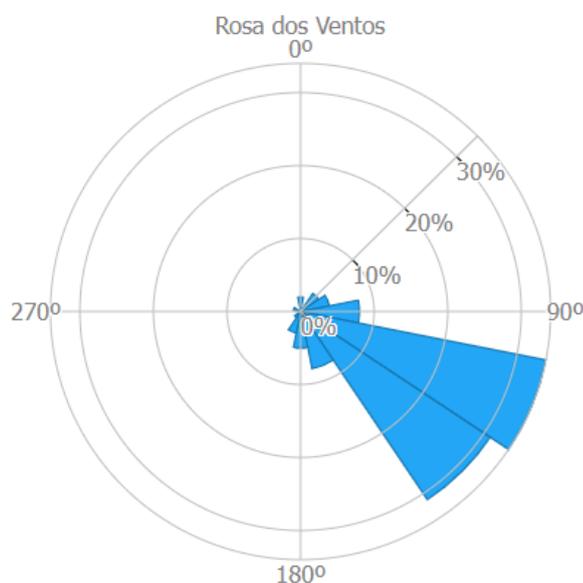
Figura 8 – Exemplo de uma Distribuição de Weibull



Fonte: Atlas eólico do Ceará (2019)

Outro fator que merece destaque nos estudos eólicos é a direção do vento, identificar de onde o vento é proveniente e como sua velocidade está distribuída. Para isso utiliza-se a rosa dos ventos dividida em 12 setores de 30° ou 16 setores de 22,5°, igualmente espaçadas e partindo do zero (centro do círculo), onde se concentram ventos mais calmos com valores de velocidades mais inferiores, e aumentando (extremidade do círculo), com ventos mais fortes (Figura 9).

Figura 9 – Rosa dos Ventos



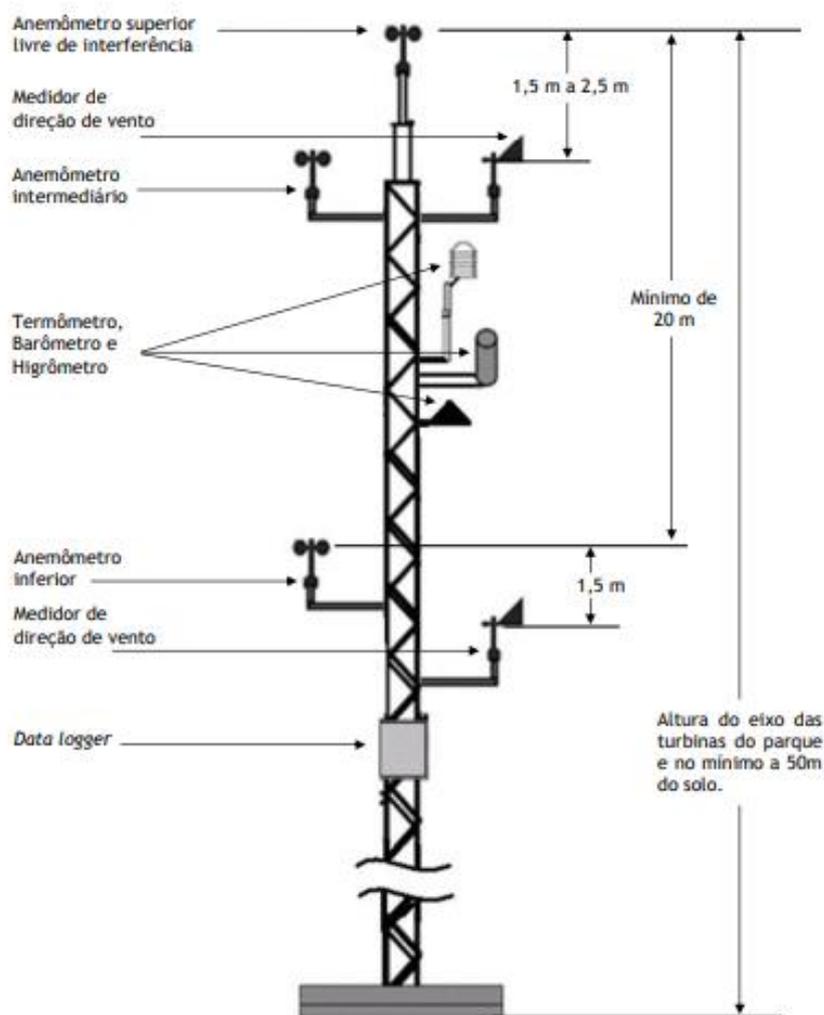
Fonte: Atlas eólico do Ceará (2019)

3.2.3 Sistemas de Medições

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE), regulamenta os sistemas de medições para os empreendimentos que desejam participar de leilões de energia. Segundo a sua nota técnica DEA (*Data Envelopment Analysis*) 08/14 de instruções para as medições anemométricas e climatológicas, em parques eólicos, algumas regras precisam ser seguidas, como a instalação da torre anemométrica mostrada na Figura 10.

Essa torre deve ser posicionada na parte frontal do parque eólico tendo como referência a direção predominante do vento, sem que haja interferências por obstáculos naturais ou que por parques vizinhos seja a menor possível

Figura 10 – Torre de medição anemométrica exigida pela EPE



Fonte: EPE (2014)

Ainda de acordo com a norma técnica DEA 08/14, a EPE exige que a torre contenha três anemômetros do tipo concha, dois medidores de direção dos ventos, um medidor de umidade do ar, um medidor de pressão barométrica e um termômetro, que precisam ficar dispostos na torre conforme o item 2.11 da norma técnica

Um anemômetro deverá ser instalado no topo da estação de medição (anemômetro superior), em altura do solo igual à do eixo das turbinas do parque eólico e, no mínimo, a 50 (cinquenta) metros de altura do solo;

O anemômetro superior deve estar livre de perturbações e interferências causadas por outros instrumentos de medição ou de sinalização;

O segundo anemômetro (anemômetro intermediário) deve ser instalado à distância de até 2,5 (dois vírgula cinco) metros abaixo do anemômetro superior;

O terceiro anemômetro (anemômetro inferior) deve ser instalado à distância mínima de 20 (vinte) metros abaixo do anemômetro superior e, preferencialmente, na altura inferior da ponta da pá das turbinas;

O medidor superior de direção de vento deve ser instalado à distância mínima de 1,5 (uma vírgula cinco) metros abaixo do anemômetro superior e máxima de 10% da altura do eixo das turbinas do parque eólico;

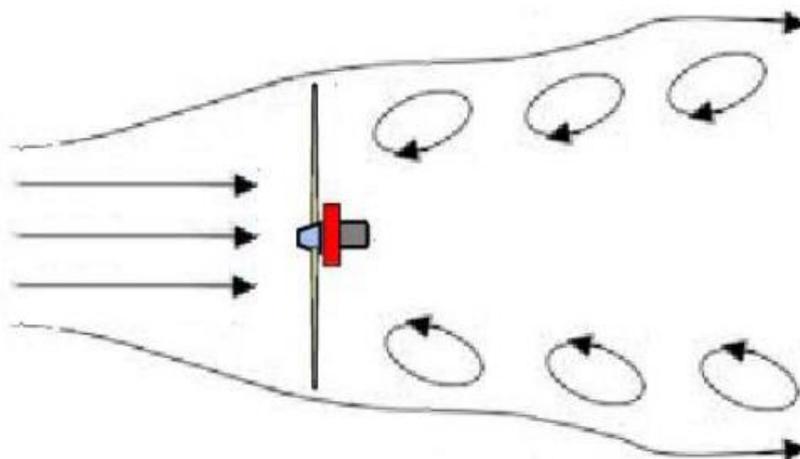
O barômetro, o medidor de umidade relativa do ar e o termômetro devem ser instalados preferencialmente entre 1,5 metros e 10 metros abaixo do topo da estação de medição (...). (Norma Técnica DEA 08/14 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2014, p. 3).

Os anemômetros de copo funcionam de acordo com a contagem da rotação de sua estrutura de copos, montado sobre um eixo fixo, e é responsável pela medição da velocidade do vento. O Wind Vane funciona com a indicação da posição de um eixo com uma aleta que se alinha com a direção do vento e um referencial. O barômetro utiliza o efeito piezoelétrico com a medição através da variação da tensão elétrica, gerada por cristais a uma resposta da tensão mecânica. O higrômetro identifica a umidade de acordo com alterações causadas nas propriedades dielétricas de um material posicionado entre dois eletrodos. E o termômetro faz a medição de temperatura baseado na alteração da resistividade de condutores metálicos (Atlas eólico do Ceará, 2019).

3.2.4 Efeito Esteira

O posicionamento dos aerogeradores em um parque eólico é fundamental para que não ocorra o efeito esteira (Figura 11), que é o resultado do vento após a turbina extrair parte de sua energia, deixando uma esteira a jusante, esse vento resultante é caracterizado por apresentar velocidade reduzida e elevado nível de turbulência (Ortiz, 2016).

As turbinas que operam dentro dessa faixa de esteira tendem a produzir menos energia, sofrer maiores cargas estruturais, aumentar processos de fadigas e custos com manutenções, em comparação às que operam em áreas livres dessa interferência.

Figura 11 – Esteira de uma Turbina Eólica

Fonte: Martins (2015)

3.3 Topografia

A topografia do terreno pode ser caracterizada por suas curvas de nível, sendo fundamental para a caracterização do escoamento atmosférico de acordo com a complexidade do terreno. O escoamento é acelerado em terrenos mais complexos, e em alguns casos mais indicados para a instalação dos aerogeradores. Contudo, é importante verificar a topografia a ser estudada, uma das formas é através de um mapa digital de elevação com as informações da altitude através das curvas de nível georreferenciadas. (Ortiz, 2016).

Na determinação do potencial eólico de um local, as características topográficas são fundamentais, pois é através delas que podemos realizar simulações de viabilidade da instalação do parque eólico, considerando a complexidade do terreno e a extrapolação da densidade do ar.

3.4 Rugosidade

A rugosidade aerodinâmica ou comprimento de rugosidade (z_0), é definida por um parâmetro das características da cobertura do solo, na modelagem do vento próximo à superfície. Em outras palavras é a distância vertical que se pode considerar um perfil de escoamento do vento vertical, ou seja quanto mais densos e altos forem a sua formação, maior será a dificuldade de escoamento do vento neste local (Atlas Eólico da Bahia, 2013). Geralmente, a rugosidade de um terreno pode ser formada por: árvores, arbustos, vegetação rasteira, construções, dentre outros (Mota, 2019).

O comprimento de rugosidade pode ser calculado, mas na prática ele vem tabelado com base em estudos prévios. Isso ainda é um problema para a literatura, já que existem diversas formas de se calcular a rugosidade aerodinâmica. Contudo, é importante que seja realizada uma estimativa robusta, por ser fundamental para o desenvolvimento de projetos de energia eólica.

A escolha dos valores de rugosidade tem como base as condições do contorno da região, de considerações termodinâmicas e da atmosfera, logo ela é determinada pela altura dos elementos, espaçamentos e características de como eles se encontram na superfície terrestre. Na Tabela 2, são apresentadas algumas faixas de rugosidade para tipos de cobertura e/ou uso da terra.

Tabela 2 – Valores de rugosidade associados a cobertura do solo

Tipo de Cobertura e/ou Uso da Terra	Faixa de Rugosidade z_0 [m]
Áreas urbanas	0,4 – 3,0
Florestas	0,4 – 0,8
Caatinga	0,1 – 0,4
Cerrado	0,1 – 0,4
Culturas agrícolas	0,02 – 0,1
Pastagens	0,02 – 0,05
Solo exposto	0,001 – 0,01
Corpos d'água (lagos, oceano) (sem vento de superfície)	0,0002 – 0,001

Fonte: Atlas Eólico da Bahia (2013)

3.5 Aeroeradores

3.5.1 Classificação

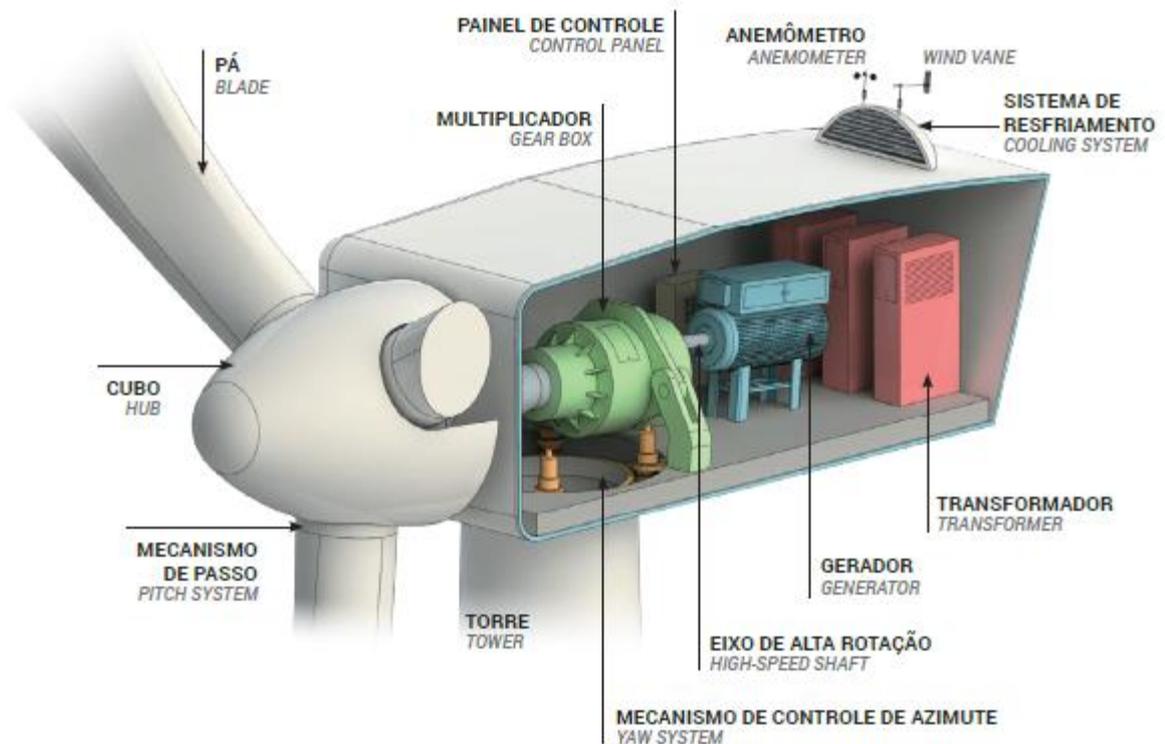
Os aeroeradores são classificados quanto ao seu eixo de duas maneiras, podendo ser de eixo vertical ou horizontal. Os de eixo vertical tem como vantagem não necessitar de nenhum tipo de controle para a orientação da direção do vento, além de ser possível que a caixa de engrenagens seja instalada no solo, mas em contrapartida sua desvantagem são as pás, localizadas próximas ao solo, onde existe um vento com velocidade menor e com maior turbulência. Já os aeroeradores de eixo horizontal possuem como vantagem o formato das pás

do rotor, que são projetadas para alcançarem alta eficiência, e sua altura de instalação, que alcançam ventos maiores e mais constantes, já as desvantagens são referentes a necessidade de um sistema de controle de direção em relação a posição do vento, e a logística dos equipamentos no transporte e instalação (Breitenbach, 2016).

3.5.2 Caracterização do Sistema Físico

Os aerogeradores são compostos por pás que se movimentam de acordo com a velocidade dos ventos, girando um rotor, que transmite a geração multiplicando sua rotação através de uma caixa multiplicadora ao gerador, convertendo a energia cinética em energia elétrica (Figura 12). A energia obtida dessa conversão é injetada na rede de média tensão do parque até uma subestação, onde transformadores elevam a tensão para que essa energia possa ser transferida às cidades nas extensas linhas de transmissão (Neoenergia, 2021).

Figura 12 – Sistema físico de um aerogerador



Fonte: Atlas Eólico do Ceará (2019)

Existe uma tendência mundial segundo o atlas eólico do Ceará, para o aumento nas dimensões das turbinas bem como na sua capacidade de conversão de energia. Esse aumento favorece a viabilização econômica, pois permitiria a instalação de aerogeradores em locais com velocidades de vento mais baixas, uma vez que os melhores locais já estão sendo ocupados por empreendimentos já viabilizados.

Por outro lado, com o aumento do diâmetro dos rotores, o peso também tem um ganho bastante significativo, com uma razão aproximadamente quadrática ao raio das pás. Com isso surgem novos desafios como o desenvolvimento de materiais mais leves, para a fabricação das pás, a redução de aço nas torres, caixas multiplicadoras mais robustas para suportar maiores cargas e criação de soluções na logística de pás, podendo ser adotado o modelo modular.

4 METODOLOGIA

Para a obtenção das informações sobre o potencial eólico, foi realizado um estudo do local a ser implantado o parque, a fim de identificar os tipos de rugosidades do terreno, altimetria e outros possíveis obstáculos. Em seguida foi utilizada uma base de dados ERA-5, com um período de medição de 10 anos, onde foi executado o processamento desses dados, observando o comportamento das variáveis e verificando a coerência das informações ao longo do tempo.

4.1 Coleta de Dados

4.1.1 Área de estudo e Sistema Elétrico

A área de estudo do potencial eólico localiza-se no município de Redenção (Figura 13), na região do maciço de Baturité, a 55 km de distância de Fortaleza, no Estado do Ceará. O município tem 225,3 km² e cerca de 29.053 habitantes de acordo com o último censo, e uma altitude de 88 metros acima do nível do mar (Anuário do Ceará, 2021).

Figura 13 –Localização da Município de Redenção



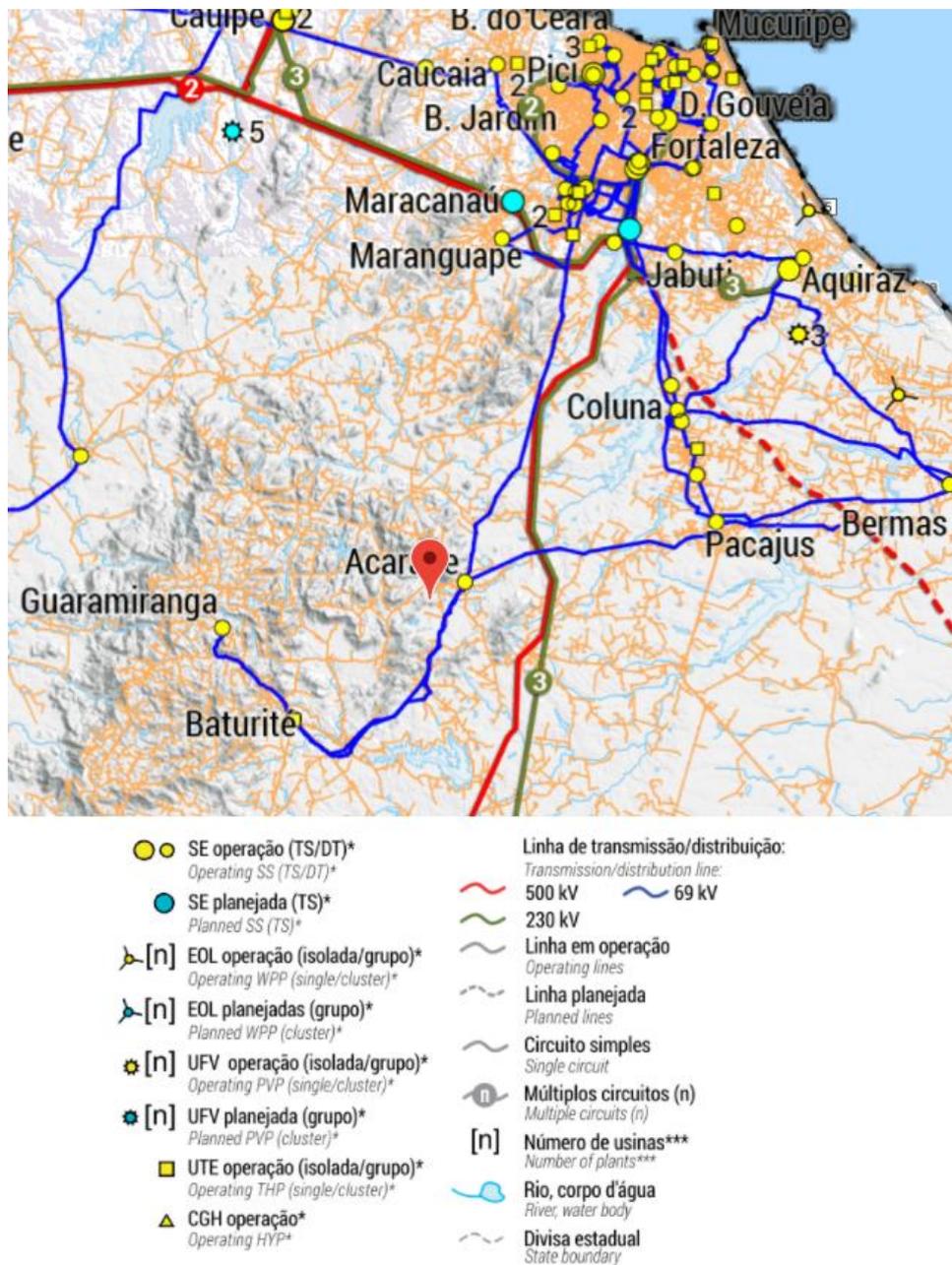
Fonte: (Anuário do Ceará, 2021)

O clima do município varia do tropical quente semiárido brando, tropical quente subúmido e o tropical quente úmido, com chuvas de janeiro a abril, com precipitação média no ano de 2019 de 1.159 mm, ao longo do ano a temperatura varia de 22° a 35°. Em Redenção a porcentagem de céu encoberto por nuvens sofre uma grande variação sazonal, com períodos de

menor cobertura iniciando em maio e encerrando em outubro, e maior cobertura iniciando em outubro e terminando em maio. (*Weatherspark*, 2022).

Os dados de infraestrutura são importantes para a viabilidade da instalação de um parque eólico. De acordo com o Atlas Eólico e Solar do Ceará, a subestação mais próxima está localizada a 3,3 km de distância da sede municipal, a rede de alta tensão distribuição (69 KV) a 2,5 km e a rede de transmissão (230 e 500 KV) a 11,5 km (Figura 14).

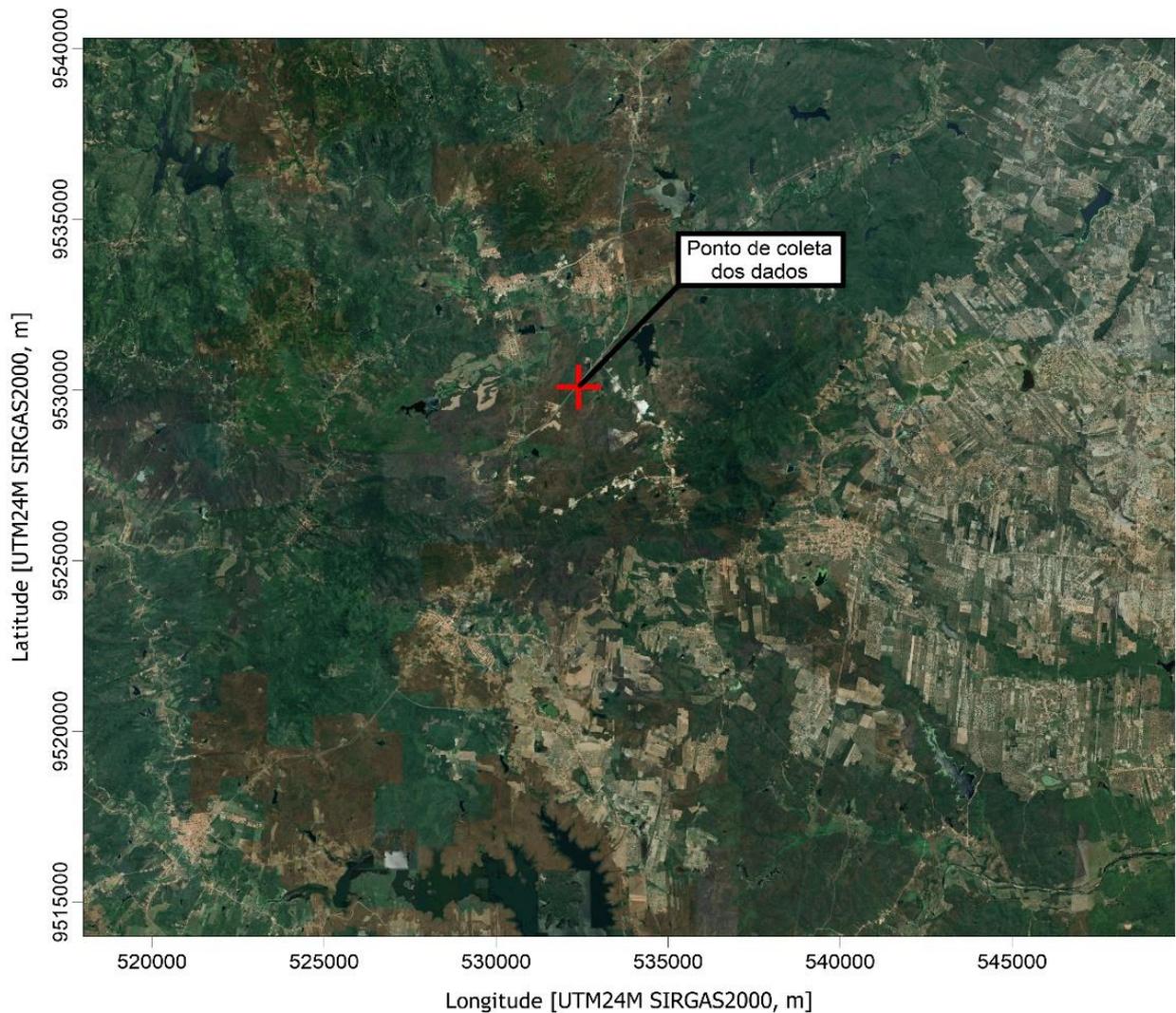
Figura 14 – Sistema Elétrico Próximo a Área



Fonte: Adaptado de Atlas Eólico e Solar do Ceará (2019)

Segundo o Atlas eólico do Ceará (2019), para um efeito de comparação, considerando uma altura de 100 m, a região possui ventos com velocidade média anual de 4,5 m/s, com direção predominante a leste (90°). O ponto de coleta dos dados anemométricos (Figura 15) tem coordenadas 532398.00 m E, 9530088.00 m S, do sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM), datum WGS 84, zona 24 M.

Figura 15 –Ponto de Coleta dos Dados Anemométricos



Fonte: Adaptado do Google Earth (2022)

O local é composto por planícies e montanhas com altitudes de até 835 m acima do nível do mar, a topografia no entorno do local do projeto pode ser considerada significativamente complexa, pelo fato de existirem muitas zonas de declives elevados.

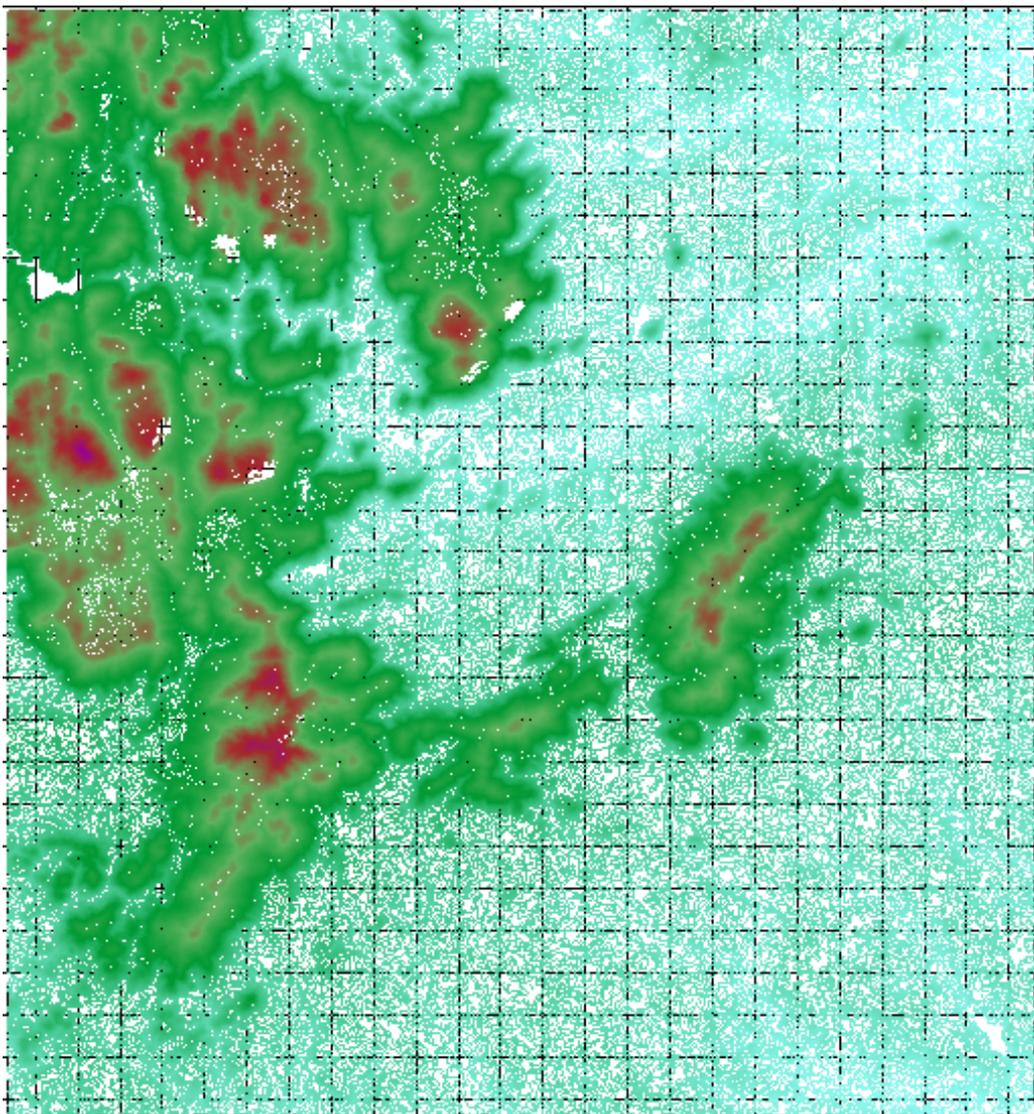
Os dados anemométricos utilizados neste estudo foram obtidos através da base de dados ERA5, que cobrem a superfície terrestre em uma grade de 30 km e fornecem medições

com frequência temporal horária de diversas variáveis climáticas atmosféricas, tanto terrestres como oceânicas.

4.1.2 Topografia

Para realizar o mapeamento da topografia existente na região, foram utilizados os dados SRTM do local, um modelo digital de elevação espacial, para gerar as curvas de nível (Figura 17) através do software *Global Mapper*®, que gera o mapa do local desejado e em seguida adicionado no *WAsP Map Editor*®, que salva no formato utilizado para o *WAsP*®. O local apresenta vegetação de caatinga arbustiva densa e florestas subcaducifólica tropical pluvial, com relevo de maciços residuais e depressões sertanejas (Anuário do Ceará, 2021).

Figura 17 – Raster das Curvas de Nível da Região Utilizadas no Mapa Topográfico

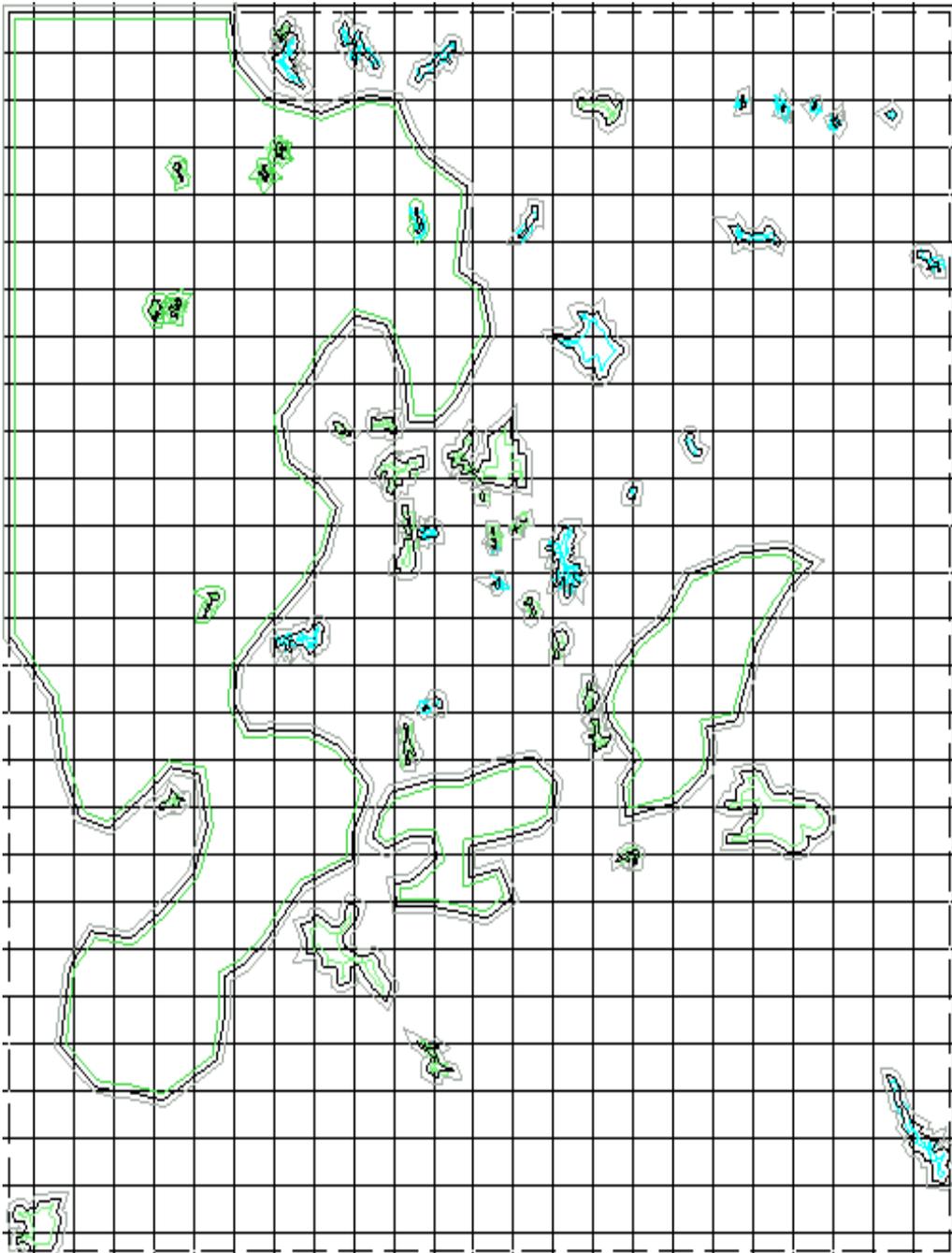


Fonte: Autor

4.1.3 Rugosidade

Para definir as rugosidades do local de estudo, foram utilizadas imagens de satélites coletadas a partir do software Google Earth Pro®, relacionando a rugosidade existente no local ao seu valor previamente tabelado, essa etapa foi realizada utilizando o WAsP Map Editor®, onde foi aplicado comprimentos de rugosidades as diferentes regiões interna e externa a ela (Figura 19).

Figura 17 – *Raster dos Obstáculos da Região Utilizados no Mapa de Rugosidade*



Fonte: Autor

4.2 Análise Estatística dos Dados de Vento

Para a realização deste estudo foram obtidos dados da série ERA5, que segundo Paiva (2019), pode ser definida como:

O produto ECMWF *ReAnalysis* ERA5 é desenvolvido pelo *Copernicus Climate Change Service*, implementado pelo *European Centre for Medium - Range Weather Forecasts* (ECMWF), (...). Os dados de reanálise são produzidos pela combinação de previsões numéricas de curto prazo com dados observacionais. O ERA5 é produzido usando a assimilação de dados em quatro dimensões da atmosfera e superfície por meio do *Integrated Forecast System* da ECMWF com 137 níveis verticais em coordenadas sigma (que usam a pressão atmosférica na superfície como referência) em grades com 31 km de resolução para os níveis atmosféricos.

Os dados foram obtidos em padrão horário, no período de 01 de janeiro de 2010 até 31 de dezembro de 2020, totalizando 10 anos, com as seguintes variáveis: velocidade do vento, direção do vento, temperatura e umidade do ar. Na tabela abaixo são apresentados os sensores utilizados no trabalho, o período de medição, tipo de medição, altura e a cobertura dos dados obtidos.

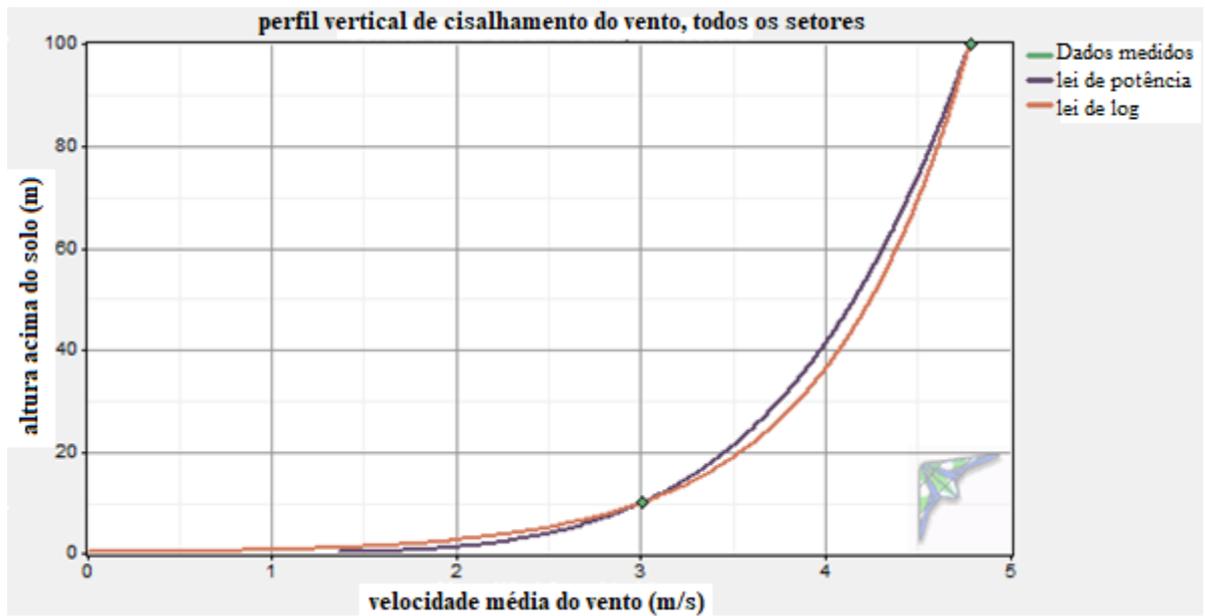
Tabela 3 – Medições obtidas com o ERA5

Tipos de medição	Período de medição		Altura [m]	Cobertura [%]
	Início	Fim		
Velocidade	01/01/2010	31/12/2020	100	100
Velocidade	01/01/2010	31/12/2020	10	100
Direção	01/01/2010	31/12/2020	100	100
Direção	01/01/2010	31/12/2020	10	100
Temperatura	01/01/2010	31/12/2020	2	100
Umidade	01/01/2010	31/12/2020	2	100

Fonte: Autor

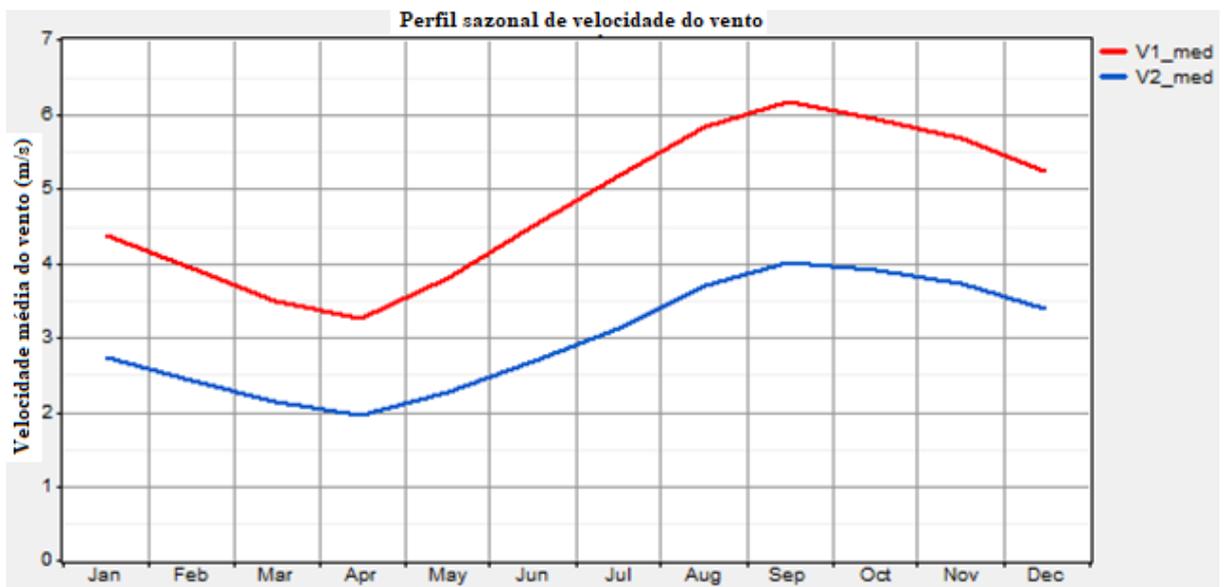
Esses dados são organizados em uma tabela de uma planilha eletrônica, e inseridos no *Windographer*®, um *software* de análise de dados de vento, capaz de gerar um relatório com informações da campanha de medição, como: início, fim e duração, informações sobre as propriedades termodinâmicas médias: pressão, temperatura e massa específica, rugosidade, perfil de velocidade do vento, comportamento diário e mensal das médias de velocidade, frequência das direções e das médias, dentre outras. (Martins, 2015). Essas informações estão apresentadas nas Figuras 21 a 24.

Figura 18 – Perfil de Velocidade do Vento para a Região



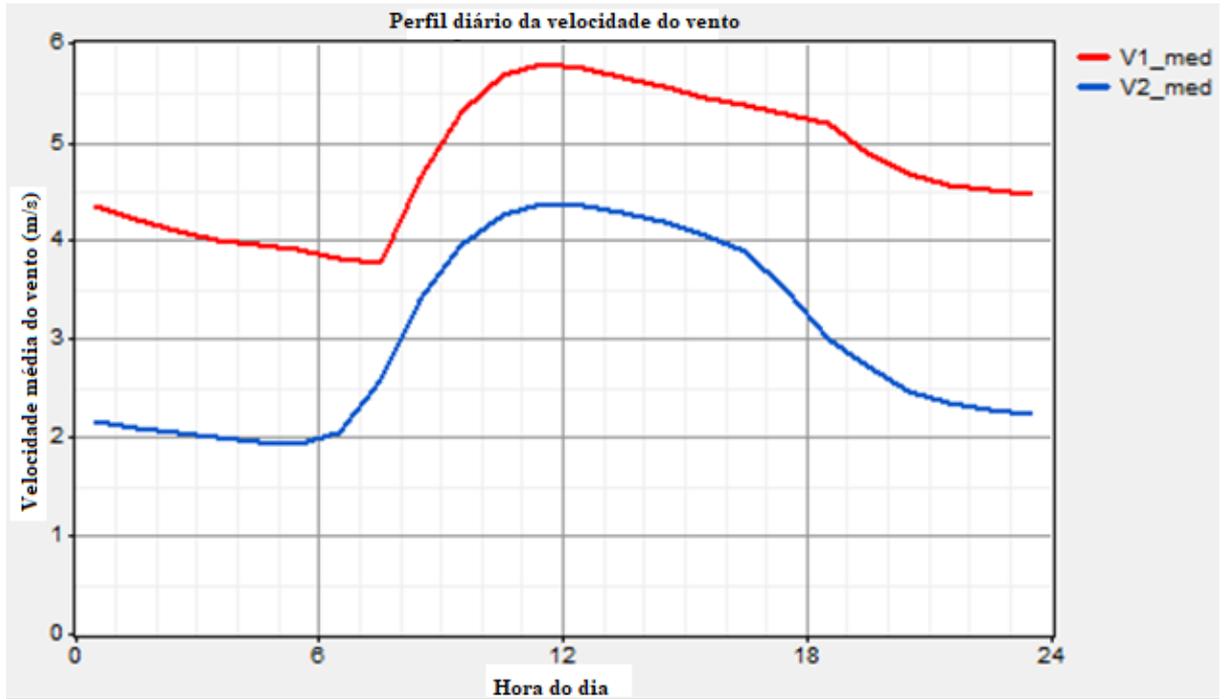
Fonte: Autor

Figura 19 – Perfil Sazonal da Velocidade do Vento para a Região



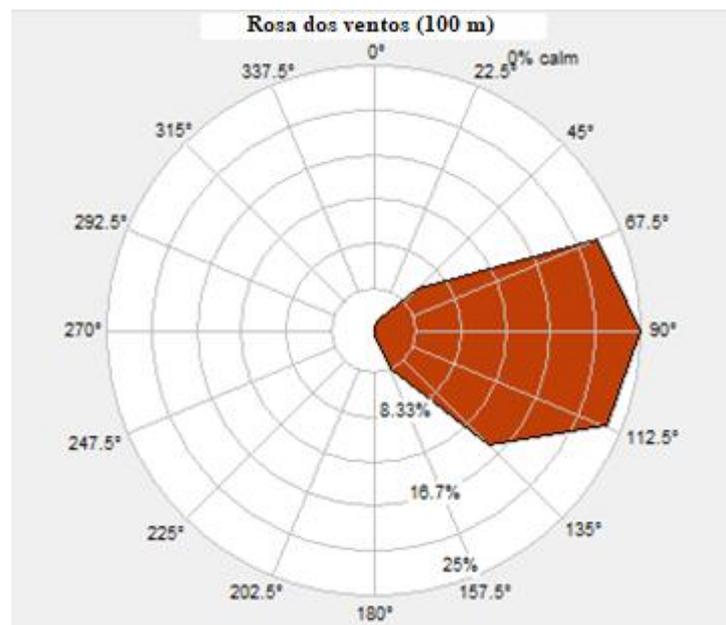
Fonte: Autor

Figura 20 – Perfil Diário da Velocidade do Vento para a região



Fonte: Autor

Figura 21 – Rosa dos Ventos para a Região

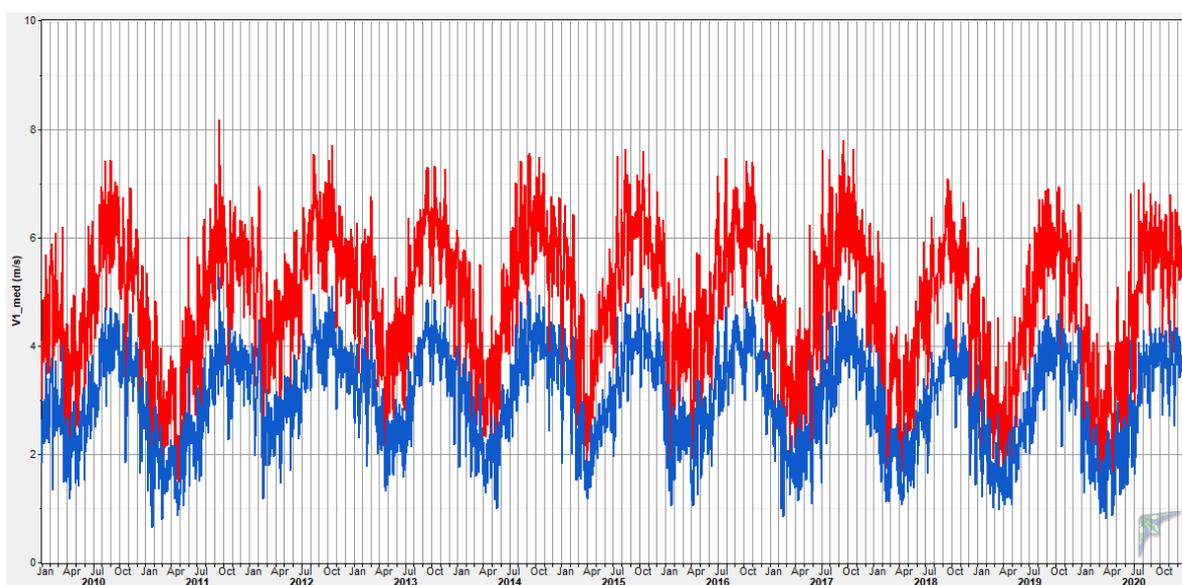


Fonte: Autor

Em casos onde são utilizados dados extraídos de torres físicas de medição, seria necessário realizar uma análise sobre eventuais falhas e problemas que poderiam ocorrer pelo mau funcionamento dos sensores instalados, perdas de registros, ou quaisquer outras anomalias que possam ocorrer durante a campanha. Caso houvesse falhas, seria necessário que esses dados fossem removidos para evitar uma extrapolação positiva ou negativa da velocidade do vento, ou apresentassem direções que não condissesse com a realidade do local estudado, alterando a frequência dos setores.

Nos casos da torre de medição instaladas junto ao local de estudo, a consistência nos dados das medições durante o período analisado é fundamental, pois é possível fazer uma previsão de interferências causadas por florestas, mudanças causadas no efeito de esteira (em casos de parques vizinhos), alterações nos equipamentos de medição ou na configuração da torre.

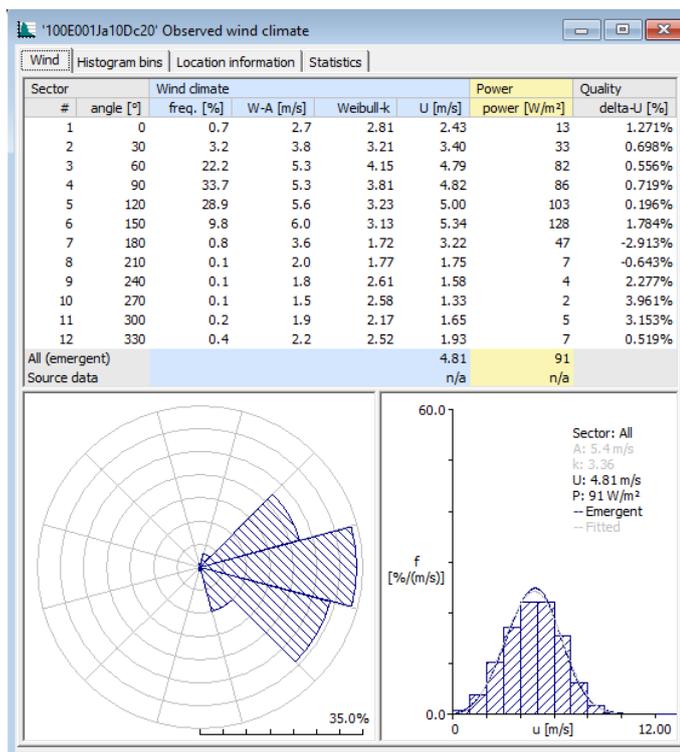
Figura 22 –Dados de Ventos Sem Períodos de falhas



Fonte: Autor

Após ter sido realizado a etapa de análise e tratamento estatístico dos dados, é necessário inseri-lo no *WAsP*® através de um arquivo .tab, mostrado na Figura 23, que é um formato compatível com o *software*, obtido com o programa *OWC Wizard*® do *WAsP*®, juntamente com as coordenadas do ponto de extração dos dados anemométricos e a altura.

Figura 23 –Resultado das Propriedades dos dados de Vento



Fonte: Autor

Conforme apresentado acima a predominância na direção dos ventos é a leste, indicando que a posição dos aerogeradores no *micrositing* devem estar apontadas para a mesma direção.

4.3 Simulação

4.3.1 Grade de Recurso (*Resource Grid*)

Após a definição das condições iniciais para o cálculo do potencial eólico, como o tratamento dos dados anemométricos, a topografia e a rugosidade, é necessário realizar a simulação da área em relação ao recurso eólico existente no local, onde é criado um *layer* no formato WRG (Wind Resource Grid), onde é calculado o atlas eólico.

O Arquivo WRG pode ser definido como um *raster* (mapa de bits), que cobre toda a área definida, onde cada ponto apresenta as características do recurso eólico disponível, modelado para a altura estabelecida pelo usuário, onde é possível verificar os parâmetros de velocidade média, densidade de potência, altitude, energia anual gerada, dentre outros. Os dados do recurso da área são utilizados para o cálculo da produção energética, sendo necessário

que a altura do WRG seja a mesma do rotor do aerogerador (*hub height*). Com o auxílio do mapa de recurso é possível escolher os melhores locais para a instalação dos aerogeradores, em relação a geração de energia.

5 RESULTADOS

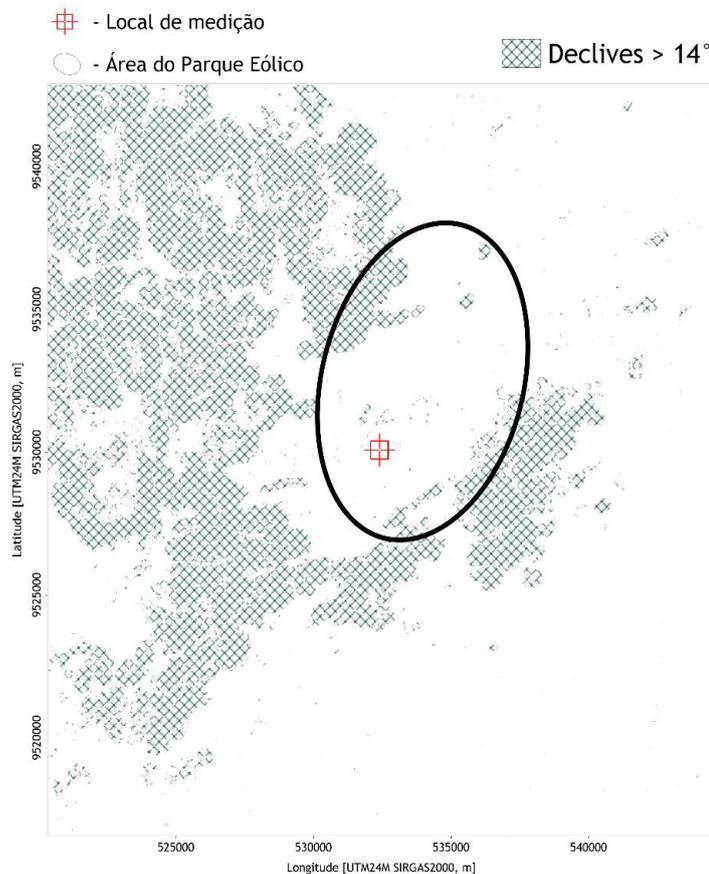
Para os resultados, foi elaborado o mapa das condições locais de topografia e rugosidade do terreno, em seguida foi obtido o recurso eólico do local, através de simulação com o *software WAsP*®, que extrapola as condições de vento gerando um escoamento potencial preliminar, e utiliza desse escoamento, para fazer uma previsão do comportamento do vento em cada ponto. Após isso, foi inserido o posicionamento dos aerogeradores (*micrositing*) no local.

Depois, foram apresentados os resultados referentes a altitude em que cada aerogerador foi instalado, altura do rotor, velocidade média, perdas de energia por esteira, energia bruta gerada, energia líquida e o fator de capacidade. Os resultados apresentados foram obtidos carregando os *inputs* do *WAsP* no *software WindFarmer*, que é um programa de avaliação de recursos eólicos que fornecem estimativas de produção energética.

5.1 Dados de Entrada

Uma das etapas mais importantes no desenvolvimento do estudo do potencial eólico de um local, é a modelagem do terreno.

Figura 24 – Mapa com as Declividades do Local

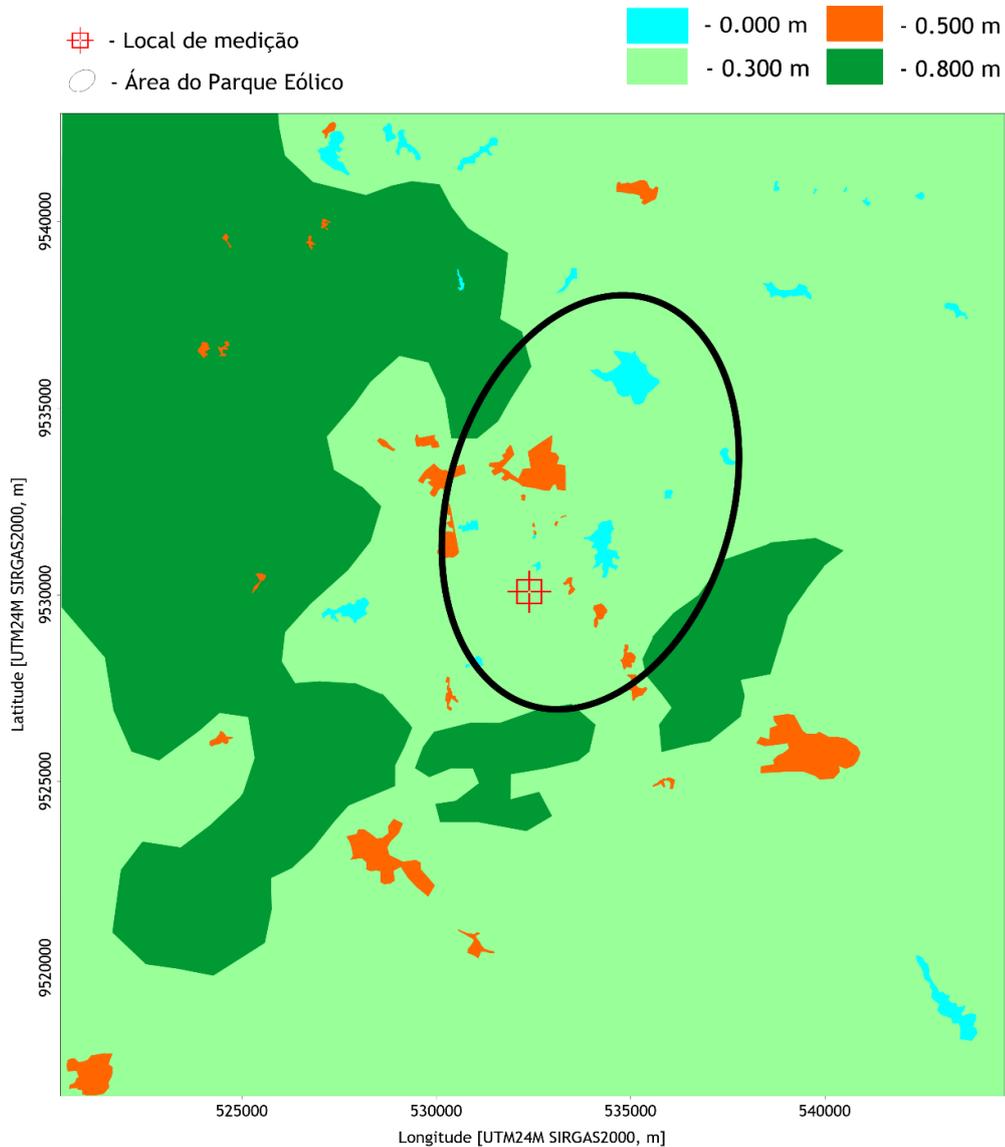


Fonte: Autor

O mapa de declividade da região é apresentado acima (Figura 24), indicando as áreas onde não são adequadas o posicionamento dos aerogeradores. A área apresenta variações na declividade onde as regiões montanhosas apresentam valores maiores que 14° , enquanto o restante do mapa tem valores menores.

Na Figura 25, é apresentado o mapa de rugosidade. O local analisado possui regiões montanhosas com florestas localizados predominantemente a oeste e um pouco ao sul de onde será inserido os aerogeradores, conforme mostra a Figura 20. Para as regiões montanhosas foi associado um valor de 0,8 m, para as áreas urbanas um valor de 0,5 m, para a região com vegetação mais espaçada de caatinga um valor de 0,3 m e para os corpos d'água 0 m, por definição do *WASP*.

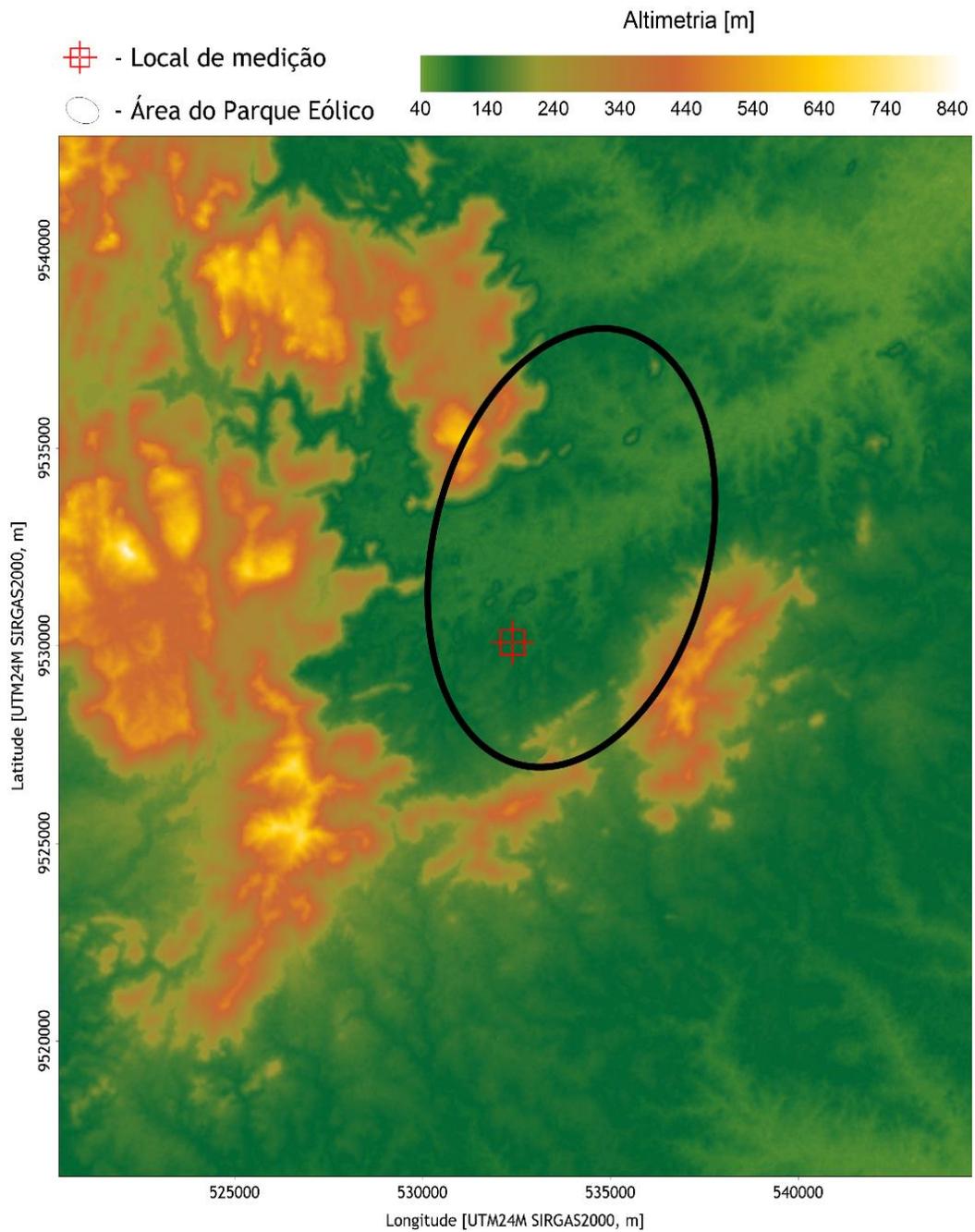
Figura 25 –Mapa de Rugosidade da Região



Fonte: Autor

A topografia da região é apresentada na Figura 26, O resultado é compatível com as informações apresentadas neste trabalho. A identificação das formas de relevo e as características geomorfológicas do local, foram possíveis com a inserção das curvas de nível para cada variação de 5 m.

Figura 26 –Mapa de Topografia da Região

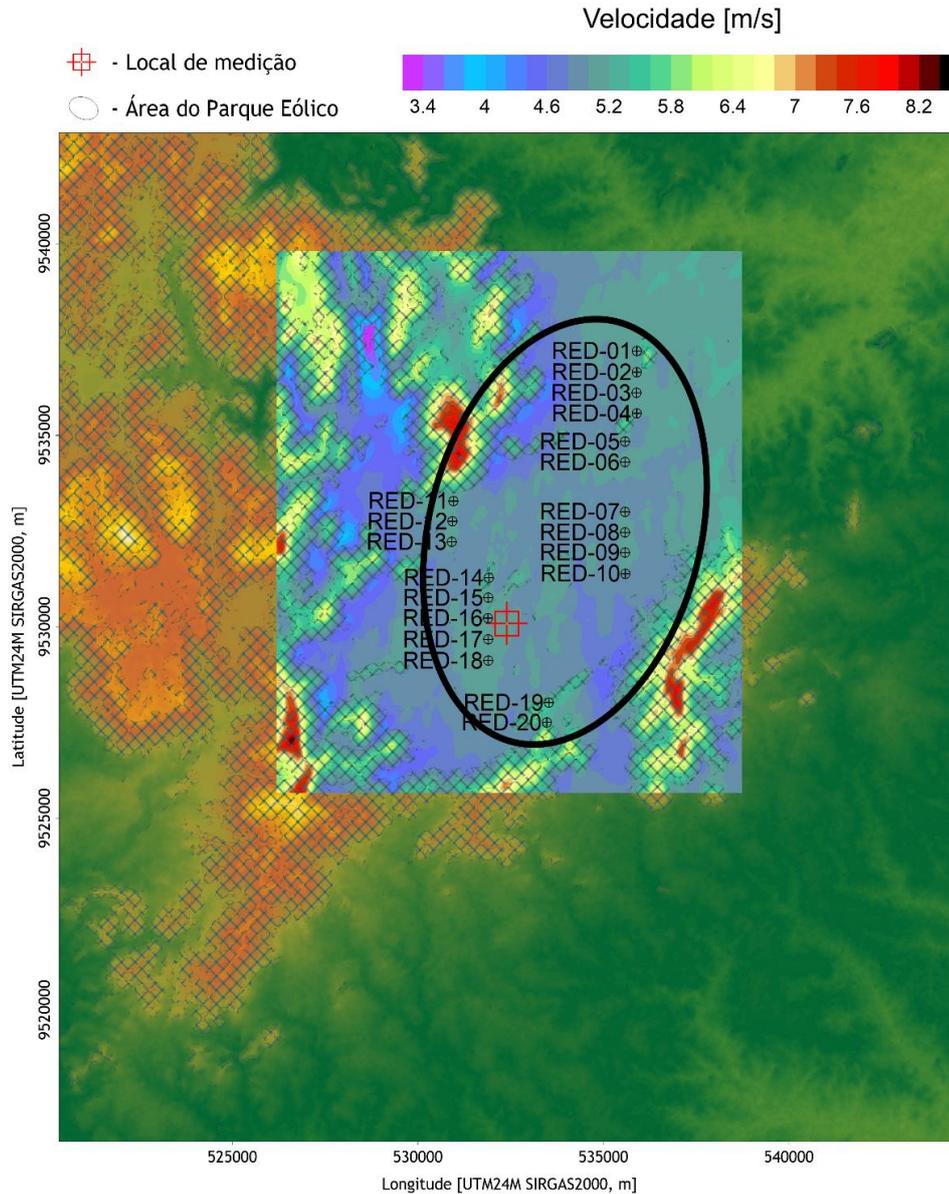


Fonte: Autor

5.2 Micrositing

Nesta etapa, foi inserido no mapa de recurso a posição em se pretende instalar os aerogeradores, analisando os melhores locais disponíveis, em relação ao potencial eólico.

Figura 27 –Mapa de Recurso da Região



Fonte: Autor

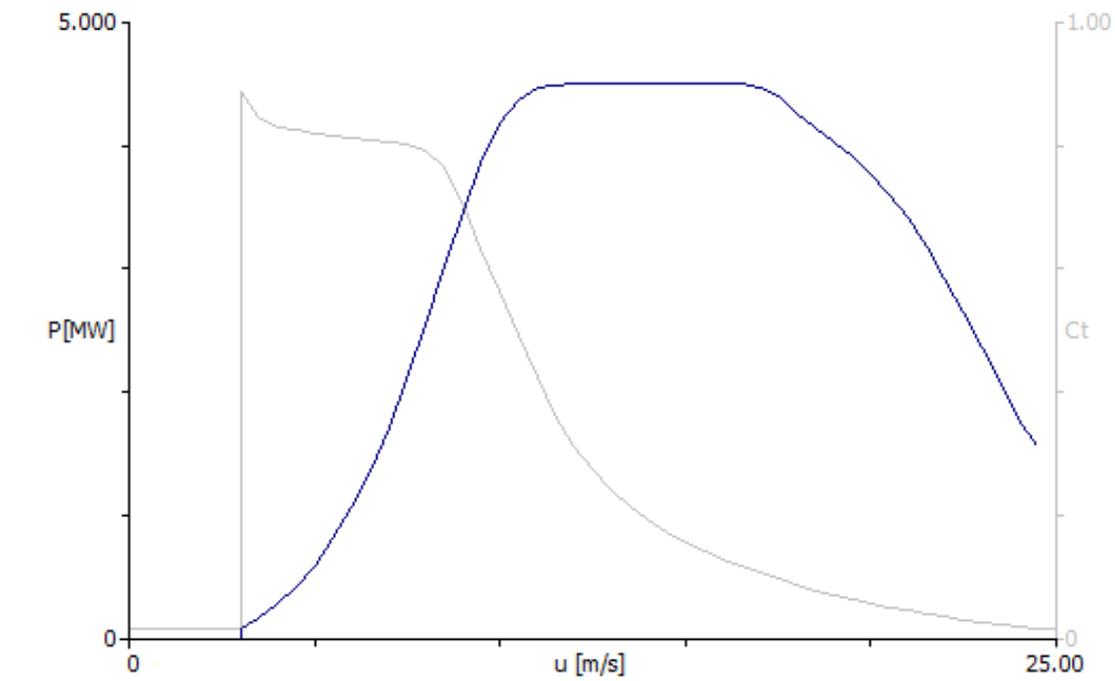
É importante observar o posicionamento correto das turbinas evitando as interferências de possíveis rugosidades, áreas com declives acentuados e pelo efeito esteira. Os distanciamentos adotados no trabalho foram de 12 diâmetros na direção predominante do vento (Leste), e 2 diâmetros na direção perpendicular ao vento. Os aerogeradores foram nomeados com a abreviação RED, em alusão ao município de Redenção, local da análise do parque eólico.

Para gerar o parque no *WAsP* foi necessário carregar as coordenadas dos aerogeradores definidas no *micrositing*, e sua curva de potência obtida com o *software WAsP Turbine Editor* no formato WTG. Nele foram inseridas informações do aerogerador como: diâmetro do rotor, altura da torre, potência da turbina e velocidade.

O aerogerador escolhido para este trabalho foi o Vestas V150 de 4,5 MW, ao todo foram utilizadas 20 turbinas, com as nomeações RED – 01 a RED – 20, e as seguintes características: 150 m de diâmetro, 120 m de altura e com potência instalada total de 90 MW.

Na Figura 28 é possível verificar a curva de potência do aerogerador utilizado, onde são relacionados potência em função da velocidade

Figura 28 –Curva de Potência do aerogerador V-150



Fonte: Autor

5.3 Resultados da Simulação Para a Usina Eólica Redenção

A Tabela 4 apresenta os dados obtidos através da simulação para o parque eólico na região de Redenção-CE.

Tabela 4 – Relatório de Produção de Energia

Turbina	Localização		Regime de ventos			Produção Anual de Energia			
	SIRGAS2000 UTM24M		Altitude [m]	Altura do rotor [m]	Vel. Média [m/s]	Bruta [MWh]	Perdas Esteira [%]	Bruta após Esteira [MWh]	Factor de Capacidade [%]
	XX [m]	YY [m]							
RED-01	535899	9537205	110	120	5,04	7411	0,7	7356	18,66
RED-02	535899	9536651	90	120	5,06	7538	0,3	7512	19,06
RED-03	535886	9536111	88	120	5,08	7623	0,5	7583	19,24
RED-04	535899	9535576	89	120	5,09	7682	0,1	7673	19,46
RED-05	535584	9534837	74	120	4,99	7236	0,6	7190	18,24
RED-06	535581	9534303	88	120	5,05	7455	0,3	7435	18,86
RED-07	535586	9533010	85	120	5,04	7409	0,5	7373	18,70
RED-08	535581	9532470	99	120	5,05	7453	0,7	7399	18,77
RED-09	535583	9531947	115	120	5,06	7459	0,8	7401	18,77
RED-10	535594	9531395	121	120	4,95	6983	0,1	6978	17,70
RED-11	530960	9533290	87	120	5,01	7366	6,2	6911	17,53
RED-12	530933	9532756	83	120	4,97	7129	6,5	6665	16,91
RED-13	530915	9532222	118	120	5,18	8043	9,1	7314	18,55
RED-14	531911	9531288	110	120	5,25	8346	4,4	7979	20,24
RED-15	531899	9530764	98	120	5,05	7450	4,3	7130	18,09
RED-16	531887	9530233	118	120	5,13	7790	3,4	7523	19,08
RED-17	531892	9529677	113	120	4,99	7174	4,0	6886	17,47
RED-18	531892	9529122	131	120	5,13	7796	4,5	7442	18,88
RED-19	533527	9528027	206	120	5,48	9433	0,2	9410	23,87
RED-20	533472	9527510	200	120	5,39	8981	0,1	8970	22,75
Total						153 757	2,4	150 130	19,04

Fonte: Autor

Comparando os dados de velocidade do vento obtidos na simulação com os dados disponíveis no atlas eólico do Ceará, os números ficaram bem próximos à velocidade do vento médio anual para o município de Redenção no atlas que é de 4,5 m/s, enquanto a velocidade média simulada nos pontos dos aerogeradores é de 5,1 m/s, para a mesma altura de 100 m. Observando o mapa de recursos (Figura 27) existem locais em Redenção onde esse valor ultrapassa os 8 m/s, mas pelo terreno apresentar uma alta declividade, teria que ser realizado um estudo mais aprofundado sobre a viabilidade do empreendimento nesses pontos para a implantação dos aerogeradores. Segundo a Echoenergia (2019), um vento com velocidade média superior a 7 m/s, e entre uma altura de 80 m e 120 m, já é considerado de alta qualidade, para a instalação dos parques.

As perdas por esteira no parque simulado neste estudo foram muito pequenas, com média de 2,4%, enquanto nos parques eólicos atuais variam entre 10 a 20% (Carvalho, Melo,

Uchôa, 2020), o que mostra que o distanciamento entre elas na simulação foi bem otimizado. É recomendado que perdas acima de 12% em aerogeradores seja feita uma mudança no layout, e a turbina seja realocada para outro local.

O fator de capacidade médio do parque simulado (19,04%) ficou abaixo do valor médio mundial que é de aproximadamente 34%, e do fator de capacidade médio do Brasil que é de 40,6%, segundo o INFOVENTO (2021).

Uma alternativa à complementação na geração de energia do parque estudado, seria a realização de um estudo solar fotovoltaico para a criação de um complexo híbrido, projetos desse tipo de geração já existem no Ceará, na cidade de Trairi onde 29 turbinas estão instaladas e a parte solar está com a conclusão prevista para 2022 (Canal Energia, 2021).

6 CONCLUSÃO

Este trabalho buscou analisar o recurso eólico do município de Redenção localizado no Estado do Ceará, utilizando *softwares* de simulação. Após coletadas as informações da região como rugosidade, topografia, declive e com uma série de dados ERA5, chegou-se à conclusão do potencial local, no que se refere aos valores da produção anual de energia. Entender como funciona o fluxo eólico, e várias metodologias, garante uma alternativa futura de produção energética.

O levantamento topográfico demonstrou que a área é complexa, não favorecendo a instalação de um parque eólico. O terreno possui grandes variações de altitude. Além disso, a rugosidade superficial na região é alta, devido às grandes áreas montanhosas cobertas com vegetações mais densas. Desta forma, o escoamento do vento tende a ser mais turbulento, e, conseqüentemente, aumenta as perdas energéticas.

Os ventos nos locais simulados possuem velocidade média de 5,1 m/s, para uma altura de 100 m, no entanto existem locais mais atrativos como o litoral do estado, onde as médias da velocidade do vento são maiores. A produção energética anual é de 150.130 MW, e o fator de capacidade possui média de 19,04%. Existem alguns locais na região onde a velocidade do vento ultrapassa os 8 m/s, porém a localização é de difícil acesso e seguindo as restrições de declividade não seria viável a instalação de um aerogerador nessa localização.

7 REFERÊNCIAS

MOTA, Suzany Mendes. **Análise do potencial eólico da região do norte pioneiro do Paraná.** 2019. Trabalho de Conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, PR, 2019.

LIRA, Adriano Gouveia. **Análise das incertezas na estimativa da produção de energia em parques eólicos.** 2012. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2012.

PAIVA, Vitor Galazzo. **Estimativa do potencial de geração de Energia eólica offshore na margem continental brasileira.** 2019. Dissertação (Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2019.

GERELLI, Eder dos Santos. **Análise dos dados anemométricos coletados pela CRELUZ no município de Palmeira das Missões/RS para geração de energia elétrica por fonte eólica.** 2017. Trabalho de Conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, RS, 2017.

BREITENBACH, Guilherme. **Análise do potencial eólico para geração de energia elétrica em São Francisco de Paula, RS, utilizando o método computacional WASP.** 2016. Trabalho de Conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Centro Universitário Univates, Rio Grande do Sul, RS, 2016.

MARTINS, Ana Carolina Jardim Salgado. **Estimativa da produção de energia e definição do layout de um parque eólico na região Sudeste do Brasil.** 2015. Trabalho de Conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2015.

ORTIZ, Gabriel Santos. **Análise do potencial eólico pelo software *WAsP* comparando dados de torre de medição local com dados do INMET na cidade de Rio Grande, RS.** 2016. Trabalho de Conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2016.

NEOENERGIA. **Como funciona um aerogerador.** 2021. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/pt-br/te-interessa/meio-ambiente/Paginas/como-funciona-um-aerogerador.aspx>. Acesso em: 15 dez. 2021.

ANUÁRIO DO CEARÁ. **Cidade de Redenção.** 2021. Disponível em: <https://www.anuariodoceara.com.br/cidades/redencao/>. Acesso em: 04 jan. 2022.

SECTI. **Atlas Eólico da Bahia.** 2013. Disponível em: http://www2.secti.ba.gov.br/atlasWEB/metodologia_p2.html. Acesso em: 06 jan. 2022.

INFOVENTO. **Energia eólica, os bons ventos do Brasil.** 2021. Disponível em: <http://www.canalenergia.com.br/biblioteca/53152438/abeeolica-infovento-no23>. Acesso em: 10 dez. 2021.

ABEEÓLICA. **Boletim anual, dados 2020.** 2021. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/>. Acesso em: 22 nov. 2021.

ADECE. **Atlas Eólico e Solar do Estado do Ceará.** 2019. Disponível em: <http://atlas.adece.ce.gov.br/#>. Acesso em: 22 nov. 2021.

UNICEF. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.** 2022. Disponível em: <https://www.unicef.org/brazil/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel>. Acesso em: 06 jan. 2022.

WEATHERSPARK. **Clima Característico em Redenção durante o ano.** 2022. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/31109/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Reden%C3%A7%C3%A3o-Brasil-durante-o-ano#:~:text=Em%20Reden%C3%A7%C3%A3o%2C%20o%20ver%C3%A3o%20%C3%A9,superior%20a%2036%20%C2%B0C>. Acesso em: 18 jan. 2022.

CANAL ENERGIA. **Qair Brasil termina obra de eólica no Ceará.** 2021. Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53192173/qair-brasil-termina-obra-de-eolica-no-ceara>. Acesso em 10 jan. 2022.

CARVALHO, M. C. Paulo; MELO, Camylla Narciso; UCHÔA, Kênio Monteles. **ANÁLISE DO DISTANCIAMENTO DE AEROGERADORES COM ARRANJO FÍSICO RADIAL NAS REGIÕES DE PLANEJAMENTO DO CEARÁ.** 2020. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2020.

ECHOENERGIA. **Estudo do vento na implantação de empreendimentos eólicos.** 2019. Disponível em: <https://www.echoenergia.com.br/noticias/estudo-do-vento-na-implantacao-de-empresendimentoseolicos/#:~:text=S%C3%A3o%20elas%2C%20Nordeste%2C%20Sudeste%20e,n%C3%ADvel%20considerado%20de%20alta%20qualidade>. Acesso em: 10 jan. 2022.

EPE. **Leilões de Energia: Instruções para as medições anemométricas e climatológicas em parques eólicos.** 2014. NOTA TÉCNICA DEA 08/14 - Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, RJ, 2014.

UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-BRASILEIRA. **Manual de normalização de trabalhos acadêmicos da Unilab.** 2020. Sistema de bibliotecas da Unilab. Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Acarape, CE, 2020.