



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ANGICOS
CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

MATHEUS ALVES DE ARAÚJO

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE EXPANSÃO SUSTENTÁVEL DA ENERGIA
EÓLICA NO RIO GRANDE DO NORTE**

ANGICOS

2024

MATHEUS ALVES DE ARAÚJO

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE EXPANSÃO SUSTENTÁVEL DA ENERGIA
EÓLICA NO RIO GRANDE DO NORTE**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Vinicius Candido
Henriques

ANGICOS

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

A663a Araújo, Matheus Alves de .
Avaliação do potencial de expansão sustentável
da energia eólica no Rio Grande do Norte. /
Matheus Alves de Araújo. - 2024.
42 f. : il.

Orientador: Marcos Vinícius Cândido Henriques.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de , 2024.

1. Energia eólica. . 2. Expansão sustentável. .
3. Rio Grande do Norte.. 4. Potencial eólico.. 5.
Aerogeradores.. I. Henriques, Marcos Vinícius
Cândido, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo autor(a).

Biblioteca Campus Angicos
Bibliotecário: Helder Romero Maia Duarte
CRB: 15/673

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

MATHEUS ALVES DE ARAÚJO

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE EXPANSÃO SUSTENTÁVEL DA ENERGIA
EÓLICA NO RIO GRANDE DO NORTE**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 23 / 10 / 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Vinicius Cândido Henriques (UFERSA)
Presidente

Profa. Dra. Tania Luna Laura (UFERSA)
Membro Examinador

Prof. Dr. Wivaldo Dantas de Azevedo Junior (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, o criador de todas as coisas, por me conceder sabedoria e forças para concluir este trabalho.

A minha família que sempre esteve ao meu lado, mesmo à distância, obrigado por acreditarem em mim. A vocês devo minha força e determinação. A minha mãe por sempre estar disposta a cuidar de mim e por ser uma grande companheira durante todo meu curso. Ao meu pai que sempre buscou me dar forças e conselhos extraordinários, me incentivando a buscar um futuro promissor. Aos meus irmãos que estiveram sempre ao meu lado me apoiando e me incentivando.

Aos meus amigos que estiveram comigo nos momentos mais importantes do meu curso, tornando esse ciclo mais leve e alegre, celebrando minhas conquistas e me oferecendo ajuda nos momentos difíceis.

Agradeço ao professor e orientador Marcos Vinícius pela paciência, dedicação e conhecimentos transmitidos durante a orientação deste trabalho.

Agradeço aos membros da banca examinadora pelas valiosas sugestões para a melhoria deste trabalho.

É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.

Theodore Roosevelt

RESUMO

O mundo vem buscando cada vez mais por fontes de energias renováveis, diante da crescente demanda por eletricidade e o esgotamento das fontes convencionais finitas. A energia eólica tem participação significativa na matriz energética brasileira e o estado do Rio Grande do Norte (RN) tem uma forte influência, oferecendo recursos estáveis e uma estrutura eólica bem desenvolvida. Esta pesquisa tem como objetivo identificar as áreas com maior potencial, visando uma expansão sustentável da geração eólica no RN, tendo a considerar aspectos socioambientais, econômicos e técnicos. Para isso foram coletadas fontes de dados dos recursos eólicos do RN e de características socioambientais, utilizando o software QGIS, que permitiu o mapeamento desses dados. Os resultados da pesquisa mostraram que o estado do RN possui capacidade de expansão da geração eólica, destacando-se cinco regiões em que foi notado uma boa viabilidade de instalação de novos aerogeradores, com áreas como o Sul do município de Santana do Matos que chegou a medir até 2884 W/m² de densidade de potencial eólico. Portanto, concluiu-se que a expansão da energia eólica no RN contribuirá para o desenvolvimento sustentável, admitindo medidas adequadas para mitigar os efeitos negativos nas comunidades locais e ambientais.

Palavras-chave: Energia eólica. Expansão sustentável. Rio Grande do Norte. Potencial eólico. Aerogeradores. Desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT

The world is increasingly looking for renewable energy sources, given the growing demand for electricity and the depletion of finite conventional sources. Wind energy has a significant share in the Brazilian energy matrix and the state of Rio Grande do Norte (RN) has a strong influence, offering stable resources and a well-developed wind structure. This research aims to identify the areas with the greatest potential, aiming for a sustainable expansion of wind generation in RN, taking into account socio-environmental, economic and technical aspects. For this, data sources were collected on RN's wind resources and socio-environmental characteristics, using the QGIS software, which allowed the mapping of these data. The research results showed that the state of RN has the capacity to expand wind generation, highlighting five regions in which a good feasibility of installing new wind turbines was noted, with areas such as the south of the municipality of Santana do Matos that reached measure up to 2884 W/m² of wind potential density. Therefore, it was concluded that the expansion of wind energy in RN will contribute to sustainable development, assuming appropriate measures to mitigate negative effects on local and environmental communities.

Keywords: Wind energy. Sustainable expansion. Rio Grande do Norte. Wind potential. Wind turbines. Sustainable development.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Parque eólico Whitelee, Eaglesham, East Renfrewshire, Escócia.....	24
Figura 2	–	Região de interesse ao sul do município de Santana do Matos	35
Figura 3	–	Região de interesse ao sul do município de Jucurutu.....	36
Figura 4	–	Região de interesse ao Norte do município de Caicó	37
Figura 5	–	Região de interesse ao sul do município de Triunfo Potiguar.....	38
Figura 6	–	Região de interesse ao Leste do município de São Fernando.	39

LISTA DE MAPAS

Mapa 1	–	Posição geográfica dos aerogeradores já em operação e planejados, conforme base de dados da Aneel em agosto de 2024	30
Mapa 2	–	Antropização de Biomas presentes no Rio Grande do Norte, conforme base de dados 2008-2009	31
Mapa 3	–	Velocidade do Vento a 100 metros de altura no Rio Grande do Norte	32
Mapa 4	–	Densidade de Potência a 100 metros de altura no Rio Grande do Norte	33
Mapa 5	–	Delimitação de cinco áreas com maior interesse para instalação de novos aerogeradores no Rio Grande do Norte	34

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	–	Matriz elétrica brasileira (2023)		20
-----------	---	-----------------------------------	-------	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GEE	Gases do Efeito Estufa
RN	Rio Grande do Norte
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SEDEC	Secretaria do Desenvolvimento Econômico, da Ciência, da Tecnologia e da Inovação
EIA	Estudos de Impacto Ambiental
RIMA	Relatórios de Impacto Ambiental
CBEE	Centro Brasileiro de Energia Eólica
Celpe	Companhia Energética de Pernambuco
Proinfa	Programa de Incentivo à Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
SI	Sistema Internacional de Unidade
DP	Densidade de potência
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
SIG	Sistemas de Informação Geográfica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Energia eólica no Brasil	19
2.2	Energia eólica no Rio Grande do Norte	20
2.3	Impactos ambientais da energia eólica.....	21
2.4	Impactos socioeconômicos da energia eólica nas comunidades locais	22
2.5	Aspectos regulamentares e políticos	22
2.6	Velocidade do vento	23
2.7	Densidade de potência	23
2.8	Viabilidade da energia eólica	24
3	METODOLOGIA	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4.1	Sul do município de Santana do Matos.....	34
4.2	Sul do município de Jucurutu	35
4.3	Norte do município de Caicó	36
4.4	Sul do município de Triunfo Potiguar	37
4.5	Leste do município de São Fernando	38
4.6	Discussão geral dos resultados apresentados	39
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
6	REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

Em todo o mundo, os meios de geração de energia elétrica mais utilizados são provenientes de fontes não renováveis e combustíveis fósseis como petróleo, carvão mineral, gás natural, etc. Com a alta demanda de eletricidade, a dependência dessas fontes não renováveis vem ficando cada vez mais forte, dessa forma, causando uma grande preocupação com seu esgotamento e a emissão de gases poluentes que contribuem para o aquecimento global, principalmente dos Gases do Efeito Estufa (GEE) (COSTA et al, 2019).

Visto isso, a adesão às fontes de energias renováveis vem tomando uma proporção cada vez maior, desde a década de 70, quando ocorreram as crises de petróleo, levando vários países a aderir a ideia de buscar fontes inesgotáveis, para que então houvesse uma diminuição na dependência dessas fontes findáveis. Dentre as opções de fontes energéticas provenientes de recursos renováveis, a energia eólica vem se destacando nas últimas décadas (SIMAS; PACAS, 2013). A energia cinética dos ventos era utilizada em diversos engenhos do homem, contribuindo assim para o avanço das atividades agrícolas (CUNHA et al., 2019).

A motivação maior para que os países incentivem a geração de energias renováveis é o crescimento sustentável, que segundo Simas e Pacas (2013, p.4) desenvolvimento sustentável “é aquele que supre as necessidades das gerações presentes sem, no entanto, comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades.”. Em 1996 ocorreu um crescimento da participação da energia eólica no mundo, tendo um fortalecimento em 2004, dessa forma, levando a um grande incentivo da adesão desta fonte em diversos países. Em 2011 a capacidade eólica instalada mundialmente chegou a 238 GW (SIMAS; PACAS, 2013).

A geração de energia eólica em terra firme (*onshore*) representa uma parcela significativa da produção mundial de eletricidade, com uma capacidade instalada total de 842 GW. O Brasil participa deste cenário com 3% da geração global, sendo o Nordeste a região com maior concentração de parques eólicos do país, respondendo por 90% da capacidade instalada. Dentre os estados nordestinos, o Rio Grande do Norte (RN) se destaca, com 32,4% da capacidade eólica regional (MACEDO; MELO; SILVA, 2023). Essa liderança é impulsionada por fatores como a ocorrência de ventos fortes e constantes, especialmente nas regiões litorânea e semi-árida, além de uma infraestrutura eólica já bem desenvolvida. O estado também apresenta um grande potencial de crescimento e redução de custos de produção, o que contribui para o desenvolvimento econômico local e atrai investimentos para o setor (MELO, 2021).

Diante disso, é clara a evolução e crescimento da geração elétrica através da energia eólica no Brasil nos últimos anos. De acordo com o relatório anual 2023 do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a produção de energia eólica representa 12,8% da matriz elétrica brasileira. Segundo a Secretaria do Desenvolvimento Econômico, da Ciência, da Tecnologia e da Inovação (SEDEC, 2024), o RN conta com o maior número de turbinas eólicas em operação, mais de 2.800 máquinas em atividade. Considerando os recursos naturais favoráveis e a infraestrutura existente, o RN se destaca como um polo de geração de energia eólica no Brasil. Os ventos constantes e fortes ao longo da costa garantem a produção contínua de energia limpa, contribuindo para a diversificação da matriz energética brasileira e para o desenvolvimento econômico do estado.

Portanto, mesmo a geração energética por fonte eólica apresentando um bom potencial de capacidade de produção instalada, ela não está isenta dos impactos socioambientais, que podem acarretar diversos problemas a população local e também a fauna e flora. Por esses motivos é que as empresas responsáveis por esses empreendimentos energéticos elaboram Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e no processo de licenciamento produzem Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA) com a finalidade de identificar possíveis ações de mitigação desses efeitos negativos (AQUINO; SOUZA; PERLIN, 2024).

1.1 Objetivos

A pesquisa em questão tem como objetivo realizar um mapeamento de oportunidades de expansão sustentável da energia eólica no RN, buscando identificar áreas que possuam potencial de capacidade de instalação e avaliar os impactos socioambientais e econômicos, focando mais nas comunidades locais, propondo dessa forma, um progresso no desenvolvimento sustentável, que tenha uma boa produção de energia limpa com o mínimo de impactos socioambientais negativos.

Para alcançar o objetivo geral, traçaram-se os seguintes objetivos específicos:

- Análise da distribuição da velocidade e densidade de potência eólica no estado do RN, utilizando dados de mapas dos recursos eólicos;
- O estudo de áreas no RN que apresentem bom potencial de geração eólica, sem afetar as comunidades nativas, levando em consideração os impactos ambientais e socioeconômicos.

No capítulo 2 é realizada a revisão bibliográfica sobre os seguintes tópicos: Energia eólica no Brasil; Energia eólica no RN; Impactos Ambientais da Energia Eólica; Impactos Socioeconômicos da Energia Eólica nas comunidades locais do RN; Aspectos regulamentares e políticos; Velocidade do vento; Densidade de potência e Viabilidade da energia eólica. No capítulo 3 é apresentada a metodologia que foi utilizada para realizar a seguinte pesquisa em questão, mostrando as fontes de dados usadas para formular o trabalho. No capítulo 4 são discutidos os resultados obtidos na pesquisa, mostrando as áreas com maior viabilidade de instalação de novos parques eólicos no RN. E por fim, no capítulo 5, são apresentadas as considerações finais da pesquisa realizada, reunindo as principais finalidades do trabalho e suas consequências para o desenvolvimento sustentável do estado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Energia eólica no Brasil

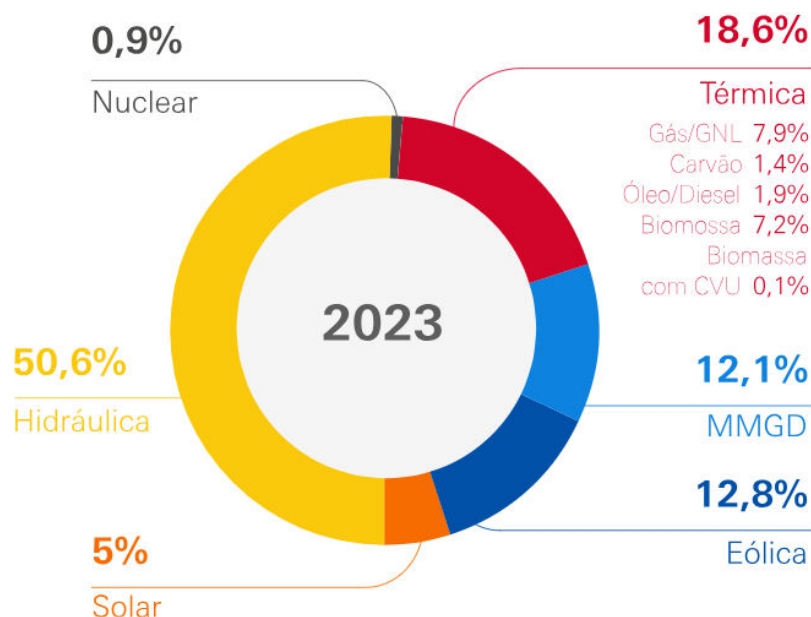
O Brasil e outros países, começaram a incentivar a implementação de fontes de energias renováveis em suas matrizes elétricas, logo após a crise do petróleo em 1973, quando se deram conta que o petróleo é um bem não-renovável e que algum dia iria acabar (MORAIS *et al*, 2024).

Segundo Diniz (2018), enquanto países como Alemanha e Dinamarca já exploravam a energia eólica em grande escala nos anos 2000, o Brasil ainda dava os primeiros passos nessa área. Em 1992, o primeiro aerogerador foi instalado no Brasil, no município de Fernando de Noronha/PE, com uma turbina de 225 kW de potência, quando houve uma parceria entre o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e a Companhia Energética de Pernambuco (Celpe) com um instituto dinamarquês (GOUVÊA; SILVA, 2018).

No ano do surgimento do Programa de Incentivo à Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), com a lei 10.438 em 2002, foi que o desdobramento dessas fontes alternativas de energia começou a progredir, (GOUVÊA; SILVA, 2018). O Proinfa é um dos programas mais notáveis para o desenvolvimento de recursos energéticos renováveis no Brasil, tendo como objetivo principal, diversificar a participação de fontes renováveis como eólica, Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e biomassa (DUTRA; SZKLO, 2006).

Segundo o relatório anual de 2023 do ONS (ONS, 2023), as fontes de energia renováveis eólica e solar vem contribuindo significativamente para que a matriz elétrica brasileira seja constituída ainda mais por fontes limpas e renováveis de energia. Atualmente a energia eólica representa 12,8% da matriz elétrica brasileira, sendo 88% do total da respectiva matriz, representado por fontes de energias renováveis, e tendo uma previsão para 2027 de 89% de renováveis, segundo o ONS.

Gráfico 1 - Matriz Elétrica Brasileira (2023)



Fonte: ONS (2023)

Para os estudos de Pintos, Martins e Pereira (2017, p.4):

O Brasil possui uma área de aproximadamente 0,8% de todo o território com ocorrência de ventos com velocidades médias igual ou acima de 7 m/s ao nível de 50 m acima do solo, totalizando o potencial de 143,4 GW, capaz de gerar 272 TWh/ano.

2.2 Energia eólica no Rio Grande do Norte

Os indicadores de distribuição de energia elétrica demonstram que as regiões Nordeste e Norte apresentam os menores índices de cobertura energética em âmbito nacional (PINTO; MARTINS; PEREIRA, 2017). A região Nordeste se destaca pelo seu potencial de geração de energia eólica, em especial no estado do Rio Grande do Norte (RN) pela sua localização geográfica, que favorece a velocidade do vento nas suas regiões litorâneas e em boa parte do seu interior. Essa fonte de geração de energia elétrica através do vento, seria uma garantia para a distribuição de energia nas regiões do estado que sofrem com a escassez de água em determinados períodos de tempo no decorrer do ano (RODRIGUES; NEPOMUCENO; MORAIS, 2017).

A produção da energia eólica no RN se iniciou de fato no ano de 2009, com a implantação de 32 parques eólicos, porém o primeiro empreendimento eólico, construído pela Petrobrás, apenas para autoconsumo, entrou em operação no ano de 2004. Dentre os

demais empreendimentos eólicos em operação no território brasileiro no ano de 2016, o estado do Rio Grande do Norte vinha se destacando na região do Nordeste, sendo responsável por 33,0% de toda capacidade instalada (RODRIGUES; NEPOMUCENO; MORAIS, 2017).

Em julho de 2023, o RN contava com a maior capacidade instalada no Brasil, apresentando 8.806 MW de potência e a segunda maior quantidade de parques eólicos em operação. Portanto, o RN possui uma ótima aptidão de energia eólica, sendo considerado o estado com os melhores ventos apresentados para implantação de usinas eólicas do território brasileiro (AQUINO; SOUZA; PERLIN, 2024).

2.3 Impactos Ambientais da Energia Eólica

Em 2003, a contribuição da emissão de GEE no setor de energia era de 11% e em 2013 passou para 29%. A geração de energia eólica é muito conhecida pela baixa contribuição na emissão dos GEE, quando comparado com outros tipos de geração de energia elétrica (PINTO; MARTINS; PEREIRA, 2017).

A energia eólica, mesmo com seu bom potencial de capacidade de instalação, não se isenta dos impactos ambientais causados pela sua produção de energia (AQUINO; SOUZA; PERLIN, 2024). No Brasil, um efeito de impacto ambiental bem crítico se dá no período de construção do projeto de parques eólicos, porém ainda pequeno quando se comparado com outros tipos de geração de energia, como as usinas hidrelétricas, que causam grande impacto ambiental na fase de construção, já que requerem grandes construções civis na fase de instalação. Os impactos ambientais causados pela instalação de aerogeradores são específicos e dependem das condições do local. Dentre eles, destacam-se as alterações visuais da paisagem, a emissão de ruídos e as interferências na fauna e flora da região. (PINTO; MARTINS; PEREIRA, 2017).

As atividades de produção de energia eólica podem desencadear uma série de impactos ambientais. A remoção da vegetação para a instalação dos aerogeradores resulta na perda de habitat para diversas espécies, alterando o equilíbrio ecológico e, em casos extremos, levando à extinção local. Em regiões semiáridas, esse desmatamento pode acelerar a desertificação e interferir nos padrões de chuva. A fauna local, especialmente aves e morcegos, também é afetada pelas colisões com as pás das turbinas e linhas de transmissão (AQUINO; SOUZA; PERLIN, 2024).

2.4 Impactos socioeconômicos da energia eólica nas comunidades locais

A geração de energia eólica causa alguns incômodos para as comunidades locais que acabam tendo que lidar no seu dia a dia com esses impactos socioeconômicos (BARCELLA; BRAMBILLA, 2012). A população local pode apresentar problemas como resultado das usinas eólicas instaladas nas proximidades, como: adoecimento devido a exposição aos ruídos, interferência visual das paisagens, deterioração de questão de saúde pública e riscos de acidentes (AQUINO; SOUZA; PERLIN, 2024).

As comunidades ao terem que vivenciar com ruídos constantes das torres eólicas, que podem incomodar em uma noite tranquila, até mesmo a 1900 metros de distância, tendem a desenvolver doenças associadas ao risco de exposição aos ruídos constantes, seja pelo movimento das pás, ou pelo funcionamento das partes mecânicas das torres (AQUINO; SOUZA; PERLIN, 2024). As comunidades locais que vivem naquelas vizinhanças são constantemente expostas aos riscos de acidentes, por exemplo, durante a construção ou operação dos parques, podem ter cabos de altas tensões descobertos, que acarretam grandes riscos de incidentes no local (COSTA et al, 2019).

2.5 Aspectos regulamentares e políticos

As políticas e regulamentações que regem o setor de energia eólica no Brasil têm um papel fundamental para o desenvolvimento dessa fonte de energia, ainda mais no Rio Grande do Norte, que possui boas condições naturais para essa geração de energia. Porém, esses processos legislativos acabam acarretando alguns desafios para o andamento dos empreendimentos eólicos. Segundo a Resolução Nº 462, de 24 de Julho de 2014 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), os empreendimentos eólicos que tem licenciamento simplificados, consequentemente deverão apresentar relatórios também reduzidos, somente com informações simples e necessárias, contendo “informações relativas ao diagnóstico ambiental da região de inserção do empreendimento, sua caracterização, a identificação dos impactos ambientais e das medidas de controle, mitigadoras e compensatórias” (CONAMA, 2014, p.3). De acordo com a Resolução Nº 462, de 24 de Julho de 2014 do CONAMA na seção III “Das licenças e Autorizações”:

Art. 8º As Licenças Prévia, de Instalação e de Operação deverão conter, no mínimo, as seguintes informações:

I – nome ou razão social do empreendedor;

II – número do CNPJ do empreendedor;

III – nome oficial do empreendimento e respectivo código de registro na ANEEL;

- IV – Município(s) e Unidade(s) da Federação de localização do empreendimento;
- V – potência total em megawatts do empreendimento;
- VI – área total do empreendimento;
- VII – área a ser licenciada e coordenadas geográficas de todos os vértices da poligonal solicitada pelo empreendimento;
- VIII – número estimado e altura das torres do empreendimento;
- IX – potência nominal unitária dos aerogeradores do empreendimento.

2.6 Velocidade do vento

O vento é um agente meteorológico responsável por algumas modificações no clima, pois serve como um condutor da umidade e energia da atmosfera. Quando associado com furacões e tornados, o vento tem uma energia avassaladora, causando grandes danos por sua força, porém, por meio da alteração da energia cinética do vento em eletricidade, ele pode ser uma ótima opção de fonte energia (MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2008).

A velocidade do vento, grandeza física que expressa a rapidez com que o ar se desloca, é quantificada no Sistema Internacional (SI) em metros por segundo (m/s). No entanto, em aplicações práticas, a unidade quilômetro por hora (km/h) também é amplamente utilizada (CAMELO et al, 2008).

2.7 Densidade de potência

No estudo da avaliação de potencial eólico de uma determinada região, a densidade de potência (DP) é uma variável de suma importância, pois é onde se obtém a quantidade de potência que pode ser obtida a uma certa velocidade de vento por unidade de área (TEIXEIRA; CAMELO, 2013). Assim, a DP representa basicamente a quantidade de energia eólica liberada por unidade de área, que nesse caso se dá pela área varrida pelas pás do aerogerador (GALVÃO et al, 2019).

Figura 1 - Parque eólico Whitelee, Eaglesham, East Renfrewshire, Escócia.



Fonte: Whitelee (2024).

Segundo Campos et al (2012), para obter os cálculos da DP é usado a seguinte equação:

$$Dp = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (1)$$

onde:

Dp - densidade de potência (W/m^2);

ρ - massa específica do ar (kg/m^3);

v - velocidade do vento (m/s).

2.8 Viabilidade da geração da energia eólica

Para um estudo de viabilidade de um projeto de geração da energia eólica em uma certa região, é necessário a análise de dados, e principalmente os que estão ligados a velocidade do vento que está disponível para ser utilizada e a variação deste recurso no local do empreendimento. Devido a instabilidade do recurso eólico, o funcionamento dos aerogeradores de uma usina, deve ser qualificado com medições precisas de dados da velocidade e direção do vento no local de instalação, com utilização de anemômetros e sensores de direção (PINTO; MARTINS; PEREIRA, 2017).

A primeira análise para um estudo de viabilidade é conhecer o cenário geral dos dados do vento naquele local, como a sua velocidade, potencialidade, densidade do vento, entre outras, para que assim, esses dados auxiliem futuros investidores para tomadas de decisão em saber se o cenário estudado é favorável e compensatório (GOMES; HENKES, 2014).

Um dos aspectos importantes para estudar a viabilidade de um projeto eólico é a potência que o vento disponibiliza em uma certa área e, consequentemente, a velocidade do vento. Conforme demonstrado por Pinto (2012), a potência eólica disponível pode ser determinada através da seguinte equação:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2)$$

onde:

P - Potência disponível do vento (W);

ρ - massa específica do ar (kg/m^3);

A - área do rotor da turbina eólica (m^2);

v - velocidade do vento (m/s).

Analisando essa equação, temos que a potência disponível pelo vento depende diretamente da velocidade do vento e da área que as pás da turbina conseguem capturar. Tendo que a potência é proporcional ao cubo da velocidade do vento e essa relação cúbica indica que pequenas mudanças na velocidade do vento irão resultar em grandes aumentos na potência do vento, por exemplo, se o vento duplica o valor da velocidade, a potência irá aumentar em oito vezes (PINTO, 2012). Em Pinto (2012, p.69) temos:

Se, por exemplo, tivermos um vento que aumente sua velocidade de 7 m/s para 8 m/s, a potência disponível passará de 343W para 512W; em termos de energia, esse simples (aparentemente) acréscimo de 169 W é bem considerável.

Sabendo também que a potência é ligada proporcionalmente a área varrida pelo rotor da turbina eólica, dependendo da geometria da turbina, por exemplo, de eixo horizontal, em que a área convencionalmente é $\frac{\pi}{4} D^2$. Logo, se o tamanho do diâmetro da pá é duplicado, a potência aumenta 4 vezes. Tendo entendido esses conceitos de densidade de potência relacionados a velocidade do vento, conseguimos obter informações necessárias para o estudo da viabilidade de um projeto eólico, já que, por exemplo, o custo da produção de uma turbina aumenta significativamente dependendo do tamanho do diâmetro da sua pá (PINTO, 2012).

Assim, sabemos que para uma construção de um projeto eólico ser economicamente viável, envolve muitas variáveis e cada uma delas influenciará no custo final do projeto. Um fator importante é o local escolhido para instalação, pois a região deve ter uma boa velocidade de vento, o custo do terreno varia de um lugar para outro e se a escolha do terreno não for bem feita poderá acarretar problemas nas fundações das turbinas. Temos também um outro fator fundamental nessa escolha que é o tipo de turbina que será escolhida para aquele projeto, pois o tamanho importa, já que turbinas maiores tem um custo por kW menor e também porque a durabilidade influencia nos cálculos do custo total do projeto ao longo dos anos (PINTO, 2012).

3 METODOLOGIA

No presente estudo foi adotada uma metodologia em que coletamos e analisamos alguns dados referenciados geograficamente, e esses dados foram coletados de fontes tanto nacionais quanto internacionais, dessa forma, assegurando ao trabalho uma boa confiabilidade e segurança.

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) foi uma das principais fontes de dados para o embasamento da pesquisa, disponibilizando dados geográficos e socioeconômicos, através de dados vetoriais e *raster* (IBGE, 2022). Sendo os dados vetoriais: dados atualizados em 2024 das rodovias estaduais e federais do RN, que utilizamos para a análise de acessibilidade e logística, identificando as regiões que teriam maior proximidade a rodovias, dessa forma, possibilitando a otimização dos trajetos na fase de construção dos parques eólicos. Também foram utilizados os dados do ano de 2022 dos limites municipais do RN, permitindo a delimitação precisa de cada área municipal do estado. Em relação aos dados raster (imagem georreferenciada) utilizamos também o mapa base do RN e o mapa de áreas urbanas, para identificar áreas com restrições para a instalação de parques eólicos, permitindo o descarte de áreas próximas a zonas urbanas, dessa forma, possibilitando uma seleção assertiva de locais adequados no ponto de vista ambiental e social.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) disponibilizou dados vetoriais da localização dos aerogeradores já instalados e em planejamento no RN, permitindo uma análise mais detalhada das áreas com maior concentração de aerogeradores ativos e planejados, dessa forma, possibilitando uma boa distribuição espacial da geração eólica (ANEEL, 2024).

O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) disponibilizou dados raster de áreas já antropizadas do RN, especificamente das vegetações caatinga, mata atlântica e mangue (IBAMA, 2008-2009). Essa base de dados serviu para identificação de áreas com menor impacto ambiental para a implantação de parques eólicos, pois, sendo uma área já mexida pelo homem, aquela região não passaria por uma ação que impactaria a flora local.

O Global Wind Atlas é uma plataforma internacional que esquematiza os recursos eólicos mundiais, incluindo dados da velocidade do vento e densidade de potência, podendo gerar mapas de alta resolução, por meio de recursos topográficos e modelos climáticos. Os dados obtidos do Global Wind Atlas foram usados para identificar as áreas do RN com maior

capacidade de instalação eólica, baseando-se na velocidade do vento e na sua densidade de potência em 100 metros de altura (GLOBAL WIND ATLAS, 2024).

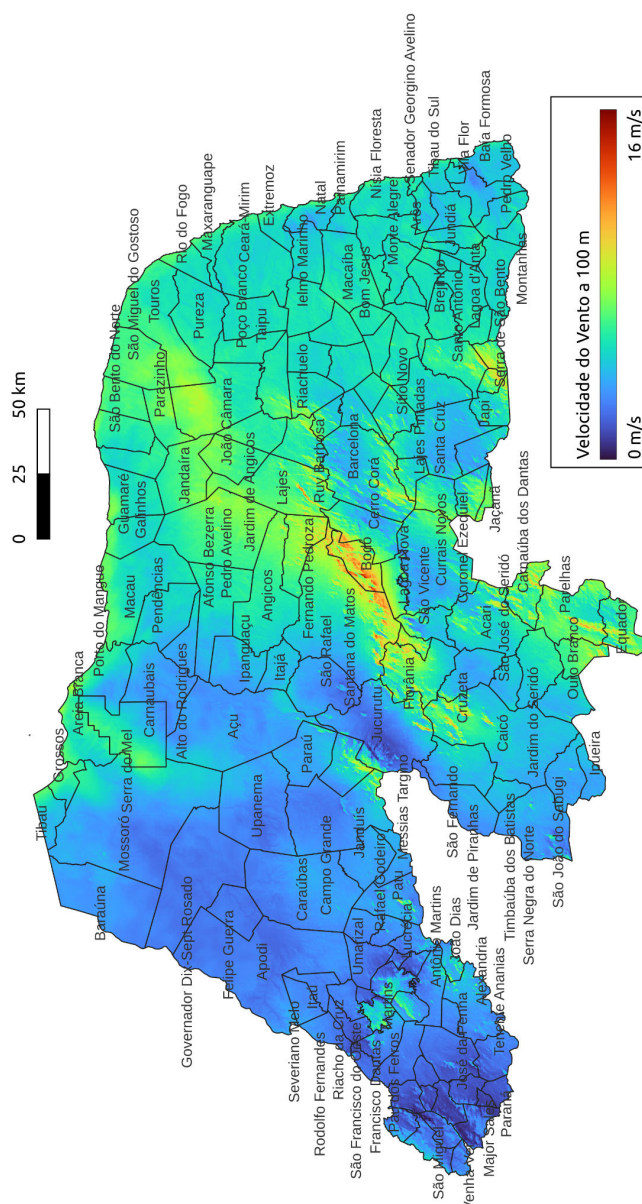
Todos esses dados apresentados foram analisados utilizando o software de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) QGIS, que oferece um suporte à visualização, edição e análise de dados geoespaciais, como dados vetoriais e raster, que geralmente são usados em software de SIG (QGIS, 2024). Esse programa foi usado nesta pesquisa para fazer o mapeamento de áreas que oferecem um maior potencial de geração eólica no RN, através da sobreposição dos mapas dos dados apresentados neste capítulo. Nele foi feita uma comparação da localização dos aerogeradores já ativos com aqueles que estão em planejamento para serem instalados futuramente, tendo então uma análise da viabilidade técnica e econômica da expansão da energia eólica naquelas regiões. Utilizando os dados ambientais, foram feitas análises para identificar áreas de baixo impacto socioambiental, verificando as áreas já antropizadas e as zonas urbanas, visando uma minimização desses impactos na instalação de novos aerogeradores, possibilitando uma expansão sustentável dessa energia renovável no Rio Grande do Norte.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo apresentamos os dados georreferenciados obtidos e tratados para o contexto do Rio Grande do Norte tendo como objetivo identificar as regiões com áreas de potencial de futuras instalação de aerogeradores ainda não exploradas e buscando também regiões sustentáveis para a população local, sendo assim tendo um resultado positivo de implementação dessas torres eólicas nas localidades que também apresentem boa densidade de potência, uma boa velocidade de vento e bom potencial para geração de energia elétrica.

O mapa 1 mostra as posições geográficas dos aerogeradores já em operação e planejados, conforme base de dados da Aneel em agosto de 2024. Os marcadores em verde caracterizam as turbinas eólicas já instaladas e em operação, enquanto os marcadores em branco representam os aerogeradores que estão em fase de planejamento. Utilizamos esse mapa para identificar as regiões sem sistemas de geração eólica, tanto instalados quanto em planejamentos, para assim termos uma base de dados para a identificação das áreas mais adequadas para futuras instalações.

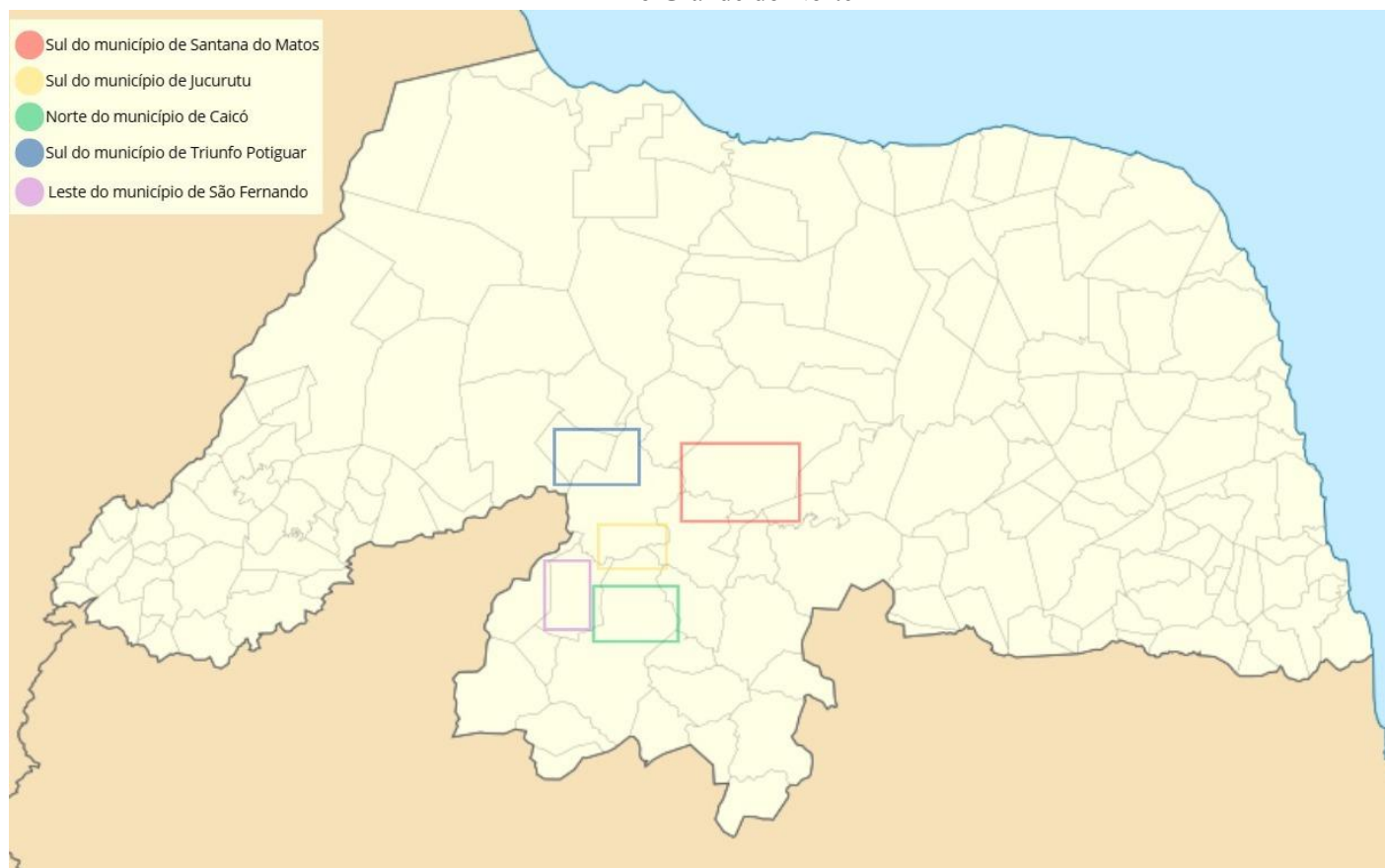
Mapa 3 - Velocidade do Vento a 100 metros de altura no Rio Grande do Norte.



Fonte: Global Wind Atlas (2024)

O mapa 4 ilustra a densidade de potência a 100 metros de altura no Rio Grande do Norte em W/m^2 , com uma escala gradiente de cores variando de 0 W/m^2 (azul escuro) até 3140 W/m^2 (vermelho escuro). As áreas mais propícias à instalação de parques eólicos são aquelas que apresentam maiores valores de densidade de potência do vento. Esse dado representa a quantidade de potência disponível por unidade de área varrida pelas pás dos aerogeradores. Com base nisso, analisamos algumas regiões que apresentaram uma densidade de potência de vento elevada, tendo em vista a energia que poderá ser captada por cada área varrida pelas pás de um aerogerador instalado nessas localidades.

Mapa 5 - Delimitação de cinco áreas com maior interesse para instalação de novos aerogeradores no Rio Grande do Norte

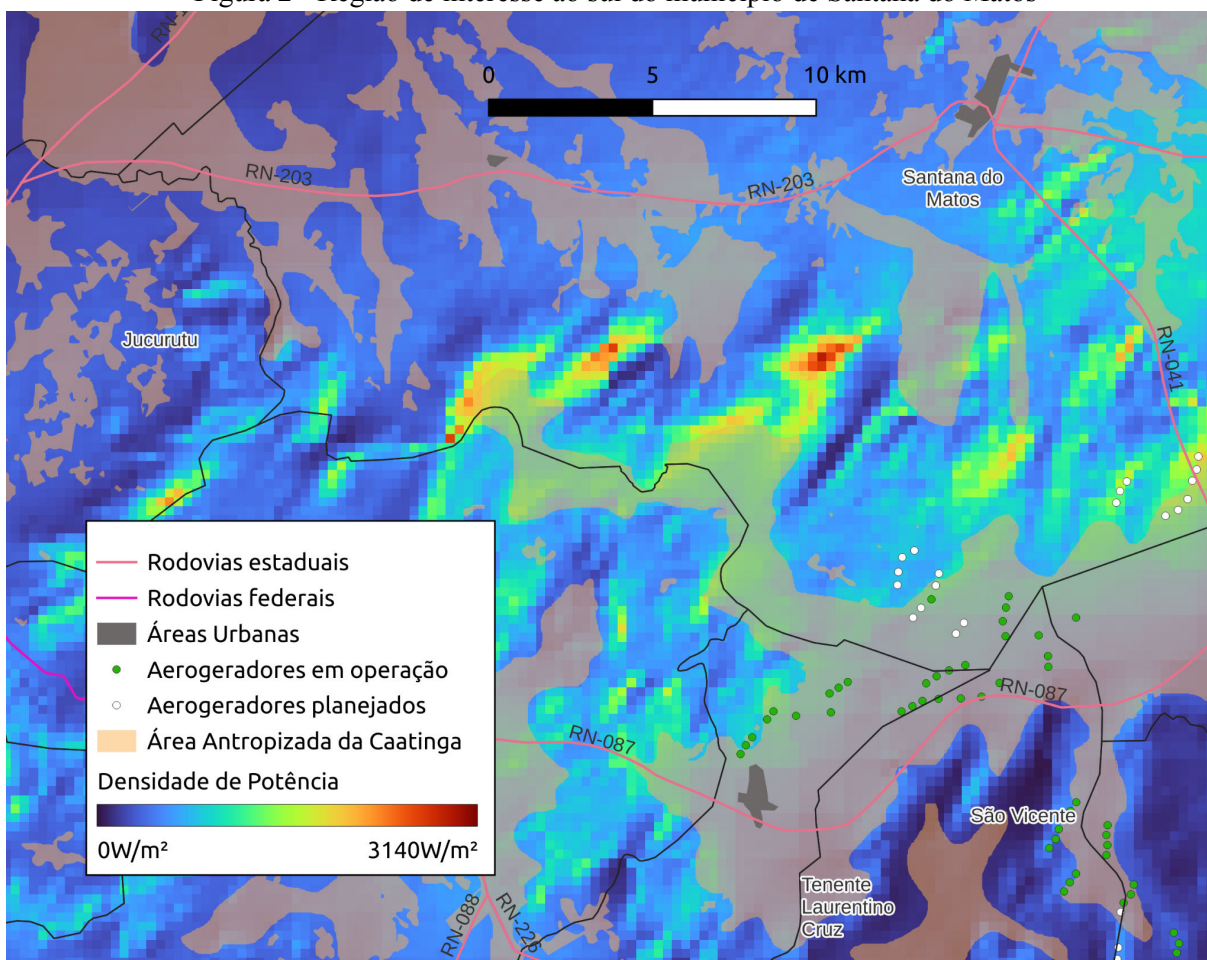


Fonte: adaptado de Wikimedia (2024).

4.1 Sul do município de Santana do Matos

Identificou-se, como é mostrado na figura 2, ao sul do município de Santana do Matos, uma região com bons valores de densidade de potência a 100 metros de altura, chegando até o valor de 2884 W/m^2 e com áreas já antropizadas, facilitando assim o processo de planejamento para instalação de parques eólicos nessa região de interesse.

Figura 2 - Região de interesse ao sul do município de Santana do Matos

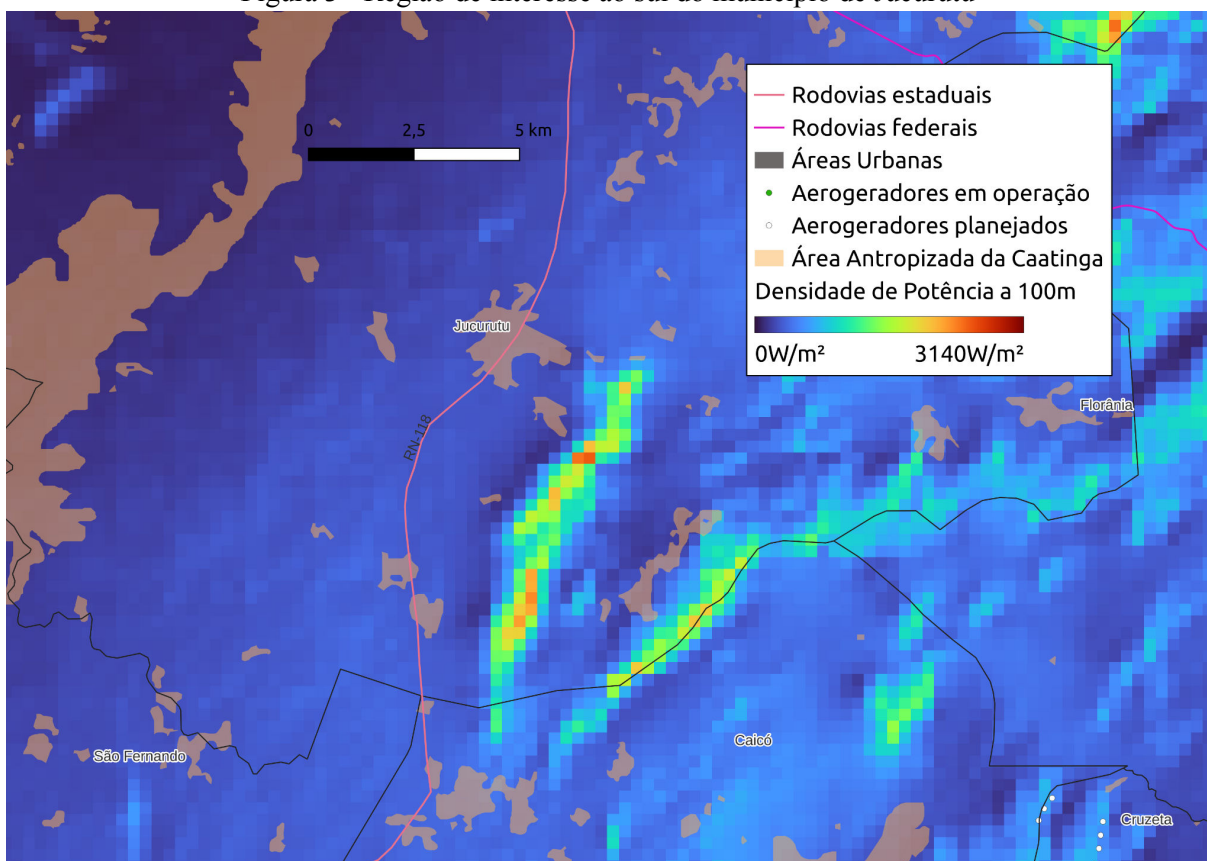


Fonte: Elaborada pelo autor usando o *software* QGIS, 2024

4.2 Sul do município de Jucurutu

Identificou-se, como é mostrado na figura 3, ao sul do município de Jucurutu, uma região com bons valores de densidade de potência a 100 metros de altura, chegando até o valor de 2511 W/m², próximo a RN 118, dessa forma, facilitando o trajeto de máquinas de grandes portes nas redondezas, e sem aerogeradores planejados, sendo uma área que provavelmente não foi explorada.

Figura 3 - Região de interesse ao sul do município de Jucurutu

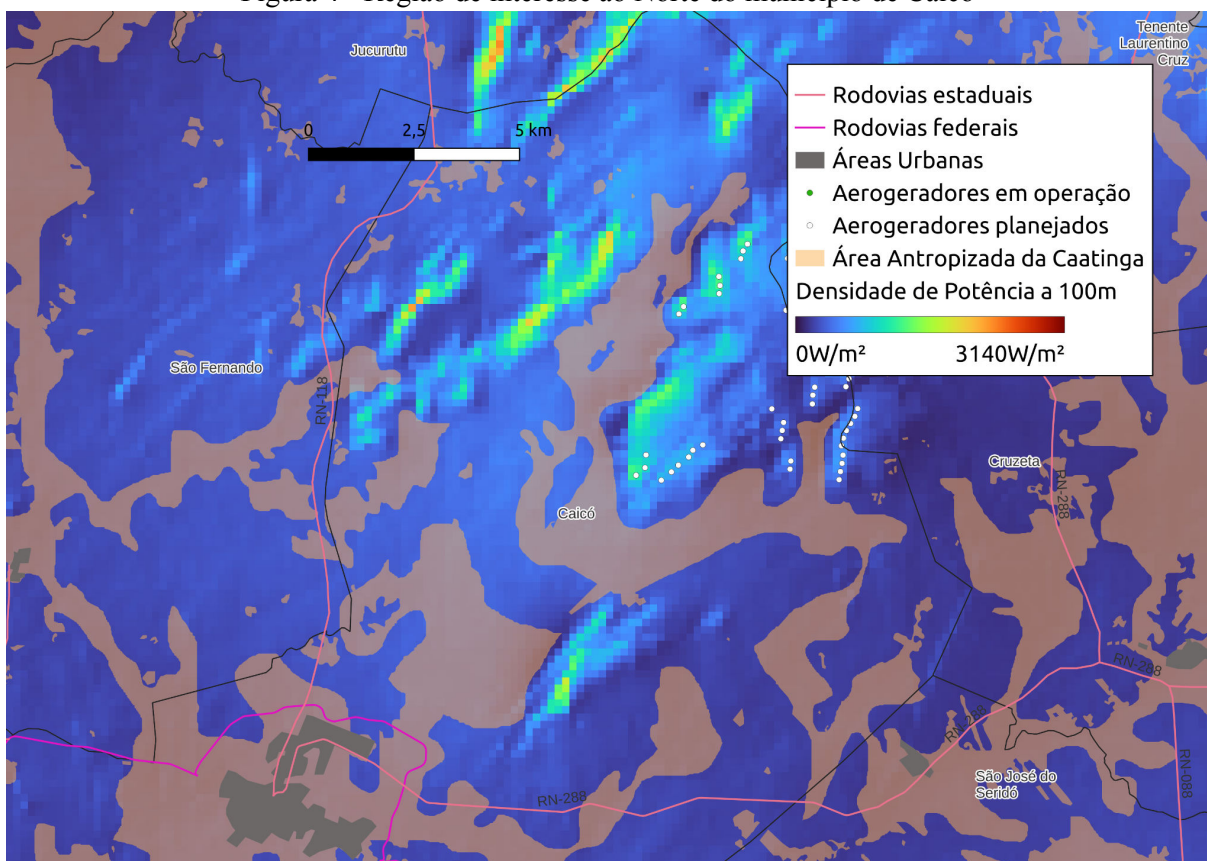


Fonte: Elaborada pelo autor usando o *software* QGIS, 2024

4.3 Norte do município de Caicó

Identificou-se, como é mostrado na figura 4, ao norte do município de Caicó, uma região com bons valores de densidade de potência a 100 metros de altura, chegando até o valor de 2219 W/m² e próximo a RN 118, dessa forma, facilitando o trajeto de máquinas de grandes portes nas redondezas.

Figura 4 - Região de interesse ao Norte do município de Caicó

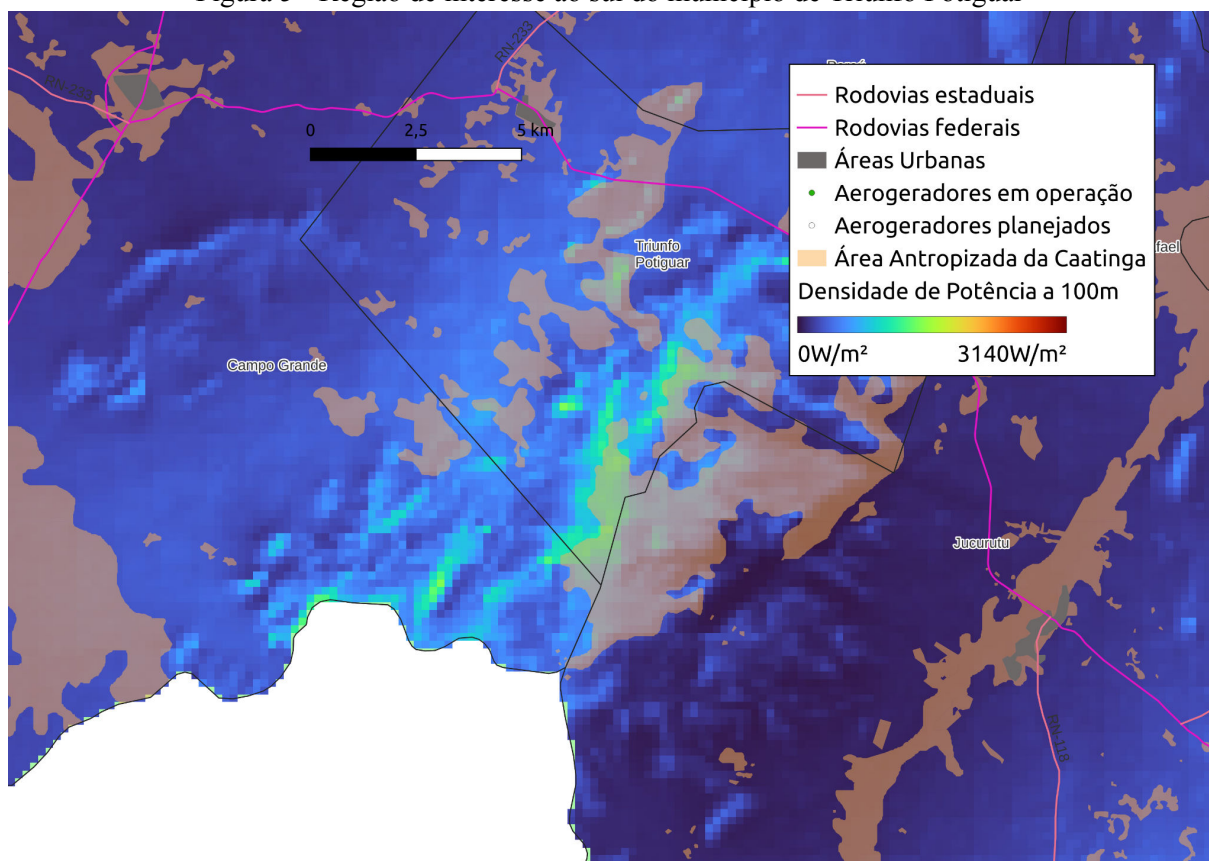


Fonte: Elaborada pelo autor usando o *software* QGIS, 2024

4.4 Sul do município de Triunfo Potiguar

Identificou-se, como é mostrado na figura 5, ao Sul do município de Triunfo Potiguar, uma região com bons valores de densidade de potência a 100 metros de altura, chegando até o valor de 1441 W/m^2 , próximo de áreas antropizadas.

Figura 5 - Região de interesse ao sul do município de Triunfo Potiguar

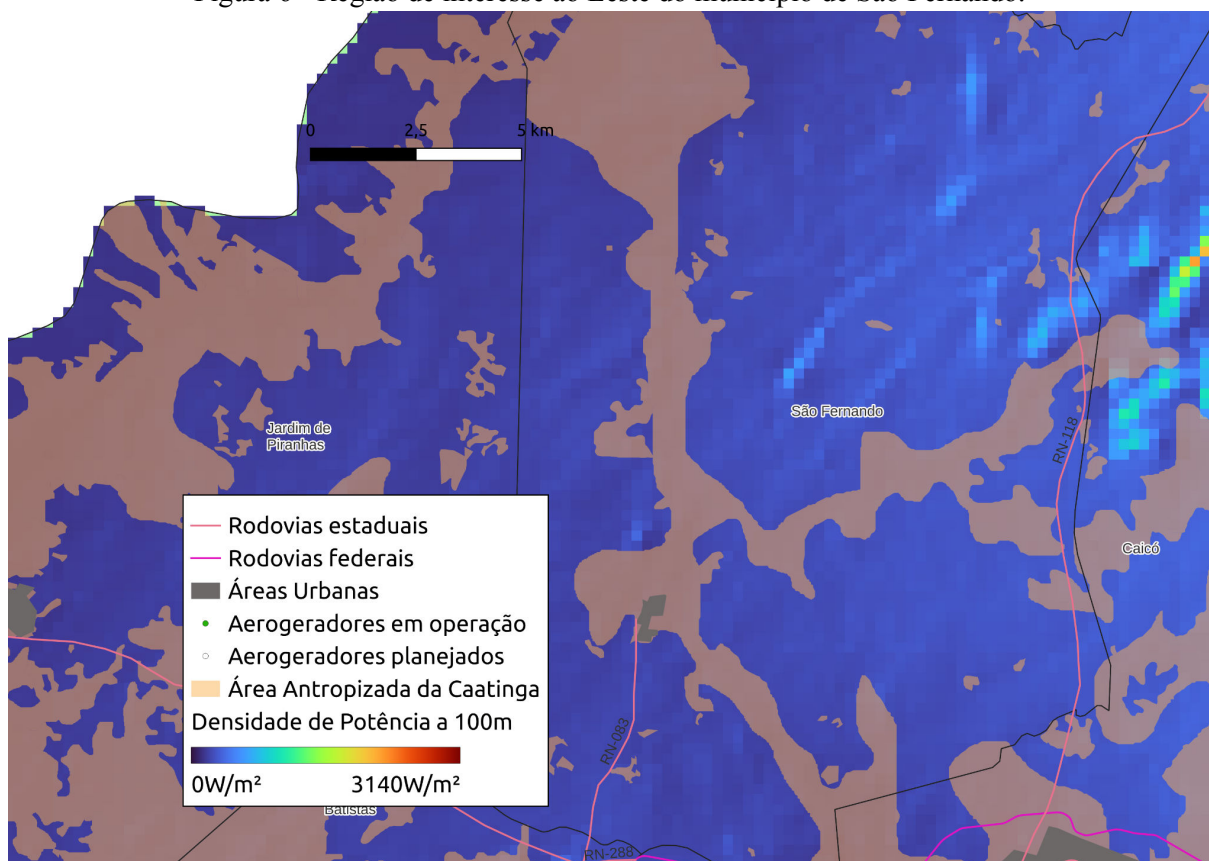


Fonte: Elaborada pelo autor usando o *software* QGIS, 2024

4.5 Leste do município de São Fernando

Identificou-se, como é mostrado na figura 6, ao Leste do município de São Fernando, uma região com bons valores de densidade de potência a 100 metros de altura, chegando até o valor de 784 W/m² e próximo à RN 118, dessa forma, facilitando o trajeto de máquinas de grandes portes nas redondezas.

Figura 6 - Região de interesse ao Leste do município de São Fernando.



Fonte: Elaborada pelo autor usando o *software* QGIS, 2024

4.6 Discussão geral dos resultados apresentados:

Diante desses mapas apresentados, vimos que o Rio Grande do Norte ainda possui regiões que apresentam possibilidades reais de expansão sustentável, sendo áreas que possuem ótimos valores de densidade de potência, dessa forma, possibilitando uma boa capacidade de futuras instalações de energia eólica. Algumas regiões apresentam áreas já antropizadas, permitindo o desenvolvimento sustentável e sem causar impactos negativos à fauna e à flora locais. Outro fator positivo é a proximidade dessas áreas a rodovias estaduais e federais, facilitando os trajetos de grandes máquinas para os futuros sítios eólicos. As áreas identificadas estão a uma distância segura das zonas urbanas, minimizando os riscos de exposição de ruídos e acidentes que possam afetar a população local.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da análise dos dados obtidos, mapeamos áreas de bom proveito para uma expansão sustentável da geração de energia eólica no Rio Grande do Norte, identificando regiões com bom potencial eólico, que já foram antropizadas, entre outros critérios para um desenvolvimento sustentável. Em relação à DP eólica, destacam-se as regiões: Sul do município de Santana do Matos, que apresenta uma DP eólica viável, chegando até o valor de 2884 W/m^2 ; Sul do município de Jucurutu, que atinge valores de DP de até 2511 W/m^2 ; dentre todas as regiões destacadas na presente pesquisa, o menor valor de DP é 784 W/m^2 que mesmo apresentando um baixo valor em relação às outras regiões, possui um ótimo potencial de instalação eólica.

Esta pesquisa pode contribuir para o avanço da compreensão do potencial eólico no RN de uma forma a agregar nas tomadas de decisão por parte de agentes públicos e privados que estão envolvidos neste setor energético. Ao identificar as regiões de melhor proveito e potencial eólico, esse estudo pode auxiliar nas definições de políticas públicas e incentivando o progresso do desenvolvimento sustentável, minimizando os impactos ambientais e socioeconômicos no setor eólico. É de suma importância também a participação da comunidade local, visando a transparência nos processos de licenciamento e gestão dos parques eólicos e também o investimento na infraestrutura e distribuição de energia, resultando na integração da energia eólica à rede elétrica, tendo então uma garantia da redução dos custos de geração.

A implantação de parques eólicos gera impactos socioambientais positivos e negativos. Destacam-se entre os impactos positivos a redução da emissão de GEE, diversificação da matriz energética, geração de empregos, etc. Já nos impactos negativos destacam-se emissão de ruídos (aerodinâmico ou mecânico), remoção da vegetação, adoecimento da população por causa da exposição aos ruídos, riscos de acidentes, fragmentação dos habitats da fauna local, etc. Algumas medidas de mitigação devem ser tomadas com o intuito de minimizar esses impactos negativos. Um estudo ambiental prévio pode contribuir para a mitigação desses impactos negativos na fauna e flora local, como também definir algumas áreas de exclusão para a instalação de turbinas e um monitoramento ambiental da região local.

Portanto, este estudo deve seguir avançando, tendo um enfoque nos impactos socioambientais, sendo assim, estando cada vez mais perto de mitigar esses efeitos negativos para a população e meio ambiente, pois o avanço da expansão sustentável da energia eólica é de suma importância para as próximas gerações.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em:

<https://sigel.aneel.gov.br/portal/home/index.html>. Acesso em 10 out. 2024.

AQUINO, Talles Rodrigo Barbosa de; SOUZA, Francisco das Chagas Silveira; PERLIN, Ana Paula. Planos e programas de prevenção e mitigação de impactos socioambientais: uma análise dos empreendimentos de energia eólica do Rio Grande do Norte–Brasil, entre 2010 e 2023. **Revista Ciência Geográfica**, v. 28, n. 2, p. 314-324, 2024.

BARCELLA, Marciano do Santos; BRAMBILLA, Flávio Régio. Energia eólica e os impactos socio-ambientais: estudo de caso em parque eólico do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 05-18, 2012.

CAMELO, H. do N et al. Análise estatística da velocidade de vento do estado do Ceará.

Revista Tecnologia, v. 29, n. 2, 2008. Disponível em: <https://ojs.unifor.br/tec/article/view/38>.

Acesso em: 18 out. 2024.

CAMPOS, Maikel Jumes de et al. Estimativa do potencial eólico no Município de Palotina-Paraná. **Acta Iguazu**, v. 1, n. 2, p. 94-103, 2012.

COSTA, Mônica Antonizia de Sales et al. Impactos socioeconômicos, ambientais e tecnológicos causados pela instalação dos parques eólicos no Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, p. 399-411, 2019.

CUNHA, Eduardo Argou Aires et al. Aspectos históricos da energia eólica no Brasil e no mundo. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 4, p. 689-697, 2019.

DINIZ, Tiago Barbosa. Expansão da indústria de geração eólica no Brasil: uma análise à luz da nova economia das instituições. 2018.

DUTRA, Ricardo Marques; SZKLO, Alexandre Salem. A energia eólica no Brasil: PROINFA e o novo modelo do setor elétrico. In: **Anais do XI Congresso Brasileiro de Energia-CBE**. 2006. p. 842-868.

GALVÃO, Luiz Claudio Ribeiro et al. Análise procedimental da energia contida no recurso do vento verificada através de tecnologias consolidadas de geração eólica. In: **Brazil Windpower 2019 Conference and Exhibition**. 2019. p. 1-12.

GOMES, Luiz Eduardo Bueno; HENKES, Jairo Afonso. Análise da energia eólica no cenário elétrico: aspectos gerais e indicadores de viabilidade econômica. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 3, n. 2, p. 463-482, 2014.

GOUVEA, Renato Luiz Proença de; SILVA, Paulo Azzi da. Desenvolvimento do setor eólico no Brasil. 2018.

GLOBAL WIND ATLAS. Disponível em: <https://globalwindatlas.info/>. Acesso em 10 out. 2024.

IBAMA - Antropização da Caatinga: IBAMA, 2008 - 2009. Disponível em: https://dadosabertos.ibama.gov.br/dataset/antropizacao-dos-biomas-extra-amazonicos/resource/cdb7b2e6-11f4-4781-96d7-44df104d3970?inner_span=True. Acesso em 10 out. 2024.

IBGE - Malha Municipal. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 10 out. 2024.

MACEDO, Luziene Dantas; DE OLIVEIRA MELO, Ellitamara Alves; DO NASCIMENTO SILVA, Emerson. Panorama da Geração de Energia Eólica onshore no País: O Caso do Rio Grande do Norte. **Revista de Economia Regional, Urbana e do Trabalho**, v. 12, n. 1, p. 91-107, 2023.

MARTINS, Fernando Ramos; GUARNIERI, Ricardo André; PEREIRA, Enio Bueno. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, p. 1304.1-1304.13, 2008.

MELO, Ellitamara Alves de Oliveira. Geração de energia eólica onshore no Rio Grande do Norte: uma avaliação sobre o emprego formal e arrecadação tributária. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/38057>. Acesso em: 28 mar. 2024.

MORAIS, Paulo Roberto Ribeiro et al. O Papel do Estado na Diversificação e Ampliação da matriz Elétrica Brasileira: uma Análise da Legislação. **Sociedade & Natureza**, v. 36, p. e70415, 2024.

ONS - Relatório Anual de 2023. Rio de Janeiro: ONS, 2023. Disponível em: https://www.ons.org.br/relatorio_anual/index.html#:~:text=Em%202023%2C%20coordenamos%201.915%20agentes,energia%20que%20potencializa%20a%20vida. Acesso em: 10 out. 2024.

PINTO, Lucía Iracema Chipponelli; MARTINS, Fernando Ramos; PEREIRA, Enio Bueno. O mercado brasileiro da energia eólica, impactos sociais e ambientais. **Revista Ambiente & Água**, v. 12, p. 1082-1100, 2017.

PINTO, Milton. Fundamentos de Energia Eólica . Rio de Janeiro: LTC, 2012. E-book. pág.VIII. ISBN 978-85-216-2193-5. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/978-85-216-2193-5/>. Acesso em: 18 out. 2024.

QGIS. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation. Disponível em: <https://www.qgis.org/>. Acesso em: 10 out. 2024.

Resolução normativa CONAMA. nº 462/2014 de 24 de julho de 2014. Disponível em <https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=677>. Acessado em: 10 out. 2024.

RODRIGUES, Marcus Vinicius Sousa; NEPOMUCENO, Arlean Fernandes; MORAIS, E. Uma breve descrição do setor de energia eólica no estado do Rio Grande do Norte. In: **Brazil Windpower Conference & Exhibition (Accessed February, 2020) at: <http://abeeolica.org.br>**. 2017.

Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico do Rio Grande do Norte (SEDEC/RN). Energia. Disponível em: <http://www.sedec.rn.gov.br/Conteudo.asp?TRAN=ITEM&TARG=15443&ACT=&PAGE=0&PARM=&LBL=Energia>. Acesso em: 28 mar. 2024.

SIMAS, Moana; PACCA, Sergio. Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável. **Estudos avançados**, v. 27, p. 99-116, 2013.

TEIXEIRA, Wesley; CAMELO, Henrique. Análise da densidade de potência eólica em regiões de serra e litoral do estado do Ceará. **Ciência e Natura**, v. 35, p. 459-462, 2013.

WIKIMEDIA - Brasil Rio Grande do Norte location map.svg. Disponível em: https://commons.m.wikimedia.org/wiki/File:Brazil_Rio_Grande_do_Norte_location_map.svg. Acesso em: 31 out. 2024.

WHITELEE - Turbinas eólicas - olhando para o sul.JPG . Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Whitelee_-_Wind_turbines_-_looking_south.JPG. Acesso em: 31 out. 2024.