



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS
CURSO DE BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

JOÃO HUGO CADEIRA BRANDÃO

**ESTUDO DO POTENCIAL EÓLICO DO MUNICÍPIO DE APODI E
PROXIMIDADES DE PAU DOS FERROS - RN**

PAU DOS FERROS

2020

JOÃO HUGO CADEIRA BRANDÃO

**ESTUDO DO POTENCIAL EÓLICO DO MUNICÍPIO DE APODI E
PROXIMIDADES DE PAU DOS FERROS - RN**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Ciência e tecnologia

Orientador: Prof. Dr Sharon Dantas da Cunha.

PAU DOS FERROS

2020

© 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.

B817e Brandão, João Hugo Cadeira.
ESTUDO DO POTENCIAL EÓLICO DO MUNICÍPIO DE
APODI E PROXIMIDADES DE PAU DOS FERROS - RN /
João Hugo Cadeira Brandão. - 2020.
43 f. : il.

Orientador: Sharon Dantas da Cunha.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2020.

1. Energia eólica. 2. Distribuição Weibull. 3.
Lei de Faraday. 4. Turbinas eólicas. I. Cunha,
Sharon Dantas da , orient. II. Título.

JOÃO HUGO CADEIRA BRANDÃO

**ESTUDO DO POTENCIAL EÓLICO DO MUNICÍPIO DE APODI E
PROXIMIDADES DE PAU DOS FERROS - RN**

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

Defendida em: 29 / 01 / 2020.

BANCA EXAMINADORA

Sharon Dantas da Cunha

Nome do Orientador, Prof. Dr. Sharon Dantas da Cunha (UFERSA)
Presidente

Otávio Paulino Lavor

Nome do Examinador, Prof. Dr. Otávio Paulino Lavor (UFERSA)
Membro Examinador

Wesley de Oliveira Santos

Nome do Examinador, Prof. Dr. Wesley de Oliveira Santos (UFERSA)
Membro Examinador

Dedico este trabalho aos meus falecidos avós Antunino Antunes Brandão, Francisca Leite Cavalcante, Maria Antonia De Oliveira (in memoriam) que foram responsáveis pelo desenvolvimento da família com seu trabalho duro e humildade.

Dedico também este trabalho aos meus pais Antonia Antunes Brandão e João Cadeira Neto que me ensinaram como vencer na vida sempre com honestidade e humildade. E também ao meu avô ainda vivo Francisco Cadeira de Oliveira.

AGRADECIMENTOS

A Jesus Cristo, que me deu sabedoria e forças para estudar, e sempre colocou no meu caminho as pessoas certas e me deu uma família que sempre me apoiou em momentos difíceis.

A minha família, que nos momentos de dificuldades souberam me ouvir e me aconselhar e nunca desistiram de mim. Mãe, obrigado por ser uma mulher tão guerreira que sempre foi um “céu de ternura, aconchego e calor”. Obrigado Pai, que sempre foi meu melhor amigo e conselheiro para situações difíceis de solucionar. Obrigado irmã, minha leal companheira.

De modo especial a outros membros da minha família: minha madrinha Marta, tia Ruth, tia Esmeralda e tia Rubenita, que em vários momentos foram mães para mim. E também agradecer a alguns primos: Maressa e Vinicius.

A meu orientador Sharon, por aceitar me orientar nesse trabalho e ser tão atencioso e paciente.

A alguns professores que serviram de inspiração para o profissional que desejo ser: Professor Sharon Dantas, Francisco Ernandes, Otávio Lavor, Segundo Gurgel, Monica Paula, Shirlene Kelly, Fernando Henrique, Bruno Fontes, Raimundo Leirton, William Vieira. Obrigado por passar todo o conhecimento. Vocês são exemplos de inteligência e trabalho para desenvolvimento de futuros profissionais.

Aos amigos que ganhei na UFERSA, que foram meus irmãos de batalha para vencer os obstáculos e superar os “fumos” para chegar até aqui: João Matias, John David, Luiz Eduardo, Joelton Santana, Murilo Feitosa, Luan Barreto, José Luan, Pedro Ivan, Karina Estrela, Breno Eduardo, David Dutra, Carlos Ramalho, Marcelo Tavares, Luiz Aires.

Aos servidores e funcionários da UFERSA que proporcionam um ambiente agradável para o aprendizado de todos na universidade.

“Tenha em mente que tudo que você aprendeu na escola é trabalho duro de muitas gerações. Receba essa herança, honre-a, acrescente a ela, e um dia, fielmente, deposite-a nas mãos de seus filhos.”

RESUMO

A energia eólica tem se destacado no cenário mundial de produção de energia elétrica. Os movimentos das pás fazem girar um sistema de imãs que convertem energia mecânica dos ventos em energia elétrica, com base na lei de Faraday. Para instalar uma turbina ou parque eólico em uma determinada região é necessário coletar a velocidade dos ventos durante o ano para estimar a potência elétrica que pode ser gerada. Os dados foram obtidos no banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia e através de equações é possível estimar velocidades em diferentes alturas. A partir disso, usando outros parâmetros apresentados no Atlas eólico do Rio Grande do Norte, é possível determinar uma curva probabilística das velocidades dos ventos conhecida com distribuição de Weibull. Uma função obtida com esta distribuição, a curva de potência da turbina e o tempo, é integrada numericamente em limites de integração referentes à velocidade de acionamento e desligamento da turbina, para obter a energia total convertida em um ano. Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo do potencial eólico na cidade Apodi e proximidades de Pau dos Ferros. Dessa maneira, é possível concluir que é mais viável a instalação de aerogeradores em regiões mais altas.

Palavras-chave: Energia eólica. Distribuição Weibull. Lei de Faraday. Turbinas eólicas.

ABSTRACT

Wind energy has stood out in the world scenario of electric energy production. The movements of the blades rotate a system of magnets that convert mechanical energy from the winds into electrical energy, based on Faraday's law. To install a turbine or wind farm in a given region, it is necessary to collect the wind speed during the year to estimate the electrical power that can be generated. The data were obtained from the database of the National Institute of Meteorology and through equations it is possible to estimate speeds at different heights. From this, using other parameters presented in the Wind Atlas of Rio Grande do Norte, it is possible to determine a probabilistic curve of wind speeds known with Weibull distribution. A function obtained with this distribution, the turbine power curve and time, is numerically integrated into integration limits for the turbine start and stop speed, to obtain the total energy converted in one year. This work aims to conduct a study of the wind potential in the city of Apodi and Pau dos Ferros and its surroundings. Thus, it is possible to conclude that the installation of wind turbines in higher regions is more viable.

Keywords: Wind energy. Weibull distribution. Faraday law. Wind turbines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Turbina eólica de eixo horizontal.....	
Figura 2 – Turbina eólica de eixo vertical.....	
Figura 3 – Potencial eólico brasileiro com ao longo dos anos.	
Figura 4– Tubo de corrente que representa o fluxo de ar em uma turbina eólica	
Figura 6 - principais componentes internos de um aerogerador.....	
Figura 7 – Imã induzindo corrente elétrica.....	
Figura 8 – Representação de um gerador de fluxo radial.	
Figura 9 – Representação do gerador a imãs permanente de fluxo axial.	
Figura 10 – Velocidade anual média dos ventos.	
Figura 12 – Distribuição de Weibull.	
Figura 13 – Curva de potencia.....	
Figura 14 – Curva de Energia para Apodi com 50 KW	
Figura 15 – Curva de Energia para Apodi com 2,627 KW	
Figura 16 – Ilustração das altitudes nas cidades solicitadas.....	
Figura 17 – Distribuição de Weibull para a cidade de Martins.	
Figura 18 – Energia anual convertida para a cidade de Martins.	
Figura 19 - Distribuição de Weibull para a cidade de Portalegre.....	
Figura 20 - Energia anual convertida para a cidade de Portalegre.	
Figura 21 – Distribuição de Weibull para a cidade de São Miguel	
Figura 22 - Energia anual convertida para a cidade de São Miguel.	
Figura 23 - Distribuição de Weibull para a cidade de Pau dos Ferros.	
Figura 24 - Energia anual convertida para a cidade de Pau dos Ferros.....	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Velocidade média anual de Apodi.....	
Tabela 2 – Velocidade em Apodi em cada mês.....	
Tabela 3 – Velocidade estimada para Apodi.	
Tabela 4 – Potencia anual média para Apodi.	
Tabela 5 – Velocidades médias das demais cidades.....	
Tabela 6 – Fatores de forma Weibull.	
Tabela 7 – Função gama.....	
Tabela 8 – Fator de escala em metros por segundo.....	
Tabela 9 – Comparativo Pau dos Ferros e Apodi.....	

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	.....
2 GESTÃO DO CONHECIMENTO (GC).....	.....
2.1 Aerogeradores .....	.....
2.1.1 A energia eólica no Brasil.....	.....
2.2. Potência de uma turbina eólica .....	.....
2.3 Princípio de funcionamento de um gerador de corrente elétrica. ....	.....
3 METODOLOGIA.....	.....
4 RESUTADOS.....	.....
4 CONCLUSÕES.....	.....
REFERÊNCIAS .....	.....

1 INTRODUÇÃO

Ao passo que o desenvolvimento tecnológico foi avançando, o consumo de energia elétrica em residências, indústrias, estabelecimentos, se tornou cada vez mais presente. Por consequência, várias formas de se obter energia foram descobertas, obviamente, sempre com a intenção de transformar determinada energia em eletricidade. Segundo Ricardo Aldabó (2012), umas das formas mais limpas de obter energia elétrica é através de turbinas eólicas, isso acontece por causa da agressividade mínima que esse tipo de aparato causa ao meio ambiente. Por exemplo, as usinas hidrelétricas fornecem a grande maioria da energia elétrica usada no Brasil, porém modifica a fauna e flora, pois modifica o curso natural dos rios e necessita de uma grande área alagada. Aldabó (2012), também cita que atualmente as formas mais utilizadas de se obter energia elétrica são as baseadas em petróleo e carvão mineral que obviamente são fontes esgotáveis de energia, irão se esgotar em aproximadamente 40 anos (PORTILHO, 2018).

O primeiro registro histórico da utilização de energia eólica foi por volta de 200 A.C na Pérsia. Nessa época, os moinhos de vento eram utilizados para bombear água e moer grãos. Essa tecnologia, apesar de simples, foi amplamente utilizada durante os séculos seguintes, que inicialmente não possuíam a função de gerar energia elétrica. Na Holanda por volta do século XVII os moinhos de vento eram muito utilizados para drenar água. Em 1582 foi construído o primeiro cata-vento para produção de óleos vegetais (CUNHA, 2017).

O final do século XIX foi marcado pela Revolução Industrial, que trouxe consigo um grande número de recursos e possibilitou vários novos tipos de tecnologia que veio a transformar o mundo. Também é caracterizado por um grande aumento do uso de combustíveis fósseis para a geração da energia elétrica, necessária para o funcionamento das máquinas, que embora possuíssem grande valor energético, o seu uso exagerado ia gerar uma futura escassez desses materiais, e também causaria a longo prazo, danos irreversíveis ao meio ambiente. Entretanto, a expansão das usinas elétricas com fontes mais limpas de energia, só surgiu na década de 70 com a crise do petróleo (CUNHA, 2017).

De certa forma, a produção de energia eólica no Brasil é algo bem recente. De acordo com Diniz (2018) a primeira usina eólica instalada no Brasil, foi no arquipélago de Fernando de Noronha em Pernambuco em 1992. Nesta época já existia usinas deste

tipo em várias partes do mundo como Alemanha e Dinamarca, e assim observa-se que o Brasil recebeu tarde essa tecnologia que existe desde 1957 (DINIZ, 2018).

Segundo Diniz (2018), em 2001 houve um grande racionamento de energia elétrica que por consequência trouxe uma reforma no setor de produção de energia elétrica incentivando a fontes alternativas de energia. Nesse contexto, a energia eólica teve uma grande expansão, chegando a representar cerca de 7,1% de toda energia produzida no Brasil.

Desta forma é evidente o destaque que a energia eólica tem dentro do quadro mundial de produção de energia elétrica. Em virtude disso, este presente trabalho tem como objetivo estimar o potencial energético de Pau dos Ferros e cidades próximas de forma que se possa determinar o melhor local para instalação do parque eólico em função de sua altitude. Além disso, também foi proposto uma metodologia eficiente para obter a energia convertida anualmente para qualquer cidade com uma estação automática próxima.

2 GESTÃO DO CONHECIMENTO (GC)

2.1 Aeroeradores

Os aeroeradores, também chamados popularmente de cata-ventos, são constituídos por pás que giram por consequência das forças dos ventos. Estes equipamentos são construídos de maneira a aproveitar ao máximo essa força, ou seja, a posição do objeto em relação à direção do vento e a velocidade do mesmo está diretamente ligado a dificuldade de locomoção de determinado objeto. Quando o vento passar através de suas pás, elas irão rotacionar em relação a um eixo, e transformará a energia eólica em outras formas de energia. Os aeroeradores são classificados de acordo com o movimento do seu eixo (ALDABÓ, 2012).

- Turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH), como mostrado na figura 1;
- Turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV), como mostrado na figura 2;

Figura 1 – Turbina eólica de eixo horizontal.



Fonte: Aneel (2019).

Figura 2 – Turbina eólica de eixo vertical



Fonte: Energia Lateral (2019)

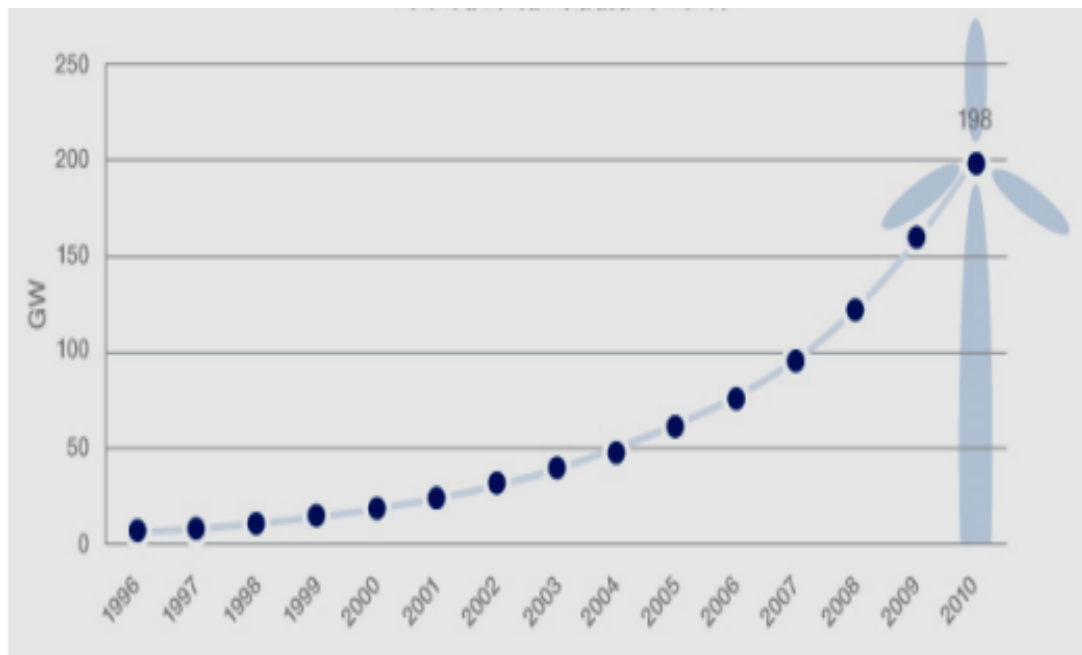
O aerogerador mais usado é o TEEH, que, segundo de Ricardo Aldabó (2012) são constituídos por:

- Pás do rotor – Capturam a energia do vento para transformar em energia rotacional.
- Eixo – Envia a energia rotacional para o gerador.
- Gerador – Utiliza a energia mecânica absorvida e transforma em elétrica através de eletromagnetismo
- Unidade de controle eletrônico – Monitora o sistema.
- Torre – Sustenta toda a estrutura a uma distância segura do sol.

2.1.1 A energia eólica no Brasil

Desde a década de 1990 o uso de usinas eólicas tem aumentando significativamente. Isso mostra como o interesse por novas tecnologias tem aumentado assim como o interesse por fontes limpas de energia. A figura 3 representa como a potência tem aumentando no decorrer dos anos (KASPARY, 2015).

Figura 3 – Potencial eólico brasileiro com ao longo dos anos.



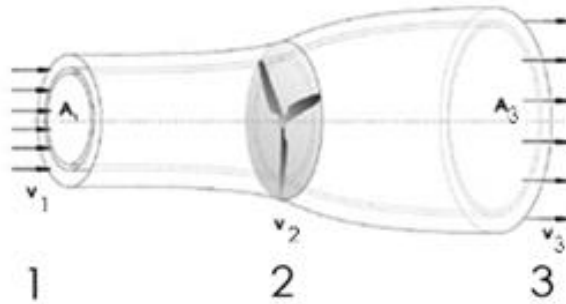
Fonte: Kaspary (2015)

No ano de 2012, houve mais um acréscimo de 45 GW, dessa forma um total de 283 GW (KASPARY, 2015). Anos depois em 2017, o Brasil chegou num total de 12763 GW e 458 parques eólicos assumindo a oitava posição no ranking mundial de produção de energia elétrica através de energia eólica (NASCIMENTO, 2018).

2.2. Potência de uma turbina eólica

A potência é uma grandeza muito importante no dimensionamento da turbina eólica, pois fornece a quantidade de energia transferida por unidade de tempo, cuja unidade no sistema internacional de medida (SI) é watt (joule/segundo). Na figura 4 é mostrado o fluxo de vento através da turbina eólica.

Figura 4– Tubo de corrente que representa o fluxo de ar em uma turbina eólica



Fonte: Adaptado de Picolo (2014)

De acordo com Ricardo Aldabó, a potência total extraída pela turbina é a diferença da potência do vento antes e depois da turbina.

$$P_2 = P_1 - P_3 \quad (1)$$

Onde P_2 é a potência extraída do vento, P_1 , potência disponível do vento na entrada do rotor, e P_3 é potência de saída do rotor. Existe também uma parcela de energia cinética que é absorvida pela turbina.

O perfil de velocidade do vento é alterado ao passar pela turbina, dessa forma podemos determinar que a energia absorvida pela turbina é a diferença da energia cinética calculada antes e depois da turbina eólica (PICOLO, 2014). Observe a equação 2, que mostra a energia cinética envolvida levando em consideração a diferença de velocidade:

$$E_{ca} = \frac{1}{2}m(V_1^2 - V_3^2) \quad (2)$$

É possível dizer que a derivada da energia em relação ao tempo é a potência extraída, ou seja, a taxa de variação da energia no tempo (PICOLO, 2014). Dessa forma, tem-se a equação 3 que mostra como a potência é obtida:

$$\frac{dE_{ca}}{dt} = P_2 \quad (3)$$

Dervivando a equação 2, de modo a obter a vazão mássica, tem-se a equação 4 que representa a potência após derivar a função.

$$P_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{dm}{dt} \right) (V_1^2 - V_3^2) \quad (4)$$

A vazão mássica pode ser escrita como a equação 5:

$$\frac{dm}{dt} = \rho AV \quad (5)$$

A velocidade e a área nessa secção pode ser qualquer uma presente na figura 4. Isso acontece porque a vazão massica é considerada constante. Entretanto, para fins desses calculos, vamos considerar a velocidade do ar no instante em que ele passa nas pás do rotor, ou seja, o V_2 , (PICOLO, 2014) então tem-se a equação 6.

$$P_2 = \frac{1}{2} \rho A_2 V_2 (V_1^2 - V_3^2) \quad (6)$$

Pelo teorema de Rankine-Froude existe a seguinte relação entre as velocidades como mostrado na equação 7:

$$V_2 = \frac{(V_1 + V_3)}{2} \quad (7)$$

Após realizar manipulações e utilizando as equações 7 e 6, obtém-se a equação 8:

$$P_2 = \frac{1}{2} \rho A_2 V_1^3 \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{V_3}{V_1} \right] \left[1 - \left(\frac{V_3}{V_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (8)$$

Fazendo uma analogia com a equação 6, pode-se dizer que o coeficiente de potência é representado pela equação 9:

$$C_p = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{V_3}{V_1} \right] \left[1 - \left(\frac{V_3}{V_1} \right)^2 \right] \quad (9)$$

A turbina eólica possui um aproveitamento máximo de 16/27 ou 59,3% da potência total (ALDABÓ, 2011). A potência total é dada pela equação 10.

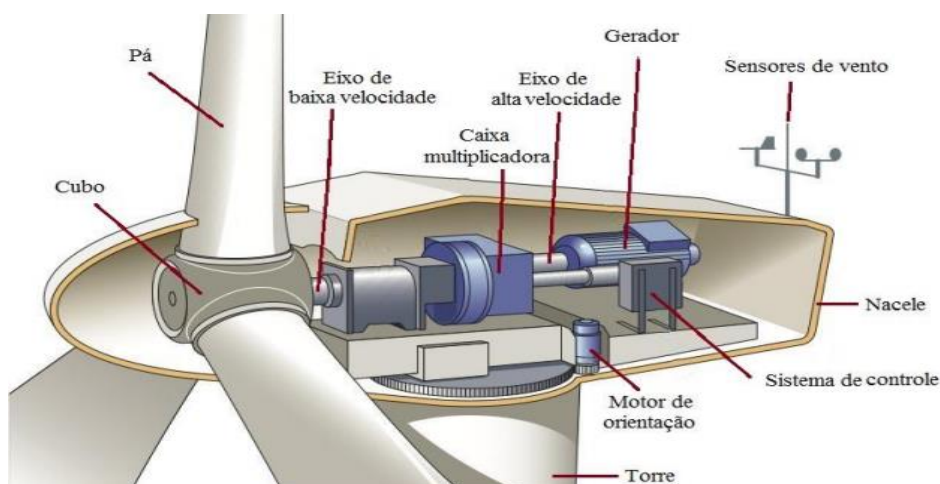
$$P_2 = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (10)$$

Onde ρ é massa específica do ar, A é área varrida pelo ar no rotor, V é a velocidade do vento, e C_p é um fator de correção que leva em conta que a turbina não consegue extrair toda potência disponível no vento e depende do material do rotor, formato e condições de estado de conservação.

2.3 Princípio de funcionamento de um gerador de corrente elétrica.

Um dos componentes de um aerogerador é um dispositivo chamado gerador. Com o vento atingindo as pás da turbina o seguinte processo vai ocorrer: As pás irão rotacionar de forma a acionar um eixo de baixa velocidade que por sua vez vai transferir energia para uma caixa de engrenagens. Em seguida, a caixa de engrenagens vai rotacionar um eixo de alta velocidade fazendo que o rotor funcione. Esse sistema pode ser visto na figura 6 (TAVEIROS, 2014).

Figura 6 - Principais componentes internos de um aerogerador.

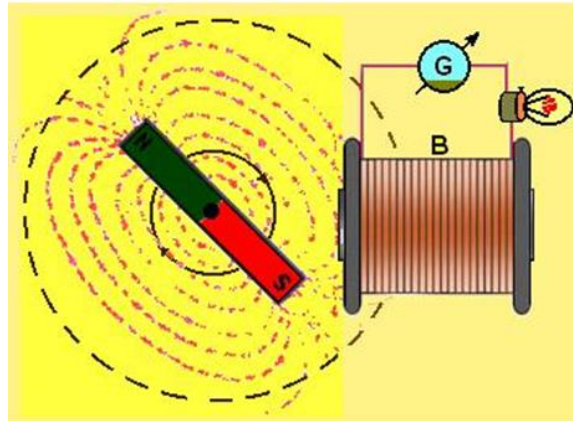


Fonte: Ohara (2014)

Agora, é importante entender o princípio de funcionamento de um gerador para o entendimento de como a energia elétrica é gerada. De maneira resumida, os geradores funcionam com base na lei de Faraday, onde um campo magnético varia com o tempo de forma a induzir uma f.e.m (força eletromotriz) (OHARA, 2014).

Para exemplificar de acordo com a figura 7 tem-se uma bobina formada por espiras de material condutor. Quando um fluxo magnético varia nas proximidades da espira, percebe-se que uma corrente induzida surge no circuito fazendo uma lâmpada funcionar (Netto).

Figura 7 – Imã induzindo corrente elétrica.



Fonte: Netto

Inicialmente, devemos quantificar o número de linhas de campo magnético que atravessa a espira. Para isso, podemos calcular o fluxo magnético através da seguinte equação 11 (HALLIDAY, 2016).

$$\varphi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (11)$$

De maneira experimental, Faraday percebeu que quando se varia esse fluxo com o tempo, surge uma ddp (diferença de potencial). Dessa forma, a lei de Faraday se torna a equação 12 (HALLIDAY, 2016).

$$\varepsilon = -\frac{d\varphi}{dt} \quad (12)$$

Para uma bobina com número “N” de espiras, tem-se a equação 13. (HALLIDAY, 2016)

$$\varepsilon = -\frac{Nd\varphi}{dt} \quad (13)$$

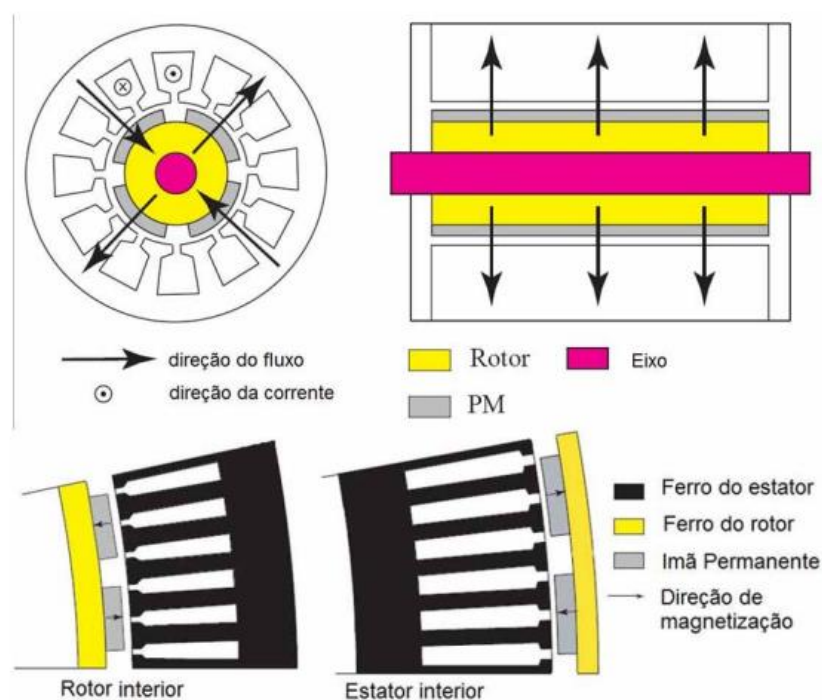
Analisando a lei de Faraday, pode-se chegar a algumas conclusões.

- Em decorrência do produto escalar, quando as linhas de campo magnético formam ângulo de 90 graus com a área da espira, o fluxo resultante é nulo.
- Em decorrência do produto escalar, quando as linhas de campo magnético formam ângulo de 0 ou 180 graus com a área da espira, o fluxo resultante é máximo.

- Mudando a área total da bobina, vamos ter mudança no fluxo magnético resultante.
- Mudando a intensidade do campo magnético, vamos ter mudança no fluxo magnético resultante.

Para caracterizar os geradores elétricos, vamos avaliar a orientação do fluxo dentro do gerador (MAIA, 2011). Gerador de fluxo radial: o fluxo magnético se propaga em direção perpendicular ao sentido de rotação do rotor (MAIA, 2011).

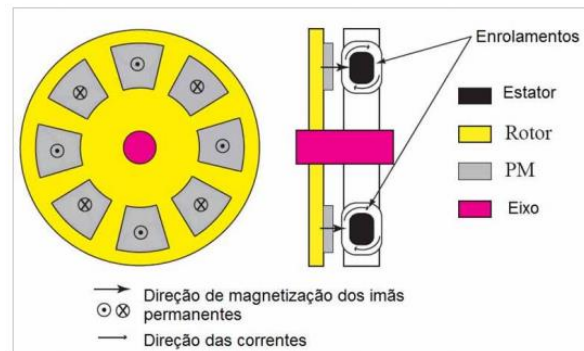
Figura 8 – Representação de um gerador de fluxo radial.



Fonte: Maia (2011)

Gerador de fluxo axial: o fluxo de campo magnético é paralelo ao sentido de rotação. Comparando com a classificação anterior, os geradores de fluxo axial apresentam maior densidade de potência com um menor volume. Observe as figura 8 e 9 que mostram o gerador de fluxo radial e axial.(MAIA, 2011).

Figura 9 – Representação do gerador a ímãs permanente de fluxo axial.



Fonte: Maia (2011)

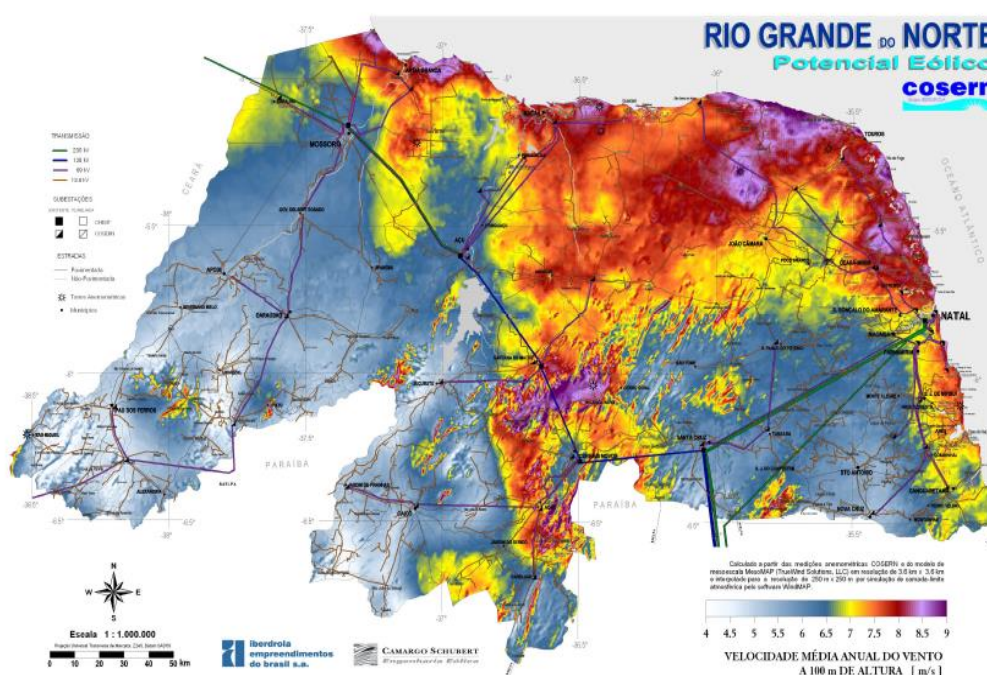
3 METODOLOGIA

O presente trabalho se caracteriza como uma pesquisa de cunho probabilístico, que consiste na organização e observação de dados pré-existentes. Os dados foram obtidos de forma quantitativa e qualitativa, sobre a velocidade dos ventos em diversas cidades próximas a cidade de Pau dos Ferros.

Os lugares escolhidos para obtenção de dados foram as cidades de Apodi, São Miguel, Martins, Pau dos Ferros e Porta Alegre, localizados no Alto Oeste no estado Rio Grande do Norte. Essas cidades possuem respectivamente, 36323; 22157; 8.218; 27745; 7867 habitantes (IBGE, 2019).

Os dados foram obtidos por meio do Instituto Nacional de Meteorologia durante todo o ano de 2019 apenas para a cidade de Apodi, (INMET, 2019) e através da análise do gráfico de cores sobre velocidade média anual que existe no atlas eólico do Rio Grande do Norte. Se utilizando da lei Logarítmica, obtêm-se estimativas das velocidades nas demais cidades analisando a diferença de altura (CASTRO, 2005). Observe a figura 10 que representa a velocidade anual média dos ventos no ano de 2003.

Figura 10 – Velocidade anual média dos ventos.



Fonte: Amarante (2003)

O tratamento de dados foi feito conforme o proposto pelo Atlas eólico do Rio Grande do Norte. Inicialmente é necessário escolher uma altura de referência e a velocidade anual média para usar na lei logarítmica representada na equação 14 (CASTRO, 2005).

$$v = v_{ref} \cdot \frac{\log(h_2/z_0)}{\log(h_1/z_0)} \quad (14)$$

Onde:

v é a velocidade que deseja-se estimar em metros por segundo;

v_{ref} é a velocidade que foi medida a altura de referencia em metros por segundo;

h_2 altura que deseja-se estimar o valor da velocidade v em metros;

h_1 altura que foi medido o v_{ref} em metros;

z_0 é a rugosidade do terreno.

Após isso, é usado a distribuição de Weibull representada na equação 15 (OZAWA, 2017) para determinar um gráfico probabilístico das velocidades dos ventos.

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (15)$$

Em que:

$$k = \left(\frac{\sigma}{V}\right)^{-1,085} \quad (16)$$

$$c = \frac{V}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (17)$$

Onde:

c é o fator de escala em metros por segundo.

K é fator de forma.

V é a velocidade média em metros por segundo.

Γ é a função gama.

σ é desvio padrão das velocidades.

Por fim, determina-se a energia anual média através de integração numérica da área abaixo da curva do gráfico multiplicado pelo tempo desejado e pela potência na altura estimada. A equação 18 mostra como é o calculo da curva de energia.

$$E_c(V) = f(V).t.P(V) \quad (18)$$

Onde:

$E_c(V)$ é a energia convertida

$f(V)$ densidade de probabilidade Weibull

t é o número de horas do período considerado (no projeto, 1 ano, 8760 horas)

$P(V)$ é a potência em Watt.

A energia anual média é dada pela equação 19.

$$E_{tc} = \int E_c(V)dV \quad (19)$$

4 RESULTADOS

De maneira inicial será analisado como a altura influencia na obtenção de potência nas regiões próximas a Pau dos Ferros. A tabela 1 mostra dados da velocidade média anual para o ano de 2019 referente a cidade de Apodi.

Tabela 1 – Velocidade média anual de Apodi em 2019.

Cidades	Altitude (m)	Velocidade média (m/s)
Apodi	10	2,23

Fonte: Autor

Os dados coletados foram obtidos realizando uma média das velocidades em cada mês de modo a obter uma estimativa. De acordo com a nota técnica número 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET do Instituto Nacional de Meteorologia, os sensores são instalados a 10 de metros de altura. A tabela 2 mostra as velocidades médias de Apodi para cada mês ao longo do ano de 2019.

Tabela 2 – Velocidade média em Apodi em cada mês do ano de 2019.

Mês	Velocidade (m/s)
Janeiro	0,32
Fevereiro	0,22
Março	0,63
Abril	1,85
Mai	2,12
Junho	2,53
Julho	2,75
Agosto	3,41
Setembro	3,38

Outubro	3,62
Novembro	3,74
Dezembro	3,60

Fonte: Autor

O desvio padrão dessas velocidades médias é 1,18.

Com esses dados, é possível extrapolar a velocidade dos ventos em diferentes alturas usando a equação 14 (CASTRO, 2005). Nesse estudo, a altura de referência é 10 metros e a velocidade de referência é mostrada na tabela 1. De acordo com a equação 14, percebe-se é necessário os valores da rugosidade do terreno. Analisando o Atlas eólico do Rio Grande do Norte, estima-se que o valor de rugosidade é em média 0,27.

As tabelas a seguir, mostram as velocidades para diferentes alturas.

Tabela 3 – Velocidade estimada para Apodi.

Altura (m)	Velocidade (m/s)
20	2,66
30	2,91
40	3,09
50	3,22
60	3,34
80	3,51
90	3,59
100	3,65

Fonte: Autor

Agora, utilizando a equação 10, estima-se a potência média gerada em um ano, para isso, é necessário sabermos a densidade do ar nas regiões próximas. Usando o Atlas eólico do RN estima-se que a densidade do ar como sendo $1,17 \text{ kg/m}^3$.

Também é necessário determinar a área varrida pelas pás do rotor. Para simplicidade de cálculos será adotado um rotor de diâmetro igual a 17 metros, o mesmo tamanho da primeira turbina eólica instalado no Brasil em Fernando de Noronha-PE no ano de 1992 (ANEEL). Dessa forma, a área calculada é aproximadamente 226 metros quadrados.

Na equação 10 é necessário o valor do coeficiente de potência, neste caso será adotado o valor ideal do coeficiente de potência de uma turbina eólica, 0,593, que é um valor adimensional. Nesse caso serão desprezados os efeitos de diminuição da potência (WENZEL, 2007). Então, a tabela abaixo mostra a potência média anual para aerogeradores de diferentes alturas.

Tabela 4 – Potência anual média para Apodi.

Altura (m)	Potência (Watt)
20	1464,81
30	1919,72
40	2299,84
50	2627,92
60	2906,55
80	3403,82
90	3611,55
100	3827,57

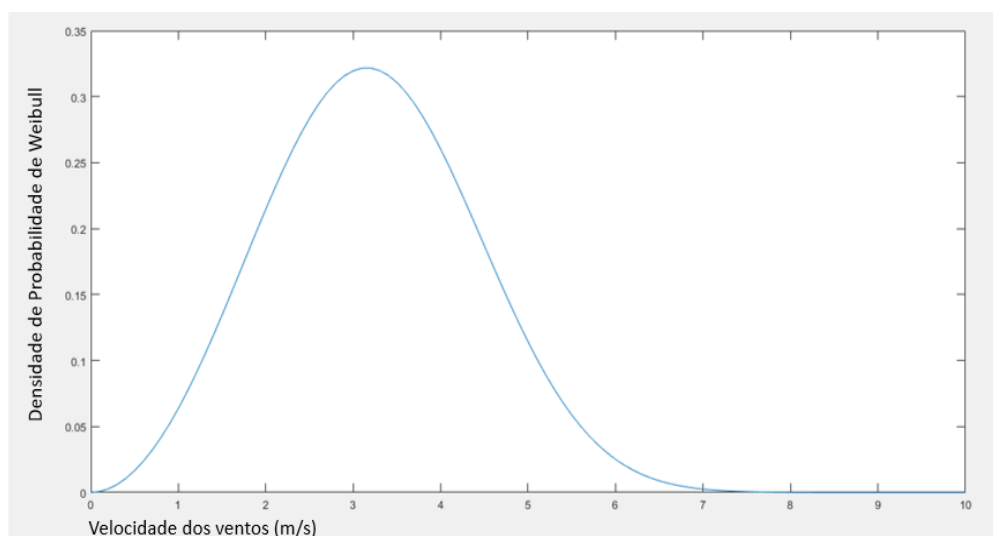
Fonte: Autor.

A análise anterior foi feita com os dados do Instituto Nacional de Metrologia e assumindo parâmetros arbitrários. A seguir, será feita uma análise baseada no atlas eólico do Rio Grande do Norte, usando métodos estatísticos e integração numérica.

Neste estudo será utilizado a distribuição de Weibull (OZAWA, 2017). Essa distribuição probabilística é o que melhor descreve a frequência de velocidade do vento, dada pela equação 15.

Através da equação 16, pode-se determinar o valor do fator de forma de acordo com a velocidade que se deseja usar. Inicialmente para uma altura de 50 metros na cidade de Apodi temos k igual a 2,97. Através do atlas eólico já conhecendo o valor de k , podemos estimar o valor da função gama como sendo igual a 0,89. O fator de escala é dado pela equação 17 que para este caso é igual a 3,62 m/s. O gráfico a seguir descreve a distribuição de Weibull de acordo com os dados citados a cima.

Figura 12 – Distribuição de Weibull.

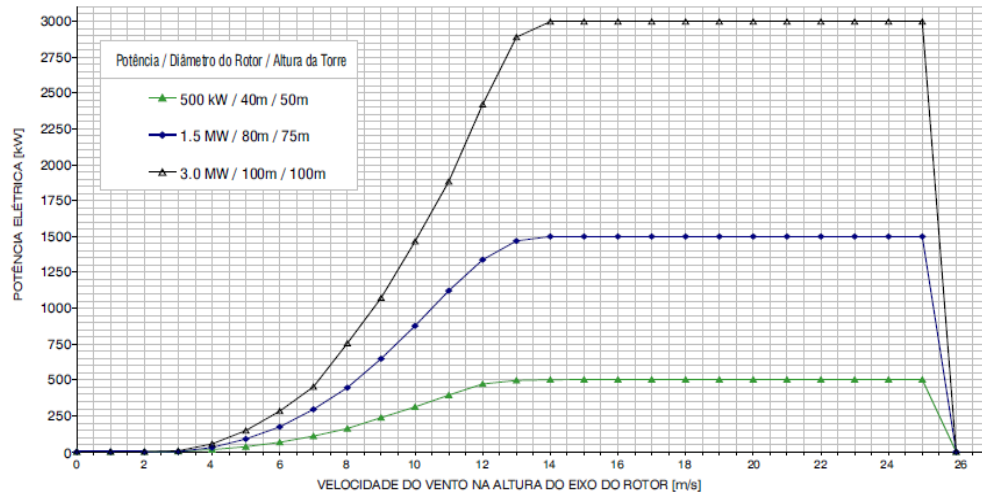


Fonte: Autor

A figura 12 descreve a probabilidade de uma determinada velocidade ocorrer em determinado momento, e a partir da distribuição de Weibull se obtêm a energia convertida anualmente.

Para determinar a energia convertida será adotada a curva de potência de um aerogerador em função da velocidade apresentado no atlas eólico do Rio Grande do Norte, como apresentado na figura 13.

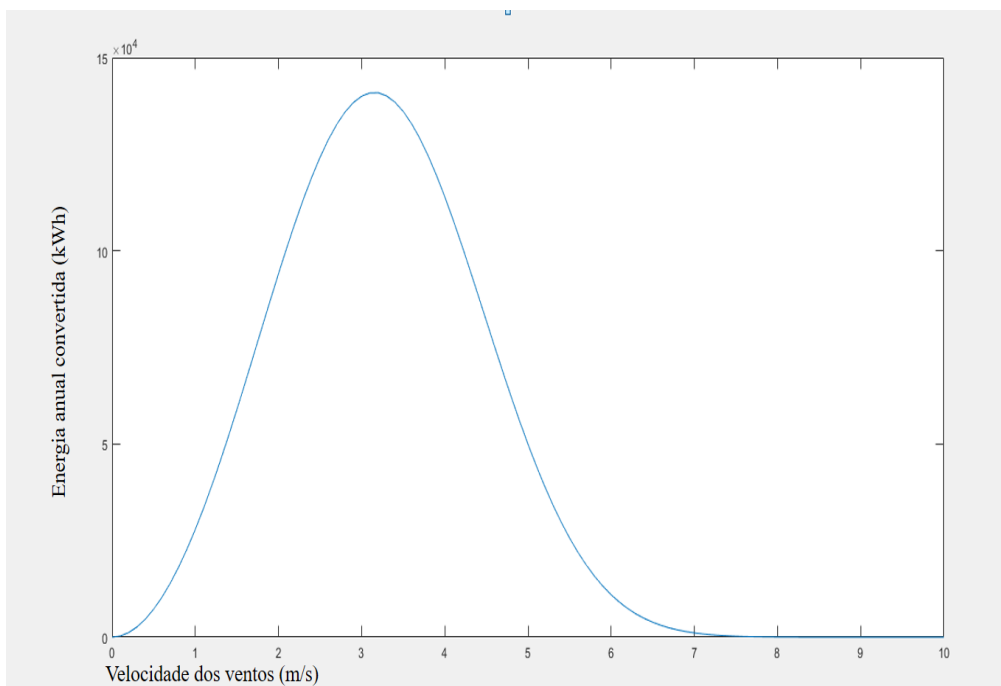
Figura 13 – Curva de potência



Fonte: Atlas eólico do Rio Grande do Norte

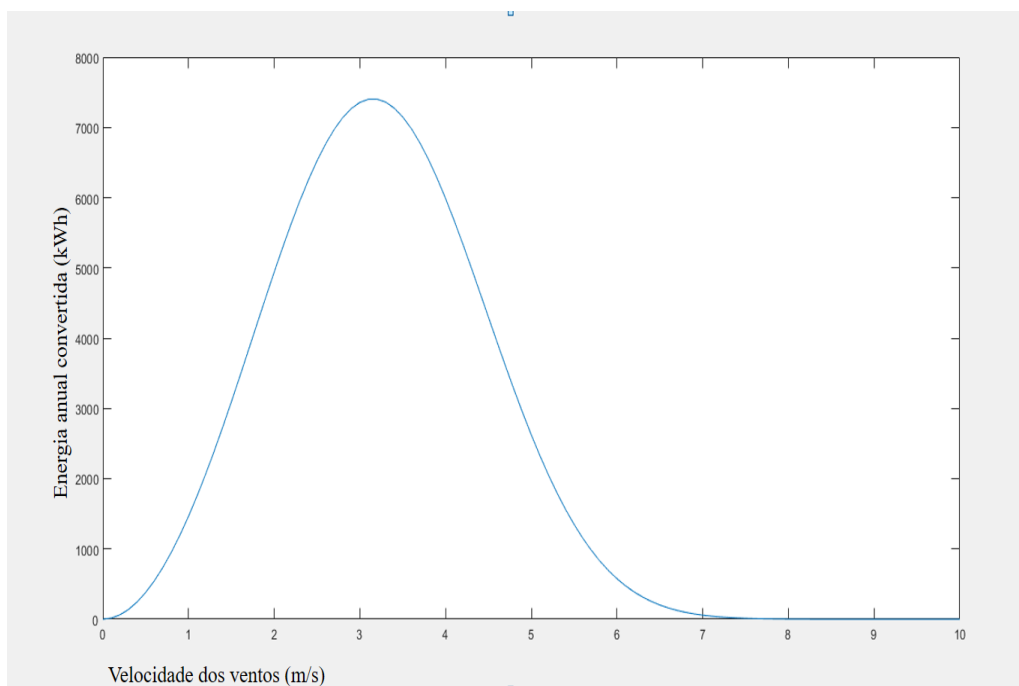
Através da análise do gráfico, com base na velocidade, será adotada a potência gerada com a velocidade média dos ventos de Apodi a 50 metros de altura, como sendo igual a 50 kW. Levando em consideração que os dados expostos no atlas eólico são de 2003, será feito o mesmo cálculo para uma potência de 2627,923 W, determinada na tabela 4 com as velocidades coletadas no Instituto Nacional de Metrologia no ano de 2019. De acordo com Silva (2018), podemos determinar a energia convertida pela equação 18.

Figura 14 – Curva de Energia para Apodi com 50 KW



Fonte: Autor

Figura 15 – Curva de Energia para Apodi com 2,627 KW



Fonte: Autor

Com as curvas de energia, de acordo com Silva (2018) é preciso apenas realizar o cálculo da área abaixo da curva. Para isso, pode-se realizar a integração da função

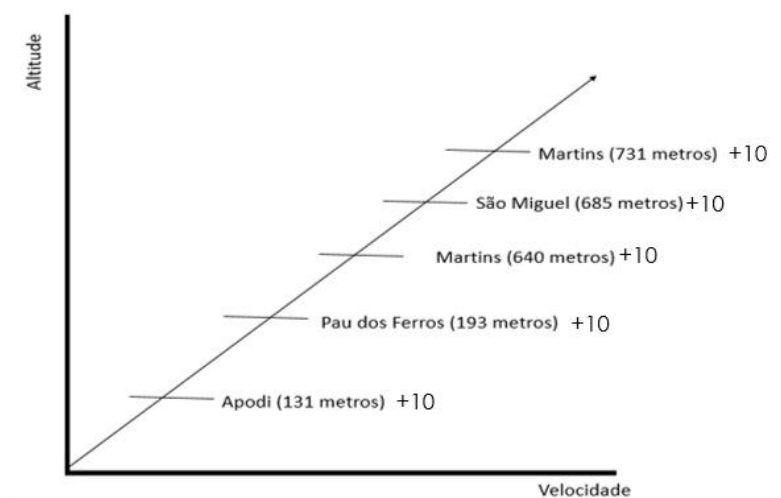
$E_c(V)$ para encontrar a energia total anual convertida no processo. Para isso, é utilizado a equação 19, onde os limites de integração devem ser apresentados de acordo com *cut-in* e o *cut-out*, que são respectivamente as velocidades com que o aerogerador vai começar a gerar energia e o momento em que ele vai parar de produzir energia. Para essa simulação, será adotado os limites de integração como sendo de 2,5 m/s até 26 m/s, onde esses limites foram identificados pela análise do gráfico da figura 13.

Após realizar a integração com o *software* MATLAB utilizando um método numérico conhecido por método dos trapézios (BILOTI, 2019), obtêm-se que para 2,627 kW, a energia total convertida de $1,139 \times 10^4$ kWh/ano e para 50 kW temos uma energia total convertida de $3,139 \times 10^5$ kWh/ano na cidade de Apodi no estado do Rio Grande do Norte.

Já compreendido a forma de se calcular a energia total convertida, de maneira análoga será calculado a energia total convertida para outras cidades. As cidades escolhidas para o estudo foram: Pau dos ferros, Martins, Porta Alegre e São Miguel. Desta forma, é possível ter uma melhor visão do quadro eólico nessa região.

Para as demais cidades, calcula-se as seguintes velocidades médias representadas na tabela 6. Para se obter esses resultados foi obtido as informações das altitudes das cidades, e tomando a velocidade de Apodi a 10 metros de altura, foi feito uma estimativa das velocidades médias a 10 metros de altura a partir da equação 14. Para melhor compreender o que foi exposto, observe a figura 16.

Figura 16 – Ilustração das altitudes nas cidades solicitadas.



Fonte: Autor.

A figura 16 representa a altitude de cada cidade em relação ao nível do mar. O termo “+10” indica a altitude onde o sensor de velocidade foi colocado. Então para realizar a coleta de dados das outras cidades usa a equação 14 tomando a diferença de altitude entre as cidades levando em consideração os 10 metros de altura devido à posição em que o sensor de velocidade está.

Tabela 5 – Velocidades médias das demais cidades.

Altura (m) e Cidade	Martins	Portalegre	São Miguel	Pau dos Ferros
10	4,80 m/s	4,74 m/s	4,76 m/s	2,62 m/s
50	7,00 m/s	6,91 m/s	6,96 m/s	3,08 m/s
75	7,56 m/s	7,46 m/s	7,52 m/s	3,30 m/s
100	7,95 m/s	7,85 m/s	7,91 m/s	3,45 m/s

Fonte: Autor.

Se for feito um comparativo com a paleta de cores da figura 10, podemos observar que as velocidades determinadas estão dentro do esperado.

Para essas cidades foram obtidos os seguintes fatores de forma, obtidos do atlas eólico.

Tabela 6 – Fatores de forma Weibull.

Martins	Portalegre	São Miguel	Pau dos Ferros
3,435	3,425	3,28	3,38

Fonte: Amarante (2003)

Também, através desses dados, é possível determinar o valor da função gama de maneira aproximada.

Tabela 7 – Função gama.

Martins	Portalegre	São Miguel	Pau dos Ferros
0,89	0,89	0,89	0,89

Fonte: Amarante (2003)

E por fim, utilizando os a função gama a cima, é possível o fator de escala utilizando a equação 17. Lembrando, que se utiliza a altura de 50 metros.

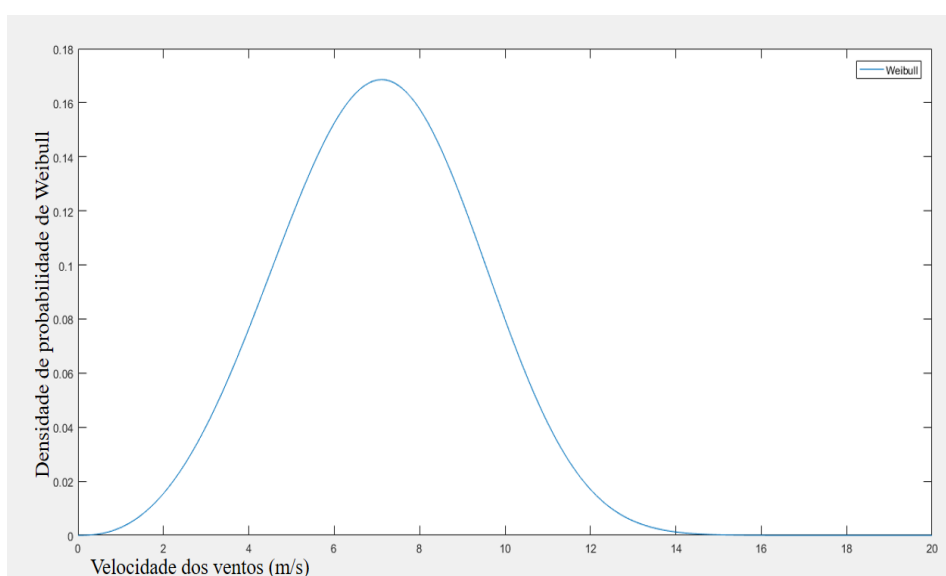
Tabela 8 – Fator de escala em metros por segundo.

Martins	Portalegre	São Miguel	Pau dos Ferros
7,86	7,76	7,82	3,46

Fonte: Amarante (2003)

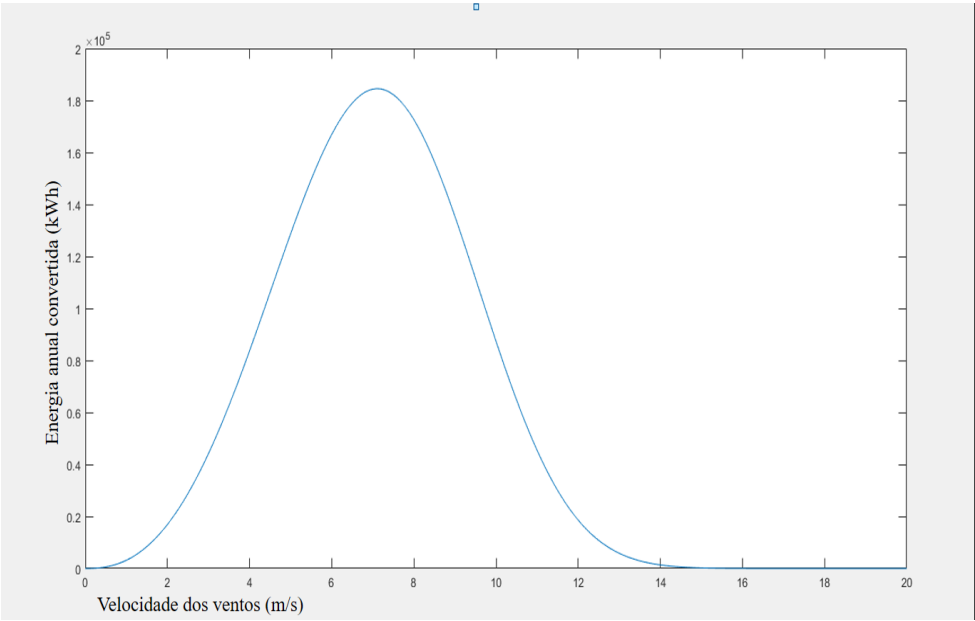
Agora, nos gráficos abaixo têm-se as distribuições de Weibull para cada cidade e os gráficos que representa a energia anual convertida para cada cidade.

Figura 17 – Distribuição de Weibull para a cidade de Martins.



Fonte: Autor

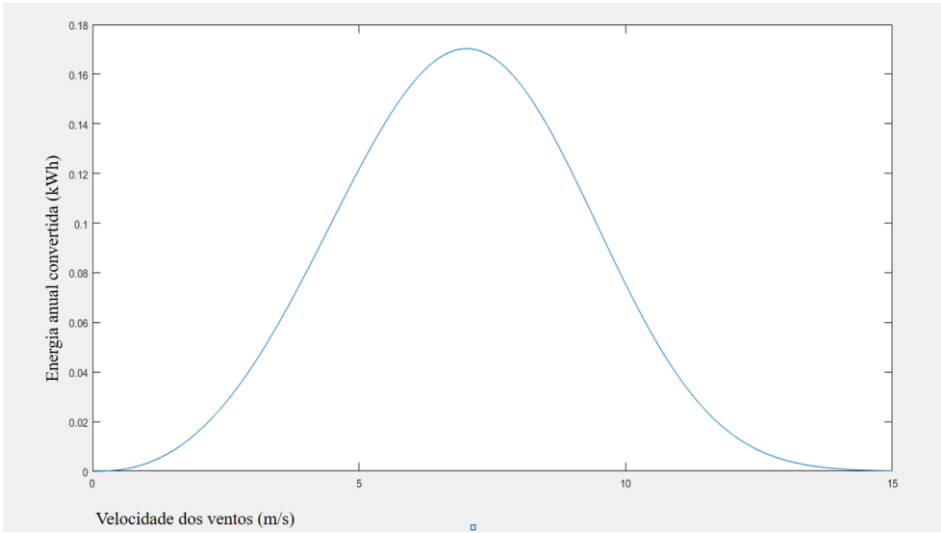
Figura 18 – Energia anual convertida para a cidade de Martins.



Fonte: Autor

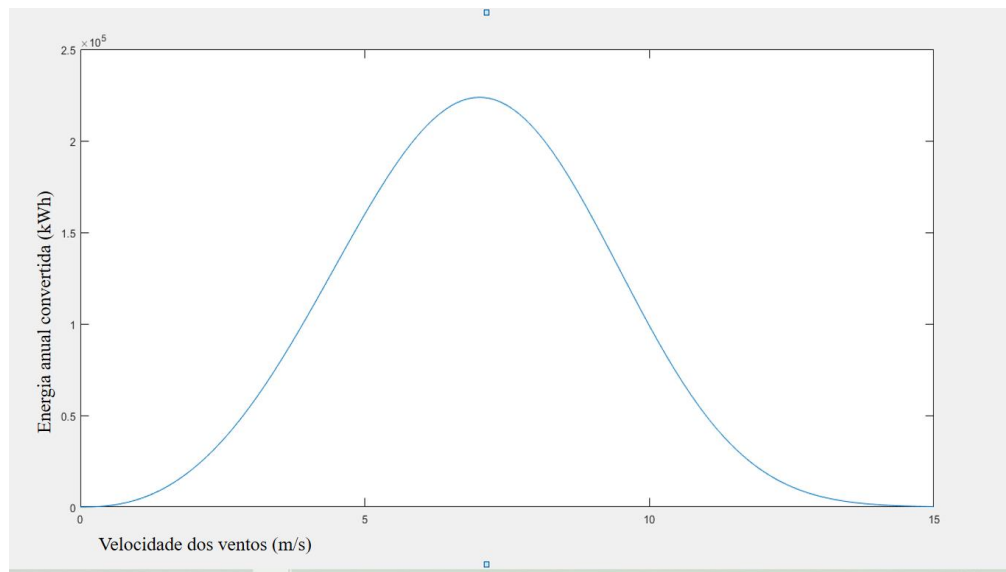
Para a cidade de Martins, a energia total convertida foi de $1,0297 \times 10^6$ kWh/ano.

Figura 19 - Distribuição de Weibull para a cidade de Portalegre.



Fonte: Autor

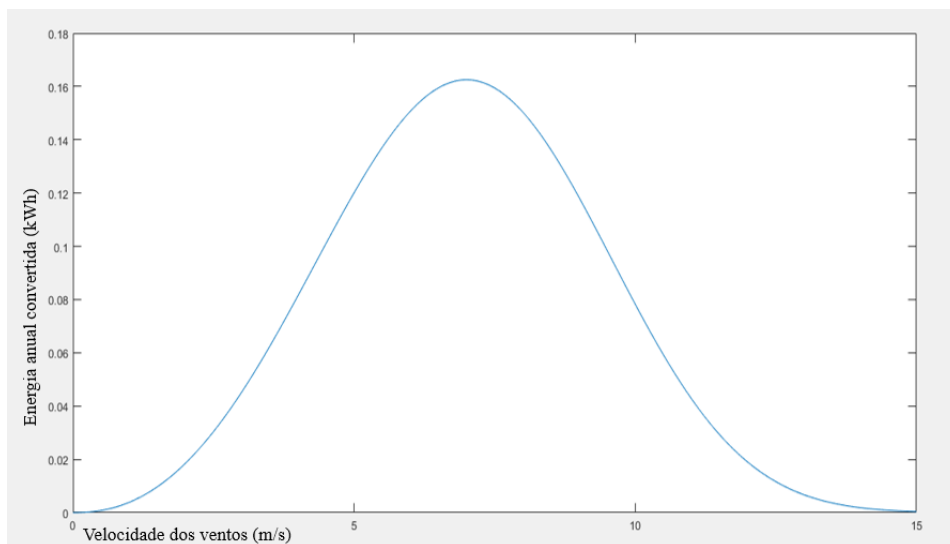
Figura 20 - Energia anual convertida para a cidade de Portalegre.



Fonte: Autor

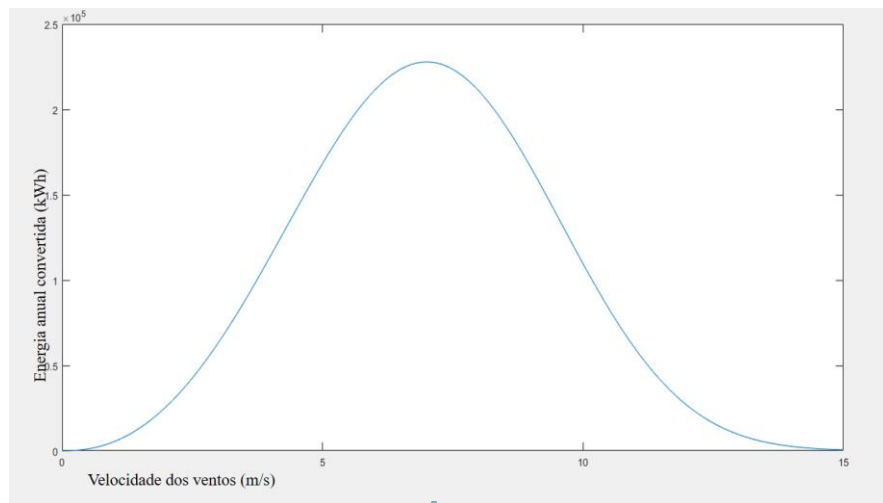
Para a cidade de Portalegre a energia total convertida foi de $1,286 \times 10^6$ kWh/ano.

Figura 21 – Distribuição de Weibull para a cidade de São Miguel



Fonte: Autor.

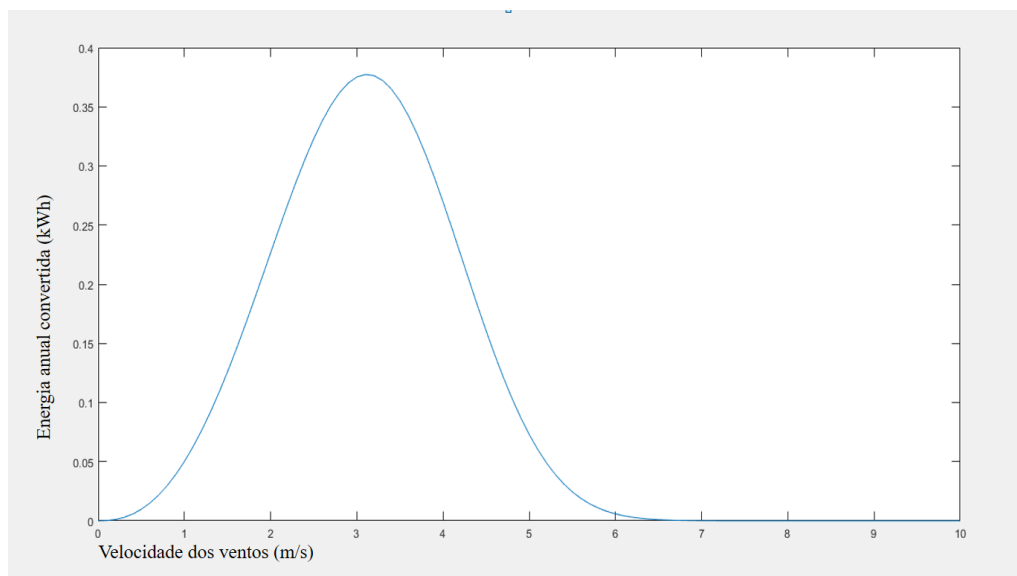
Figura 22 - Energia anual convertida para a cidade de São Miguel.



Fonte: Autor.

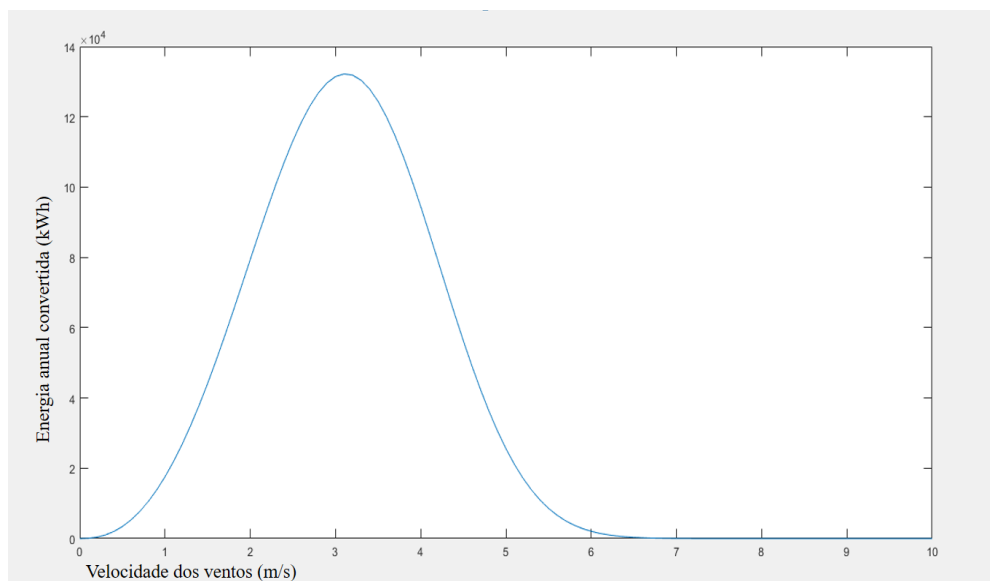
A energia total convertida para São Miguel é de $1,3687 \times 10^6$ kWh/ano.

Figura 23 - Distribuição de Weibull para a cidade de Pau dos Ferros.



Fonte: Autor.

Figura 24 - Energia anual convertida para a cidade de Pau dos Ferros.



Fonte: Autor

Tem-se que a energia total convertida para Pau dos Ferros é de $2,5 \times 10^5$ kWh/ano.

Tendo em vista os valores obtidos de energia para cada cidade, percebe-se que não é viável fazer aproximações de viabilidade para cidades próximas. Como por exemplo, no trabalho de conclusão de curso do engenheiro civil Giovanni Rêgo e Silva, onde nesse trabalho é realizado o dimensionamento de uma turbina eólica para uma residência em Pau dos Ferros, utilizando os dados da cidade de Apodi. Entretanto, como foi visto nos resultados, existe uma diferença de aproximadamente 21% da energia. Além disso, utilizando os dados da estação automática de Pau dos Ferros instalada na Universidade Federal Rural do Semi-Árido, é possível perceber um grande diferença entre as velocidades. Observe a tabela 9 que indica o comparativo entre os dados do INMETRO e a estação automática de Pau dos Ferros.

Tabela 9 – Comparativo Pau dos Ferros e Apodi.

	Rugosidade	V_{10} Novembro	V_{10} Outubro
Apodi	0,27	3,74	3,62
Pau dos Ferros	0,15	3,06	3,29
Erro	45%	18,06%	9,07%

Fonte: Autor.

O V_{10} significa a velocidade em mês especificado a 10 metros de altura. Lembrando que os dados obtidos foram a 2 metros de altura. Entretanto, para fazer o comparativo, é necessário usar a lei logarítmica para estimar a velocidade a altura de 10 metros. Observando a Tabela 8, percebe-se que existe um erro considerável em todos meses e também na rugosidade.

4 CONCLUSÕES

Por fim, este trabalho tratou dos dados de Apodi disponíveis no Instituto Nacional de Meteorologia de forma a obter os dados de outras cidades, a partir de equações matemáticas, tendo em vista que é esta a melhor forma de se obter dados de velocidades dos ventos em regiões que não possuem estações automáticas para detectar essas velocidades.

Também neste trabalho foi apresentado uma metodologia eficiente para determinar a energia convertida anualmente para qualquer cidade que possua uma estação próxima. Esta metodologia foi baseada em gráficos estatísticos e métodos de integração numérica onde obtemos resultados satisfatórios.

Além disso, foi notado que não é viável utilizar dados de cidades próximas sem fazer a correção, para estimar a energia total de outra cidade. Para isso é necessário primeiramente realizar um tratamento de dados baseado na lei logarítmica e na diferença de altitude das cidades para obter resultados mais satisfatórios.

Para concluir, pode-se dizer que não é viável a instalação de parques eólicos em Pau dos Ferros, em detrimento de sua localização geográfica. Tendo em vista que Pau dos Ferros se encontra em regiões entre serras, o vento nesta região não desenvolve potência suficiente. Entretanto, outras cidades como Martins e São Miguel são cidades com um potencial significativamente maior, possuindo melhores condições de receber um parque eólico.

REFERÊNCIAS

ALDABÓ, Ricardo. **ENERGIA EÓLICA**. São Paulo: Artliber Editora, 2012.

AMARANTE, Odilon A. Camargo do; SILVA, Fabiano de Jesus Lima da; RIOS FILHO, Luiz Gonzaga. **Potencial Eólico do Estado do Rio Grande**. Natal: 2003. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/atlas_eolico_RN.pdf. Acesso em: 19 dez. 2019.

ANEEL. **Agencia Nacional de Energia elétrica**. Disponível em: <https://tecnoblog.net/247956/referencia-site-abnt-artigos/>. Acesso em: 11 Dez. 2019.
BILOTI, Ricardo. **Integração numérica**. Campinas: 2019.

CASTRO, Rui M.g.. **Energias Renováveis e Produção Descentralizada**. Iguatu: Person, 2005. Disponível em: http://esa.ipb.pt/~jpmc/ArquivoEA/Eolica_ed2p1.pdf. Acesso em: 5 Dez. 2019.

CUNHA, Eduardo. ASPECTOS HISTÓRICOS DA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL E NO MUNDO. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/65759/38008>. Acesso em: 12 Dez. 2019.

David, HALLIDAY,, RESNICK, Robert, WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física - Vol. 3 - Eletromagnetismo, 10ª edição**. LTC, 06/2016. VitalBook file

DINIZ, Tiago. **EXPANSÃO DA INDÚSTRIA DE GERAÇÃO EÓLICA NO BRASIL: UMA ANÁLISE À LUZ DA NOVA ECONOMIA DAS INSTITUIÇÕES**. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/ppp/index.php/PPP/article/view/864>. Acesso em: 10 Dez. 2019.

ENERGIA LATERAL. **Aerogeradores industriais**. Disponível em: <https://energialateral.pt/aerogeradores-industriais.html> . Acesso em: 9 Dez. 2019.
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico**. Rio Grande do Norte. 2019.

INMETRO. Disponível em: <http://www4.inmetro.gov.br/>. Acesso em: 1 Dez. 2019.

KASPARY, Rosane Maria; JUNG, Carlos Fernando. **ENERGIA EÓLICA NO BRASIL: UMA ANÁLISE DAS VANTAGENS E DESVANTAGENS**. 2015.

MAIA, Thales Alexandre Carvalho. **Projeto e Construção de um Gerador a Ímãs Permanentes de Fluxo Axial para Turbina Eólica de Pequena Potência**. 2011.

NASCIMENTO, Luciano. **Brasil é o oitavo país do mundo em produção de energia eólica.** 2018. Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2018-02/brasil-e-o-oitavo-pais-do-mundo-em-producao-de-energia-eolica>. Acesso em: 12 dez. 2019.

OHARA, Flávia Megumi. **ANÁLISE DINÂMICA DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO**

ELETROMECAÂNICA DE UMA TURBINA EÓLICA. Brasília: 2014.

OZAWA, Maurilio Takeshi. **Aplicação de parâmetros da distribuição de Weibull na análise do potencial energético de um microgerador eólico em cidades do estado do Paraná.** 2017. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8448/1/PG_COELE_2017_2_13.pdf. Acesso em: 4 dez. 2019

PICOLO, Ana Paula; BÜHLER, Alexandre J.; RAMPINELLI, Giuliano Arns. **Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica.** 2014.

PORTILHO, Gabriela. Quanto tempo vai durar o petróleo no mundo?. **Super Interessante.** Disponível em: <https://super.abril.com.br/mundo-estranho/quanto-tempo-vai-durar-o-petroleo-no-mundo/> . Acesso em: 19 jan. 2020.

SILVA, Giovanni Rêgo e. **ENERGIA EÓLICA E SOLAR: ESTUDO COMPARATIVO.** Pau dos Ferros:2018.

TAVEIROS, Filipe Emanuel Vieira. **Sistema de Conversão de Energia Eólica Baseado no Gerador de Indução Duplamente Alimentado: Análise e Contribuição ao Controle da Máquina.** Natal: 2014.

WENZEL, Guilherme München. **PROJETO AERODINÂMICO DE PÁS DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL.** , 2007. Disponível em: <http://revistaseletronicas.pucrs.br/ojs/index.php/graduacao/article/viewFile/3490/2738>. Acesso em: 3 Dez. 2019.

