



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

João Hugo Cadeira Brandão ¹
Wesley de Oliveira Santos ²
Sharon Dantas da Cunha ³

RESUMO

A energia eólica tem se destacado no cenário mundial de produção de energia elétrica. Para instalar uma turbina ou parque eólico em uma determinada região é necessário dispor de dados de velocidade dos ventos durante um ano e estimar a potência elétrica que pode ser gerada. Em algumas localizações existem estações automáticas interligadas ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). O problema é que algumas cidades não possuem dados da velocidade dos ventos, e uma alternativa é extrapolar a velocidade do vento usando dados de cidades próximas. Foi desenvolvida uma metodologia para a obtenção das velocidades do vento levando em conta os dados da cidade mais próxima, considerando a diferença de altitude entre as cidades, quantas não apresentam barreiras naturais entre elas. Através dos dados da estação meteorológica de Apodi, e com os parâmetros presentes no Atlas eólico do Rio Grande do Norte, foi possível determinar uma curva probabilística das velocidades dos ventos, conhecida pela distribuição de Weibull. Com esta distribuição e a curva de potência do gerador foi possível obter a curva de energia convertida pela turbina, e assim a energia total convertida em um ano.

Palavras-chave: energia eólica, estação meteorológica, velocidade do vento.

INTRODUÇÃO

O final do século XIX foi marcado pela Revolução Industrial que possibilitou vários tipos de tecnologia, transformando o mundo no que é conhecido nos dias de hoje. Esta fase também é caracterizada por um grande aumento no uso de combustíveis fósseis para a geração da energia elétrica necessária para o funcionamento das máquinas. Apesar de ainda ser bastante utilizado, os combustíveis fósseis, como os derivados do petróleo e carvão mineral, podem se esgotar em aproximadamente 40 anos (Portilho, 2018).

Com o desenvolvimento tecnológico foi observado um aumento no consumo de energia elétrica nas residências e indústrias, e como consequência, várias formas de se obter energia foram descobertas. A expansão das usinas elétricas com fontes mais limpas de energia, só surgiu na década de 70 com a crise do petróleo (CUNHA, 2017). Por exemplo, as usinas hidrelétricas fornecem a grande maioria da energia elétrica usada no Brasil, porém

¹ Graduando do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, joaohugocb@gmail.com;

² Professor Doutor, Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, wesley.santos@ufersa.edu.br;

³ Professor Orientador, Doutor, Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, sharondantas@ufersa.edu.br;



modifica a fauna e flora, modificando o curso natural dos rios e necessita de uma grande área alagada. Segundo Ricardo Aldabó (2012), umas das formas mais limpas de obter energia elétrica é através de turbinas eólicas, devido à agressividade mínima que esse tipo de aparato causa ao meio ambiente. Além disso, o tempo para a instalação de parques eólicos é muito menor que o de uma usina hidrelétrica.

A produção de energia eólica no Brasil é algo bem recente, sendo a primeira usina eólica instalada no Brasil no arquipélago de Fernando de Noronha em Pernambuco em 1992. Porém, essa tecnologia existe desde 1957, e só foi incentivado quando o Brasil passou por um racionamento de energia no ano de 2001. Nesse contexto, a energia eólica teve uma grande expansão, aumentando a capacidade produtiva de 27,1 MW em 2005 para 10.740 MW em 2016, representando cerca de 7,1% de toda energia produzida no Brasil (DINIZ, 2018).

A escolha do local para a instalação de um aerogerador é feita com um estudo de viabilidade que usa uma curva probabilística para estimar a potência total obtida por uma turbina eólica com parâmetros predeterminados durante um ano. Este trabalho tem como objetivo estimar o potencial eólico das cidades de Apodi, Pau dos Ferros, Martins, Portalegre e São Miguel, através de uma metodologia que usa os dados de uma estação Meteorológica próxima.

METODOLOGIA

Devido ao aumento no consumo de energia, e a crescente uso de fontes renováveis, a energia eólica tem se destacado no quadro mundial de produção de energia elétrica. A escolha do local é muito importante, pois é possível estimar a energia produzida durante um ano, e assim prever o tempo de amortização do investimento.

Este trabalho é uma pesquisa probabilístico, que consiste na organização e observação de dados pré-existentes, com o objetivo de estimar o potencial eólico de alguns municípios do Oeste Potiguar. Os municípios escolhidos foram os localizados em regiões serranas, como Martins, Portalegre e São Miguel, e cidades polos como Pau dos Ferros e Apodi. Essas cidades possuem respectivamente 8218, 22157, 7867, 36323 e 27745 habitantes (IBGE, 2019). Para obter o potencial eólico de uma região será apresentado a metodologia proposta pelo Atlas Eólico do Rio do Grande do Norte (Amarante, 2003), e os parâmetros necessários, como rugosidade e fator de forma, também serão retirados do atlas. Já os dados da velocidade para a cidade de Apodi serão obtidos através do Instituto de Meteorologia (INMET).



REFERENCIAL TEÓRICO

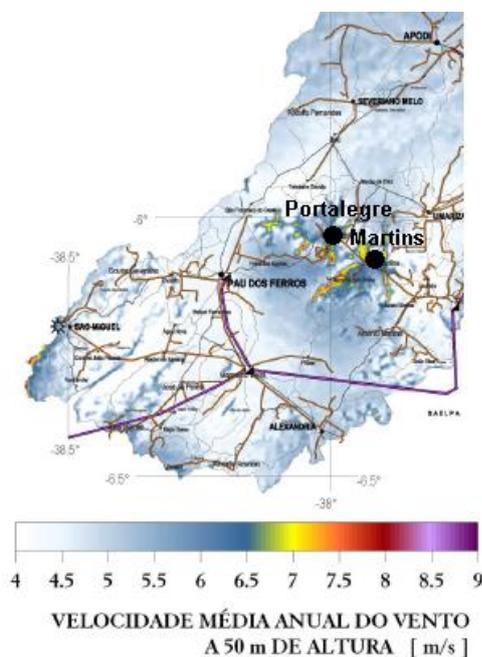
Para calcular o potencial eólico é necessário conhecer a velocidade da região estudada, bem como o comportamento com a altitude em relação ao solo. A velocidade do vento se comporta de maneira logarítmica, como apresentado na equação 1 (CASTRO, 2005).

$$v = v_{ref} \cdot \frac{\log\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\log\left(\frac{h_1}{z_0}\right)} \quad (1)$$

onde v é a velocidade estimada, v_{ref} é a velocidade medida numa altura de referência, h_2 altura que se deseja estimar o valor da velocidade v , h_1 altura que foi medido o v_{ref} , e z_0 é a rugosidade do terreno. As unidades de velocidade são em m/s, e das alturas e rugosidade, em metros. A rugosidade do terreno utilizada neste trabalho foi obtida do Atlas Eólico através do seu código de cores, e a altura de referência é 10 m, que é a altura de instalação das estações meteorológicas do INMET. (INMET, 2011)

A figura 1 mostra a ampliação da figura da página 35 do atlas eólico, mostrando a região que será estudada neste trabalho, e código de cores representa a velocidade a 50 m de altura.

Figura 1: Região de interesse que será estudada neste trabalho.



Fonte: Adaptada de Amarante, 2003.

Como o Atlas foi publicado no ano de 2003 é necessário obter dados mais recentes em relação a velocidade média anual. Porém, somente a cidade de Apodi possui estação



meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), e os dados de velocidade, para isso será usado uma metodologia para obter a velocidade média nas cidades estudadas como será descrito na próxima seção.

O próximo passo é obter a distribuição de Weibull que determina a distribuição de velocidade dos ventos, como pode ser visto na equação 2 (OZAWA, 2017):

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

onde v é a velocidade média, obtida da equação 1, k é o fator de forma, e c , o fator de escala, dado pela equação 3, ambos em m/s.

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (3)$$

onde Γ é a função gama, \bar{v} a velocidade média, e σ , o desvio padrão da velocidade. Valores de k próximo de um, indica regime de vento variável, e maior que três, regime de vento estável. (ACUNHA, 2006)

A energia anual convertida numa região é dada pela equação 4 (Silva, 2018):

$$E_c(v) = f(v) \cdot t \cdot P(v) \quad (4)$$

onde $f(v)$ é a densidade de probabilidade Weibull, t é o número de horas do período considerado (no projeto, 1 ano, 8760 horas), e $P(v)$ é obtida através da curva de potência do aerogerador em W.

A energia média anual é obtida através de integração numérica da equação 5, nos limites de velocidade mínimas e máximas de acionamento e desligamento do aerogerador respectivamente:

$$E_{tc} = \int_{v_{min}}^{v_{max}} dE_c(v) \quad (5)$$

onde v_{min} é a velocidade mínima de trabalho do aerogerador, também chamado de “cut-in”, e v_{max} , a velocidade máxima, também chamada “cut-out”.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

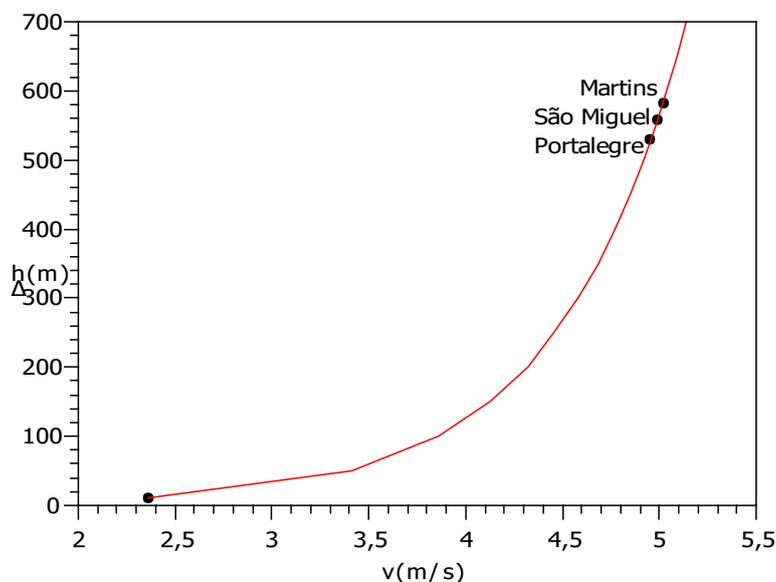
A quantidade de energia média anual é um parâmetro importante para estimar o tempo de amortização do investimento na instalação de um aerogerador. Como foi comentado o atlas eólico é do ano de 2003, e este trabalho utilizará do atlas o valor da rugosidade, e do fator de



forma a uma altitude de 50 m. A velocidade para a cidade de Apodi será obtida através do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados de velocidade foram coletados para a cidade de Apodi para o ano de 2019. De acordo com a nota técnica número 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET do INMET, os sensores são instalados a 10 de metros de altura. A velocidades média e desvio padrão anual são respectivamente, 2,36 e 1,35 m/s.

As cidades de Pau dos ferros, Portalegre, São Miguel e Martins não possuem estações estação meteorológicas. Para as cidades serranas Portalegre, São Miguel e Martins será utilizado uma metodologia que leva em conta o desnível (diferença de altitude) entre Apodi e a cidade a ser analisada, e assim obter a velocidade de referência através da equação 1, para altitude de 10 m (valor de referência). O argumento para utilizar esta metodologia é que não existe barreiras, desconsiderando as perdas da velocidade do vento de Apodi até as cidades. Também foi desconsiderado a direção predominante do vento a partir da cidade de Apodi. A figura 2 mostra o comportamento da variação da altitude das cidades serranas em relação a Apodi

Figura 2: Variação da altitude para as cidades serranas em relação a cidade de Apodi versus velocidade na altitude de 10 m.



Fonte: Autor, 2020.

Já a cidade de Pau dos Ferros como está entre serras, será considerado a velocidade da estação mais próxima que é a de Apodi. A tabela 1 apresenta as velocidades para diferentes alturas para as cidades analisadas neste trabalho.



Tabela 1 – Velocidades para diferentes altitudes para a cidade de Apodi, e extrapolações para 10 m, e demais altitudes para as cidades de Pau dos Ferros, Portalegre, São Miguel e Martins.

Altitude (m)	Apodi	Pau dos Ferros ⁴	Portalegre	São Miguel	Martins
10	2,36	2,36	4,88	4,92	4,95
25	2,96	2,87	6,16	6,21	6,24
50	3,41	3,26	7,12	7,18	7,22
75	3,68	3,49	7,68	7,75	7,79
100	3,86	3,65	8,08	8,15	8,2

Fonte: Autor, 2020.

Outra variável importante no cálculo da energia é o fator de forma de Weibull, k. Esta variável foi obtida para altitude de 50 m do Atlas Eólico através da interpolação linear dos valores entre duas curvas de nível e a localização da cidade. A tabela 2 mostra a altitude, diferença de altitude (Δh = desnível entre as cidades +10m), fator de forma (k) e rugosidade das cidades analisadas.

Tabela 2: Altitude, Δh , fator de forma e rugosidade das cidades analisadas.

	Apodi	Pau dos Ferros	Portalegre	São Miguel	Martins
Altitude (m)	131 ⁵	193	650	679	703
Δh (m)	0	0	529	558	582
k (m/s)	3,480	3,380	3,425	3,280	3,435
Rugosidade (m)	0,27	0,15	0,30	0,30	0,30

Fonte: Autor, 2020.

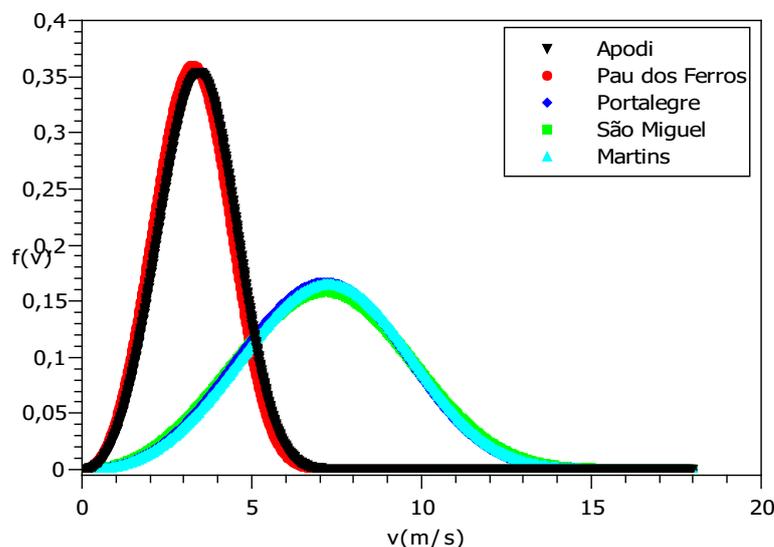
Com estes valores se obtém a distribuição de probabilidade das velocidades, distribuição de Weibull, através da equação 2. A figura 3 mostra as distribuições de Weibull, para as cidades de Apodi, Pau dos Ferros, Portalegre, São Miguel e Martins.

⁴ Os dados para a cidade de Pau dos Ferros serão os mesmos da cidade de Apodi.

⁵ Altitude obtida do site INMET



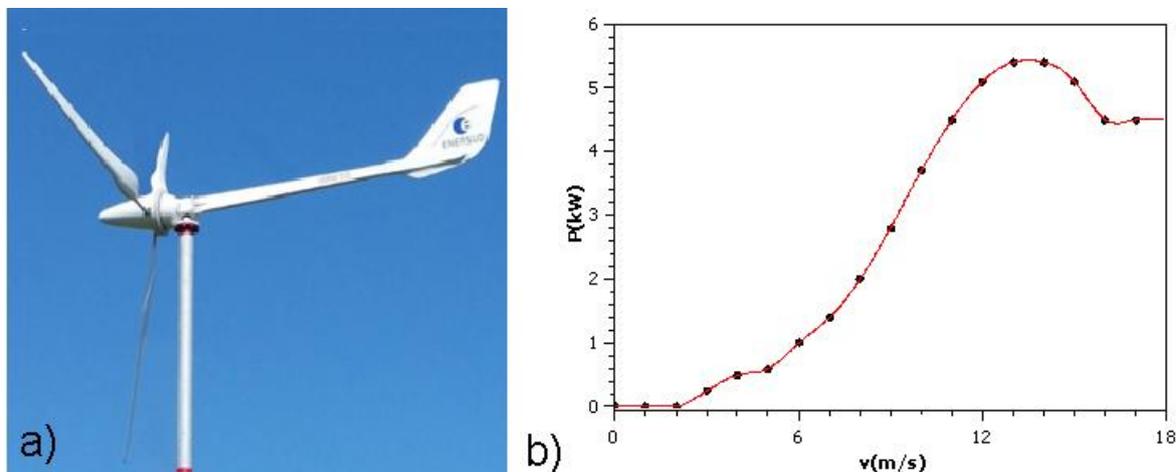
Figura 3: Distribuição de Weibull para as cidades de Pau dos Ferros, Portalegre, São Miguel e Martins.



Fonte: Autor, 2020.

Para calcular a energia gerada na cidade foi escolhido uma turbina eólica horizontal da fabricante ENERSUD, modelo VERNE 555 (figura 4 a)) com potência de 6 kW. A turbina será instalada numa altura de 50 m, e possui um diâmetro de 5,5 m, e segundo o fabricante, a turbina alcança a potência nominal quando atingir uma velocidade de 12,5 m/s, e começa a gerar à 2,2 m/s (“cut in”). Substituindo os valores, usando o valor da densidade do ar em Apodi igual à $1,17 \text{ kg/m}^3$, extraído do Atlas Eólico, obtém-se o valor de $C_p \sim 0,21$. A curva de potência desta turbina é apresentada na figura 4 b), onde os círculos são os dados e a linha vermelha foi obtida através da interpolação cúbica. (BARCELLOS, 2014)

Figura 4: a) Imagem do Aerogerador da fabricante ENERSUD, modelo VERNE 555, e sua curva de potência.

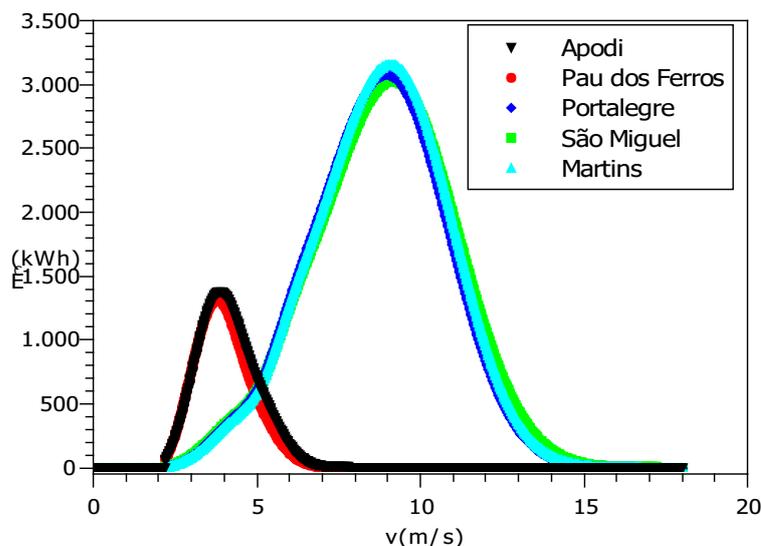


Fonte: a) Enersud. b) Autor, 2020



Para obter a energia anual convertida se utiliza a equação 4, com a distribuição da figura 3, e a curva de potência da figura 5 b), e o tempo de 8760 horas, que equivale a um ano. A figura 5 mostra o comportamento desta variável versus velocidade para as cidades de Apodi, Pau dos Ferros, Portalegre, São Miguel e Martins.

Figura 5: Energia anual convertida para a cidade de Pau dos Ferros, Portalegre, São Miguel e Martins.



Fonte: Autor, 2020.

Observe a similaridade das curvas para as cidades serranas. Através da integração da curva de energia se obtém a energia total convertida através do cálculo da área abaixo da curva (equação 6). Foi utilizado o método trapezoidal para integração desta curva, e os limites de integração são de 2,2 m/s até 18 m/s, “cut-on” e “cut-off” respectivamente do gerador.

A tabela 3 mostra os resultados da energia convertida anual obtida através da integração das curvas da figura 5, e a economia (E_{RS}) obtida através da energia gerada para as cidades estudadas neste trabalho. Para isso foi considerado o valor de R\$ 0,70197 por kwh cobrado pela concessionária NEOENERGIA para o consumidor “Consumo Ativo Intermediário - Tarifa Branca”. (COSERN)



Tabela 3: Energia anual convertida, e a economia gerada considerando o valor de kWh cobrado pela concessionária.

	Apodi	Pau dos Ferros	Portalegre	São Miguel	Martins
ETC(kWh/ano)	2968,89	2701,98	15820,11	16296,08	16330,29
ER\$ (R\$)	2084,07	1896,71	11105,24	11439,36	11463,37

Fonte: Autor, 2020.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou as etapas do cálculo do potencial eólico de uma região. A dificuldade existente em alguns casos é a falta de dados da velocidade anual, apesar do atlas eólico fornecer valores aproximados, foi necessário valores de velocidade média anual dos ventos para a região/cidade a ser analisada para melhorar a estimativa dos dados.

O valor da velocidade média dos ventos obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia para a cidade de Apodi foi utilizado obter a velocidade para as cidades serranas do alto oeste potiguar (Portalegre, São Miguel e Martins), que não possuíam estações meteorológicas, através do desnível entre estas cidades na relação logarítmica. Como não existe barreiras naturais entre Apodi e essas cidades, a metodologia pode ser tornar uma alternativa para a estimativa da energia produzida. Como a cidade de Pau dos Ferros não possuía dados para o ano todo, e está entre serras, foi utilizado os dados da cidade de Apodi.

No cálculo da energia convertida para as cidades estudadas, foi observado que os potenciais eólicos das cidades serranas são bem próximos, pois possuem diferenças de altitude de no máximo 53 m, e são fortes candidatas para a instalação do aerogerador comercial escolhido. As cidades de Apodi e Pau dos Ferros não possuem um bom potencial eólico. Utilizando a velocidade média de Apodi na cidade de Pau dos Ferros, e considerando que a velocidade é aproximadamente 14,22% menor, segundo os dados de dois meses medidos, a energia convertida é 31% menor, não sendo interessante utilizar velocidade de estações próximas em cidades com características de relevo como Pau dos Ferros, ou seja, entre serras.

REFERÊNCIAS

ACUNHA. e col. **Análise do desempenho de um aerogerador de pequeno porte.** 2006 Disponível em: <https://semengo.furg.br/images/2006/06.pdf>. Acesso em: 16 de set. 2020.



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.

BARCELOS, Silvana Nunes. **AVALIAÇÃO DE POTENCIAL EÓLICO PARA AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE – REGIÃO DE ESTUDO: ESPÍRITO SANTO**. 2014. Disponível em: http://www.engenhariamecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2014-2_silvana_nunes_barcellos.pdf. Acesso em 12 de set. 2020.

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.

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.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico**. Rio Grande do Norte. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **NOTA TÉCNICA No. 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET: Rede de Estações Meteorológicas Automáticas do INMET**. 2011.

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

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.

TABELA DE TARIFAS DE ENERGIA ELÉTRICA. 2020. Disponível em:

[http://servicos.cosern.com.br/residencial-rural/Documents/tarifa-](http://servicos.cosern.com.br/residencial-rural/Documents/tarifa-2020/COSERN_TARIFAS_DE_ENERGIA_ELETRICA_JULHO_2020_%20REH_N_2.677_Grupo_B.pdf)

[2020/COSERN_TARIFAS_DE_ENERGIA_ELETRICA_JULHO_2020_%20REH_N_2.677](http://servicos.cosern.com.br/residencial-rural/Documents/tarifa-2020/COSERN_TARIFAS_DE_ENERGIA_ELETRICA_JULHO_2020_%20REH_N_2.677_Grupo_B.pdf)

[_Grupo_B.pdf](http://servicos.cosern.com.br/residencial-rural/Documents/tarifa-2020/COSERN_TARIFAS_DE_ENERGIA_ELETRICA_JULHO_2020_%20REH_N_2.677_Grupo_B.pdf). Acesso em: 13 de set. 2020.

TURBINA EÓLICA VERNE 555. Disponível em:

<http://www.enersud.com.br/produtos/turbina-eolica-verne-555/>. Acesso em: 15 de set 2020.