

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS GUARAPUAVA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL**

João Victor Corrêa Girardi

**ANÁLISE DA POTENCIALIDADE EÓLICA DA REGIÃO DE
GUARAPUAVA - PR**

Guarapuava
Julho 2019

JOÃO VICTOR CORRÊA GIRARDI

**ANÁLISE DA POTENCIALIDADE EÓLICA DA REGIÃO DE
GUARAPUAVA - PR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação de Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Guarapuava,
como parte dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Civil.

Orientador: Dyorgge Alves Silva

Guarapuava
Julho 2019

JOÃO VICTOR CORRÊA GIRARDI

ANÁLISE DA POTENCIALIDADE EÓLICA DA REGIÃO DE GUARAPUAVA – PR.

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Petrônio Rodrigo Mello Montezuma da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Guarapuava, Julho de 2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dyorgge Alves Silva (UTFPR) - Orientador
Msc. Universidade de Brasília

Prof. Marcelo Henrique Granza (UTFPR)
Msc. Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Rodrigo Scoczynski Ribeiro (UTFPR)
Msc. Universidade Tecnológica Federal do Paraná

AGRADECIMENTOS

Agradeço sinceramente a todas as pessoas que despenderam esforços para me auxiliar durante todos estes anos para que eu pudesse chegar até o final. Agradeço especialmente a todos que me auxiliaram na produção deste projeto de pesquisa.

Agradeço a Deus, pela permissão de estar presente neste momento, de ter conseguido chegar até aqui, por ter sido a base de toda a minha caminhada, e por me abençoar de todas as formas possíveis.

Aos meus pais, que se esforçaram para dar a mim e aos meus irmãos a melhor educação possível ao longo dos anos, e se hoje estou aqui, é totalmente graças a vocês. Agradeço por todo o apoio, quando eu mesmo não acreditava que poderia dar certo e principalmente pelo amor.

Agradeço aos meus irmãos, Thales e Rafaella, por todo o apoio e carinho durante toda a nossa jornada de vida.

Agradeço a Jéssica, que está sendo o meu porto seguro desde o início da minha trajetória em Guarapuava, minha melhor amiga e companheira.

Agradeço a todos os meus amigos – que não irei citar para não correr o risco de esquecer alguém – por todo o apoio e camaradagem desde que vim para o Paraná, me ajudaram de todas as formas possíveis durante este tempo e eu nunca esquecerei.

Agradeço a todos os professores, que se esforçaram ao máximo para formar os melhores engenheiros possíveis, contribuindo para o nosso conhecimento com uma entrega louvável.

Agradeço ao meu orientador, por todo o auxílio na execução do trabalho, pela orientação e dedicação.

Agradeço a SIMEPAR, que cedeu os dados necessários para a realização desta pesquisa, sempre nos auxiliando de forma muito prestativa.

Agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná por me fornecer uma educação de qualidade e por me tornar um engenheiro.

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo do potencial eólico na região de Guarapuava – PR, abordando brevemente a história da utilização da energia eólica pelos seres humanos, conceitos teóricos e o panorama atual da energia eólica no país, sua importância na geração de energia elétrica e o potencial de crescimento desta modalidade. Para a realização dos cálculos foi utilizada a teoria relacionada a potência do vento, Lei de Betz e a distribuição de Weibull, para a uniformização dos histogramas do vento. Por meio dos dados de medição dos ventos, obtidos das estações meteorológicas da cidade de Guarapuava e do distrito de Entre Rios, realizou-se uma análise do potencial eólico, através da extrapolação das velocidades dos ventos, criação de histogramas dos ventos contendo a uniformização dada pela distribuição de Weibull e a porcentagem de vento obtida em cada velocidade durante um ano. Utilizando o histograma obtido juntamente com a curva de potência de um aerogerador foi possível realizar o cálculo do fator de capacidade da região utilizando aquele aerogerador, verificando-se assim a viabilidade de implantação de um parque eólico nas regiões estudadas.

Palavras-chave: Potencial eólico. Energia eólica. Aerogerador.

ABSTRACT

The present work presents a study of the wind potential in the Guarapuava - PR region, briefly discussing the history of the use of wind energy by humans, theoretical concepts and the current panorama of wind energy in the country, its importance in electric power generation and growth potential of this modality. The wind power theory, Betz's Law and Weibull's distribution were used to standardize wind histograms. Through wind data, obtained from the meteorological stations of the city of Guarapuava and the district of Entre Rios, an analysis of the wind potential was carried out by extrapolating the wind speeds, creating histograms of the winds containing the uniformity given by the Weibull distribution and the percentage of wind obtained at each speed during one year. Using the histogram obtained along with the power curve of a wind generator, it was possible to calculate the capacity factor of the region using that wind turbine, thus verifying the feasibility of implementing a wind farm in the regions studied.

Keywords: Wind potential. Wind energy. Wind turbine.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
1.1	DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	9
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	9
1.2.1	Objetivo principal.....	10
1.2.2	Objetivos Secundários.....	10
2	ENERGIA EÓLICA.....	11
2.1	HISTÓRIA DA ENERGIA EÓLICA.....	11
2.2	ENERGIA EÓLICA NO BRASIL.....	14
2.3	ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO.....	16
2.4	ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO DO PARANÁ.....	17
2.5	TIPOS DE AEROGERADORES.....	18
2.5.1	Rotor com eixo horizontal.....	18
2.5.2	Rotor com eixo vertical.....	19
2.6	PRINCIPAIS COMPONENTES DO SISTEMA EÓLICO.....	21
3	FUNDAMENTOS DO APROVEITAMENTO EÓLICO.....	22
3.1	POTÊNCIA DO VENTO.....	22
3.2	LEI DE BETZ.....	22
3.3	PERFIL DE VELOCIDADE DO VENTO.....	24
3.4	INTENSIDADE DE TURBULÊNCIA.....	26
3.5	ANÁLISE ESTÁTISTICA DO REGIME DOS VENTOS.....	27
3.5.1	DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DE WEIBULL.....	28
3.6	ENERGIA PRODUZIDA POR UMA TURBINA EÓLICA.....	30
3.7	FATOR DE CAPACIDADE.....	32
4	METODOLOGIA.....	33
4.1	OBTENÇÃO DOS DADOS.....	33
4.2	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	34
4.3	AEROGERADOR.....	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
5.1	CARACTERÍSTICAS DOS VENTOS.....	36
5.2	ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL.....	38
5.3	ENERGIA PRODUZIDA.....	40
6	CONCLUSÕES.....	42
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	43
8	REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

O primeiro registro histórico de cata-vento foi por volta do ano 200 A.C. na Pérsia, ainda que se suponha que desde 2000 a.c. ele substituíria a força motriz humana ou animal nas atividades rurais na China (DUTRA, 2001).

Durante o século XI, o sistema de cata-ventos chegou até a Europa. Embora houvesse baixa eficiência, esse sistema apresentou grande expansão devido suas vantagens no setor agrícola. No século XII aprimorou-se a tecnologia e essa ficou conhecida como moinho holandês, uma forma mais eficiente de obter energia cinética para as atividades desenvolvidas na época, principalmente em bombeamento de água, moagem de cereais, dentre outros (GAVINO, 2011).

A forma mais eficiente de se transformar energia cinética em energia eólica, para produção de eletricidade, foi através dos aerogeradores. A geração de energia elétrica por meio dos ventos surgiu no final do século XIX. Em 1976, a primeira turbina eólica comercial começou a abastecer uma rede elétrica, na Dinamarca (ALVES, 2010). O Brasil tem utilizado cata-ventos desde o final do século XIX, em fazendas e salinas, para o bombeamento de água. Todavia, o país começou a demonstrar interesse no setor eólico somente após a crise do petróleo em 1973, quando foram iniciados projetos voltados a fontes renováveis de energia. Sendo assim, nesse cenário, deu-se a largada para a pesquisa de aerogeradores nacionais (GAVINO, 2011).

Algumas regiões do Brasil, como a região sudeste e nordeste, encontram-se próximas a uma crise energética, devido ao fato da produção de energia elétrica no país estar quase que totalmente consumida (ARAÚJO, 2016). Segundo o autor, a crise está associada a pequena diversificação da matriz energética, sendo que mais de 60% da energia produzida é gerada através de recursos hídricos, a baixa reserva de água nos reservatórios de barragens que ocorrem durante alguns meses do ano, e devido às mudanças climáticas ocorridas nos últimos anos, diminuindo assim a produção de energia no setor hídrico, que é a maior fonte de energia elétrica do Brasil.

Dessa maneira, vale ressaltar a importância por buscar outras fontes renováveis de energia, as quais possuem menor taxa de impacto ambiental em relação as matrizes energéticas tradicionais atualmente no país (CATANEO; SCHNEIDER; SILVA, 2016).

Os grandes avanços obtidos na utilização de energia eólica no Brasil, nos últimos anos, são resultados da evolução das turbinas eólicas e do aumento da altura em que os aerogeradores são instalados, fatores que promovem maior aproveitamento das correntes de vento, conforme indica a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (LOPES, 2016). Segundo a autora, dados preliminares de um subprojeto realizado sobre energias renováveis indica que o potencial eólico brasileiro é de aproximadamente 880 GWh, sendo esse o quarto potencial eólico com maior capacidade de expansão existente no planeta.

Segundo o Balanço Energético Nacional de 2018, divulgado pelo Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2018), a energia eólica apresentou um grande crescimento de produção, indicando uma ampliação na geração elétrica de 5.050 GWh em 2012 para 42.373 GWh em 2017. Tais valores representam um avanço de 839% em 5 anos, aumentando assim a sua participação na matriz energética do país. Atualmente a capacidade instalada no país é de 12.283MWh, e quando comparado com LOPES (2016), pode-se dizer que apenas 1,40% do potencial total estimado é utilizado.

Nesse contexto, o trabalho irá avaliar a potencialidade eólica da região sul do país, especificamente na região de Guarapuava – PR, localizada no interior do estado do Paraná. Vale ressaltar a importância do local de estudo, uma vez que grande parte dos parques eólicos são localizados nas regiões litorâneas do país.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O presente trabalho delimita-se a analisar o potencial eólico na região de Guarapuava – PR, verificando a viabilidade da instalação de aerogeradores, sendo estes analisados de forma a se encontrar o aerogerador mais adequado para a região.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e serão apresentados nos próximos itens.

1.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é a análise do potencial eólico da região de Guarapuava – PR, para subsidiar estudos futuros de viabilidade de instalação de usinas eólicas na região.

1.2.2 Objetivos Secundários

Os objetivos secundários deste trabalho são:

- Identificar qual tipo de turbina eólica será melhor utilizada na região;
- Definir quais locais da região são mais propícios para receber uma usina eólica;
- Em caso de inviabilidade para instalação de uma usina eólica, verificar a possibilidade de utilização de energia eólica para atender comunidades isoladas.

2 ENERGIA EÓLICA

A força dos ventos vem sendo utilizada há milhares de anos, através de cata-ventos e moinhos, mas a geração de energia eólica pode ser considerada uma inovação recente. Desde a década de 1980, a energia eólica vem se desenvolvendo a larga escala, tudo isso ligado a necessidade de se obter energia limpa, diminuindo os danos ambientais no planeta (PINTO, 2013).

Segundo o autor, diante de um cenário onde a matriz energética mundial é composta em sua maioria por combustíveis fósseis, a energia eólica aparece como uma das opções de energia renovável que menos gera impacto ambiental e que mais cresce atualmente no Brasil.

2.1 HISTÓRIA DA ENERGIA EÓLICA

Os ventos são utilizados para gerar energia há séculos para produzir trabalho. Existiam várias formas de utilização dos ventos, sendo as duas mais famosas as velas para embarcações e os cata-ventos (DALMAZ, 2007).

Segundo o autor, os registros mais antigos de embarcações com velas encontram-se em hieróglifos egípcios, que utilizavam as velas como auxílio aos remos. As primeiras embarcações totalmente propulsadas por velas foram as dos fenícios, cerca de 1000A.C.

Em relação aos cata-ventos, o primeiro registro histórico de cata-ventos foi na Pérsia, cerca de 200A.C. Era um moinho de vento de eixo vertical e era utilizado para moer grãos e bombear água (DUTRA, 2001). A Figura 1 representa um modelo semelhante de moinho de vento, com cerca de 1000 anos, presente em Nashtifan, no Irã.

Figura 1 – Moinhos de vento de Nashtifan



(fonte: AMUSINGPLANET, 2014)

Este tipo de moinho de vento se expandiu pela Ásia nos séculos seguintes, e por mais que apresentassem uma baixa eficiência, eram extremamente úteis para a substituição da força motriz animal ou humana (DUTRA, 2001).

Através das cruzadas é que os cata-ventos chegaram até a Europa, durante o século XI. Acabaram sendo amplamente difundidos por alguns países como França, Holanda e Inglaterra. Por não obter uma eficiência muito grande, a busca por inovações na composição e característica do cata-vento foi grande, até que no século XII foi criado o moinho holandês (GAVINO, 2011).

Segundo o autor, o moinho holandês substituiu os cata-ventos de eixo vertical de uma forma muito veloz, visto que houve melhorias significativas nas pás e no eixo, o que facilitou a sua utilização para outras atividades, como a produção de óleos, a drenagem de terrenos e até fabricação de papel.

No século XIX, haviam mais de 20 mil moinhos apenas na Inglaterra, Holanda e Bélgica, o que demonstra a importância do sistema de moinhos para a região (DUTRA, 2001). Com a revolução industrial, a energia eólica acabou sendo colocada em segundo plano, em detrimento às recentes máquinas a vapor, alimentadas por combustíveis fósseis, que tinham uma eficiência energética maior, naquela época, em relação a energia eólica (DALMAZ, 2007).

No fim do século XIX, as primeiras turbinas eólicas começaram a ser desenvolvidas. A instalação da primeira turbina eólica é admitida ao norte americano Charles F. Brush, que em 1888 instalou na cidade de Cleveland, Ohio, uma turbina com 18 metros de altura, 144 pás e um rotor de eixo horizontal com diâmetro de 17 metros (DUTRA, 2001).

A turbina tinha um tubo metálico central de 36 cm que possibilitava o giro da estrutura, de forma a sempre acompanhar o vento. A potência da turbina era de 12kW em corrente contínua, o que permitia alimentar 350 lâmpadas incandescentes (GAVINO, 2011).

Segundo o autor, este invento foi o início de um novo paradigma no uso da energia eólica para a produção de energia elétrica. Além disso, países com pouca reserva de combustíveis fósseis e sem grandes rios para instalação de usinas hidrelétricas continuaram focando seus esforços para a evolução do sistema eólico.

O maior exemplo é a Dinamarca que criou um programa no final do século XIX visando o desenvolvimento dos aerogeradores e na década de 1920 já continham 120 modelos em operação, representando um grande avanço (DUTRA, 2001).

Poul La Cour é considerado o grande pioneiro dinamarquês no desenvolvimento das turbinas eólicas modernas, sendo que foi o primeiro pesquisador a utilizar pequenos túneis de vento para a realização de ensaios (DALMAZ, 2007).

Durante o início do século XX até a década de 1970, a energia eólica foi bastante utilizada para gerar energia elétrica para locais isolados, mas acabou perdendo a utilidade com o passar dos anos, devido a instalação de cabos até áreas mais afastadas (AMARANTE et al., 2001).

Em relação aos aerogeradores de grande escala, a Rússia foi o primeiro país a conseguir realizar a ligação de um aerogerador de corrente alternada e uma usina termelétrica de corrente contínua, no ano de 1931. Conhecido como Balaclava, a turbina possuía uma potência de 100kW. A Figura 2 mostra o Balaclava em funcionamento (DALMAZ, 2007).

Figura 2 – Aerogerador Balaclava



(fonte: SALOMÃO, 2015)

Já a primeira turbina eólica comercial, construída na Dinamarca, começou a transmissão de energia no ano de 1976, sendo um marco para a energia eólica, visto que a partir daquele

momento era possível realizar a integração da energia eólica com outros tipos de geração de energia elétrica (ALVES, 2010).

Uma grande parte dos investimentos em energia eólica haviam sido paralisados ou extintos com o preço baixo do petróleo após a segunda guerra mundial, mas com a crise do petróleo, originada pelas altas sucessivas do combustível, onde seu valor de mercado acabou se quadruplicando em cerca de 3 meses (DUTRA, 2001).

Segundo o autor, após essa crise, os países importadores de petróleo começaram a pensar em outras fontes de energia que pudessem substituir o petróleo, e nesse contexto a energia eólica acaba recebendo novamente diversos investimentos e pesquisas na área.

2.2 ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

Desde o século XIX o Brasil utiliza a energia eólica através de moinhos de vento para bombeamento de água e moagem de grãos, mas sua utilização como energia elétrica é bem recente, sendo que a primeira turbina eólica instalada em território brasileiro foi em Fernando de Noronha, no ano de 1992, conforme é mostrado na Figura 3 (GAVINO, 2011).

Figura 3 – Primeiro aerogerador de Fernando de Noronha



(fonte: ANEEL, 2002)

No início do século XXI, o Brasil atravessou uma grave crise energética, que acabou resultando na crise do apagão de 2001. Após esse evento, o governo começou a investir mais na oferta de energia elétrica, através de fontes alternativas, como as fontes solares, eólicas, de biomassa e gás. Em relação a energia eólica, o governo federal criou dois projetos: Programa Emergencial de Energia Eólica (PROEÓLICA) e o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) (GAVINO, 2011).

O primeiro foi criado logo após a crise energética, com o objetivo de implementar 1500MW de energia eólica até 2003, o que acabou não ocorrendo, mas pelo menos possibilitou a entrada de empresas atuantes no setor de energia eólica, fazendo com o interesse pelo setor eólico aumentasse no país (ALVES, 2010).

Já o PROINFA foi criado em 2002, como uma forma de aumentar a participação das fontes eólicas, de biomassa e as pequenas centrais hidrelétricas (PCH), e obteve um sucesso maior, visto que a meta de que as fontes renováveis tivessem uma participação de 10% no Sistema Integrado Nacional (SIN) em 20 anos já foi atingida, sendo que apenas a energia eólica teve cerca de 11,5% de participação no SIN em agosto de 2018, de acordo com a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) (BRASIL, 2018b).

A matriz energética brasileira, se comparada a matriz energética mundial, é uma das mais limpas e com maior presença de energias renováveis, que engloba a energia eólica. Os últimos indicadores do Ministério de Minas e Energias (BRASIL, 2017), indicam que 43,8% da matriz energética brasileira é proveniente de fontes renováveis, contra 13,7% da média mundial. Se compararmos apenas as matrizes elétricas, o Brasil se destaca ainda mais, com cerca de 80,4% da matriz elétrica sendo proveniente de fontes renováveis, enquanto que a média mundial é de 24%.

Mesmo com estes valores, o Brasil precisa se preocupar na diversificação da sua matriz elétrica, pois mais de 60% é constituída por hidrelétricas, que variam sua produção de acordo com a precipitação. Neste ponto a energia eólica tem uma vantagem considerável, pois estudos indicam que os meses com pouca chuva são justamente os que mais ventam, podendo assim contribuir para que o país possa planejar melhor a sua operacionalidade e distribuição no setor elétrico (DALMAZ, 2007).

A usina eólica do Morro do Camelinho, localizada em Gouveia - MG, foi a primeira usina a ser instalada no país, em 1994, dois anos após a instalação da primeira turbina eólica, em Fernando de Noronha. Esta instalação foi um marco para o país e deu início a utilização do vento para geração de energia elétrica em grande escala (DUTRA, 2001); (DALMAZ, 2007); (ALDABÓ, 2012).

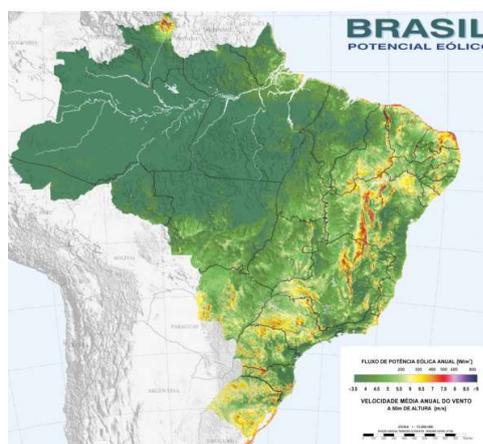
2.3 ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO

O atlas do potencial eólico brasileiro foi criado em 2001, por uma necessidade de se obter dados confiáveis para o conhecimento do regime de ventos em todo o território brasileiro. O atlas foi desenvolvido através do software de modelagem numérica dos ventos chamado MesoMap. (AMARANTE et al., 2001)

Segundo o autor foram utilizados dados obtidos de 1983 até 1999 e foram consideradas as características de cada localidade, como terreno, vegetação, uso do solo, entre outros fatores. Além disso considera os efeitos climatológicos, que acabam interferindo no tempo útil de produção do aerogerador.

As simulações feitas para a obtenção do atlas foram reproduzidas em mapas com escalas de cores, onde é representado o regime de ventos para a altura determinada de 50 metros, conforme é mostrado na Figura 4. O atlas registrou um potencial eólico de 143 GW de capacidade instalada.

Figura 4 – Atlas do potencial eólico brasileiro



(fonte: AMARANTE et al., 2001)

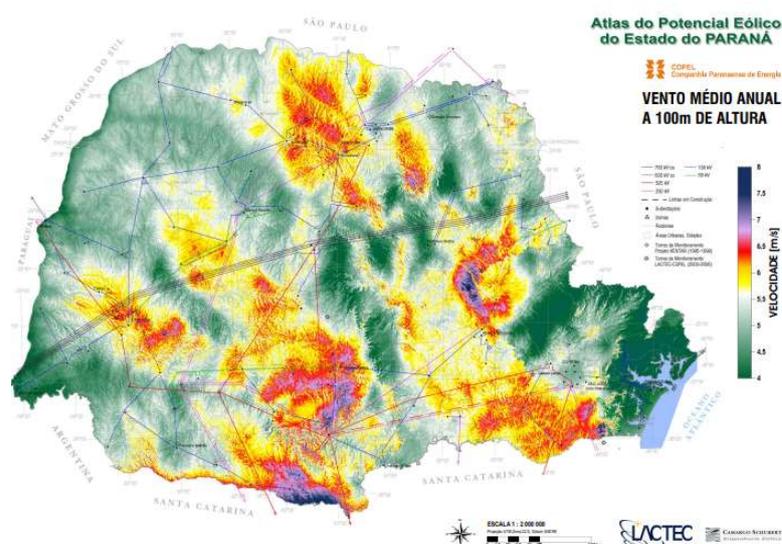
O Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), em 2013, criou um novo atlas do potencial eólico brasileiro, em parceria com o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). Foram analisados regimes de ventos em diversas alturas, variando de 30 a 200 metros de altura. Com essas simulações foi possível aumentar a estimativa do potencial eólico brasileiro, que no primeiro atlas foi estimado apenas para a altura de 50 metros. Este atlas está disponível de forma online, através do site da CEPEL (CEPEL, 2013).

2.4 ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO DO PARANÁ

O atlas do potencial eólico do Paraná foi criado em 2007, através de uma parceria entre a Companhia Paranaense de Energia e empresas privadas, com o objetivo de estimar possíveis locais com possibilidades de potenciais suficientes para a instalação de usinas eólicas de grande porte, como já havia ocorrido em 1999, quando a COPEL instalou 2,5 MW na usina eólica de Palmas (AMARANTE; SCHULTZ, 2007).

Foram realizadas simulações de 50, 75 e 100 metros e indicadas em mapas com escalas de cores, representando o regime de ventos conforme a respectiva altura. A Figura 5 mostra o mapa do potencial eólico do estado do Paraná (AMARANTE; SCHULTZ, 2007).

Figura 5 – Atlas do potencial eólico do estado do Paraná



(fonte: AMARANTE; SHULTZ, 2007)

2.5 TIPOS DE AEROGERADORES

Os aerogeradores são divididos pela característica do eixo do rotor. Podem ser com rotor de eixo horizontal ou rotor de eixo vertical. Cada tipo de aerogerador tem suas características próprias, conforme será descrito mais abaixo. Os aerogeradores mais utilizados atualmente são os com rotor de eixo horizontal, devido principalmente à altura que podem ser instalados, muito superior aos de eixo vertical.

2.5.1 Rotor com eixo horizontal

As turbinas eólicas de rotores com eixo horizontal são as mais utilizadas no comércio de energia eólica. Elas são baseadas nos moinhos de ventos holandês, e podem ser caracterizadas de duas formas: tipo hélice, variando de uma a três pás ou tipo multipás, com uma quantidade de pás muito maior que o tipo hélice (MÜLLER, 2015).

Segundo o autor, o tipo hélice é o modelo mais convencional na geração de energia eólica, sendo as turbinas multipás mais utilizadas para o bombeamento de água. Os aerogeradores de eixo horizontal tem como vantagens um rendimento aerodinâmico maior e suportam mais os esforços mecânicos do que os aerogeradores de eixo vertical.

A principal desvantagem deste tipo de turbina é a direção das pás em relação ao vento, que obrigatoriamente deve estar orientada de acordo com a direção do vento, enquanto que nos aerogeradores de eixo vertical esta preocupação não é necessária (ARAUJO, 2015).

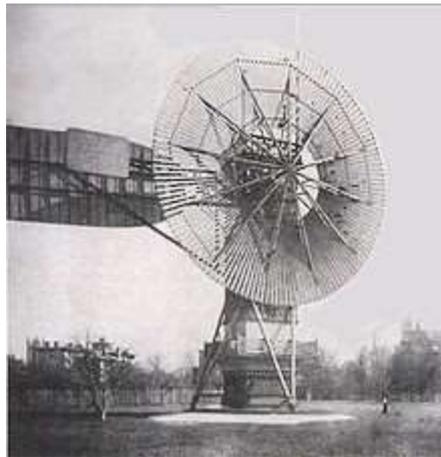
Além disso, outros aspectos importantes a serem mencionados são a instalação do rotor no topo da torre, para auxiliar na estabilidade do aerogerador, a altura da torre e o diâmetro, sendo este o responsável pela potência gerada pelo aerogerador (SANTOS, 2017). As Figuras 6 e 7 demonstram as turbinas tipo hélice e multipás, respectivamente.

Figura 6 - Turbina eólica de eixo horizontal tipo hélice



(fonte: MULLER, 2015)

Figura 7 – Primeira turbina eólica de eixo horizontal tipo multipás



(fonte: DALMAZ, 2007)

2.5.2 Rotor com eixo vertical

Os aerogeradores de rotor com eixo vertical possuem características vantajosas em relação aos aerogeradores de eixo horizontal, como o fato de não precisar controlar a orientação do rotor em relação ao vento, os componentes são armazenados de uma forma mais otimizada e as pás são construídas de forma mais fácil (MANWELL; McGOWAN; ROGERS, 2002); (DALMAZ, 2007).

Ao mesmo tempo que possuem características positivas, como as citadas acima, outras características os fazem ser preteridos na hora da escolha do tipo de aerogerador para ser utilizado comercialmente (SANTOS, 2017).

A principal característica negativa é a conversão de energia eólica em energia elétrica, que tem uma eficiência menor que os de eixo horizontal. Outra característica negativa importante é a necessidade de uma fonte externa de energia para dar início a rotação dos aerogeradores (ARAUJO, 2015). Os aerogeradores mais utilizados com rotor de eixo vertical são os tipos Darrieus e Savonius, que são demonstrados nas Figuras 8 e 9, respectivamente.

Figura 8 – Turbina eólica de eixo vertical tipo Darrieus



(fonte: MÜLLER, 2015)

Figura 9 – Turbina eólica de eixo vertical tipo Savonius



(fonte: MÜLLER, 2015)

2.6 PRINPAIS COMPONENTES DO SISTEMA EÓLICO

Segundo Aldabó (2012), o sistema eólico é constituído por vários componentes, que visam gerar a maior eficiência possível. Os principais componentes utilizados em um aerogerador com eixo horizontal são:

- Pás do rotor – Responsável por capturar a energia do vento e converter em energia mecânica, realizando a rotação do eixo;
- Eixo – Transfere a energia mecânica da rotação para o gerador;
- Nacele – Realiza a proteção dos demais equipamentos;
- Gerador elétrico – Equipamento que transforma a energia mecânica proveniente do eixo em energia elétrica, através de eletromagnetismo;
- Caixa multiplicadora – Aumenta a velocidade do eixo entre o cubo do rotor e o gerador;
- Freio – Atua no caso de falha do sistema ou sobrecarga de energia, detendo a rotação do eixo;
- Torre – Ergue todo o conjunto até a altura adequada onde as pás possam girar com segurança e distantes do solo. Além disso sustenta o rotor e as naceles.

3 FUNDAMENTOS DO APROVEITAMENTO EÓLICO

Neste capítulo serão apresentados os conceitos fundamentais para o estudo da geração de eletricidade por meio da energia eólica. Serão conceitos relacionados as características dos ventos, características dos aerogeradores, aos fundamentos da energia eólica e ao potencial eólico da região estudada.

3.1 POTÊNCIA DO VENTO

“Uma turbina eólica capta uma parte da energia cinética do vento que passa através da área varrida pelo rotor e a transforma em energia elétrica” (AMARANTE *et al.*, 2001, p. 14).

Conforme é demonstrado pela Equação 1, a velocidade do vento é um fator de suma importância no cálculo da potência disponível, visto que a potência é proporcional ao cubo da velocidade, uma pequena alteração na velocidade já acarreta uma variação grande na potência (PINTO, 2013).

$$Pot = \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

Pot = Potência média do vento (Watts);

ρ = Massa específica do ar ($\frac{kg}{m^3}$);

A = Área varrida pelo rotor (m^2);

V_1 = Velocidade do vento incidente sobre a turbina.

3.2 LEI DE BETZ

Para o cálculo da potência real de um aerogerador é necessário saber que nem toda a potência fornecida pelo vento será absorvida pela turbina. Para essa relação, existe um coeficiente de potência máximo, sendo este definido pela razão entre a potência absorvida pela turbina e a potência que o vento fornece, conforme demonstrada na Equação 2 (DALMAZ, 2007).

$$C_p = \frac{P_e}{Pot} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

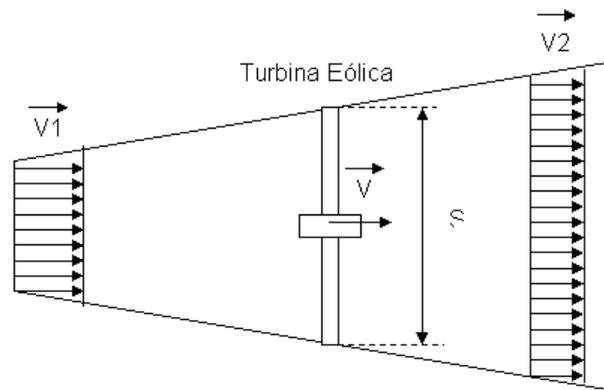
C_p = Coeficiente de potência máximo;

P_e = Potência extraída pela turbina (Watts);

Pot = Potência média do vento (Watts).

A potência extraída pela turbina deve ser calculada levando em conta que a própria turbina gera um bloqueio ao vento na hora de atravessar, por isso a velocidade utilizada pela turbina para gerar energia cinética (\vec{V}) não é a mesma que incide sobre o aerogerador (\vec{V}_1), conforme pode se observar na Figura 10 (DALMAZ, 2007).

Figura 10 – Variação da velocidade do vento



(fonte: ALMEIDA, 2007)

Observado isto, a potência extraída pela turbina é dada pela Equação 3.

$$P_e = \frac{1}{2} \rho A (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

P_e = Potência extraída pela turbina (Watts);

ρ = Massa específica do ar ($\frac{kg}{m^3}$);

A = Área varrida pelo rotor (m^2);

V = Velocidade do vento na turbina;

V_1 = Velocidade do vento incidente sobre a turbina;

V_2 = Velocidade do vento após passagem pela turbina.

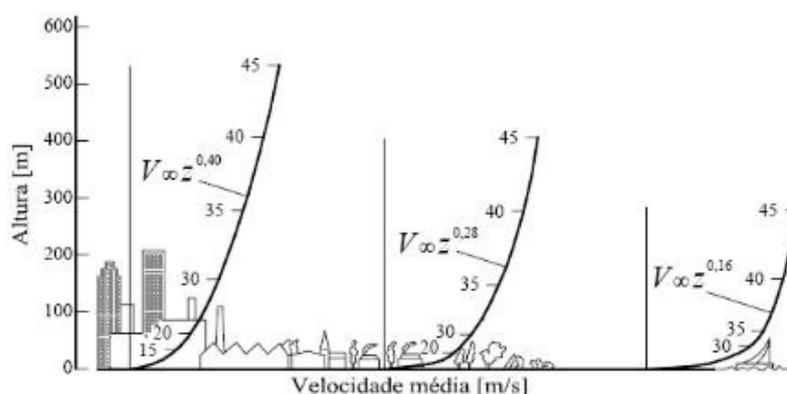
O valor máximo teórico encontrado por Betz para o coeficiente de potência foi de 0,593, então este é considerado o limite de potência que uma turbina eólica pode produzir (RODRIGUES, 2011). Atualmente os aerogeradores modernos trabalham com um coeficiente de potência máximo de 0,48.

3.3 PERFIL DE VELOCIDADE DO VENTO

O perfil de velocidades do vento de uma região com possível potencial eólico é extremamente importante e deve ser tratado com o maior cuidado possível. Portanto, há a necessidade de se realizar uma extrapolação, de forma a estimar a velocidade do vento a uma altura condizente com a instalação de um aerogerador de grande porte.

A característica do terreno também precisa ser levada em consideração na hora de se realizar a extrapolação do perfil de velocidades. Os dois métodos mais utilizados para realizar a extrapolação de velocidades são a Lei logarítmica e a Lei exponencial de Helmmann (CAMELO et al, 2010). A Figura 5 demonstra os efeitos da rugosidade do terreno na formação do perfil do vento.

Figura 11 – Perfis de velocidade com rugosidades distintas



(fonte: LOREDO-SOUZA, *et al.*, 2006)

Custódio (2013) estabeleceu valores de referência para o parâmetro Z_0 , utilizado na Lei logarítmica para estimar a rugosidade superficial, conforme indicado no Quadro 1.

Quadro 1 – Coeficientes de rugosidade superficial

Classe	Z_0 (m)	Tipo de área
0	0,0002	Com água, tais como mares e lagos.
1	0,03	Aberta com poucos quebra-ventos, plana ou levemente ondulada, podendo apresentar simples fazendas, árvores ou arbustos.
2	0,1	Terrenos de fazendas com quebra-ventos afastados a mais de 1000 metros entre si, e algumas construções espalhadas; caracterizados por grandes áreas abertas entre alguns quebra-ventos, com uma paisagem aberta; o terreno pode ser plano ou ondulado.
3	0,4	Áreas urbanas, florestas e terras de fazendas com muitos quebra-ventos; a área de fazenda é caracterizada por muitos quebra-ventos, com separação média de poucas centenas de metros.

(fonte: Adaptado de CUSTÓDIO, 2009)

A velocidade em uma determinada altura pode ser calculada através da Lei logarítmica, demonstrada na Equação 4, utilizando os valores do Quadro 1, de acordo com o tipo de terreno que está sendo avaliado para o cálculo do potencial eólico (MANWELL; McGOWAN; ROGERS, 2002).

$$\frac{V_z}{V_{z_r}} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

V_z = Velocidade do vento na altura z (m/s);

V_{z_r} = Velocidade do vento na altura de referência (m/s);

z = Altura da extrapolação (m);

z_0 = Coeficiente de rugosidade superficial (m);

z_r = Altura de referência (m).

A Lei exponencial de Hellmann é um método semelhante a Lei logarítmica, que também representa o perfil da velocidade do vento. A Lei exponencial de Hellmann é descrita conforme a Equação 5 (NUNES JUNIOR, 2008).

$$V_z = V_{ref} \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

V_z = Velocidade do vento na altura z (m/s);

V_{ref} = Velocidade do vento na altura de referência (m/s);

z = Altura da extrapolação (m);

α = Expoente da camada limite (m);

z_r = Altura de referência (m).

O parâmetro “ α ” pode variar de acordo com a rugosidade e o tipo de terreno que está sendo estudado. Hellmann estabeleceu valores para o parâmetro “ α ”, conforme demonstrado pelo Quadro 02 (NUNES JUNIOR, 2008).

Quadro 2 – Valores do expoente de Hellmann de acordo com a rugosidade do local.

Tipo de área	Valores de α
Lugares planos com gelo.	0,08 a 0,12
Lugares planos (mar, costa).	0,13 a 0,16
Terrenos pouco acidentados.	0,20 a 0,26
Zonas rústicas.	0,25 a 0,40
Terrenos acidentados ou bosques.	0,20
Terrenos muito acidentados ou cidades.	0,25 a 0,40

(fonte: Adaptado de NUNES JUNIOR, 2008)

3.4 INTENSIDADE DE TURBULÊNCIA

Um dos fatores mais importantes a ser considerado no cálculo do potencial eólico é a grande variabilidade do vento, em intervalos de tempo pequenos. Essas variações ocorrem de forma

aleatória e em períodos igualmente aleatórios. Cada estação do ano tem uma frequência de vento, intensidade, são algumas das variações que ocorrem durante o ano (DALMAZ, 2007).

Segundo o autor, outros fatores como instabilidade atmosférica, rugosidade superficial, topográfica do terreno e obstáculos interferem na turbulência do vento. A forma de se captar a turbulência é realizando medições com uma frequência maior que a do evento.

Uma forma de estimar a intensidade de turbulência é através da Equação 7, que relaciona o desvio padrão da velocidade e a média da velocidade durante o período da turbulência. Os valores da intensidade de turbulência considerados para o cálculo da extrapolação se encontram no intervalo de 0,1 a 0,4 (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2002).

$$I_t = \frac{\sigma}{\bar{V}} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

I_t = Intensidade de turbulência;

\bar{V} = Velocidade média no período da turbulência (m/s);

σ = Desvio padrão da velocidade do vento (m/s).

Alguns obstáculos acabam reduzindo a velocidade do vento, e assim aumentando a intensidade de turbulência, ocasionando o chamado efeito de sombreamento. Este efeito é caracterizado não apenas pela redução na velocidade mas também por modificar a distribuição das velocidades. Os principais obstáculos conhecidos que produzem o efeito de sombreamento são construções civis, morros e florestas muito densas (DUTRA, 2001).

3.5 ANÁLISE ESTÁTISTICA DO REGIME DOS VENTOS

Os ventos são caracterizados por ter uma variação de acordo com cada época do ano. A velocidade também sofre uma variação e isso faz com que as medições de dados sejam longas, para conseguir gerar uma boa confiabilidade em relação ao perfil de vento da região (DUTRA, 2001).

Segundo o autor, os dados obtidos através da medição do anemômetro precisam ser tratados estatisticamente, na forma de expressões analíticas, que fornecem a probabilidade de ocorrência dos ventos com uma determinada velocidade.

3.5.1 DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DE WEIBULL

“A distribuição estatística de Weibull foi desenvolvida na década de 1930 pelo físico sueco Wallodi Weibull. Esta distribuição foi proposta para se descrever o tempo de vida de materiais sob cargas que causavam fadiga e fratura nestes materiais” (DALMAZ, 2007, p. 24).

A distribuição de Weibull é o mecanismo mais aceito e utilizado para o tratamento estatístico dos histogramas de velocidade dos ventos, sendo bastante empregado em softwares que calculam uma estimativa da geração de energia eólica em um determinado tempo (DUTRA, 2001).

Esta distribuição é, juntamente com a distribuição de Rayleigh, os tratamentos estatísticos mais aceitos para demonstrar a distribuição de velocidades do vento, através dos histogramas de velocidade dos ventos, sendo bastante empregado em softwares que calculam uma estimativa da geração de energia eólica em um determinado tempo (DUTRA, 2001); (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2002).

A função densidade de probabilidade de Weibull é demonstrada conforme a Equação 8 (DUTRA, 2001), sendo esta dependente de dois parâmetros: “k” e “c”. Esses parâmetros serão explicados posteriormente.

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} * \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

$f(V)$ = Função densidade de probabilidade;

V = Velocidade do vento (m/s);

k = Fator de forma;

c = Fator de escala (m/s).

O fator de forma “k” é o responsável pelo formato que a curva de distribuição de Weibull se apresenta. Os valores normalmente observados para esse parâmetro ficam em torno de 1,5 a 3 (MARTINEZ, 2003). A Equação 10 descreve a forma de cálculo do parâmetro “k”. Segundo o autor, este parâmetro dá a dimensão da regularidade dos ventos, sendo que quanto maior for o valor do parâmetro “k” melhor é a regularidade obtida na região.

O coeficiente de escala “c” é conhecido como o fator característico da distribuição de Weibull. Ele tem a mesma unidade de medida do vento, sendo que o valor de “c” fornece a velocidade do vento para o qual 63,2% dos ventos obtidos no estudo estão abaixo do valor de “c” (DALMAZ, 2007). A Equação 11 descreve o cálculo do coeficiente “c”.

Realizando a integração da função densidade de probabilidade, é possível obter a fração acumulada de ocorrência de ventos com valores menores ao que foi integrado. Esta fração acumulada é chamada Função de acumulação de Weibull, demonstrada na Equação 9.

$$F(V) = \int_0^V f(V)dV = 1 - \exp \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right] \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

$F(V)$ = Função acumulação de Weibull;

$f(V)$ = Função densidade de probabilidade;

V = Velocidade do vento (m/s);

k = Fator de forma;

c = Fator de escala (m/s).

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}} \right)^{-1,086} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

\bar{v} = Velocidade média do vento no período considerado;

σ = Desvio padrão da velocidade do vento;

k = Fator de forma.

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

\bar{v} = Velocidade média do vento no período considerado;

Γ = Função gama;

k = Fator de forma;

c = Fator de escala (m/s).

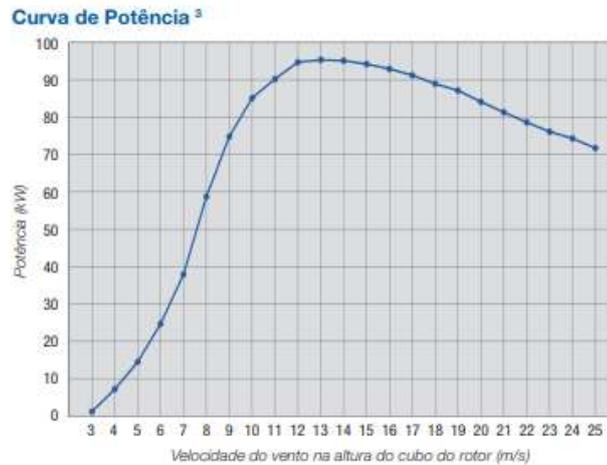
3.6 ENERGIA PRODUZIDA POR UMA TURBINA EÓLICA

A energia gerada por um aerogerador depende de vários fatores para ser estimada. O principal é o tipo de turbina e suas características, além do regime de ventos já apresentado (DALMAZ, 2007).

As características de um aerogerador estão todas praticamente inclusas na sua curva de potência. Essa tem como parâmetro o rendimento da máquina para cada velocidade de vento. Além disso leva em consideração os componentes da turbina, como a transmissão, o gerador elétrico e as unidades de controle (ALDABÓ, 2012).

A Figura 12 demonstra a curva de potência do aerogerador AGW 100, com potência nominal de 95kW, mas variando de acordo com a velocidade do vento. Observando a Figura 12, verifica-se que a velocidade de partida do aerogerador é de 3m/s, enquanto que a velocidade de corte é de 25 m/s. Há um aumento de produção de energia conforme o vento aumenta, até a velocidade de 13 m/s, onde atinge seu pico, a chamada potência nominal. Após esta velocidade o aerogerador acaba reduzindo a sua potência, devido a fatores aerodinâmicos. O estudo de regime dos ventos se mostra de vital importância, visto que é através dele que será encontrado o aerogerador ideal para o local, sendo que as decisões tomadas sempre serão em cima dos valores da velocidade média do vento.

Figura 12 – Curva de potência do aerogerador AGW – 100.



(fonte: WEG, 2018a)

Através da função de acumulação de Weibull, é possível realizar a curva de duração do vento, para que seja analisado por quanto tempo o vento atua acima do valor desejado. Cruzando a curva de potência do aerogerador com a curva de duração do vento, é possível observar a quantidade de horas com potência desejada (DALMAZ, 2007).

A energia pode ser calculada pela Equação 12 (DALMAZ, 2007), e não leva em consideração alguns fatores, como a correção das pás em relação ao ângulo do vento e a mudança brusca de direção do vento.

$$E_a = T f_i P_i \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

P_i = Potência em função de uma determinada velocidade de vento;

f_i = Frequência anual de ocorrência de uma determinada velocidade de vento;

E_a = Energia produzida no período analisado (W);

T = Período de tempo analisado (h).

3.7 FATOR DE CAPACIDADE

O fator de capacidade é uma correlação entre a energia produzida em um determinado período e a capacidade instalada do sistema de geração de energia eólica. Ele é disposto conforme a Equação 13. O fator de capacidade é muito importante pois ele informa qual será a viabilidade de se instalar uma usina eólica na região. Um fator de capacidade acima de 0,20 é considerado normal, enquanto que acima de 0,30 é um valor bom para a instalação de aerogeradores na região (DUTRA, 2001).

$$FC = \left(\frac{E_a}{PN * T} \right) \quad \text{(Equação 13)}$$

Onde:

FC = Fator de capacidade;

E_a = Energia produzida no período analisado (W);

T = Período de tempo analisado (h).

4 METODOLOGIA

A metodologia abordada consiste na utilização de dados obtidos das estações meteorológicas do SIMEPAR – Sistema Meteorológico do Paraná – de Guarapuava e do distrito de Entre Rios. Estes dados foram utilizados para o cálculo da velocidade média do vento, a sua direção e a intensidade de turbulência. Com a análise dos dados é possível calcular a densidade de potência dos ventos, encontrar a energia produzida e o fator de capacidade da localidade.

4.1 OBTENÇÃO DOS DADOS

Os dados das medições dos ventos foram obtidos de duas estações meteorológicas da SIMEPAR, uma localizada na área urbana de Guarapuava e a outra localizada no distrito de Entre Rios, localizado a cerca de 18km da cidade. Os dados fornecidos contêm a velocidade dos ventos, direção, altura do equipamento de medição, a sua precisão, sendo assim utilizados para realizar estatisticamente o cálculo da velocidade média, fator imprescindível para a realização deste trabalho.

Foram utilizados dados referentes aos anos de 2016, 2017 e 2018, para que assim fosse possível realizar uma análise tentando evitar com que fatores macroclimáticos interferissem, como o El niño, que ocorre com frequência de 3 a 4 anos. O intervalo dos dados coletados para a pesquisa é diário, sendo estes as velocidades médias do dia.

O anemômetro utilizado na estação meteorológica para a captação dos dados é o modelo 5103, da marca Young, conforme a Figura 13.

Figura 13 – Anemômetro Young 05103.



(fonte: YOUNG, 2018)

4.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A primeira parte da análise estatística consiste na extrapolação dos dados obtidos, visto que as estações meteorológicas que forneceram os dados estão instaladas a uma altura de 10m, enquanto que neste trabalho será analisado o potencial para uma altura de 100m.

Existem duas formas de se realizar a extrapolação dos dados medidos, e para este trabalho foi utilizada a Lei potencial de Hellmann. Para os dados obtidos, independente da estação estudada, foram utilizados os valores de expoentes do Quadro 2, com o devido cuidado de se observar o local onde estão instaladas as estações, de forma a se utilizar o valor do expoente corretamente.

Para a estação de Guarapuava, por se situar dentro da cidade, foi utilizado um fator de 0,35, pertencente ao grupo de terrenos muito acidentados ou cidades, que varia de 0,25 a 0,40. Já para a estação de Entre Rios, que fica no distrito de Entre Rios, foi utilizado um fator de 0,26, pertencente ao grupo de terrenos pouco ondulados, devido as características da região onde se encontra a estação.

Após a extrapolação dos dados, foi realizado o tratamento dos dados através da distribuição de Weibull, que é a distribuição mais utilizada para medir grandezas que variam de acordo com o tempo de medição. Por meio desta distribuição foi possível obter um fator de forma do vento, que nos permitiu realizar uma curva aproximada da velocidade média dos ventos, contida no histograma de ventos.

4.3 AEROGERADOR

Com os dados tratados foi possível analisar a curva de potência de alguns aerogeradores para encontrar um aerogerador que se adapte a região. O aerogerador que será utilizado neste trabalho é o aerogerador WEG AGW 110/2.1, com capacidade de 2,1MW de potência, com as características definidas pelo Quadro 3 e a Figura 14.

Quadro 3 – Dados operacionais do aerogerador escolhido.

Modelo	AGW 110/2,1
Potência nominal	2100 kW
Velocidade de início	3 m/s
Velocidade de corte	20 m/s
Diâmetro rotor	110 metros
Altura do cubo	95 metros
Vida útil	20 anos
Área varrida pelo rotor	9503 m ²

(fonte: Adaptado de WEG, 2018b)

Figura 14 – Curva de potência do aerogerador WEG AGW 110/2.1.



(fonte: WEG, 2018b)

Calculando a densidade de potência, a energia que realmente será produzida e o fator de capacidade do aerogerador é possível obter uma relação entre a capacidade instalada e a capacidade de produção real da região.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente tópico irá analisar os resultados obtidos da extrapolação da velocidade dos ventos e verificar a existência de um possível potencial nas regiões analisadas. Caso haja, será realizada uma análise com o aerogerador WEG AGW 110/2.1, para verificar a capacidade de produção de energia estimada na situação previamente calculada.

5.1 CARACTERÍSTICAS DOS VENTOS

A Tabela 1 demonstra as características dos ventos obtidas nas regiões analisadas para a altura de referência (10 metros) e a extrapolada (100 metros). Calculou-se as velocidades médias com base nos dados obtidos da SIMEPAR, referentes a um intervalo de 3 anos. A altura de 100 metros foi escolhida devido a maioria dos aerogeradores serem fabricados para funcionar nesta altura.

Tabela 1 – Características dos ventos nas regiões estudadas.

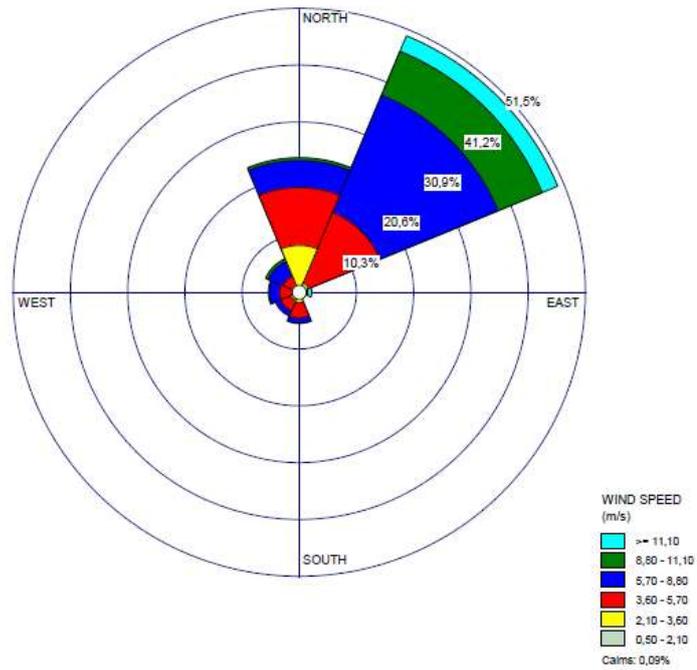
Estação	Entre Rios		Guarapuava	
Altura (metros)	10	100	10	100
Veloc. Média (m/s)	3,60	6,55	2,68	6,00
Desvio padrão (m/s)	1,19	2,16	1,12	2,50
α	0,00	0,26	0,00	0,35

(fonte: AUTOR, 2019)

Um dos fatores a serem analisados para a implantação de um parque eólico é a velocidade média dos ventos, sendo que o valor de referência normalmente utilizado é de 7 m/s. Dessa maneira, pode-se observar com o auxílio da Tabela 1, que tanto a cidade de Guarapuava como a região de Entre Rios possui potencial a ser explorado para um parque eólico, uma vez na altura de 100 metros as velocidades médias são próximas da que é adotada como referência.

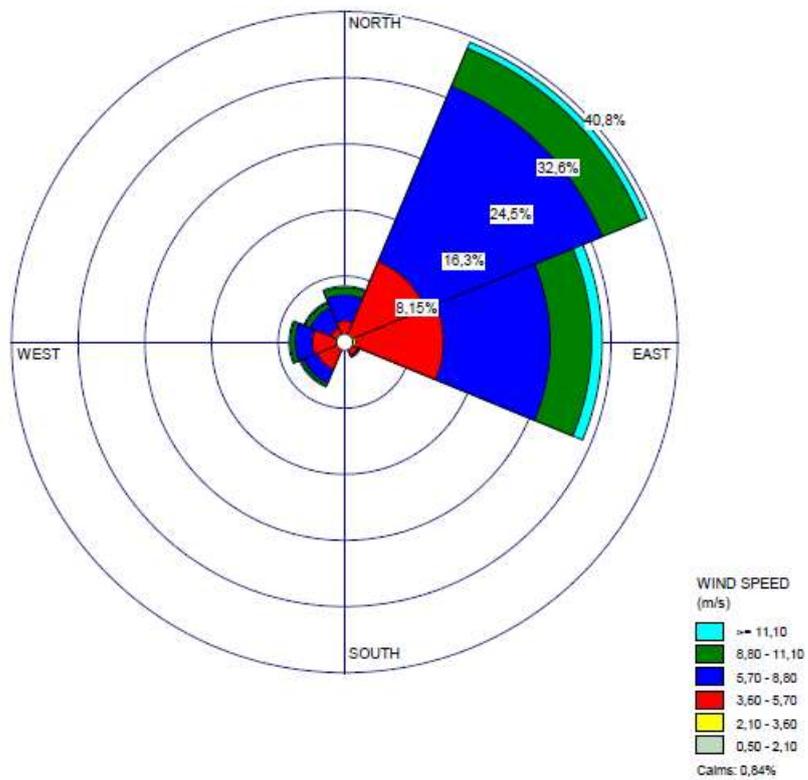
Outro fator relevante para a implantação de um parque eólico é a direção do vento, visto que as turbinas são posicionadas de acordo com a sua direção predominante. As Figuras 15 e 16 demonstram as rosas dos ventos para as duas estações analisadas. O software utilizado para a realização da rosa dos ventos foi o “WRPLOT View - Freeware”.

Figura 15 – Rosa dos ventos na altura de 100m – Estação Guarapuava.



(fonte: AUTOR, 2019)

Figura 16 – Rosa dos ventos na altura de 100m – Estação Entre Rios.



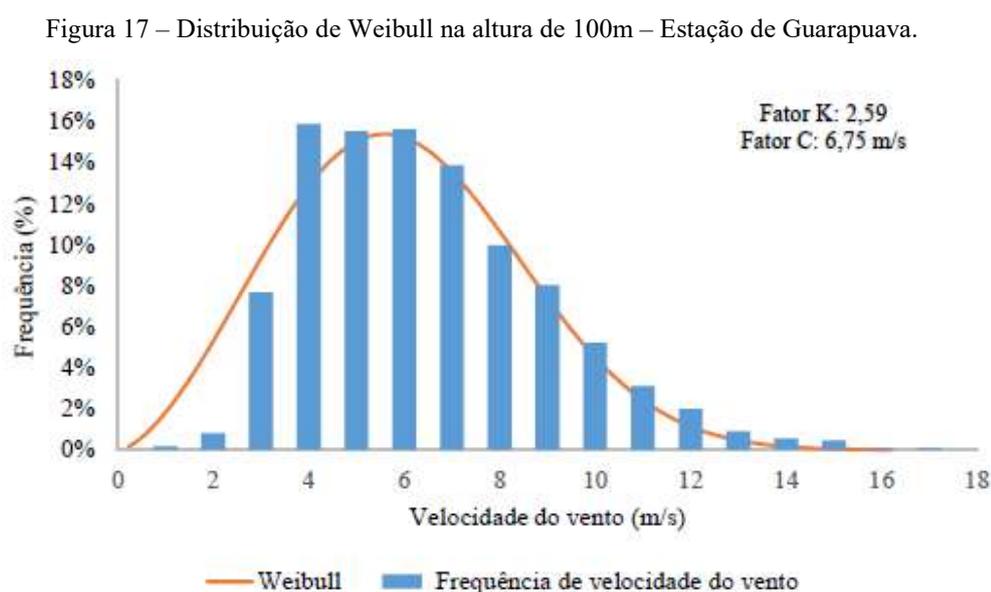
(fonte: AUTOR, 2019)

Por meio das Figuras 15 e 16 é possível analisar a origem dos ventos nos locais estudados. Observa-se que, para cidade de Guarapuava, o vento é predominante nas direções Norte e Nordeste. Já para a região de Entre Rios o vento prevalece na direção Nordeste e Leste. Desse modo, para a implantação de um parque eólico nessas regiões, recomenda-se que os aerogeradores sejam posicionados nas direções indicadas, para que assim exista uma produção contínua de energia através do sistema eólico.

5.2 ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

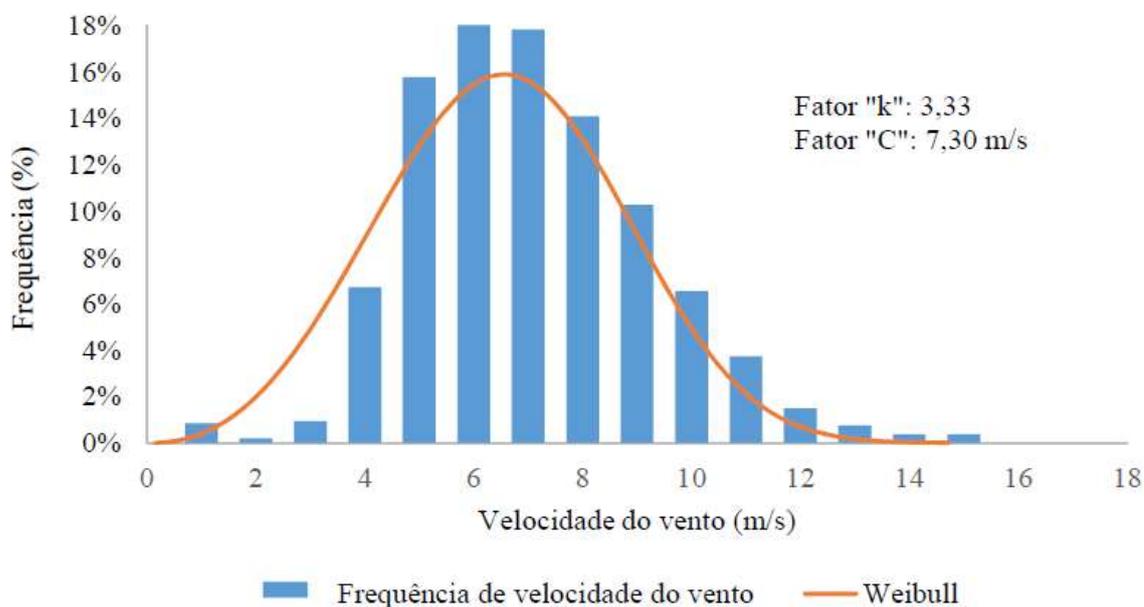
Como o vento possui grande variação em um determinado período de tempo, utiliza-se a distribuição de Weibull para se obter uma curva de distribuição dos ventos e conseguir estimar a sua predominância. Vale ressaltar ainda que os fatores “k” e “c” foram empregues para realização desses cálculos.

O fator “k” define a forma da distribuição de Weibull, sendo que esse valor normalmente varia entre 1,5 e 3. Quanto maior este valor melhor é a regularidade de ventos na região. O fator “c” é o fator característico da distribuição de Weibull, sendo que este informa a velocidade do vento na qual 63,2% da frequência dos ventos são de velocidades menores do que a informada pelo fator. As Figuras 17 e 18 indicam a distribuição de Weibull para ambas estações. O software utilizado para a realização do histograma dos ventos foi o “Microsoft Excel”.



(fonte: AUTOR, 2019)

Figura 18 – Diagrama de Weibull na altura de 100m – Estação Entre Rios.



(fonte: AUTOR, 2019)

Observa-se, por meio da Figura 17, que para a estação de Guarapuava as maiores frequências dos ventos estão entre 4 m/s e 7 m/s. Já, para a região de Entre Rios, essa frequência variou entre 5 m/s e 8 m/s, conforme a Figura 18. Dessa maneira é possível observar que os aerogeradores conseguiriam operar em grande parte do tempo, uma vez que a velocidade de partida da turbina eólica é de 3 m/s. Contudo, como o vento predomina em uma velocidade menor do que 7 m/s (velocidade média de referência para implantação de um parque eólico) observa-se que a turbina não iria operar com uma produção de energia otimizada, o que poderia inviabilizar a implantação.

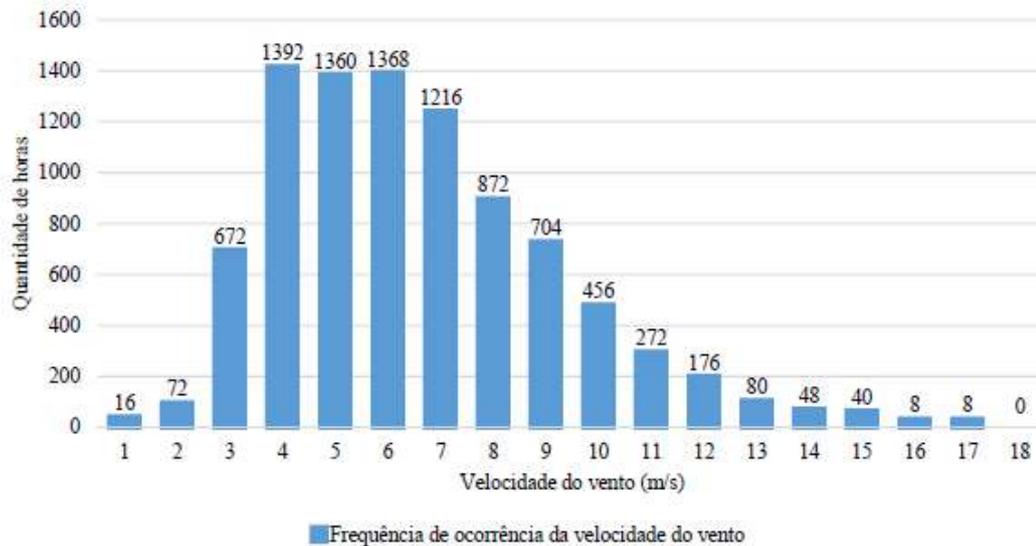
Pode-se observar ainda que em relação a frequência dos ventos, a região de Entre Rios possui 55% dos ventos entre 6 m/s e 9 m/s, já a cidade de Guarapuava dispõe de 45% nessa faixa. Isso é importante, uma vez que a velocidade de referência para a implantação de um parque eólico é de 7 m/s.

A partir destes dados é possível encontrar o fator de capacidade da turbina estudada em cada uma das regiões (tópico 5.3), e verificar se ele está adequado na faixa de valores normalmente utilizados por usinas eólicas já existentes.

5.3 ENERGIA PRODUZIDA

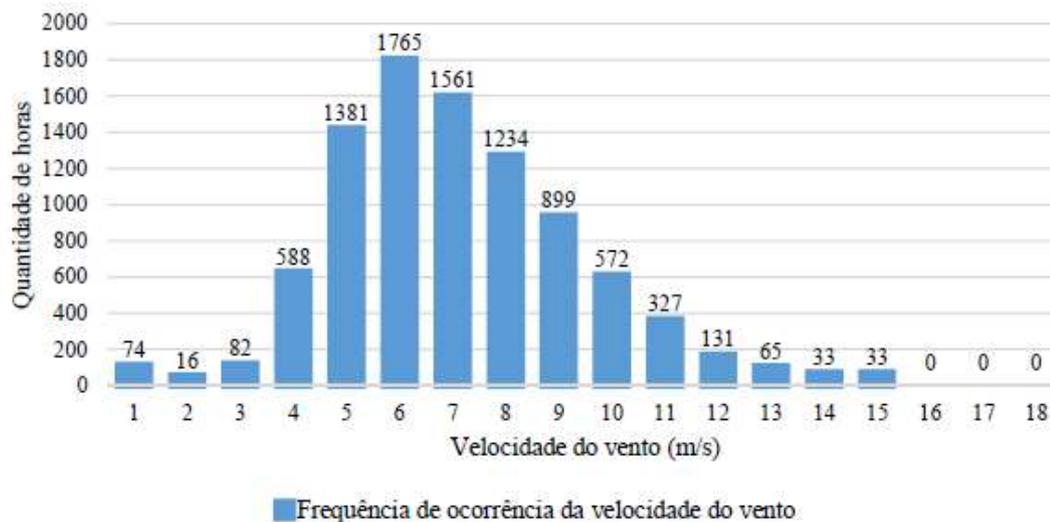
A energia produzida pela turbina durante um período de tempo foi calculada através da relação entre a curva de potência do aerogerador, demonstrada na Figura 14 e a quantidade de horas que cada velocidade obteve no período de tempo. As Figuras 19 e 20 demonstram a frequência de tempo de cada vento durante o período de um ano.

Figura 19 – Frequência da ocorrência de cada velocidade na altura de 100m – Estação de Guarapuava.



(fonte: AUTOR, 2019)

Figura 20 – Frequência da ocorrência de cada velocidade na altura de 100m – Estação Entre Rios.



(fonte: AUTOR, 2019)

Levando em consideração que a velocidade de partida da turbina em estudo é de 3 m/s, pode-se observar que para a estação de Guarapuava apenas 8,68% dos ventos não poderiam ser utilizados para geração de energia eólica. Já para a estação de Entre Rios o valor dos ventos com velocidade menor que a de partida é de 1,96%.

Ao correlacionar as Figuras 14, 19 e 20 torna-se possível efetuar o cálculo da energia produzida pela turbina analisada e calcular o seu fator de capacidade. Para realizar o cálculo da energia produzida utilizou-se a Equação 12, enquanto que para o cálculo do fator de capacidade, foi utilizada a Equação 13. A Tabela 2 determina os valores da energia produzida e o fator de capacidade para cada uma das estações.

Tabela 2 – Energia produzida e fator de capacidade.

Estação	Entre Rios	Guarapuava
Quantidade aproximada de vento na direção da turbina (%)	70	75
Energia média produzida pela turbina (kWh)	667,47	605,48
Potência nominal da turbina (kW)	2100	2100
Fator de capacidade	0,32	0,29

(fonte: AUTOR, 2019)

Por meio da Tabela 2 é possível observar que a localização das duas estações meteorológicas são locais com uma boa probabilidade de se instalar uma usina eólica. Nesse caso, nota-se que a estação de Entre Rios se destaca, uma vez que o fator de capacidade obtido (0,32) é superior a capacidade de referência para a instalação de uma usina eólica (0,30).

Pode-se observar que a estação de Guarapuava obteve um fator de capacidade muito próximo ao valor de referência, sendo que para esta estação deve ser considerado que a mesma se encontra dentro da cidade, obtendo uma interferência na medição dos ventos que deve ser considerada.

6 CONCLUSÕES

Em relação as velocidades dos ventos, pode-se concluir que a velocidade média apresentada para a cidade de Guarapuava (6 m/s) e a região de Entre Rios (6,55 m/s) são próximas a de referência (7 m/s). Esse é um dos fatores levado em consideração para a implantação de um parque eólico.

Outro ponto importante verificado para a análise de potencial eólico foi a direção dos ventos. Pôde-se observar que os ventos são predominantes das direções Norte e Nordeste para a cidade de Guarapuava e Nordeste e Leste para a região de Entre Rios. Sendo assim, como existe incidência de ventos superiores nessas direções, pôde-se verificar que as turbinas eólicas poderão operar na maior parte do tempo.

Além do mais, através do fator de capacidade tornou-se possível identificar que a região de Entre Rios dispõe de um bom potencial eólico, uma vez que possui fator de capacidade maior do que 0,3. Em relação a cidade de Guarapuava verificou-se que o fator de capacidade é considerado normal, tendo em vista que este é inferior a 0,3 e superior a 0,20.

Por meio da frequência dos ventos concluiu-se que os aerogeradores podem ser operados na maior parte do tempo, uma vez que a velocidade dos ventos verificados nas direções predominantes (4 m/s a 7 m/s para cidade de Guarapuava e 5 m/s a 8 m/s para região de Entre Rios) são superiores a velocidade de partida da turbina eólica (3 m/s).

O aerogerador utilizado, o WEG AGW 110/2.1, foi escolhido devido a ser o aerogerador que mais otimizou a geração de energia na região estudada. Além disso, é um aerogerador de fabricação nacional, reduzindo assim o custo de logística e de manutenção.

Tendo em vista o apresentado pode-se afirmar que o potencial eólico das regiões é promissor. Entretanto, como grande parte do vento incide com velocidade menor do que 7 m/s, observa-se que a turbina não iria operar com uma produção de energia otimizada, o que poderia inviabilizar a implantação. Sendo assim recomenda-se que, para conseguir dados mais precisos, seja realizada a medição dos ventos na altura desejada para implantação das turbinas eólicas. Dessa maneira, pode-se evitar erros decorrentes da extrapolação dos dados.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante do apresentado, fica a sugestão para possíveis trabalhos futuros para uma melhor análise da potencialidade eólica da região de Guarapuava – PR.

- a) Medição dos ventos com torres, colocando o anemômetro na altura desejada;
- b) Busca por possíveis locais para a instalação da usina eólica;
- c) Estudar a viabilidade de instalação de uma estação meteorológica para a realização de estudos mais aprofundados em relação ao vento, podendo assim variar altura e outros fatores que poderão ser melhores analisados.

8 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Aneel, 2002.

ALDABÓ, R. **Energia eólica**. 367 p. 2ª edição. São Paulo – SP. Editora ArtLiber, 2012. ISBN 978-85-88098-70-1

ALMEIDA, M. **Caraterização e Desempenho de Pequenos Aerogeradores de Eixo Horizontal**. Universidade do Minho, 2007.

ALVES, J. J. A. Análise regional da energia eólica no Brasil. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**. p. 165-188. v. 6, n. 1, 2010.

AMARANTE, O. A. C. *et al.* **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília, 2001.

AMARANTE, O. A. C.; SCHULTZ, D. J. Atlas do potencial eólico do estado do Paraná. **COPEL, Camargo Schubert Engenharia Eólica, LACTEC**, 53 p., 2007.

AMUSINGPLANET. **Os antigos moinhos de vento de Nashtifan**. Disponível em: <<https://www.amusingplanet.com/2014/07/the-ancient-windmills-of-nashtifan.html>>. Acesso em 23/08/2018.

ARAÚJO, D. D. **Projeto Mecânico de um Aerogerador Horizontal Tripá**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2015.

ARAÚJO, L.E.S. **Crise hídrica e potencial energético da região sudeste**. 2016. 116 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro - RJ.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balço energético nacional**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em:< <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-397/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%202018-ab%202017vff.pdf>>. Acesso em 22/08/2018.

CAMELO, H. N. *et al.* **Métodos de Extrapolação de Velocidade do Vento para Regiões Litorâneas do Nordeste Brasileiro**. XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, p. 13-17, 2010.

CATANEO, I.; SILVA M.C.A.; SCHNEIDER, R.G. Comparativo do potencial de produção de metano utilizando glicerol e sacarose como substrato orgânico, em reatores operados de forma descontínua alimentada. **Scientia cum Industria**, Caxias do Sul, v. 4, n. 2, p. 80-86, 2016.

CEPEL. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **Novo Atlas eólico brasileiro – Simulações 2013**. Disponível em: <<https://novoatlas.cepel.br/index.php/atlas-online/>>. Acesso em 11/09/2018.

CUSTÓDIO, R.S. **Energia eólica para produção de energia elétrica**. 2013. 319p. 2ª edição. Editora Synergia. ISBN 978-85-613-2588-6

DALMAZ, A. **Estudo do potencial eólico e previsão de ventos para geração de eletricidade em Santa Catarina**. Programa de pós-graduação em Engenharia mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

DUTRA, R. M. **Viabilidade técnico-econômica da energia eólica face ao novo marco regulatório do setor elétrico brasileiro**. 2001. 259f. Tese (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

FADIGAS, E.A.F.A. **Energia eólica**. 2011. 285p. 1ª edição. Barueri - SP. Manole, 2011. ISBN 978-85-204-3004-0

GAVINO, N. A. **Energia Eólica: uma análise dos incentivos à produção (2002-2009)**. 2011. 115f. Monografia – Instituto de Economia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro - RJ.

LOPES, N. **Potencial eólico em terra do Brasil pode ser seis vezes maior do que o estimado**. FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO,

2016. Disponível em:< <http://agencia.fapesp.br/potencial-eolico-em-terra-do-brasil-pode-ser-seis-vezes-maior-do-que-o-estimado/24053/>>. Acesso em: 25/08/2018.

LOREDO-SOUZA, A. M. *et al.* **Coeficientes de arrasto aerodinâmico em estruturas treliçadas de linhas de transmissão.** XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, 2006, p. 1102-1110. Campinas, SP.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind energy explained: Theory, design and application.** Inglaterra. Editora John Wiley & Sons Ltd, 2002. 577 p.

MARTÍNEZ, A. C. **Principios de conversión de la energía eólica.** In: Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica. p. 28-95. ISBN 84-7207-139-1

MÜLLER, M. N. **Projeto de uma Turbina Eólica de Eixo Horizontal.** Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2015.

NUNES JUNIOR, E. R. **Metodologia de projeto de turbinas eólicas de pequeno porte.** Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, 2008.

PINTO, M.O. **Fundamentos da energia eólica.** 2013. 392p. 1ª edição. Rio de Janeiro. LTC, 2013. ISBN 978-85-216-2160-7

RODRIGUES, P.R. **Energia eólica em energias renováveis.** 2011. 51p. Livro digital. Palhoça - RS. Unisul, 2011.

SALOMÃO, R. M. **Protótipo de um aerogerador de eixo horizontal.** Departamento de Engenharia Mecânica DEM/POLI/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

SANTOS, G. B. S. **Projeto de aerogerador horizontal comercial de pequeno porte.** Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2017.

WEG S.A. **Catálogo Aerogeradores AGW 100.** 2018a. Disponível em: < <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h6e/h31/WEG-aerogeradores-agw-100-50041735-catalogo-portugues-br.pdf>>.

WEG S.A. **Catálogo Aerogeradores AGW 110**. 2018b. Disponível em: <
<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hee/hf1/WEG-aerogerador-agw-110-2.1-50030583-catalogo-portugues-br.pdf>>.