

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

WELLINGTON DE OLIVEIRA FERREIRA

**POTENCIAL DE USO DE MICROGERADORES EÓLICOS EM UNIDADES
CONSUMIDORAS DE BAIXA TENSÃO NO MUNICÍPIO DE CASCAVEL- PARANÁ**

MEDIANEIRA

2022

WELLINGTON DE OLIVEIRA FERREIRA

**POTENCIAL DE USO DE MICROGERADORES EÓLICOS EM UNIDADES
CONSUMIDORAS DE BAIXA TENSÃO NO MUNICÍPIO DE CASCAVEL- PARANÁ**

**Potential for the use of wind microgenerators in low voltage consumer units in
the Municipality of Cascavel- Paraná**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Evandro André Konopatzki.

Coorientador(a): Edson Andreoli.

MEDIANEIRA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

WELLINGTON DE OLIVEIRA FERREIRA

**POTENCIAL DE USO DE MICROGERADORES EÓLICOS EM UNIDADES
CONSUMIDORAS DE BAIXA TENSÃO NO MUNICÍPIO DE CASCAVEL- PARANÁ**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 19/Maio/2022

Evandro André Konopatzki
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Edson Andreoli
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Leandro Antonio Pasa
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Yuri Ferruzzi
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

MEDIANEIRA

2022

Dedico este trabalho a todos àqueles que, de uma forma ou outra, contribuíram para o meu êxito.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelos anjos que colocou em meu caminho ao longo desta trajetória, meus familiares e amigos, que foram os maiores incentivadores de todo meu percurso acadêmico, por seu carinho, paciência e lealdade, por terem sido companheiros incondicionais, permanecendo ao meu lado nos momentos felizes e também difíceis enfrentados neste caminho.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, campus Medianeira e toda sua equipe, pelas contribuições.

Aos professores que me auxiliaram nesse processo, com muita dedicação e esforço, especialmente ao professor orientador Prof. Dr. Evandro André Konopatzki e Co-orientador Prof. Me. Edson Andreoli, por terem dedicado parte do seu tempo e seu conhecimento para ampliar meu olhar para a importância da Educação Psicomotora na idade escolar, auxiliando assim de forma direta nesta conquista.

Por fim, agradeço a Deus que na sua bondade infinita permitiu-me ingressar no ensino superior e chegar ao fim da caminhada acadêmica com um enorme conhecimento.

"A great wind is blowing, and that gives you
either imagination... or a headache."

(Um grande vento está soprando, e isso lhe dá
imaginação... ou uma dor de cabeça.)

(Catherine the Great)

RESUMO

O crescimento econômico, o aumento da demanda por energia e a instituição de políticas governamentais para valorização do meio ambiente e sustentabilidade têm contribuído para a necessidade da diversificação da matriz energética brasileira e incentivado a busca por energias limpas e renováveis. Uma dessas energias é provinda do vento e, nesse sentido, o presente trabalho propõe um estudo de viabilidade técnica de instalação de aerogeradores de pequeno porte na cidade de Cascavel, PR. O objetivo principal dessa pesquisa consistiu na verificação das categorias de unidades consumidoras (UC) que podem ser beneficiadas com a energia produzida por aerogeradores de potências nominais 1 kW, 2 kW e 3 kW. Para isso foi estimada a produção de energia aplicando-se a distribuição de Weibull sobre uma série diária de ventos da mesorregião do período de 2007 a 2017, a Energia gerada estimada foi comparada ao consumo das UCs das diferentes categorias e com fatores de carga (FC) e de demanda (FC) variados entre 0,05 e 1 por incremento de 0,05. Os resultados indicam o perfil das UCs com viabilidade técnica para uso da microgeração eólica distribuída. Levando em consideração os resultados obtidos, conclui-se que microgeradores eólicos podem ser instalados a 10 m de altura na maioria das categorias, sendo necessário levar em conta os diferentes fatores mínimos de carga e de demanda.

Palavras-chave: aerogerador; energia eólica; geração distribuída; microgerador; viabilidade técnica.

ABSTRACT

Economic growth, increased demand for energy and the institution of government policies to value the environment and sustainability have contributed to the need to diversify the Brazilian energy matrix and this contributes to the search for clean and renewable energies. One of these energies comes from the wind and, in this sense, the present work proposes a study of the technical feasibility of installing small wind turbines. The methodology will analyze the categories of consumer units that can benefit from the energy produced by wind turbines with nominal powers of 1 kW, 2 kW and 3 kW in the distributed wind microgeneration system in the Municipality of Cascavel, Paraná. For this, a daily historical series of winds from the mesoregion from 2007 to 2017 will be used, at a height of 10 meters, provided by the Meteorological System of Paraná (SIMEPAR). The hourly probability of distribution of the Weibull winds was calculated and the electric energy production of the wind turbines was estimated. With these data, it will be possible to indicate the consumer units in tariff group B that may be served by each of the wind turbines depending on their daily consumption profile and their load factor. It is expected to conclude by categorizing the technical feasibility of wind microgeneration distributed in the studied municipality.

Keywords: wind energy; wechnical viability; microgenerator; wind turbine; distributed generation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Gráfico Matriz Elétrica Brasileira	16
Figura 2 - Sistema eólico para bombeamento de água na China (2000 a.C.).....	18
Figura 3 - Estrutura típica de moinho de vento para moagem de grãos (a) e imagem de moinho instalado (b).	19
Figura 4 - Primeiro aerogerador desenvolvido em Ohio, no ano 1988 pelo industrial Bruch.....	20
Figura 5 - Macro circulação das massas de ar	22
Figura 6 - Representação do vento dia e noite.....	23
Figura 7 - Comportamento do vento sob a influência do relevo	25
Figura 8 - Distribuição de Weibull para diferentes valores de k.....	30
Figura 9 - Ventos Brasileiros	31
Figura 10 - Velocidade média anual do vento	32
Figura 11 - Componentes do gerador eólico	36
Figura 12 - Rotor horizontal.....	38
Figura 13 - Rotores tipo Savônus (a), Darrieus (b) e H-Darrieus (c)	38
Figura 14 - Sistema de compensação de energia elétrica	40
Figura 15 - Consumo de energia elétrica em 2020	43
Figura 16 - Consumo de energia elétrica por classe (GWh) em 2020.....	43
Figura 17 - Consumo per capita por região geográfica	44
Figura 18 - Velocidade dos Ventos no Estado do Paraná.....	45
Figura 19 - Mapa da Rugosidade do Estado do Paraná	45
Figura 20 - Localização do município de Cascavel	52
Figura 21 - Intensidade dos ventos no Estado do Paraná.....	53
Figura 22 - Estação meteorológica da SIMEPAR em Cascavel	54
Figura 23 - Rosa dos ventos (a) e distribuição média diária dos ventos (b).....	55
Figura 24 - Curva de Potência das turbinas: a) ELV-H3.1 – 1kW; b) ELV-H3.8 – 2KW; e c) ELV-H4.6 – 3 KW	56
Figura 25 - Distribuição de Weibull para Cascavel.....	60
Figura 26 - Regime de ventos de Cascavel	61
Figura 27 - Categorias atendidas pela turbina H3.1	63
Figura 28 - Categorias atendidas pela turbina H3.8	64
Figura 29 - Categorias atendidas pela turbina H4.6	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cálculo do potencial eólico-elétrico do Brasil	33
Tabela 2 - Consumo de energia elétrica por região	47
Tabela 3 - Classes de Unidades Consumidores	48
Tabela 4 - Requisitos técnicos dos aerogeradores	56
Tabela 5 - Energia Consumida por Cenários	58
Tabela 6 - Estimativa da geração de energia elétrica das turbinas estudadas em 10 anos ELV-H3.1	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEÓLICA	Associação Brasileira de Energia Eólica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CGU	Central Geradora Undi-elétrica
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
CRESESB	Centro de Referência das Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito
EEC	Enterprise Electronics Corporation
EOL	Central Geradora Eólica
GWEC	Global Wind Energy Council
PCH	Pequena Central hidrelétrica
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Paraná
UC	Unidade Consumidora
UFV	Hidrelétrica Central
UH	Geradora Solar
UHE	Usina Hidrelétrica
UTE	Usina Térmica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Energia Eólica	15
2.1.1	O Vento	21
<u>2.1.1.1</u>	<u>Fatores que influenciam o regime dos ventos</u>	<u>24</u>
<u>2.1.1.2</u>	<u>Energia e potência retirada do vento</u>	<u>25</u>
<u>2.1.1.3</u>	<u>Distribuição de Weibull</u>	<u>28</u>
2.1.2	Potencial Eólico Brasileiro	30
2.1.3	Geração de Energia Eólica	34
<u>2.1.3.1</u>	<u>Sistemas eólicos de pequeno porte</u>	<u>37</u>
<u>2.1.3.2</u>	<u>Vantagens e desvantagens da energia eólica</u>	<u>40</u>
2.2	Sistema Tarifário Brasileiro	41
2.2.1	Característica de consumo de energia do Setor Residencial	46
2.3	Categorias das Unidades Consumidoras do Grupo B	48
2.4	Fatores de Demanda e de Carga	49
3	METODOLOGIA	51
3.1	Tipo de Pesquisa	51
3.2	Objeto em Estudo	52
3.2.1	Região em Estudo	52
3.2.2	Dados de Vento	54
3.2.3	Aerogeradores Seleccionados para o Estudo	56
3.3	Procedimento Metodológico	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1	Distribuição de Ventos para Cascavel	60
4.2	Análise do Regime Eólico de Cascavel, PR	61
4.2.1	Estimativa de Potência Instantânea e Geração de Energia Elétrica	61
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
	REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

O vento é uma das fontes de energia renovável utilizada pela humanidade e, atualmente, tem sido promissor e competitivo para o desenvolvimento do setor elétrico brasileiro.

De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA, 2017), o Brasil é considerado um país com alta capacidade de produção de energia eólica em função das características consideradas como favoráveis, ou seja, os ventos brasileiros apresentam estabilidade e constância em sua intensidade, o que favorece sua utilização para a produção de energia eólica.

Embora a produção de energia a partir dos ventos ainda seja pouco representativa no território brasileiro, é perceptível a evolução do setor no país ao longo das últimas décadas.

A utilização de fontes de energia alternativa, dentre elas a energia eólica, é bastante vantajosa tanto do ponto de vista econômico, já que diminui custos econômicos para o consumidor, como do ponto de vista ambiental contribuindo para a redução dos impactos ambientais por meio da geração de energia renovável e limpa.

Para a implementação da energia eólica é preciso levar em consideração fatores como a variação de altura do terreno em relação ao nível do mar, a rugosidade do terreno, o relevo e, principalmente, a presença de obstáculos no espaço onde serão instalados os aerogeradores, os quais podem alterar o curso dos ventos impedindo a produção de energia em seu potencial máximo.

Por isso torna-se relevante realizar uma análise da viabilidade técnica para implementação de energia eólica em cada local, levando em consideração todos os fatores existentes que possam interferir de forma considerável na produção de energia, a fim de levantar as especificidades necessárias que possibilitem a efetiva produção de energia e o aerogerador mais adequado para cada caso.

Nas últimas décadas os debates e discussões sobre o uso da energia eólica têm se acentuado e os governos têm criado incentivos e meios para o desenvolvimento de tecnologias nessa área. Esses incentivos têm possibilitado um crescimento significativo da produção de eletricidade a partir da energia eólica trazendo resultados significativos para o país (ALDABÓ, 2002; INTERACADEMY COUNCIL, 2007).

Atualmente, além da implementação de grandes usinas eólicas, a energia elétrica obtida através da força dos ventos pode ser utilizada em sistemas isolados, abastecendo residências e pequenas empresas (ERENO, 2010; LU; MCELROY; KIVILUOMAK, 2009).

Para regulamentar a implementação da energia eólica residencial, bem como o uso de outras fontes de energia limpas e renováveis para esta finalidade, em 2012, foi publicada a Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL, que “estabelece condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica”.

Neste contexto, é possível afirmar que a utilização da força dos ventos para a obtenção de energia elétrica possibilita um desenvolvimento sustentável, além de contribuir efetivamente para diminuir a dependência de fontes de energia não renováveis e poluentes que são, até hoje, responsáveis pela maioria da energia utilizada no planeta (CASTRO, 2009).

Com a demanda cada vez mais latente por energia elétrica gerada por fontes renováveis, este trabalho tem como tema de estudo a viabilidade técnica de implementação de energia eólica em unidades consumidoras do grupo tarifário B na cidade de Cascavel, Paraná, de modo a apresentar alternativas para o desenvolvimento econômico e sustentável da região. Dessa forma, o problema analisado nessa pesquisa consistiu em identificar a categoria de unidades consumidoras da classe B cuja instalação de micro aerogeradores de 1 kW, 2 kW e 3 kW seja tecnicamente viável.

Com objetivo principal de analisar as categorias de unidade consumidoras classe B beneficiadas com microgeração eólica distribuída, simulando aerogeradores com potências nominais de 1 kW, 2 kW e 3 kW no Município de Cascavel-Paraná, foram abordados os seguintes objetivos específicos:

- a) Analisar a incidência de ventos à altura de 10 m, no Município de Cascavel-Paraná, utilizando os dados diários do período de 2007 a 2017, advindos da Estação Meteorológica Paranaense;
- b) Estimar a produção de energia elétrica com três diferentes aerogeradores de escala comercial, usados na microgeração distribuída, com potências nominais de 1 kW, 2 kW e 3 kW;

- c) Estimar o consumo de energia elétrica das unidades consumidoras, classificadas por categoria de atendimento, diversos fatores de carga e de demanda.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nas últimas décadas, a energia eólica vem ganhando cada vez mais espaço no contexto energético brasileiro. Esse tipo de energia é gerado utilizando a energia cinética dos ventos que movimentam turbinas e transformam a energia mecânica em energia elétrica de forma limpa, renovável, e o melhor, sem agressão ao meio ambiente.

A expansão da energia eólica surgiu em um contexto de necessidade de diversificação da matriz elétrica brasileira, considerando a dependência do Brasil em relação as usinas hidrelétricas, maior fonte de produção de energia elétrica da atualidade. Desta forma, a energia eólica encaixa-se perfeitamente na política de diversificação energética brasileira, como possibilidade de complementaridade à matriz energética.

Considerando a relevância do conhecimento acerca de aspectos intrínsecos à energia eólica, nesse capítulo serão apresentados conhecimentos sobre a composição da matriz elétrica brasileira, bem como fundamentos da energia eólica, suas características, vantagens e desvantagens, bem como um breve panorama histórico e a visão geral evolutiva e conceitual sobre o desenvolvimento e a utilização da energia eólica nas diversas esferas.

Vale acrescentar que serão apresentados ainda aspectos relativos aos fenômenos físicos responsáveis pela geração dos ventos, sua velocidade e determinação das variáveis envolvidas no dimensionamento de um projeto eólico.

Como o objeto de conhecimento do presente trabalho está diretamente relacionado a produção e consumo de energia elétrica, também serão apresentados aspectos relacionados ao sistema tarifário brasileiro e as principais características de consumo de energia do setor residencial, dando embasamento teórico para a implementação de um sistema eólico residencial de pequeno porte.

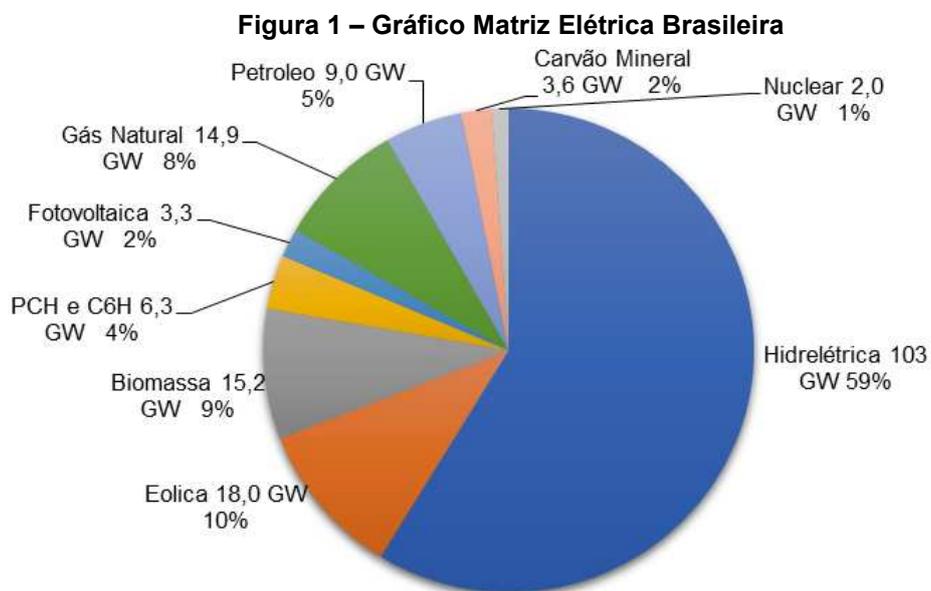
2.1 Energia Eólica

Ao voltar o olhar para utilização de fontes energéticas, atualmente percebe-se que, apesar do Brasil ter um extenso território e geograficamente ter uma condição extremamente favorável para a utilização da energia eólica, ou seja, com

alto potencial de produção de energia eólica, esta fonte de energia ainda é pouco explorada.

Vale acrescentar que, nas últimas décadas, muito tem contribuído para o desenvolvimento das tecnologias voltadas à produção de energia eólica, a qual se destaca como energia renovável que mais tem crescido no mundo.

De acordo com dados divulgados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), no primeiro semestre de 2021, a energia eólica já é a segunda maior fonte de energia do Brasil, como pode ser observado na Figura 1.



Fonte: Adaptado de Godoi (2021).

Levando em consideração a configuração geográfica, as condições climáticas, a necessidade e oportunidade de ampliação da matriz energética brasileira, a implementação da energia eólica mostra-se absolutamente adequada (CEPEL, 2001).

Nesse sentido, é de primordial importância conhecer aspectos intrínsecos à produção de energia eólica, para a partir daí, realizar análise do potencial eólico do local a ser instalado o aerogerador, utilizando tecnologias de aquisição e tratamento de dados, possibilitando a transformação dos bons ventos brasileiros em eletricidade para o nosso desenvolvimento.

Segundo Magalhães (2009), “a energia eólica é a energia obtida pelo movimento do ar, ou seja, o vento”. Neste sentido, é possível afirmar que Energia

Eólica é o processo pelo qual a força do vento é transformada em energia cinética e, a partir dela, em eletricidade através do uso de equipamentos específicos.

A energia eólica consiste na conversão de correntes de energia renovável, ou seja, transformação da energia do vento em energia útil através do uso de turbinas eólicas que convertem a força do vento em torque ou força de rotação usado para impelir um gerador elétrico para gerar eletricidade.

A energia eólica é uma fonte abundante de energia limpa, renovável e sustentável, sendo uma eficiente alternativa, já que complementa o sistema de geração de energia do país e reduz a dependência das usinas hidrelétricas, estando permanentemente disponível em todas as regiões do planeta.

De acordo com Magalhães (2009):

Esta energia pode ser aproveitada de várias formas como a moagem de grãos (sua utilidade mais antiga), bombeamento de água e também a geração de energia elétrica entre outras aplicações menos conhecidas. A transformação da energia dos ventos em energia elétrica ocorre através da utilização de equipamentos eletromecânicos cujo principal é basicamente componente principal é o aerogerador. Este equipamento é basicamente composto por uma torre de sustentação, um gerador elétrico e um conjunto de pás que são responsáveis pela captação do vento e acionamento do gerador elétrico.

Magalhães (2009), acrescenta ainda que a energia eólica é a transformação da energia cinética em translação gerando movimento rotacional nas turbinas eólicas, conhecidas como aerogeradores.

Para Lopez (2012), a energia eólica pode ser obtida a partir da energia cinética dos ventos para se gerar energia elétrica por meio do movimento rotacional de uma turbina. O vento incide nas pás da turbina eólica e gera um torque no rotor do gerador transformando a energia cinética do vento em energia mecânica rotacional. Acoplado ao eixo da turbina existe um gerador elétrico que é capaz de converter eletromecanicamente essa energia rotacional em energia elétrica.

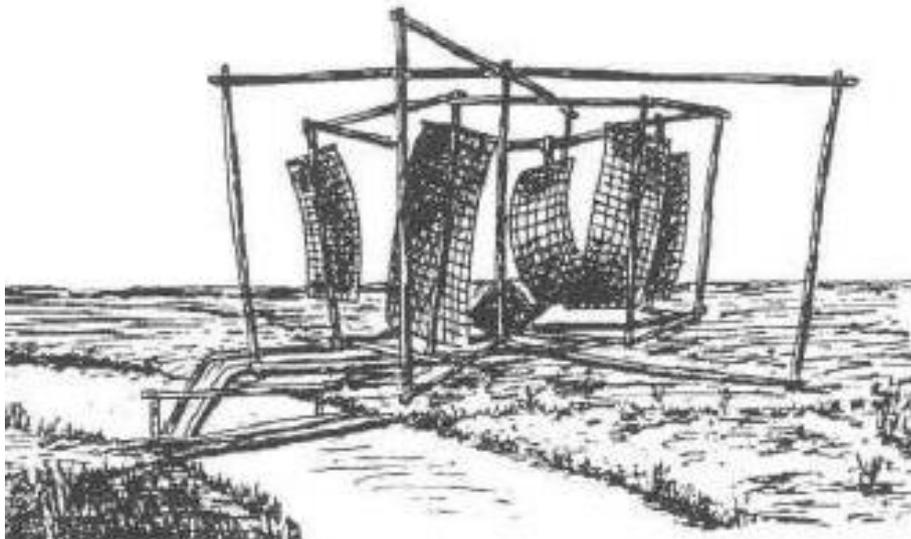
A tecnologia para a transformação da energia cinética do vento em energia mecânica útil tem sido utilizada pelo homem desde a antiguidade. A energia eólica concomitantemente com a energia hidráulica produzida pela roda d'água, é a fonte de energia mais antiga utilizada pela humanidade.

Desde os primórdios da humanidade a energia eólica vem sendo amplamente utilizada para gerar energia mecânica auxiliando, principalmente, nas

atividades agrícolas. A necessidade de criar novas tecnologias é algo intrínseco ao desenvolvimento humano.

O primeiro registro que se tem sobre a utilização da força do vento para a produção de energia data do ano de 200 a.C., na Pérsia, quando se percebeu o potencial do vento como fonte abundante de energia, surgindo assim, forma primitiva de moinho de vento que foi utilizado por vários séculos para o bombeamento de água (como apresentado na Figura 2) e moagem de grãos.

Figura 2 – Sistema eólico para bombeamento de água na China (2000 a.C.)



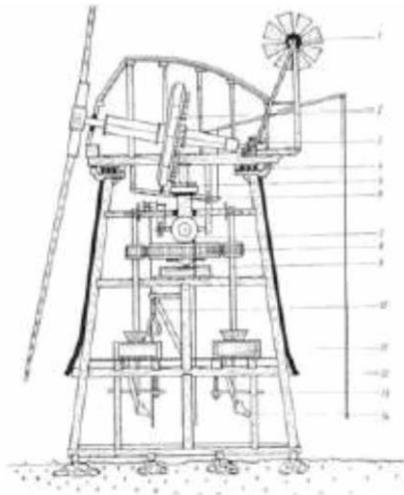
Fonte: Dutra (2012).

Alguns registros, como pressupõem Dutra (2012), nos levam a crer que, mesmo antes da Pérsia, a China (por volta de 2000 a.C.) e o Império Babilônico (por volta 1700 a.C.) já utilizavam cataventos rústicos para auxiliar na irrigação. (SHEPHERD, 1994) (CHESF-BRASCEP, 1987).

No século XI, houve uma grande expansão na utilização da tecnologia eólica, surgindo os moinhos de vento fortemente utilizados para bombeamento de água e moagem de grãos.

Esta forma de utilização da energia eólica caiu em desuso na Europa com o advento da Revolução Industrial e a invenção da máquina a vapor. No entanto, alguns dos moinhos de vento desta época continuam em plena utilização em várias partes do mundo, detalhes e imagens de moinhos antigos são apresentados na Figura 3.

Figura 3 - Estrutura típica de moinho de vento para moagem de grãos (a) e imagem de moinho instalado (b).



(a)



(b)

Fonte: Dutra (2012).

Vale acrescentar, que há registros históricos da utilização de energia eólica no transporte marítimo desde a sua inicialização.

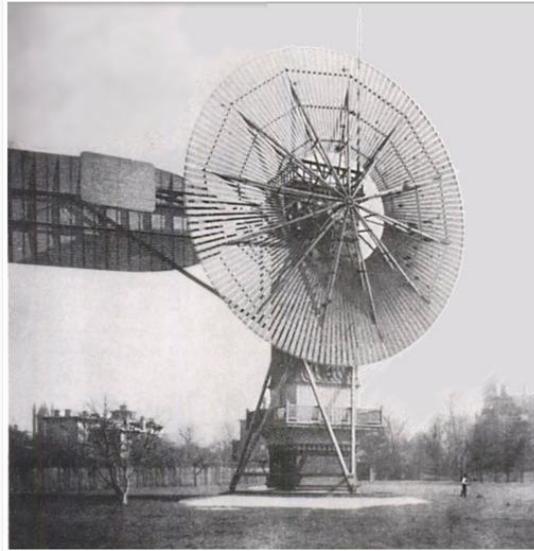
Com o amplo desenvolvimento da tecnologia, no final do século XX, iniciou-se a adaptação dos conhecidos moinhos de vento para a geração de energia elétrica.

O marco na utilização dos cataventos para a geração de energia elétrica foi registrado em 1988, com a implementação do primeiro aerogerador de que se tem registro, construído por Charles F. Bruch, um industrial voltado para eletrificação, na cidade de Cleveland, Ohio (SCIENTIFIC AMERICA, apud SHEPHERD, 1994).

Esse sistema tinha a capacidade de fornecimento de 12 KW, utilizada para carregamento de baterias destinadas ao fornecimento de energia para 350 lâmpadas incandescentes.

Como premissa para a invenção desse sistema Bruch utilizou a configuração do moinho. Esse sistema era composto por 144 pás, tendo um diâmetro de 17 m e uma torre de 18 m de altura, sendo sustentado por um tubo metálico central de 36 cm o qual possibilitava o giro do sistema acompanhando o vento predominante. Esse sistema operou satisfatoriamente durante 20 anos e foi desativado em 1908. O Registro do primeiro aerogerador é apresentado na Figura 4, a seguir.

Figura 4 - Primeiro aerogerador desenvolvido em Ohio, no ano 1988 pelo industrial Bruch.



Fonte: Windsector (2013).

A partir do século XX, a difusão substancial da rede elétrica contribuiu significativamente para o aumento de pesquisas para o desenvolvimento de aerogeradores. Os Estados Unidos desenvolveram e implementaram o uso de aerogeradores de pequeno porte nas fazendas e residências rurais isoladas enquanto a Rússia realizava fortes investimentos para a criação e instalação de aerogeradores de médio e grande porte diretamente na rede (DUTRA, 2012).

Com o início da Segunda Guerra Mundial e a diminuição da disponibilidade dos combustíveis fósseis, principalmente a crise do petróleo, os países sentiram e necessidade de economizar essas fontes de energia, havendo o investimento no desenvolvimento de aerogeradores de médio e grande porte.

A delimitação de áreas destinadas à sua instalação contribuiu efetivamente para agilizar o processo de expansão, dispensando os longos estudos ambientais.

No entanto, com o fim da guerra esta tecnologia deixou de ser competitiva, passando a ser utilizada apenas para fins de pesquisa utilizando e aprimorando técnicas aeronáuticas na operação e desenvolvimento de pás, além de aperfeiçoamentos no sistema de geração (DUTRA, 2010).

Neste contexto, com a considerável expansão e desenvolvimento de tecnologias, a energia eólica, por sua viabilidade, passou a ganhar espaço no mercado de produção de energia.

Graças ao desenvolvimento da tecnologia voltada à produção de energia eólica e de investimentos por parte dos governos, grande parte dos países tem conseguido o desprendimento das energias não-renováveis.

2.1.1 O Vento

A energia eólica utiliza a força do vento para gerar energia elétrica. Considera-se vento o fluxo de gases em grande escala causado pelo aquecimento de forma irregular da superfície terrestre pela radiação solar em função do movimento de rotação da Terra e das diferentes orientações de incidência dos raios solares, ou seja, a superfície terrestre libera na atmosfera, de maneira contínua e não uniforme, o calor recebido pelo sol. Este aquecimento é responsável pelo deslocamento das massas de ar.

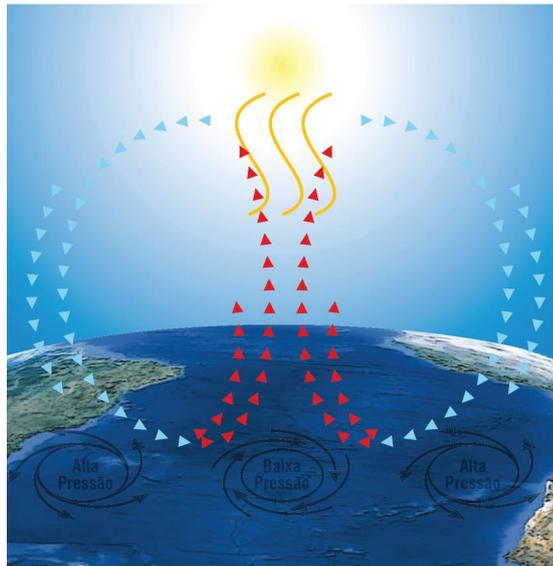
Portanto, a atmosfera terrestre assume papel relevante e fundamental no processo de formação dos ventos, pois é nela que acontecem as modificações que interferem diretamente no clima e nos ventos, de forma específica no tempo e no espaço, ocasionando aquecimento desigual da superfície terrestre.

Para Castro (2003), os ventos são causados por diferenças de pressão por toda a extensão da superfície terrestre, em função da radiação solar recebida na terra ser maior nas zonas equatoriais do que nas zonas polares. Portanto, os ventos são originados pela radiação solar.

A formação dos ventos é determinada pelo deslocamento das massas de ar. Nas regiões tropicais do nosso planeta, os raios solares chegam à crosta terrestre quase que perpendicularmente sendo mais aquecidas que nas regiões polares. Portanto, o ar quente, existente nas baixas altitudes das regiões tropicais apresentam tendência a subir, dando lugar as massas de ar frios que se deslocam das regiões polares.

Neste contexto, considera-se vento os deslocamentos de ar da zona de alta pressão para a zona de baixa pressão. Desta forma, o vento é o movimento de uma massa de ar, mais ou menos rápida, entre as zonas de diferentes pressões. Quanto maior for a diferença de pressão, mais rápido será o fluxo de ar e, por consequência, mais forte será o vento. Na Figura 5 é representada uma corrente de ar em escala macro circulação.

Figura 5 – Macro circulação das massas de ar



Fonte: BLOG Researchgate (2008-2021)

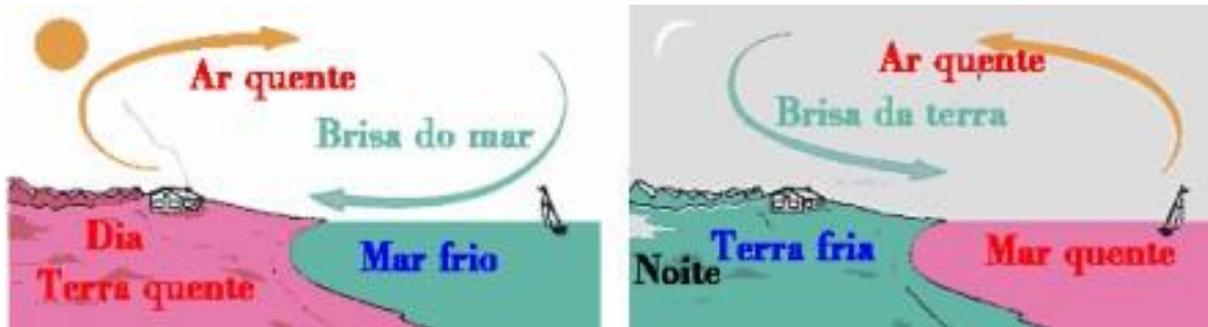
De acordo com Custódio (2009), os ventos planetários, denominados de ventos constantes, produzidos pelo aquecimento no Equador e resfriamento nos polos, são classificados em:

- a) alísios: ventos que sopram dos trópicos para o Equador, em baixas altitudes.
- b) contra-alísios: ventos que sopram do Equador para os polos, em altas altitudes.
- c) ventos do oeste: ventos que sopram dos trópicos para os polos.
- d) polares: ventos frios que sopram dos polos para as zonas temperadas.
- e) vale acrescentar que a força do vento apresenta variações significativas ao longo do ano. Sobre isso, o autor supracitado acrescenta que, em função da inclinação do eixo de rotação da Terra, ocorrem variações sazonais na distribuição de radiação recebida na superfície terrestre resultando em variações na intensidade e direção dos ventos, originando os ventos continentais ou periódicos que formam as monções e as brisas.

Consideram-se monções os ventos periódicos que mudam de direção, aproximadamente, a cada seis meses, soprando em determinada direção em uma estação do ano e em sentido contrário em outra.

Já as brisas são ventos que sopram do mar para o continente e vice-versa, surgindo devido às diversas capacidades das superfícies de refletir, absorver e emitir o calor recebido do sol, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Representação do vento dia e noite



Fonte: Grupo Virtuuous (2014).

Durante o dia há maior capacidade da terra em refletir os raios solares e por isso a temperatura do ar aumenta e, conseqüentemente, forma-se uma corrente de ar que sopra do mar para a terra (brisa marítima). Já no período da noite, a temperatura da superfície terrestre apresenta uma diminuição mais rápida do que a temperatura da água originando a brisa terrestre que sopra da terra para o mar.

Custódio (2009), complementa ainda que, além dos ventos expostos anteriormente, existem ainda os ventos locais. Esses ventos sopram em regiões determinadas e resultam das condições locais, como, por exemplo, os ventos que sopram em vales e montanhas.

Nestes espaços geográficos o ar quente das encostas das montanhas se eleva e o ar mais frio desce. À noite, a direção dos ventos é revertida e o ar frio das montanhas desce e se concentra nos vales.

A velocidade e a direção do vento variam continuamente no tempo. Portanto, para efetivar o aproveitamento energético de um determinado local ou região é primordial a realização de análise e estudos por um longo período de tempo. Esses estudos permitirão realizar análise qualitativa e técnica do comportamento, evitando a imprecisão de resultados e o êxito do projeto.

2.1.1.1 Fatores que influenciam o regime dos ventos

Para o êxito da implementação da tecnologia dos sistemas eólicos e obtenção de bons rendimentos financeiros de forma segura, é preciso conhecer as informações relativas ao histórico da velocidade média do vento do local de instalação.

A velocidade do vento modifica de acordo com a localização geográfica e a altitude, podendo haver alterações instantâneas, diárias, sazonais e anuais. Construções (edifícios, pontes, ou quaisquer outros monumentos de grande porte) também podem afetar consideravelmente o fluxo dos ventos e comprometer a eficiência da produção de energia elétrica ao longo do ano (SATO, 2015; ALDABÓ, 2002).

Uma das condições primordiais para a transformação da energia contida no vento em energia elétrica é a existência de um fluxo constante e uma velocidade mínima do vento, fatores que interferem diretamente no comportamento estatístico do vento.

Além disso, as características topográficas de uma região e a rugosidade do solo também influenciam consideravelmente no comportamento dos ventos gerando variações de velocidade, ou seja, a redução ou aceleração na velocidade do vento. Pode-se ainda acrescentar que a velocidade do vento pode variar também de acordo com a altura (CRESESB, 2010).

Portanto, levando em consideração que a velocidade do vento pode variar significativamente em curtas distâncias, os procedimentos para avaliar o local de instalação do sistema eólico, devem levar em consideração todos os parâmetros regionais que possam influenciar nas condições do vento.

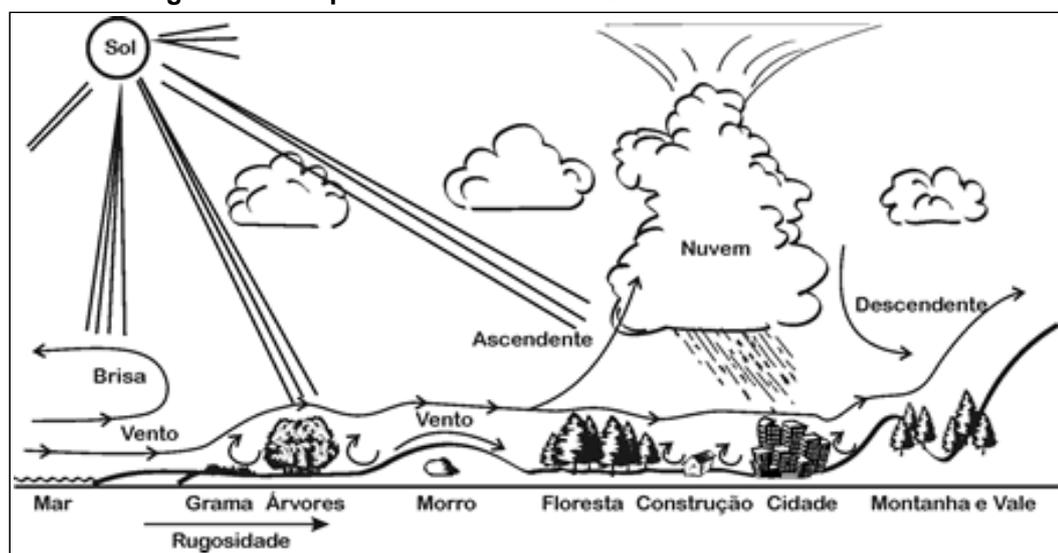
Dentre os principais fatores que interferem diretamente no regime dos ventos (CRESESB, 2010) destaca:

- a) a variação da velocidade com a altura;
- b) a rugosidade do terreno, que é caracterizada pela vegetação, utilização da terra e construções;
- c) presença de obstáculos nas redondezas;
- d) relevo que pode causar efeito de aceleração ou desaceleração no escoamento do ar.

As informações necessárias para traçar um panorama das condições regionais podem ser obtidas utilizando mapas topográficos ou ainda, através de visitas presenciais na área em estudo, a fim de avaliar e modelar a rugosidade e os obstáculos. Além disso, imagens aéreas e dados de satélite podem contribuir de forma significativa para uma análise mais elaborada.

A figura 7 mostra o comportamento dos ventos sob a influência das características da superfície do solo:

Figura 7 - Comportamento do vento sob a influência do relevo



Fonte: CEPEL (1998).

2.1.1.2 Energia e potência retirada do vento

Compreende-se como Energia Eólica o processo de transformação do vento em energia cinética e posteriormente em energia elétrica a partir do uso de equipamentos específicos.

Com o intuito de viabilizar a implementação da energia eólica, é relevante considerar as variações de velocidade do vento entre os lugares. Nesse sentido, ao levar em consideração um local para a instalação de uma turbina eólica, a realização de uma avaliação da quantidade e qualidade do recurso eólico é de fundamental importância.

Portanto, ao propor a instalação de aerogeradores torna-se extremamente relevante que se saiba a quantidade de energia produzida pelo vento do local ou região, a fim de ter o máximo aproveitamento dos ventos.

O cálculo da potência da turbina eólica é para se saber qual tipo de velocidade que pode trazer um retorno mais rápido do investimento feito para esse tipo de energia.

De acordo com Castro (2009), a existência de um fluxo permanente e de força apropriada é condição primordial para o aproveitamento da energia proveniente do vento. Vale acrescentar que as turbinas usadas atualmente nos sistemas de energia eólica são projetadas para alcançar a potência máxima utilizando ventos com velocidades de 10 a 15 m/s.

O referido autor preconiza ainda que a energia necessária para uma turbina eólica é a energia cinética associada a uma coluna de ar que se desloca a uma velocidade uniforme e constante $u(m/s)$. A coluna de ar, ao atravessar a seção plana transversal $A(m^2)$ do rotor da turbina, desloca uma massa $\rho Au(kg/s)$, em que ρ é a massa específica do ar $\rho = 1,225 Kg/m^3$ em condições de pressão e temperatura normais).

Sendo assim, a energia cinética do vento (m) a uma velocidade (v) é determinada pela equação 1:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Enquanto a potência do vento pode ser determinada utilizando a equação 2:

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

Onde P = potência do vento [W] ρ = massa específica do ar [kg/m³] A = área da seção transversal [m²] e v = velocidade do vento [m/s]

A equação 2 demonstra o quanto a potência do vento disponível está intrinsecamente ligada à sua velocidade.

De acordo com Nogueira e Souza (2012), o cálculo da potência eólica, em função da velocidade do vento $[p(v)]$, pode ser desenvolvida por:

$$A + Bv + Cv^2 \text{ para } v_i \leq v \leq v_n$$

$$p(v) = \{P_n\} \text{ para } v_n \leq v \leq v_f$$

$$0v > v_f$$

Sendo:

$$A = P_n * v_i \left[\frac{v_n - 2v_n \left(\frac{v_i}{v_n} \right)^3}{2(v_n - v_i)^2} \right]$$

$$B = P_n \left[\frac{v_n - 3v_i + 4v_i \left(\frac{v_i}{v_n} \right)^3}{2(v_n - v_i)^2} \right]$$

$$C = P_n \left[\frac{1 - 2 \left(\frac{v_i}{v_n} \right)^3}{2(v_n - v_i)^2} \right] \quad (3)$$

Onde:

P_n é a potência elétrica nominal, W;

v_i é a velocidade inicial do vento, onde se inicia a geração de energia, ms⁻¹;

v_n é a velocidade nominal do vento, a partir da qual a geração é constante;

v_f é a velocidade final do vento, quando a geração é interrompida, ms⁻¹;

Vale acrescentar, que com a redução da velocidade de deslocamento da massa de ar, a energia cinética do vento é transformada em energia mecânica a partir da rotação das pás do aerogerador. Na conversão da energia cinética em energia elétrica, não é possível obter um aproveitamento da totalidade da potência disponível no vento.

Na equação abaixo os valores de V_{\min} e V_{\max} correspondem aos limites das velocidades de vento analisadas.

$$P_{med} = \sum_{v_{min}}^{v_{max}} p(v) * f(v) \quad (4)$$

As funções $p(v)$ e $f(v)$ são, respectivamente, a curva de potência da turbina eólica e a distribuição de Weibull dos dados de vento coletados.

Desta forma, os valores de $p(v)$ terão potências elétricas em razão de cada velocidade de vento em análise, da mesma forma $f(v)$ assumirá valores da probabilidade de ocorrência deste mesmo valor de velocidade de vento. O somatório do produto destas funções é a potência média gerada pelo aerogerador.

A equação apresentada abaixo é utilizada para realizar o cálculo da potência média gerada pela turbina eólica:

$$P_{med} = \int_{V_{min}}^{V_{max}} p(v) * f(v) dv \quad (5)$$

A energia elétrica diária produzida pelo aerogerador é definida pelo produto da potência média gerada e o intervalo de tempo em que o aerogerador ficou em funcionamento.

Portanto, é possível afirmar que se a energia elétrica produzida pela turbina eólica for maior que a demanda de consumo, o aerogerador é viável tecnicamente (CASTRO, 2007).

2.1.1.3 Distribuição de Weibull

Ao propor a implementação de sistemas eólicos é necessário levar em consideração as características do vento, já que é do vento que provém a força necessária para movimentar os aerogeradores e gerar energia elétrica.

Para caracterizar o vento de uma determinada região utiliza-se sistemas probabilísticos que reproduzem estatisticamente os dados coletados pela estação

meteorológica. Esses sistemas são primordiais no dimensionamento do sistema eólico e na escolha do local apropriado para a sua instalação.

Vale ressaltar que a determinação do potencial eólico só pode ser considerado confiável se os dados forem coletados por um período relativamente longo de tempo, já que, ao longo do ano, ocorre uma grande variação no regime dos ventos que sofrem alterações instantâneas, diárias, sazonais e anuais (TROEN; PETERSEN, 1989).

De acordo com Burton (2001), nas últimas décadas, alguns sistemas de distribuição de probabilidade foram utilizados na avaliação eólica, sendo a de Weibull a mais adequada para essa função.

A distribuição de Weibull permite representar as frequências de velocidade do vento de uma forma simples e compacta. A densidade de probabilidade definida pela distribuição de Weibull é representada na equação abaixo:

$$f(u) = \frac{k}{A} \left(\frac{u}{A} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{u}{A} \right)^k \right) \quad (6)$$

Nessa equação $f(u)$ é a frequência de ocorrência da velocidade do vento u (ms^{-1}); k é o parâmetro forma e A é o parâmetro de escala da distribuição.

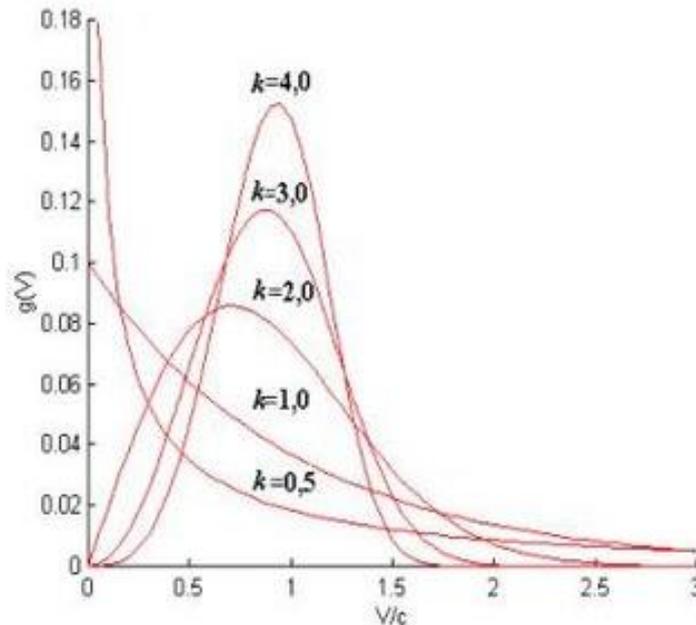
Vale acrescentar que o fator A depende fundamentalmente da velocidade média do vento. Esse fator representa a escala de distribuição de Weibull, revelando a grande diversidade de ocorrências de velocidade de vento (MOURA et al., 2004).

Em se tratando do fator k , é possível afirmar que é o fator adimensional de forma da distribuição de Weibull, representando uma medida inversa da oscilação da velocidade do vento, aproximadamente a velocidade média.

Neste contexto, o fator k será uma medida inversa à turbulência, ou seja, quando a velocidade do vento for constante, a turbulência será mínima e, concomitantemente, o fator k terá valores maiores. No entanto, é preciso considerar que quanto maior for a variação do vento, maior será a turbulência, o que faz com que os valores para k sejam mínimos (LIMA; SILVA; VIEIRA, 2008).

A figura 8 demonstra a variação dos valores de k para o fator A fixo:

Figura 8 - Distribuição de Weibull para diferentes valores de k.



Fonte: MOSS et al., 2001

Atualmente, com o desenvolvimento de novas e modernas tecnologias, vários programas podem ser utilizados para a geração de um modelo probabilístico a fim de realizar a análise estatística de dados de ventos. Para o presente estudo utilizou-se o Excel o qual utiliza uma linguagem de programação própria e funções que realizam a distribuição de *Weibull*, mostrando graficamente seus resultados.

2.1.2 Potencial Eólico Brasileiro

Mais altos níveis, menor variação interanual e um sistema interligado de distribuição fazem do Brasil um candidato natural a liderar no uso da energia solar.

A alta performance dos ventos é uma das razões que colocam o país entre os maiores geradores mundiais. Unidirecionais, constantes, velozes e com pouca turbulência, os ventos brasileiros estão entre os melhores do mundo nesses critérios e são ideais para girar as pás eólicas com mais intensidade, possibilitando aproveitamento máximo dos aerogeradores, bem como maior geração de eletricidade (ABEEÓLICA, 2019; GWEC, 2019). A Figura 9 mostra as principais características dos ventos brasileiros.

Figura 9 – Ventos Brasileiros



Fonte: Echoenergia (2020).

O potencial eólico brasileiro para aproveitamento energético tem sido objeto de estudos e inventários desde os anos 1970 e o seu histórico revela o lento, mas progressivo descortinamento de um potencial energético natural de relevante magnitude existente no país.

Nas últimas décadas muitas pesquisas à nível nacional e regional tem sido realizadas, a fim de avaliar o potencial eólico brasileiro, trazendo resultados bastante precisos.

Atualmente, o MesoMap é um dos estudos de referência em se tratando de energia eólica brasileira. Este estudo mostra valores relevantes sobre a velocidade e densidade dos ventos em todo o território brasileiro.

Para gerar dados confiáveis e úteis os estudos utilizam vários bancos de dados considerados de qualidade adequada para delinear os parâmetros necessários como a velocidade do vento, rugosidade, densidade do ar e dados meteorológicos e sobre o relevo.

O Brasil possui um histórico favorável à energia renovável e apesar de haver divergências entre especialistas e instituições na estimativa do potencial eólico brasileiro, inúmeros estudos apresentam valores bastante consideráveis (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

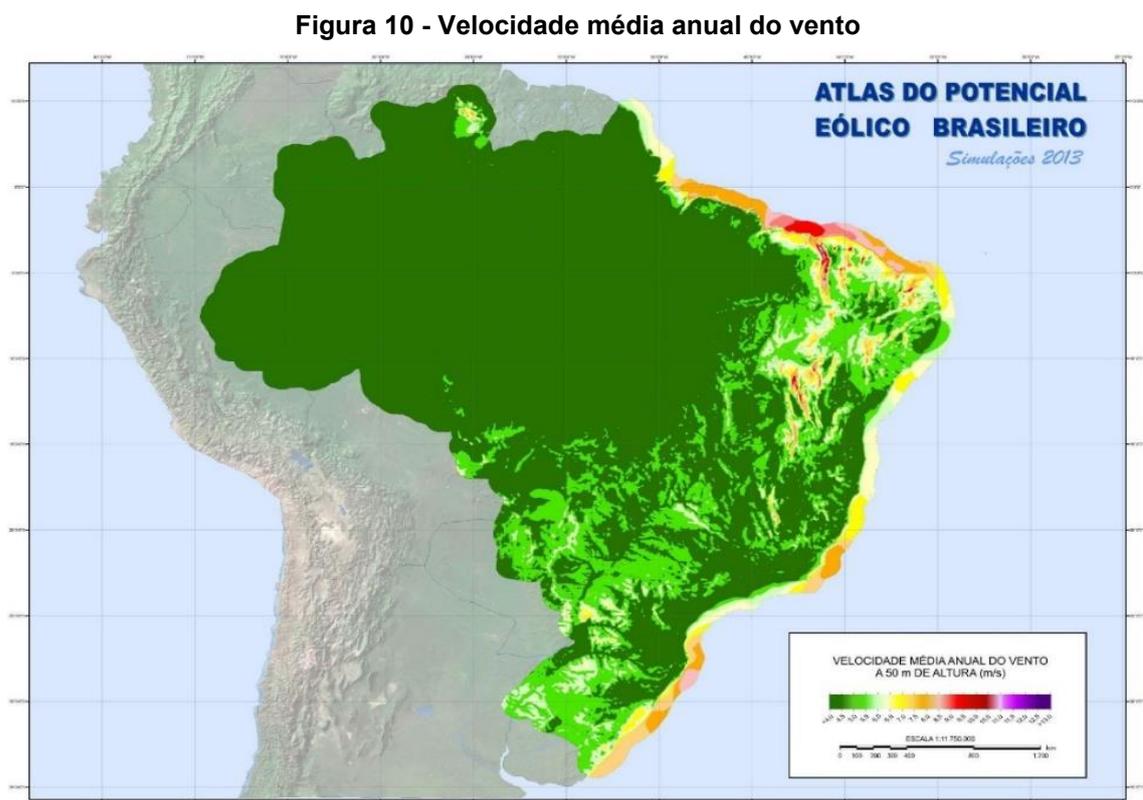
Mais de 71 mil km² do território brasileiro apresentam ventos com velocidade superior a 7 m/s ao nível de 50 m de altura, o que possibilitaria a produção

equivalente a 272 TWh/ano, ou seja, aproximadamente 64% do consumo nacional de energia elétrica.

Esse potencial de produção de energia eólica concentra-se sobretudo na região Nordeste do país em, em seguida, da região Sul, como pode ser observado no Atlas do Potencial Eólico Brasileiro publicado em 2013.

O atlas do Potencial Eólico Brasileiro, foi criado pelo CRESEB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito) em parceria com o CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica), objetivando fornecer informações relevantes para auxiliar na capacitação de empreendedores e investidores na identificação de áreas adequadas para aproveitamento das forças dos ventos, em todo território nacional, para a produção de energia elétrica.

Na Figura 10 é apresentado um mapa temático dos ventos, do qual se pode observar visualmente o perfil de ventos em cada região do país.



Fonte: Cepel (2013).

Como se percebe pelos estudos realizados ao longo das últimas décadas, o Brasil possui um alto potencial eólico, sobretudo nas regiões sudeste, nordeste e sul do país viabilizando a implementação de sistemas eólicos para a geração energia elétrica.

No entanto, por falta de investimentos e incentivos, ou pelo alto custo de instalação dos sistemas eólicos, o aproveitamento desse potencial ainda é irrisório se comparado à capacidade total do país, apesar de representar uma relevante fonte de complementação à energia hidroelétrica, da qual o Brasil é estreitamente dependente.

A tabela 1 corrobora para demonstrar que os dados apresentados no mapa eólico acima, são favoráveis para a produção de energia eólica, principalmente, nas regiões nordeste e sul, onde a constância e velocidade média dos ventos está em torno de 6 e 8 m/s, ou seja, velocidade compatível com o funcionamento das turbinas eólicas.

Tabela 1 – Cálculo do potencial eólico-elétrico do Brasil

Região	INTEGRAÇÃO POR PARCIAIS DE VELOCIDADES					INTEGRAÇÃO CUMULATIVA			
	Vento [m/s]	Área [k/m]	Potência instalável [Gw]	Fator de Capacidade	Energia Anual [TW/ano]	Vento [m/s]	Área Cumulativa [k/m]	Potência Instalável [GW]	Energia Anual [TW/ano]
Norte	6-6,5	11460	22,92	0,13	25,58	>6	24206	48,41	70,49
	6,5-7	6326	12,65	0,17	18,46	>6,5	12746	25,49	44,91
	7-7,5	3300	6,6	0,2	11,33	>7m/s	6420	12,84	26,45
	7,5-8	1666	3,33	0,25	7,15	>7,5	3120	6,24	15,11
	8-8,5	903	1,81	0,3	4,65	>8	1454	2,91	7,96
	>8,5	551	1,1	0,35	3,31	>8,5	551	1,1	3,31
Nordeste	6-6,5	146589	293,18	0,13	327,19	>6	245105	490,21	649,5
	6,5-7	60990	121,98	0,17	178,02	>6,5	98516	197,03	322,31
	7-7,5	24383	48,77	0,2	83,73	>7m/s	37526	75,05	144,29
	7,5-8	9185	18,37	0,25	39,43	>7,5	13143	26,29	60,56
	8-8,5	3088	6,18	0,3	15,91	>8	3958	7,92	21,13
	>8,5	870	1,74	0,35	5,23	>8,5	870	1,74	5,23
Centro-oeste	6-6,5	41110	82,22	0,13	91,76	>6	50752	101,5	120,83
	6,5-7	8101	16,2	0,17	23,65	>6,5	9642	19,28	29,07
	7-7,5	1395	2,79	0,2	4,79	>7m/s	1541	3,08	5,42
	7,5-8	140	0,28	0,25	0,6	>7,5	146	0,29	0,63
	8-8,5	6	0,01	0,3	0,03	>8	6	0,01	0,03
	>8,5	0	0	0,35	0	>8,5	0	0	0
Sudeste	6-6,5	114688	229,38	0,13	255,99	>6	175859	351,72	446,07
	6,5-7	46302	92,6	0,17	135,15	>6,5	61171	122,34	190,08
	7-7,5	11545	23,09	0,2	39,64	>7m/s	14869	29,74	54,93
	7,5-8	2433	4,87	0,25	10,44	>7,5	3324	6,65	15,29
	8-8,5	594	1,19	0,3	3,06	>8	891	1,78	4,84

INTEGRAÇÃO POR PARCIAIS DE VELOCIDADES						INTEGRAÇÃO CUMULATIVA			
Região	Vento [m/s]	Área [km²]	Potência [MW]	Fator de Capacidade	Energia [TWh]	Vento [m/s]	Área Cumulativa	Potência [MW]	Energia [TWh]
	>8,5	297	0,59	0,35	1,78	>8,5	297	0,59	1,78
	6-6,5	121798	243,6	0,13	271,86	>6	171469	342,94	424,74
	6,5-7	38292	76,58	0,17	111,77	>6,5	49671	99,34	152,88
	7-7,5	9436	18,87	0,2	32,4	>7m/s	11379	22,76	41,11
	7,5-8	1573	3,15	0,25	6,75	>7,5	1943	3,89	8,71
	8-8,5	313	0,63	0,3	1,61	>8	370	0,74	1,95
Sul	>8,5	57	0,11	0,35	0,34	>8,5	57	0,11	0,34
						>6	667391	1334,78	1711,62
						>6,5	231746	463,49	739,24
					Total Brasil Estimado	>7m/s	71735	143,47	272,2
						>7,5	21676	43,35	100,3
						>8	6679	13,36	35,93
						>8,5	1775	3,55	10,67

Fonte: CEPEL (2001).

Neste contexto, é possível afirmar que a energia eólica é uma alternativa eficaz para diversificar a matriz elétrica brasileira e, conseqüentemente, possibilitar maior segurança ao setor.

Sendo assim, torna-se de extrema relevância que, frente ao aumento constante da demanda por energia elétrica, o Brasil realize investimentos nas tecnologias limpas ao invés de optar por fontes não renováveis que provocam impactos socioambientais bastante agressivos.

2.1.3 Geração de Energia Eólica

A transformação da energia disponível nos ventos em energia elétrica é efetuada utilizando um equipamento conhecido como aerogerador ou turbina eólica, os quais possuem hélices que se movem com a força dos ventos.

Em um primeiro momento a energia cinética do vento é transformada em energia mecânica e, posteriormente, em energia elétrica.

A geração de energia elétrica é realizada através da transformação da energia cinética contida nas massas de ar em movimento ou vento em energia mecânica através do uso de uma turbina eólica conhecidas como aerogeradores. A energia mecânica gerada a partir da rotação da turbina aciona um gerador de

energia elétrica através de um eixo, gerando eletricidade por meio de indução eletromagnética originando a corrente alternada.

Os aerogeradores podem ser instalados de forma individual, quando se requer produção de energia em pequena escala, ou em conjunto.

De acordo com Melo (2013), os sistemas de geração de energia eólica podem ter três aplicações:

- a) **sistemas isolados:** aqueles considerados de pequeno porte, utilizados para abastecer determinadas regiões onde não há viabilidade de implementação de uma extensão da rede elétrica;
- b) **sistemas híbridos:** são aqueles que utilizam mais de uma fonte para a geração de energia, como é o caso das turbinas eólicas e painéis fotovoltaicos, entre outras fontes. Estes sistemas, normalmente, são utilizados para atender a demanda de vários usuários;
- c) **sistemas interligados à rede:** são aqueles que possuem uma grande quantidade de aerogeradores, como nos parques eólicos, sendo que toda a energia produzida é enviada diretamente à rede elétrica.

Em se tratando de geração de energia eólica, vale lembrar que a utilização desta fonte de energia na geração de eletricidade depende principalmente da velocidade do vento. O rendimento de um sistema eólico é calculado a partir da velocidade do vento, portanto pequenas oscilações de velocidade podem contribuir efetivamente para mudanças consideráveis no desempenho efetivo do sistema.

Nesse contexto, é de fundamental importância a realização de estudos sobre o comportamento do vento, em especial sobre sua velocidade e direção, para, a partir destas informações determinar o tipo de aerogerador e o local adequado para sua instalação.

Para uso em escala industrial e comercial de grande porte, o modelo de aerogerador mais utilizado é o de rotores com três pás instalados sobre uma torre tendo o formato de cata-vento vale acrescentar que esse modelo de aerogerador, normalmente, é parte integrante de parques. Os componentes dos aerogeradores são apresentados na Figura 11.

Figura 11 – Componentes do gerador eólico



Fonte: CBIE (2020).

A composição e funcionamento dos minigeradores não se diferenciam das grandes turbinas eólicas. Esse tipo de aerogerador pode ter eixo vertical e horizontal e são utilizados para a produção de energia eólica para uso residencial, em pequenas empresas ou pequenos parques eólicos.

Vale acrescentar que os aerogeradores de eixo horizontal normalmente possuem mais eficiência e são mais comuns no mercado. No entanto, os sistemas de eixo vertical são menos barulhentos e integram-se com mais facilidade as edificações (INSTITUTO IDEAL, 2014).

Segundo a Resolução Normativa REN 482/2012 da ANEEL, recentemente alterada pela REN 687/2015, são considerados micro e minigeradores eólicos os sistemas de geração de energia elétrica a partir da força dos ventos com potência suficiente para produzir eletricidade para o abastecimento de pequenos consumidores, sendo microgeradores os sistemas com potência igual ou de até 75 KW, e minigeradores, acima de 75 KW e até 5MW.

Em se tratando de minigeradores eólicos, Magalhães (2009, s/p.), afirma que:

O micro e minigerador eólico são formados por um rotor, composto de duas, três ou mais pás, que são responsáveis pela captura e transmissão da força mecânica dos ventos. Para o uso de geração em pequena escala são utilizados os aerogeradores de pequeno porte: de eixo horizontal, que possuem maior eficiência e são mais comumente encontrados no mercado.

Vale ressaltar que, para a utilização em áreas urbanas, o ideal é utilizar as turbinas verticais, projetadas especialmente para estas áreas, sendo de fácil manutenção e podendo ser instaladas em qualquer lugar, nos telhados ou em terra firme.

Atualmente, as pessoas que buscam alternativas de produção de energia doméstica ecologicamente correta, podem fazer uso da tecnologia das turbinas eólicas, dispondo de modelos específicos para essa finalidade, sendo necessário apenas realizar pesquisa de preços e de marcas disponíveis que melhor se adequem para cada residência ou pequena empresa.

A energia renovável residencial contribui efetivamente para amenizar os problemas ambientais enfrentados atualmente pela humanidade. É possível encontrar no mercado, sistemas completos e integrados que possibilitam a produção de energia elétrica utilizando diferentes intensidades de ventos, ou seja, ventos fortes ou fracos (LIMA, 2020).

2.1.3.1 Sistemas eólicos de pequeno porte

Os sistemas eólicos de pequeno porte ou de baixa potência contribuem significativamente no fornecimento de energia elétrica, sendo úteis onde há vento o suficiente e espaço adequado para sua instalação.

São considerados sistemas eólicos de pequeno porte aqueles utilizados para o abastecimento de energia elétrica em residências e pequenas empresas.

De acordo com o Instituto Ideal (2014), em se tratando de projetos de pequeno porte, os sistemas eólicos são instalados mais próximos do solo, devendo ser analisado o terreno antes da definição do local de instalação.

Desta forma, esses sistemas são instalados mais próximos ao solo, geralmente possuindo entre 10 e 40 metros, portanto o entorno da edificação precisa ser minuciosamente analisado antes de definir o local para sua implementação identificando obstáculos que possam influenciar no comportamento dos ventos.

As turbinas dos aerogeradores de pequeno porte funcionam com ventos de 3 a 25 m/s, acima desta velocidade os componentes do gerador atuam com sobrecarga e abaixo a geração de energia fica comprometida.

O aerogerador com rotor em eixo horizontal (Figura 12) possui três ou mais pás, é o mais eficiente entre todos os tipos de microgeradores eólicos quando opera em condições de vento sem muitas mudanças de direção. Por não conter um sistema de controle das pás ou eixo interno, pode ser mais ruidoso que outros modelos, além de ser inadequado para locais com ventos turbulentos.

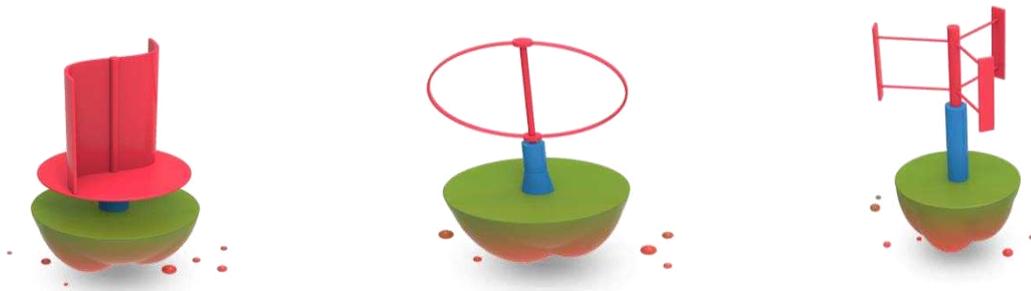
Figura 12 - Rotor horizontal



Fonte: Instituto Ideal (2014).

Os principais tipos de turbinas eólicas de eixo vertical de pequeno porte, encontrados no mercado com custos-benefícios atrativos para instalação em residências, são: Savônus e Darrieus, Apresentados na Figura 13.

Figura 13 – Rotores tipo Savônus (a), Darrieus (b) e H-Darrieus (c)



(a)

(b)

(c)

Fonte: Instituto Ideal (2014).

O aerogerador com rotor Savônus (Figura 13 (a)) tem eixo vertical e pás arqueadas. Está disponível no mercado em níveis de potências maiores, sendo aplicável em áreas urbanas, alguns modelos são extremamente ruidosos e

normalmente precisam de um sistema de aceleração inicial e, geralmente, é mais caro que outros tipos.

O aerogerador com rotor Darrieus (Figura 13 (b)), tem eixo vertical e pás arqueadas. Esse sistema está disponível em níveis de potências maiores, sendo aplicável em áreas urbanas, alguns modelos são ruidosos, sendo que normalmente precisam de um sistema de aceleração inicial.

O aerogerador com rotor H-Darrieus, tem eixo vertical e pás verticais posicionadas em paralelo. Esse sistema é mais eficiente que o tipo Darrieus, apresenta modelos com motores sem núcleo não necessitando de sistema de aceleração inicial e é muito silencioso. Uma imagem desse aerogerador é mostrada na Figura 13 (c).

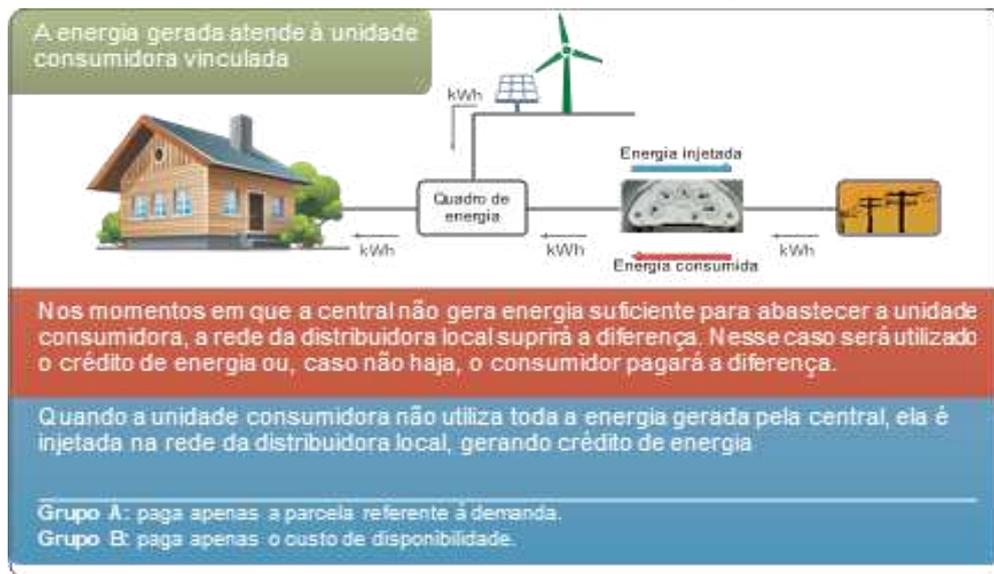
Neste contexto, Faria (2010) preconiza que, ao optar por um sistema eólico, para escolher o aerogerador adequado é preciso analisar as condições do vento no local da instalação, ou seja, é preciso identificar a velocidade mínima de vento para o funcionamento do microgerador eólico, em qual velocidade de vento ele alcança a potência nominal e em que velocidade (máxima) de vento ele desliga.

Portanto é preciso analisar as premissas para a efetividade do sistema, realizar uma boa pesquisa de mercado e estudo de instalação e conexão, especificando o tipo e modelo do aerogerador, do inversor, da estrutura de suporte e o quanto de demanda energética é necessário. Para tanto, a pesquisa no mercado é de suma importância para a instalação e conexão à rede de um micro ou minigerador eólico.

A partir da regulamentação da ANEEL, dada pela Resolução Normativa nº 414/2010, permitindo a injeção de energia na rede em troca de créditos em KW/h na conta de energia, a geração descentralizada de energia tornou-se viável economicamente para consumidores de praticamente todo Brasil.

Portanto, quando a geração de eletricidade for maior que o consumo a energia excedente é automaticamente injetada na rede, gerando uma compensação, em KW/h, da distribuidora, assim o consumidor paga somente o valor da diferença entre a energia consumida da rede pública e o que foi gerado e injetado na rede, mais a incidência de impostos sobre toda a energia consumida. A Figura 14 apresenta um diagrama possíveis fluxos da energia gerada em sistema de compensação.

Figura 14 - Sistema de compensação de energia elétrica



Fonte: Aneel (2016).

De acordo com os pressupostos da Aneel (2010), o ideal é que a geração de energia elétrica dos sistemas de pequeno porte seja em torno de 90% do consumo total, evitando geração de energia além do necessário, minimizando o investimento.

Neste contexto, o sistema de compensação de energia, instaurado pela legislação energética vigente, compensa o fator negativo da produção de energia eólica relativo à inexistência de ventos com velocidade e constância adequadas, viabilizando não apenas economicamente, mas tecnicamente a implementação da energia eólica residencial e comercial de pequeno porte.

2.1.3.2 Vantagens e desvantagens da energia eólica

Nas últimas décadas a energia eólica tem assumido um lugar de destaque na produção de energia elétrica por apresentar numerosas vantagens se comparada às outras formas de energia tradicionalmente utilizadas.

Em se tratando de vantagens a energia eólica destaca-se pôr se tratar de uma fonte de energia limpa, renovável e fonte energética inesgotável, além da sua contribuição ambiental, por não emitir poluentes, ou seja, gases de efeito estufa que contribuem efetivamente para o aquecimento global, nem gerar resíduos ao gerar energia elétrica.

Segundo pesquisa realizada pela Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA, 2019), a implementação de energia eólica contribuiu para evitar a

emissão de 22,85 milhões de toneladas de gás carbônico (CO₂) na atmosfera terrestre. Além disso, a implementação da energia eólica contribui para o crescimento da economia da região, aumentando a geração de empregos e tem ótima rentabilidade de investimento, tendo um sistema durável e que exige pouca manutenção.

O investimento em geração de energia eólica também traz benefícios para o setor governamental, pois auxilia o país a cumprir metas e acordos internacionais de sustentabilidade, além de reduzir a dependência energética de combustíveis fósseis.

Apesar das inúmeras vantagens oriundas da geração de energia eólica, também existem desvantagens significativas que devem ser levadas em consideração na sua implementação.

A principal desvantagem deste tipo de energia é que ela depende da força dos ventos, e estes apresentam variações significativas durante o ano e nem sempre atingem velocidades e densidades ideais para o seu aproveitamento energético (ABEEÓLICA, 2017).

Vale acrescentar que esses parâmetros sofrem variações anuais e sazonais, causando intermitência da geração de energia. Neste sentido, a energia eólica é considerada um tipo de energia complementar.

Apesar do desenvolvimento tecnológico e das inovações e investimentos em pesquisas, os equipamentos utilizados para a geração de energia eólica ainda apresentam um custo expressivo e não são adaptáveis a qualquer espaço, seja pelo tamanho dos equipamentos ou pelos obstáculos que se interpõem nos arredores.

Portanto, antes de optar pela geração de energia eólica é necessário realizar um minucioso estudo de viabilidade técnica e financeira, a fim de garantir a efetividade da implementação deste tipo de energia.

2.2 Sistema Tarifário Brasileiro

De acordo com a Agência Nacional de Energia – ANEEL (2008), o consumo de energia é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida da sociedade.

Este indicador nos permite acompanhar o ritmo das atividades desenvolvidas nos setores industrial, comercial e de serviços, além de fornecer

informações relevantes sobre a capacidade de aquisição de bens e serviços tecnologicamente mais avançados pela população.

Neste contexto, torna-se de extrema relevância estruturar e definir alguns conceitos que permeiam a compreensão dos parâmetros de consumidores de energia. Compreende-se como unidade consumidora o conjunto composto por instalações, equipamentos elétricos, condutores e acessórios, incluída a subestação, quando do fornecimento em tensão primária, caracterizado pelo recebimento de energia elétrica em apenas um ponto de entrega, com medição individualizada, correspondente a um único consumidor e localizado em uma mesma propriedade ou em propriedades contíguas.

As classes de consumo são as diversas classes aplicadas a cada tipo de consumidor, conforme a Resolução Normativa ANEEL n. 414/2010.

De acordo com a COPEL, unidade consumidora é compreendida como “os consumidores ou unidade consumidora de energia elétrica podem ser classificados em dois grupos distintos, ou seja, o grupo A e o grupo B”.

O grupo A é formado por unidades consumidoras que recebem energia em tensão igual ou superior a 2,3 kV ou são atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária, caracterizado pela tarifa binômica (aplicada ao consumo e à demanda faturável). No grupo A, subdividido em seis subgrupos, estão as indústrias e estabelecimentos comerciais de médio ou grande porte.

Já o grupo B caracteriza-se por unidades consumidoras que utilizam tensão inferior a 2,3 kV, com tarifa monômica (aplicável apenas ao consumo).

De acordo com prerrogativa da ANEEL (2010), os consumidores de energia estão subdivididos em quatro subgrupos:

- a) O consumidor do tipo B1 é o residencial;
- b) O consumidor rural é chamado de B2;
- c) O consumidor B3 são os demais consumidores;
- d) O consumidor B4 é a iluminação pública.

De acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica divulgado em 2020 pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE, o consumo de energia por classe apresentou redução, em relação a 2019, em cinco das oito classes, com exceção das classes residencial, rural e serviço público, como é possível observar na Figura 15:

Figura 15 – Consumo de energia elétrica em 2020



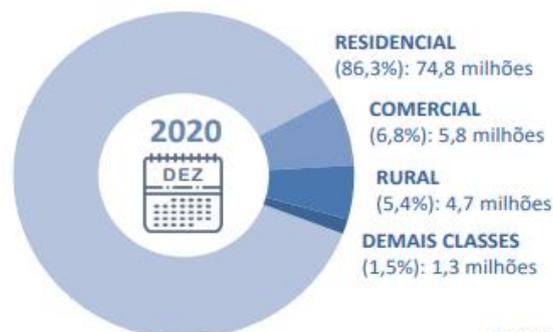
Fonte: EPE (2020).

De acordo com dados do EPE (2020) a classe residencial, a segunda maior consumidora de energia elétrica do nosso país, estando atrás apenas da classe industrial é responsável pelo consumo de 31,15% da energia elétrica enquanto a classe comercial consome 17,34% dessa energia. Portanto, a classe residencial e comercial é responsável pelo consumo de cerca de 50% do total da energia elétrica consumida em nosso país.

Levando em consideração a quantidade de consumidores por classe é possível observar que, em 2020, o consumo concentrou-se nas classes residencial (86,3%), Comercial (6,8%) e rural (5,4%), mantendo aderente à média de concentração dos últimos nove anos.

A menor taxa de variação em relação a 2019 se deu na Iluminação Pública, função da crise sanitária da Covid-19. Pelo mesmo motivo, as classes Serviço Público e Poder Público saltaram, respectivamente 6,8% e 4,3%. Já as classes como Industrial e Comercial sofreram redução de 0,6% e 0,7% também em função de efeitos econômicos da pandemia. Esses dados são visíveis na Figura 16.

Figura 16 – Consumo de energia elétrica por classe (GWh) em 2020



Fonte: EPE (2021)

Fonte: EPE (2020).

Portanto, a classe residencial representa o maior número de unidades consumidoras de eletricidade do país.

O consumo de eletricidade associado a informações populacionais permite identificar também a intensidade de uso de energia por pessoa em cada unidade federativa ou região geográfica. Por se tratar do consumo de energia elétrica total, efeitos da estrutura das economias regionais e locais podem influenciar o valor do consumo per capita da sua população. Na Figura 17 são apresentados alguns dados do ano 2020:

Figura 17 – Consumo per capita por região geográfica

	NORTE	NORDESTE	SUDESTE	SUL	CENTRO-OESTE
 População	18,8 milhões	57,5 milhões	89,3 milhões	30,3 milhões	16,6 milhões
 Consumo per capita	1.845 kWh/hab.	1.411 kWh/hab.	2.609 kWh/hab.	2.901 kWh/hab.	2.341 kWh/hab.
 UFs de destaque (kWh/hab.)	 AP: 1.171  PA: 2.235	 MA: 1.081  BA: 1.659	 RJ: 2.188  SP: 2.780	 RS: 2.588  SC: 3.593	 DF: 2.008  MT: 2.763

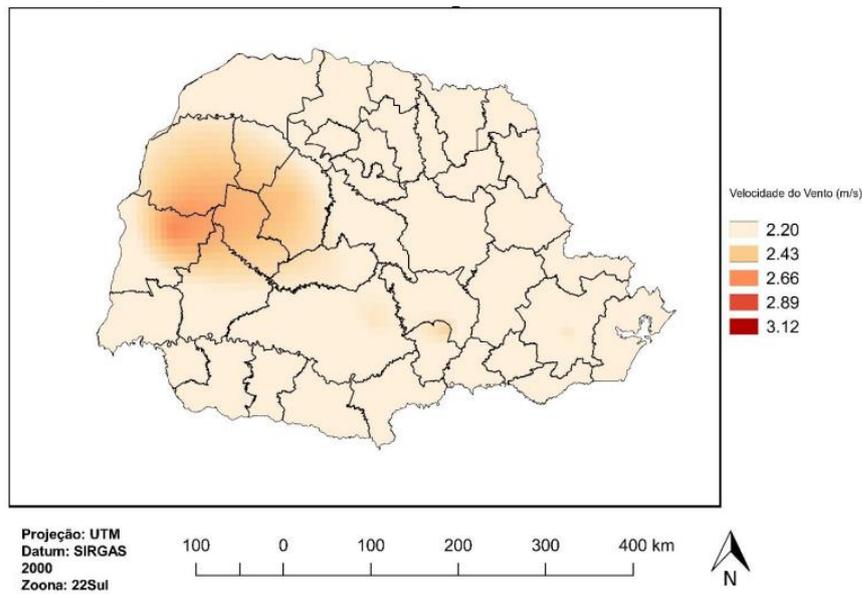
Fonte: EPE (2021).

De acordo com dados divulgados a região Sul é a líder em consumo anual per capita de energia elétrica no Brasil com 2.901 kWh por habitante. Esses dados justificam-se devido à alta concentração da indústria eletrointensiva no Centro-Sul do país, o que favorece o maior consumo per capita nessas regiões.

Além disso, de acordo com estudos realizados, o sul é uma das regiões com maior potencial eólico do Brasil, com ventos que atingem velocidades que variam entre 7 a 8 m/s, tendo, portanto, uma capacidade de produção de até 41,1 Twh/ano (EPE, 2007).

A região do Estado do Paraná, mais especificamente onde está localizada a cidade de Cascavel, é uma área privilegiada pelos bons ventos brasileiros, como pode-se observar na figura 18:

Figura 18 - Velocidade dos Ventos no Estado do Paraná

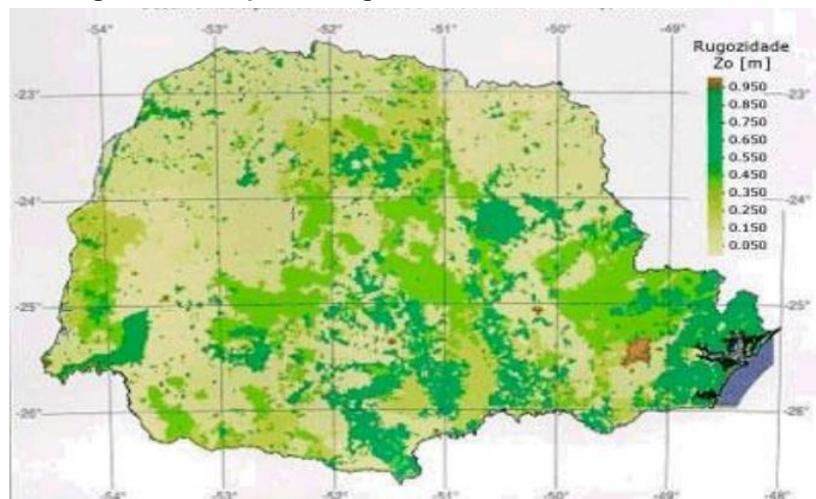


Fonte: Bailão, 2016

De acordo com Pinto (2001) existe uma grande diversidade de regimes de ventos que atuam sobre o Estado do Paraná devido, principalmente a rugosidade do relevo e das altitudes variadas dos locais onde situam-se as estações meteorológicas.

Ao observar-se o relevo do estado do Paraná, podemos observar que as áreas com incidência de ventos de maior velocidade são aquelas que apresentam rugosidade do terreno mais baixa, com exceção das áreas que abrangem a microrregião de Curitiba, localizado a sudeste do Estado, como mostra a figura 19:

Figura 19 - Mapa da Rugosidade do Estado do Paraná



Fonte: Copel, 2007.

Como pode-se perceber, a microrregião de Cascavel, está localizada em uma das melhores áreas para geração de energia eólica apresentando uma incidência de ventos com velocidades entre 2.4 m/s e 3.1 m/s.

Neste contexto pode-se afirmar que, além da região sul, em especial o Estado do Paraná e a cidade de Cascavel apresentarem uma demanda energética alta em função do desenvolvimento do setor industrial e da renda per capita da população, apresenta um alto potencial eólico aproveitável capaz de trazer mudanças expansivas no setor energético da região.

2.2.1 Característica de consumo de energia do Setor Residencial

A microgeração distribuída facilita o dimensionamento da geração da UC por dispensar estudos da curva diária de carga, bastando conhecer o seu consumo energético.

Fica dispensado conhecer a demanda instantânea de carga de cada unidade, pois essa é uma variável dependente do comportamento do consumidor, estando sensível, portanto, a diversos fatores (como os climáticos e econômicos). Fatores esses que podem interferir consideravelmente nos hábitos do consumo de energia.

Segundo a COPEL em (2020, s./p.) o volume absoluto de energia consumida pelas residências do Paraná foi de 7.910 GWh em 2020, aproximadamente um quarto de toda a energia faturada pela distribuidora.

De acordo com dados divulgados pela distribuidora, o consumo médio energético mensal residencial no Paraná em 2019 foi de 163 kWh por unidade consumidora. Conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Consumo de energia elétrica por região

	2015	2016	2017	2018	2019	Δ% (2019/2018)
Brasil	161,4	159,8	157,9	159,1	162,2	1,9
Norte	183,5	183,1	175,2	169,3	167,6	-1,0
Acre	231,7	218,5	222,9	224,3	230,5	2,8
Amapá	185,8	184,9	186,1	178,1	193,1	8,4
Amazonas	237,3	217,6	197,9	192,7	192,1	-0,3
Pará	319,5	315,1	305,9	308,7	281,1	-8,9
Rondônia	143,9	148,9	142,6	134,7	129,5	-3,8
Roraima	271,9	292,0	266,8	249,2	238,3	-4,4
Tocantins	150,7	165,7	165,9	165,4	175,8	6,3
Nordeste	120,8	121,3	119,5	120,5	125,2	3,9
Alagoas	120,8	123,7	121,9	119,1	120,9	1,5
Bahia	127,5	125,8	125,6	123,8	132,8	7,2
Ceará	125,6	130,8	126,1	129,5	130,2	0,5
Maranhão	142,9	143,7	142,5	142,2	143,2	0,7
Paraíba	114,8	115,2	115,1	116,1	122,7	5,7
Pernambuco	130,0	127,5	125,2	125,8	129,2	2,7
Piauí	114,9	105,9	109,0	112,2	144,5	28,8
Rio Grande do Norte	115,8	115,4	112,0	113,7	122,3	7,6
Sergipe	109,7	111,2	109,3	110,9	113,3	2,1
Sudeste	174,5	171,3	169,0	170,8	172,9	1,2
Espírito Santo	194,7	191,3	191,5	191,4	192,3	0,5
Minas Gerais	125,5	123,8	123,6	125,7	126,6	0,7
Rio de Janeiro	163,7	159,2	154,0	157,2	166,9	6,2
São Paulo	178,7	175,1	163,7	169,0	173,9	2,9
Sul	177,4	177,1	177,0	178,5	181,6	1,7
Paraná	161,0	157,1	160,5	160,4	163,1	1,7
Rio Grande do Sul	200,2	201,7	202,6	201,9	208,8	3,4
Santa Catarina	180,0	182,1	178,1	182,2	183,2	0,5

Fonte: EPE (2020)

Como pode-se perceber através da análise dos dados apresentados anteriormente a região sul, bem como o Estado do Paraná, apresenta um grande potencial para instalação de energias distribuídas, tanto em função da demanda de consumo de energia elétrica que vem aumentando cada vez mais devido a estruturação econômica da região quanto no que tange ao potencial eólico existente.

2.3 Categorias das Unidades Consumidoras do Grupo B

O presente estudo abrange as categorias das unidades consumidoras classificadas como grupo B. As classes de consumidores de energia elétrica estão descritas na Tabela 3, segundo ANEEL apud Neto (2010):

Tabela 3 – Classes de Unidades Consumidores

Nível de Tensão	Tipo de Consumidor	Tipo de Tarifa
B1	Residencial	Monômia Convencional
B2	Rural	Monômia Convencional
B3	Poder Público	Monômia Convencional
B4	Iluminação Pública	Monômia Convencional
A1	Geral em 230 kV	Contrato de Fornecimento
A2	Geral em 138 kV	Contrato de Fornecimento
A3	Geral em 69 kV	Contrato de Fornecimento
A4	Geral em 13,8 kV	Contrato de Fornecimento

Fonte: ANEEL apud NETO, 2010.

De acordo com o disposto na Resolução Normativa 418 (ANEEL, 2010) o grupo B, ou seja, grupo de baixa tensão, é o grupo composto de unidades consumidoras atendidas em tensão inferior a 2,3 kV, caracterizado pela tarifa monômia, ou seja, aplicável apenas ao consumo, não havendo cobrança sobre a demanda utilizada. Esse grupo é subdividido em:

- B1 – residencial;
- B2 – rural;
- B3 – demais classes; e
- B4 – Iluminação Pública.

Fazem parte do grupo B as residências, fábricas, indústrias e estabelecimentos comerciais de pequeno porte.

As condições gerais de fornecimento de energia elétrica e os critérios para a classificação das Unidades Consumidoras em grupos determinados está disposto na Resolução Normativa 414 (ANEEL, 2010). De acordo com essa normativa o grupo B caracteriza-se por unidades consumidoras atendidas em rede aérea com carga instalada inferior a 75 kW.

2.4 Fatores de Demanda e de Carga

Compreender o fator de carga e fator de demanda e a relação direta nos custos e consumo de energia elétrica é primordial, pois possibilita a previsibilidade a fim de promover uma gestão eficiente de demanda de energia das unidades consumidoras.

De acordo com a Resolução Normativa nº 414 da ANEEL, a demanda é caracterizada como a:

Média das potências elétricas ativas ou reativas, solicitadas ao sistema elétrico pela parcela da carga instalada em operação na unidade consumidora, durante um intervalo de tempo especificado, expressa em quilowatts (kW) e quilovolt-ampère-reactivo (kVAr), respectivamente.

Sendo assim, a demanda é considerada a carga elétrica requerida pelo sistema elétrico em um dado momento, podendo ser classificada em demanda máxima e demanda média.

Considera-se demanda máxima a soma da potência dos equipamentos que operam concomitantemente, ou seja, é o maior valor de demanda registrado ao longo do dia, enquanto a demanda média caracteriza-se pela média das potências elétricas requisitadas ao sistema elétrico, pela parcela da carga instalada, em operação na unidade consumidora.

O fator de demanda é a “razão entre a demanda máxima num intervalo de tempo especificado e a carga instalada na unidade consumidora.” (REN ANEEL 418, 2010)

O Fator de Demanda, determinado pela Equação 7, é a razão entre a demanda máxima ($d_{máx}$) num intervalo de tempo especificado e a carga (ou potência) instalada (P_{inst}) na unidade consumidora (ANEEL, 2010).

$$Fd = \frac{D_{max}}{P_{inst}} \quad (7)$$

Vale acrescentar que o fator de demanda, normalmente, é menor do que a unidade, assumindo um valor unitário apenas se toda a carga instalada for ligada concomitantemente por um período consideravelmente grande, tal como o intervalo de demanda. (MAMEDE, 2001)

Já o fator de carga, de acordo com a redação dada pela REN ANEEL nº 418 “é a razão entre a demanda média e a demanda máxima da unidade consumidora ocorridas no mesmo intervalo de tempo especificado.” (REN ANEEL 418, 2010)

Portanto, considera-se fator de carga a razão entre a energia ativa consumida e a energia máxima que poderia ser utilizada em um dado intervalo de tempo, sendo dado pela equação 8:

$$FC = \frac{D_{méd}}{D_{máx}}$$
$$FC = \frac{\text{Consumo de energia ativa (kWh)}}{D_{máx} (\text{kW}) \times n^{\circ} \text{ de horas}} \quad (8)$$

O fator de carga (FC) é considerado um índice adimensional variando de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo do coeficiente 1, maior será a eficiência energética da instalação, indicando que as demandas instantâneas no decorrer do dia são aproximadas da demanda máxima.

3 METODOLOGIA

3.1 Tipo de Pesquisa

A presente pesquisa científica tem abordagem bibliográfica e quantitativa. Bibliográfica pois consiste na coleta de informações a partir de textos, livros, artigos e demais materiais de caráter científico. Esses dados são usados no estudo sob forma de citações e referências, e servem de embasamento para o desenvolvimento do assunto pesquisado; e quantitativa por usar técnicas e ferramentas estatísticas como principal meio de análise dos dados obtidos.

Portanto, para a realização deste trabalho utiliza-se como metodologia a pesquisa de revisão bibliográfica, com propósito descritivo e explicativo, buscando conectar ideias para explicar aspectos relativos à produção e utilização da energia eólica, através de teorias publicadas em livros e obras de autores renomados no assunto, com o intuito de conhecer e analisar as principais contribuições teóricas existentes.

Além disso, a presente pesquisa tem abordagem qualitativa buscando principalmente verificar a possibilidade de as unidades consumidoras utilizar tecnologia de microgeração de energia, analisando a geração de energia eólica a partir das características dos ventos da região em estudo e a utilização de microgeradores de 1kW, 2kW e 3kW.

Adicionalmente a pesquisa tem caráter quantitativo, pois contou com o levantamento, coleta e estudo de dados sobre os ventos na região escolhida e sobre os equipamentos eólicos disponíveis no mercado, buscando compreender, interpretar e utilizar os conhecimentos teóricos anteriormente adquiridos para analisar a viabilidade técnica de produção de energia eólica.

A análise, classificação e interpretação dos dados é uma fase decisiva na realização de um trabalho de pesquisa. Todo o conhecimento e técnica disponível deve ser utilizada para realização desta fase.

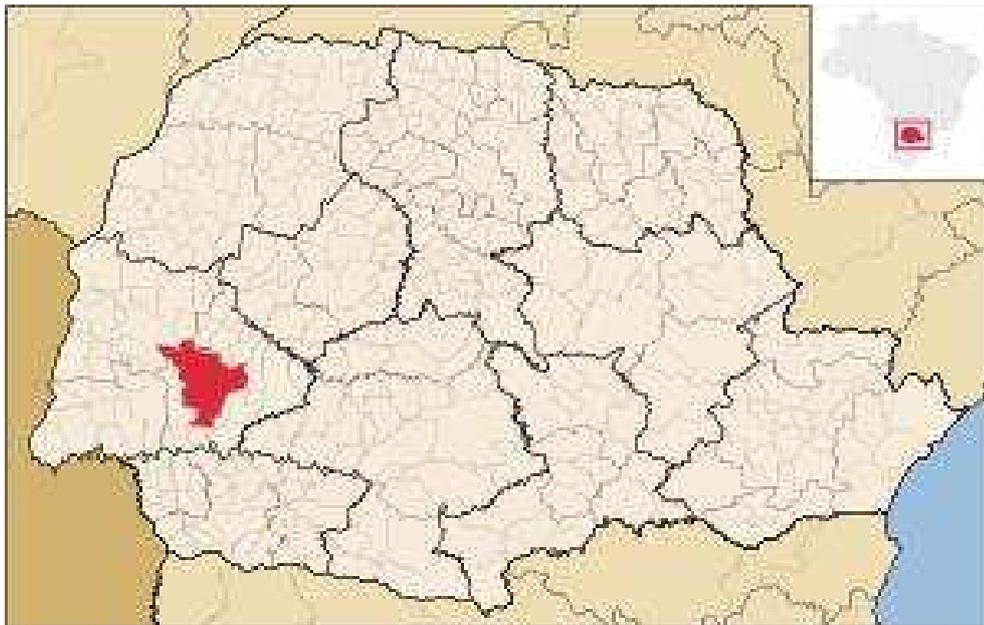
3.2 Objeto em Estudo

O objeto de estudo do presente trabalho é a viabilidade técnica de uso de microgeradores eólicos de 1, 2 e 3 kW, no município de Cascavel, no Estado do Paraná, levando em consideração as características dos ventos na região.

3.2.1 Região em Estudo

Para a realização do presente estudo utiliza-se dados relativos aos ventos do município de Cascavel, localizado no oeste do Estado do Paraná (Figura 20).

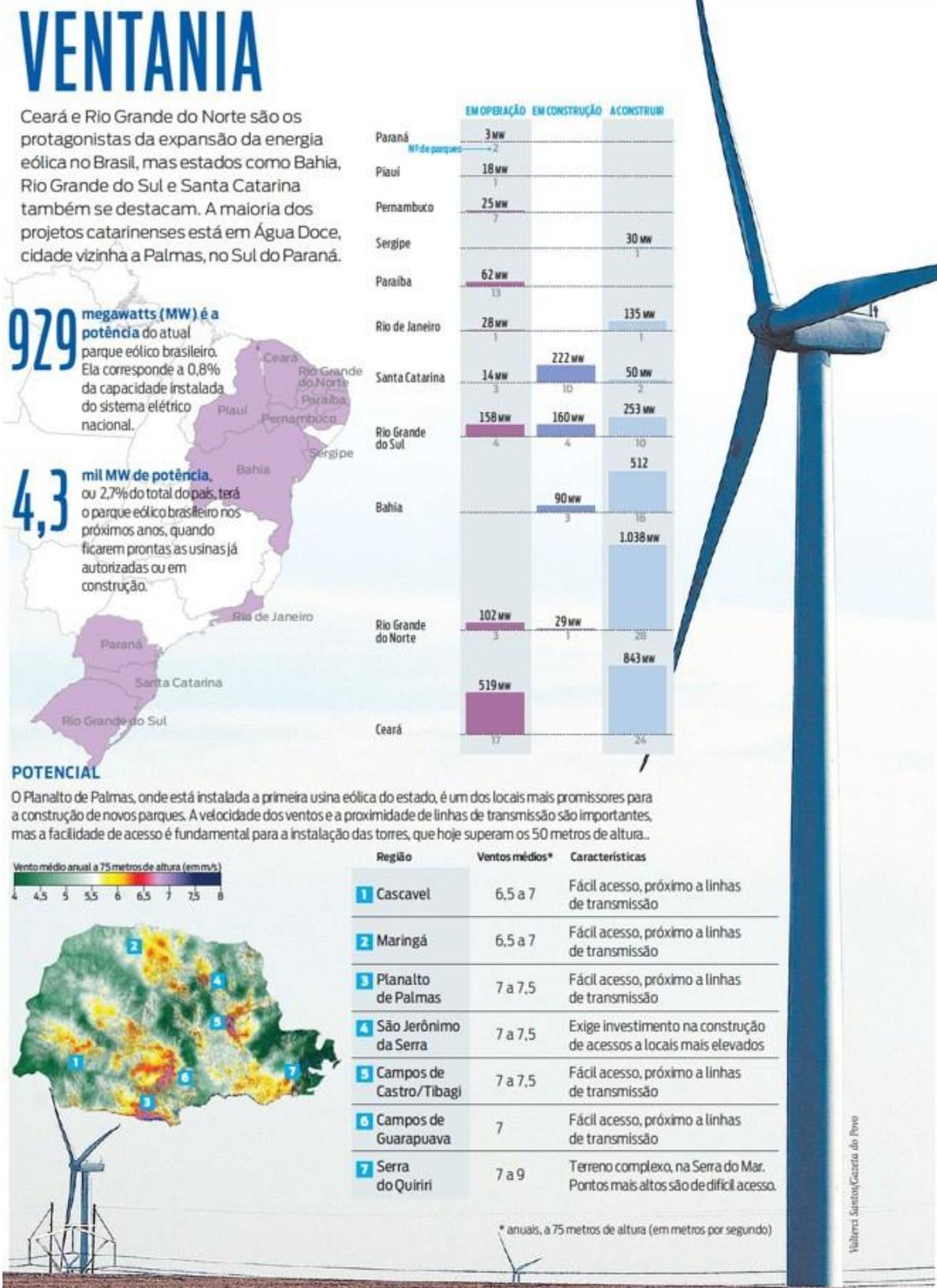
Figura 20 – Localização do município de Cascavel



Fonte: Wikipédia (2021).

A escolha da região relativa à coleta de dados deu-se em função de seu alto potencial eólico, ou seja, sua distribuição geográfica, relevo e intensidade dos ventos compatíveis com a necessidade para a geração de energia eólica, como mostra a Figura 21.

Figura 21 - Intensidade dos ventos no Estado do Paraná



Fonte: CEPEL (2013).

3.2.2 Dados de Vento

Para a realização da presente pesquisa, foram utilizados dados de ventos coletados pela estação meteorológica do SIMEPAR, situada na cidade de Cascavel.

O Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) em Cascavel, com novo radar fornecido pela empresa norte-americana EEC (*Enterprise Electronics Corporation*) representada no Brasil pela Simtech, foi inaugurado no dia 11 de abril de 2014.

Com inovações tecnológicas de ponta, o novo radar é do tipo Doppler e opera na Banda-S de frequência com dupla polarização, representando expressivo salto de qualidade na estimativa mais precisa de chuvas e vento, bem como na detecção de eventos severos como granizo, tempestades e vendavais. Sua alta resolução espacial abrange 240 quilômetros de raio no modo quantitativo e 480 quilômetros no modo qualitativo.

A figura 22 mostra a estação meteorológica do SIMEPAR localizada na cidade de Cascavel-PR.

Figura 22 – Estação meteorológica da SIMEPAR em Cascavel



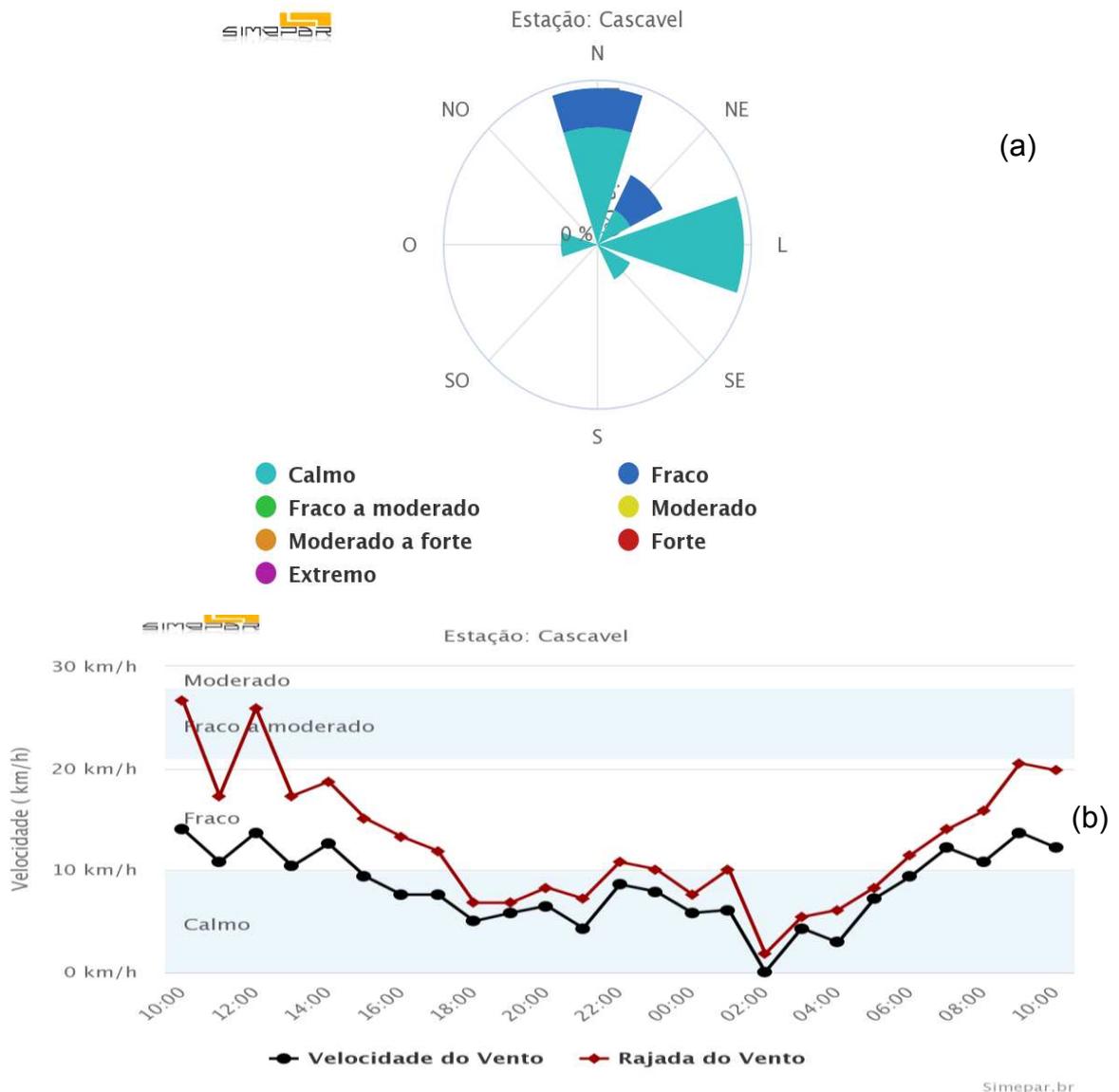
Fonte – SIMEPAR (2017).

A estação está localizada em latitude - 24.8845 e longitude - 53.5547, a uma altitude de 719 m em relação ao nível do mar. A temperatura média anual no local é 18,2° C. A pressão atmosférica no local é de aproximadamente 1012 hPa. O anemômetro utilizado para medição é da marca Young, modelo 5103, que está numa altura de 10 m em relação ao solo.

Para a caracterização da distribuição horizontal do vento nas regiões de estudo, foram utilizados os dados de direção e velocidade dos ventos observados na estação do SIMEPAR da cidade de Cascavel.

Os dados coletados podem ser representados na rosa dos ventos para Cascavel (Figura 23 (a)) e na distribuição das frequências do vento (Figura 23 (b)).

Figura 23 - Rosa dos ventos (a) e distribuição média diária dos ventos (b)



Fonte – SIMEPAR (2021).

3.2.3 Aerogeradores Seleccionados para o Estudo

Foram seleccionados 3 aerogeradores comerciais: ELV-H3.1, ELV-H3.8 e ELV-H4.6. Aerogeradores da marca Eletrovento de eixo horizontal e compostos por 3 pás cada, para Mumemori (2004) a produção de energia elétrica de um aerogerador consiste no valor absoluto de potência elétrica gerada em um intervalo de tempo de exposição e a um determinado regime de vento.

A tabela 4, apresenta os requisitos técnicos de cada modelo de aerogerador.

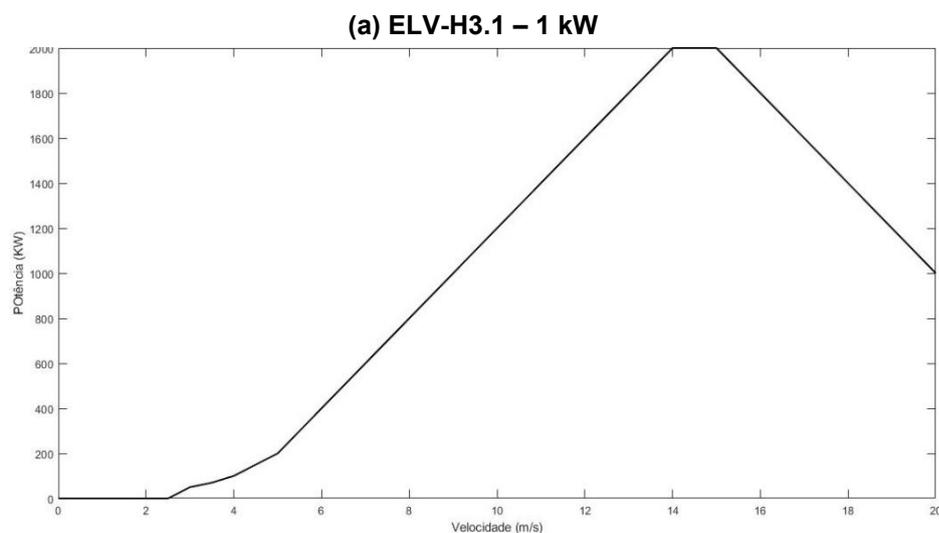
Tabela 4 - Requisitos técnicos dos aerogeradores

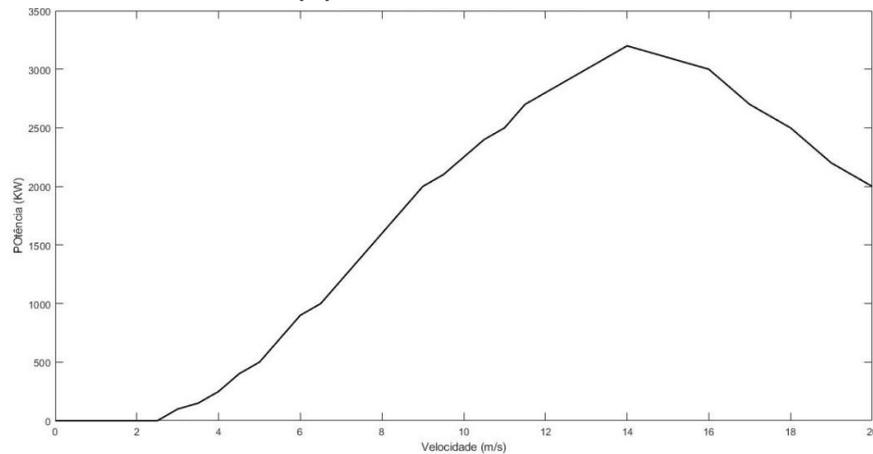
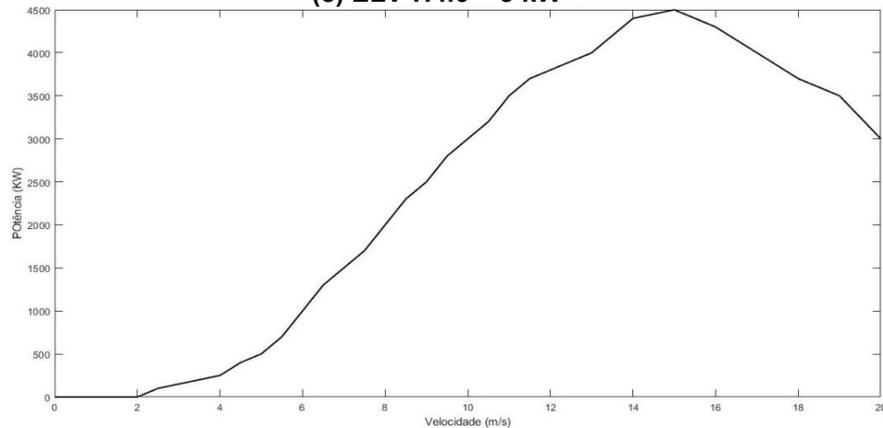
Modelos de aerogeradores	Potência Nominal(W)	Potência máxima(W)	Numero de pás	Diâmetro das Pás(m)
ELV-H3.1	1.000	2000	3	3,1
ELV-H3.8	2.000	3200	3	3,8
ELV-H4.6	3.000	4500	3	4,8

Fonte: Adaptado de Eletrovento (2021).

Para cálculo da potência média gerada das turbinas eólicas são relacionadas as suas curvas de potências, apresentadas na Figura 24.

Figura 24 – Curva de Potência das turbinas: a) ELV-H3.1 – 1kW; b) ELV-H3.8 – 2KW; e c) ELV-H4.6 – 3 KW



(b) ELV-H3.8 – 2 kW**(c) ELV-H4.6 – 3 kW**

Fonte: Adaptado de Eletrovento (2021).

3.3 Procedimento Metodológico

Os dados obtidos através das medições do SIMEPAR foram disponibilizados em planilha eletrônica contendo 26.960 dados de velocidade instantânea do vento, os valores diários possuem intervalo de 3 h, iniciando às zero horas, entre 02/01/2007 e 24/05/2016. A partir desses dados calculou-se a probabilidade de distribuição de ventos de Weibull, para os horários intermediários a fim de apresentar dados horários dos ventos separando-os em distribuições unitárias entre 3 e 15 m/s. A distribuição de Weibull realizada mostra a ocorrência das velocidades de maior frequência no local de instalação. Portanto, o aerogerador escolhido deve possuir uma curva de potência que se ajuste às velocidades de vento do local com eficiência.

A partir dos dados tratados foram calculadas: as velocidades mínima, média e máxima; energia produzida e potência da turbina (conforme equações 1 a 5).

Seguindo o relevo do Município de Cascavel, Paraná (ANEEL, 2013) estimou-se, para esse estudo, o fator rugosidade medidor de 0,4; o fator rugosidade sítio gerador de 0,5; as alturas livres arrasto (estação medidor e sítio gerador) de 2000 m e as constantes: elevadora de 2,646014837 e rebaixadora de 0,383172753.

Usando as demandas máximas por categoria das unidades consumidoras (Tabela 5) foram variados os fatores de demanda e de carga de zero a 1 usando incremento de 0,05. Dessa forma foi possível estimar a energia média mensal consumida. Vale acrescentar que os valores tomados como parâmetros para essa pesquisa seguem a recomendação da norma ISSO 90011, que define diretrizes de gestão da qualidade dos sistemas elétricos, objetivando uma maior eficiência e garantia de qualidade.

Tabela 5 – Energia Consumida por Cenários

Categor ia	Demanda Máx (kVA)	DJ (A)	TI PO	ENERGIA CONSUMIDA POR CENÁRIOS									
				FD=0,19 e FC=0,19	FD=0,19 e FC=0,86	FD=0,86 e FC=0,19	FD=0,86 e FC=0,86	FD=1,00 e FC=,525	FD=0,05 e FC=0,525	FD=0,525 e FC=1,00	FD=0,52 5 e FC=0,05	FD=0,525 e FC=0,525	
12	6	50	1	158,12	716,46	716,46	3.246,43	2.299,50	114,98	2.299,50	114,98	1.207,24	
14	8	63	1	210,82	955,28	955,28	4.328,57	3.066,00	153,30	3.066,00	153,30	1.609,65	
19	10	50	1	263,53	1.194,10	1.194,10	5.410,72	3.832,50	191,63	3.832,50	191,63	2.012,06	
22	15	70	1	395,30	1.791,16	1.791,16	8.116,08	5.748,75	287,44	5.748,75	287,44	3.018,09	
25	5	100	1	131,77	597,05	597,05	2.705,36	1.916,25	95,81	1.916,25	95,81	1.006,03	
28	11	50	2	289,88	1.313,52	1.313,52	5.951,79	4.215,75	210,79	4.215,75	210,79	2.213,27	
29	14	63	2	368,94	1.671,75	1.671,75	7.575,01	5.365,50	268,28	5.365,50	268,28	2.816,89	
36	19	50	3	500,71	2.268,80	2.268,80	10.280,36	7.281,75	364,09	7.281,75	364,09	3.822,92	
37	24	63	3	632,47	2.865,85	2.865,85	12.985,72	9.198,00	459,90	9.198,00	459,90	4.828,95	
38	30	80	3	790,59	3.582,31	3.582,31	16.232,15	11.497,50	574,88	11.497,50	574,88	6.036,19	
41	38	100	3	1.001,41	4.537,60	4.537,60	20.560,73	14.563,50	728,18	14.563,50	728,18	7.645,84	
42	48	125	3	1.264,94	5.731,70	5.731,70	25.971,45	18.396,00	919,80	18.396,00	919,80	9.657,90	
43	57	150	3	1.502,12	6.806,40	6.806,40	30.841,09	21.845,25	1.092,26	21.845,25	1.092,26	11.468,76	
44	67	175	3	1.765,65	8.000,50	8.000,50	36.251,81	25.677,75	1.283,89	25.677,75	1.283,89	13.480,82	
45	76	20	3	2.002,83	9.075,20	9.075,20	41.121,46	29.127,00	1.456,35	29.127,00	1.456,35	15.291,68	
46	37	1150	1	975,06	4.418,19	4.418,19	20.019,66	14.180,25	709,01	14.180,25	709,01	7.444,63	
47	44	175	1	1.159,53	5.254,06	5.254,06	23.807,16	16.863,00	843,15	16.863,00	843,15	8.853,08	
48	50	200	1	1.317,65	5.970,52	5.970,52	27.053,59	19.162,50	958,13	19.162,50	958,13	10.060,31	

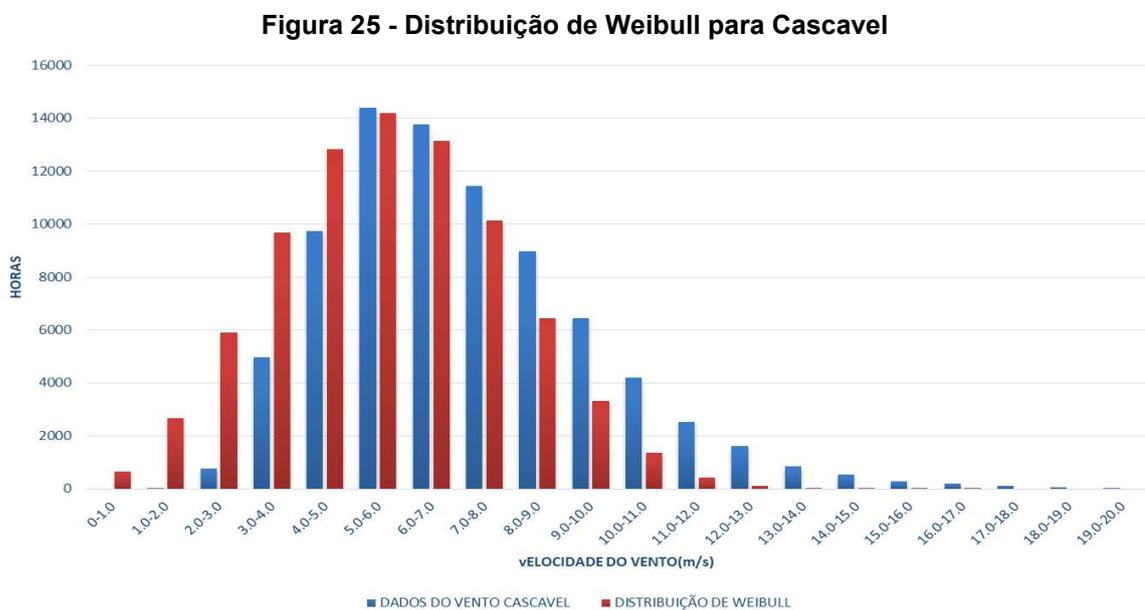
Fonte: Autoria Própria

Em seguida, os dados da geração média estimada foram comparados aos dados de consumo médio estimado para indicação das características técnicas viáveis para instalação da microgeração distribuída eólica nas unidades consumidoras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Distribuição de Ventos para Cascavel

As velocidades dos ventos foram discretizados por hora, com um intervalo de 1 m/s em um total de 80.880 horas. Tendo-se, com isso, as informações do comportamento das velocidades e a capacidade de explorar a frequência de horas em cada amostragem. A distribuição dos ventos é apresentada na Figura 25.



Fonte: Autoria Própria

De acordo com análise dos dados coletados, Cascavel é um local de regime de ventos intensos e de baixa turbulência, são regularmente ventos em grandes altitudes e considerados bons para o aproveitamento do recurso eólico.

Pode-se constatar que Cascavel apresenta a maior distribuição de ventos entre 5 m/s e 8 m/s, superando 10.000 horas (12,50%) do período analisado.

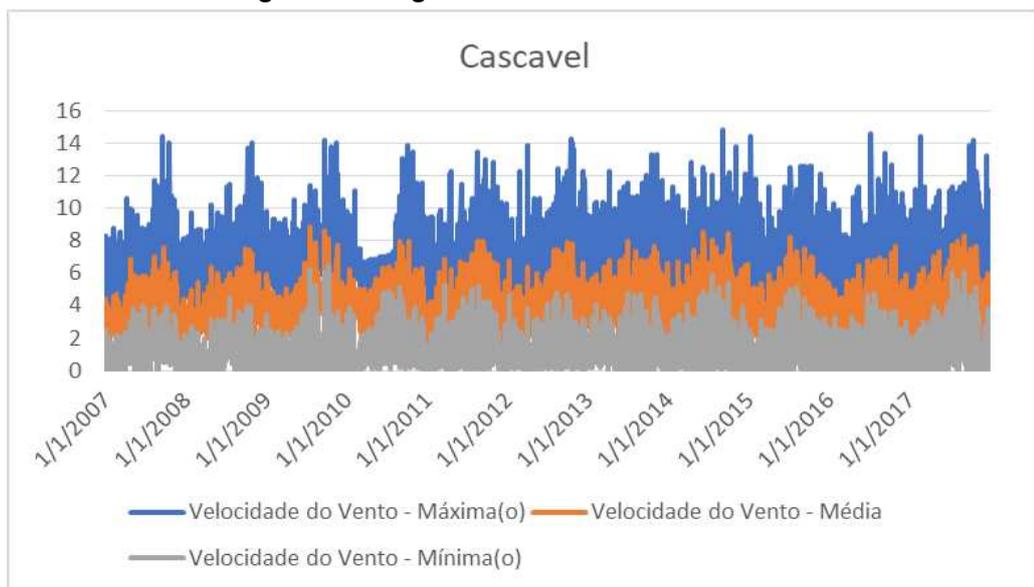
Considerando a Lei de Betz o potencial eólico médio do município de Cascavel foi de 36,56 W/m² para a altura de 12 metros. Caracterizando um bom potencial eólico para regime de microgeração.

4.2 Análise do Regime Eólico de Cascavel, PR

As informações acerca da velocidade e frequência do vento são importantes medidores para estudar e prever as condições do vento na área de estudo. Essencialmente, o potencial eólico de um local é expresso considerando dois principais parâmetros: a velocidade em m/s e a direção dos ventos.

Vale acrescentar, que apesar da predominância dos ventos ser uma variável ambiental, os ventos de Cascavel, para série histórica estudada, apresentaram sazonalidade e baixa variância (6,482). A velocidade mínima foi de $1,530 \pm 0,189$; a velocidade média foi de $4,390 \pm 0,271$ e a velocidade máxima foi de $13,854 \pm 0,904$. As velocidades diárias são apresentadas na Figura 26.

Figura 26 - Regime de ventos de Cascavel



Fonte: Autoria Própria

4.2.1 Estimativa de Potência Instantânea e Geração de Energia Elétrica

Para a verificação de viabilidade técnica dos aerogeradores foram apresentadas as probabilidades de tempo de cada vento, sendo consideradas a faixa de velocidade inicial de geração e comparadas às curvas de potência de cada modelo estudado. Conforme apresentado na tabela 6 a seguir.

Tabela 6 - Estimativa da geração de energia elétrica das turbinas estudadas em 10 anos

Velocidade (m/s)	produção (Horas)	ELV-H3.1 (1 kW)		ELV-H3.8 (2 kW)		ELV-H4.6 (3 kW)	
		Potência (W)	Energia (W.h)	Potência (W)	Energia (W.h)	Potência (W)	Energia (W.h)
3.0-4.0	9.678,49	100	967.849,26	150	1.451.773,89	200	1.935.698,52
4.0-5.0	12.837,98	200	2.567.597,09	400	5.135.194,19	400	5.135.194,19
5.0-6.0	14.192,97	300	4.257.893,11	700	9.935.083,93	700	9.935.083,93
6.0-7.0	13.145,58	500	6.572.790,35	1000	13.145.580,70	1300	17.089.254,91
7.0-8.0	10.140,54	700	7.098.382,90	1400	14.196.765,81	1700	17.238.929,91
8.0-9.0	6.438,58	900	5.794.726,19	1800	11.589.452,39	2300	14.808.744,73
9.0-10.0	3.313,71	1100	3.645.082,73	2100	6.958.794,31	2800	9.278.392,41
10.0-11.0	1.358,33	1300	1.765.841,64	2400	3.260.015,34	3200	4.346.687,12
11.0-12.0	435,09	1500	652.643,57	2700	1.174.758,43	3700	1.609.854,15
12.0-13.0	106,72	1700	181.440,69	2900	309.516,48	3900	416.246,30
13.0-14.0	19,63	1900	37.304,05	3100	60.864,50	4200	82.461,58
14.0-15.0	2,65	2000	5.301,33	3200	8.482,13	4500	11.928,00
	Total no período	Média kWh/dia	Média kWh/mês	Média kWh/dia	Média kWh/mês	Média kWh/dia	Média kWh/mês
	80.880	9,31	279,55	18,67	560,21	22,74	764,03

Fonte: Aatoria Própria (2021)

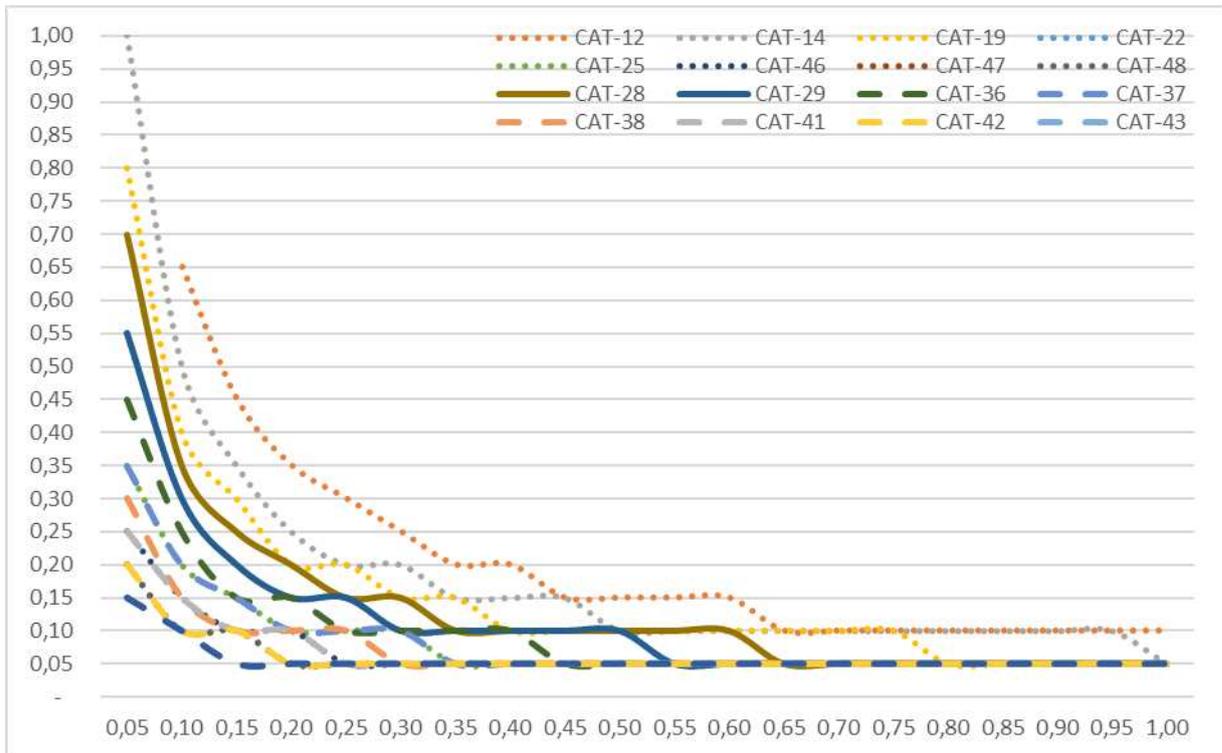
Os dados apresentados na tabela 6 perfazem um total de 80.880,00 horas, obtendo-se, portanto, a estimativa de energia total produzida pela turbina ELV-H3.1 igual a 33.546.852,98 kWh; uma média de 279,55 kWh/mês e 9,31 kWh/dia de energia produzida.

Em se tratando do modelo ELV-H3.8, a análise dos dados apresenta a energia produzida, pelo mesmo período, 67.226.282,17 kWh; uma média de 560,21 kWh/mês e 18,67 kWh/dia.

Já para o modelo ELV-H4.6, os dados coletados se referem ao mesmo período dos aerogeradores anteriores, obtendo-se 81.888.475,83 kWh; cuja média mensal foi de 764,03 kWh/mês e diária de 22,74kWh/dia.

Os cenários do consumo de energia elétrica das unidades consumidoras, com diferentes fatores de carga e de demanda podem ser visualizados nas Figuras 27, 28 e 29:

Figura 27 – Categorias atendidas pela turbina H3.1



Fonte: Autoria Própria.

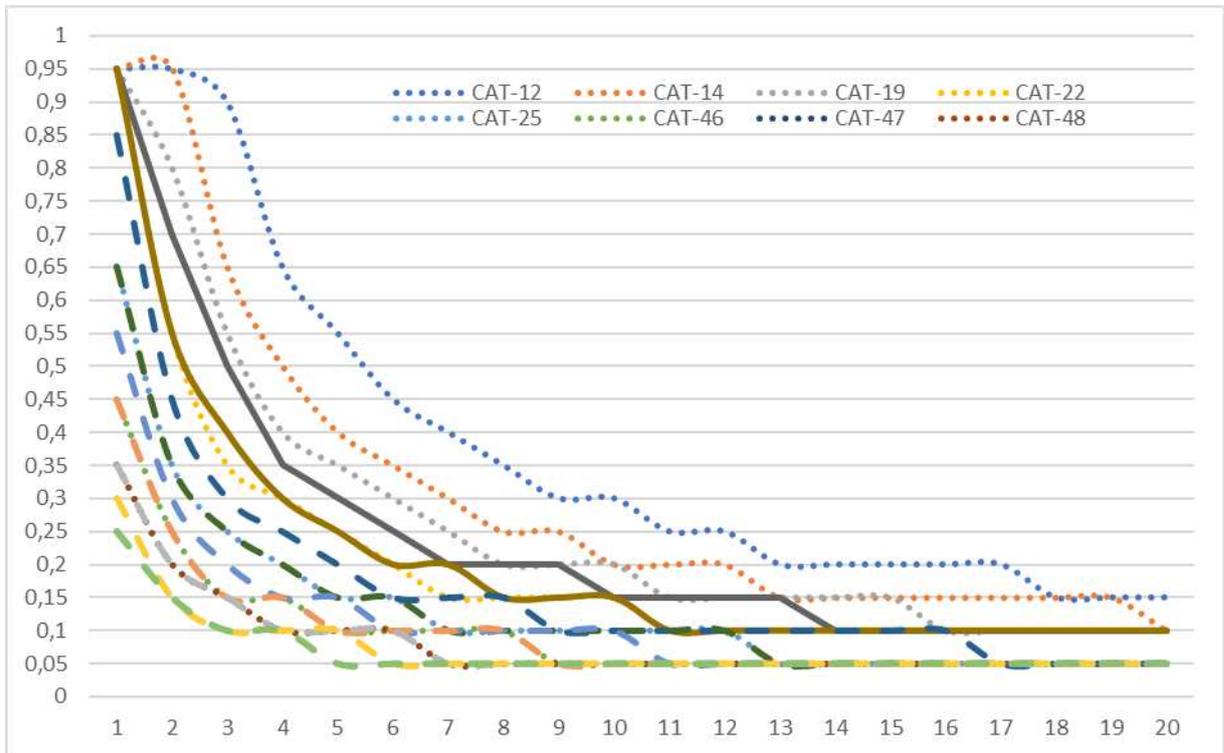
A figura 27 apresenta a relação dos fatores que torna viável, tecnicamente, instalar uma turbina aerogeradora de modelo ELV-H3.1 nas categorias de unidades consumidoras.

É importante ressaltar que as categorias de unidades consumidoras podem ser de entrada monopolar, bipolar ou tripolar. Vale acrescentar que o disjuntor monopolar se refere a circuitos de 127V com apenas uma fase, o bipolar está diretamente relacionado a circuitos bifásicos ou com duas fases e o tripolar diz respeito a circuitos com motores em Sistemas trifásicos com 220 ou 380V.

As categorias de unidades consumidoras 12, 14, 19, 22, 25, 46, 47 e 48 apresentadas no gráfico são de entrada monopolar ou unipolar. As categorias 28 e 29 são aquelas que apresentam entrada bipolar, enquanto as categorias 36, 37, 38, 41, 42 e 43 são categorias com entrada tripolar.

Como é possível observar no gráfico apresentado na figura 27, para a entrada monopolar, a categoria 14 apresenta uma maior quantidade de fatores que favorecem o funcionamento da turbina. Já na entrada bipolar a categoria 28 apresenta a melhor condição de funcionamento, enquanto para a entrada tripolar a categoria 36 é a que melhor se ajusta ao funcionamento da turbina.

Figura 28 – Categorias atendidas pela turbina H3.8



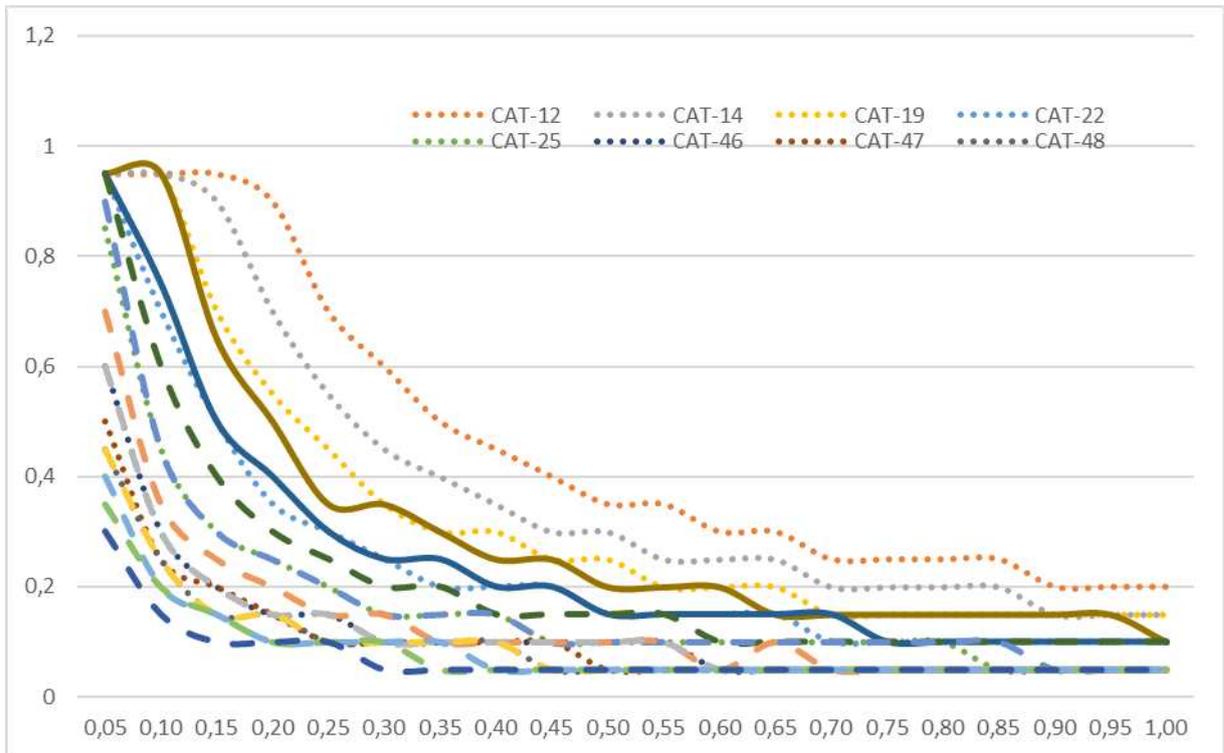
Fonte: Autoria Própria.

A figura 28 apresenta a relação dos fatores usados para a instalação de uma turbina aerogeradora de modelo ELV-H3.8.

Ao observarmos o gráfico apresentado na figura 28 percebe-se que, para o funcionamento adequado desse tipo de turbina aerogeradora, a categoria 14 possui dados mais favoráveis em se tratando de categorias de unidades consumidoras com entrada monopolar. Além disso, pode-se perceber que as categorias 12 e 19 também apresentam dados relevantes para tal.

Já as categorias 28 e 29 demonstram maior compatibilidade de funcionamento nos casos em que se tem entrada bipolar, tendo resultados de aproveitamento muito próximos aos apresentados pelas categorias de entrada monopolar, enquanto para os circuitos com entrada tripolar percebe-se que a categoria 45 mostra-se mais eficiente, ou seja, apresenta uma maior quantidade de fatores que garantem em efetivo funcionamento da turbina.

Figura 29 – Categorias atendidas pela turbina H4.6



Fonte: Autoria Própria.

Na figura 29 é possível verificar a relação dos fatores viáveis para instalação de uma turbina aerogeradora de modelo ELV-H4,8 nas categorias de unidades consumidoras.

De acordo com o gráfico apresentado na figura 29 percebe-se que, em se tratando de unidades consumidoras com entrada monopolar, as categorias 12, 14 e 19 apresentaram uma maior quantidade de fatores favoráveis ao funcionamento da turbina aerogeradora em questão.

Em se tratando das unidades consumidoras com entrada bipolar verifica-se que as categorias 28 e 29 apresentaram maior quantidades de fatores que viabilizam a produção de energia com esse tipo de turbina.

Já para as unidades consumidoras com entrada tripolar, as categorias 36 e 37 destacaram-se pela eficiência energética.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A energia elétrica é primordial para o progresso econômico e social. Apesar da incidência de bons ventos e de um vasto e extenso território, o Brasil ainda apresenta baixos índices de aproveitamento da microgeração eólica distribuída.

O presente trabalho buscou coletar dados e analisar a viabilidade técnica de uso de microgeradores eólicos em unidades consumidoras do grupo B no município de Cascavel, localizado no Estado do Paraná.

Os resultados obtidos através deste trabalho de pesquisa demonstram que a microgeração eólica na área de estudo, é viável para a maioria das unidades consumidoras, porém para sua implementação se faz necessário conhecer a categoria e os fatores de carga e demanda da instalação, além de um estudo minucioso do local de instalação do sistema eólico, pois existem diversos fatores da urbanização municipal não considerados nesse estudo que podem interferir na efetiva produção de energia eólica. (como exemplos a arborização e as edificações nos arredores).

Em se tratando dos ventos Cascavelenses, de acordo com dados obtidos, há constância, frequência e velocidade média compatíveis com as necessárias para a implementação dos micro aerogeradores analisados, ou seja, o regime de ventos no local de estudo é de natureza constante e com valores médios propícios à geração eólica de pequenas proporções na altura designada (10 metros em relação ao solo).

A distribuição de Weibull corroborou para verificar a frequência de cada velocidade do vento. Dessa forma foi possível calcular a energia média produzida no intervalo de 10 anos e estimar a energia média mensal gerada.

Foi constatado que os fatores de carga e de demanda influenciam na quantidade média mensal de energia elétrica consumida e possuem correlação inversa, sendo possível dimensionar o sistema gerador em unidades consumidoras novas (que não possuem histórico de consumo).

Levando em consideração os resultados obtidos, conclui-se que a utilização da energia eólica é possível para maioria das categorias e que cada uma possui diferentes fatores de carga e de demanda mínimos para se tornar tecnicamente viável.

Para trabalhos futuros, propõe-se o estudo de viabilidade econômica para implementação de microgeradores eólicos em unidades consumidoras de baixa tensão interligando o sistema de microgeração eólica a rede de distribuição para a região da cidade de Cascavel - PR, além da realização de análise desses sistemas eólicos on-grid e off-grid objetivando a avaliação dos benefícios oriundos do sistema de compensação de energia.

Além disso, seria extremamente importante realizar um estudo detalhado sobre a implementação de um sistema híbrido de geração de energia, ou seja, energia eólica e energia solar, já que os ventos podem variar bastante durante o ano interferindo consideravelmente na produção de energia eólica.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Assembleia Legislativa. **Resolução normativa n. 482, de 17 de abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso à microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.

_____. **Resolução Normativa n. 687, de 24 de novembro de 2015**. Altera a Resolução Normativa n. 482, de 17 de abril de 2012, e os módulos 1 e 3 dos procedimentos de distribuição – PRODIST.

_____. **Resolução Normativa n. 414, de 09 de setembro de 2010**. Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada.

_____. **Fundamentos do Setor Elétrico: O recurso eólico**. 2017. In. Curso EAD autoinstrucional - LabTime UFG. Brasília. Disponível em: <http://www.labtime.ufg.br/modulos/aneel/mod3_uni1_sl11.html>. Acesso em: 08 ago. 2021.

ALDABÓ, R. **Energia Eólica**. São Paulo. Artliber, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEÓLICA). Energia Eólica. In: **6. ELAEE – Latin American Energy Economics Meeting**. New Energy Landscape: Impacts for Latin America. Rio de Janeiro: ELAEE, 2017.

BRADFORD, Gamaliel. **Daughters of Eve**. Paperback, 2017.

BLOG WINDSECTOR, Windsector. 2013. Disponível em: <<https://windsector.tumblr.com/post/4711554356/the-first-wind-turbine-in-america>>. Acesso em: 08 ago. 2021.

BLOG RESEARCHGATE, 2008-2021. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/>>. Acesso em: 08 ago. 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Anuário estatístico de Energia Elétrica 2020 (EPE)**. Disponível em: <<http://shinyepe.brazilsouth.cloudapp.azure.com:3838/anuario/EPEFactSheetAnuario.pdf>>. Acesso em: 05 ago. 2021.

_____. **Anuário estatístico de Energia Elétrica (EPE), 2020: com base em 2019**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202020.pdf>>. Acesso em: 05 ago. 2021.

BURTON, T. et al. **Wind Energy Handbook**. Chichester: John Wiley and Sons, 2001.

CASTRO, R. M. G. **Introdução à Energia Eólica: Energias Renováveis e Produção Descentralizada**. Instituto Superior Técnico, 4. ed. Lisboa, 2009.

CASTRO, Rui. **Energias Renováveis e Produção descentralizada: Introdução à Energia Eólica**. 2003. (Curso de Engenharia) - DEEC/Secção de Energia, Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2003.

CENTRO BRASILEIRO DE INFRAESTRUTURA (CBIE). **Como funciona a geração eólica?**. 17 de Janeiro, 2020. Disponível em: <<https://cbie.com.br/artigos/como-funciona-a-geracao-eolica/>>. Acesso em: 05 ago. 2021.

CEPEL. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. 2001. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2021.

_____. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. 2013. Disponível em: <http://www.observatoriodaenergiaeolica.ufc.br/wp-content/uploads/2019/07/NovoAtlasdoPotencialEolico_BrasileiroSIM_2013-compressed.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2021.

_____. **Atlas só Potencial Eólico Brasileiro**, 1998.

CHESF-BRASCEP. Fontes Energéticas Brasileiras, Inventário, Tecnologia. Energia Eólica. De cata-ventos a aerogeradores: o uso do vento. Rio de Janeiro, 1987. v.1

Companhia Paranaense de Energia. **Micro e Minigeração – Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. 2015. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2FB57635122BA32D4B03257B630044F656#>>

COSTA, R. A. da; CASOTTI, B. P.; AZEVEDO, R. L. S. de. **Um panorama da indústria de bens de capital relacionados à energia eólica**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 29, p. 229-277, mar. 2009.

CRESESB. **Energia Eólica Princípios e Tecnologia**. Ministério de Minas e Energia. 2010.

_____. **Tutorial de Energia Eólica**. 2008. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&catid=3>. Acesso em: 05 ago. 2021.

CUSTÓDIO, Ronaldo dos Santos. **Energia Eólica Para Produção de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009.

DUTRA, R. **Energia Eólica: Princípios e Tecnologia**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2010.

DUTRA, Ricardo Marques (Org.). **Energia Eólica: Estado da Arte e Princípios Físicos**. Rio de Janeiro: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Cepel, 2012. a

_____. **Energia Eólica: Princípios e Tecnologias.** São Paulo: Artliber, 2010.

EPE - **Empresa de Pesquisa Energética** – Brasil. Balanço Energético Nacional 2007.

ERENO, Dinorah. **A força dos ventos.** Pesquisa FAPESP, 2010.

FARIA, J.O. Estudo técnico relativo à instalação de micro eólicas em edifícios urbanos para microprodução de energia. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Dissertação. Mestrado em engenharia eletrotécnica. Porto, Portugal, 2010.

GODOI, Maurício. **Energia eólica chega a 18 GW de capacidade instalada no Brasil.** Agência Canal Energia. São Paulo, 2021. Disponível em <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53163929/energia-eolica-chega-a-18-gw-de-capacidade-instalada-no-brasil>. Acesso em: 05 ago. 2021.

GOLDEMBER, José; LUCON, Oswaldo. **Energia e meio ambiente no Brasil.** 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142007000100003>. Acesso em: 05 ago. 2021.

GRUPO VIRTUOUS. **As Massas de Ar.** Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <https://www.sobiologia.com.br/conteudos/Ar/Ar7.php>. Acesso em: 05 ago. 2021.

INSTITUTO IDEAL. **Guia de microgeradores eólicos.** 2014. Disponível em: <https://institutoideal.org/guiaeolica/>. Acesso em: 05 ago. 2021.

InterAcademy Council. **Lighting the way: toward a sustainable energy future.** Amsterdam, 2007.

IU, Xi; MCELROY, Michael B.; KIVILUOMA, J. Global potencial for wind-generated electricity. **PNAS.** v. 106, n. 27, p. 10933-38, 22 jun. 2009. Doi. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0904101106>.

KONOPATZKI, Evandro André. BECKER, Taise Vanessa. HEINTZE, Taiomara Dal’Sotto. ZEFERINO, Cristiane Lionço. MARANGONI, Filipe. **Levantamento da Curva de Carga em Unidades Residenciais do Município de Medianeira-PR.** III CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO Ponta Grossa, PR, Brasil, 04 a 06 de dezembro de 2013. Disponível em: <http://anteriores.aprepro.org.br/conbrepro/2013/anais/artigos/educacaoeng/3.pdf>

KONOPATZKI, Evandro André. DALSOTTO, Taiomara Cardoso. BECKER, Taise Vanessa. SOARES, Debora de Souza. MARANGONI, Filipe. **Uso dos fatores de demanda e de carga como ferramentas de gestão elétrica em unidades residenciais do município de Medianeira-PR.** XXXIV ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO Engenharia de Produção, Infraestrutura e Desenvolvimento Sustentável: a Agenda Brasil+10 Curitiba, PR, Brasil, 07 a 10 de outubro de 2014. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2014_TN_STP_203_148_25133.pdf

LIMA, Diego Roberto Souza. **Turbinas Eólicas ou Aerogeradores.** 2020. Disponível em: <https://oakenergia.com.br/blog/turbinas-eolicas/>. Acesso em: 05 ago. 2021.

LIMA, F. L.; SILVA, E. M.; VIEIRA, C. A. **Avaliação da Aplicação das Distribuições de Probabilidade de Weibull, de Rayleigh e Log-Normal para obtenção da densidade de potência eólica na região Jaguararuana-CE.** In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, São Paulo, 2008.

LOPEZ, Ricardo Aldabó. **Energia eólica.** 2 ed. São Paulo: Artliber, 2012. b

MAGALHÃES, Murilo Vill. **Estudo de utilização da energia eólica como fonte geradora de energia no Brasil.** 2009. 50f. Monografia (Bacharel em Ciências Econômicas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. Doi <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/123646>

MATTOS, Mauro Gomes de; ROSSETTO JÚNIOR, Adriano José; BLECHER, Shelly. **Teoria e prática da metodologia da pesquisa em Educação Física: construindo sua monografia, artigo científico e projeto de ação.** São Paulo: Phorte, 2003.

MELO, E. Fonte Eólica de Energia: Aspectos de inserção, tecnologia e competitividade. **Estud. av.**, São Paulo, v.27, n.77, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142013000100010>>. São Paulo. 2013>. Acesso em: 08 ago. 2021.

MOSS, Hamilton. **Panorama das Fontes Renováveis no Brasil.** In: CONGRESSO BRASIL – ALEMÃO, 1., 2001, Fortaleza. Anais... Fortaleza: [s.n.], 2001.

MOURA, A. P. et al. Use of the Weibull and Rayleigh Distributions as Tools for Forecast of the Power, Generated Energy and Losses in a Distribution System: **a Case Study.** In: VI INDUSCON – CONFERÊNCIA DE APLICAÇÕES INDUSTRIAIS. Joinville, SC, 2004.

MUNEMORI, M. **Estimativa do potencial de energia eólica para região de Cascavel/PR.** 2004. 58f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2004.

NETO, J, V, T. **Diagnóstico Energético em uma Unidade de Separação de Gases.** Recife, 2010.

NOGUEIRA, C. E.; SOUZA, S. M. **Aproveitamento da energia eólica para produção de eletricidade.** In: Fontes Renováveis Agroenergia. Cascavel: Edunioeste, 2012.

PARANÁ. **Agência de Notícias do Paraná.** 2021. Consumo residencial de energia teve alta de 5,5% em 2020. Disponível em: <<https://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=110899>>. Acesso em: 05 ago. 2021.

PINTO, A. P. F. **Projecto e Operação de parques eólicos com excedente de potência instalada.** Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2001. RAMOS, F. G.; SEIDLER, N. Estudo da energia eólica para aproveitamento em pequenos empreendimentos. Revista Eletrônica de Extensão da URI, v7, n. 13, p. 108127, 2011.

SATO, Mireille. **Avaliação do potencial Eólico em microescala de Cascavel e região.** 2015. 90F. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Campus de Cascavel, Paraná, 2015.

SHEPHERD, D. G. Historical Development of the windmill. In turbine technology - fundamental concepts of wind turbine engineering. Spera, S.A. 1 ed. New York: Asme Press, 1994.

SIMEPAR, Cascavel. **Dados das estações:** O Paraná é o líder brasileiro no ranking de sustentabilidade Ambiental. 07/10/2021. Disponível em: <<http://www.simepar.br/>>. Acesso em: 08 ago. 2021.

TROEN, I.; PETERSEN, E. L. **European Wind Atlas**, Riso National Laboratory, Denmark. 1989.

WIKIPEDIA. **Cascavel (Paraná)**. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Cascavel_\(Paran%C3%A1\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/Cascavel_(Paran%C3%A1))>. Acesso em: 08 ago. 2021.