

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
ÁREA DE CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

**TIAGO GAVAZZONI**

**AVALIAÇÃO DA INSTALAÇÃO DE AEROGERADORES EÓLICOS DE PEQUENO PORTE  
EM UMA EDIFICAÇÃO URBANA**

**CAXIAS DO SUL  
2020**

**TIAGO GAVAZZONI**

**AVALIAÇÃO DA INSTALAÇÃO DE AEROGERADORES EÓLICOS DE PEQUENO PORTE  
EM UMA EDIFICAÇÃO URBANA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito para o grau de engenheiro mecânico. Área de concentração: Mecânica dos Fluidos, Aerodinâmica.

Prof. Orientador Me. Paulo Linzmayer

**CAXIAS DO SUL**

**2020**

**TIAGO GAVAZZONI**

**AVALIAÇÃO DA INSTALAÇÃO DE AEROGERADORES EÓLICOS DE PEQUENO PORTE  
EM UMA EDIFICAÇÃO URBANA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito para o grau de engenheiro mecânico. Área de concentração: Mecânica dos Flúidos, Aerodinâmica.

**Aprovado em 11/12/2020**

**Banca Examinadora:**

Prof. Me. Paulo Linzmayer  
Universidade de Caxias do Sul- UCS

Prof. Me. Sergio da Silva Kucera  
Universidade de Caxias do Sul- UCS

Prof. Me. Adelair Lino Colombo  
Universidade de Caxias do Sul- UCS

## RESUMO

As fontes de energia renováveis têm sido cada vez mais utilizadas e procuradas entre os consumidores do país. A utilização de meios para extrair essa energia do ambiente é bastante explorada. Placas fotovoltaicas, usinas maremotrizes e turbinas eólicas estão se tornando grandes auxiliares para o desenvolvimento do país em termos de energia limpa.

O trabalho se propôs a avaliar a instalação de turbinas eólicas no edifício Vinas do Sol, localizado em Caxias do Sul, RS.

Foi considerado dados do vento de acordo com o Atlas eólico, a estação meteorológica da cidade e medições realizadas no local pelo anemômetro.

8 Modelos de Turbinas eólicas foram avaliadas, com base nos dados dos fabricantes referente ao coeficiente e curva de potência, tamanho, eixo de rotação, peso, potência nominal.

Com as informações coletadas, gerou-se composições de aerogeradores fixados no telhado do edifício e em regiões concentradoras de vento, assim como a energia gerada para cada uma delas. Calculou-se o retorno de investimento para cada composição e para todos os custos de instalação e integração com a rede de energia municipal.

Para a composição de aerogeradores com menor tempo de retorno de investimento, de 15 anos, as turbinas foram posicionadas nas arestas do prédio, na região concentradora de vento e estimou-se que gera aproximadamente 612 kWh/mês.

A análise dessas configurações foi avaliada em pontos de vista técnico, de geração limpa e de viabilidade econômica.

**Palavras-Chave:** Turbinas eólicas, Aerogeradores, Coeficiente e curva de potência, Energia limpa.

## ABSTRACT

Renewable energy sources have been increasingly used and sought after by consumers in the country. The use of means to extract this energy from the environment is widely explored. Photovoltaic plates, tidal power plants and wind turbines are becoming great helpers for the country's development in terms of clean energy.

The work aimed to evaluate the installation of wind turbines in the Vinas do Sol building, located in Caxias do Sul, RS.

Wind data according to the wind Atlas, the city's meteorological station and measurements carried out on site by the anemometer were considered.

8 Wind turbine models were evaluated, based on manufacturers' data regarding the power coefficient and curve, size, axis of rotation, weight, rated power.

With the information collected, compositions of wind turbines fixed on the roof of the building and in wind concentrating regions were generated, as well as the energy generated for each of them. The return on investment was calculated for each composition and for all installation and integration costs with the municipal power grid.

For the composition of wind turbines with the shortest return on investment, 15 years, the turbines were positioned at the building's edges, in the wind concentrating region and it was estimated that it generates approximately 612 kWh / month.

The analysis of these configurations was evaluated from a technical, clean generation and economic viability point of view.

**Keywords:** Wind turbines, Wind turbines, Power coefficient and curve, Clean Energy

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz Energética Brasileira .....	13
Figura 2 - Circulação Atmosférica .....	16
Figura 3 - Potencial eólico das Regiões Brasileiras .....	17
Figura 4 - Atlas Eólico do RS a 50 metros de altura .....	18
Figura 5 - Atlas Eólico do RS a 100 metros de altura .....	19
Figura 6 - Densidade média anual do ar no RS a 100 m de altura .....	20
Figura 7 - Turbinas Eólicas de eixo horizontal (TEEH) instalados em Osório/RS.....	21
Figura 8 - Turbina Darrieus de lâmina curva .....	21
Figura 9 - Turbinas Darrieus H .....	22
Figura 10 - Composição do Aerogerador .....	23
Figura 11 - Escoamento não-viscoso (a) e viscoso (b) sobre um cilindro ou esfera .....	25
Figura 12 - Escoamento viscoso com menor efeito de esteira .....	26
Figura 13 - Dimensões de um aerofólio .....	26
Figura 14 - Principais forças na pá de uma turbina .....	27
Figura 15 - Ângulos relevantes em uma pá eólica .....	28
Figura 16 - Mecanismos de controle de potência por passo (a) e por estol (b) .....	29
Figura 17 - Perda na ponta da pá .....	30
Figura 18 - Fluxo de ar aderente (a) e separado (b) no perfil de uma pá eólica, resultante do efeito de estol dinâmico .....	31
Figura 19 - Tubo de Betz .....	33
Figura 20 - Coeficiente de potência x velocidade específica para turbinas eólicas .....	36
Figura 21 - Curva de potência de um aerogerador .....	37
Figura 22 - Recurso eólico em meios edificados .....	37
Figura 23 - Estrutura da camada limite urbana .....	38
Figura 24 - Turbinas eólicas em regiões concentradoras .....	38
Figura 25 - Escoamento em torno de um edifício isolado .....	39
Figura 26 - Ângulo de Inclinação .....	40
Figura 27 - Camada limite atmosférica .....	41
Figura 28 - Rugosidade do terreno .....	41
Figura 29 - Residencial Vinas do Sol .....	44
Figura 30 - Fluxograma das etapas de trabalho .....	46
Figura 31 - Densidade de probabilidade dos ventos .....	47
Figura 32 - Densidade de probabilidade dos ventos pelo atlas a 50m .....	48
Figura 33 - Anemômetro Digital GM816 .....	49
Figura 34 - Três regiões de coleta medição dos ventos .....	49

Figura 35 - Curva de potência turbinas eólicas .....	51
Figura 36 - Densidade de Weibull para velocidades .....	52
Figura 37 - Velocidades do vento no centro do edifício Vinas do sol .....	53
Figura 38 - Velocidades do vento nas bordas do edifício Vinas do sol .....	53
Figura 39 - Velocidades do vento nas arestas do edifício Vinas do sol .....	54
Figura 40 - Composições de aerogeradores: a) 5 turbinas Razec266, b) 2 Turbinas Gerar246 e 1 Verne555, c) 25 Notus138, d)5 Gerar246e 2 Razec266, e) 1 SX1700 e 1 SX3300, f) 4 Turbinas SX1700, g) 2 Skystream Marine e h) 10 turbinas Notus138 e 10 Air40 .....	56
Figura 41 - Composições de aerogeradores para o ângulo de inclinação: a) turbinas Razec226 e b) turbinas Gerar 246 .....	57

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Turbinas eólicas e suas especificações .....	50
---	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Energia gerada para turbina Notus 138 .....	55
Tabela 2 - Energia gerada para turbina Razec 266 .....	55
Tabela 3 - Energia gerada para as 8 composições de aerogeradores .....	57
Tabela 4 - Energia gerada para as 2 composições no ângulo de inclinação .....	58
Tabela 5 – Custos unitários de cada turbina eólica .....	58
Tabela 6 - Custos de cada configuração de aerogeradores .....	58
Tabela 7 - Custos de instalação e integração com rede .....	60
Tabela 8 - Retorno de investimento para cada composição .....	61

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional ( <i>Computational Fluid Dynamics</i> )
CLU	Camada Limite Urbana
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Coeficiente de Potência
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
MMA	Ministério do Meio Ambiente
SEMA	Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura
TEEH	Turbina Eólica de Eixo Horizontal
TEEV	Turbina Eólica de Eixo Vertical
TSR	Velocidade na ponta da pá ( <i>Tip Speed Ratio</i> )
UC	Unidade de Conservação

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	14
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO .....	14
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>14</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>16</b>
2.1	O VENTO .....	16
2.2	ENERGIA EÓLICA NO BRASIL .....	17
<b>2.2.1</b>	<b>Energia Eólica no Rio Grande do Sul</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Densidade do Ar no Rio Grande do Sul</b> .....	<b>19</b>
2.3	AEROGERADORES .....	20
<b>2.3.1</b>	<b>Composição do Aerogeradores</b> .....	<b>22</b>
2.4	MECÂNICA DOS FLUIDOS .....	23
<b>2.4.1</b>	<b>Teorema de Bernoulli</b> .....	<b>24</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Camada limite e esteira</b> .....	<b>24</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Dimensões de um aerofólio</b> .....	<b>26</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Forças de Arrasto e Sustentação</b> .....	<b>27</b>
<b>2.4.5</b>	<b>Ângulos relevantes nas pás</b> .....	<b>27</b>
<b>2.4.6</b>	<b>Mecanismos de controle</b> .....	<b>28</b>
2.5	PERDAS .....	30
<b>2.5.1</b>	<b>Perdas nas pontas das pás</b> .....	<b>30</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Perdas pela turbulência</b> .....	<b>30</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Perdas pelo estol dinâmico</b> .....	<b>31</b>
2.6	POTENCIAL DO VENTO .....	32
<b>2.6.1</b>	<b>Limite de Betz</b> .....	<b>33</b>
<b>2.6.2</b>	<b>Coeficiente de velocidade específica</b> .....	<b>35</b>
<b>2.6.3</b>	<b>Curva de potência</b> .....	<b>36</b>
2.7	AEROGERADORES EM MEIOS URBANOS .....	37
<b>2.7.1</b>	<b>Ângulo de inclinação</b> .....	<b>40</b>
<b>2.7.2</b>	<b>Lei Logarítmica</b> .....	<b>40</b>
2.8	DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DE WEIBULL .....	42
2.9	LEGISLAÇÃO E AMBIENTE .....	43
<b>2.9.1</b>	<b>Resolução Normativa ANEEL 482/2012</b> .....	<b>43</b>
<b>2.9.2</b>	<b>Licenciamento Ambiental</b> .....	<b>44</b>

<b>3</b>	<b>MATERIAIS E METODOS .....</b>	<b>45</b>
3.1	DESCRIÇÃO DO AMBIENTE DE ESTUDO .....	45
3.2	ETAPAS DE TRABALHO .....	45
3.2.1	<b>Metodologia de cálculo .....</b>	<b>46</b>
3.2.2	<b>Dados de velocidade do vento pelas estações meteorológicas .....</b>	<b>47</b>
3.2.3	<b>Dados de velocidade do vento pelo atlas eólico .....</b>	<b>47</b>
3.2.4	<b>Dados de velocidade do vento pelo anemômetro .....</b>	<b>48</b>
3.2.5	<b>Extrapolção de velocidade do vento .....</b>	<b>49</b>
3.2.6	<b>Verificação das turbinas existentes .....</b>	<b>50</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>51</b>
4.1	CURVA DE POTÊNCIA DAS TURBINAS .....	51
4.2	VELOCIDADES DO VENTO .....	51
4.2.1	<b>Velocidade do vento no edifício Vinas do sol .....</b>	<b>52</b>
4.3	ENERGIA GERADA PELOS AEROGERADORES .....	54
4.4	COMPOSIÇÕES DE AEROGERADOS .....	56
4.4.1	<b>Composições de aerogeradores para os dados do atlas e estações .....</b>	<b>56</b>
4.4.2	<b>Composições de aerogeradores para os dados do anemômetro .....</b>	<b>57</b>
4.5	VALORES PARA OS AEROGERADORES E COMPOSIÇÕES .....	58
4.5.1	<b>Custos de instalação e integração com rede .....</b>	<b>59</b>
4.5.2	<b>Consumo elétrico condomínio e apartamentos unitários.....</b>	<b>60</b>
4.5.3	<b>Análise de retorno de investimento .....</b>	<b>60</b>
4.6	VIABILIDADE DOS AEROGERADORES EM EDIFÍCIOS .....	61
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>63</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>65</b>
	<b>APÊNDICE A - ENERGIA GERADA PARA AS TURBINAS VERNE 555 E GERAR246 .....</b>	<b>69</b>
	<b>APÊNDICE B - ENERGIA GERADA PARA AS TURBINAS SX1700 E SX3300 .....</b>	<b>70</b>
	<b>APÊNDICE C - ENERGIA GERADA PARA AS TURBINAS AIR 40 E SKYSTREAM .....</b>	<b>71</b>

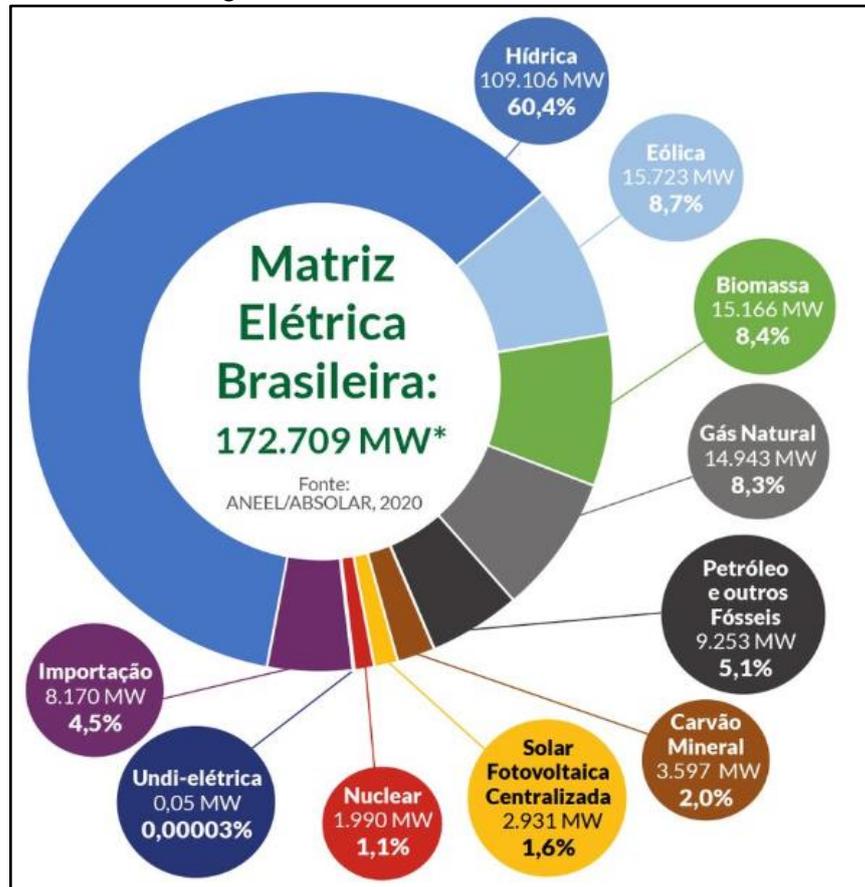
## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o mundo tem percebido os impactos que o meio-ambiente tem sofrido devido ao seu mau e excessivo uso. A degradação do ambiente ameaça a sustentabilidade das empresas em diversos países ao redor do mundo.

Dentro desse cenário, existe uma intensa busca pela utilização de fontes limpas, renováveis de energia e sem emissão de gases para o efeito estufa. Os estudos e a procura por parte dos governos para a utilização dessas fontes de energias estão cada vez maiores. Conforme Absolar (2019), o sucesso desse uso, no qual as energias solar, biomassa e a eólica se destacam e acabam por facilitar e viabilizar financeiramente a aquisição de sistemas elétrico geradores.

As formas de geração eólica e solar ganharam grande evidência no cenário mundial. O mercado da energia eólica, por se apresentar em estágio de preços competitivos e uma tecnologia madura para implementação, foi impulsionada por esses contextos e houve um enorme crescimento da sua capacidade instalada no Brasil nos últimos anos. Atualmente a eólica é a segunda colocada na matriz elétrica brasileira, conforme representado pela Figura 1, produzindo atualmente cerca de 15 MW.

Figura 1 – Matriz Elétrica Brasileira



Fonte: Absolar (2020)

Quanto ao uso da energia solar, se percebe que, no mercado brasileiro, tem sido cada vez maior, sendo cada vez mais fácil o acesso da pessoa física a esse recurso. Conforme Absolar (2020), se percebe um aumento de mais de cinquenta e duas vezes a produção de energia solar em relação a 2016. Conforme a Agência Internacional de Energia (2016), as fontes eólica e solar, tiveram as maiores taxas de crescimento entre 1990 e 2014, com crescimentos anuais de 24% e 46%, respectivamente.

Com esses dados se percebe que o Brasil tem todas as condições de ampliar o uso de fontes eólicas para o aumento de sua geração de energia, além de viabilizar economicamente e tecnologicamente a utilização de aerogeradores para a pessoa física, ou propriamente para o setor urbano.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Motivado com o aumento da utilização e com a facilidade de aquisição das placas fotovoltaicas para a microgeração de energia, este trabalho se justifica no fato de estudar o recurso eólico e aerogeradores para essa geração de energia. A crescente demanda pela geração de energia através de fontes renováveis fortalece essa busca. O trabalho irá avaliar a viabilidade de utilização dos aerogeradores na cidade de Caxias do Sul.

O trabalho possibilitará um maior conhecimento sobre turbinas eólicas e aerogeradores, visando a utilização em áreas urbanas para o uso popular.

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

### 1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade de instalação de uma turbina eólica em uma edificação urbana, além de selecionar uma composição de aerogeradores ideal para essa aplicação.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Foram definidos os seguintes objetivos específicos do trabalho:

- a) avaliar as características dos aerogeradores eólicos;
- b) avaliar a melhor relação de materiais, peso, configuração de itens para o adequado funcionamento da turbina;
- c) dimensionar as melhores configurações e posicionamento das turbinas eólicas em edifícios;

- d) estimar analiticamente a geração de energia produzida com a configuração das turbinas eólicas;
- e) avaliar aspectos/regulamentação ambiental, energética e civil (plano diretor), cujos custos envolvidos devem ser considerados.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

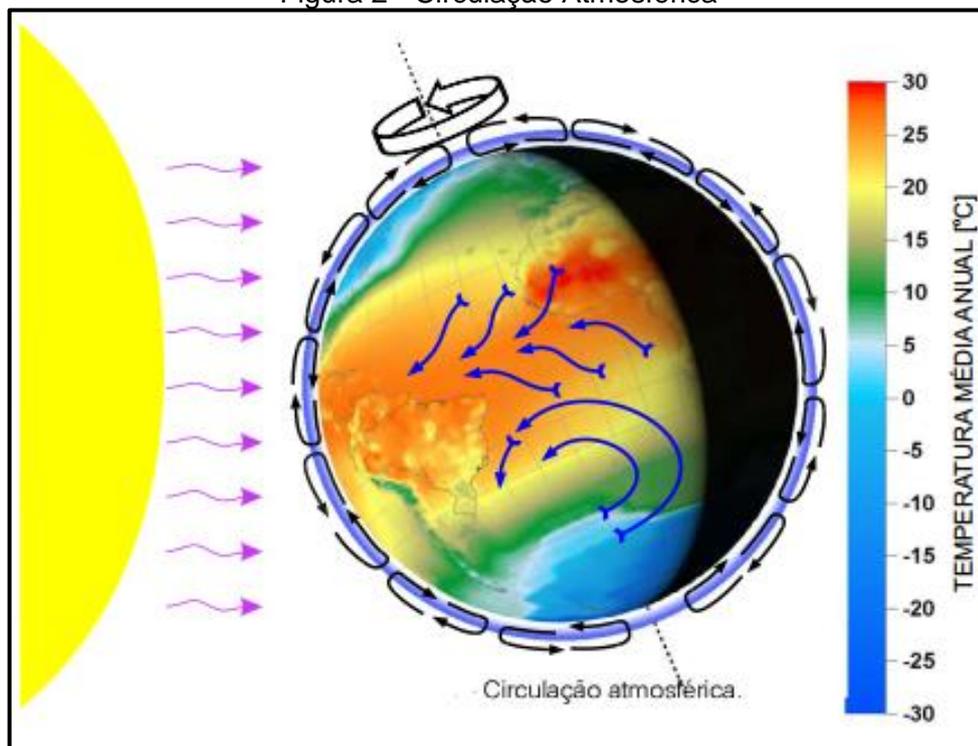
Este capítulo trata dos principais tópicos que envolvem a análise dos aerogeradores de forma geral, para facilitar o entendimento das metodologias utilizadas e também para facilitar a compreensão do desafio proposto. São descritos também as análises e cálculos realizados para a definição das turbinas eólicas.

### 2.1 O VENTO

O vento tem sua origem na associação entre a energia solar e a rotação do planeta e pode-se dizer que o vento é a atmosfera em movimento. Conforme Amarante (2009), ocorre devido à ação contínua da energia radiante solar sobre a Terra, que aquece sua superfície de forma irregular, resultando na circulação contínua das camadas de ar da atmosfera. Representado pela Figura 2, o Sol aquece a Terra com mais intensidade entre os trópicos, fazendo as massas de ar quente subirem na atmosfera, criando zonas de baixa pressão junto à superfície. As massas de ar frio vindas dos polos preenchem essas zonas, esse deslocamento constante forma os ventos.

Conforme Amarante (2009), o vento envolve um mecanismo solar-planetário permanente, cuja duração é mensurável na escala de bilhões de anos. O vento é considerado uma fonte renovável de energia.

Figura 2 - Circulação Atmosférica

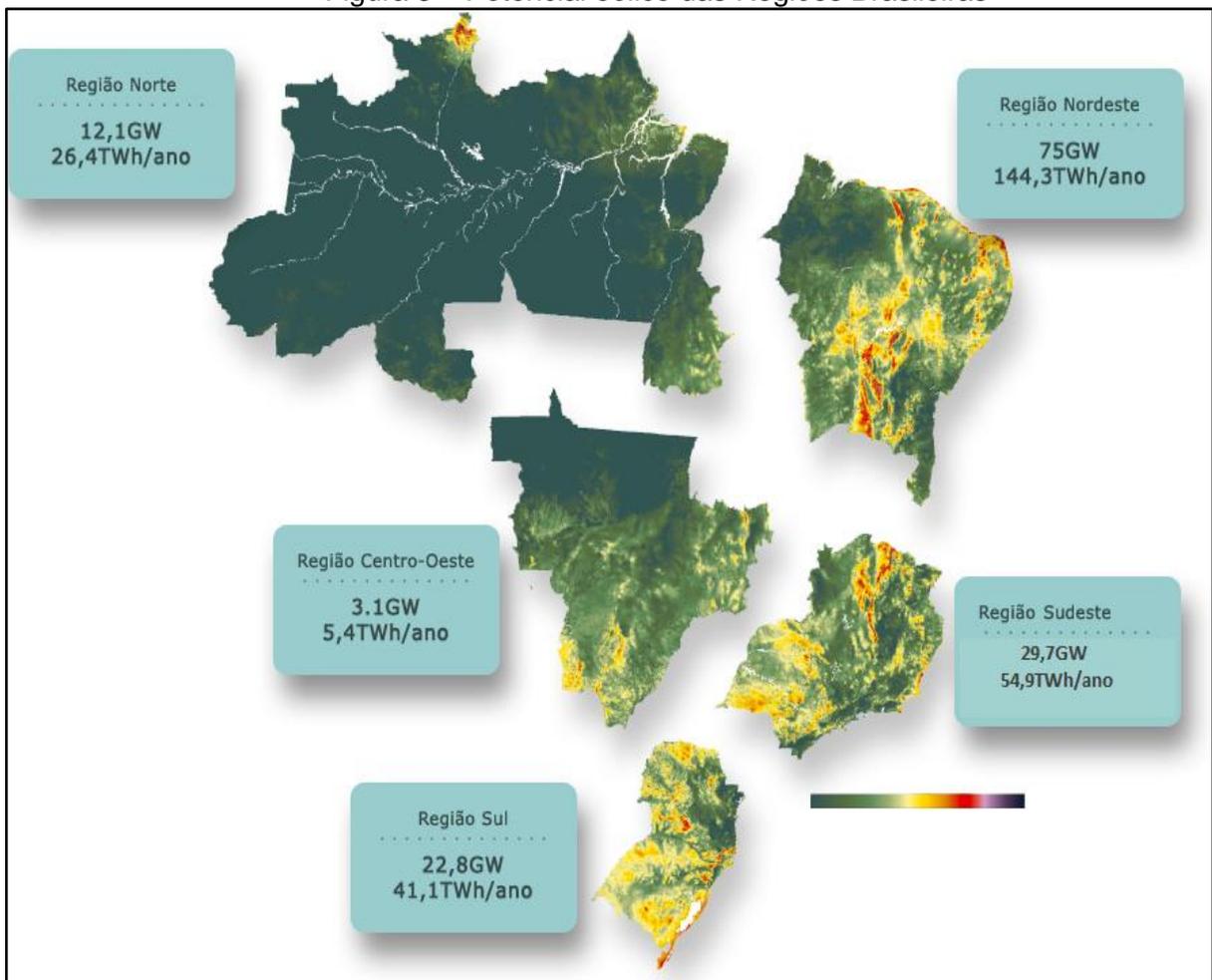


Fonte: Amarante (2009)

## 2.2 ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

O Brasil apresenta um grande potencial para a produção eólica. A Figura 3 demonstra a distribuição do potencial teórico das cinco regiões brasileiras. As de maior potencial são Nordeste, Sudeste e o Sul do país que apesar de não liderar o ranking, possui uma grande quantidade de ventos e se torna uma oportunidade interessante.

Figura 3 – Potencial eólico das Regiões Brasileiras

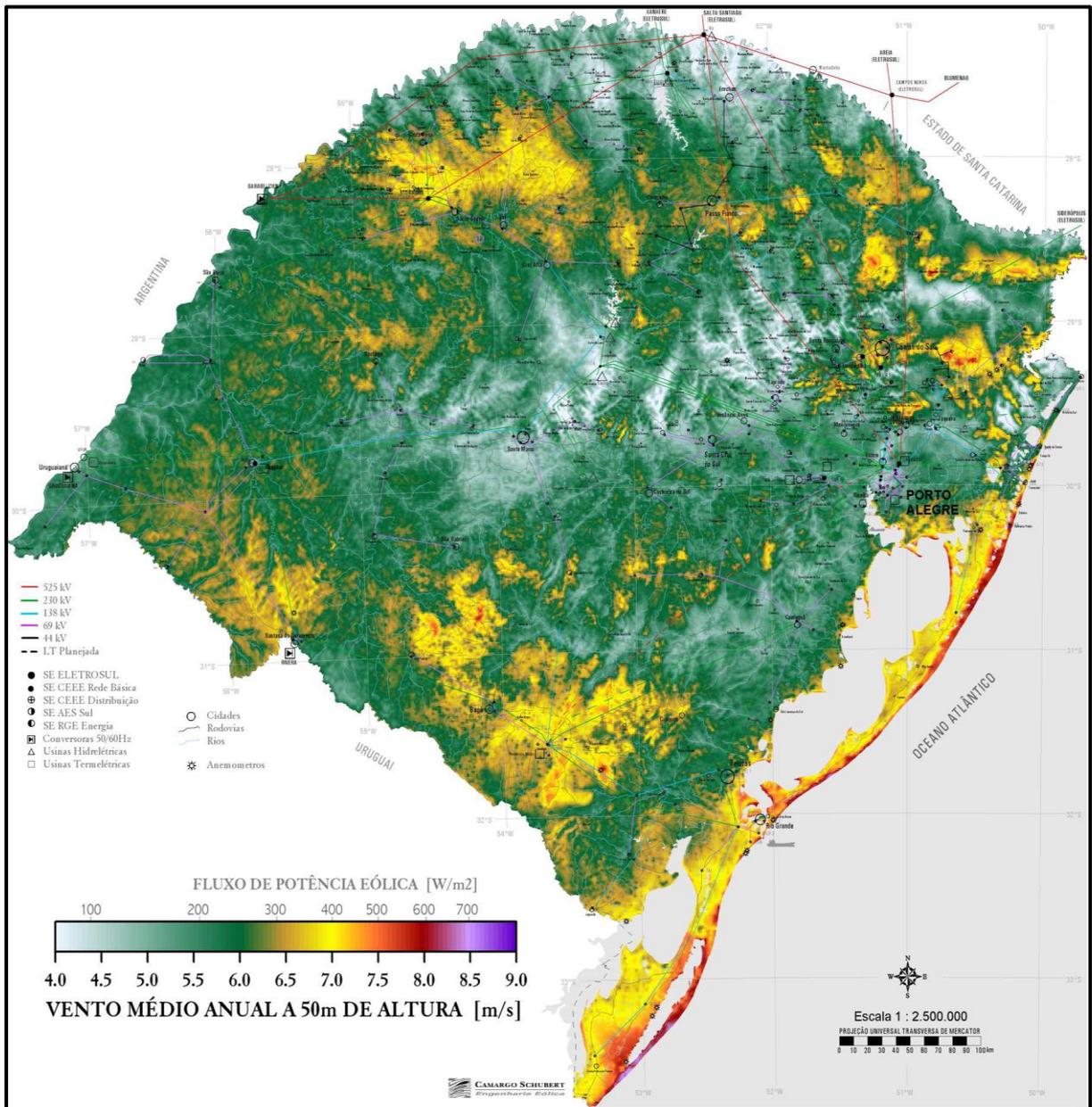


Fonte: adaptado de Amarante (2009)

### 2.2.1 Energia Eólica no Rio Grande do Sul

Com o intuito de instalar o aerogerador no Rio Grande do Sul, é necessário avaliar a velocidade média anual dos ventos nesse estado. A Figura 4 apresenta a velocidade média dos ventos no Rio Grande do Sul a 50 metros de altura. Pode-se observar que no litoral os ventos possuem as maiores velocidades, e a região nordeste possui alguns pontos em laranja e vermelho onde o vento pode ser utilizado.

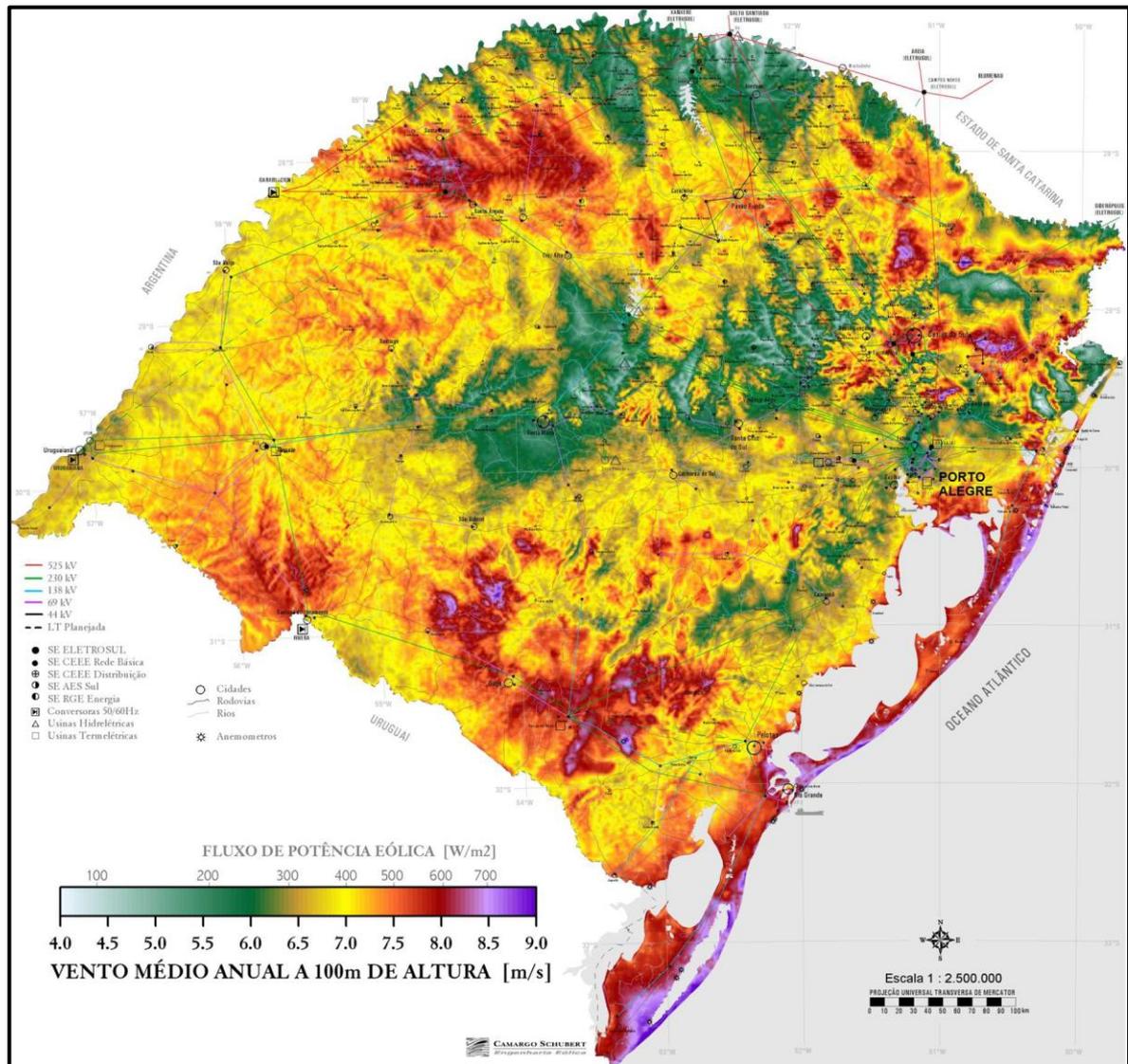
Figura 4 – Atlas Eólico do RS a 50 metros de altura.



Fonte: Back et al. (2014)

Na figura 5, é mostrado as velocidades médias anuais a 100 metros de altura. Observa-se que existe um aumento considerável da velocidade média em todo estado. Segundo os dados coletados por Back et al. (2014), existe um aumento das velocidades nas estações da primavera e no inverno, o que não acontece nas estações de verão e outono. Como o vento é um fenômeno muito variável, o atlas eólico rio-grandense mostra os dados como uma média anual.

Figura 5 – Atlas Eólico do RS a 100 metros de altura.



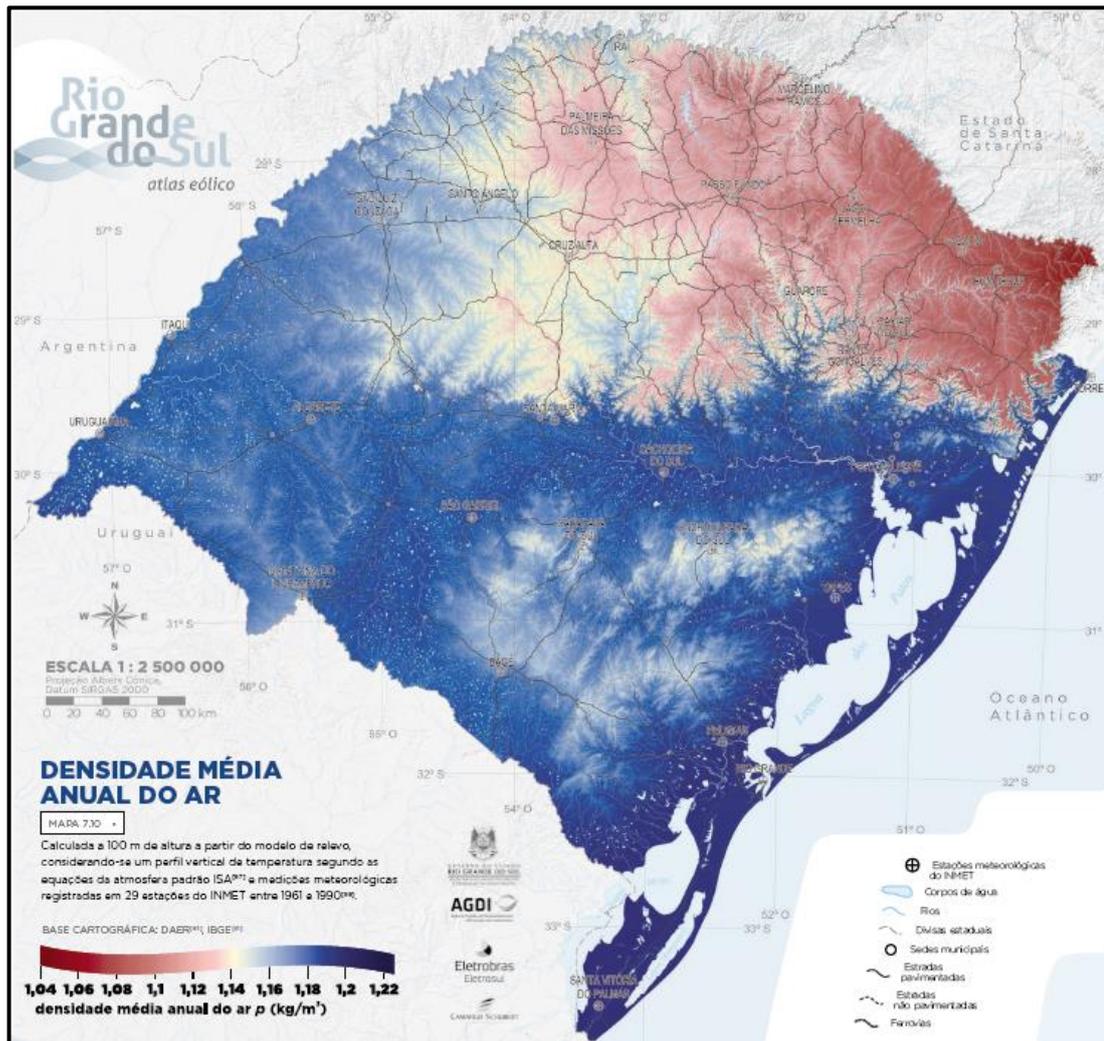
Fonte: Back et al. (2014)

Conforme os dados mostrados acima, o trabalho em questão irá focalizar na região nordeste do estado.

## 2.2.2 Densidade do Ar no Rio Grande do Sul

Para o cálculo de potência do vento, é utilizado o valor de densidade do ar ( $\rho$ ), a Figura 6 ilustra valores médios dessa densidade para todo o estado.

Figura 6 – Densidade média anual do ar no RS a 100 m de altura



Fonte: Back et al. (2014)

### 2.3 AEROGERADORES

Nos aerogeradores, gera-se eletricidade a partir de um gerador que transforma energia cinética em energia elétrica. Os equipamentos com maior velocidade de rotação são os mais indicados para essa conversão de energia, pois irão converter mais energia em menos tempo, em relação a equipamentos com baixa rotação (APPIO, 2001).

De acordo com Santos, Rodrigues e Silva (2016), as turbinas podem ser agrupadas em duas principais características, de acordo com a direção do seu eixo de rotação: Turbinas de eixos horizontal (TEEH) e vertical (TEEV). As primeiras turbinas que apareceram e atualmente são as mais comuns são as TEEH, com uma tecnologia num estado bem consolidado.

Segundo Pinto (2019), os modelos de TEEH mais utilizados são de três pás, mostradas na Figura 7.

Figura 7 – Turbinas Eólicas de eixo horizontal (TEEH) instalados em Osório/RS



Fonte: Pires (2010)

Na (TEEV) os geradores e demais componentes estão na base do equipamento, conforme representado pela Figura 8. Conforme Jin et al (2015), as TEEV apresentam algumas vantagens tecnológicas, quando comparadas às TEEH:

- a) requerem um custo de produção mais baixo;
- b) podem absorver a energia do vento em todas direções, sem necessidade de um sistema de orientação das pás;
- c) produzem baixo nível de ruído, devido à baixa rotação;
- d) operam em segurança sob ventos de alta velocidade.

Segundo Mertens (2006) a turbina Darrieus foi inventada pelo engenheiro aeronáutico George Darrieus em meados de 1932 nos Estados Unidos da América. O primeiro modelo, conhecido como *Eggbeater*, ou modelo de lâminas curvas. Segundo Mertens (2006), a turbina Darrieus apresenta um rendimento de 40% aproximadamente.

Figura 8 – Turbina Darrieus de lâmina curva



Fonte: Biguin (2011)

Outra turbina desenvolvida por Darrieus é comumente chamada de Darrieus H, representada pela Figura 9, pois utiliza pás retas paralelas ao eixo do rotor, fazendo a turbina lembrar essa letra. Esse modelo é bastante utilizado, principalmente para mini e microgeração, tanto em postes como em telhados de casas e prédios. Ela apresenta uma maior área de escoamento em comparação com a *Eggbeater* e, como consequência, apresenta maior rendimento energético, chegando a 50% (SILVA, 2011).

Segundo Brulle (1980), o fato de se ter popularizado no mercado, gerou mais investimento e pesquisa ao redor desse modelo, gerando pequenas variações de montagem, devido a isso esse modelo é conhecido por diversos nomes, como Giromil, SB-VAWT (TEEV de lâmina reta, em inglês), Rotor-H e *Cycloturbine*.

Figura 9 – Turbinas Darrieus H

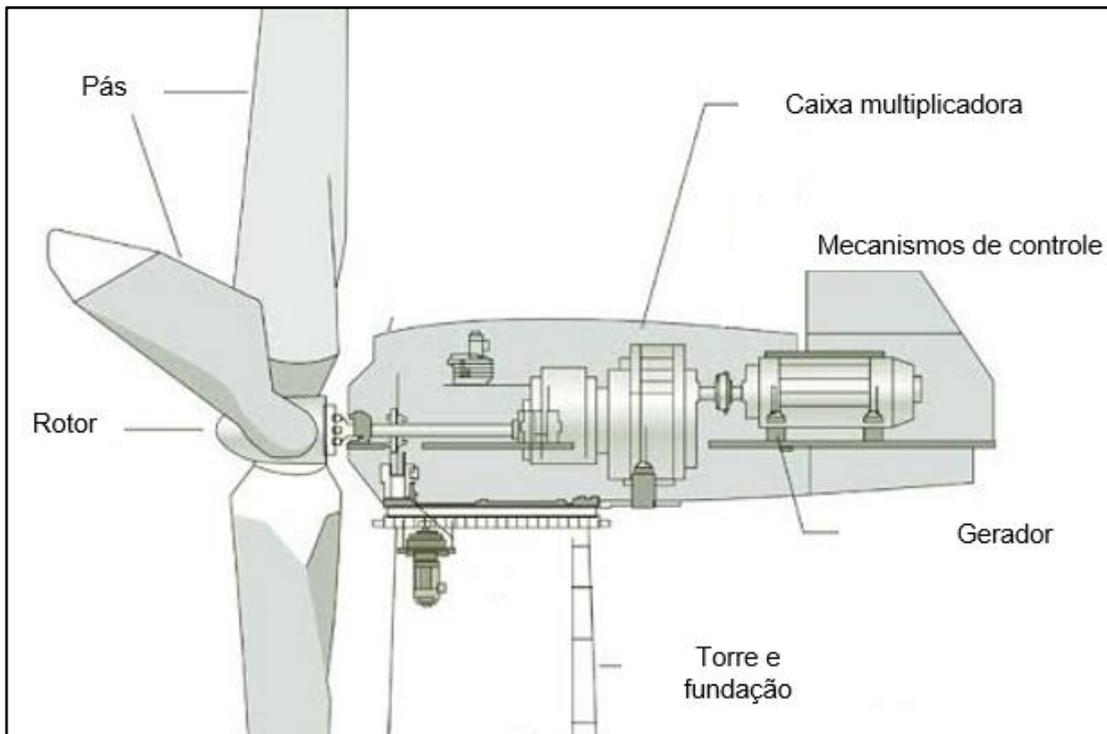


Fonte: Carmo (2012)

### 2.3.1 Composição dos Aerogeradores

Os aerogeradores são compostos por diversos componentes, e podem variar de acordo com o modelo específico. De acordo com Márques et al. (2017), a maioria das turbinas eólicas são compostas pelo rotor juntamente com as pás, onde o torque aerodinâmico é gerado; uma caixa multiplicadora ou de transmissão, responsável por elevar a rotação e transmitir a energia de rotação ao gerador; o gerador elétrico, componente que gera a energia elétrica; mecanismos de controle e orientação das pás, capazes de direcionar o rotor e limitar a velocidade das pás; a torre, que sustenta os componentes; a fundação da construção. A composição dos aerogeradores está mostrada na Figura 10.

Figura 10 – Composição do Aerogerador



Fonte: adaptado de Windbox (2020)

## 2.4 MECÂNICA DOS FLUÍDOS

Segundo Bistafa (2018), um corpo em movimento em um fluido experimenta o arrasto. Pode-se estimar se as forças viscosas são ou não desprezíveis através do número de Reynolds, representado pela Equação 1.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot l}{\mu} \quad (1)$$

Nela  $Re$  representa o número de Reynolds;  $\rho$  representa a massa específica do ar ( $\text{kg/m}^3$ );  $v$  representa a velocidade de escoamento ( $\text{m/s}$ );  $l$  o comprimento de referência ( $\text{m}$ ) e  $\mu$  a viscosidade dinâmica do fluido ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ).

Conforme Bistafa (2018), se o número de Reynolds for maior que 2400, os efeitos viscosos serão desprezíveis, gerando um escoamento não viscoso. Caso o número seja pequeno, os efeitos viscosos serão dominantes gerando escoamento viscoso. Conclui-se, portanto que não basta analisar apenas a viscosidade do fluido, é necessário avaliar o sistema completo do escoamento com o número de Reynolds.

Os regimes laminar e turbulento são pontos importantes a serem mencionados. Segundo Custódio (2013), pode haver uma transição do regime laminar e turbulento em

algum ponto da seção do aerofólio. Existem pontos de transição onde o escoamento deixa de ser laminar e passa a turbulento, ocorre a partir de um valor crítico do número de Reynolds.

#### 2.4.1 Teorema de Bernoulli

As partículas que passam pelas pás da turbina possuem um trajeto mais longo em um dos seus lados. Para que o escoamento do fluido seja contínuo, as partículas que tem o trajeto mais longo devem ter uma velocidade maior do que as do trajeto menor, de forma que alcancem o bordo de fuga ao mesmo tempo, caracterizando escoamento contínuo.

De acordo com a equação de Bernoulli, representada pela Equação 2, a soma das pressões dinâmica e estática num fluido não viscoso se conserva. Portanto, se existir um aumento da velocidade e, conseqüentemente, da pressão dinâmica, esse aumento será acompanhado por uma diminuição da pressão estática e vice-versa. Considerando que as variações da energia potencial sejam desprezíveis.

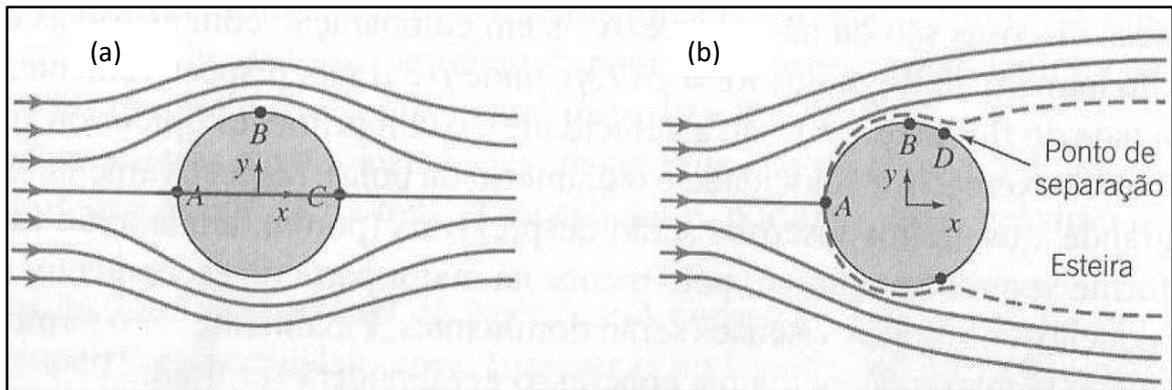
$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = const. \quad (2)$$

Na equação  $\rho$  representa a densidade do fluido ( $\text{kg/m}^3$ );  $v$  é a velocidade do fluido ( $\text{m/s}$ );  $g$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ );  $h$  é a posição em relação a um referencial (m) e  $p$  é a pressão estática (Pa). Devido a isso, o lado mais longo torna-se uma região de baixa pressão e o menor de alta pressão.

#### 2.4.2 Camada Limite e Esteira

A Figura 11 apresenta escoamentos não-viscoso e viscoso. No escoamento não-viscoso, conforme Fox, Pritchard e McDonald (2014), as linhas de corrente e a distribuição de pressões é simétrica da frente para trás, não existindo força líquida de arrasto de pressão. Como se trata de um fluido não viscoso, não existe arrasto devido ao atrito. Embora ele seja desprezível para escoamentos com valores de número de Reynolds acima de 2400, existirá sempre uma camada limite delgada, onde o atrito é de fato significativo. Através dessa camada limite, a velocidade aumenta rapidamente de zero, na superfície, até o valor previsto pela teoria do escoamento não-viscoso, sobre sua borda externa, representado na Figura 11b.

Figura 11 – Escoamento não-viscoso (a) e viscoso (b) sobre um cilindro ou esfera



Fonte: adaptado de Fox, Pritchard e McDonald (2014)

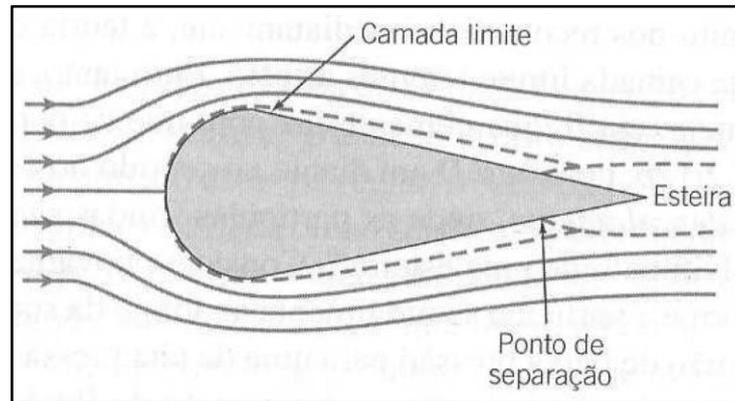
A camada limite ajuda a explicar outra consequência, de suma importância quanto do projeto de parques eólicos.

Conforme Fox, Pritchard e McDonald (2014), trata-se do efeito esteira, também composto pelo efeito de movimento rotacional do fluido na descarga de uma turbina eólica. Por exemplo, o ponto D na Figura 11b, é o ponto de descolamento, onde as partículas são afastadas da superfície do objeto, causando o desenvolvimento de uma esteira. Nela há sempre uma pressão menor que a do ar na frente do objeto. Como consequência disso, surgirá um considerável arrasto de pressão.

No estudo de aerodinâmica, a força de arrasto é devida, em geral, à esteira de baixa pressão. A forma do corpo, tem papel fundamental na característica da esteira formada e, conseqüentemente, na força de arrasto. No caso de turbinas eólicas, se busca minimizar essa esteira. Assim, diminui-se a força de arrasto sobre a turbina e minimiza-se a perturbação do fluxo de ar que será aproveitado em outra, localizada no sentido da descarga da turbina mencionada.

A Figura 12 representa uma forma de corpo onde a esteira é reduzida apenas com sua alteração geométrica. O ponto de separação é deslocado para trás em relação ao caso anterior, devido as linhas de corrente se abrirem ou fecharem gradualmente na extensão do corpo.

Figura 12 – Escoamento viscoso com menor efeito de esteira

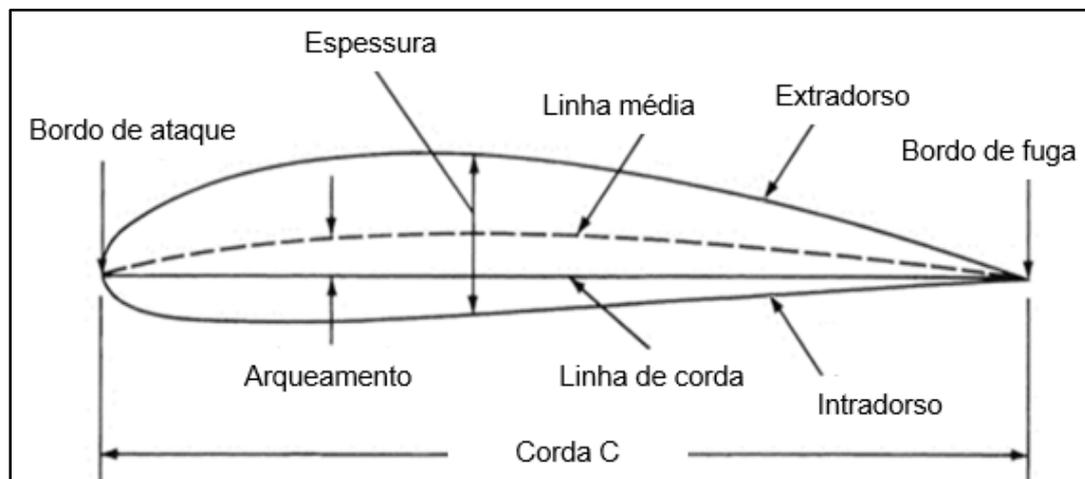


Fonte: Fox, Pritchard e McDonald (2014)

### 2.4.3 Dimensões de um aerofólio

Conforme Santos, Rodrigues e Silva (2016), o aerofólio é definido com a seção bidimensional transversal de uma pá. A Figura 13 apresenta as dimensões que o caracterizam. São elas a corda, a espessura, a linha de curvatura, o extradorso e o intradorso. A parte frontal do aerofólio é denominado de bordo de ataque e o outro extremo é o bordo de fuga. No caso da pá, a envergadura é o comprimento da raiz a ponta.

Figura 13 – Dimensões de um aerofólio



Fonte: Anderson (2015)

Conforme Lewis (1988), a teoria do elemento de pá, também denominada de *Aspect Ratio*, é um indicador importante para determinar as dimensões ideais de uma pá, de forma a maximizar a força de sustentação, e uma consequente otimização na extração de potência do vento. Com o aumento desse valor, a distribuição da força de sustentação ao longo da pá tende a ser mais uniforme. Quando o *Aspect Ratio* tende ao infinito, o fluxo sobre as seções

da pá tende a ser bidimensional; quando o seu valor possuir um valor finito, ocorre o efeito de vórtices de ponta de pá e a força de sustentação cai.

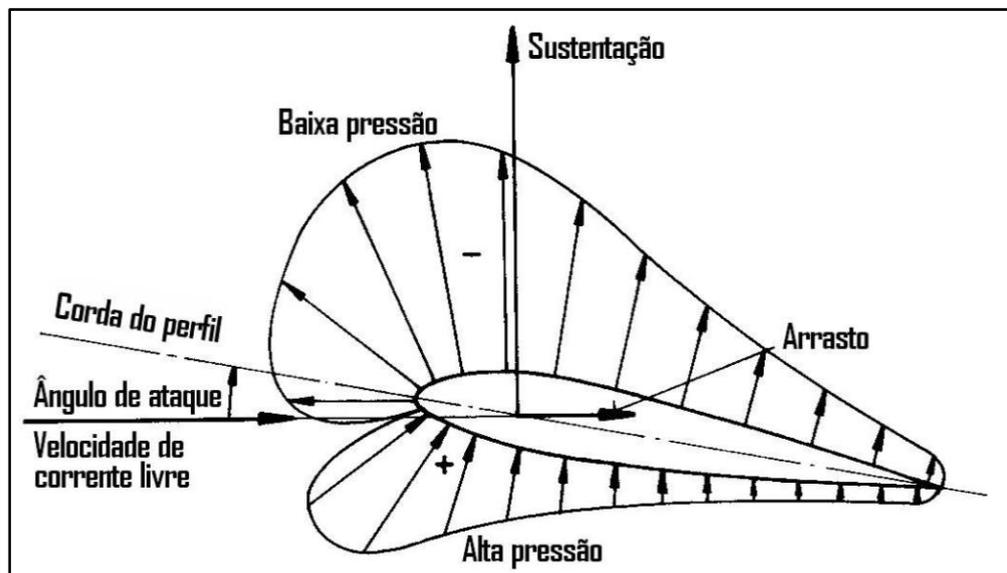
#### 2.4.4 Forças de Arrasto e Sustentação

De acordo com Pinto (2019), o princípio de funcionamento de qualquer turbina eólica é basicamente em função das forças de sustentação e arrasto, que convertem a energia do vento em energia mecânica de rotação do rotor.

A força de sustentação, *Lift*, é perpendicular à direção do vento, surgindo a partir do diferencial de pressão entre as superfícies das pás. Além da força de sustentação em um aerofólio inserido em um escoamento, atua também uma força de resistência, denominada de arrasto, *Drag*, que, conforme Melo (2011), possui a mesma direção da velocidade de escoamento e o sentido é o contrário do movimento do aerofólio no escoamento.

As forças descritas acima podem ser observadas na Figura 14. A resultante aerodinâmica que atua num aerofólio em um escoamento é a soma vetorial das forças de sustentação e de arrasto.

Figura 14 – Principais forças na pá de uma turbina

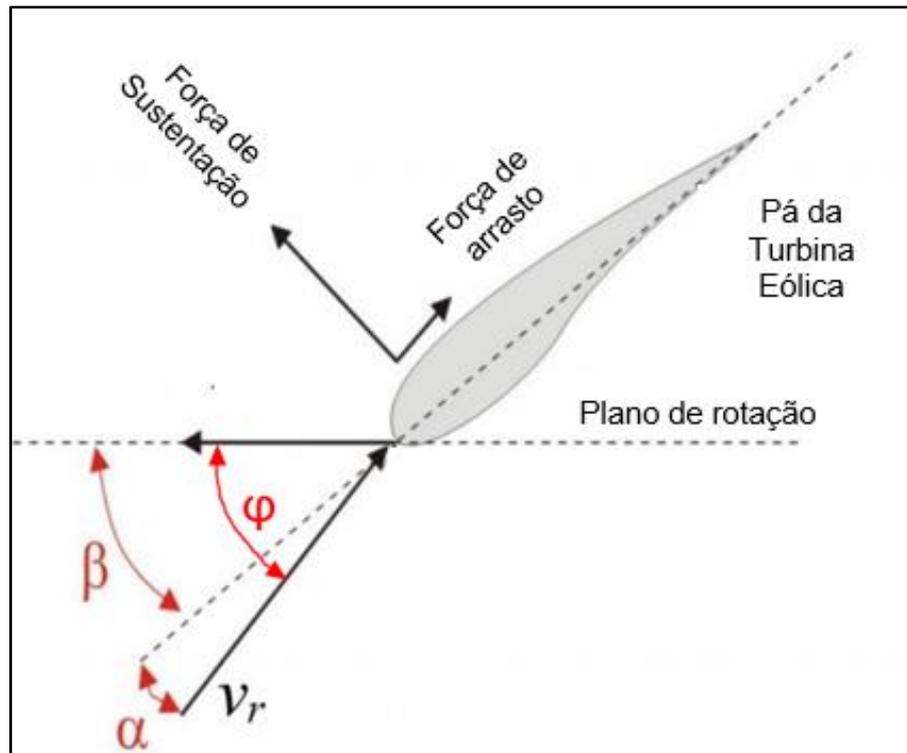


Fonte: Melo (2011)

#### 2.4.5 Ângulos relevantes nas pás

As pás de uma turbina eólica são arranjadas de tal modo a formar ângulos específicos com a velocidade do vento. Os principais são apresentados na Figura 15.

Figura 15 – Ângulos relevantes em uma pá eólica



Fonte: adaptado de Pavinatto (2005)

Os ângulos podem ser descritos da seguinte forma:

- $\beta$  é o ângulo de pá, passo (*pitch*), entre a direção da corda da pá com o plano de rotação.
- $\alpha$  é o ângulo de ataque, entre a direção do vento relativo e a corda do aerofólio.
- $\varphi$  é o ângulo de escoamento, soma dos de pá e de ataque, e corresponde ao ângulo entre a direção do vento relativo e o plano de rotação.

De acordo com Wenzel (2007), o ângulo de ataque influencia diretamente nas forças atuantes no aerofólio e influencia diretamente nas forças de sustentação e de arrasto.

Quando a pá de uma turbina se move, cada setor da pá se moverá com uma velocidade relativa ao ar, portanto, o ângulo de ataque varia para cada seção da pá de acordo com a distância dessa seção.

#### 2.4.6 Mecanismos de Controle

Os mecanismos de controle de uma turbina eólica são de extrema importância para a segurança tanto da turbina como do meio em que ela está inserida. De acordo com Tibola (2009), a partir dela que será garantida a integridade estrutural, além de definir o controle e ajuste de potência. Existem dois tipos básicos para controle de velocidade, por estol e pelo passo, sendo que o primeiro pode ser efetuado por meios passivos ou ativos.

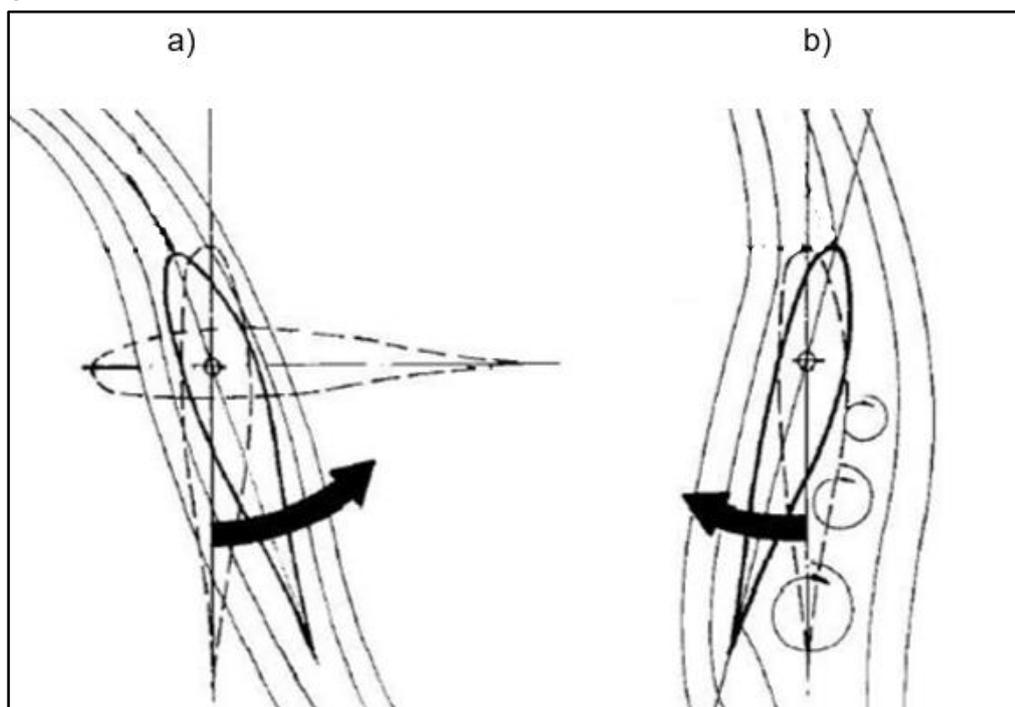
Segundo Pereira (2004), no estol passivo a geometria do aerofólio é desenvolvida com ângulos fixos, para assegurar que, quando o vento atingir uma velocidade específica, seja criada uma zona de turbulência. O benefício desse processo está no fato de não utilizar partes móveis, apesar de ser difícil realizar esse cálculo aerodinâmico do aerofólio. Uma desvantagem é que as pás ficam submetidas a uma grande sobrecarga no momento do estol.

Conforme Tibola (2009), no estol ativo existe um dispositivo mecânico, como molas por exemplo, que faz com ocorra um giro sincronizado das pás. No momento que a turbina ultrapassa sua potência nominal e atinge determinada rotação, as pás se movimentam no intuito de aumentar o ângulo de ataque e assim criar um estol forçado. O controle por estol pode ser observado na Figura 18b.

De acordo com Wenzel (2007), no controle do passo, *pitch*, o ângulo de ataque é mantido dentro de valores desejados quando a velocidade do vento se alterar. Segundo Pereira (2004), esse tipo de mecanismo é muito comum e sofisticado, encontrado principalmente em turbinas de grande porte e faz parte do próprio sistema de controle de potência.

Conforme Tibola (2009), esse controle é feito movendo aletas em cada pá através de servomecanismos, de modo a incrementar e decrementar poucos graus a cada alteração de intensidade do vento, de tal maneira a manter um ângulo ótimo para a extração da potência do vento. O controle por passo está representado pela Figura 16.

Figura 16 – Mecanismos de controle de potência por passo (a) e por estol (b)



Fonte: adaptado de Wenzel (2007)

## 2.5 PERDAS

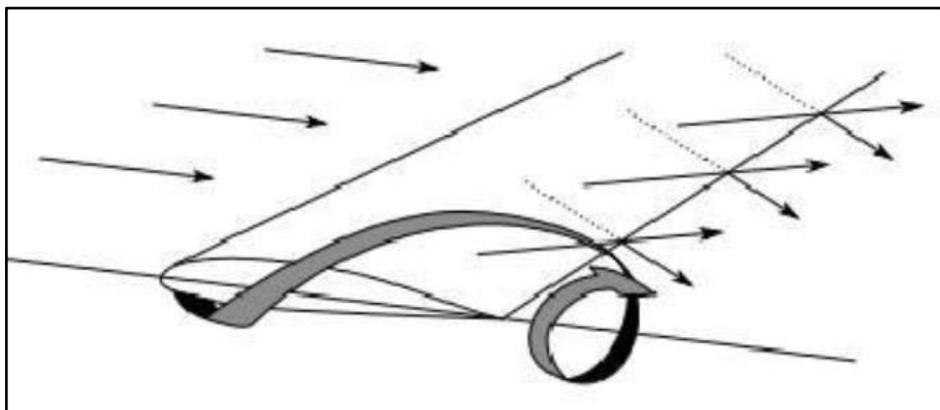
As turbinas eólicas apresentam algumas perdas no rotor, principalmente pela interferência dos vórtices nas pontas das pás, pela turbulência e pelo estol dinâmico. De acordo com Homicz (1991), essas perdas provocam diminuição da eficiência.

### 2.5.1 Perdas nas pontas das pás.

Ao se afastar da raiz da pá, crescem os valores das velocidades tangencial do rotor e relativa do vento que incide sobre ele. Segundo Homicz (1991), esse acontecimento culmina na interferência do deslocamento do ar nas pontas das pás.

O diferencial de pressão entre os dois lados do aerofólio precisa ser equilibrado até o fim da sua extensão. Conforme Branlard (2011), esta equalização causa o aparecimento de um gradiente de pressão que percorre o comprimento da pá, gerando um efeito conhecido como vórtice de ponta, representado na Figura 17.

Figura 17 – Perda na ponta da pá.



Fonte: Branlard (2011)

Esse gradiente de pressão implicará em um movimento radial com fluxo de ar da superfície inferior tendo uma componente radial na direção da ponta, enquanto o fluxo da superfície superior irá na direção oposta. (BRANLARD, 2011).

### 2.5.2 Perdas pela turbulência

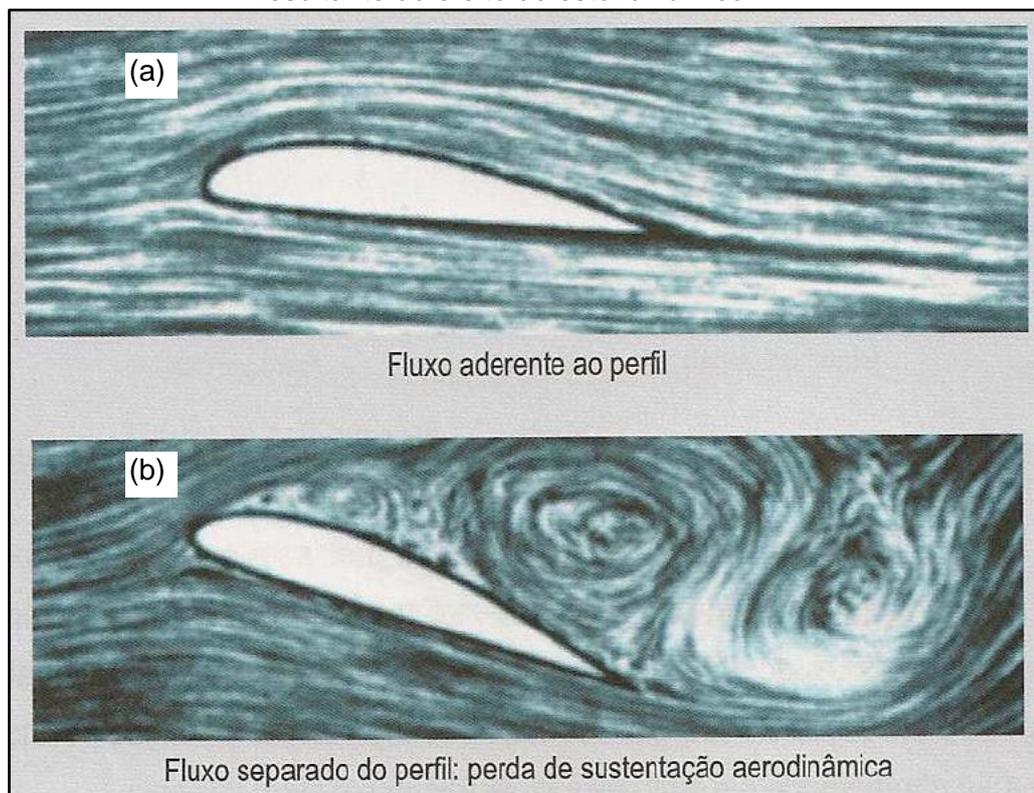
A turbulência se caracteriza por uma alteração repentina na direção e intensidade do vento, em uma certa distância. Conforme Porté-Agel e Wu (2012), diferentes estudos mostram a importância do efeito da turbulência na estrutura de uma turbina eólica. O déficit de

velocidade diretamente associado com a perda de potência nas fazendas eólicas, e a turbulência à jusante da turbina que afeta o carregamento dinâmico induzido pelo fluxo de ar, são duas características que tem recebido atenção na comunidade de energia eólica.

### 2.5.3 Perdas pelo estol dinâmico

Conforme Tibola (2009), o estol ocorre quando o fluxo de ar na superfície do perfil deixa abruptamente, de se fixar no aerofólio, passando a girar em um vórtice irregular criando uma turbulência no extradorso, e assim a força de sustentação diminui. Pode-se observar na Figura 18 que, com o aumento do ângulo de ataque, o aerofólio sofre um aumento do estol dinâmico no seu extradorso. O estol dinâmico apresenta um comportamento histerésico, ou seja, se a pá muda de posição, o fluxo não reage instantaneamente, mas se adapta gradualmente a um novo estado após um determinado tempo (GENDRICH, 1997). O estol dinâmico ocorre em baixas velocidades periféricas, isto é, quando a turbina está em baixa rotação ou perto da raiz da pá. Conforme Homicz (1991), em casos de alta velocidade periférica, este efeito do estol dinâmico não acontece.

Figura 12 – Fluxo de ar aderente (a) e separado (b) no perfil de uma pá eólica, resultante do efeito de estol dinâmico



Fonte: adaptado de Custódio (2013)

## 2.6 POTENCIAL DO VENTO

A energia eólica em si é a própria energia cinética da massa de ar que atravessa a área de varredura das pás do aerogerador, calculada pela equação abaixo.

$$Ec = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

Nesta Equação,  $Ec$  é a energia cinética (J);  $m$  é a massa de ar (kg);  $v$  é a velocidade dessa massa de ar em movimento, ou seja, o vento (m/s).

Já a potência do vento é dada pela derivada da energia cinética em relação ao tempo, conforme equação abaixo.

$$P = \frac{dEc}{dt} = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot v^2$$

Nela  $P$  é a potência do vento (W);  $Ec$  é a energia cinética (J);  $t$  é o tempo;  $\dot{m}$  é o fluxo de massa de ar (kg/s) e  $v$  é a velocidade dessa massa de ar em movimento – vento (m/s).

Sendo  $\dot{m}$  o fluxo de massa de ar que atravessa perpendicularmente uma seção transversal de área  $S$  ( $m^2$ ) (BETZ, 1996). Esse fluxo de massa é dado pela seguinte equação.

$$\dot{m} = \rho v A$$

Assim, substituindo as duas equações anteriores, chega-se à conclusão de que a potência contida no vento ( $P_{vento}$ ) se dá pela Equação 3.

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

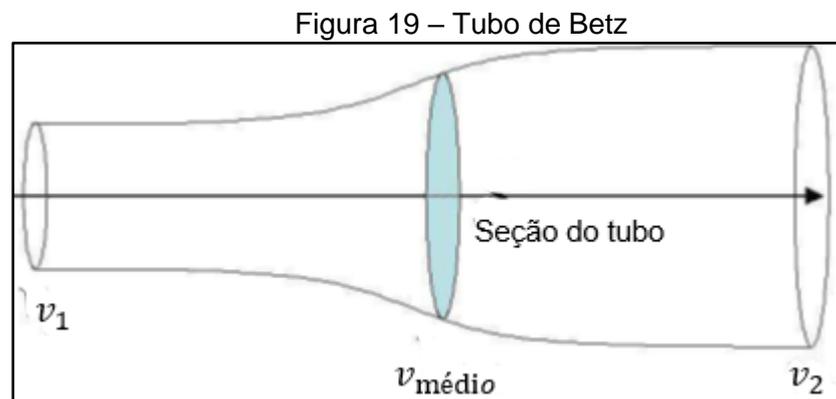
Percebe-se que a potência eólica está diretamente ligada à área das pás, à densidade do ar e ao cubo da velocidade do vento.

Através dos conceitos expostos, se percebe que a energia gerada é altamente sensível à velocidade do vento que atravessa as pás. Se identifica que quanto maior a área ocupada pelas pás, e quanto mais vento soprar, maior será a potência aproveitada pelos aerogeradores.

### 2.6.1 Limite de Betz

Após apresentado os conceitos físicos da potência do vento. Segundo Betz (1929), é importante ressaltar que existe um limite teórico para a extração da potência dos ventos, descrito em 1929 pelo físico alemão Albert Betz, e atualmente conhecida pelo coeficiente de Betz.

A lei da conservação de massa em um determinado volume de controle, pode ser descrita ou fundamentada no fato de o fluxo de massa de ar que entra no rotor ser exatamente ao que sai desse rotor, conforme Figura 19 e matematicamente pela Equação 4, da lei da conservação de massa. A área ocupada pelo ar na saída do rotor é maior do que a ar na entrada.



Fonte: adaptado de Betz (1966)

$$\dot{m} = \rho A_1 v_1 = \rho A v = \rho A_2 v_2 \quad (4)$$

Na equação  $\dot{m}$  é o fluxo de massa de ar (kg/s)  $\rho$  é a massa específica do ar (kg/m<sup>3</sup>);  $v_1$  é a velocidade da massa de ar na entrada do rotor (m/s);  $v_2$  é a velocidade da massa de ar na saída do rotor (m/s);  $A_1$  é a área da seção transversal na entrada do rotor (m<sup>2</sup>) ;  $A_2$  é a área da seção transversal na saída do rotor (m<sup>2</sup>);  $A$  é a área da seção transversal no rotor (m<sup>2</sup>) e  $v$  é a velocidade da massa de ar no rotor (m/s).

É intuitivo de se pensar a geração de energia elétrica está diretamente relacionada à energia cinética contida no vento, ou seja, a potência máxima que se utiliza do vento será aquela na qual a velocidade de saída do rotor seja nula. O físico Albert Betz provou fisicamente que para obter a máxima potência teórica possível, a velocidade de saída no rotor deve ser exatamente igual a um terço da de entrada, ou seja, mais de 66% da energia cinética contida na massa de ar que atravessa o rotor seria aproveitada e convertida em energia elétrica.

A potência extraída do fluxo de ar que atravessa o rotor é a diferença entre a potência na entrada e na saída deste rotor. Substituindo na Equação 3, obtém-se a seguinte equação.

$$P_{extraída} = \frac{1}{2}\rho A_1 v_1^3 - \frac{1}{2}\rho A_2 v_2^3 = \rho(A_1 v_1^3 - A_2 v_2^3)$$

Adicionalmente, pode-se substituir a Equação anterior na 4, obtendo-se a 5.

$$P_{extraída} = \rho A v (v_1^2 - v_2^2) \quad (5)$$

É importante informar uma conclusão física, descrita pela equação abaixo, na qual a velocidade da massa de ar onde a potência mecânica é extraída é a média aritmética das de entrada e de saída do rotor.

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

Dessa forma, substituindo-se as duas Equações anteriores, se obtém a 6.

$$P_{extraída} = \rho A v_1^3 \left( \frac{\left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \left\{1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right\}}{2} \right) \quad (6)$$

Através da última equação, pode-se determinar o coeficiente de potência do rotor ( $C_p$ ), descrito pela Equação 7.

$$C_p = \frac{\left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \left\{1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right\}}{2} \quad (7)$$

O coeficiente de potência do rotor é uma medida de eficiência da turbina eólica, pois relaciona a energia que pode ser produzida ou gerada em relação à total contida no vento que atravessa o rotor. Ao buscar o ponto máximo desse coeficiente de potência, utilizando a relação das velocidades, sendo que a velocidade de entrada e na saída do rotor deve ser de um terço, conclui-se que o valor máximo de  $C_p$  é descrita pelo Limite de Betz, representado pela Equação abaixo.

$$C_p = \left(\frac{16}{27}\right) = 59,3\%$$

Portanto, pode-se dizer que o limite teórico para a extração de potência do vento é de 59,3% da potência disponível, ou seja, nenhum aerogerador pode ter aproveitamento teórico maior que esse limite. Portanto, substituindo a Equação anterior na 3, obtem-se a Equação 8.

$$P_{extraída} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (8)$$

Vale ressaltar que esse valor é calculado para uma turbina ideal, com infinito número de pás e sem perdas mecânicas ou aerodinâmicas.

### 2.6.2 Coeficiente de Velocidade específica

Sempre que a turbina eólica extrai potência do vento, um torque  $T$  é gerado, conforme representado pela Equação 9.

$$T = \frac{P_{vento}}{w} \quad (9)$$

Na Equação 9,  $w$  é a rotação do rotor (rpm) e  $P_{vento}$  é a potência extraída do vento em (W).

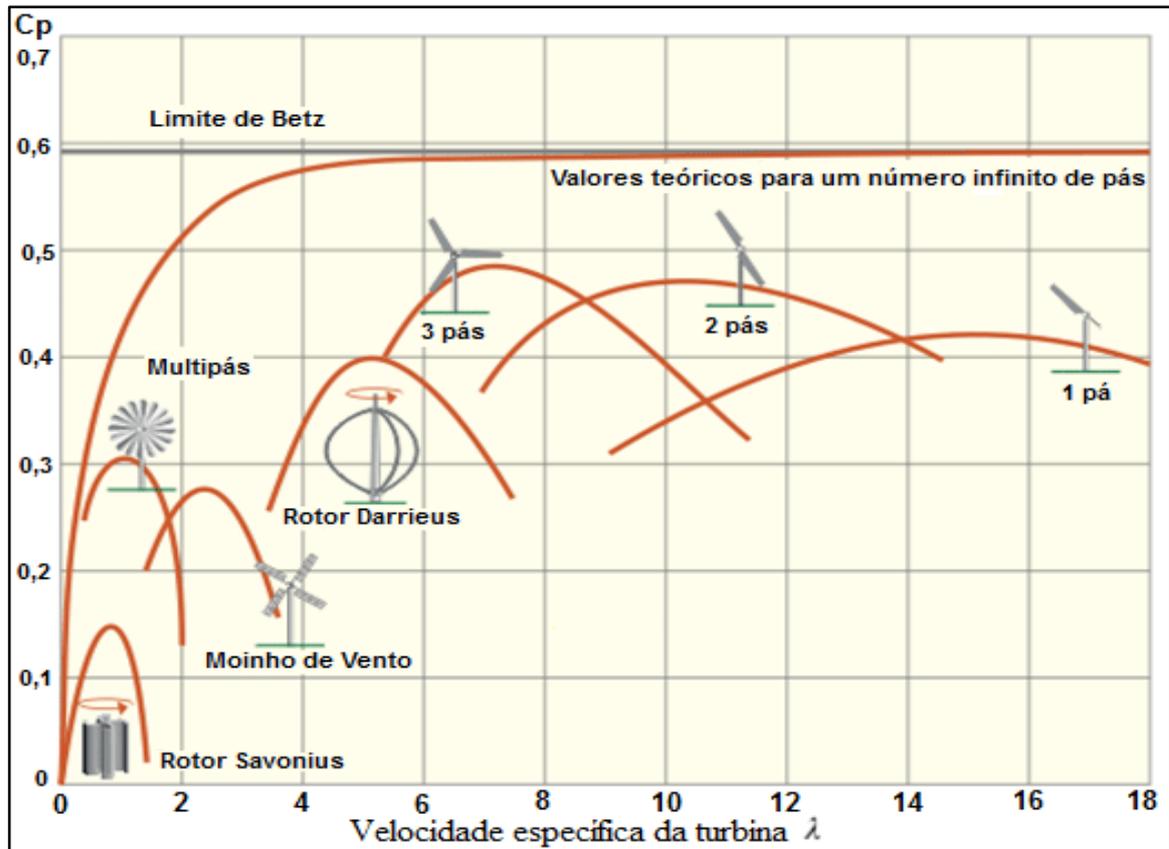
Conforme Tesch et al. (2015), o coeficiente de potência e o torque de uma turbina podem ser expressos em função da velocidade específica.

O coeficiente de velocidade específica é também conhecido pela sigla em inglês TSR. Sendo a velocidade da pá, o produto entre a velocidade rotacional do rotor e o seu raio, obtem-se a Equação 10 para o coeficiente de velocidade específica.

$$\lambda = \frac{wR}{v} \quad (10)$$

Onde  $\lambda$  é o coeficiente da velocidade específica,  $w$  é a rotação do rotor (rad/s);  $R$  significa o raio da turbina (m) e  $v$  representa a velocidade do vento (m/s). Cada modelo de turbina eólica possui uma curva de potência específica em função da velocidade específica, conforme representado pela Figura 20. De acordo com Pfaffel, Faulstich e Rohrig (2017), o coeficiente de potência é um indicador muito comum para classificar as turbinas eólicas.

Figura 20 – Coeficiente de potência x velocidade específica para turbinas eólicas



Fonte: Bazzo (2017)

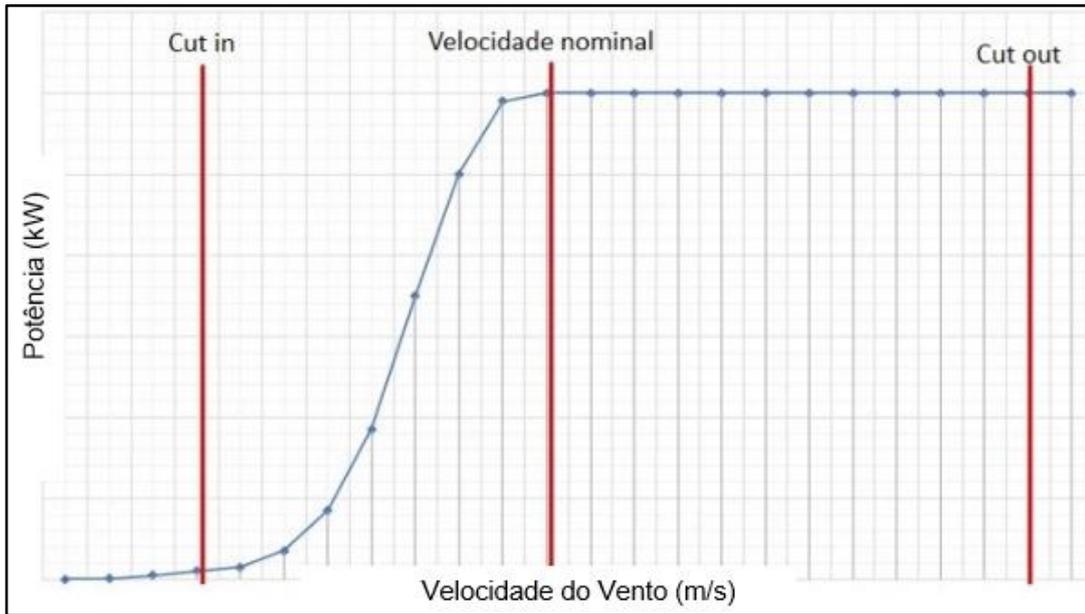
### 2.6.3 Curva de Potência

Os aerogeradores possuem uma curva de potência, que representa o quanto é gerado de potência pela velocidade do vento.

Conforme descrito por Dutra e Ferreira (2011), essa curva de potência mostra as velocidades na qual a turbina começa a rotacionar, ou seja, gerar energia (*cut-in speed*), a nominal do aerogerador, onde a geração se mantém constante e a velocidade de corte, onde o aerogerador é retirado de operação para não ser danificado pela alta velocidade de vento (*cut-out speed*).

A velocidade cut-out mostra também a capacidade da turbina eólica de suportar altas velocidades do vento. De velocidade de cut-in para a velocidade nominal, a turbina aumenta sua potência conforme aumenta a velocidade do vento que incide sobre a área do aerogerador. A curva de potência é demonstrada pela Figura 21.

Figura 21 – Curva de Potência de um Aerogerador.



Fonte: adaptado de Silva e Abreu-Harbich (2017)

## 2.7 AEROGERADORES EM MEIOS URBANOS

O sucesso dos aerogeradores em meios edificados depende da quantidade e da frequência dos recursos eólicos no local. De acordo com Santos (2014), no meio urbano, se faz necessário reunir algumas condições para a instalação de turbinas eólicas, em especial se o local não possuir obstáculos ao vento em sua volta, e que elas não provoquem ruídos ou tenham qualquer efeito visual, como a reflexão do sol nas suas pás. A Figura 22 mostra alguns exemplos de aerogeradores em edificações localizadas em países da Europa.

Figura 22 – Recurso eólico em meios edificados.

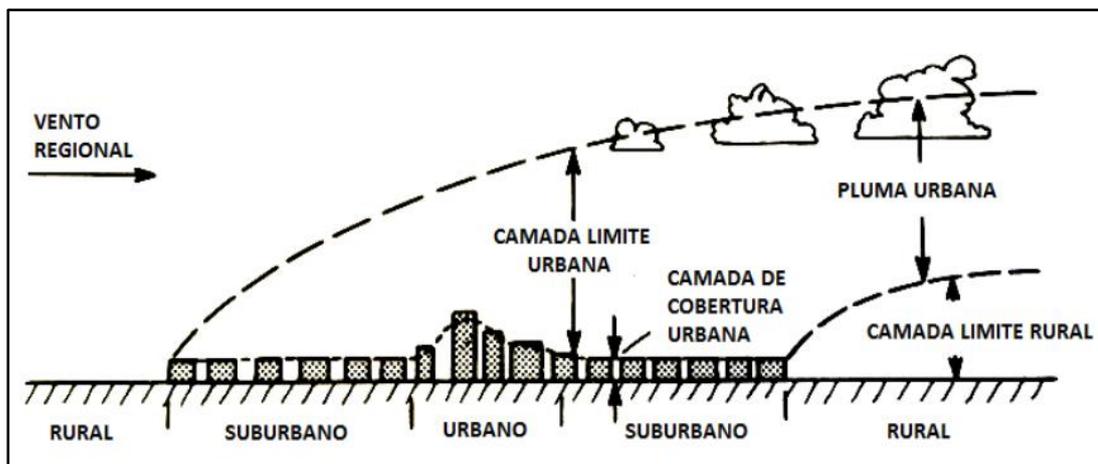


Fonte: adaptado de Park et al. (2019)

De acordo com Ibelli (2013), no que diz respeito aos locais edificados, devido à geometria superficial ser muito variável e possuir uma elevada rugosidade, na região mais superficial o escoamento do ar não é uniforme e possui valores reduzidos de velocidade média e altos níveis de turbulência.

A passagem do escoamento do ar de uma área rural a uma urbana resulta na formação da camada limite urbana, CLU, representada pela Figura 23. Dentro dessa camada limite se identifica a camada de cobertura urbana, com uma altura média igual aos elementos de rugosidade, ou seja, os prédios e construções.

Figura 23 – Estrutura da Camada limite Urbana.



Fonte: Debiazi (2016)

Apesar da menor disponibilidade do recurso eólico na CLU, existem, locais onde pode ser aproveitado a própria forma dos edifícios que apresentam efeito concentrador (SANTOS 2014)., conforme ilustrado na Figura 24.

Figura 24 – Turbinas eólicas em regiões concentradoras de vento

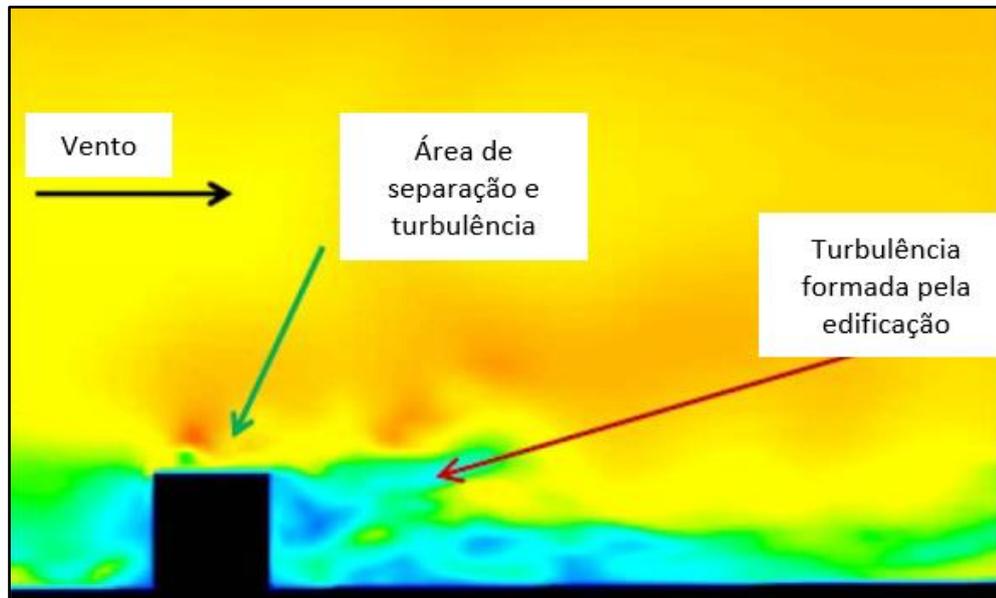


Fonte: adaptado de Babrova (2015)

Os edifícios no meio urbano, sobretudo os de maior altura, apresentam uma cobertura plana, que se torna um local interessante para a aplicação de uma turbina eólica. Contudo é necessária uma análise do comportamento do escoamento sobre as construções para avaliar sua aplicabilidade. Conforme Blocken (2014), a análise do comportamento do escoamento sobre os edifícios é bastante complexa e difícil de modelar, e simulações em CFD ou ensaios em túnel de vento são levados a cabo, de forma a perceber o padrão do escoamento em torno de edificações.

Na Figura 25, é possível visualizar o complexo padrão que o vento apresenta quando incide perpendicularmente a uma fachada. De acordo com Santos (2014), foi apresentado pontos de separação bem marcados referente ao escoamento em edifícios com bordas, levando a formação de bolhas de separação e turbulência.

Figura 25 – Escoamento em torno de um edifício isolado



Fonte: adaptado de Blocken (2014)

Nas arestas dos edifícios acontece a separação da camada limite e do fluxo de vento. Isso forma uma zona de recirculação, caracterizada pela diminuição da velocidade e aumento da turbulência. Além da zona de recirculação, forma-se uma esteira, onde a velocidade e a intensidade de turbulência voltam gradualmente aos valores do escoamento livre. Conforme Mertens (2006), essa região deve ser evitada para localização de uma turbina eólica e deve ser importante conhecer o tamanho da região de recirculação.

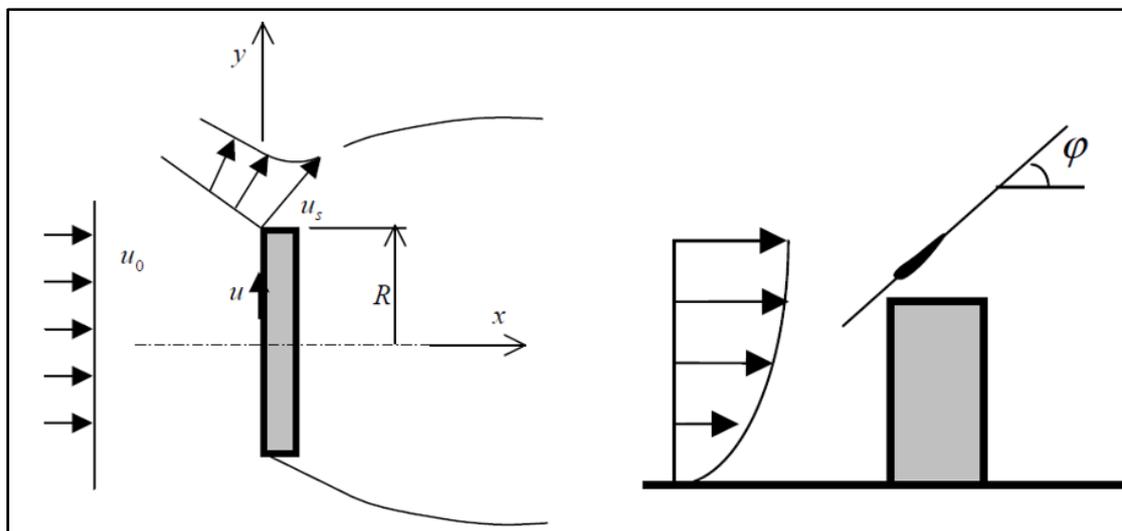
À montante do edifício, dá-se origem a uma zona de recirculação menor, devido à interação entre as elevadas pressões que se estabelecem na superfície frontal do edifício e o gradiente adverso de pressão existente em proximidade do terreno. Conforme Ibelli (2013), outro fenômeno de particular relevância é o efeito de aceleração nos bordos do edifício

expostos à ação do vento, resultantes da diferença de pressão presente nas superfícies adjacentes.

### 2.7.1 Ângulo de Inclinação

Conforme Mertens (2006), o ângulo entre o teto de uma edificação e o vetor velocidade desviado é chamado ângulo de inclinação, que pode variar de acordo com a posição do telhado, a rugosidade da área contra o vento, a área frontal, o arredondamento das bordas e o fluxo de vento livre no edifício. O ângulo de inclinação  $\varphi$  pode ser visualizado na Figura 26.

Figura 26 – Ângulo de Inclinação



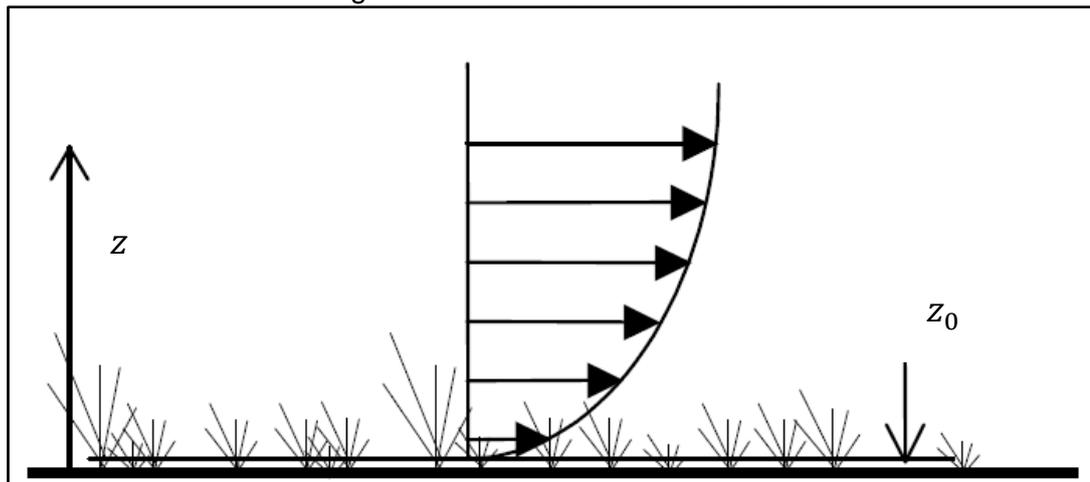
Fonte: adaptado de Mertens (2006)

Conforme Mertens (2006), para turbinas eólicas, um concentrador de placas de aerofólios pode ajudar a separar o fluxo de ar na borda de edifícios influenciando o vento a aumentar seu valor em módulo e consequentemente aumentar a eficácia da turbina.

### 2.7.2 Lei Logarítmica

De acordo com Mertens (2006) a velocidade do vento decresce até zero na superfície do solo, resultando na chamada camada limite atmosférica, representada pela Figura 27. O fluxo do vento nessa camada pode ser dividido entre zonas interna e externa. Correlaciona-se a velocidade do vento nas duas zonas resultando num perfil de camada limite logarítmica, conhecida por lei logarítmica.

Figura 27 – Camada limite atmosférica



Fonte: Mertens (2006)

De acordo com Back et al. (2014), a rugosidade aerodinâmica  $z_0$  varia conforme as características da cobertura da terra nos ventos próximos à superfície. A rugosidade do terreno é determinada pela altura, espaço e características do local de estudo. A Figura 28 apresenta valores típicos de rugosidade em diversos tipos de cobertura e uso da terra.

Figura 28– Rugosidade do terreno

Tipo de Cobertura e/ou uso da terra	Faixa de Rugosidade $Z_0$ [m]
Áreas urbanas	0,7 - 3
Florestas	0,4 - 1
Reflorestamento	0,4 - 0,95
Vegetação de áreas úmidas	0,1 - 0,4
Culturas agrícolas	0,02 - 0,15
Pastagens	0,02 - 0,20
Solo exposto	0,001 - 0,01
Corpos de água [lagos, oceano] <i>sem vento de superfície</i>	0,0002 - 0,001

Fonte: adaptado de Back et al (2014)

A lei logarítmica pode ser escrita conforme a Equação 11. Segundo Mertens (2006) a velocidade do vento a uma certa altura pode ser calculada analiticamente, considerando valores teóricos para sua rugosidade do terreno.

$$Uz = \frac{u}{k} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (11)$$

Na Equação acima,  $Uz$  representa a velocidade do vento (m/s);  $u$  é a velocidade de atrito;  $k$  é a constante de Von Karmán ( $k=0,4$ );  $z$  altura acima do nível do solo (m);  $z_0$  é a rugosidade do terreno. A velocidade de atrito e a constante de Von Karmán não serão explicadas nesse trabalho, pois utilizou-se da Equação 11 para estimar a velocidade entre duas alturas diferentes e esses termos foram anulados.

## 2.8 DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DE WEIBULL

A distribuição estatística de Weibull é frequentemente utilizada para analisar estudos dos ventos. De acordo com Back et al. (2014), essa distribuição depende de dois parâmetros, sendo um de escala e outro de forma. Ela trata os dados com maior aderência aos de velocidades do vento. A análise de Weibull é uma importante ferramenta para confiabilidade em configurar vida útil de equipamentos na engenharia de confiabilidade.

Foi utilizado a distribuição de Weibull nesse trabalho para apresentar as possíveis variações na velocidade do vento. Foi calculado diversos dados estatísticos para determinar os parâmetros da distribuição de Weibull, tais como velocidade média pela equação 12 e desvio padrão pela equação 13.

$$v_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i) \quad (12)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - v_m)^2 \quad (13)$$

Nas Equações acima,  $v_m$  representa a velocidade média do vento (m/s);  $n$  é o número de medições;  $v_i$  é a velocidade em cada medição (m/s);  $\sigma^2$  representa o desvio padrão. Com esses valores obtidos conseguimos determinar 2 parâmetros para a distribuição de Weibull. De acordo com Akhlaque et al. (2006), o fator de forma da curva de Weibull ( $\beta$ ) pode ser aproximado pela Equação 14.

$$\beta = \left( \frac{\sigma^2}{v_m} \right)^{-1,086} \quad (14)$$

Onde  $\beta$  representa a forma da curva de Weibull. Foi calculado o parâmetro de distribuição, representado pela Equação 15.

$$\alpha = \frac{v_m}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)} \quad (15)$$

Onde  $\alpha$  representa o parâmetro de distribuição de Weibull;  $\Gamma$  é o fator gama de Weibull. Com esses parâmetros obtidos, o Excel fornece uma função que possibilita calcular a densidade de probabilidade para cada faixa de velocidade. A função utiliza as velocidades desejadas e os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ .

## 2.9 LEGISLAÇÃO E AMBIENTE

As turbinas eólicas instaladas em terreno brasileiro devem atender às normas legais necessárias para sua implantação e ligação elétrica com as unidades distribuidoras de energia. Além disso deve-se atender as especificações para seu licenciamento ambiental.

### 2.9.1 Resolução Normativa ANEEL 482/2012

A Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de energia elétrica. O consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis e fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade.

Os microgeradores são aqueles que possuam potência instalada menor ou igual a 75 kW, os minigeradores atuam na faixa de 75 kW a 5 MW. Conforme a ANEEL (2012) existe requisitos mínimos para a liberação, descritos abaixo:

- a) ART do responsável técnico do projeto elétrico e instalação do sistema de microgeração;
- b) diagrama unifilar contemplando geração/proteção/medição e memorial descritivo da instalação;
- c) certificado de conformidade do(s) inversor(es) ou número da concessão do INMETRO do(s) inversor(es) para a tensão nominal de conexão com a rede;

- d) lista de unidades consumidoras participantes do sistema de compensação (se houver);
- e) documento que comprove o reconhecimento pela ANEEL da cogeração qualificada (se houver).

Além desses requisitos, é necessário, a validação pela distribuidora de energia da região, assim como sua inspeção regular. De acordo com a ANEEL (2012), o saldo positivo do crédito de energia gerado não pode ser revertido em dinheiro, mas sim utilizado para abater o consumo ou fatura nos próximos meses. Não se faz necessário assinatura de contrato para os micro e minigeradores distribuídos participantes do sistema de compensação da energia.

### **2.9.2 Licenciamento Ambiental**

De acordo com Araújo (2015) o licenciamento ambiental é um procedimento administrativo no qual o órgão ambiental competente licencia a implantação, ampliação e operação de empreendimentos causadores da degradação ambiental.

Conforme Back et al. (2014) os parques eólicos geram os seguintes impactos ao meio-ambiente: alteração da paisagem, deslocamento de terra, desmatamento e alterações da drenagem do terreno, geração de ruídos e afugentamento da fauna terrestre e aérea.

Segundo Back et al. (2014) os empreendimentos de energia eólica estão sujeitos a legislação ambiental federal, estadual e municipal, aplicada pelos procedimentos dos órgãos competentes. Na esfera federal, é regulamentado pelo MMA e gerido pelo IBAMA ou UC's federais caso envolvam unidades de conservação. No meio estadual os processos são regulamentados pelo SEMA e geridos pela FEPAM.

A Resolução/CONAMA 462/2014 estabelece os procedimentos para o licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica a partir de fonte eólica em superfície terrestre. De acordo com a Resolução os microgeradores eólicos com potência menor ou igual a 75 quilowatts podem ser objetos de autorização legal, porém ficam dispensados dos procedimentos de licenciamento ambiental previsto no artigo quinze da Resolução/CONAMA 462 /2014.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem por finalidade apresentar a descrição do local de estudo do trabalho, seus instrumentos para coleta de dados e metodologia utilizada para alcançar os objetivos, previamente definidos no item 1.2.1.

#### 3.1 DESCRIÇÃO DO AMBIENTE DE ESTUDO

As turbinas eólicas podem ser aplicadas a diversas edificações para obtenção da energia. Porém, para adquirir dados e parâmetros de análise se faz necessário estudar em alguma construção já existente. O prédio escolhido para a análise está localizado em Caxias do Sul, na rua Claudio Luis Lamp, Bairro Vinhedos, o residencial Vinas do Sol, representado na Figura 29.

O prédio não se localiza numa área central da cidade, porém no seu perímetro existe diversas construções e terrenos de proteção ambiente com árvores de alto porte. O prédio possui uma altura de 30 metros, com uma área de 260 m<sup>2</sup> no telhado.

Figura 29 – Residencial Vinas do Sol

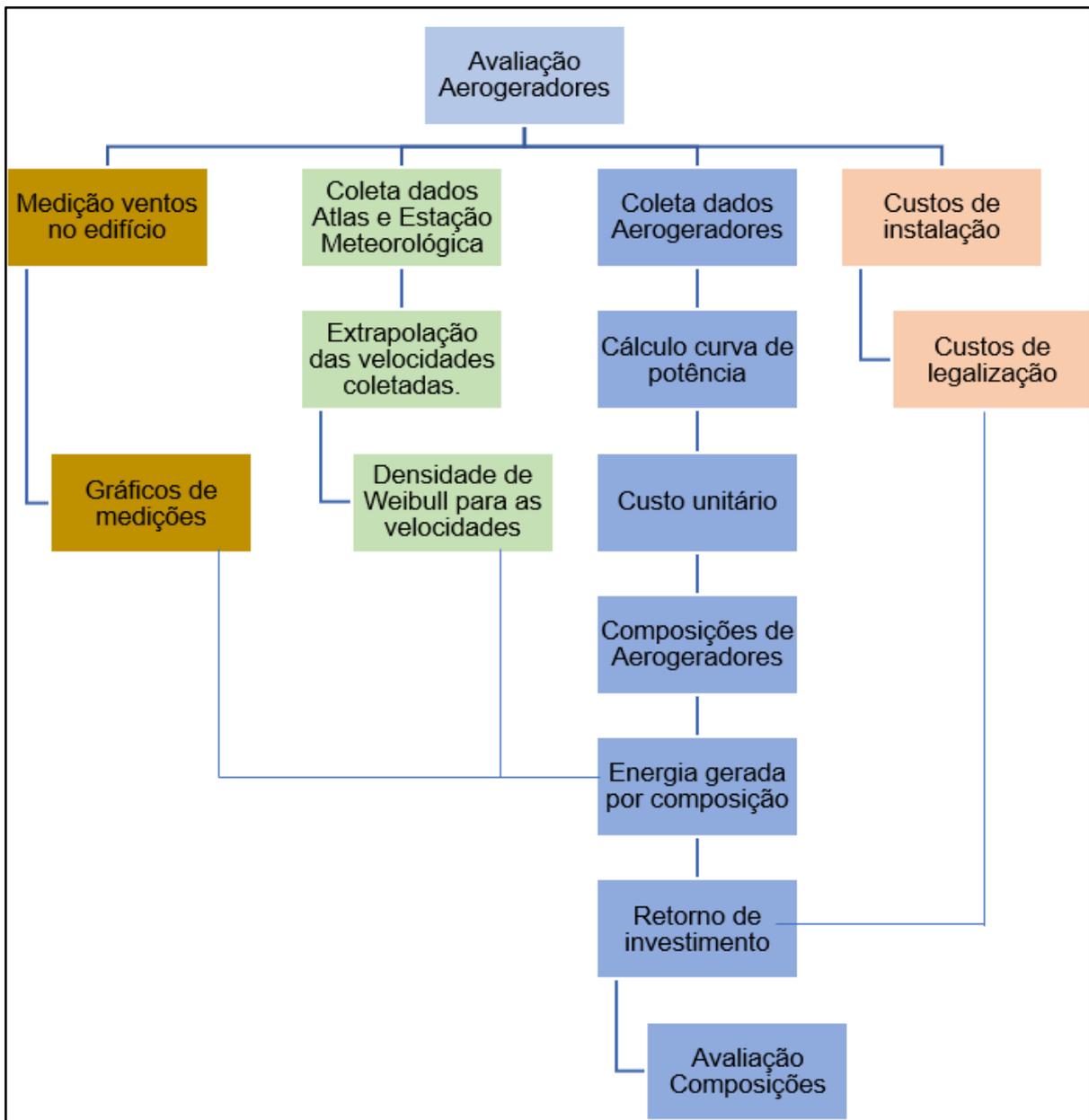


Fonte: o autor (2020)

#### 3.2 ETAPAS DE TRABALHO

A metodologia para coleta dos dados do vento e todas as etapas de trabalho para o projeto estão apresentadas na Figura 30.

Figura 30 – Fluxograma das Etapas de Trabalho



Fonte: o autor (2020)

### 3.2.1 Metodologia de cálculo

A melhor opção é entendida como a melhor configuração de aerogeradores, podendo ser utilizado com um certo valor de diâmetro ou vários menores espalhados.

As análises das turbinas envolveram todos os aspectos estudados até o momento, visando o aproveitamento máximo do fluxo de ar no edifício.

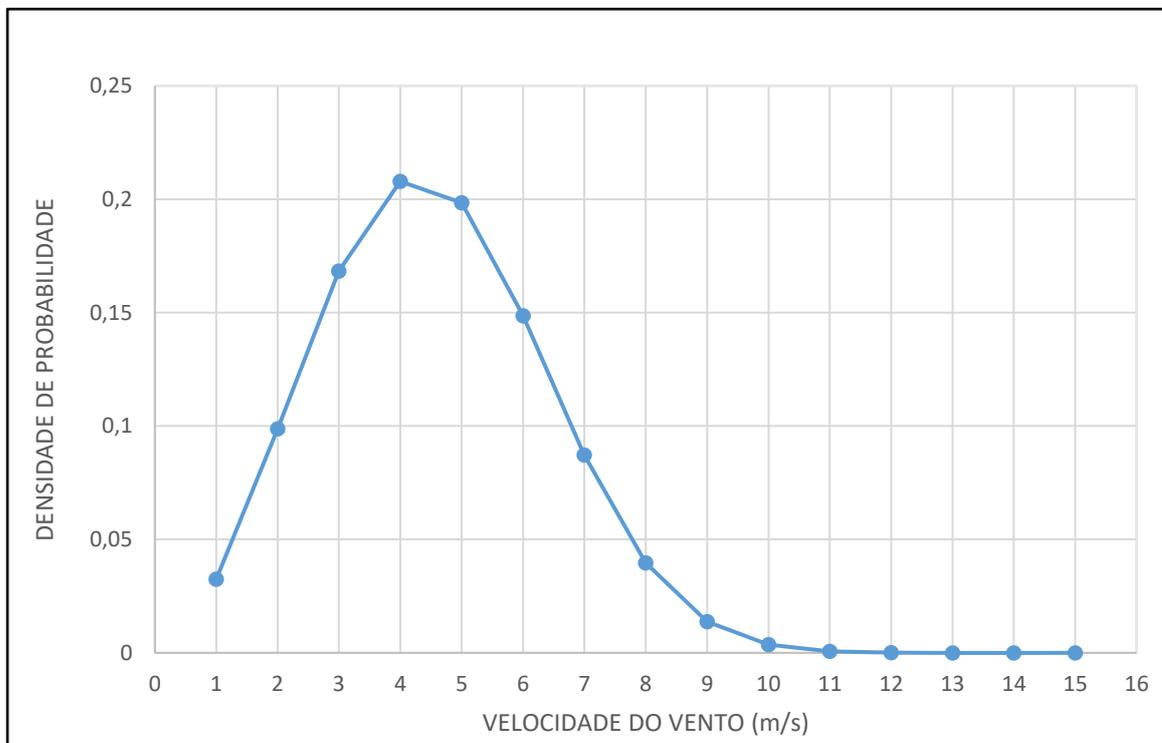
O estudo abrangeu uma análise simplificada dos custos de fabricação, materiais, montagem e instalação dos aerogeradores.

### 3.2.2 Dados de velocidade do vento pelas estações meteorológicas

As estações meteorológicas possuem anemômetros que coletam dados horários para estudar a variação da direção e intensidade do vento na altura de aplicação de 10 metros de altura. Para esse trabalho, foram utilizados dados da estação meteorológica de Caxias do Sul, entre as datas de primeiro de janeiro até dia trinta e um de agosto, disponibilizados pelo INMET. Com o auxílio do software Excel, foi tabelado todas as medições. Primeiramente foram separados os dados dos ventos por faixa de velocidade e por direção.

Após os cálculos realizados pela curva de Weibull, obteve-se a Figura 31, que demonstra a probabilidade de ocorrência em cada faixa de vento.

Figura 31 – Densidade de probabilidade dos ventos



Fonte: o autor (2020)

Foi verificado que a velocidade de vento com maior probabilidade é de 4 m/s, a maior velocidade atingida é de 10 m/s, porém com a menor probabilidade de acontecer.

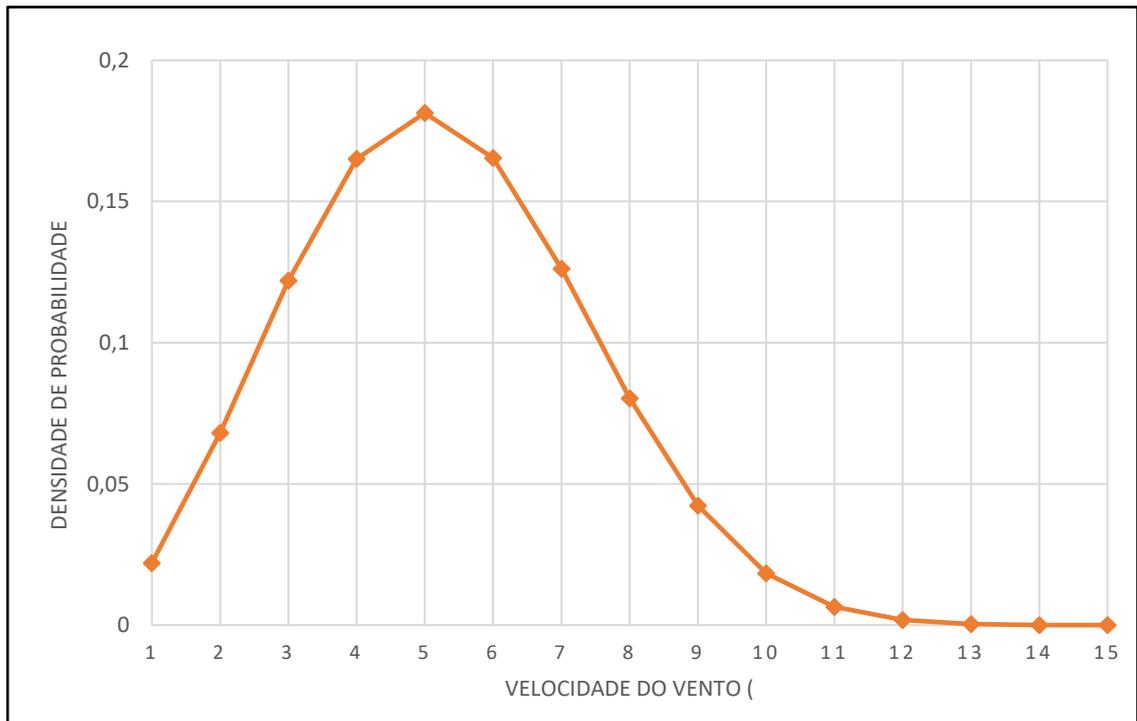
### 3.2.3 Dados de velocidade do vento pelo atlas eólico

Para obter os dados estatísticos da densidade de Weibull, foi o Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, que já disponibiliza as informações analisadas e tratadas para fornecer os dados necessários para os cálculos.

Retirou-se do atlas a velocidade média anual na altura de 50 metros, além do Fator de forma de Weibull anual. Calculou-se o fator de escala com a equação 21.

Obteve-se a curva de Weibull e a densidade de probabilidade de cada velocidade, representada pela Figura 32.

Figura 32 – Densidade de probabilidade dos ventos pelo atlas a 50m



Fonte: o autor (2020)

Foi visualizado que a velocidade com maior probabilidade de acontecer é de 5 m/s, e a maior velocidade é de 11 m/s. Esses dados foram utilizados para estimar a energia gerada que varia conforme a velocidade do vento.

### 3.2.4 Dados de velocidade do vento pelo anemômetro

Para medir a velocidade e direção do vento foi utilizado uma estação meteorológica portátil, mostrado, na Figura 33, da marca B-Max modelo GM816, com uma escala de medição do vento de 0 a 30 metros por segundo, com uma precisão de 95%.

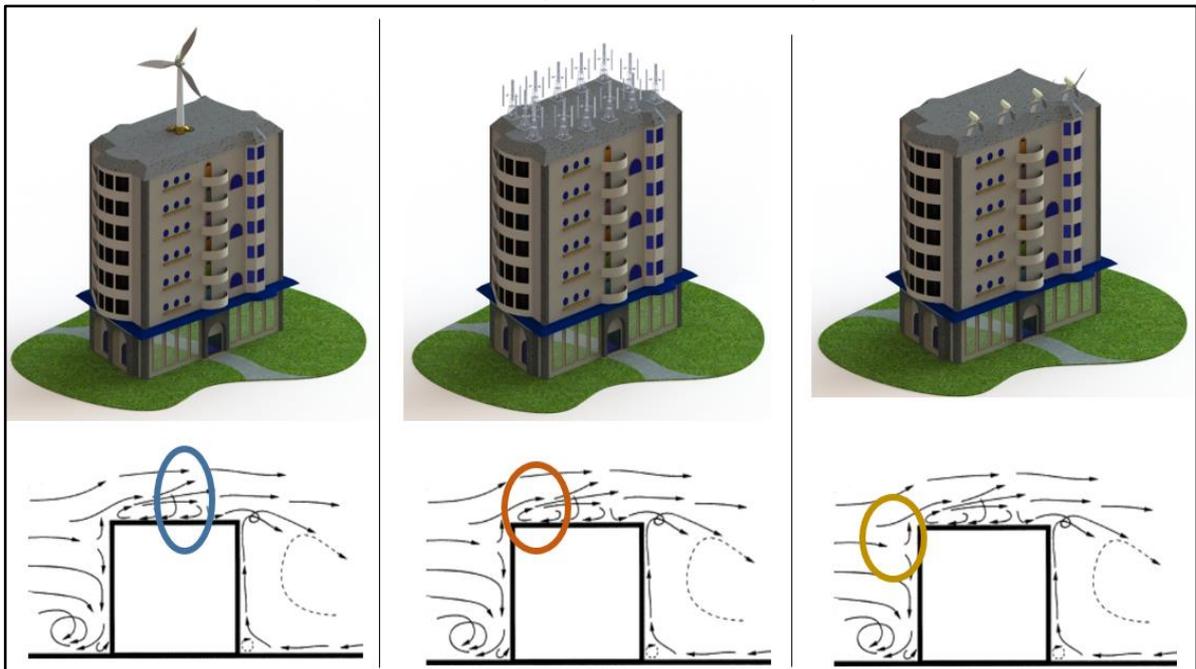
Figura 33 – Anemômetro Digital GM816



Fonte: o autor (2020)

Foram coletados dados do vento na cobertura do prédio em três diferentes regiões da cobertura: no centro, nas bordas e nas arestas dela, conforme representado pela Figura 34. As medições foram realizadas nos horários das 18:00 e 21:00.

Figura 34 – Três regiões de coleta medição dos ventos.



Fonte: o autor (2020)

### 3.2.5 Extrapolação da velocidade do vento

Conforme descrito na seção 2.7.2 deste trabalho, a lei logarítmica possibilita a aproximação do valor da velocidade do vento na camada limite em condições variáveis. Escrevendo a lei logarítmica para representar a velocidade do vento em duas alturas

diferentes, foi utilizado, a Equação 11, dividindo-se uma expressão pela outra, pode-se relacionar as velocidades do vento nas duas alturas, conforme Equação 16.

$$\frac{u(h_2)}{u(h_1)} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)} \quad (16)$$

Com os dados estatísticos obtidos anteriormente, foi realizado a aproximação das velocidades para a altura de 30 metros.

### 3.2.6 Verificação das turbinas eólicas existentes.

Para a análise de viabilidade e comparação de resultados foram utilizados dados de geradores eólicos de pequeno porte já existentes no mercado de duas empresas fabricantes do Brasil, sendo elas a Satrix e a Enersud, além de eólicas do mercado internacional que são comercializadas facilmente no Brasil.

As turbinas possuem características e formatações específicas, com suas devidas curvas de potência. Foi obtido os dados de cada turbina, com suas respectivas dimensões, eixo de rotação, entre outros dados considerados importantes. As informações foram planilhadas para melhor visualização e futura comparação, representada no Quadro 1.

Quadro 1 – Turbinas eólicas e suas especificações

Fabricante	ENERSUD				SATRIX		SOUTH WEST	XZERES WIND
Nome Eólica	Notus 138	Gerar 246	Razec 266	Verne 555	SX1700	SX3300	Air 40	Skystream Marine
Eixo de Rotação	H	H	V	H	H	H	H	H
Altura das pás (m)	-	-	2,66	-	-	-	-	-
Diâmetro (m)	1,12	2,46	2	5,5	3,84	5,92	1,17	3,72
Peso (kg)	12	32	100	160	83,5	147	5,9	77
Área (m <sup>2</sup> )	0,99	4,75	5,32	24,19	11,76	27,53	1,08	10,87
Potencia (W)	420	1000	1200	6000	1200	3300	400	1900
Velocidade vento (m/s)	12,5	10,5	10,5	10,5	10	10	12	9
Cut in (m/s)	2,2	2	2,5	2,2	2,2	2,5	3,1	2,5
Cp	0,46	0,34	0,36	0,3	0,19	0,22	0,4	0,44

Fonte: o autor (2020)

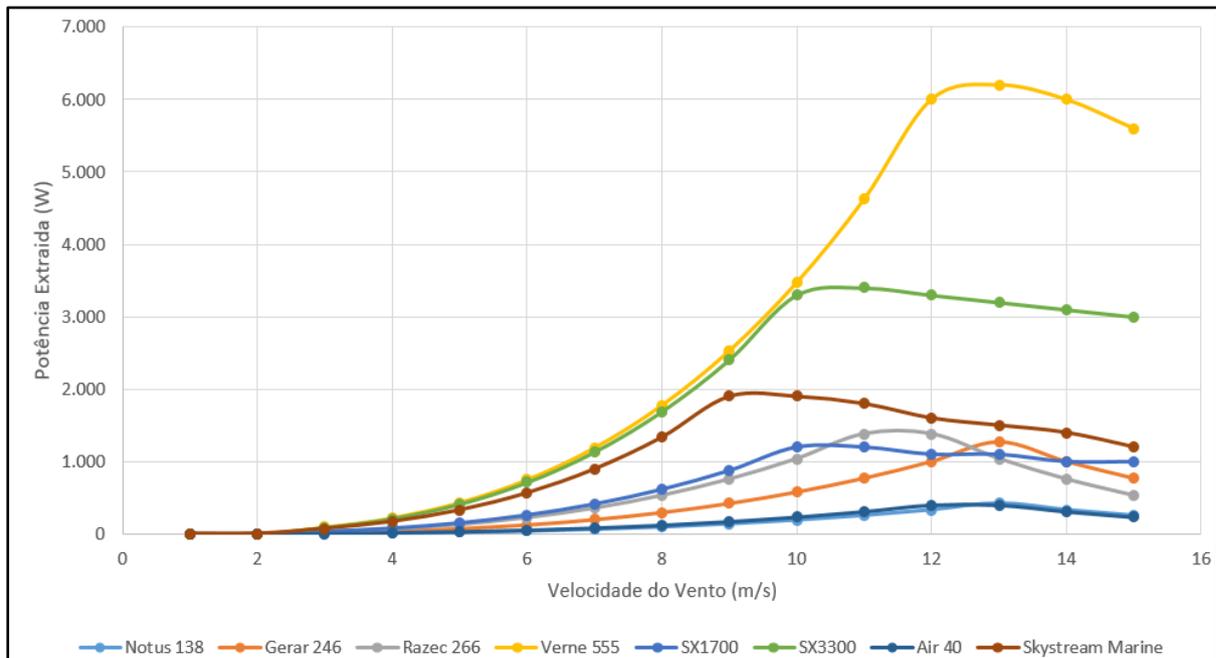
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através da metodologia descrita anteriormente, a curva de potência, os ventos na altura de 30 metros para as medições, os resultados de produção de energia para cada turbina, as dimensões, coeficiente de potência e resultados para as composições de turbinas.

### 4.1 CURVA DE POTÊNCIA DAS TURBINAS

A curva de potência para diferentes velocidades do vento, considerando os 8 modelos de turbinas eólicas estão representados na Figura 35.

Figura 35 – Curva de potência turbinas eólicas



Fonte: o autor (2020)

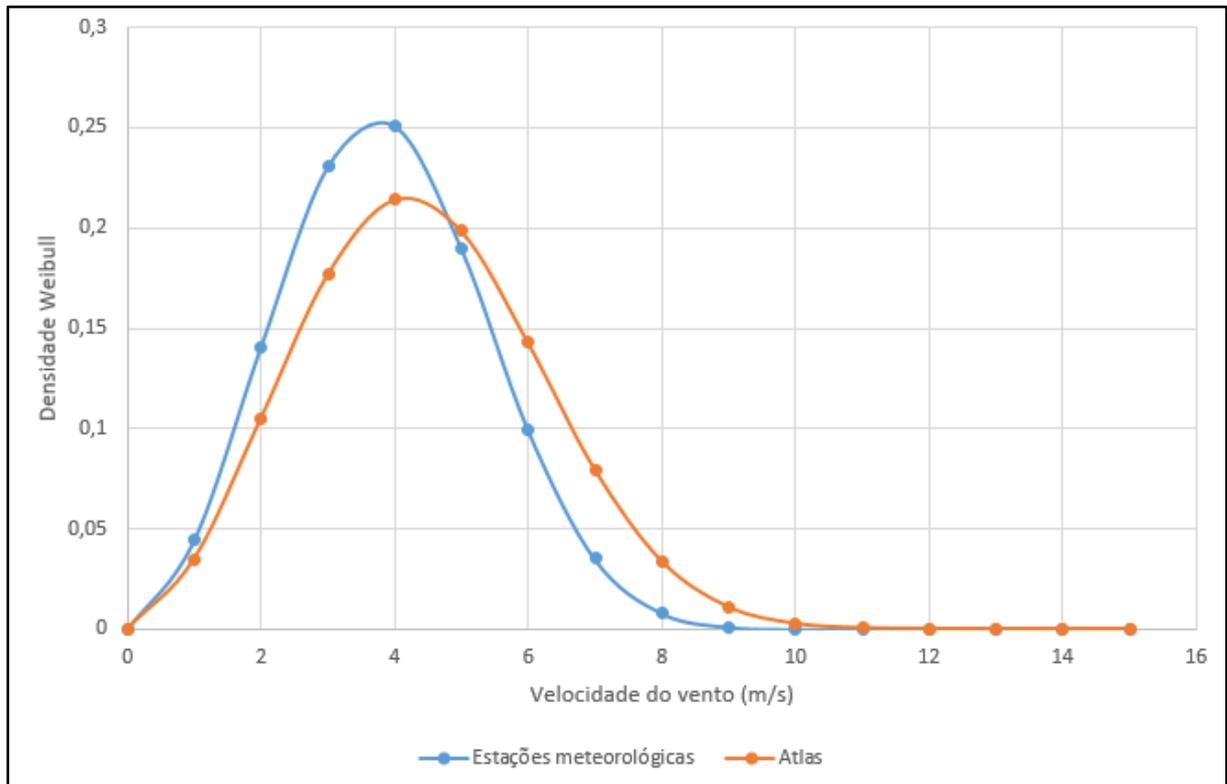
É possível verificar que existe uma variação considerável entre a potência máxima produzida e o formato da curva. Essa variação acontece pelas características de cada turbina. Se percebe que, para velocidades do vento maiores que 8 m/s, as turbinas Verne 555 e SX3300 se distanciam das outras.

### 4.2 VELOCIDADES DO VENTO

Utilizando a extrapolação logarítmica para estimar as velocidades na altura de 30 metros, obteve-se um novo valor médio para as velocidades da estação meteorológica e do

atlas. Os dados foram comparados e obtiveram os resultados demonstrados na Figura 36, com as velocidades representadas segundo a distribuição de Weibull.

Figura 36 – Densidade de Weibull para velocidades



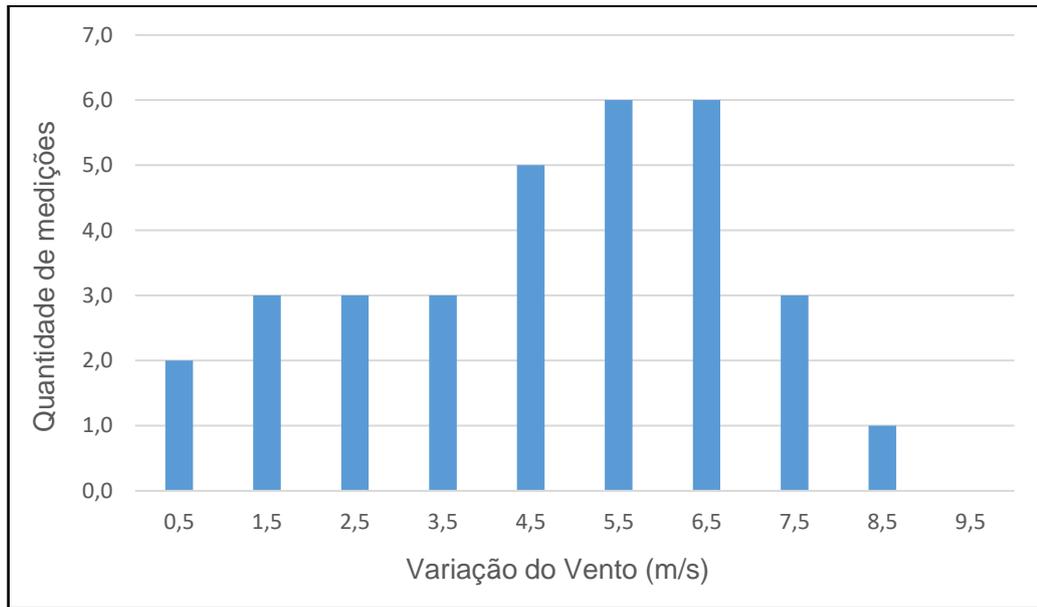
Fonte: o autor (2020)

Se percebe que, apesar da estimativa dos valores e do cálculo de aproximação pela lei logarítmica, os dados estão semelhantes. Verifica-se que o atlas possui ventos mais velozes em comparação aos dados meteorológicos. Essa diferença pode ser explicada em tempo base diferentes, já que o atlas traz décadas de coleta de medições, enquanto os dados meteorológicos são de um período de um ano.

#### 4.2.1 Velocidade do vento no edifício Vinas do sol

As medições da velocidade do vento coletadas no edifício foram planilhadas no software Excel com as quantidades de medições para cada faixa de velocidade. Os dados obtidos para as medições no centro do edifício estão representados pela Figura 37. Nela pode-se identificar que as faixas de velocidade com maior ocorrência estão na faixa de 4,5 a 6,5 metros por segundo.

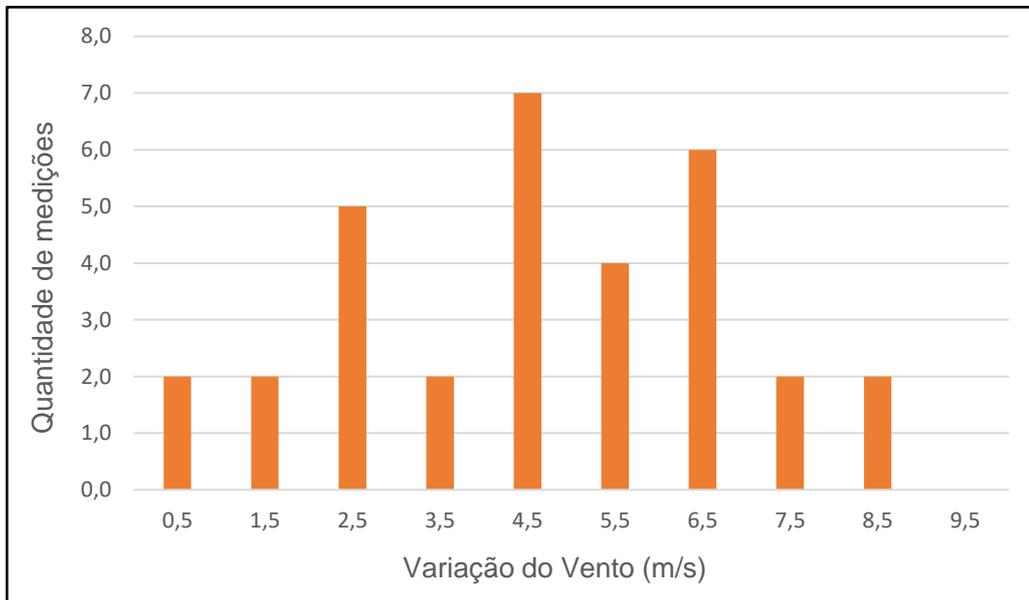
Figura 37 – Velocidades do vento no centro do edifício Vinas do Sol.



Fonte: o autor (2020)

As velocidades para nas bordas do prédio foram planilhadas e estão apresentadas na Figura 38.

Figura 38 – Velocidades do vento nas bordas do edifício Vinas do Sol.

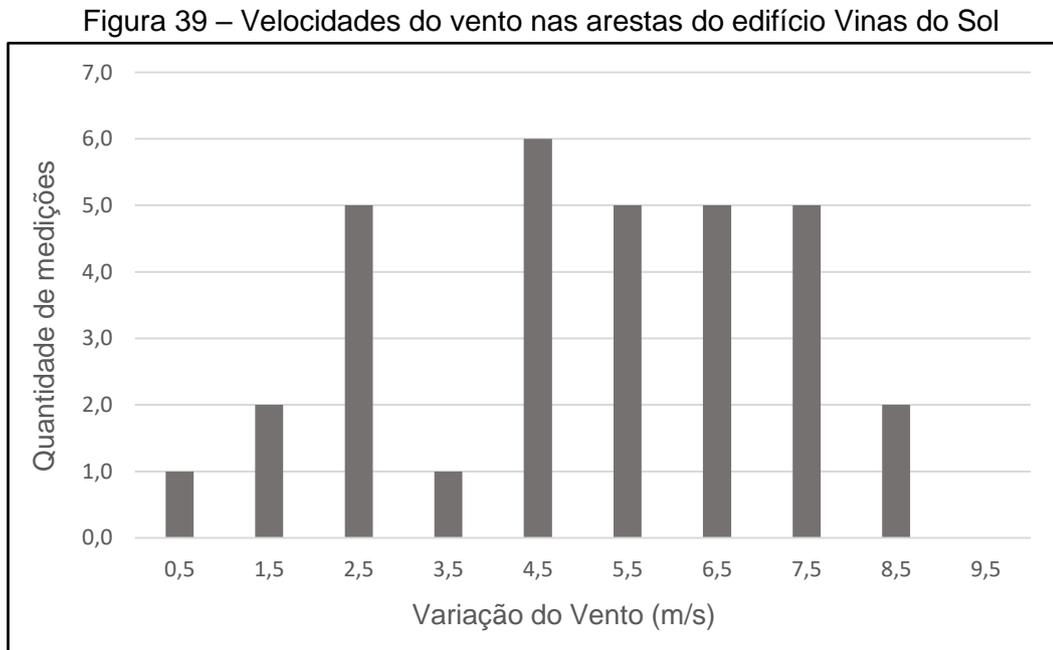


Fonte: o autor (2020)

Os ventos com maiores medições são de 4,5 e 6,5 m/s. Percebe-se que o maior valor para a velocidade do vento nas bordas é de 8,5 m/s.

Foi realizado a medição do vento em todas as arestas do prédio, o resultado obtido é referente a apenas uma lateral do edifício onde o vento tem maior ocorrência que está na

posição noroeste. Os ventos para as arestas, na região concentradora de vento estão mostrados na Figura 39. Os dados do vento nas outras arestas não estão demonstrados nesse trabalho.



Fonte: o autor (2020)

Apesar da quantidade de medições ser baixa, foi utilizado esses dados para identificar que a posição de coleta das arestas possui uma velocidade maior em relação as outras, confirmando que existe as zonas de acúmulo do vento no edifício estudado.

#### 4.3 ENERGIA GERADA PELOS AEROGERADORES

A potência produzida pela turbina, descrito pela Equação 14 no capítulo 2 desse trabalho é então utilizado.

Cada turbina possui suas curvas e coeficiente de potência, sendo assim cada uma delas produz uma certa quantidade de energia conforme a distribuição de Weibull para as velocidades do vento.

A potência produzida pelos aerogeradores foi calculada pela Equação 14 para os dados da estação meteorológica e do Atlas eólico e, após foi transformada em energia gerada, kWh/mês. Esse cálculo foi realizado para todas as turbinas descritas, conforme Apêndices A, B e C.

As Tabelas 1 e 2 demonstram os resultados para as turbinas eólicas Notus 138 e Razec 266, respectivamente.

Tabela 1 – Energia gerada para turbina Notus 138

Velocidade do Vento (m/s)	Estações meteorológicas	Atlas	Energia Gerada Estações Met. (kWh/mês)	Energia Gerada Atlas (kWh/mês)
0	0,0000	0,0000	0	0
1	0,0442	0,0348	0	0
2	0,1404	0,1052	0	0
3	0,2303	0,1770	0,98	0,75
4	0,2510	0,2144	2,52	2,15
5	0,1900	0,1987	3,73	3,90
6	0,0993	0,1428	3,37	4,84
7	0,0350	0,0793	1,89	4,27
8	0,0081	0,0337	0,65	2,71
9	0,0012	0,0108	0,13	1,23
10	0,0001	0,0026	0,02	0,40
11	0,0000	0,0004	0,00	0,09
Energia gerada (kWh/mês)			13,28	20,36
Média da Energia Gerada (kWh/mês)			16,82	

Fonte: o autor (2020)

Tabela 2 – Energia Gerada para turbina Razec 266

Velocidade do Vento (m/s)	Estações meteorológicas	Atlas	Energia Gerada Estações Met. (kWh/mês)	Energia Gerada Atlas (kWh/mês)
0	0,0000	0,0000	0	0
1	0,0442	0,0348	0	0
2	0,1404	0,1052	0	0
3	0,2303	0,1770	5	4
4	0,2510	0,2144	12	10
5	0,1900	0,1987	18	19
6	0,0993	0,1428	16	23
7	0,0350	0,0793	9	21
8	0,0081	0,0337	3	13
9	0,0012	0,0108	1	6
10	0,0001	0,0026	0	2
11	0,0000	0,0004	0	0
Energia gerada (kWh/mês)			64,01	98,16
Média da Energia Gerada (kWh/mês)			81,08	

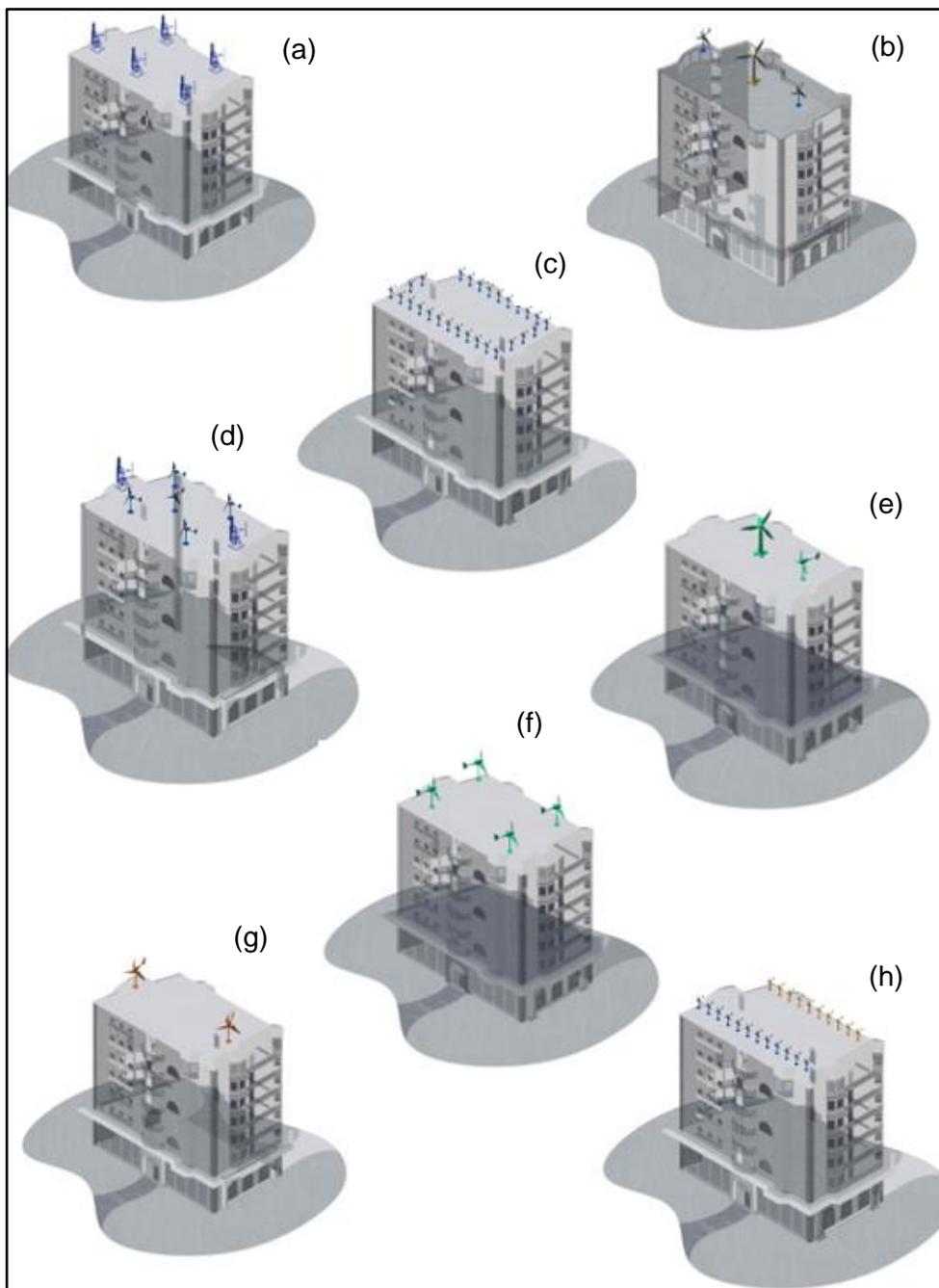
Fonte: o autor (2020)

#### 4.4 COMPOSIÇÕES DE AEROGERADORES

##### 4.4.1 Composições de aerogeradores para os dados do atlas e estações.

Com as possibilidades de vento em cada faixa de velocidade, foi levantado 8 composições de aerogeradores para análise de viabilidade, demonstradas na Figura 40.

Figura 40 – 8 Composições de aerogeradores: a) 5 turbinas Razec266, b) 2 Turbinas Gerar246 e 1 Verne555, c) 25 Notus138, d) 5 Gerar246e 2 Razec266, e) 1 SX1700 e 1 SX3300, f) 4 Turbinas SX1700, g) 2 Skystream Marine e h) 10 turbinas Notus138 e 10 Air40



Fonte: o autor (2020)

Com essas 8 composições diferentes, obteve-se a energia gerada para cada uma. A Tabela 3 mostra essa geração.

Tabela 3 – Energia gerada para as 8 composições de Aero geradores

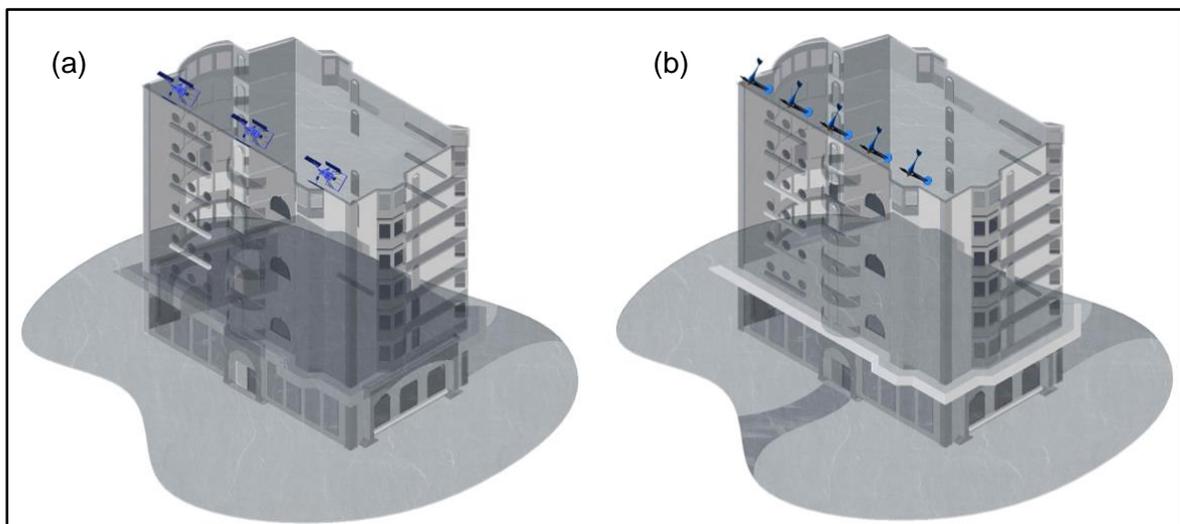
Composição	Energia (kWh/mês)
a	405,4
b	540,5
c	420,5
d	500,0
e	352,0
f	375,5
g	566,8
h	340,0

Fonte: o autor (2020)

#### 4.4.2 Composições de aerogeradores para os dados do anemômetro

As velocidades do vento coletadas pelo anemômetro nas zonas de acúmulo, ou do ângulo de inclinação foram utilizadas para compor duas possibilidades de composições de aerogeradores. A Figura 41a mostra a utilização de 3 Turbinas eólicas Razec 266, a 41b 5 Turbinas Gerar 246. Essas duas composições obtiveram os resultados de energia gerada conforme Tabela 4. É identificado que a composição com 3 turbinas de eixo vertical gera 70% da energia da com 4 turbinas de eixo horizontal.

Figura 41 – Composições de aerogeradores para o ângulo de inclinação: a) turbinas Razec 26 e b) turbinas Gerar 246



Fonte: o autor (2020)

Tabela 4 – Energia gerada para as 2 composições no ângulo de inclinação

Composição:	Energia (kWh/mês)
a	440,6
b	611,9

Fonte: o autor (2020)

#### 4.5 VALORES PARA OS AEROGERADORES E COMPOSIÇÕES

Para analisar a viabilidade de investimento dos aerogeradores, foi obtido os seus valores. Os valores apresentados para as importadas já consideram o custo de importação. A Tabela 5 mostra os valores unitários para cada aerogerador no ano de 2020.

Tabela 5 – Custos unitários de cada turbina eólica

Turbina Eólica	Notus	Gerar	Razec	Verne	SX1700	SX3300	Air	Skystream Marine
	138	246	266	555			40	
Custo unitário (R\$)	3.600	9.396	19.761	40.708	27.927	73.028	4.275	48.227

Fonte: o autor (2020)

Com os valores de cada turbina, levanta-se o valor para cada configuração de aerogeradores, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Custos de cada configuração de aerogeradores

Dados	Configuração	Energia gerada (kWh/mês)	Custo Total (R\$)
Atlas e estações	a	405,4	98.806
Atlas e estações	b	540,5	59.501
Atlas e estações	c	420,5	90.000
Atlas e estações	d	500,0	86.503
Atlas e estações	e	352,0	100.954
Atlas e estações	f	375,5	111.706
Atlas e estações	g	566,8	96.454
Atlas e estações	h	340,0	78.749
Anemômetro	a	440,6	59.284
Anemômetro	b	611,9	46.981

Fonte: o autor (2020)

Ao analisar os dados acima, se percebe que existem 4 configurações que apresentam melhores retornos financeiros para o investidor. A configuração b e h do atlas e estação meteorológica apresentam os menores custos, assim como as duas configurações dos dados coletados pelo anemômetro.

#### **4.5.1 Custos de instalação e integração com rede**

Os custos de instalação dos aerogeradores variam de acordo com cada região e profissional a trabalhar nesse processo. Como nesse trabalho foram avaliadas composições de turbinas eólicas com no mínimo 2 turbinas e no máximo 25, considerou-se um valor único para essa instalação.

Para o laudo de anotação de responsabilidade técnica, conhecido com ART. Junto a engenheiros mecânicos e elétricos com experiência nesses laudos, estimou-se um valor médio para o laudo. Foi solicitado algumas exigências para que o laudo possa ser emitido, tais como: fixação rígida da haste de suporte das turbinas, fixação do aerogerador na haste, cabos de amarração em material anticorrosivo para fixação da turbina, se aplicável.

Quanto aos certificados dos inversores do sistema, as empresas brasileiras já fornecem os aerogeradores com os inversores dentro das normas e aprovados pelo INMETRO.

Para a integração com a rede, o condomínio deve solicitar à distribuidora local o acesso da geração das turbinas na rede, com todos os documentos descritos no item 2.8.1 desse trabalho. É solicitado a instalação de um medidor bidirecional para identificar a energia utilizada e a gerada. Após a instalação dos medidores, a distribuidora fica responsável pela integração do sistema gerador com a rede. Os custos para a adequação da energia gerada na rede são calculados pela distribuidora, com cobrança das seguintes atividades: aferição e calibração de medidores, visita técnica, vistoria da unidade consumidora e geradora, além da ligação do sistema.

Os custos levantados para a instalação dessas composições podem ser visualizados na Tabela 7, considerando que podem variar de acordo com negociação e modelos de turbinas escolhidas para implementação.

Tabela 7 – Custos de instalação e integração com rede.

Item	Custo (R\$)
Instalação Turbinas	R\$ 600,00
Laudo ART	R\$ 2.500,00
Integração com rede	R\$ 61,60
Aprovação com distribuidora	R\$ 218,76
Medidor bidirecional	R\$ 149,90
Total	R\$ 3.530,26

Fonte: o autor (2020)

#### 4.5.2 Consumo elétrico condomínio e apartamentos unitários

O Condomínio Vinas do Sol consome uma média anual de 900 kWh/mês para os diversos serviços comuns, tais como lâmpadas para iluminação, cerca elétrica, elevador, sistema de segurança e portões eletrônicos.

Cada apartamento consome, em média anual, 260 kWh/mês considerando uma família de 3 habitantes.

A distribuidora de energia de Caxias do Sul está cobrando no ano de 2020 uma tarifa de aproximadamente R\$0,46/kWh. Portanto o condomínio tem um gasto mensal médio de R\$ 414,00.

#### 4.5.3 Análise de retorno do investimento

Para analisar o retorno do investimento, foram considerados todos os custos das composições de turbinas, instalação, integração e o valor de R\$ 0,46/kWh produzido para estimar tempo de retorno. Foi monetizado a potência gerada por cada composição de turbina, sendo dividido pelo seu custo total. O valor obtido é a quantidade de anos para que o sistema seja pago.

O valor de compensação foi obtido a partir da multiplicação da energia gerada e o valor do kWh da distribuidora, e representa quanto reais a composição iria subtrair da conta de luz. A Tabela 8 apresenta a quantidade de anos para que cada sistema retorne seu investimento.

Tabela 8 – Retorno de Investimento para cada composição.

Dados	Configuração	Energia gerada (kWh/mês)	Valor Compensação (R\$)	Retorno Investimento (anos)
Atlas e estações	a	405,4	186,5	46
Atlas e estações	b	540,5	248,7	21
Atlas e estações	c	420,5	193,4	40
Atlas e estações	d	500,0	230,0	33
Atlas e estações	e	352,0	161,9	54
Atlas e estações	f	375,5	172,7	56
Atlas e estações	g	566,8	260,7	32
Atlas e estações	h	340,0	156,4	44
Anemômetro	a	440,6	202,7	26
Anemômetro	b	611,9	281,5	15

Fonte: o autor (2020)

É identificado que existem diferentes retornos financeiros para as configurações. Para a configuração b (três turbinas de eixo horizontal, sendo uma Notus 555 e duas Gerar 246 da marca ENERSUD) obteve-se o menor tempo para retorno de investimento, totalizando 21 anos desde que seja instalado no telhado do edifício; enquanto a configuração f (4 turbinas SX1700 da marca Satrix) necessita de 56 anos para que o investimento seja pago. Todas as outras configurações obtiveram resultados intermediários.

Para os dados coletados do anemômetro e instalados nas regiões de concentração de ventos, as duas composições tiveram resultados positivos comparados com a instalação no telhado. A configuração utilizando as turbinas de eixo vertical tem um retorno de 26 anos, enquanto as turbinas de eixo horizontal necessitam de 15 anos para que o investimento tenha um retorno.

#### 4.6 VIABILIDADE DOS AEROGERADORES EM EDIFÍCIOS

Os resultados para verificar a viabilidade dos aerogeradores em edifícios podem ser definidos em três pontos de vista: da geração de energia renovável; técnico e da viabilidade econômica. A necessidade de investimentos em sistema de energia renováveis faz com que seja necessário o esforço pela busca e implementação de alternativas em sistemas de turbinas eólicas. O ponto de vista técnico demonstra que todas as configurações conseguiram gerar energia com o potencial eólico de Caxias do Sul, por mais que seja necessário diversos

documentos e aprovações para sua instalação. A viabilidade econômica demonstra que todas as configurações têm um elevado valor de implementação. A configuração que poderia ser aplicada é a de 4 turbinas eólicas Gerar 246 com o retorno de investimento em 15 anos.

## 5 CONCLUSÃO

Apesar da energia eólica de grande porte em si ser bem difundida no âmbito nacional, avaliada a de pequeno porte, não possui dados relevantes. Nesse trabalho foi avaliado a utilização dessas turbinas num edifício na cidade de Caxias do Sul.

Portanto faz-se necessário, a análise da curva de potência, altura de instalação, custos de instalação e integração do sistema, além do preço das turbinas. Também é muito importante analisar a velocidade média do vento no local de aplicação.

O trabalho apresentou algumas sugestões e inovações com o estudo de aerogeradores em pontos estratégicos no edifício, para atender uma certa demanda de energia mensal.

Três pontos foram levantados para a implementação das turbinas, o primeiro é o ponto de vista técnico, o segundo da geração de energia renovável e o terceiro é referente a rentabilidade financeira.

Do ponto de vista técnico, os resultados de produção de energia estimados mostram que os aerogeradores disponíveis são capazes de atender a demanda total ou parcial de diversos consumidores. A análise também apresentou que, apesar da média de velocidade do vento não ser tão atrativa, existem composições de aerogeradores que são capazes de fornecer quantidade razoáveis de energia.

As turbinas eólicas estudadas já possuem seu sistema bem atualizado com peso, relação de dimensão e produtividade definidos. Dentre todas as composições apresentadas concluiu-se que os aerogeradores nas arestas do prédio conseguem gerar uma quantidade de energia maior do que as fixadas no telhado do edifício.

Todas as configurações de turbinas eólicas de pequeno porte devem ser aprovadas por técnicos capacitados e pela distribuidora de energia, com isso as turbinas estão legalmente aptas a gerar energia e aptos a conectar com a rede de energia municipal.

Do ponto de vista da geração de energia renovável, todas turbinas são capazes de atender esse requisito. A demanda pela geração limpa deve aumentar cada vez mais, com o intuito de melhorar a saúde de nosso planeta.

Do ponto de vista da rentabilidade econômica, para a utilização dos aerogeradores constatou-se que, de acordo com os altos custo das turbinas eólicas no Brasil, o retorno dos empreendimentos para a cidade de Caxias do Sul é para mais de 15 anos. As duas composições que obtiveram os melhores resultados nos trazem um retorno de 15 e 21 anos respectivamente. Os aerogeradores analisados possuem seus dados e curvas bem dimensionados para ventos acima de 10 metros por segundo, e na cidade estudada os ventos se mantiveram na média de 6,5 metros por segundo. Essa velocidade média interfere na produção de energia drasticamente.

Com os três pontos apresentados pode-se interpretar que a instalação de aerogeradores em regiões urbanas com uma velocidade média inferior a 10 metros por segundo, apresentaram resultados positivos de geração de energia, porém o ponto de viabilidade econômica desvaloriza muito sua aplicabilidade no ano de 2020. Porém, assim como a alta demanda dos sistemas de geração de energia solar acabaram por viabilizar sua compra e instalação, pode-se esperar que, se a demanda dos aerogeradores aumentar e seu custo reduzir, o mercado se tornará mais competitivo, viabilizando mais facilmente esses projetos.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.
- ABSOLAR. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil**. Infográfico ABSOLAR. São Paulo: 2020. Disponível em: <http://www.absolar.org.br/infografico-absolar-.html>. Acesso em: 05/04/2020.
- AMARANTE, Odilon A. Camargo et al. **Atlas eólico**: Atlas Eólico do Espírito Santo. Vitória, ES: ASPE, 2009. 100 p.
- ANDERSON JR., J. D. **Fundamentos de engenharia aeronáutica**. 7ª edição. Porto Alegre – RS: AMGH Editora Ltda, 2015
- ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA 482 nº 9.427**, de 17 de abril de 2012. 48500.004924/2010-51. [S. l.], 17 abr. 2012.
- APPIO, A. J. **Energia Eólica Evolução e Perspectivas no Brasil**. Canoas, 2001. Disponível em: <http://br.geocities.com/aljappio/images/energiaeolica.htm>. Acesso em 09 mar. 2020.
- ARAÚJO, Thiago C. D. Licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica a partir de fonte eólica em superfície terrestre. **Jus Brasil**, [s. l.], 07 2015. Disponível em: <https://jus.com.br/artigos/40578/licenciamento-ambiental-de-empreendimentos-de-geracao-de-energia-eletrica-a-partir-de-fonte-eolica-em-superficie-terrestre>. Acesso em: 18 ago. 2020.
- BACK, Alexandre Clasen *et al.* **Atlas Eólico**: Rio Grande do Sul. Porto Alegre: AGDI, 2014. 116 p. Disponível em: <https://minasenergia.rs.gov.br/upload/arquivos/201602/29144533-livro-atlas-rs-2014.pdf>. Acesso em: 26/03/2020
- BAZZO, Thiago de Paula M. **Projeto ótimo multidisciplinar de geradores síncronos de ímãs permanentes para aerogeradores considerando a curva de ocorrência do vento**. Orientador: Prof. Renato Carlson. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.
- BETZ, Albert. **Introduction to the Theory of Flow Machines**. 1. ed. [S. l.]: Pergamon, 1966. 300 p.
- BIGUIN, Alexandre. Tipos de Turbina. **Energia Eólica**, 2011. Disponível em: <http://energiaeolicabr.blogspot.com/2011/12/>. Acesso em: 4 maio 2020.
- BISTAFA, R. Sylvio. **Mecânica do Fluidos**. Noções a Aplicações. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2018.
- BLOCKEN, Bert. **Apontamentos do curso Sports Building aerodynamics**. University of Technology Eindhoven: 2014.
- BOBROVA, Darya. **Building-Integrated Wind Turbines in the Aspect of Architectural Shaping**. 2015. 7 f. Tese (Engenharia Civil) - Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia, 2015.
- BRANLARD, E. **Wind turbine tip-loss corrections**. Technical University of Denmark. [S.l.], p. 185. 2011.

BRULLE, Robert. **Mcdonnell 40-kW giromill wind system. Phase II. Fabrication and Test.** United States: 1980.

CARMO, Diogo Manuel F. G. M. **Projeto de uma turbina eólica de eixo vertical para aplicação em meio urbano.** 2012. 300 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2012.

CUSTÓDIO, Ronaldo dos Santos. **Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica.** 2. ed. rev. e aum. [S. l.]: Synergia, 2013. 340 p.

DEBIAZI, Pedro Renan. **Mapeamento do ambiente térmico e suas relações com os parâmetros do entorno urbano.** 2016. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

DUTRA, R. B. Montezano, e FERREIRA, J. C. **Energia eólica: Princípios e Tecnologia.** CRESEB/Cepel: 2011.

FOX, Robert W; PRITCHARD, Philip J; MCDONALD, Alan T. **Introdução à Mecânica de Fluidos.** 8. ed. rev. [S. l.]: LTC, 2014

GENDRICH, C. P. **Dynamic Stall of Rapidly Pitching Airfoils: MTV Experiments and Navier-Stokes Simulations.** Michigan State University. [S.l.], p. 151. 1997.

HANSEN, Martin O. L. **Aerodynamics of Wind Turbines.** 2. ed. London: Earthscan Publications Ltd, 2008. 192 p.

HOMICZ, G. F. **Numerical Simulation of VAWT Stochastic Aerodynamic Loads Produced by Atmospheric Turbulence: VAWT-SAL Code.** Sandia National Laboratories. [S.l.], p. 73. 1991.

IBELLI, Gerardo. **Avaliação do potencial eólico em meio urbano.** Aplicação a um caso de estudo em Telheiras. 2013. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente). Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa: 2013.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Key Renewable Trends, Excerpt from: Renewables Information.** Paris, 2016b. Disponível em: <https://euagenda.eu/upload/publications/untitled-69169-ea.pdf>. Acesso em: 08/04/2020

JIN, X et al. **Darrieus vertical axis wind turbine: Basic research methods.** Renewable and Sustainable Energy Reviews 42: 2015.

LEWIS, Edward V. **Principles of naval architecture.** Jersey city: The society of naval architectures and marine engineers, 1988. v. 2.

MÁRQUES, Fausto Pedro G. *et al.* Optimal Dynamic Analysis of Electrical/Electronic Components in Wind Turbines. **MDPI**, Switzerland: 2017. Energies, p. 1-19.

MELO, Thiago. **Energia Eólica: Fundamentos e cenário do crescimento no Brasil e no Mundo,** 2011.

MERTENS, Sander. **Wind Energy in the Built Environment Concentrator Effects of Buildings.** 2006. 170 p. Tese (Doutorado) - Technische Universiteit Delft, Multi-Science, Reino Unido: 2006.

PARK, Jae-Chan *et al.* Feasibility Study of Fluctuating Wind Pressure around High-Rise Buildings as a Potential Energy-Harvesting Source. **Energies**: MDPI, Korea, 2019. Disponível em: [https://www.researchgate.net/figure/Large-scale-building-integrated-wind-turbine-BIWT-systems-a-Bahrain-World-Trade\\_fig1\\_336805948](https://www.researchgate.net/figure/Large-scale-building-integrated-wind-turbine-BIWT-systems-a-Bahrain-World-Trade_fig1_336805948). Acesso em: 19 ago. 2020

PAVINATTO, Eduardo. **Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica**. 2005. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PEREIRA, Marcelo M. **Um estudo do aerogerador de velocidade variável e sua aplicação para fornecimento de potência elétrica constante**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora - MG, 2004.

PFÄFFEL, Sebastian; FAULSTICH, Stefan; ROHRIG, Kurt. Performance and Reliability of Wind Turbines:: A Review. **Energies**: MDPI, Germany, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/11/1904/pdf>. Acesso em: 18 maio 2020.

PINTO, Milton *et al.* **Energia Eólica: Princípios de Operação**. São Paulo: ERICA, 2019. 336 p.

PIRES, Júlio Cesar. **Estudo de rotor para turbina eólica de eixo horizontal de pequeno porte com aplicação de modelagem e simulação virtual**. 2011. Dissertação (Mestrado em Design) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PORTÉ-AGEL, Fernando; WU, Yu-Ting. Atmospheric Turbulence Effects on Wind-Turbine Wakes:: An LES Study. **Energies**: MDPI, Switzerland, 2012. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/5/12/5340/pdf>. Acesso em: 2 jun. 2020.

POTENCIAL eólico Brasileiro. [S. /], [entre 2014 e 2016]. Disponível em: <http://foxenergy.com.br/potencial-eolico-brasileiro/>. Acesso em: 10 ago. 2020.

SANTOS, Alane Farias dos; RODRIGUES, Marcus Vinicius Sousa; SILVA, Leonardo Magalhães Xavier. **Princípios básicos da aerodinâmica do funcionamento de uma turbina eólica de Darrieus**. ABCM- Universidade Federal Rural do Semi-árido, Fortaleza: 2016.

SANTOS, Antonio José Alves da Silva. **Estudo de um sistema de concentração integrado numa pequena turbina eólica de eixo vertical**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) - Universidade de Lisboa, Lisboa, 2014

SILVA, Guilherme Botelho de Oliveira. **Desenvolvimento de uma Turbina Eólica de Eixo Vertical**. Orientador: Prof. Fernando José Parracho Lau. 2011. 300 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeroespacial) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.

SILVA, Leandro Mendes da; ABREU-HARBICH, Loyde Vieira de. **Metodologia simplificada para avaliação do potencial de energia eólica em centros urbanos**. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas, SP, v. 8, n. 1, p. 46-58, mar. 2017. ISSN 1980-6809. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8648501>. Acesso em: 05 maio. 2020.

SILVA, Leandro Mendes da; ABREU-HARBICH, Loyde Vieira de. **Metodologia simplificada para avaliação do potencial de energia eólica em centros urbanos**. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção. SP, v. 8, n. 1, p. 46-58, mar. 2017.

TESCH, Krzysztof *et al.* **Investigation of the Aerodynamics of an Innovative Vertical-Axis Wind Turbine**. 2014. Tese (Engenharia Elétrica) - University of technology Gdansk, Poland, 2012. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/264983601\\_Investigation\\_of\\_the\\_Aerodynamics\\_of\\_an\\_Innovative\\_Vertical-Axis\\_Wind\\_Turbine](https://www.researchgate.net/publication/264983601_Investigation_of_the_Aerodynamics_of_an_Innovative_Vertical-Axis_Wind_Turbine). Acesso em: 15 jun. 2020.

TIBOLA, Gabriel. **Sistema eólico de pequeno porte para geração de energia elétrica com rastreamento de máxima potência**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009

WENZEL, Guilherme Munchen. **Projeto Aerodinâmico de pás de turbinas eólicas de eixo horizontal**. 2007. 340 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

WINDBOX. Componentes dos aerogeradores: conheça toda a sua estrutura. **Windbox**, Natal, 3 jan. 2020. Disponível em: <https://windbox.com.br/blog/componentes-dos-aerogeradores/>. Acesso em: 15 dez. 2020.

## APÊNDICE A – ENERGIA GERADA PARA AS TURBINAS VERNE 555 E GERAR246

Energia gerada para turbina Verne 555

Velocidade do Vento (m/s)	Estações meteorológicas	Atlas	Energia Gerada Estações Met. (kWh/mês)	Energia Gerada Atlas (kWh/mês)
0	0,0000	0,0000	0,0	0,0
1	0,0442	0,0348	0,0	0,0
2	0,1404	0,1052	0,0	0,0
3	0,2303	0,1770	23,5	18,1
4	0,2510	0,2144	60,8	51,9
5	0,1900	0,1987	89,9	94,0
6	0,0993	0,1428	81,2	116,7
7	0,0350	0,0793	45,4	102,9
8	0,0081	0,0337	15,6	65,2
9	0,0012	0,0108	3,2	29,7
10	0,0001	0,0026	0,4	9,7
11	0,0000	0,0004	0,0	2,2
12	0,0000	0,0001	0,0	0,4
13	0,0000	0,0000	0,0	0,0
14	0,0000	0,0000	0,0	0,0
15	0,0000	0,0000	0,0	0,0
Energia gerada (kWh/mês)			320,04	490,78
Média da Energia Gerada (kwh/mês)			405,411478	

Fonte: o autor (2020)

Energia gerada para turbina Gerar246

Velocidade do Vento (m/s)	Estações meteorológicas	Atlas	Energia Gerada Estações Met. (kWh/mês)	Energia Gerada Atlas (kWh/mês)
0	0,0000	0,0000	0	0
1	0,0442	0,0348	0	0
2	0,1404	0,1052	0	0
3	0,2303	0,1770	4	3
4	0,2510	0,2144	10	9
5	0,1900	0,1987	15	16
6	0,0993	0,1428	14	19
7	0,0350	0,0793	8	17
8	0,0081	0,0337	3	11
9	0,0012	0,0108	1	5
10	0,0001	0,0026	0	2
11	0,0000	0,0004	0	0
12	0,0000	0,0001	0	0
13	0,0000	0,0000	0	0
14	0,0000	0,0000	0	0
15	0,0000	0,0000	0	0
Energia gerada (kWh/mês)			53,34	81,80
Média da Energia Gerada (kwh/mês)			67,57	

Fonte: o autor (2020)

**APÊNDICE B – ENERGIA GERADA PARA AS TURBINAS SX1700 E SX3300**

Energia gerada para turbina SX1700

Velocidade do Vento (m/s)	Estações meteorológicas	Atlas	Energia Gerada Estações Met. (kWh/mês)	Energia Gerada Atlas (kWh/mês)
0	0,0000	0,0000	0	0
1	0,0442	0,0348	0	0
2	0,1404	0,1052	0	0
3	0,2303	0,1770	5	4
4	0,2510	0,2144	14	12
5	0,1900	0,1987	21	22
6	0,0993	0,1428	19	27
7	0,0350	0,0793	11	24
8	0,0081	0,0337	4	15
9	0,0012	0,0108	1	7
10	0,0001	0,0026	0	2
11	0,0000	0,0004	0	1
12	0,0000	0,0001	0	0
13	0,0000	0,0000	0	0
Energia gerada (kWh/mês)			74,10	113,63
Média da Energia Gerada (kwh/mês)			93,86	

Fonte: o autor (2020)

Energia gerada para turbina SX3300

Velocidade do Vento (m/s)	Estações meteorológicas	Atlas	Energia Gerada Estações Met. (kWh/mês)	Energia Gerada Atlas (kWh/mês)
0	0,0000	0,0000	0	0
1	0,0442	0,0348	0	0
2	0,1404	0,1052	0	0
3	0,2303	0,1770	15	12
4	0,2510	0,2144	39	33
5	0,1900	0,1987	57	60
6	0,0993	0,1428	52	74
7	0,0350	0,0793	29	66
8	0,0081	0,0337	10	42
9	0,0012	0,0108	2	19
10	0,0001	0,0026	0	6
11	0,0000	0,0004	0	1
12	0,0000	0,0001	0	0
13	0,0000	0,0000	0	0
Energia gerada (kWh/mês)			203,77	312,48
Média da Energia Gerada (kwh/mês)			258,12	

Fonte: o autor (2020)

## APÊNDICE C – ENERGIA GERADA PARA AS TURBINAS AIR40 E SKYSTREAM

Energia gerada para turbina Air40

Velocidade do Vento (m/s)	Estações meteorológicas	Atlas	Energia Gerada Estações Met. (kWh/mês)	Energia Gerada Atlas (kWh/mês)
0	0,0000	0,0000	0	0
1	0,0442	0,0348	0	0
2	0,1404	0,1052	0	0
3	0,2303	0,1770	0	0
4	0,2510	0,2144	3	2
5	0,1900	0,1987	4	4
6	0,0993	0,1428	4	5
7	0,0350	0,0793	2	5
8	0,0081	0,0337	1	3
9	0,0012	0,0108	0	1
10	0,0001	0,0026	0	0
11	0,0000	0,0004	0	0
12	0,0000	0,0001	0	0
13	0,0000	0,0000	0	0
Energia gerada (kWh/mês)			13,24	21,11
Média da Energia Gerada (kwh/mês)			17,18	

Fonte: o autor (2020)

Energia gerada para turbina Skystream

Velocidade do Vento (m/s)	Estações meteorológicas	Atlas	Energia Gerada Estações Met. (kWh/mês)	Energia Gerada Atlas (kWh/mês)
0	0,0000	0,0000	0	0
1	0,0442	0,0348	0	0
2	0,1404	0,1052	0	0
3	0,2303	0,1770	24	9
4	0,2510	0,2144	61	26
5	0,1900	0,1987	90	47
6	0,0993	0,1428	81	59
7	0,0350	0,0793	45	52
8	0,0081	0,0337	16	33
9	0,0012	0,0108	3	15
10	0,0001	0,0026	0	5
11	0,0000	0,0004	0	1
12	0,0000	0,0001	0	0
13	0,0000	0,0000	0	0
Energia gerada (kWh/mês)			320,04	246,79
Média da Energia Gerada (kwh/mês)			283,42	

Fonte: o autor (2020)