



**Eudes Klockner Matte**

**DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO DE UM PERFIL  
AERODINÂMICO PARA UM AEROGERADOR DE EIXO  
VERTICAL**

**Horizontina**

**2014**

**Eudes Klockner Matte**

**DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO DE UM PERFIL  
AERODINÂMICO PARA UM AEROGERADOR DE EIXO  
VERTICAL**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Ademar Michels, Dr.

**Horizontina**

**2014**

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:**

**“Dimensionamento e simulação de um perfil aerodinâmico para um  
aerogerador de eixo vertical”**

**Elaborada por:**

**Eudes Klockner Matte**

como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Mecânica

**Aprovado em: 19/11/2014  
Pela Comissão Examinadora**

---

**Prof. Dr. Ademar Michels  
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

---

**Prof. Dr. Fabiano Cassol  
FAHOR – Faculdade Horizontina**

---

**Prof. Me. Anderson Dal Molin  
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Horizontina  
2014**

## **DEDICATÓRIA**

A minha família, por sua capacidade de acreditar e investir em mim, pela dedicação e segurança que me passaram durante toda essa caminhada. Aos meus amigos, colegas e professores que entre um parágrafo e outro melhoraram tudo que tenho produzido na vida.

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço a minha mãe Asta, heroína que me deu apoio incondicional. Ao meu pai Euclides, que nas horas difíceis me fortaleceu não deixando o desânimo e cansaço vencer. Meu muito obrigado a minha irmã Ana Paula, que sempre fez entender que o futuro é feito a partir da dedicação do presente.

Agradeço a todos os professores por me proporcionar conhecimento no processo de formação profissional.

A todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para minha formação, o meu muito obrigado.

Quando os ventos de mudança sopram, umas  
pessoas levantam barreiras, outras constroem  
moinhos de vento.  
(Érico Veríssimo)

## RESUMO

Este trabalho final de curso tem por objetivo apresentar o dimensionamento da pá assim como a simulação do vento e as pressões exercidas a qual ela está sujeita através de uma turbina eólica de eixo vertical para uma propriedade urbana no noroeste do Rio Grande do Sul. A revisão bibliográfica apresenta algumas definições sobre a energia eólica, características de aerogeradores horizontais e verticais e componentes aerodinâmicos de arrasto e sustentação. Com base na velocidade do vento na região o potencial eólico disponível (kW) a uma altura de 30 metros é adquirido através de equações matemáticas e este por sua vez determina o dimensionamento do rotor. Utilizou-se o perfil aerodinâmico da turbina de Lenz2 da qual foi elaborado o modelamento geométrico em 3D utilizando o software SolidWorks. Com o modelo foi possível realizar a simulação do escoamento do fluido ao longo da pá e a pressão que esse fluido exerce sobre ela através do componente de elementos finitos Flow Simulation. Como principais resultados obtém-se a variação da velocidade em ambos os sentidos em que o fluido (ar) passa ao longo da pá e a diferença de pressão exercida pelo fluido na pá (kPa) tanto na região de sustentação como na área de arrasto.

**Palavras-chave:** Aerodinâmica. Aerogerador. Dimensionamento.

## **ABSTRACT**

The objective of this final project is to present the dimensions of a blade in a vertical axis wind turbine, as well as a wind simulation and its pressure exerted on the blade. The project is for a urban property located at the NorthWest of Rio Grande do Sul. The bibliography brings some definitions of wind energy, also characteristics of horizontal and vertical windmills, and aerodynamic components of drag and lift. Using the wind speed of the region, the wind potential (kW) a height of 30 meters is obtained through mathematical equations and this in turn determines the rotor dimensioning. It was used the aerodynamic profile of Lenz2 turbine to elaborate the 3D geometric model on SolidWorks software. With this model, it was possible to make a simulation of the fluid runoff through the blade, and the pressure exerted on it through the finite element component Flow Simulation. The main results obtained by varying the speed in both directions in which the fluid (air) passes along the blade and the pressure difference exerted by the fluid on the blade (kPa) in both the lift and in the drag area.

**Keywords:** Aerodynamic. Windmill. Dimensions.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Forças de Coriolis .....	14
Figura 2 – Turbina eólica de eixo horizontal (esquerda) e vertical (direita) .....	18
Figura 3 – Relação entre o coeficiente de potência e a razão da velocidade .....	21
Figura 4 – Aspectos de uma TEEV Darrieus.....	22
Figura 5 – Turbina Darrieus H de três pás .....	23
Figura 6 – Ilustração de uma turbina Savonius de duas conchas (a). escoamento do ar em uma turbina Savonius (b) .....	24
Figura 7 – Turbina Darrieus de pás torcidas .....	24
Figura 8 – Turbina Lenz2 .....	25
Figura 9 – Princípio das forças aerodinâmicas resultantes .....	26
Figura 10 – Diagrama de velocidades e forças atuantes sobre as pás das turbinas.	27
Figura 11 – Representação dos vetores de velocidade e dos ângulos de ataque e azimute.....	38
Figura 12 – Geometria do perfil da pá (em milímetros) .....	39
Figura 13 – Inclinação do ângulo da pá .....	39
Figura 14 – Modelo de pá .....	40
Figura 15 – Domínio total da simulação .....	41
Figura 16 – Variação da velocidade do vento no escoamento do fluido para arrasto .....	42
Figura 17 – Variação da velocidade do vento no escoamento do fluido para sustentação.....	42
Figura 18 – Pressão que o fluido ao passar exerce sobre a pá .....	43

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	12
1.2 OBJETIVOS .....	13
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>14</b>
2.1 VENTOS .....	14
2.1.1 ORIGEM DOS VENTOS .....	14
2.1.2 INTENSIDADE DOS VENTOS .....	15
2.2 ENERGIA EÓLICA .....	18
2.2.1 CONVERSÃO DE ENERGIA .....	18
2.2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS AEROGERADORES .....	18
2.2.2.1 TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL .....	19
2.2.2.2 TURBINAS EÓLICAS DE EIXO VERTICAL .....	19
2.2.3 POTENCIAL EÓLICO .....	20
2.2.4 POTENCIAL EÓLICO REAL .....	21
2.3 AEROGERADORES DE EIXO VERTICAL .....	22
2.4 FORÇAS AERODINÂMICAS .....	26
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>30</b>
3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS .....	30
3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS .....	30
<b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>32</b>
4.1 DIMENSIONAMENTO DA TURBINA .....	32
4.1.1 ESCOLA DO TIPO DE TURBINA .....	32
4.1.2 CÁLCULOS PARA O DIMENSIONAMENTO DA TURBINA .....	33
4.1.3 PÁS .....	37
4.2 MODELAMENTO COMPUTACIONAL DA PÁ DO ROTOR .....	40
4.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA PÁ DA TURBINA .....	40
4.3.1 PARÂMETROS INICIAIS .....	41
4.3.2 RESULTADOS OBTIDOS .....	41

4.3.2.1 VELOCIDADE DO ESCOAMENTO DO FLUÍDO .....	42
4.3.2.2 PRESSÃO DO FLUÍDO SOBRE A SUPERFÍCIE DA PÁ.....	43
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>44</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>45</b>
<b>ANEXO A – VELOCIDADE DO VENTO NO RIO GRANDE DO SUL .....</b>	<b>47</b>
<b>ANEXO B – CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA.....</b>	<b>48</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O uso da energia dos ventos não surgiu recentemente, foi utilizado há milênios através dos persas, gregos e egípcios nos barcos a velas para ajudar na força dos remos e também num período mais tardio em moinhos, na moagem de grão, mas foi apenas na década de 30 que houve interesse em usar essa fonte para a geração de eletricidade. Diante da descoberta do petróleo houve um desinteresse pela energia eólica ficando deslocada no tempo até a crise do petróleo dar início na década de 70, motivando novamente o desenvolvimento de geradores eólicos como uma fonte energética alternativa.

No Brasil, o aumento da necessidade da oferta de energia elétrica para atender a demanda provocada pelo crescimento econômico, tem contribuído na procura por fontes energéticas “limpas”, ou seja, que não liberam ou liberam poucos resíduos ou gases no ambiente. Comparada às termoelétricas que causam uma poluição excessiva do ar devido à queima de combustíveis fósseis ou até mesmo as hidroelétricas que geram uma enorme quantidade de eletricidade, mas por sua vez necessitam de um estudo aprofundado e uma área realmente grande para o projeto ser viabilizada, os aerogeradores, como são conhecidas as turbinas eólicas, além de ser de rápida implementação podem ser considerada uma alternativa de demanda a curto prazo.

As medições já realizadas indicam que as regiões norte, nordeste e sul do Brasil possuem um grande potencial, onde por sua vez já existem vários parques eólicos em funcionamento, como o de Osório no Rio Grande do Sul e o de Guamaré no Rio Grande do Norte.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

Segundo Jureczto et al. apud Pires (2010) o custo de fabricação das pás de uma turbina eólica está na ordem de 15 a 20 % do custo total. À medida que as pesquisas para uso residencial avançam, essas turbinas tendem a ser financeiramente viáveis no fornecimento de energia elétrica.

A ampla gama de possibilidades projetuais como, por exemplo, software de moldes em 3D, apresenta modelos em realidade virtual e possibilita a simulação de

estruturas com precisão, facilitando a complexidade e a visão que envolve o dimensionamento de uma turbina eólica.

Deste modo, a utilização de uma fonte alternativa em áreas urbanas para diminuir os gastos com a tarifa de luz pode ser adquirida com um pequeno aerogerador instalada em um prédio ou em um ponto mais alto de uma propriedade.

## 1.2 OBJETIVOS

Para melhor desempenho estrutural, o dimensionamento de um rotor se faz necessário. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo principal a seleção de um perfil de pás para um gerador eólico de eixo vertical, bem como sua simulação aerodinâmica em softwares específicos que possa fornecer uma potência satisfatória para casas/prédios nas áreas urbanas da região noroeste do Rio Grande do Sul. Tendo como objetivos específicos:

- Identificar a intensidade dos ventos na região noroeste do Rio Grande do Sul;
- Determinar o consumo elétrico de uma propriedade;
- Definir o perfil aerodinâmico das pás;
- Modelar as pás em software computacional;
- Simular o escoamento do fluido nas pás do rotor por meio de software.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

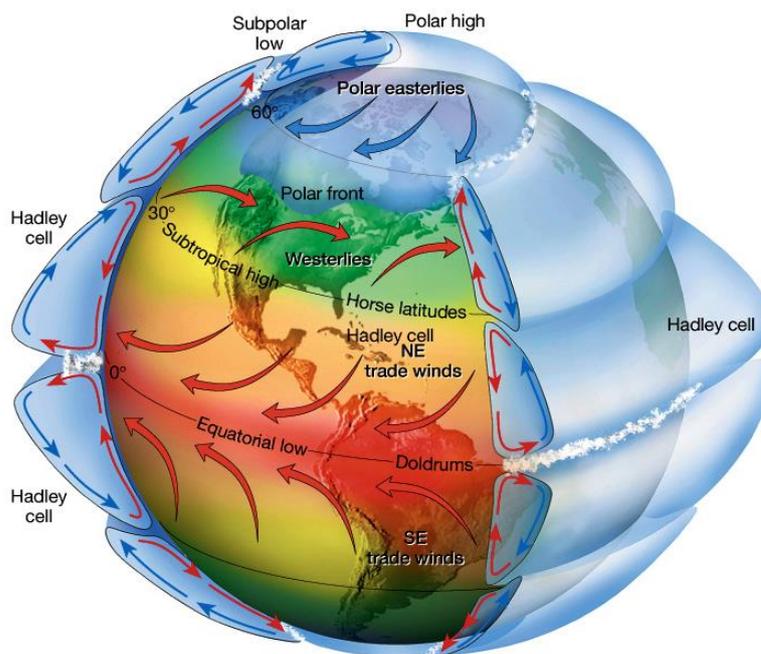
### 2.1 VENTOS

#### 2.1.1 Origem dos ventos

Segundo o Atlas Eólico do Estado do Rio Grande do Sul (2002) o vento origina-se da associação da radiação solar e da rotação planetária, ou seja, planetas envoltos por gases apresentam distintas formas de circulação atmosférica e ventos em sua superfície. Trata-se de um mecanismo solar-planetário permanente.

Conforme Santos et al. (2006) a rotação da Terra origina as forças de Coriolis, que é o movimento de algum objeto em relação a um referencial não inercial, como no hemisfério norte em que o movimento dos ventos é no sentido anti-horário, sendo no sul o sentido horário. Assim o ar quente e menos denso sobe do equador aos Pólos criando zonas de baixa pressão, próximo dos trópicos as forças de Coriolis impede que os ventos continuem para os Pólos, criando altas pressões onde os ventos descem. A figura 1 representa as forças de Coriolis que atuam sobre os ventos na Terra.

Figura 1 – Forças de Coriolis



Fonte: Junior, 2008.

De acordo com Sá e Lopes (2001) o aquecimento desuniforme da atmosfera proveniente da energia solar provoca os ventos, esse aquecimento é oriundo dos raios solares e o movimento de rotação do planeta.

Ainda conforme o autor, a energia total disponível dos ventos ao redor do planeta que pode ser aproveitada é de aproximadamente 2%, essa energia converte-se em energia eólica que é capaz de mover as pás de um aerogerador.

### 2.1.2 Intensidade dos ventos

Segundo Jervell (2009) os ventos mais fortes ocorrem cerca de 10 km da superfície da terra. Essa altura inviabiliza a colocação de aerogeradores, deste modo o espaço de interesse restringe-se a dezenas de metros de altura do solo, nestas alturas o vento é afetado diretamente por forças de atrito que provoca diminuição de sua velocidade.

Santos et al. (2006) citam que a superfície terrestre influencia de forma significativa nos ventos de aproximadamente 100 metros de altura. A intensidade desses ventos é reduzida devido aos obstáculos existentes no solo, como árvores, montanhas, casas, prédios o que provoca uma diminuição na sua velocidade. A tabela 1 apresenta as diferentes características do terreno através do coeficiente de atrito.

Tabela 1 – Coeficiente de atrito para distintos terrenos

<b>Característica do terreno</b>	<b>Coef. de atrito (<math>\alpha</math>)</b>
Terreno firme, águas calmas	0,10
Gramma alta em terreno plano	0,15
Plantações e arbustos altos	0,20
Florestas e muitas árvores	0,25
Vilas com árvores e arbustos	0,30
Grandes cidades com edifícios altos	0,40

**Fonte:** Farret, 2010, p. 70.

À medida que os ventos se afastam da superfície, tornam-se mais uniformes e alcançam maiores velocidades. Conforme Ferrart (2010) o escoamento desses ventos na superfície terrestre é turbulento e em função da altura sua velocidade pode ser estimada. Conhecendo assim a velocidade do vento ( $V_o$ ) a uma altura ( $H_o$ ), pode-se determinar a sua velocidade ( $V$ ) na altura estimada ( $H$ ) usando os coeficientes de atrito ( $\alpha$ ) da tabela 1, onde:

$$V = V_o \left( \frac{H}{H_o} \right)^\alpha \quad (1)$$

As manifestações dos locais mais conhecidos dos ventos segundo Santos (2006) são observadas em regiões costeiras chamadas de brisas marinhas e em regiões de vales ou montanhas. Durante o dia o ar quente nas proximidades das montanhas eleva-se por ser menos denso, e o ar frio por ser mais denso desce sobre o vale. No período noturno a direção que o vento sopra se inverte, o ar frio das montanhas descem e se acumulam nos vales. No caso da brisa marinha durante o dia o calor gerado pela influencia do sol faz com que as áreas em terra aqueçam mais rapidamente que o mar, esse calor gerado faz o ar quente subir, circulando para o mar que por sua vez atrai o ar mais frio do mesmo para o solo. À noite assim como nas regiões de vales ou montanhas a direção do vento se invertem, o ar quente dos mares sobe e o ar frio nas áreas em terra se desloca em direção ao mar.

Além disso, para implantar sistemas eólicos para atender residências isoladas onde há dificuldade em se determinar a velocidade do vento, pode ser usada à escala de Beaufort para estimar a viabilidade das instalações eólicas. A tabela 2 abaixo apresenta a classificação segundo o grau de Beaufort, sua velocidade em m/s e seus efeitos causados na natureza.

Tabela 2 – Escala Beaufort

<b>Grau</b>	<b>Classificação</b>	<b>Efeito do vento na natureza</b>	<b>Velocidade (m/s)</b>
0	Calmaria	Tudo parado. A fumaça sobe verticalmente.	0,00 - 0,30
1	Quase calmaria	A fumaça se dispersa. Cata-vento parado. Não se sente o vento no rosto.	0,30 - 1,40
2	Brisa	Sente-se o vento no rosto. Ouve-se o ruído das folhas, Cata-vento move-se.	1,40 - 3,00
3	Vento fresco	As folhas e os pequenos ramos das árvores agitam-se constantemente. Bandeiras esticam-se.	3,00 - 5,50
4	Vento moderado	O vento levanta poeira e papel do chão. Pequenos galhos agitam-se.	5,50 - 8,00
5	Vento Regular	Pequenas árvores com folhas começam a balançar	8,00 - 11,00
6	Vento meio forte	Grandes galhos movem-se, fios de eletricidade assobiam. Começa a ficar difícil andar contra o vento.	11,00 - 14,00
7	Vento forte	Árvores inteiras agitam-se. Fica Definitivamente difícil andar contra o vento.	14,00 - 17,00
8	Vento muito Forte	Galhos de árvores são arrancados. É preciso muito esforço para andar.	17,00 - 21,00
9	Ventania	Há destelhamento.	21,00 - 25,00
10	Vendaval	Árvores são derrubadas. Há danos em construções.	25,00 - 28,00
11	Tempestade	O vento assume características de um furacão, raramente acontece longe das costas.	28,00 - 33,00
12	Furacão	O ar fica cheio de espuma e gotas de água. O mar fica inteiramente esbranquiçado.	33,00 - 36,00

**Fonte:** Ferrat, 2010, p. 65.

## 2.2 ENERGIA EÓLICA

### 2.2.1 Conversão de energia

As turbinas eólicas além de serem usadas para a geração de energia elétrica, tendo seu uso de imediato ou armazenado em baterias, podem ser usadas para o bombeamento de água, moagem de grãos e etc. essas turbinas utilizam a energia cinética do vento e as transformam em energia mecânica. (FARRET, 2010).

### 2.2.2 Classificação dos aerogeradores

Os rotores dos aerogeradores são os responsáveis pela captura cinética do vento e transformá-la em um gerador elétrico. É o componente mais característico de um sistema eólico, pois o rotor influencia diretamente no rendimento do sistema. Essas turbinas tem seu design dividido em duas classificações: as turbinas de eixo horizontal (TEEH) e as turbinas de eixo vertical (TEEV) cada uma com suas respectivas características como ilustra a figura 2 (TIBOLA, 2009).

Figura 2 – Turbina eólica de eixo horizontal (a) e vertical (b)



(a)



(b)

Fonte: Wenzel, 2007.

### **2.2.2.1 Turbinas eólicas de eixo horizontal**

Em escala global, os aerogeradores de eixo horizontal são os mais usados na geração de energia elétrica conectada a redes de transmissão, pois apresentam velocidade e rotação mais elevada que as TEEV.

De acordo com Tibola (2009) um gerador eólico TEEH é formado por três principais partes: rotor, gerador e torre. O rotor é composto pelas pás, eixo e engrenagens para a transmissão de movimento para o gerador, além disso, é necessário o alinhamento do mesmo com a direção do vento, a fim de se ter um melhor aproveitamento. Esses aerogeradores apresentam uma, duas, três, quatro ou diversas pás, projetadas para forças de sustentação elevadas e pequenas forças de arrasto.

O rotor multipás das TEEH, segundo Tibola (2009) representa grande parte das instalações eólicas de pequena potência, sendo usada com mais frequência no bombeamento de água. Como característica, apresenta boa relação entre o torque de partida por área por varredura do rotor, mesmo em ventos fracos. Em desvantagem, seu melhor rendimento encontra-se nas baixas velocidades, limitando a potência máxima extraída, motivo pelo qual é pouco indicado para a geração de energia elétrica.

Ainda conforme o autor, rotores de uma, duas ou três pás são mais eficientes para o melhor aproveitamento do vento. Turbinas de uma única pá requerem um contra peso para eliminar a vibração, já os de duas pás são usados por serem mais simples, resistentes e de menor custo, já que usam menos material. As TEEH de três pás são abundantemente usadas por distribuir melhor as tensões quando estão em movimento, por esse motivo são utilizadas tanto em parques eólicos quanto em sistemas isolados, de baixa ou alta potência.

### **2.2.2.2 Turbinas eólicas de eixo vertical**

Os aerogeradores de eixo vertical são menos populares devido ao baixo aproveitamento da energia do vento, embora fossem utilizados muito no passado, hoje se restringem principalmente às áreas urbanas em consequência da produção de baixos níveis de ruídos e da sua capacidade de aproveitar ventos turbulentos (TIBOLA, 2009).

Ainda segundo o autor a vantagem desse tipo de turbina simplifica bastante os mecanismos de transmissão de potência, pois o rotor não precisa estar alinhado na direção do vento, como acontece nos aerogeradores de eixo horizontal. Em contrapartida a desvantagem reside no fato de suas pás em razão do movimento de rotação mudarem constantemente o ângulo de ataque e de deslocamento em relação à direção dos ventos, gerando forças resultantes alternadas, causando vibrações na estrutura e limitando seu rendimento.

De acordo com Tibola (2009) há vários modelos de turbinas de eixo vertical, sendo Savonius e Darrius as mais conhecidas. O rotor Savonius possui suas pás em forma de meio cilindro acoplado a um eixo, esse modelo foi bastante utilizado no passado para o bombeamento de água por possuir baixo custo, instalação e manutenção simplificada, entretanto, apresenta o menor rendimento entre as turbinas. O rotor Darrius já foi muito usado para a geração de energia elétrica e apresenta o maior rendimento entre as turbinas de eixo vertical, suas pás são construídas utilizando-se perfis aerodinâmicos. A desvantagem dessa turbina se deve a necessidade de um alto torque de partida. Esse modelo apresenta variações do perfil que utilizam as pás nas posições verticais.

### 2.2.3 Potencial eólico

Para o aproveitamento dos ventos como fonte de energia, um estudo da velocidade do local é de fundamental importância, segundo Petry e Mattuella (2007) a variação ao longo dos dias, das estações do ano e com a altura caracterizam o potencial eólico de um determinado local e configura um dos principais partes do projeto.

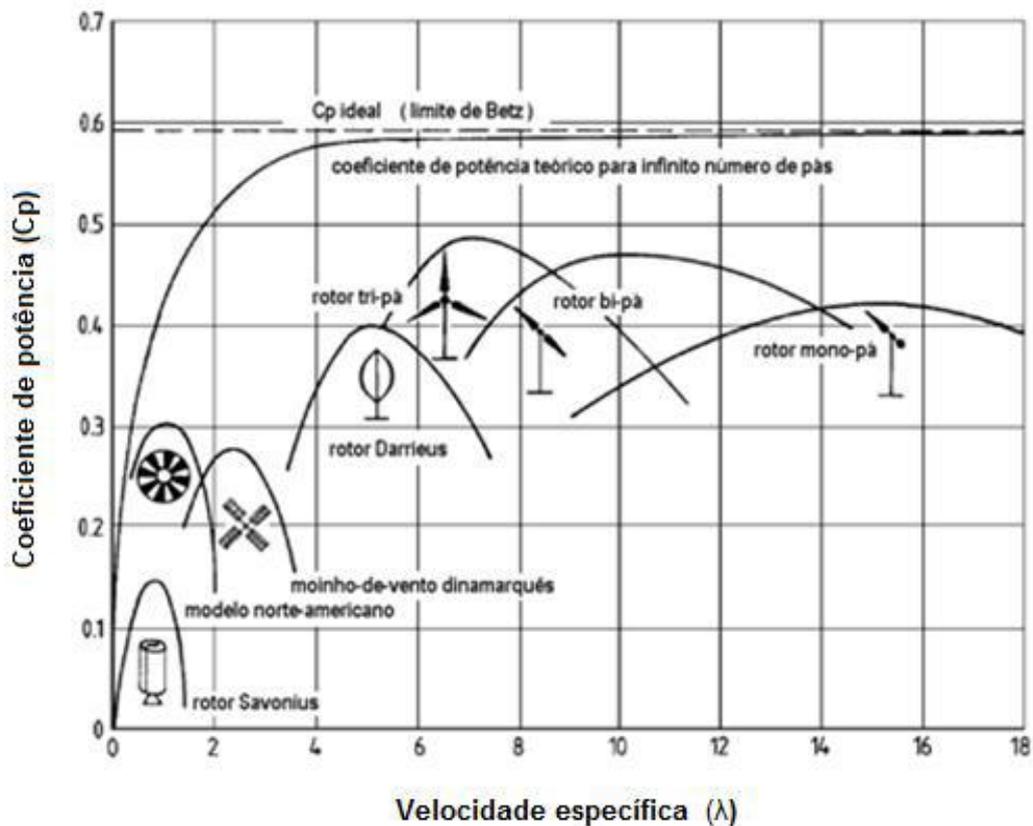
Através das turbinas eólicas, a energia cinética contida nos ventos é convertida em energia mecânica pelo giro das pás do rotor e transforma em energia elétrica pelo gerador. Segundo Sá e Lopes (2001) o potencial eólico disponível, ( $P_d$ ) contido nos ventos possui uma densidade do ar ( $\rho$ ) usual de  $1,225 \text{ kg/m}^3$ , esse vento flui perpendicular com certa velocidade  $V$  (m/s) através de uma área  $A$  ( $\text{m}^2$ ) é dada por:

$$P_d = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (2)$$

## 2.2.4 Potencial eólico real

Apenas uma fração da potência disponível no vento é aproveitada pelas turbinas eólicas, essa fração denominada coeficiente de potência ( $C_p$ ). Betz apud Menezes (2008) cita que a máxima potência extraída do vento equivale a 59% da potência disponível para a turbina, sendo que esse é um valor teórico. Ainda de acordo com o autor, turbinas eólicas modernas aproveitam aproximadamente 40%. A figura 3 mostra o coeficiente de potência em razão da velocidade da ponta de pá e a velocidade do vento conhecida também como velocidade específica ( $\lambda$ ).

Figura 3 – Relação entre o coeficiente de potência e a razão da velocidade



Fonte: Menezes, 2012.

A expressão para extrair a parcela de potência mecânica disponível no vento pelas pás da turbina é definida por:

$$P_d = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \quad (3)$$

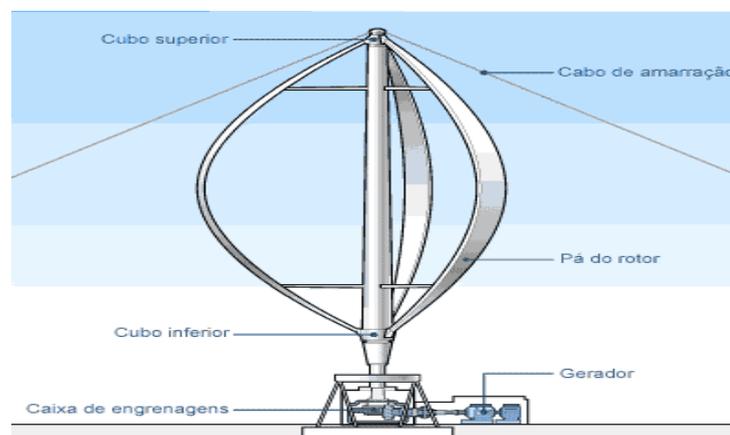
Além de depender das condições do vento e do tamanho do aerogerador, Menezes (2008) cita que o rendimento do da turbina, que compõe o rendimento aerodinâmico das pás, do gerador elétrico, entre outros, deve ser levado em consideração para a verificação da real potência elétrica que o aerogerador vai produzir. A equação que leva o rendimento ( $\eta$ ) em consideração é expressa por:

$$P_d = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta \quad (4)$$

### 2.3 AEROGERADORES DE EIXO VERTICAL

As TEEVs são turbinas eólicas cujo eixo de rotação está orientado na mesma direção da torre que suporta a estrutura do rotor, ou seja, numa mesma direção que é perpendicular a direção do movimento do vento. O fato de o gerador ficar instalado no solo faz com que a manutenção do próprio gerador e da caixa de velocidade seja mais fácil em comparação as turbinas eólicas de eixo horizontal. Ao contrario das TEEHs essas turbinas segundo Carmo (2012) podem ser posicionadas umas próximas das outras, isso se deve pelo fato do ar ao passar pelas pás deixa parte de sua energia cinética para a turbina e continua diminuindo até atingir um ponto de velocidade mínima, o que impediria o correto funcionamento caso as TEEHs fossem colocadas muito próximas uma das outras. A figura 4 apresenta o esquema de uma TEEV de grandes dimensões:

Figura 4 – Aspectos de uma TEEV Darrieus



Fonte: Layton, 2014.

As turbinas Darrieus são TEEVs que possuem duas ou três pás curvadas, cujo perfil aerodinâmico tem a forma do perfil NACA 00xx. As pás dessa turbina são fixadas nos dois extremos do eixo, reduzindo o esforço estrutural, tendo a sustentação aerodinâmica como força motriz sobre as pás. Essas turbinas apresentam rendimento energético de aproximadamente 30% (CARMO, 2012).

Ainda conforme o autor, turbinas Darrieus H ou Giromill é um tipo de TEEV que apresenta pás verticais planas, diferente das pás curvadas da Darrieus original, apresentando também um rendimento superior, uma vez que a possui uma área de passagem de escoamento maior, no entanto os esforços estruturais a que está sujeito são mais elevados. Turbinas Darrieus H são normalmente instaladas em telhados de habitações que se encontram em meio rural, conforme a figura 5.

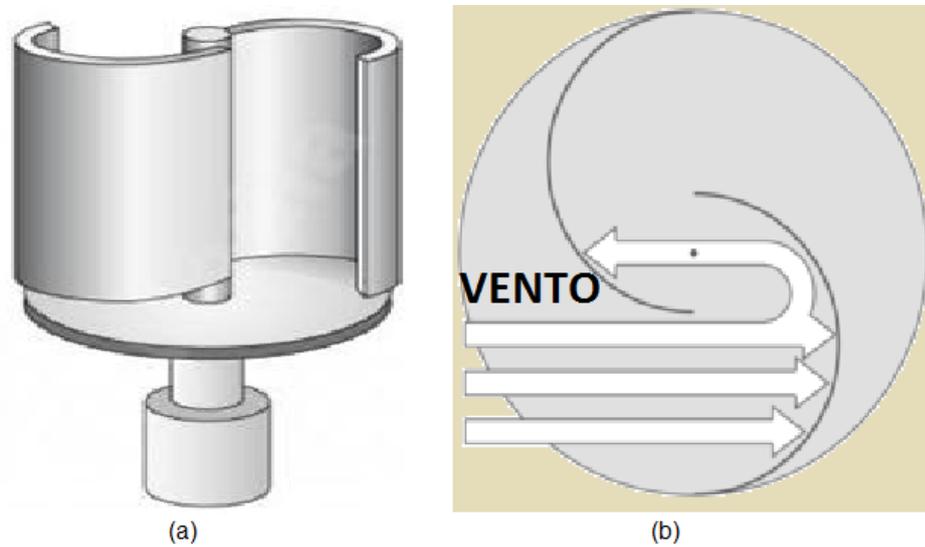
Figura 5 – Turbina Darrieus H de três pás



Fonte: Carmo, 2012.

A turbina Savonius é uma TEEV que aproveita a força do vento através do arrasto para girar seu rotor. Essa turbina se diferencia das outras por apresentar duas ou mais conchas em vez de pás. O desenho de um rotor Savonius é relativamente simples e torna sua construção e manutenção econômicas perante os outros modelos, conforme é ilustrado na figura 6. Os esforços estruturais são menos intensos que nas turbinas Darrieus, no entanto essa turbina apresenta um rendimento energético baixo, cerca de 15% o que à torna menos atrativa para a produção de eletricidade (CARMO, 2012).

Figura 6 – Ilustração de uma turbina Savonius de duas conchas (a). Escoamento do ar em uma turbina Savonius (b)



Fonte: Carmo, 2012.

As TEEVs estão normalmente sujeitas a grandes variações de torque durante cada período de rotação, o que pode provocar esforços de fadiga no eixo do rotor. O projeto de uma turbina vertical de pás torcidas permite reduzir a variação de torque no eixo do rotor, podendo ser reduzindo ainda com o aumento do número de pás, uma vez que se distribui a força do torque em torno do rotor (CARMO, 2012). A figura 7 é um exemplo de turbina Darrieus com pás torcidas

Figura 7 – Turbina Darrieus de pás torcidas



Fonte: Carmo, 2012.

Uma turbina TEEV para geração de pequenas potências que vem sendo experimentado segundo Menezes (2012) é o modelo Lenz, conforme a figura 8 representa. Esse modelo baseia-se nos princípios e projetos de outras turbinas de eixo vertical, como o Darrieus H e Savonius. O formato e posição são semelhantes às pás Darrieus H, a diferença está em umas das faces que não é totalmente fechada, o que a torna semelhante ao modelo Savonius.

A vantagem da pá não ser totalmente fechada se encontra durante a partida da turbina, pois possibilita que a turbina inicie seu movimento em baixas velocidades de vento. Seu princípio se baseia nas forças aerodinâmicas de arrasto e sustentação e segundo Lenz apud Menezes (2012) seu rendimento pode chegar a 41% tornando a adequada para a geração de energia elétrica, porém não apresenta um bom funcionamento quando submetido a velocidades de vento elevadas.

Figura 8 – Turbina Lenz2

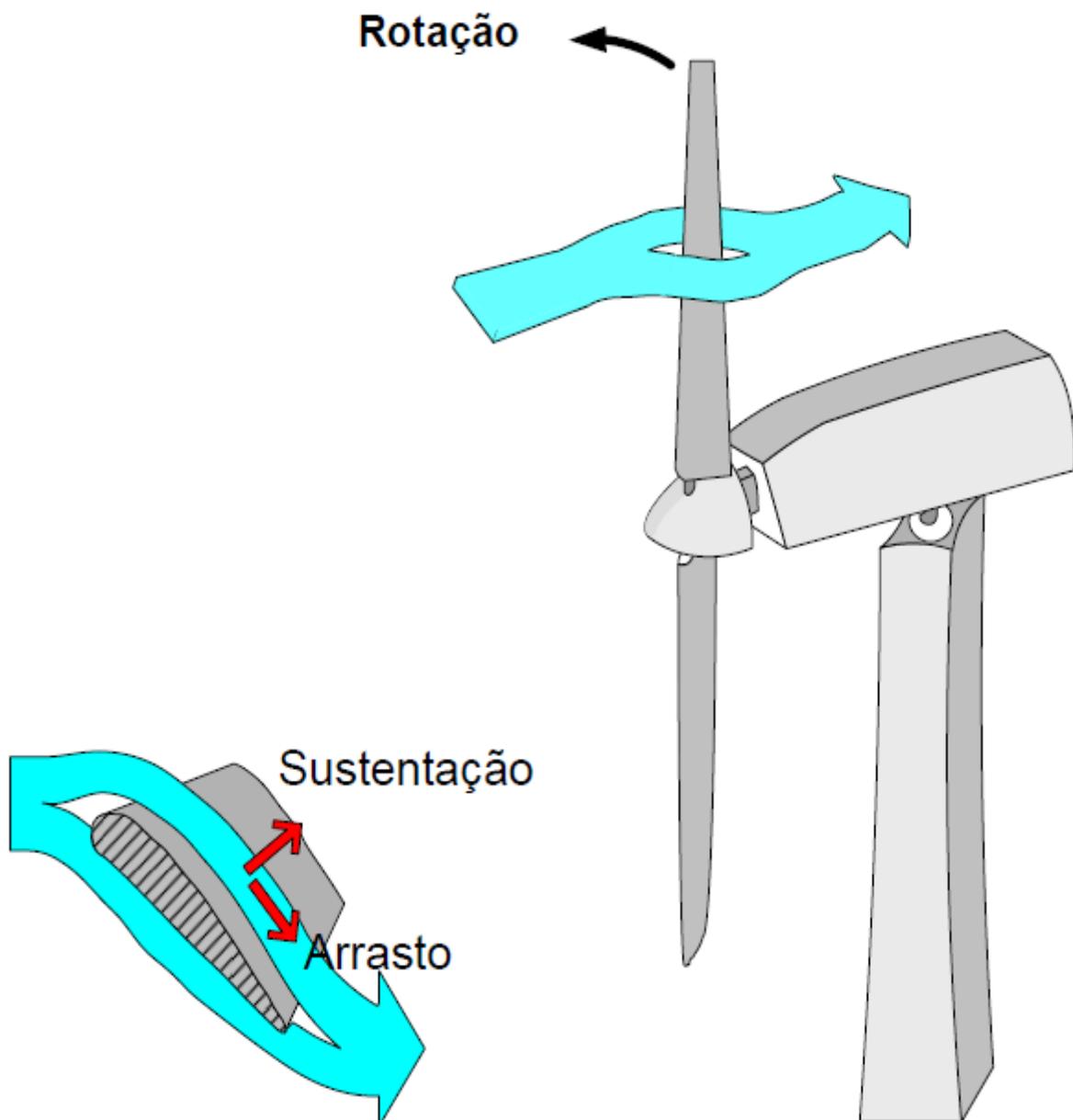


Fonte: Menezes, 2012.

## 2.4 FORÇAS AERODINÂMICAS

De acordo com as iterações das pás as turbinas eólicas são classificadas em turbinas de arraste e de sustentação. Na figura 9 estão representados os dois tipos de forças que podem ocorrer. A operação de cada tipo de turbina é respectivamente caracterizada pelo predomínio de cada uma dessas forças, devido a aspectos construtivos (ROCHA, 2008).

Figura 9 – Princípio das forças aerodinâmicas resultantes

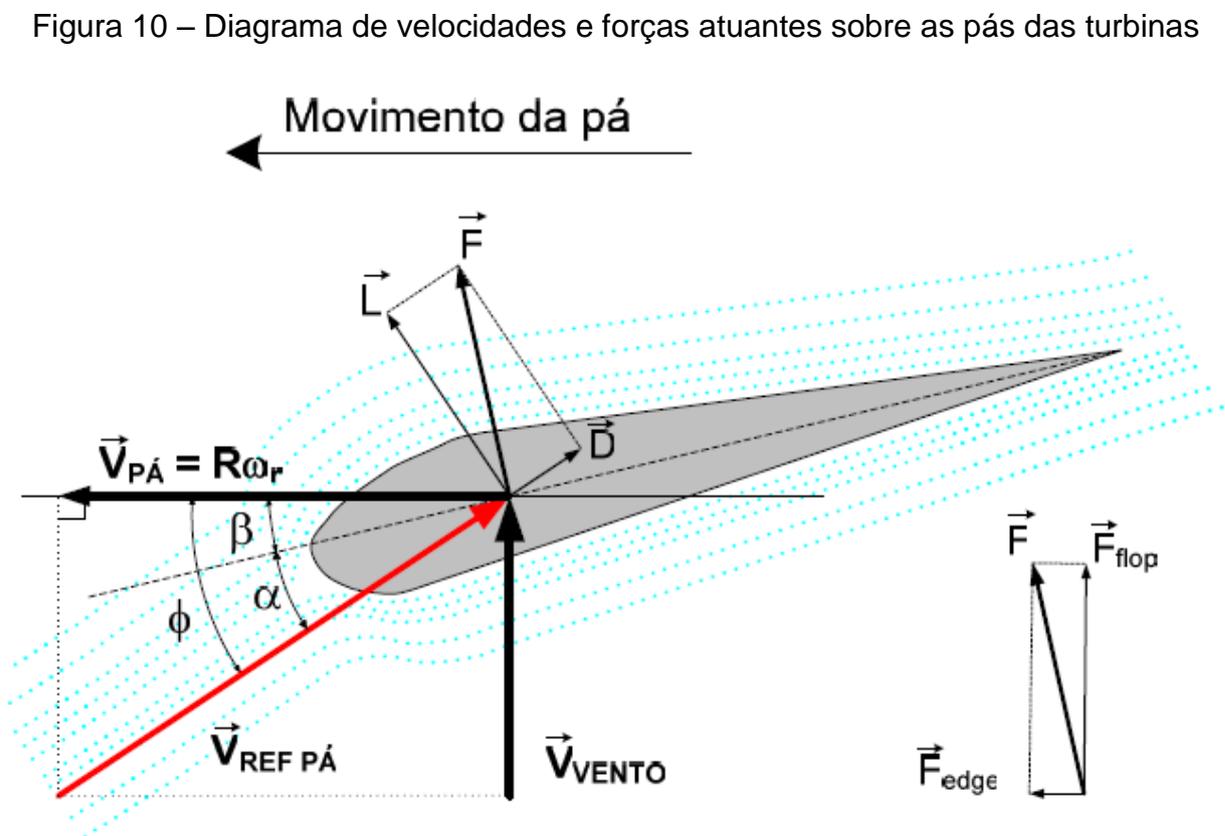


Fonte: Rocha, 2008.

Conforme Rocha (2008) as turbinas de arraste são caracterizadas devido à ação do vento empurrar as pás, forçando o rotor a girar em volta de seu eixo. Esse tipo de turbina apresenta uma desvantagem, pois a velocidade das pás não pode ser maior que a velocidade do vento, limitando assim sua eficiência. Sua utilização é usualmente aplicada em áreas rurais para bombear pequenos volumes de água com ventos de baixa velocidade.

Ainda segundo o autor, as asas dos aeroplanos têm características aerodinâmicas similares às turbinas de sustentação. O vento passa mais rapidamente sobre a superfície mais longa da pá, o que resulta em uma área de baixa pressão, e a diferença de pressão entre as duas superfícies gera uma força de sustentação. Em uma asa de avião, isto ocasiona uma força de elevação, mas no caso das pás das turbinas, pelo fato delas serem confinadas a se mover em um plano, as forças de sustentação ocasionam sua rotação.

As forças aerodinâmicas em um aerogerador é a resultante das componentes de sustentação e arraste. A Figura 10 ilustra as forças que atuam sobre o perfil da pá e sua nomenclatura:



Fonte: Rocha, 2008.

- $\vec{V}_{VENTO}$ : velocidade absoluta do vento incidente na turbina;
- $\vec{V}_{PÁ}$ : velocidade tangencial da seção da pá;
- $\vec{V}_{REF\_PÁ}$ : velocidade de vento vista no referencial da pá: subtração vetorial de  $\vec{V}_{VENTO}$  por  $\vec{V}_{PÁ}$ ;
- $\alpha$ : ângulo entre  $\vec{V}_{REF\_PÁ}$  e a linha da corda, chamado de ângulo de ataque;
- $\beta$ : ângulo entre  $\vec{V}_{PÁ}$  e a linha de corda, chamado ângulo de passo;
- $\vec{D}$ : componente da força resultante visto pela pá, ou força de arrasto;
- $\vec{L}$ : componente da força resultante perpendicular à direção do vento visto pela pá, ou força de sustentação;
- $\vec{F}$ : força resultante da pá;
- $\vec{F}_{flap}$ : componente da força resultante na pá, na direção normal ao plano de movimento (flap);
- $\vec{F}_{edge}$ : componente da força resultante na pá, na direção tangencial ao plano de movimento (edge).

As componentes da força que determinam a rotação da turbina são definidas pela seguinte equação:

$$\begin{cases} \vec{F}_{edge} = \vec{L} \cdot \text{sen}(\varnothing) - \vec{D} \cdot \text{cos}(\varnothing) \\ \vec{F}_{flap} = \vec{L} \cdot \text{cos}(\varnothing) + \vec{D} \cdot \text{sen}(\varnothing) \end{cases} \quad (5)$$

Para uma mesma velocidade de rotação e vento incidente em uma turbina, o ângulo  $\varnothing$  não se altera. Assim as componentes das forças resultantes tangencial ao plano de movimento podem ser aletradas conforme  $\vec{D}$  e  $\vec{L}$ .

Rasila apud Rocha (2008) cita que a intensidade das componentes  $\vec{D}$  e  $\vec{L}$  tem influência direta do ângulo de ataque da pá da turbina. O ângulo de ataque próximo de  $90^\circ$  exerce a máxima força de arrasto enquanto a mínima, para o ângulo de  $0^\circ$ . A força de sustentação a força máxima para um ângulo de ataque de aproximadamente  $15^\circ$ , acima desse valor a força de sustentação começa a ser reduzida devido a um fenômeno conhecido como estol. Portanto, as componentes

da força resultante responsáveis pelo movimento da pá podem ser controladas com a alteração do ângulo de ataque.

Embora o ângulo de ataque tenha uma influencia direta nas forças aerodinâmicas, Rocha (2008) cita que é mais conveniente expressar a potência desenvolvida pelo mesmo em função do ângulo de passo ( $\beta$ ), cujas medições e controles são mais simples.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS

A elaboração do dimensionamento da pá e seu perfil de um aerogerador de eixo vertical foram realizados a partir dos dados disponíveis da área urbana do município de Santa Rosa/RS.

Os dados da intensidade do vento foram extraídos do mapa eólico do Rio Grande do Sul que apresenta uma boa intensidade de ventos o que o difere de outras regiões do Brasil. O consumo da energia elétrica apresentada nos os cálculos refere-se à média entre março de 2013 e março de 2014 onde nessa propriedade foram consumidos 169 kWh. A frequência diária de ventos aproveitados foi obtida através do site climático Clima Tempo, para a verificação dos horários em que ocorrem ventos satisfatórios.

O dimensionamento das pás foi realizado principalmente a partir do estudo de Menezes (2012), através das expressões matemáticas que utiliza em sua monografia da construção de um aerogerador de eixo vertical.

A partir dos resultados adquiridos, realizou-se o modelamento geométrico da pá da turbina eólica através do software CAD SolidWorks, onde foi possível compreender suas dimensões e complexidades que envolvem esse trabalho. A elaboração do molde também permitirá a simulação do escoamento do fluido (ar) através da pá da turbina usando o software de elementos finitos, Flow Simulation, um complemento do software de desenho SolidWorks. Essa simulação possibilitou uma análise do comportamento do fluido ao passar pela pá, e também a pressão que esse exerce na pá.

As simulações foram aplicadas usando parâmetros iniciais a velocidade do vento incidente na pá, visualizando assim sua trajetória ao longo do perfil, e como parâmetro de saída a pressão atmosférica.

#### 3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

A realização desse projeto utiliza-se alguns equipamentos destinados ao desenvolvimento do trabalho. Estes seguem abaixo:

- Livros específicos sobre energia eólica, artigos e monografias sobre o assunto que abordam o tema desse trabalho, etc.;
- Notebook:
  - Sistema operacional: Windows 8.1 de 64 bits;
  - Processador: Intel Core i7 1,80 GHz;
  - Memória ram: 8,00 GB;
  - Placa de vídeo: GeForce GT 740M de 2 GB.
- Internet;
- Software de modelagem 3D, SolidWorks 2013;
- Software de elementos finitos, Flow Simulation 2013.

## **4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

### **4.1 DIMENSIONAMENTO DA TURBINA**

O dimensionamento de uma turbina eólica consiste na determinação de uma série de variáveis, como diâmetro do rotor, comprimento e largura das pás, geometria e posicionamento das pás, tipo de configuração das turbina e tipo de gerador elétrico (que não será abordado nessa monografia) que é utilizado para converter energia mecânica em energia elétrica.

#### **4.1.1 Escolha do tipo de turbina**

A escolha da turbina a ser usada como modelo para áreas urbanas é uma turbina de eixo vertical. Essa escolha se deve pela simplicidade, nas características do vento e nos custos de construção e instalação. Conforme citado na revisão bibliografia, esse tipo de turbina opera em velocidades baixas de vento e por não necessitar de sistemas de controle e direção de pás, o custo e a complexidade da turbina são reduzidos.

Dentro os modelos de turbina eólica de eixo vertical, optou-se pelo modelo Darrieus H, essa turbina de pás retas apresenta uma construção simples e custo baixo, possui também uma eficiência elevada o que viabiliza a sua utilização para geração de energia elétrica. Uma grande vantagem é a possibilidade de ser instalada em pequenas alturas e habilidade de operação em rajadas de ventos e em ventos turbulentos.

O número de pás da turbina está relacionado à com sua solidez (relação da área das pás da turbina com a área varrida da mesma) e a estabilidade. Segundo Menezes (2012) as turbinas com muitas pás possuem alta solidez e interagem com vento a uma baixa velocidade, enquanto as turbinas com poucas pás possuem baixa solidez e interagem com o vento a uma elevada velocidade. Para a geração de eletricidade o ideal é uma turbina com baixa solidez, para este fim normalmente são utilizadas turbinas de duas, três e cinco pás. Com o aumento do número de pás o custo também se eleva, no entanto uma turbina de três pás tem um funcionamento mais estável e é mais silencioso do que uma turbina de duas pás, assim como uma turbina de cinco pás é mais estável que uma de três.

Por ser mais silencioso e ter um funcionamento estável bom, a turbina de três pás é a adotada nesse projeto caso fosse necessário.

#### 4.1.2 Cálculos para o dimensionamento da turbina

Apesar das turbinas eólicas Darrieus H serem do tipo mais simples, sua análise aerodinâmica assim como seu dimensionamento são bastante complexos e requerem estudos mais específicos.

O coeficiente de potência existente no mercado para as turbinas Darrieus H pode variar de 40% a 45% para velocidades nominais de vento entre 8 m/s a 13 m/s. Para velocidades de ventos mais baixas entre 3 m/s e 6 m/s a eficiência aerodinâmica pode variar de 20% a 30%. De acordo com o anexo A que ilustra a velocidade dos ventos no estado do Rio Grande do Sul, foi retirado os valores da região noroeste que apresenta uma média anual da velocidade dos ventos a 75 metros (m) de altura, essa média é aproximadamente 7,0 metros por segundo (m/s).

Devido às características do terreno, adotou-se o coeficiente de atrito 0,3 da tabela 1 para descobrir a velocidade dos ventos a 30 metros de altura na região, usando a seguinte equação:

$$V = V_o \left( \frac{H}{H_o} \right)^\alpha \quad (6)$$

$$V = 7,0 \left( \frac{30}{75} \right)^{0,3}$$

$$V = 5,31 \text{ m/s}$$

Com a velocidade do vento determinada, o dimensionamento dessa turbina levará em consideração o coeficiente de potência ( $C_p$ ) igual a 26,5% para uma velocidade média do vento de 5,31 m/s. Com o coeficiente de potência estipulado, outros rendimentos são necessários para a obtenção dos dados, esses rendimentos são estimados para a realização das dimensões do aerogerador, rendimento como o de controle não será levando em consideração devido às perdas serem muito pequenas, tornando-a desprezível, conforme apresentado na tabela 3.

Tabela 3 – Rendimentos

<b>Rendimento</b>	<b>(%)</b>
Coeficiente de potência ( $C_p$ )	26,5
Rendimento do gerador ( $\eta_g$ )	95
Rendimento do multiplicador de velocidades ( $\eta_m$ )	98
Rendimento do inversor de tensão ( $\eta_I$ )	90
Rendimento do controle de carga ( $\eta_c$ )	Desprezível

Para o cálculo das dimensões da turbina a potência disponível ( $P_d$ ) diária se faz necessário à obtenção dos dados.

$$P_d = \frac{\text{Consumo diário total}}{\text{Nº de horas de vento satisfatório}} \quad (7)$$

Os valores do consumo diário total foram extraídos a partir da energia média consumida em kWh entre o período que compreende março de 2013 à março de 2014 encontradas no anexo B. A quantidade média de 169 kWh foi dividido pelo número de 30 dias do mês.

O Número de horas de ventos satisfatórios foi coletado a partir do site clima tempo durante o período de seis dias (de 13 a 18 de outubro), conforme o quadro 1 onde os valores em verde (em m/s) referem-se a ventos satisfatórios.

Quadro 1 – Intensidade dos ventos diários em Santa Rosa

Dia	Ventos (m/s)					
	6h	9h	12h	15h	18h	21h
1	5,0	4,2	5,6	7,2	6,9	2,8
2	5,0	5,0	6,7	7,8	7,5	2,8
3	4,2	4,2	7,2	6,7	6,7	3,9
4	5,3	4,7	6,1	7,5	6,4	3,1
5	3,3	2,8	4,2	4,7	5,3	4,4
6	3,6	4,4	6,4	6,1	5,3	5,0

Fonte: Climatempo.com.br, consultado em: 13 a 18 out. 2014. Adaptado pelo autor, 2014.

Conforme o quadro acima, o número de horas de ventos satisfatórios se aproxima de 10h, devido a não obtenção dos dados da velocidade do vento entre o período da meia noite às 6h da manhã, o valor a ser usado será de 11h diárias.

$$P_d = \frac{5,63 \text{ kWh}}{11h} \quad (7)$$

$$P_d = 512 \text{ W}$$

Portanto o sistema eólico deve ser capaz de fornecer continuamente uma potência de 512 W para atender a demanda diária, como o objetivo do trabalho é uma simulação e auxílio de um aerogerador para áreas urbanas, esse valor será reduzido para metade, 256 W.

Desta forma considerando os rendimentos a equação da potência necessária pode ser obtida pela seguinte equação:

$$P_{vento} = \frac{P_d}{C_p \cdot \eta_g \cdot \eta_m \cdot \eta_l \cdot \eta_c} \quad (8)$$

$$P_{vento} = \frac{256}{0,265 \cdot 0,95 \cdot 0,98 \cdot 0,90}$$

$$P_{vento} \cong 1153 \text{ W}$$

Portanto a turbina eólica deve ter uma área de captação que compreenda a potência do vento ( $P_{vento}$ ) de 1153 W para a velocidade do vento médio de 5,31 m/s assim a área de captação da turbina pode ser calculada.

$$A = \frac{P_{vento}}{0,5 \cdot \rho \cdot V^3} \quad (9)$$

$$A = \frac{1153}{0,5 \cdot 1,225 \cdot (5,31)^3}$$

$$A \cong 12,6 \text{ m}^2$$

Usando a massa específica do ar ( $\rho$ ) igual a  $1,225 \text{ kg/m}^3$  a turbina deve ter uma área ( $A$ ) de  $12,6 \text{ m}^2$  para que seja possível capturar do vento uma potência de  $1153 \text{ W}$ . Como esta dimensão se torna grande demais para ser posto sob uma casa ou apartamento, será necessário à utilização de mais uma turbina para obter a potência desejada de acordo com a tabela 4.

Tabela 4 – Número de turbinas por área de captação do vento

Número de turbinas	Área de captação ( $\text{m}^2$ )
1	12,6
2	6,30
3	4,20
4	3,15

Comparações feitas entre as áreas correspondentes a cada número de turbina verificou-se o número utilizado de quatro turbinas que devem ter uma área de  $3,15 \text{ m}^2$  cada, permitindo que TEEV tenha dimensões pequenas, facilitando o transporte de matérias e construção da mesma.

A área de captação de uma turbina Darrieus H é definida por:

$$A = D \cdot L \quad (10)$$

Isolando os termos  $D$  (diâmetro do rotor) ou  $L$  (comprimento da pá do rotor) dada em metros da equação, define-se a área varrida da pá. Para tanto é necessário à escolha do diâmetro como base para dimensionar o comprimento total da turbina.

Admitindo um diâmetro de  $1,50 \text{ m}$  e uma área de total de  $3,15 \text{ m}^2$ , o comprimento das pás pode ser determinado isolando o termo  $L$ , conforme a equação a seguir:

$$L = \frac{A}{D}$$

$$L = \frac{3,15}{1,50}$$

$$L = 2,10 \text{ m}$$

Portanto, cada pá possuirá um comprimento de 2,10 m e a turbina com um diâmetro igual a 1,50 m.

Dentro os modelos de Darrieus H que podem ser produzidas, a turbina Lenz pode ser construída artesanalmente é adequada para a aplicação de energia elétrica em pequena escala. Segundo Menezes (2012) essa turbina tem sido muito utilizada em áreas domésticas para geração de pequenas potências, e umas das suas vantagens se encontra na construção, onde o material a ser usado pode ser encontrado no comércio em geral como a folha de PVC e a folha de alumínio, utilizados na construção das pás.

#### 4.1.3 Pás

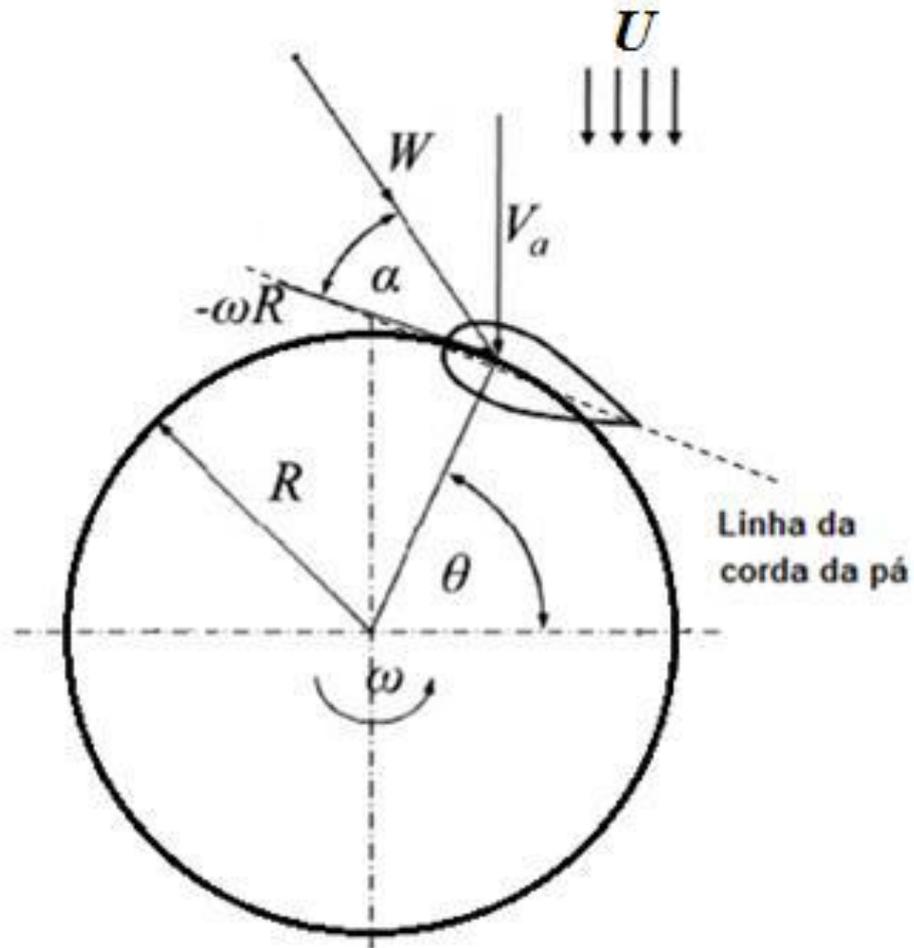
O coeficiente de potência ( $C_p$ ) da turbina depende de inúmeras variáveis aerodinâmicas. A expressão que define o coeficiente de potência das turbinas eólicas de eixo vertical é dada por:

$$C_p = \frac{\Omega \lambda}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{W}{U}\right)^2 (C_s \sin \alpha - C_a \cos \alpha) d\theta \quad (11)$$

O ângulo de azimute ( $\theta$ ) é o ângulo da posição da pá com a perpendicular ao escoamento. Formado pelos vetores que representa a velocidade relativa do escoamento e a linha da corda da pá, como mostra a figura 11 representa o ângulo de ataque ( $\alpha$ ). Onde:

- $C_a$ : coeficiente de arrasto;
- $C_s$ : coeficiente de sustentação;
- $W$ : velocidade relativa do escoamento;
- $U$ : velocidade do vento não perturbado;
- $\lambda$ : velocidade específica;
- $\Omega$ : solidez.

Figura 11 – Representação dos vetores de velocidade e dos ângulos de ataque e azimute

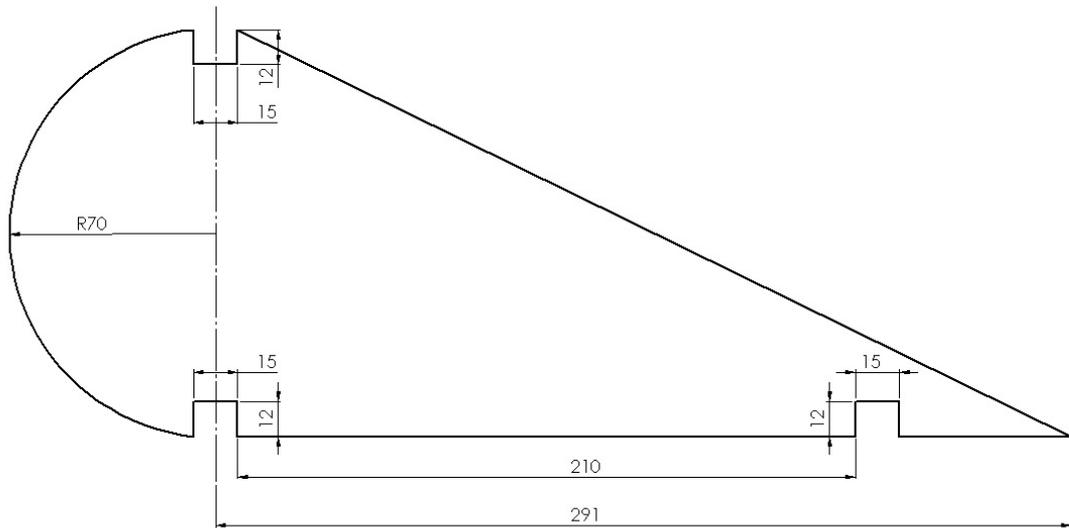


Fonte: Menezes, 2012.

Pelo motivo da turbina Lenz ser muito recente, não é possível a identificação os dados referentes à aerodinâmica das pás da turbina, uma vez que ela depende dos coeficientes de arrasto e sustentação que são características específicas para cada modelo de turbina, deste modo somente uma simulação em túnel de vento para a obtenção das curvas de desempenho.

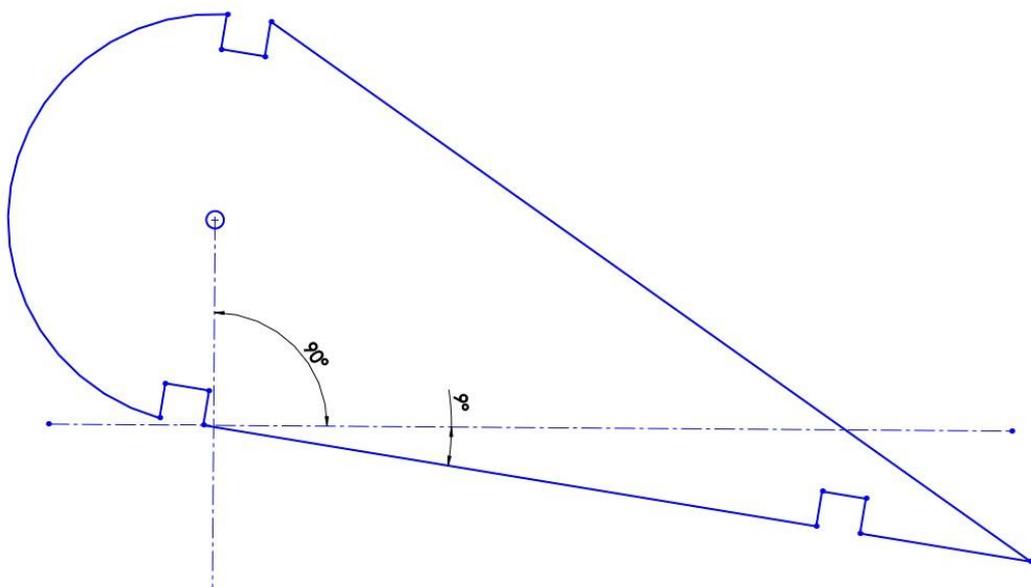
A simulação do perfil da pá ilustrada na figura 12 foi baseada na geometria da turbina Lenz2 construída por Edwin Lenz que possui tanto características de arrasto como de sustentação.

Figura 12 – Geometria do perfil da pá (em milímetros)



Segundo Lenz, com base em testes de diferentes ângulos de passo, para um bom rendimento aerodinâmico é necessário acoplar as pás ao suporte em um ângulo de  $9^\circ$ . Com base na turbina de Lenz, a simulação da pá foi feita em um ângulo de  $9^\circ$  em relação a um ponto fixo conforme a figura 13 ilustra.

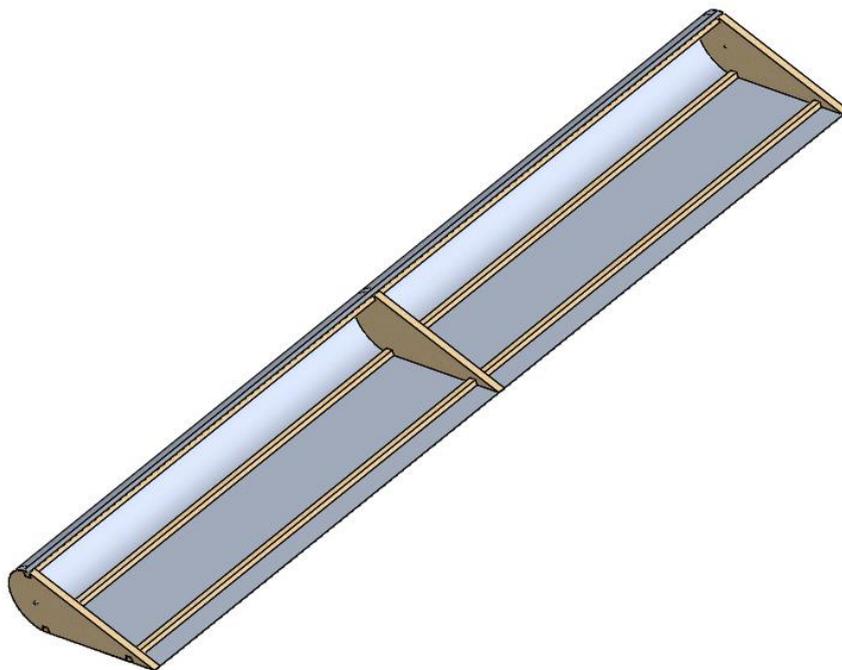
Figura 13 – Inclinação do ângulo da pá



## 4.2 MODELAMENTO COMPUTACIONAL DA PÁ DO ROTOR

Através do software de engenharia SolidWorks foi possível reproduzir o modelo da pá da turbina. A partir dos dados obtidos e com o recurso deste programa, foi possível criar um molde virtual de todo o conjunto montado juntamente com seu ângulo de passo de  $9^\circ$ . O conjunto da figura 14 apresenta três perfis de pá, sendo um em cada extremidade e outro no centro, além de mais três hastes de 2100 mm cada. O material a ser utilizado na simulação foi a madeira pinos que apresenta ser leve e resistente, além de uma folha de alumínio de 1 mm cobrindo parcialmente o perfil, dando a principal característica da turbina Lenz2.

Figura 14 – Modelo de pá



## 4.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA PÁ DA TURBINA

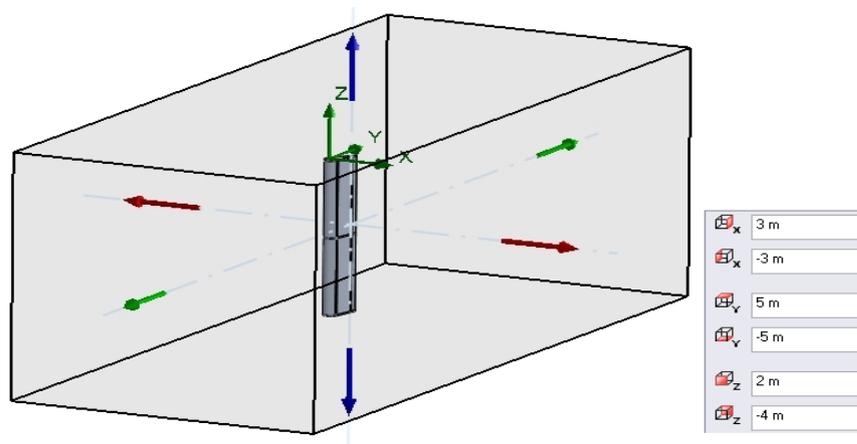
Através do software SolidWorks a simulação do escoamento do fluido ao atravessar o conjunto pode ser analisado além das variações de velocidade e pressão que o fluido exerce sobre a pá, usando o componente de elementos finitos Flow Simulation.

### 4.3.1 Parâmetros iniciais

O comportamento do fluido ao ser analisado pela simulação foi necessário estabelecer alguns parâmetros no domínio da figura 15:

- Tipo de análise: externa;
- Fluido: ar;
- Pressão: 101325 Pa;
- Temperatura: 20,2 °C;
- Malha: 5 (máximo 8, mínimo 3);
- Velocidade de entrada do fluido: 6 m/s;
- Intensidade de turbulência: 2%.

Figura 15 – Domínio total da simulação



Como as turbinas de Lenz apresentam tanto características de arrasto e sustentação, se fez necessária à simulação em ambos os sentidos do eixo Y para melhor entendimento o eixo Y simula o vento no sentido da sustentação e o eixo -Y simula o vento no sentido do arrasto.

### 4.3.2 Resultados obtidos

A elaboração da malha aplicando o nível 5 resultou num total de 174 iterações e 647458 células, sendo 644592 células de fluido e 2866 células parciais. O tempo que o software levou para gerar esses resultados durou 46 minutos.

### 4.3.2.1 Velocidade do escoamento do fluido

A simulação computacional apresenta o comportamento do fluido em relação à velocidade do vento em ambos os eixos Y. O fluido na posição de arrasto representado na figura 16 apresenta uma variação da velocidade muito maior que ao passar pela pá na posição de sustentação ilustrada na figura 17. Isso se deve pelo motivo da pá ser mais aerodinâmica na posição de sustentação, fazendo com que o fluido não se disperse ao se chocar contra ela.

Figura 16 – Variação da velocidade do vento no escoamento do fluido para arrasto

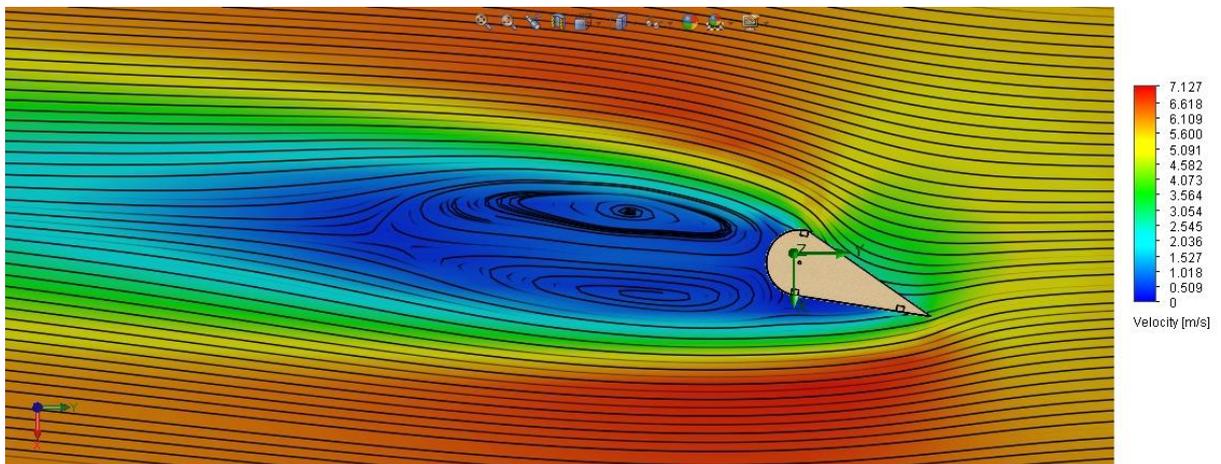
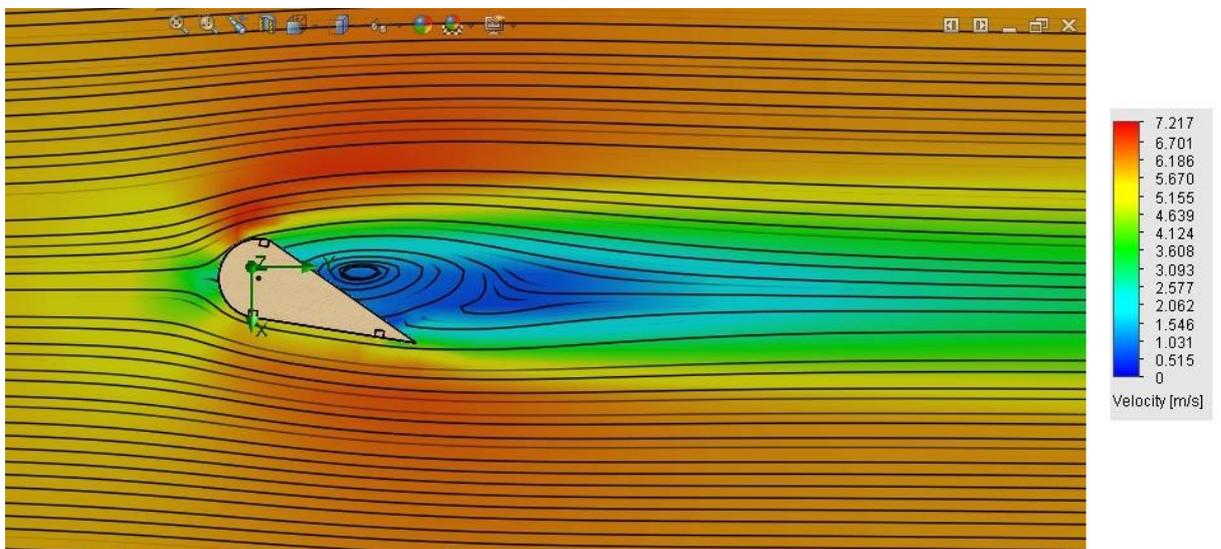


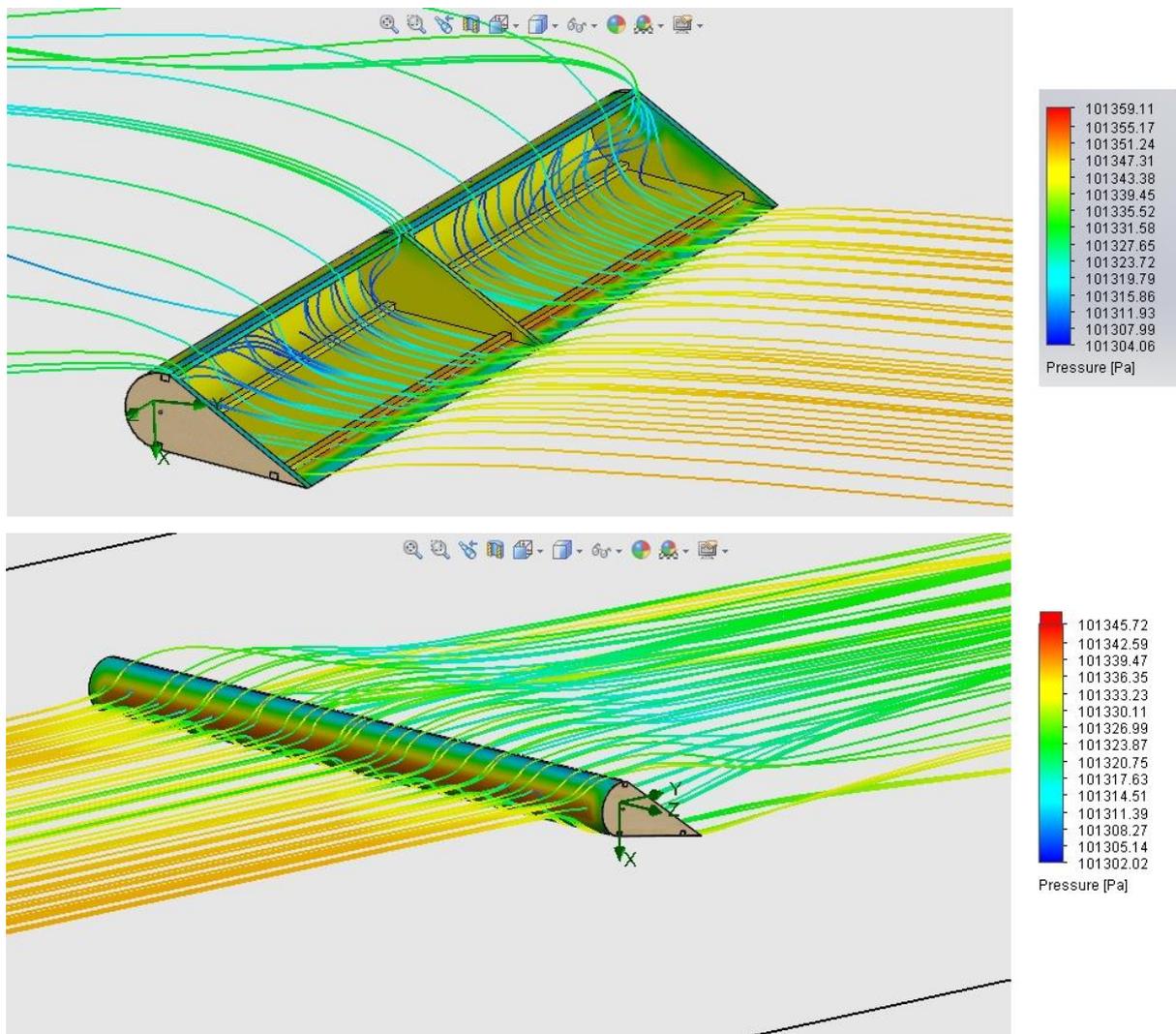
Figura 17 – Variação da velocidade do vento no escoamento do fluido para sustentação



#### 4.3.2.2 Pressão do fluido sobre a superfície da pá

A análise apresenta a pressão que o fluido exerce sobre a pá do gerador eólico nas áreas de arrasto e sustentação ilustrada na figura 18. A região que apresenta maior pressão se localiza a frente da pá ou borda de ataque, chegando a 101,35 kPa e a menor região localiza-se no fim da chapa de alumínio, chegando a 101,30 kPa.

Figura 18 – Pressão que o fluido ao passar exerce sobre a pá



## 5. CONCLUSÕES

Esse trabalho teve por objetivo a simulação aerodinâmica de um perfil de pá assim como seu conjunto montado de uma turbina eólica de eixo vertical, a fim de fornecer uma potência que auxilie no fornecimento de energia elétrica para uma referente propriedade urbana no município de Santa Rosa/RS.

Conceitos fundamentais foram abordados para este estudo referente à energia eólica, como os dispositivos de captação do vento e as principais diferenças entre os aerogeradores comumente encontrados em operação, uma turbina de eficiente e de eixo vertical que pode ser construída artesanalmente e apropriada para locais não convencionais.

A partir dos dados da intensidade do vento na região noroeste do Rio Grande do Sul e da energia consumida em uma propriedade na cidade de Santa Rosa/RS foi possível obter a partir de cálculos a área de captação do vento que a turbina estará submetida assim como o seu dimensionamento.

Os resultados da modelagem da pá permitiram a compreensão das dimensões estruturais da turbina eólica assim como as forças que estão atuantes sobre ela, além de mostrar os aspectos aerodinâmicos que realizam o papel de transformar a energia cinética contida nos ventos em energia mecânica.

Desta forma, conclui-se que devido às complexidades envolvidas uma vez que ao contrário das turbinas eólicas de eixo horizontal as de eixo vertical não possuem um estudo muito aprofundado, este trabalho atendeu aos objetivos iniciais, proporcionou a escolha do perfil e seu dimensionamento assim como a simulação do conjunto da pá para sustentação e arrasto em que está submetida a força do vento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

CLIMA TEMPO. **Previsão do tempo para Santa Rosa**. Disponível em: <<http://www.climatempo.com.br/previsao-do-tempo/cidade/781/santarosa-rs>> Acesso em: 13 à 18 de out. 2014

FARRET, Felix Aberto. **Aproveitamento de pequenas fontes de energia elétrica**. Santa Maria : Ed. UFSM, 2010.

JERVELL, José Tor. **Estudo da Influência das características do vento no desempenho de aerogeradores**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Porto, Portugal, 2008.

JUNIOR, Eden Rodrigues Nunes. **Metodologia de projeto de turbinas eólicas de pequeno porte**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

LAYTON, Julia. **Como funciona a energia eólica**. Disponível em: <<http://ambiente.hsw.uol.com.br/energia-eolica.htm>> Acesso em: 20 jul. 2014.

MENEZES, Ana Elisa da Silva. **Aproveitamento eólico para uma vila de pescadores**. 2012. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

PETRY, Adriane Pristo; MATTUELLA, Jussara M. Leite. **Análise do potencial eólico e estimativa da geração de energia empregando o software livre Alwin**. Porto Alegre : 2007.

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

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria de Energia, Minas e Comunicação. **Atlas eólico do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre : 2002.

ROCHA, Rafael Vieira. **Simulação de aerogerador em uma bancada experimental**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

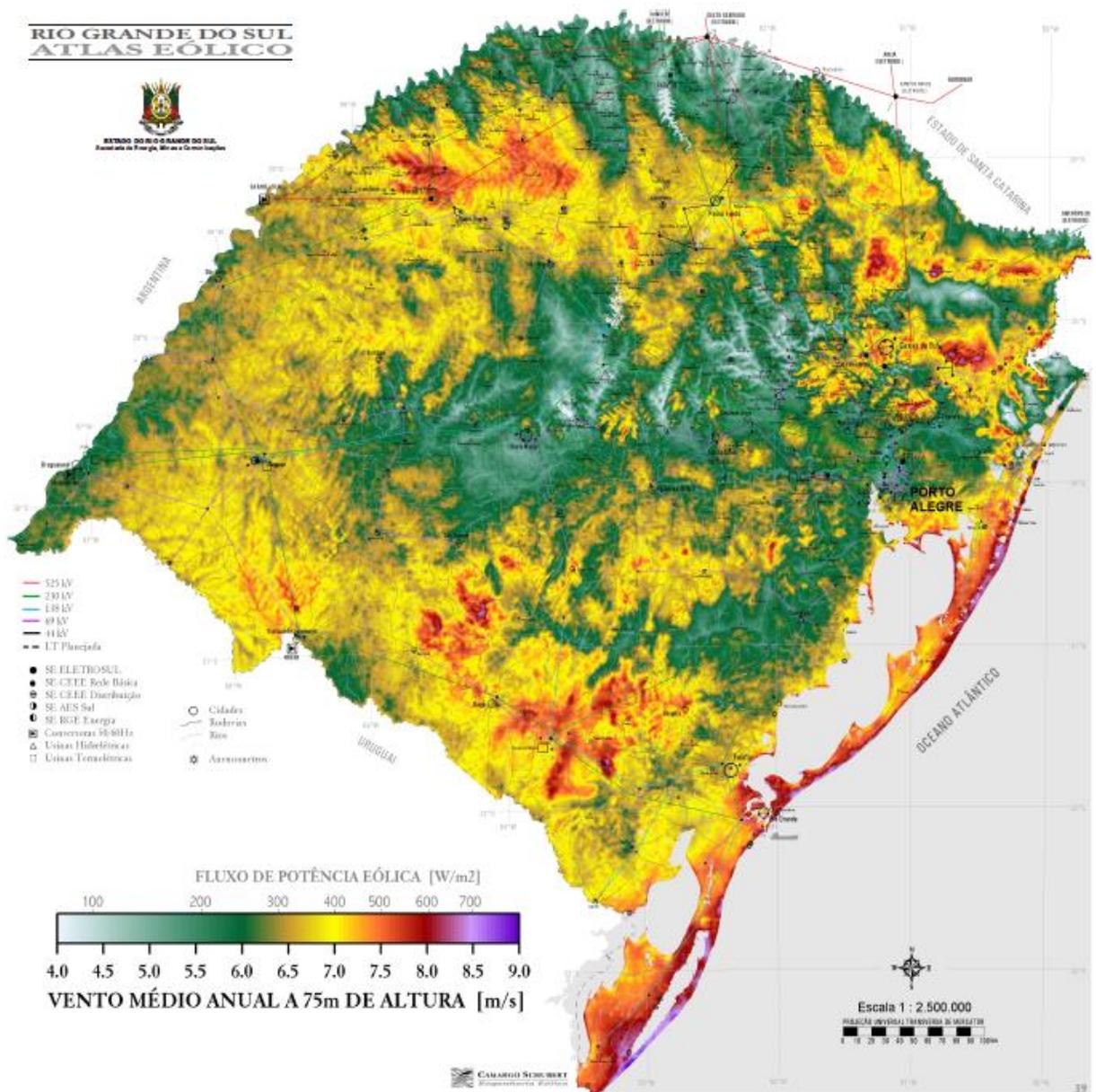
SÁ, Antônio Leite; LOPES, José Dermeval Saraiva. **Energia eólica para geração de eletricidade e bombeamento de água**. Viçosa : Ed. CPT, 2001.

SANTOS, Alison Alves et al. **Projeto de geração de energia eólica**. 2006. Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Mecânica) – Universidade de Santa Cecília, Santos, 2006.

TIBOLA, Gabriela. **Sistema eólica 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 München. **Projeto aerodinâmico de pás de turbinas eólicas de eixo horizontal.** 2007. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre,2007.

## ANEXO A – VELOCIDADE DO VENTO NO RIO GRANDE DO SUL



Fonte: Secretária de energia, minas e comunicação do RS, 2002.

## ANEXO B – CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Rio Grande Energia  
Rua Mário de Boni, 1902  
95012-580 - Caxias do Sul-RS  
Inscrição Estadual - 0290432447  
CNPJ - 02.016.439/0001-38



Uma empresa CPFL Energia

### CONTA DE ENERGIA ELÉTRICA

**CENTRO**  
SANTA ROSA - RS  
CEP: 98900-000

001864

RESERVADO AO FISCO:  
C860.73D0.3578.B06A.58F9.0B8A.35FE.1BFB

BLE: 6110 RT: 01 IT: **0450** OR: 1370 ME: **2915392**

Data de Impressão: 19/03/2014      Data de Emissão: 18/03/2014      Data de Apresentação: 25/03/2014

Nota Fiscal Série Única N°. 685.474

PREZADO (A) CLIENTE							
Em 2015 vigorará as bandeiras tarifárias. A bandeira verde não terá cobrança adicional. Amarela e Vermelha, quando acionadas, implicarão tarifas de maior valor, devido ao maior custo de geração. No mês de 03/2014 vigorará a VERMELHA, R\$ 0,030000/kWh a mais na Tarifa de Energia. Informações: www.aneel.gov.br							
DADOS DA UNIDADE CONSUMIDORA				SEU NÚMERO CONOSCO			
CENTRO SANTA ROSA - RS				<b>5401638-0</b>			
				Código para Débito em Conta			
INFORMAÇÕES DA FATURA		VALORES FATURADOS					
Mês Faturamento	Março/2014	Descrição	Quantidade	Tarifa TUSD	Valor TUSD	Tarifa TE	Valor TE
Leitura Anterior	14/02	Energia Ativa	151 kWh	0,135080	20,39	0,149700	22,60
Leitura Atual	18/03	CIP - Iluminação Pública					42,99
<b>Próxima Leitura</b>	<b>15/04</b>	ICMS					14,22
Dias de Consumo	32	PIS(0,35%)					0,21
Consumo Médio Diário	4,72	COFINS(1,63%)					0,96
Valor Consumo Diário	1,84						
B1-Residencial - Normal							
Tensão	Baixa 220 V Monofásica						
Fator de Potência							
Perdas de Transf.	0,0%						
HISTÓRICO DE CONSUMO							
Mar/13	123						
Abr/13	112						
Mai/13	108						
Jun/13	101						
Jul/13	103						
Ago/13	284						
Set/13	196						
Out/13	112						
Nov/13	110						
Dez/13	178						
Jan/14	278						
Fev/14	348						
Mar/14	151						
		DATA DE VENCIMENTO	TOTAL A PAGAR				
		<b>01/04/2014</b>	<b>R\$64,44</b>				
COMPONENTES DA TARIFA		Agora você mesmo pode atualizar o seu cadastro e solicitar outros serviços. Acesse o nosso site <a href="http://www.rge-rs.com.br">www.rge-rs.com.br</a> , é simples e rápido.					
Energia	22,22						
Transmissão	3,67						
Distribuição	13,80						
Encargos	3,50						
ICMS							
Base de Cálculo: R\$58,88							
ICMS Total: R\$14,72							
Alíquota: 25%							
INFORMAÇÕES TÉCNICAS				INDICADORES DE CONTINUIDADE			
Tipo de Medição	Número do Medidor	Leitura Anterior	Leitura Atual	Constante Mult.	Total Medido	Conjunto	Metas
ENERGIA ATIVA BT	2915392	26655	26806	1,00	151 kWh	Santa Rosa	Verificado 01/2014
				Mensal      Trim.      Anual			
				DIC      4,95      9,91      19,82      1,80			
				FIC      3,55      7,10      14,20      2,00			
				DMIC      2,77      -      -      1,32			
				DICRI			
				Encargo do Uso do Sistema de Distribuição: R\$ 37,55			
ATENÇÃO							
APROVEITE SEU TEMPO PAGUE ATRAVÉS DE DÉBITO AUTOMÁTICO. VOCÊ CONTINUA RECEBENDO SUA CONTA COM ANTECEDÊNCIA E NÃO PRECISA SE PREOCUPAR COM O PAGAMENTO. ESTA FACILIDADE PODE SER SOLICITADA PELO TELEFONE 0800.870.0900							



Uma empresa CPFL Energia

Identificador de Conta	Data de Vencimento	Total a Pagar
0.5401638.02-18/03/2014 6 5	01/04/2014	R\$64,44

83610000000-6 64440089054-2 01638021803-8 14140300965-9

