



Universidade Federal do Pampa

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA – CAMPUS BAGÉ
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS E AMBIENTE**

RUBEM ANDERSON SCHMIT RAHMEIER

**DESENVOLVIMENTO DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO
VERTICAL TIPO H**

Bagé

2015

RUBEM ANDERSON SCHMIT RAHMEIER

**DESENVOLVIMENTO DE UMA TURBINA EÓLICA
DE EIXO VERTICAL TIPO H**

Trabalho de Conclusão de Curso 2
apresentado ao Curso de Engenharia de
Energias Renováveis e Ambiente da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em engenharia de Energias
Renováveis e Ambiente.

Orientador: Profa. Dra. Cristine Machado
Schwanke

**Bagé
2015**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA TURBINA EÓLICA
DE EIXO VERTICAL TIPO H**

RUBEM ANDERSON SCHMIT RAHMEIER

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS E AMBIENTE DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO DE ENERGIAS.

Avaliado por:

Profa. Cristine Machado Schwanke, Dr^a

Prof. Marcelo Romero de Moraes, Dr.

Profa. Sabrina Neves da Silva, Dr^a

**Bagé
2015**

Rahmeier, Rubem Anderson Schmit

DESENVOLVIMENTO DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL TIPO
H / Rubem Anderson Schmit Rahmeier.

70 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS E
AMBIENTE, 2015.

"Orientação: Cristine Machado Schwanke".

1. Aerodinâmica. 2. Aerogerador. 3. Dimensionamento. I.
Título.

AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar por tudo que conquistei.

A minha noiva Dieinifer, pelo carinho, pela ajuda, pelas ideias pelos momentos bons e ruins da Engenharia, onde sempre estive ao meu lado.

Aos meus pais Maria Elena Schmit e Nelson Rahmeier, por tudo, pela compreensão, pelo amor, pela motivação, e condições que sempre me deram.

Aos meus irmãos Maicon Schmit e Eduardo Schmit, por serem sempre minha inspiração e estarem sempre ao meu lado me incentivando

Aos meus avôs Luciano Guerra e Mercilda Rahmeier pelo carinho que sempre tiveram comigo, e por não estar mais aqui conosco.

A minha avó Erlinda Nuñez pela motivação de sempre, e também em especial ao meu avô Ruben Schmit que muito se orgulhava em relação aos netos, e que partiu em Novembro/2010, deixando-nos com muita saudade.

Aos meus afilhados Santiago Ribeiro, Gabriel Ferreira e Daniel Rahmeier.

Aos meus Orientadores de Astronomia e Astrofísica de 2007-2011, Fabrício Ferrari e Guilherme Frederico Marranghello, onde trabalhei como bolsista voluntário, bolsista do PBDA, Bolsista de IC do CNPq.

A professora Cristine Schwanke por ter aceitado minha proposta de projeto, com a disposição de me ajudar no que precisei para construir o mesmo.

Ao professor Marcelo Romero pelos auxílios em *softwares específicos* e demais contribuições técnicas ao trabalho.

A professora Sabrina Neves por aceitar meu convite na participação da minha banca de Trabalho de Conclusão de Curso II

E também aos demais familiares meus, aos meus amigos de infância, colegas do curso que sempre tive uma boa relação, aos funcionários da instituição e ex-colegas de serviço da Empresa Sistema Engenharia e SENAI.

RESUMO

O propósito deste trabalho é apresentar os principais aspectos relacionados com o projeto de desenvolvimento de uma TEEV tipo H (turbina eólica de eixo vertical), bem como o andamento de futuros resultados nela obtidos.

O projeto consistiu em duas etapas. Na primeira etapa, analisou-se o perfil aerodinâmico do modelo de pá a ser desenvolvido assim como a sua simulação. Na segunda etapa escolheu-se o modelo de turbina a ser desenvolvido e neste caso optou-se por uma Turbina Eólica de Eixo Vertical TEEV (tipo H) principalmente pelo seu baixo custo e facilidade de construção.

Com base na velocidade do vento na região o potencial eólico disponível (kW) a uma altura de 14 metros é adquirido através de simulações e equações matemáticas, determinando assim no dimensionamento do rotor. Utilizou-se o software SolidWorks para desenhar e analisar os perfis de pás que neste projeto foram analisados. Com o auxílio do Windographer fazendo uso de dados estudados ao longo do ano de 2012 fez-se uma estimativa da média da potência de saída da turbina e comparou-se com dados obtidos experimentalmente por ela.

Como aplicação, tem-se o intuito de instalar a mesma no telhado da instituição para alimentar duas lâmpadas de LED de 9 W, servindo assim como forma de apoio no sistema de iluminação do estacionamento.

Palavras-chave: Aerodinâmica. Aerogerador. Dimensionamento.

ABSTRATCS

The aim of this work is to present the main aspects related to a vertical axis wind turbine (VAWT - type H) as well as the progress and the results expected to be achieved.

This Project was realized in two stages. On first stage was analized an aerodinamics profiles of Wind turbine blades to be developed. An aerodinamics simulation was realized. On second stage, the Wind turbine model has to be defined. In this case, it was defined a H rotor Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) because it has a low price and an easy to build it. According research about Wind power available (kW) in 14 meters off the ground, simulations and mathematics equations were used for realize na study of this rotor. The blades profile was draw and analysed using SolidWorks software. With the help of Windographer making use of data studied during the year 2012, it was possible to make a prediction to average power of this turbine and compared to experimental data of this Project.

For an application example, the turbine will be installed on the university roof, to supply two 9W LED lamps located in a parking lot.

Keywords: Aerodynamic, Windmill, Dimensions.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Moinho de vento persa.....	17
FIGURA 2 - Moinho de vento inglês.....	18
FIGURA 3 - Pequena turbina eólica dinamarquesa.....	20
FIGURA 4 - Modelos de rotor com eixo vertical.....	21
FIGURA 5 - Rotor tipo Savonius	22
FIGURA 6 - Rotor tipo Darrieus.....	23
FIGURA 7 - Aerogerador de eixo horizontal instalado em Osório/RS.....	24
FIGURA 8 - Evolução do tamanho e potência de aerogeradores.....	25
FIGURA 9 - Maior fazenda eólica offshore do mundo, Inglaterra.....	26
FIGURA 10 - Simulação de uma turbina da empresa Magenn Power.....	27
FIGURA 11 - Turbina TEEV de levitação da empresa Maglev.....	28
FIGURA 12 - Possíveis usos de energia eólica.....	31
FIGURA 13 - Modelagem computacional do modelo de pá de madeira a ser desenvolvido.....	38
FIGURA 14 - Representação do perfil de pá de madeira na vista lateral	38
FIGURA 15 - Representação da aerodinâmica da pá de madeira em vista lateral.....	39
.....	39
FIGURA 16 - Protótipo inicial do modelo a ser desenvolvido	40
FIGURA 17 - Campo de Velocidade.....	42
FIGURA 18 - Rosa de Ventos.....	42
FIGURA 19 - Instalação de um aerogerador fora da região de influência do obstáculo.....	43
FIGURA 20 - Programa feito no Matlab considerando a média da velocidade dos ventos para às estações de primavera e verão.....	44
FIGURA 21 - Programa feito no Matlab considerando a média da velocidade dos ventos para às estações de outono e inverno.....	45
FIGURA 22 - Gráfico da estimativa de potência gerada pelo aerogerador em função da velocidade dos ventos utilizando o Windographer.....	45
FIGURA 23 - Estimativa da potência de saída do aerogerador ao longo de cada hora do dia durante todos os meses do ano.....	46
FIGURA 24 - Estimativa da potência de saída da TEEV ao longo de cada hora do dia	47

FIGURA 25 - Rosa de ventos ao longo do ano.....	49
FIGURA 26 - Estimativa da potência de saída da turbina de acordo com a predominância do vento em determinadas épocas do ano.....	50
FIGURA 27 - Média da frequência de distribuição da potência de saída da TEEV...50	
FIGURA 28 -.Aerogerador conectado ao Sistema.....	53
FIGURA 29 - Modelo de pá do aerogerador desenvolvido em cano PVC 150 mm...54	
FIGURA 30 - Eixo do rotor desenvolvido em aço 1020.....	55
FIGURA 31 - Aerogerador montado e conectado a um Motor Trifásico.....	57
FIGURA 32 - Resultados Experimentais de 30 dias plotados no Windographer.....	58
FIGURA 33 - Comparação entre dados Computacionais e dados experimentais.....	59

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Modelos comerciais de aerogeradores de pequeno porte.....	31
TABELA 2 - Classes de Energia.....	35
TABELA 3 - Capacidade de energia eólica instalada no Mundo.....	36
TABELA 4 - Coleta de dados Windographer.....	48
TABELA 5 - Custos do aerogerador.....	56
TABELA 6 - Comparativo de resultados da Potência de Saída do Aerogerador através de dados experimentais.....	58
TABELA 7 - Velocidade do Vento e valores de RPM obtidos pela Turbina TEEV.....	60
TABELA 8 - Custos do sistema completo	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PROINFA: Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

CBEE: Centro Brasileiro de Energia Eólica

TEEV: Turbina Eólica de Eixo Vertical

TEEH: Turbina Eólica de Eixo HORIZONTAL

GEE: Gases de Efeito Estufa.

NASA: Agência Aeroespacial Norte Americana

IDER : Instituto de Desenvolvimento Sustentável de Energias Renováveis

η = rendimento da turbina

RPM = Rotações Por Minuto

LED = Diodo Emissor de Luz

$\rho = 1,225$ Densidade do ar, para uma temperatura $T_{\infty} = 15^{\circ}\text{C}$ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

T_{∞} = Temperatura ambiente $[\text{}^{\circ}\text{C}]$

A = Área varrida pelo rotor $[\text{m}^2]$

V = Velocidade do vento $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$

C_P = Coeficiente aerodinâmico de potência do rotor;

P_{bat} = Potência média fornecida pelo banco de baterias $[\text{W}]$

P_{out} = Potência de saída $[\text{W}]$

A_{hl} = Consumo do sistema em um dia $[(\text{Ah}/\text{dia})]$

t_{func} = Tempo de funcionamento $[\text{h}]$

C_{bat} = capacidade total das baterias

kV = Quilovolt

kW = Quilowatt

m = Metro

dB = Decibel

AC = Corrente alternada $[\text{A}]$

DC = Corrente contínua $[\text{A}]$

km = Quilômetro $[\text{m}]$

3D = 3 dimensões

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Justificativa.....	15
1.2 Objetivos.....	15
2 ENERGIA EÓLICA.....	17
2.1 Início do uso da Energia Eólica.....	17
2.2 Tipos de turbinas eólicas.....	20
2.3 Legislação brasileira para o setor de energia eólica.....	28
2.4 Aerogeradores.....	29
2.4.1 Partes do aerogerador	29
2.4.2 Modelos de aerogeradores de pequeno porte.....	30
2.5 Vantagens da Energia Eólica.....	32
2.5.1 Vantagens para a sociedade.....	32
2.5.2 Vantagens para o estado.....	32
2.5.3 Vantagens para as comunidades dos parques eólicos.....	32
2.6 Desvantagens da energia Eólica.....	33
2.7 Potencial eólico brasileiro.....	33
2.8. Capacidade instalada no mundo.....	35
3 METODOLOGIA.....	37
3.1 Pressão do fluido sobre a superfície da pá.....	39
3.2 Procedimento Experimental.....	39
3.2.1 Atividades a serem desenvolvidas.....	39
3.3 Tipo de torre e área para instalação.....	41
3.4 Local livre de obstáculos	43
3.5 Cálculo da Potência Gerada pelo aerogerador.....	44
3.6 Instalação do banco de baterias.....	51
3.7 Dimensionamento de Baterias para armazenar a energia do aerogerador.....	51
4 RESULTADOS OBTIDOS.....	54
4.1. Equipamentos Utilizados na obtenção de Dados Experimentais.....	60
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
5.1 Conclusão.....	62
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	63

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
APÊNDICE A – Coleta de dados através de medição de RPM no aerogerador....	67
ANEXO I - Vento médio anual no Rio Grande do Sul a 100m de altura	68
ANEXO II - Rosa de ventos anual do Rio Grande do Sul com frequência x direção dos ventos	69
ANEXO III - Distribuição de Weibull e fator de forma (K) anual no Rio Grande do Sul.....	70

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento do consumo de energia, o uso de fontes renováveis tem se tornado cada vez mais necessário nos dias atuais.

Os aerogeradores são máquinas que utilizam a energia cinética dos ventos, denominada energia eólica, permitindo a rotação de suas pás, e transformando essa energia em potência mecânica ou elétrica. Uma classificação básica de tais turbinas é feita segundo a posição do eixo do rotor. As denominadas Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (TEEH) possuem pás que giram num plano perpendicular à direção principal do vento (ALÉ, 2006).

Para 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 de turbinas eólicas para uso residencial avançam, essas turbinas tendem a ser financeiramente viáveis no fornecimento de energia elétrica.

A utilização da energia em função dos ventos não surgiu recentemente, esta forma de aproveitamento energético se faz há muitos anos. “Em torno de 2800 A.C. os egípcios utilizaram a energia dos ventos nos barcos a velas para reduzir a força necessária nos remos”. Muitos anos depois, por volta do ano 700 D.C., estas mesmas civilizações utilizaram a força dos ventos para a moagem de grãos, utilizando o princípio dos moinhos de vento, e, 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 estagnada 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. (Gipe, 1998)

Segundo Dutra (2008), um dos primeiros passos para o desenvolvimento de turbinas eólicas de grande porte para aplicações elétricas deu-se na Rússia em 1931. O aerogerador Balaclava (assim chamado) era um modelo avançado de 100 kW conectado, por uma linha de transmissão de 6,3 kV de 30 km, a uma usina

termelétrica de 20 MW. Essa foi a primeira tentativa bem sucedida de se conectar um aerogerador de corrente alternada com uma usina termelétrica. A energia medida foi de 280.000 kWh/ano. Após o desenvolvimento desse modelo, foram projetados outros modelos mais ambiciosos de 1 MW e 5 MW.

Para Dutra (2008), a Segunda Guerra Mundial (1939-1945) contribuiu para o desenvolvimento dos aerogeradores de médio e grande porte uma vez que os países em geral empenhavam grandes esforços no sentido de economizar combustíveis fósseis. Os Estados Unidos desenvolveu um projeto de construção do maior aerogerador até então projetado. Tratava-se do aerogerador *Smith-Putnam* cujo modelo apresentava 53,3 m de diâmetro, uma torre de 33,5 m de altura e duas pás de aço com 16 toneladas. Na geração elétrica, usou-se um gerador síncrono de 1250 kW com rotação constante de 28 RPM, que funcionava em corrente alternada, conectado diretamente à rede elétrica local. Esse aerogerador iniciou seu funcionamento em 10 de outubro de 1941, em uma colina de *Vermont*, e passados quatro anos de operação intermitente, uma de suas pás acabou quebrando por fadiga.

No período entre 1955 e 1968, a Alemanha construiu e colocou em operação um aerogerador com o maior número de inovações tecnológicas na época. Os avanços tecnológicos desse modelo persistem até hoje na concepção dos modelos atuais mostrando o seu sucesso de operação. Tratava-se de um aerogerador de 34 metros de diâmetro operando com potência de 100 kW, a ventos de 8 m/s. Operou cerca de 4.000 horas entre os anos de 1957 e 1968. As pás, por serem feitas de materiais compostos, aliviaram os esforços em rolamentos diminuindo assim os problemas de fadiga (DUTRA, 2008).

Segundo Alé, (2006), as Turbinas Eólicas de Eixo Vertical (TEEV) possuem suas pás girando num plano paralelo à direção do vento. Podem ser empregadas na geração de energia elétrica como sistemas interligados na rede ou como sistemas independentes (descentralizados), permitindo atingir regiões em que os custos das linhas de transmissão tornem-se inviáveis. As turbinas de pequeno porte têm especial importância no meio rural e em países em desenvolvimento. Sendo estas utilizadas em sistemas de bombeamento de água para abastecimento e irrigação de

cultivos, como também para o fornecimento de energia elétrica nas propriedades, postas de saúde e escolas.

A utilização de turbinas de grande porte emerge com a tecnologia moderna dos anos setenta, após a crise do petróleo, quando incentivos fiscais, principalmente na Califórnia (EUA), permitiram investimentos nestes sistemas, surgindo então grandes concentrações de turbinas denominadas fazendas eólicas. Após a retirada de tais incentivos, a expansão do mercado teve um declínio, ressurgindo no final da década de noventa e principalmente neste novo milênio no qual a maior preocupação é com a falta de energia devido a grande demanda de energia com o aumento do consumo tanto industrial como residencial. Valoriza-se essa energia por ser obtida por fontes de energia renováveis que provocam poucos danos ao meio ambiente, sendo então chamada de eletricidade limpa (ALÉ, 2006).

1.1 Justificativa

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

Este trabalho tem como objetivo principal a seleção de um perfil de duas pás para uma turbina eólica de eixo vertical tipo H (TEEV – tipo H), bem como a simulação da mesma em *softwares* específicos que possam fornecer dados precisos

da potência gerada pela turbina para instalação da mesma em um prédio na área rural da cidade de Bagé, situada na Mesorregião sudoeste do Rio Grande do Sul. Após a simulação feita por *softwares* como Windographer, Windstation e SolidWorks 2012, construiu-se o protótipo em um dos laboratórios da Universidade Federal do Pampa Campus Bagé. O intuito da construção da turbina é gerar energia, que servirá como forma de auxílio na diminuição da taxa de energia elétrica consumida mensalmente pela instituição, isto é, o aerogerador de pequeno porte será instalado no terraço da instituição utilizando a força dos ventos para gerar eletricidade, que servirá de apoio no sistema de iluminação de um dos estacionamentos.

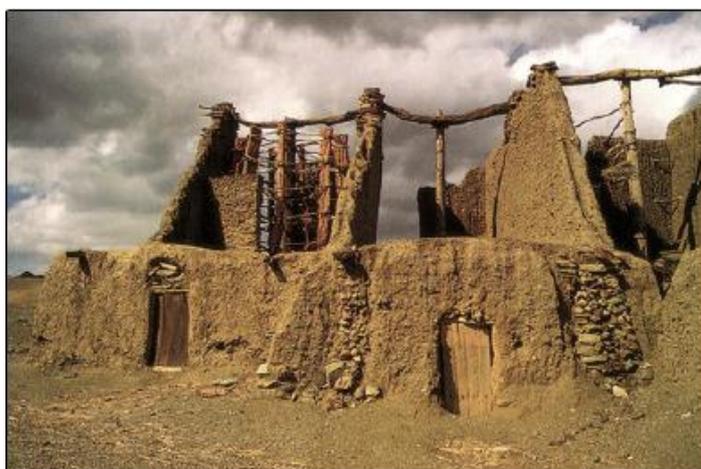
2 ENERGIA EÓLICA

2.1 Início do uso da Energia Eólica

Segundo Marschof (1992) na idade antiga, os persas construíram moinhos de vento de eixos verticais utilizados na moagem de grãos. Outros moinhos similares foram desenvolvidos também na Holanda e Inglaterra. Na Idade Média as engrenagens e lâminas tiveram projetos cuja sua construção se mostrou bem mais avançada, melhorando muito sua tecnologia.

Conforme mostrado na Figura 1, o modelo de moinho de vento persa era bastante rudimentar, e pode-se atribuir isso a pouca experiência desta civilização na prática do uso do vento. Por outro lado, os persas foram os primeiros a construir cata-ventos acoplados em edificações. Essas estruturas serviam principalmente para mover mecanismos com função na moagem de grão ou elevação de água. (MARSCHOFF, 1992).

FIGURA 1 – Moinho de vento persa



Fonte: Marschoff, 1992, p.29

Segundo Steadman (1978), na Europa até o final do século XI e começo do século XII não se conheciam moinhos de vento. Entretanto, com a introdução desses dispositivos através das pessoas que combatiam nas cruzadas, e,

inicialmente na Inglaterra os europeus caracterizavam-se pelas inovações e por fazerem adaptações nos mesmos, variando de região em região, de acordo com as características geográficas e culturais. Dessa forma, essa evolução pode ter culminado no projeto de moinhos de eixo vertical, representado pela Figura 2.

Figura 2 - Moinho de vento inglês



Fonte: Steadman, 1978, p.29

Durante a Revolução Industrial (século XIX) esta forma de geração de energia sofrera algumas alterações. Com o crescimento das cidades isso acabou acarretando no ao despovoamento das zonas rurais. Com isso, a criação de grandes fábricas que utilizavam energia a vapor e da inovação de momento, a “energia elétrica”, bem como a utilização advento do motor a combustão interna foram alguns dos fatores determinantes para o declínio da atividade dos moinhos de vento (STEADMAN, 1978).

Alguns fatores contribuíram para o desenvolvimento de turbinas para a geração de eletricidade. Segundo Carvalho (2003), o professor e cientista Poul La Cour (1846 – 1908) foi um dos pioneiros para o desenvolvimento de modernas turbinas eólicas. Neste período, Poul La Cour construiu um túnel de vento para a realização de experimentos e constatou um dos problemas envolvendo energia eólica: o armazenamento de energia.

Segundo Appio, em 1956 o engenheiro Johannes Juul projetou, para a empresa Seas, na Dinamarca, uma turbina com três pás, contendo um gerador assíncrono e freios aerodinâmicos nas pontas das pás. Por diversos anos esta turbina foi considerada como a maior do mundo, e por consequência, após onze anos de funcionamento, teve em 1975 o seu recondicionamento a pedido da NASA (Agência Aeroespacial Norte Americana), para estudos de medições objetivando o novo programa de energia eólica dos Estados Unidos (APPIO, 2001).

De acordo com Appio, (2001) após a fase de declínio dos antigos moinhos, a década de 1970 trouxe uma grande crise mundial abastecimento de petróleo. Este fato despertou novamente interesse por parte dos países europeus e dos Estados Unidos na busca de novas fontes de energia elétrica.

Nos anos 70, os dinamarqueses investiram em projetos de aerogeradores de pequeno porte para a geração de energia elétrica. Algumas pequenas e médias empresas que fabricavam maquinário agrícola na Dinamarca, começaram a desenvolver pequenos rotores eólicos. Estes equipamentos tinham venda assegurada para fazendeiros ou proprietários particulares (HAU, 2006).

Segundo Hau, (2006), os aerogeradores de pequeno porte dinamarqueses Figura 3, apresentavam uma pequena parcela no que tange conversão de energia, entretanto alguns fazendeiros iniciaram um movimento com objetivo de formar cooperativas. Dessa forma foi possível, entre outros benefícios, adquirir equipamentos com preço menor, construir plantas maiores, operadas em instalações comunitárias e, ainda, obtiveram regulamentação legal por parte do governo.

FIGURA 3 - Pequena turbina eólica dinamarquesa



Fonte: Hau, 2006, p.31.

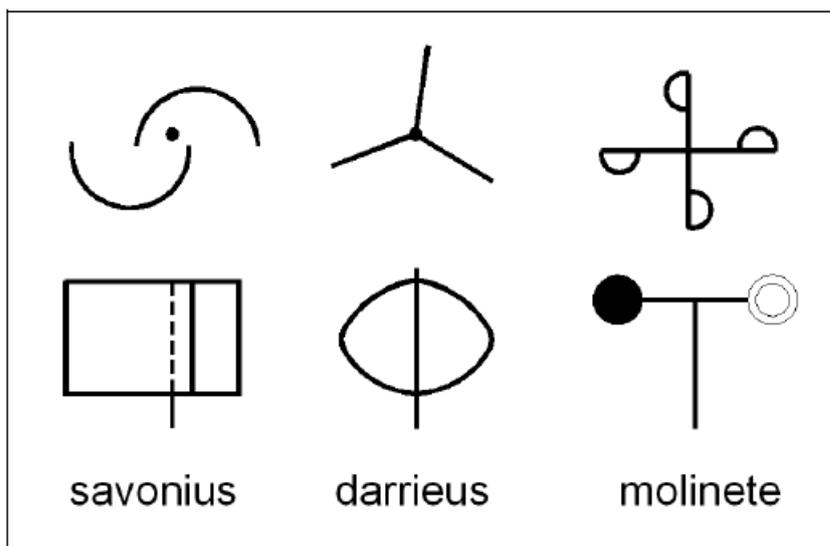
Segundo (IDER) Instituto de Desenvolvimento Sustentável de Energias Renováveis, a primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública foi instalada na Dinamarca, no ano de 1976.

O pioneirismo dos dinamarqueses pode representar um bom exemplo de como iniciar um movimento para ampliar a atividade de conversão energética em pequena escala.

2.2 Tipos de turbinas eólicas

Os modelos mais comuns encontrados na literatura são TEEV (Turbina Eólica de Eixo Vertical) Darrieus, Savonius e molinete, representados na Figura 4. Os aerogeradores de eixo horizontal TEEH (Turbina Eólica de Eixo Horizontal) apresentam uma grande diversidade de desenhos.

FIGURA 4 - Modelos de rotor com eixo vertical

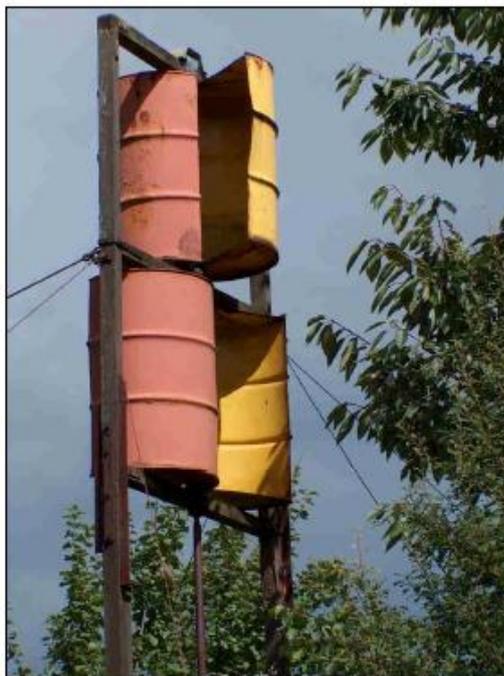


Fonte: Acioli, 1994, p.32

Segundo Acioli (1994), os rotores de eixo vertical possuem grande torque a baixa rotação, sendo ideais para os trabalhos pesados como puxar água ou moer grãos. Para Alé et al. (2006), as vantagens dos modelos TEEV estão associadas a sistemas de controle para o direcionamento da turbina em relação ao escoamento principal, bem como os aspectos de construção e manutenção, já que os geradores estão ao nível do solo.

O modelo Savonius, inventado pelo engenheiro finlandês *Sigurd J. Savonius* em 1922 é uma TEEV constituída por duas pás em formato de conchas dispostas lado a lado, em posições contrárias e ligadas a um eixo vertical, representado pela Figura 5. Essas turbinas são movidas predominantemente por forças de arrasto.

FIGURA 5 - Rotor tipo Savonius



Fonte: Alé, 2006, p.33

Em 1931 o Francês *G. J. M. Darrieus* desenvolveu a turbina Darrieus, levando seu nome na mesma, que por sua vez é um modelo que apresenta duas ou três pás em formato de Catenária mostrado na Figura 6. Segundo ALÉ, *et al* (2006), essas máquinas apresentam deficiências de arranque, sendo necessários o acoplamento de motores de partida.

Nos geradores eólicos gera-se eletricidade a partir de um alternador que transforma movimento de rotação em energia elétrica, os equipamentos com maior velocidade de rotação são os mais indicados para conversão de energia, pois, converterão mais energia em menos tempo em relação a equipamentos com baixa rotação (APPIO, 2001).

Figura 6 - Rotor tipo Darrieus



Fonte: Appio, 2001, p.34

As turbinas de eixo horizontal de médio e grande porte apresentam vantagens em relação às TEEV's. Uma dessas vantagens é a velocidade de rotação em relação mais elevada. Estes modelos são, atualmente, os mais usados na geração de energia elétrica conectada a redes de transmissão (APPIO 2001).

De acordo com Appio (2001), uma turbina eólica TEEH é formada por três partes principais: gerador, rotor e torre. Cada um desses componentes tem inúmeras peças de montagem e a isso é aplicada tecnologia suficiente para junção dos componentes adequados do sistema como em qualquer máquina.

Os geradores, ou equipamentos de conversão eletromecânica, entram no sistema com duas possíveis finalidades definidas: fornecer energia para uma rede de eletrificação, geralmente como uma alternativa secundária à rede existente, ou carregar baterias para diversas formas de uso (APPIO, 2001).

O rotor é composto pelas pás, eixo e caixa de engrenagens para transmissão do movimento de rotação para o gerador. As pás de um rotor de eixo horizontal são objetos de estudos de aerodinâmica para a otimização de seu emprego de aerogeradores. Em números de uma, duas, três, ou mais, as pás são elementos aerodinâmicos projetados para produzir forças de sustentação elevadas e pequenas forças de arrasto (APPIO, 2001).

Segundo Appio, (2001) os modelos mais utilizados na atualidade são os TEEH de três pás Figura 7, geralmente fabricados em fibra de vidro. Contam ainda com sistemas de freios aerodinâmico, mecânico ou eletrônico acionado quando o vento torna-se demasiadamente forte

FIGURA 7 – Aerogeradores de eixo horizontal instalados em Osório/RS

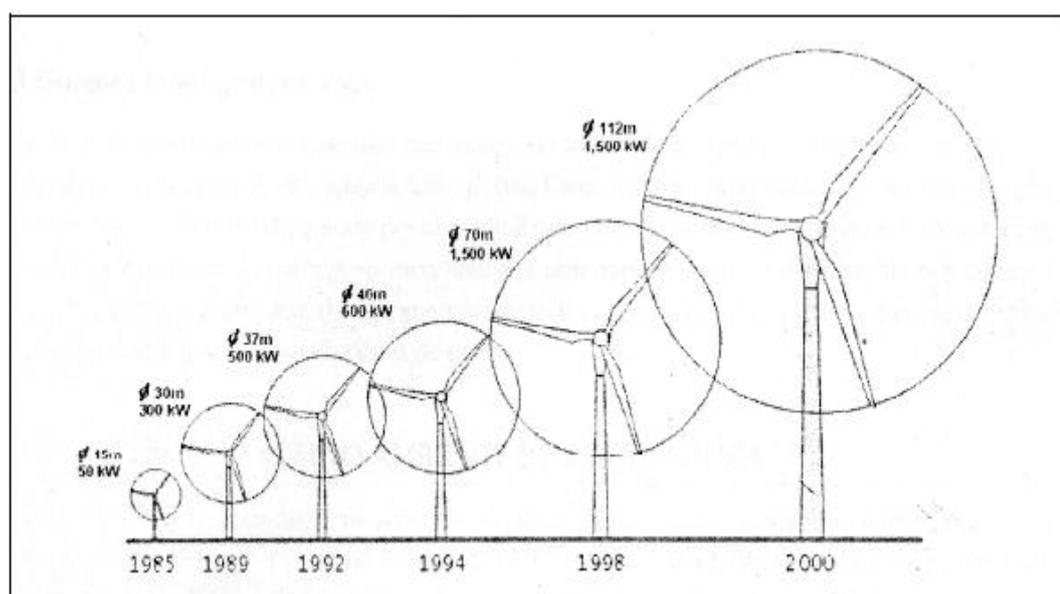


Fonte: Pires, 2010, p.35.

A área varrida pelo rotor é um dos parâmetros que define o quanto de energia o gerador irá proporcionar, conforme apresenta à Figura 8. Portanto, a energia está ligada diretamente ao comprimento (seção longitudinal da pá) (TOLMASQUIM, 2003).

O sistema de engrenagens de tamanhos distintos tem a função principal de aumentar o giro e transferir movimento rotatório ao gerador, isto é, padronizam-se os dentes da engrenagem onde é feito acoplamento entre as mesmas o que propicia com que a mesma funcione como um dínamo ou alternador. Alguns aerogeradores contam com tecnologia suficiente para descartar o uso de engrenagens, reduzindo o número de peças nos componentes (APPIO, 2001).

FIGURA 8 – Evolução do tamanho e potência de aerogeradores



Fonte: Tolmasquim, 2003 , p.36

A altura do rotor está relacionada diretamente com as condições de vento do local a ser instalada. Normalmente quanto mais alto a mesma estiver, maior a intensidade de vento será possível de se alcançar. Esse fato eleva a preocupação com a estruturação do equipamento, pois vale lembrar que a medida que a mesma for colocada em condições de intensidade de vento maior, um sistema de frenagem eficaz deve-se instalar visando a vida útil do mesmo. Já a torre de sustentação deverá ser calculada em função da carga exercida pelas peças suspensas, e, principalmente pela força do vento que terá de suportar chamada carga horizontal e pela vibração causada pelo movimento das pás (TOLMASQUIM, 2003).

Na atualidade, existem aerogeradores *offshore*, fora da costa, mais precisamente localizados no mar, que representam uma grande evolução tecnológica. A busca por sítios adequados para instalação de centrais eólicas culminou por encontrar esse tipo de local. Centrais *offshore* encontram-se em meio agressivo, pois vale lembrar que o ar sobre a superfície marinha concentra diferentes elementos químicos em relação ao ambiente terrestre. Os materiais metálicos apresentam a maior preocupação para esse tipo de máquina. A corrosão de peças pode representar grande dificuldade na utilização, principalmente de materiais ferrosos de partes do gerador elétrico, entre outras peças do aerogerador. As partes constituídas de materiais poliméricos, como é o caso dos compósitos, podem ser projetadas para apresentarem resistência à corrosão. O avanço em pesquisas no campo dos materiais foi essencial para possibilitar as instalações de aerogeradores no mar.

Na Figura 9 mostra a instalação de um sistema eólico na costa sudeste da Inglaterra. Segundo a empresa Vattenfall, proprietária dos equipamentos, essa fazenda eólica conta com 100 turbinas com capacidade total de produção de 300MW de energia, suficiente para abastecer 200 mil casas (TOLMASQUIM, 2003).

FIGURA 2.9 - Maior fazenda eólica offshore do mundo, Inglaterra



Fonte: Tolmasquim, 2003, p.37

Quanto ao desenho de aerogeradores, existem ainda experimentos e protótipos que estão em fase de projeto ou desenvolvimento para a mesma função de gerar eletricidade. A seguir, a Figura 10 mostra um projeto de aerogerador desenvolvido pela empresa canadense Magenn Power. Segundo a empresa, a turbina é constituída de um balão preenchido com gás hélio que é (menos denso que o ar), possui eixo horizontal, está elevada e suspensa por cabos a uma altitude de cerca de 300 metros e tem capacidade de gerar até 10 kW para a velocidade de vento entre 6 km/h e 100 km/h (TOLMASQUIM, 2003).

FIGURA 10 - Simulação de uma turbina da empresa Magenn Power.



Fonte: Tolmasquim, (2003) , p.37

Outro modelo de turbina TEEV, desenvolvido pela empresa Maglev (a mesma dos trens de levitação magnética), é apresentado na Figura 11. Segundo a Maglev, a turbina utilizaria ímãs permanentes de neodímio, não havendo contato através de rolamentos, reduzindo assim possibilidades de manutenção periódicas. A turbina pode gerar entre 400 e 5.000 W e pode funcionar com uma simples brisa de 1,5 m/s até ventos fortes de cerca de 40 metros por segundo, o equivalente a 144 km/h (TOLMASQUIM, 2003).

FIGURA 11 - Turbina TEEV de levitação da empresa Maglev



Fonte: Tolmasquim, 2003 , p.38

2.3 Legislação brasileira para o setor de energia eólica

Apesar da pouca disseminação de produção de energia para consumo próprio no Brasil, a ANEEL (Agencia Nacional de Energia Elétrica) dispõe de legislação para estabelecimento dos requisitos necessários para a obtenção de registro ou autorização para a implantação, ampliação ou repotenciação de centrais geradoras termelétricas, eólicas e de outras fontes alternativas de energia.

A resolução ANEEL nº 112 de 18 maio de 1999, em seu artigo 2º dispõe sobre a aplicação da mesma, listando os seguintes casos em que terão sua aplicação obrigatória:

- I – pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio interessadas em produzir energia elétrica destinada à comercialização sob a forma de produção independente;
- II – pessoa física pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio interessadas em produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo;
- III – registro de centrais geradoras termelétricas, eólicas e de outras fontes alternativas de energia, de potência até 5.000 kW, destinadas à execução de serviço público; e
- IV – ampliação e repotenciação de centrais geradoras termelétricas, eólicas e de outras fontes alternativas de energia destinadas à execução de serviço público. (ANEEL, 1999,p.112)

O parágrafo 3º da resolução descrita acima aponta que centrais geradoras eólicas, termelétricas, entre outras, com capacidade igual ou inferior a 5.000kW, devem obter registro de implantação junto a ANEEL.

Esta resolução entrou em vigor em maio de 1999. A partir daí qualquer empreendimento construído para a geração de energia através do sistema eólico, abaixo de 5.000kW deve passar por uma aprovação para obter autorização ou registro da ANEEL antes de entrar em operação.

O item II descreve que, inclusive pessoa física, que utilizará energia eólica exclusivamente para si, deverá atender essa resolução. Entretanto não fica devidamente esclarecido se pessoa física ou jurídica, ao adquirir e instalar na própria edificação um Aero gerador de pequeno porte, é necessário proceder todos esses trâmites.

2.4 Aero geradores

Aero geradores são as máquinas utilizadas para capturar e converter a energia cinética dos ventos e são constituídos basicamente, de uma turbina ou rotor eólico, de um gerador elétrico e de sistemas integrados ou auxiliares, como a caixa de multiplicação e sistemas de orientação. Tais máquinas tiveram sua origem nos antigos moinhos de vento, que convertiam a energia cinética dos ventos em energia mecânica. Em épocas mais recentes, essas máquinas passaram a ser utilizadas para produção de energia elétrica. (DALMAZ, 2007, p.39).

2.4.1 Partes do aero gerador

Segundo Tolmasquim (2003), um sistema eólico deve proporcionar um maior rendimento final trabalhando em harmonia. Para tal funcionamento, a maioria dos geradores de médio e grande porte conta com um rotor, uma caixa multiplicadora, um gerador elétrico, mecanismos de controle e orientação e uma torre de sustentação. O rotor é transformado a energia cinética do vento em energia mecânica de rotação de um eixo. Já a caixa multiplicadora ou transmissão é responsável por elevar a rotação e transmitir essa energia de rotação a um gerador. Geralmente

essa transmissão tende a aumentar o giro, aumentando assim a potência do gerador, que converte a rotação em eletricidade. Os mecanismos de controle e orientação direcionam o rotor e fazem o controle de velocidade das pás. A sustentação de todos esses componentes é feita pela torre, que tem altura conveniente para cada região em função das condições do vento (TOLMASQUIM, 2003).

2.4.2 Modelos de Aero geradores de pequeno porte

Na atualidade existem inúmeras empresas que fabricam e comercializam aerogeradores de pequeno porte. Na Tabela 1 apresentam-se alguns modelos de aerogeradores de pequeno porte com potência entre 1.000 e 1.100W, comercializados em diversos países. Os aerogeradores de pequeno porte podem ser utilizados para prover diversos segmentos da atividade humana. No início essa utilização era principalmente em locais para moagem de grãos ou bombeamento de água (TOLMASQUIM, 2003).

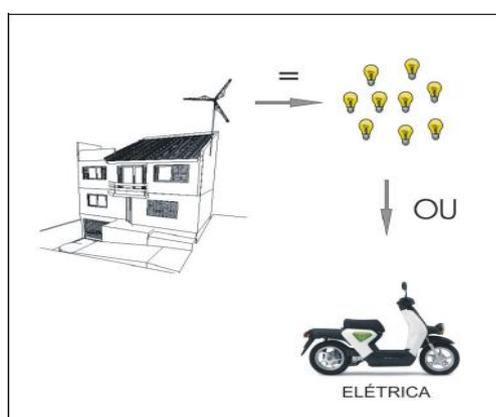
Pode-se inferir que a gama do uso dos aerogeradores de pequeno porte passa por carregamento de baterias para diversos usos, principalmente eletrificação rural em conjunto com geradores a diesel e/ou outras fontes como ligação na rede elétrica de residências, abastecimento de veículos elétricos, entre outras possibilidades representados na Figura 12.

Tabela 1 - Modelos comerciais de aerogeradores de pequeno porte

Nome - Fabricante	Potência	Diâmetro	Notas	Material das pás	Site	Preço (R\$)
Enersud (Brasil) – Linha Gerar 246	1000W – 12m/s	Ø = 2,46m	650 rpm a 12m/s (3 pás)	Fibra de vidro	www.enersud.com.br	5.990,00
Southest Windpower (Australia) – linha Whisper 200	1000W – 11,6m/s	Ø = 2,70m	Peso: 40kg – Vento limite: 55m/s	Fibra de vidro	www.windpowerenergy.com.au	11.990,00
Acolos Wind Turbine (Dinamarca) – linha Acolos H1 kW	1000W – 12m/s	Ø = 3,20m	Pode ser conectado a rede em alguns países. Vida útil 30 anos	Fibra de vidro	www.indturbinestar.com	Sob consulta por e-mail
Aero Craft (Alemanha) – linha AC 1002 H	1000W – 9m/s	Ø = 2,40m	600 rpm – Peso 45kg	Fibra de vidro	www.aerocraft.de	Não informado
Exmork New Energy Company (China) – linha FD 1kW	1000W – 8m/s	Ø = 2,80m	380 rpm – Tempo de vida útil 15anos	Fibra de vidro	www.exmork.com	Não informado
Kestrel Wind Turbines (South Africa) linha e 300i	1000W – 11m/s	Ø = 3,00m	600 rpm	Fibra de vidro	www.kestrelwind.com.za	Não informado
Zephyr Corporation (Japão) – linha Airdolphin GTO	1100W – 12,5m/s	Ø = 1,80m	Pode ser conectada a rede	Fibra de carbono	www.zephyreco.co.jp	10.523,70

Fonte: Tolmasquim, (2003) , p.45

FIGURA 12 - Possíveis usos de energia eólica



Fonte: Tolmasquim, (2003) , p.46

2.5 Vantagens da Energia Eólica

2.5.1 Vantagens para a sociedade

- É inesgotável;
- Diminui a emissão de gases de efeito de estufa (GEE).

2.5.2 Vantagens para o estado

- Reduz a elevada dependência energética do exterior, nomeadamente a dependência em combustíveis fósseis;
- Poupança devido à menor aquisição de direitos de emissão de CO₂ por cumprir o protocolo de Kioto e diretivas comunitárias e menores penalizações por não cumprir;
- Possível contribuição de cota de GEE para outros setores da atividade económica;
- É uma das fontes mais baratas de energia podendo competir em termos de rentabilidade com as fontes de energia tradicionais (TOLMASQUIM, 2003).

2.5.3 Vantagens para as comunidades dos parques eólicos

- Os parques eólicos são compatíveis com outros usos e utilizações do terreno como a agricultura e a criação de gado;
- Criação de emprego;
- Geração de investimento em zonas desfavorecidas;
- Benefícios financeiros (proprietários e zonas camarárias) (TOLMASQUIM, 2003).

2.6 Desvantagens da Energia Eólica

- A intermitência, ou seja, nem sempre o vento sopra quando a eletricidade é necessária, dificultando assim a integração da sua produção no programa de exploração;
- Pode ser ultrapassado com as pilhas de combustível (H₂) ou com a técnica da bombagem hidroelétrica.
- Provoca um impacto visual considerável, principalmente para os moradores em redor, a instalação dos parques eólicos gera uma grande modificação da paisagem;
- Impacto sobre as aves do local: principalmente pelo choque destas nas pás, efeitos desconhecidos sobre a modificação de seus comportamentos habituais de migração;
- Impacto sonoro: o som do vento bate nas pás produzindo um ruído constante 43dB(A). As habitações mais próximas deverão estar, no mínimo a 200m de distância (TOLMASQUIM, 2003).

2.7 Potencial eólico brasileiro

O Brasil, além de ser rico em recursos hídricos, também possui um grande potencial eólico. Atualmente, o Brasil ocupa a 13ª posição no ranking dos países produtores de energia eólica, com 3,1 GW de potência eólica instalada. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) o território brasileiro tem um potencial eólico de 300 GW, estando mais da metade do potencial concentrada na Região Nordeste do país. Na atualidade apenas 0,5% do potencial é aproveitado para geração de energia elétrica (CCEE, 2014).

A participação da energia eólica na matriz energética brasileira vem aumentando rapidamente e a previsão é que continue crescendo, assim como vem acontecendo no resto do mundo. Nos últimos sete anos, a capacidade instalada aumentou 54 vezes (CCEE, 2014).

Para termos uma noção mais acurada desses dados, a capacidade instalada dos parques eólicos em operação comercial no Brasil em janeiro de 2014 foi de 2.211 MW, 20% maior que a capacidade registrada no mesmo mês do ano anterior, de 1.841 MW. Já a geração total dessas usinas foi de 763 MW médios contra 612 MW médios em janeiro de 2013, o que significou salto de 25%. A geração média no início do ano correspondeu a 35% da capacidade instalada, o que coloca o Brasil, em termos de fator de capacidade, em patamar superior ao de países com maior potencial de geração eólica. Em 2012 os valores médios verificados para a China, Estados Unidos e Espanha, por exemplo, foram 18%, 33% e 24%, respectivamente. (CCEE, 2014).

Os dados constam da segunda edição do Boletim das Usinas Eólicas, divulgado mensalmente pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). O informativo revela ainda que o Nordeste foi o submercado que acumulou o aumento da capacidade instalada no país, concentrando 1.461 MW provenientes de 60 usinas – e com aumento de 25,3% em relação a janeiro do ano passado. A geração média na região foi de 597 MW médios contra 429 MW médios no início de 2013. No submercado Sul foi registrada uma capacidade de 723 MW em um universo de 29 usinas, o que representa um crescimento de 11,6% em relação ao mesmo mês do ano anterior; já o Sudeste apresentou uma única usina no mesmo intervalo de tempo, com capacidade de 28 MW. Segundo o boletim da CCEE, os estados com maior participação na geração média no período foram Ceará, Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul, Bahia e Santa Catarina, que totalizaram 93% do total gerado. No período coberto pelo informativo, a capacidade instalada das usinas eólicas associada à energia comercializada no PROINFA correspondeu a 43,6% do total, enquanto os montantes associados à energia comercializada nos leilões do ambiente de contratação regulada (CCEE, 2014).

As análises do informativo vão se somar a outros relatórios divulgados mensalmente pela CCEE, como o InfoMercado, o InfoLiquidez e o Boletim de Operação das Usinas. Vale ressaltar que o Boletim de Usinas Eólicas não leva em consideração um total de 263 MW médios de garantia física (associados a 594 MW de capacidade instalada) de usinas do 2º Leilão de Fontes Alternativas (LFA) e 149,6 MW médios (associados a 306,2 MW de capacidade instalada) de usinas do 2º e 3º Leilão de Energia de Reserva (LER) que a Agência Nacional de Energia

Elétrica – (ANEEL) considera em condições de entrar em operação comercial, mas que se encontra com restrição até a interligação efetiva dos parques ao sistema de distribuição/transmissão (CCEE, 2014). A Tabela 2 representa às classes de Energia conforme a respectiva definição.

Tabela 2 - Classes de Energia

Definição das Classes de Energia										
Classe	Mata		Campo Aberto		Zona Costeira		Morros		Montanhas	
	V_m (m/s)	E_m (W/m ²)								
4	> 6	> 200	> 7	> 300	> 8	> 480	> 9	> 700	> 11	>1250
3	4,5 - 6	80 - 200	6 - 7	200 - 300	6,5 - 8	250 - 480	7,5 - 9	380 - 700	8,5 - 11	650 - 1250
2	3 - 4,5	25 - 80	4,5 - 6	80 - 200	3 - 4,5	100 - 250	6 - 7,5	200 - 380	3 - 4,5	300 - 650
1	<3	<25	< 4,5	<80	<3	<100	<6	<200	<7	<300

Fonte: Feitosa, E. A. N. et al. (2003) , p.54

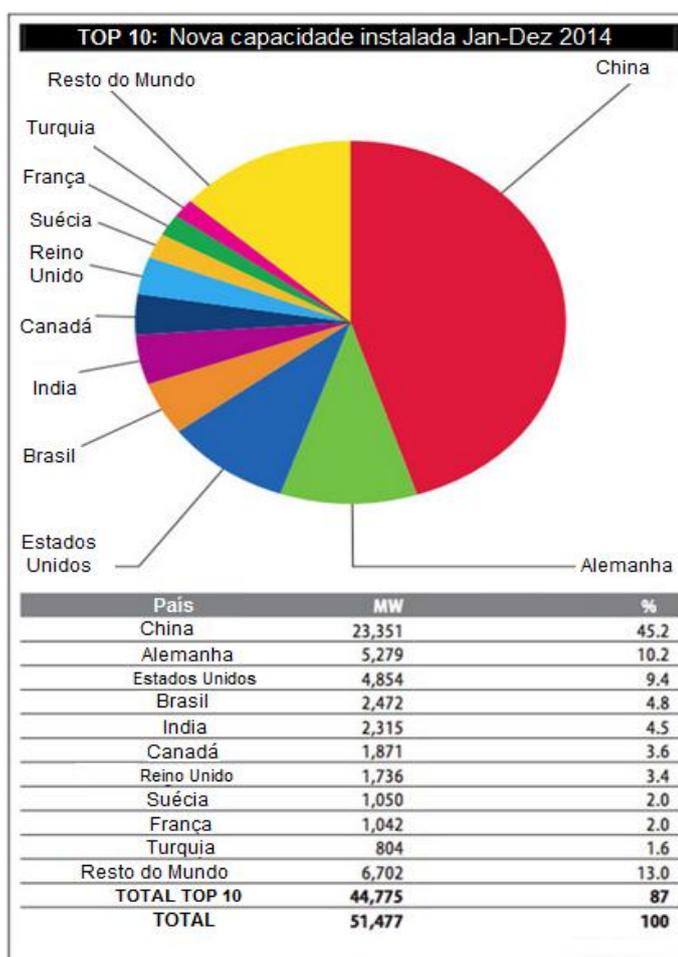
2.8 Capacidade instalada no mundo

Em 1990, a capacidade instalada no mundo era inferior a 2.000 MW. Em 1994, ela subiu para 3.734 MW, divididos entre Europa (45,1%), América (48,4%), Ásia (6,4%) e outros países (1,1%). Quatro anos mais tarde, chegou a 10.000 MW e no final de 2002 a capacidade total instalada no mundo ultrapassou 32.000 MW. O mercado tem crescido substancialmente nos últimos anos, principalmente na Alemanha, EUA, Dinamarca e Espanha, onde a potência adicionada anualmente supera 3.000 MW (BTM, 2000; EWEA, 2000, GREENPEACE, 2003)

Esse crescimento de mercado fez com que a Associação Europeia de Energia Eólica estabelecesse novas metas, indicando que, até 2020, a energia eólica poderá suprir 10% de toda a energia elétrica requerida no mundo.

De fato, em alguns países e regiões, a energia eólica já representa uma parcela considerável da eletricidade produzida. Na Dinamarca, por exemplo, a energia eólica representa 18% de toda a eletricidade gerada e a meta é aumentar essa parcela para 50% até 2030. Na região de Schleswig-Holstein, na Alemanha, cerca de 25% do parque de energia elétrica instalado é de origem eólica. Na região de Navarra, na Espanha, essa parcela é de 23%. Em termos de capacidade instalada, estima-se que, até 2020, a Europa já terá 100.000 MW. (WIND FORCE, 2003). Juntamente com gráfico a seguir tem-se a Tabela 3 que apresenta a evolução recente da capacidade instalada em vários países e regiões do mundo. China, Alemanha, EUA, Espanha e Dinamarca são responsáveis por quase 80% da capacidade instalada no mundo (GWEC, 2014).

Tabela 3 - Capacidade de Energia Eólica instalada no Mundo



Fonte: Gwec, (2014)

3 METODOLOGIA

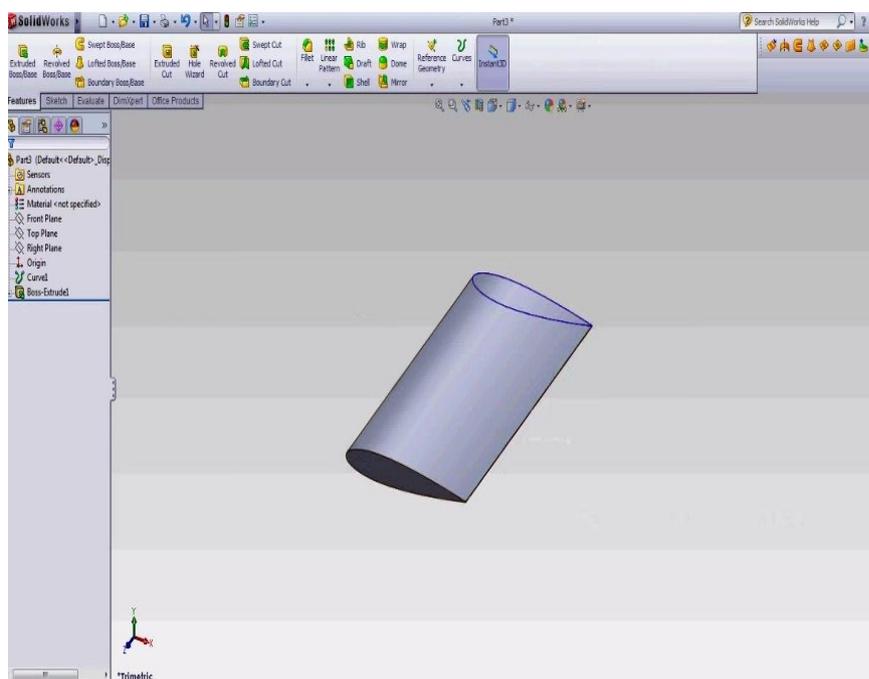
O presente trabalho constitui-se de um projeto de construção de uma Turbina Eólica de Eixo Vertical tipo H (TEEV), sendo apresentada da seguinte forma:

- a. Escolha do material reciclado enfatizando o potencial renovável, através do estudo e caracterização, processo de fabricação, e propriedades que tenham melhor desempenho técnico.
- b. Dimensionamento e modelagem das pás a serem desenvolvidas.
- c. Desempenho do perfil aerodinâmico das pás a serem utilizadas.
- d. Avaliação dos resultados das simulações para diversas velocidades de vento e espessura do objeto (pás).

Alguns materiais foram testados para a confecção das pás, sendo eles madeira, chapa de aço 1020 e Cano PVC 150 mm. O material escolhido para a confecção das pás foi o Cano PVC, porque além de ser o que apresenta o menor custo, não oxida como o aço 1020 e possui uma melhor flexibilidade para ajustes se comparado ao aço e a madeira.

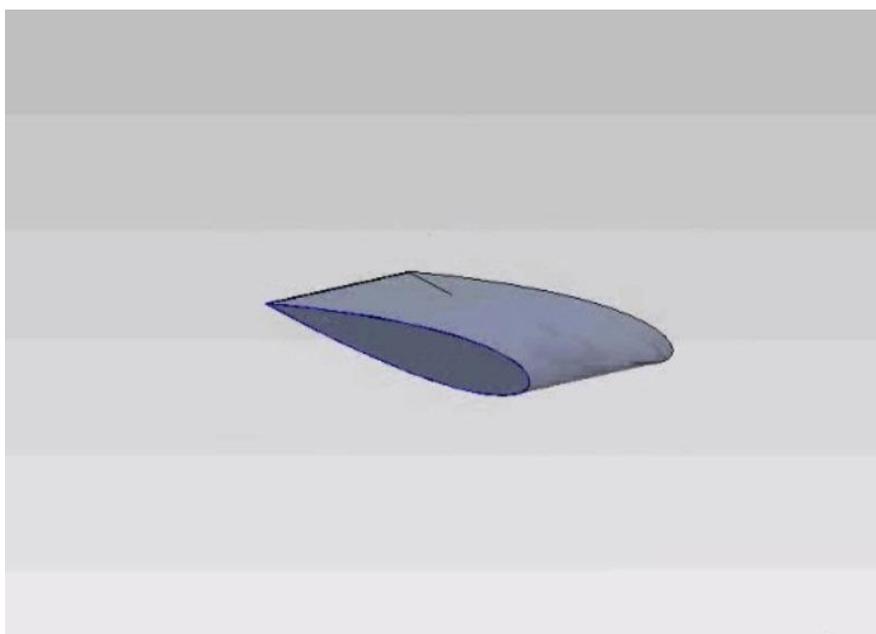
Posteriormente utilizou-se o *Software SolidWorks 2012* para modelagem computacional das pás feitas na primeira etapa de madeira, conseqüentemente em aço 1020 e por fim em Cano PVC. As figuras 13 e 14 representam do primeiro modelo da pá da turbina (pá de madeira) sendo confeccionada através do *software SolidWorks 2012*.

FIGURA 13 - Representação do primeiro modelo (em madeira) da pá da turbina desenvolvido no software SolidWorks 2012



Fonte: O autor, (2015)

FIGURA 14 - Representação do perfil da pá de madeira em vista lateral

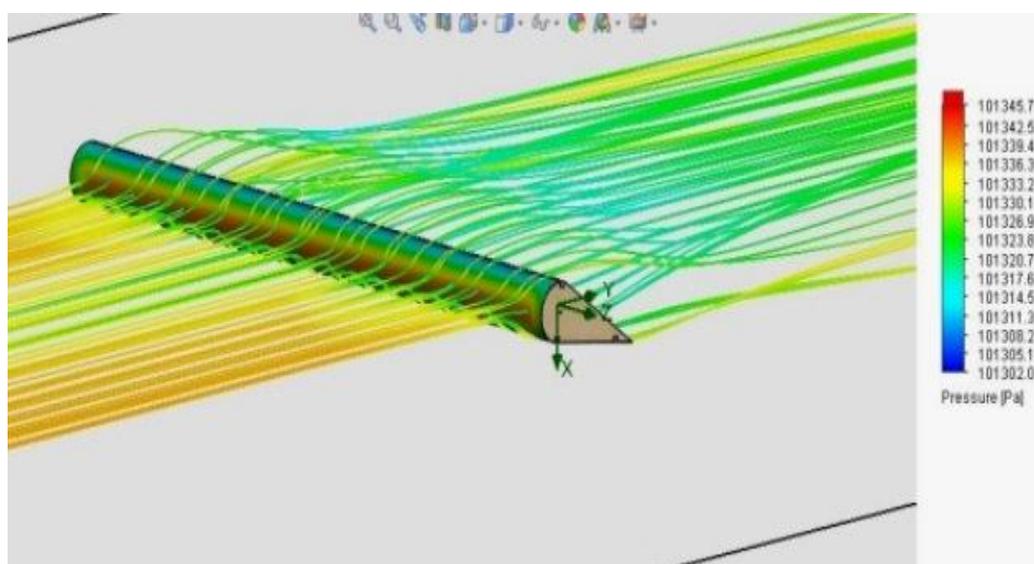


Fonte: O autor, (2015)

3.1 Pressão do fluido sobre a superfície da pá

Utilizou-se um modelo de simulação computacional desenvolvido por Matte, (2014), da simulação da pressão que o fluido exerce sobre a pá, em um perfil de pá similar ao desenvolvido neste trabalho. A Figura 15 representa uma análise similar ao primeiro protótipo de pá desenvolvido.

FIGURA 15 – Modelo de simulação computacional mostrando a pressão que o fluido exerce sobre a pá



Fonte: Matte, (2014).

3.2 Procedimento Experimental

Nesta etapa serão apresentados os procedimentos realizados para a confecção da turbina eólica.

3.2.1. Atividades a serem desenvolvidas

- a. Estudo da viabilidade;
- b. Projeto básico;
- c. Modelamento do produto;

d. Planejamento da produção/ execução do produto.

O estudo da viabilidade constitui-se na caracterização e definição das formas do projeto básico do produto. O projeto básico consiste na escolha da melhor proposta elaborada no estudo de viabilidade material a ser utilizado e ensaios com modelos virtuais e protótipos, como abaixo especificado:

- Estabelecer as variáveis dos parâmetros de projeto;
- Apresentar as características básicas dos componentes do produto;
- Mostrar a influência dos fatores internos e externos que agirão no desenvolvimento do produto;

O planejamento da produção/execução pretende determinar o melhor processo de fabricação tanto do material a ser utilizado como da montagem do produto final. Às figuras 16, **a** e **b** mostram o protótipo inicial do modelo do projeto a ser realizado.

FIGURA 16 - Protótipo inicial do modelo a ser desenvolvido

(a) desenho esquemático



(b) foto similar ao modelo a ser desenvolvido



Fonte: Alé, (2006) , p.44

3.3 Tipo de torre e área para instalação:

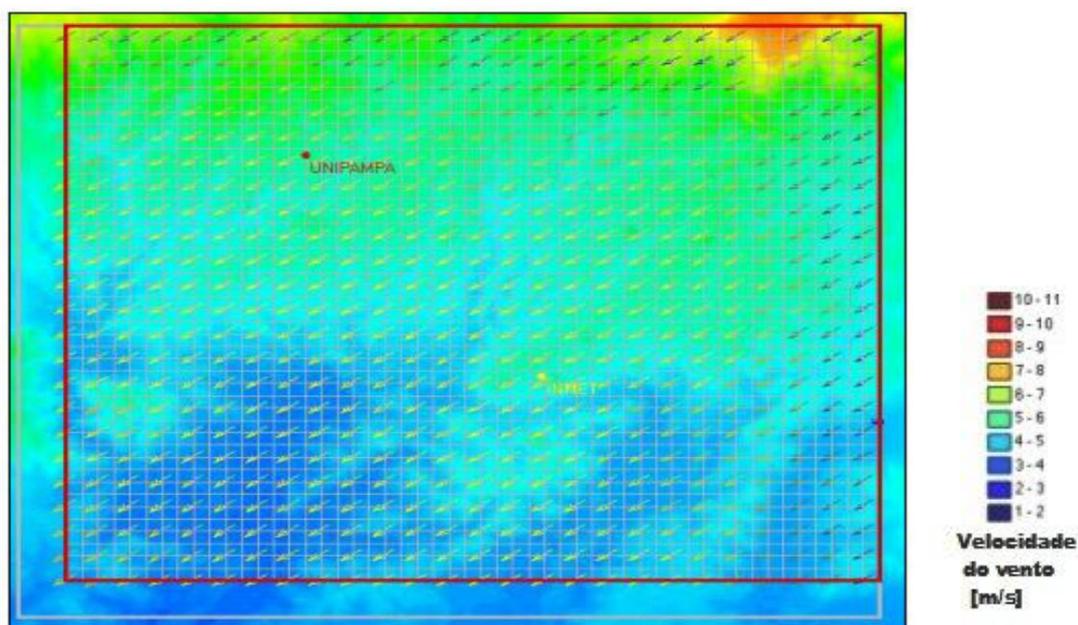
Segundo Pinho, (2008), para aerogeradores de pequeno e médio porte são comumente instalados em torres sustentadas por cabos de aço, ou estaiadas como são normalmente chamadas.

Este aerogerador está projetado para fornecer uma potência de no máximo 0,06 kW, e tem aproximadamente 20 kg podendo assim ser instalado em uma torre treliçada sendo esta sustentada por cabos de aço fixos a quatro pontos no solo, em bases de concreto. Para torre de 10 metros, a base central deve possuir dimensões aproximadas de 120 cm x 90 cm x 120 cm, enquanto as demais bases possuem dimensões aproximadas de 170 cm x 100 cm x 110 cm (estas, utilizadas nesse projeto) sendo simetricamente distribuídas (PINHO, 2008).

Outra técnica utilizada para a localização da instalação do aerogerador consistiu nos dados fornecidos por Coletto (2012), aluno da Unipampa - Campus Bagé – RS, onde em seu trabalho Coletto (2012) analisou o potencial eólico para a região da Universidade Federal do Pampa.

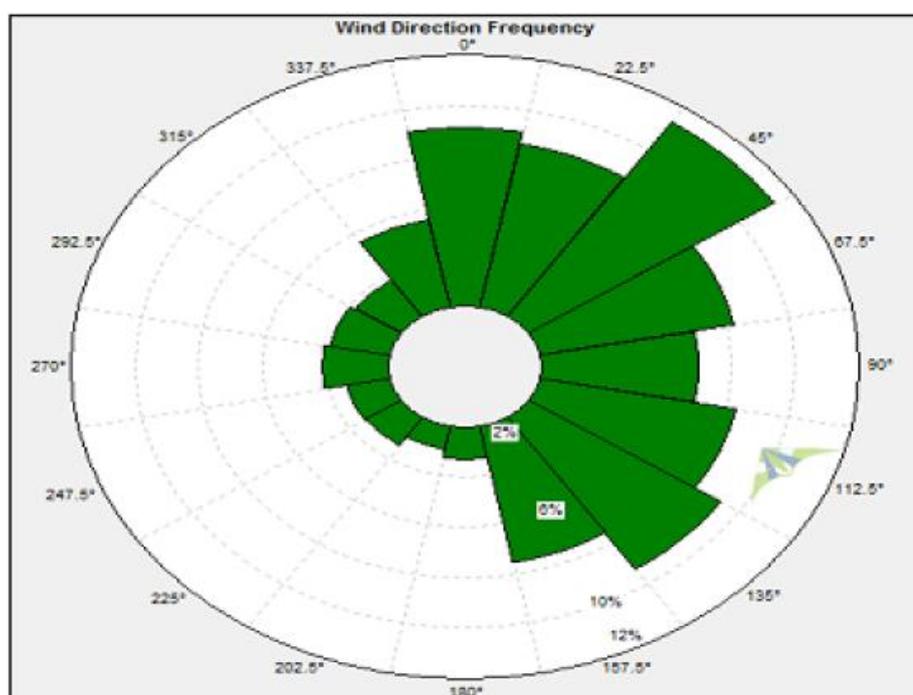
Coletto (2012) utilizou os *softwares* WindStation e Windographer, onde é apresentado, na Figura 17, a simulação do campo de velocidades e direção do vento para a região de Bagé-RS, e na Figura 18 à frequência da variação de vento através de uma Rosa de Ventos. A escala ao lado da Figura 17 representa as respectivas velocidades do vento na Unipampa a 14 metros de altura, onde a turbina será instalada.

FIGURA 17 - Campo de Velocidade



Fonte: Coletto, (2012)

FIGURA18 - Rosa de Ventos



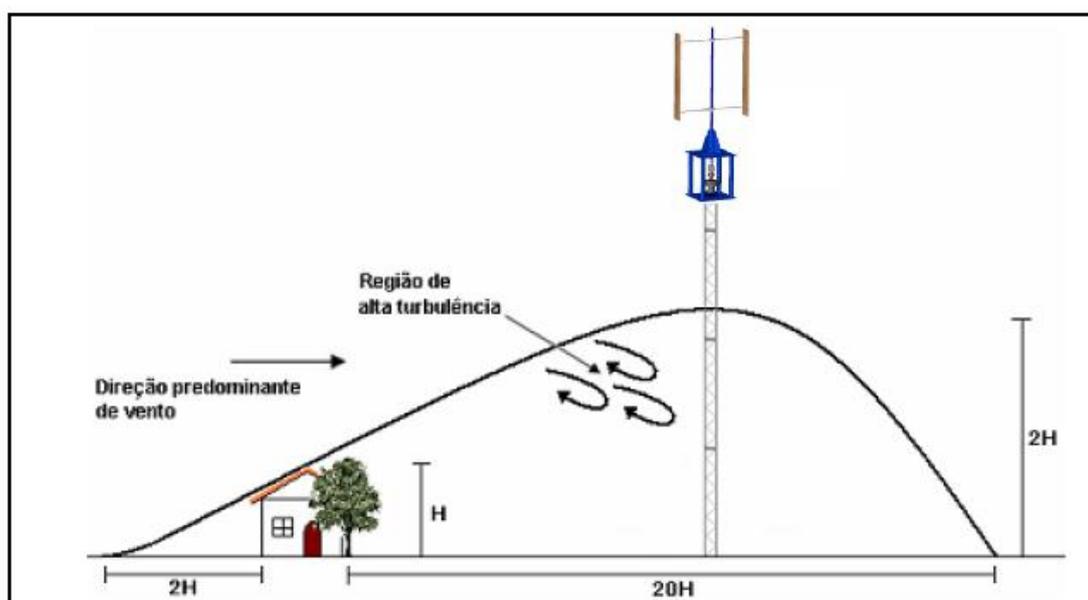
Fonte: Coletto, (2012)

Pode-se inferir que a melhor forma para a instalação do aerogerador do tipo TEEV, isolado da rede de transmissão é o ângulo com predominância de 55° . Outro fator importante é a velocidade mensal dos ventos, que varia entre 2,6 m/s nas estações de outono e inverno e 4,6 m/s no verão e primavera. Com esse ângulo é possível obter a melhor eficiência do aerogerador sem a influência de obstáculos, uma vez a região da universidade é predominantemente composta por campos (COLETO, 2012).

3.5 Local livre de obstáculos:

Pinho (2008) descreve uma técnica simples na escolha do local para a instalação do Aerogerador, a técnica consiste em posicionar a torre do aerogerador a uma distância mínima de 20 vezes a altura do obstáculo à jusante deste. Em casos de limitação de área, deve-se elevar a altura da torre até que o rotor seja completamente retirado da região de turbulência, que se propaga até uma altura de duas vezes a altura do obstáculo, como ilustrado na Figura 19.

FIGURA 19 - Instalação de um aerogerador fora da região de influência do obstáculo



Fonte: Pinho, (2008), p.50

3.6 Cálculo da Potência Gerada pelo Aerogerador

A potência gerada pelo aerogerador (TEEV tipo-H) é dada por (1)

$$P_{GER} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_r \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta \quad (1)$$

Para o valor da área varrida pelo aerogerador utilizam-se os valores da altura da pá representada por h e multiplica-se pelo comprimento entre das pás, representado por d . Este resultado é obtido por (2):

$$A_r = d \cdot h \quad (2)$$

Com base nestas equações, desenvolveu-se um código utilizando o *software* Matlab 7.6.0.

Fizeram-se ambos os códigos considerando uma média de velocidade dos ventos para primavera e verão de 4,6 m/s e para outono e inverno de 2,6 m/s, considerou-se também a densidade do ar para uma temperatura média de 15°C. A Figura 20 representa a simulação com uma velocidade média de 4,6 m/s e a Figura 21 representa a simulação com uma velocidade média de 2,6 m/s.

FIGURA 20 - Código feito no Matlab considerando a média da velocidade dos ventos para as estações de outono e inverno

```

C:\Users\Rubem\Desktop\TEEV - TIPO H\pro_turbina.m
1
2   \%Potência da Turbina Eólica de Eixo Vertical (TEEV - tipo H)
3
4 - V = 4.6           \%Média da Velocidade dos Ventos [m/s]
5 - d = 1.1;        \%Comprimento entre as pás [m]
6 - Cp = 0.4;       \% Coeficiente aerodinâmico de potência do rotor
7 - h = 1.0;        \% Altura das pás [m]
8 - n = 0.3         \% eficiência
9 - p = 1.225       \%densidade do ar Considerando uma Temp. de 15°C em [kg/m³]
10 - A = d*h        \%área varrida
11 - POTENCIA = (0.5*p) *A*(V^3) *Cp*n   \%Potência gerada pela turbina em Watts

```

Fonte: O autor, (2015)

FIGURA 21 - Código feito no Matlab considerando a média da velocidade dos ventos para as estações de primavera e verão

```

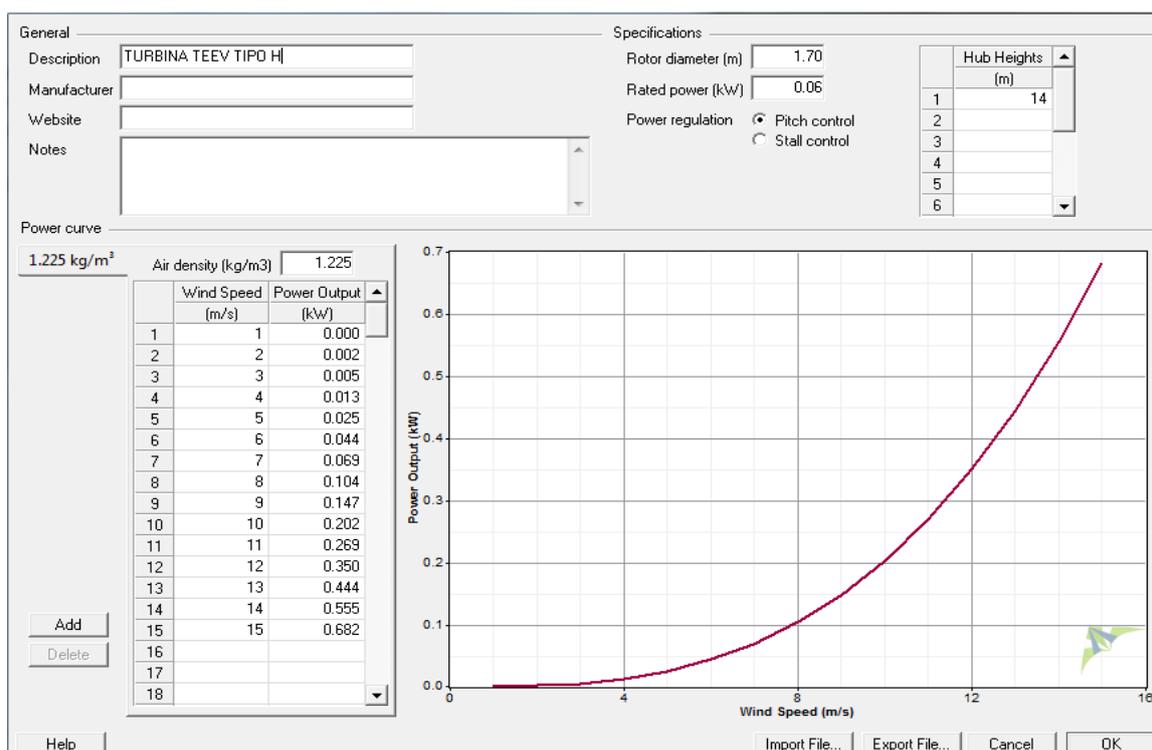
C:\Users\Rubem\Desktop\TEEV - TIPO H\pro_turbina.m
1
2  %Potência da Turbina Eólica de Eixo Vertical (TEEV - tipo H)
3
4  V = 2.6      %Média da Velocidade dos Ventos [m/s] - Outono e Inverno
5  d = 1.1;    %Comprimento entre as pás [m]
6  Cp = 0.4;   % Coeficiente aerodinâmico de potência do rotor
7  h = 1.0;    % Altura das pás [m]
8  n = 0.3     % eficiência
9  p = 1.225   %densidade do ar Considerando uma Temp. de 15°C em [kg/m³]
10 A = d*h     %área varrida
11 POTENCIA = (0.5*p)*A*(V^3)*Cp*n %Potência gerada pela turbina em Watts

```

Fonte: O autor, (2015)

Através da simulação através do Matlab, fez-se uma estimativa de potência gerada através do aerogerador em função da velocidade do vento utilizando o software Windographer. A Figura 22 representa o gráfico da potência de saída da turbina em função da velocidade dos ventos.

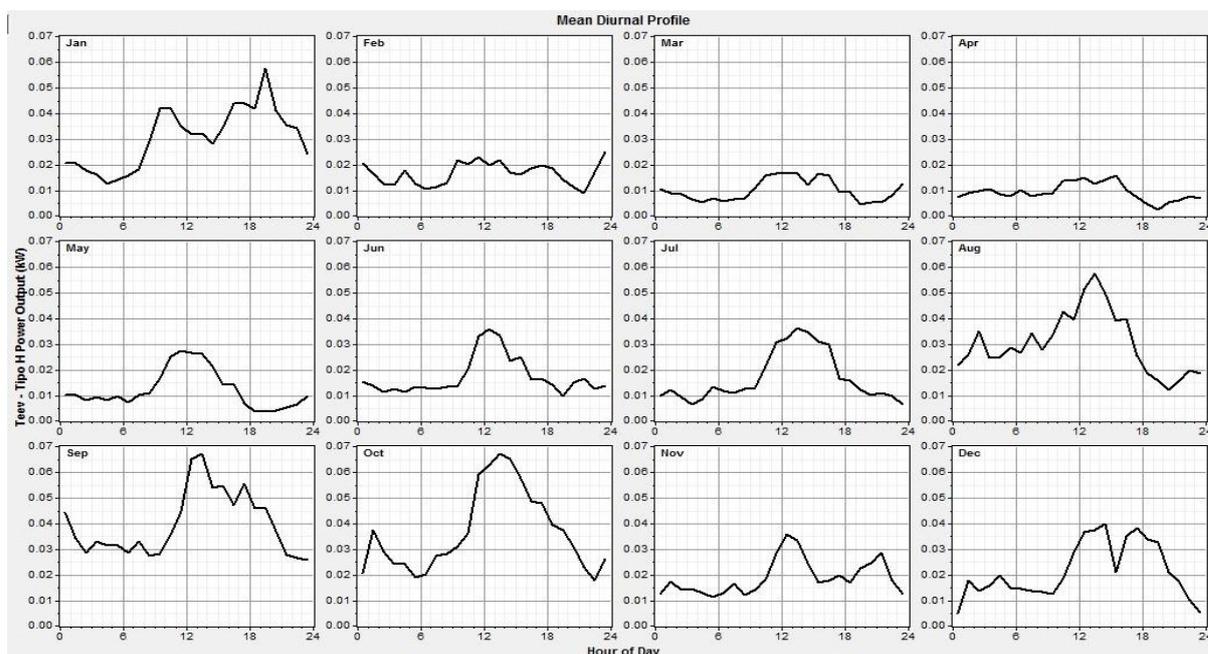
FIGURA 22 - Gráfico da estimativa de potência de saída do aerogerador em função da velocidade dos ventos utilizando o Windographer.



Fonte: O autor, (2015)

A Figura 23 possibilita a análise da estimativa da potência de saída do aerogerador ao longo de cada hora do dia durante todos os meses do ano. Utilizou-se também o Windographer para esta obtenção de dados.

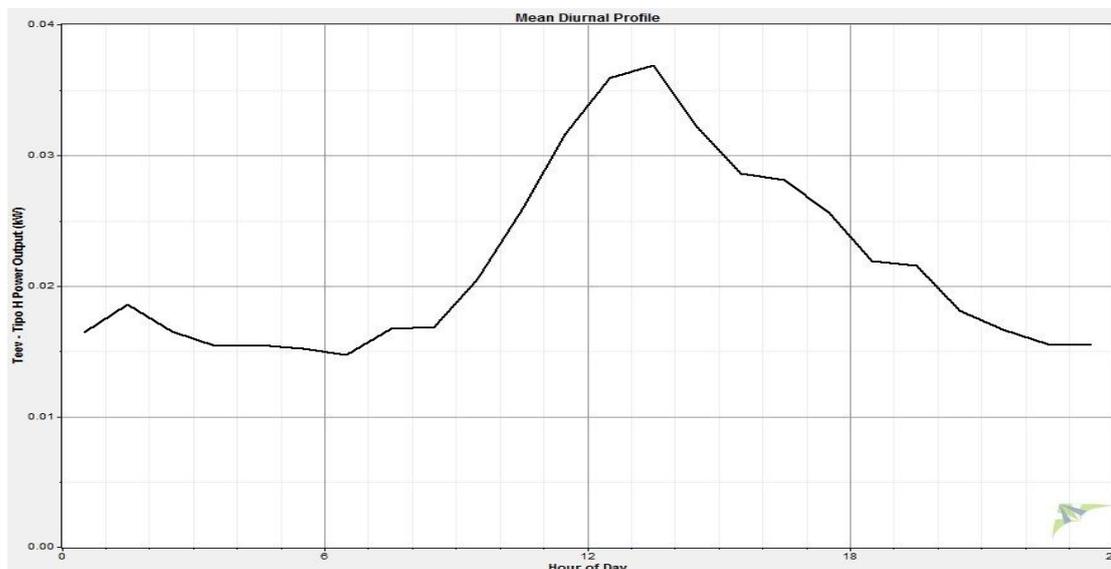
FIGURA 23 - Estimativa da potência de saída do aerogerador ao longo de cada hora do dia durante todos os meses do ano



Fonte: O autor, (2015)

Com base nestes resultados estimados pelo Windographer expressos na Figura 24 fez-se uma média durante as 24 horas do dia, da estimativa de potência de saída da TEEV- (tipo H), conforme a Figura 24.

FIGURA 24 - Estimativa da potência de saída da TEEV ao longo de cada hora do dia



Fonte: O autor, (2015)

A Tabela 4 representa a distribuição pontos/dados estimados ao longo do ano, fornecidos pelo Windographer, considerando a velocidade média dos ventos da cidade de Bagé-RS, para assim se obter a geração média de energia em cada mês.

Tabela 4 - Coleta de dados (2012 – Windographer)

Mês	Pontos/Dados Válidos	Vel. Do vento na altura de instalação (m/s)	Geração de Energia líquida média (kWh/ano)	Capacidade de saída líquida (%)
Jan	744	4,42	19,0	41,8
Fev	696	3,50	9,0	22,8
Mar	743	2,97	6,0	13,7
Abr	718	2,67	5,0	12,7
Mai	743	3,17	8,0	16,9
Jun	720	3,40	10,0	23,7
Jul	744	3,28	10,0	23,1
Ago	743	4,41	19,0	41,6
Set	720	4,49	23,0	54,4
Out	744	4,22	22,0	50,3
Nov	718	3,71	11,0	26,0
Dez	744	3,52	13,0	29,4

Fonte: Coletto, (2012).

Após a coleta de dados e analisando-os no Windographer verificou-se também a predominância dos ventos em cada mês do ano através de sua respectiva Rosa de Ventos. A Figura 25 indica essa predominância na direção do vento.

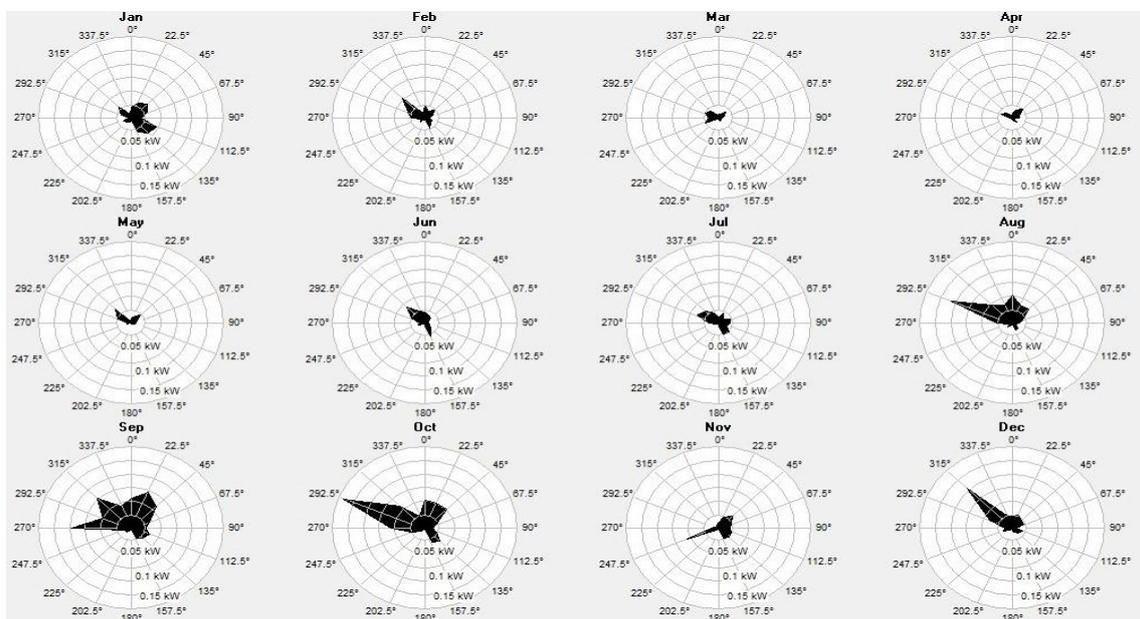
FIGURA 25 - Rosa de ventos ao longo do ano



Fonte: O autor (2015)

A estimativa da potência de saída da turbina, e os resultados são expressos através da Figura 26.

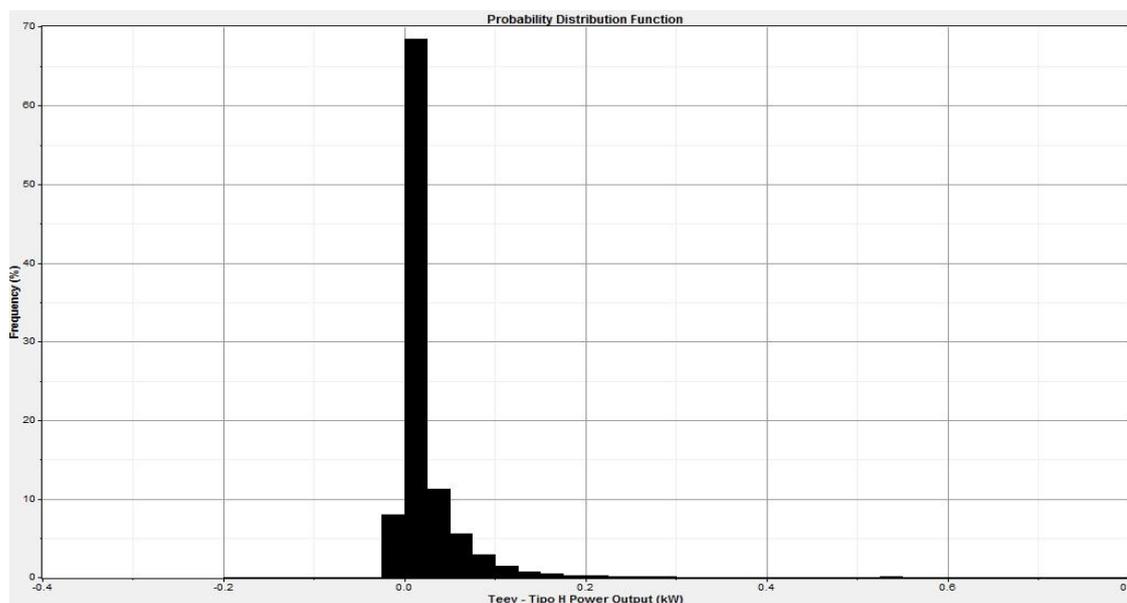
FIGURA 26 - Estimativa da potência de saída da turbina de acordo com a predominância do vento em determinadas épocas do ano



Fonte: O autor, (2015)

A Figura 27 representa através de um histograma a média da frequência de distribuição da potência de saída da turbina TEEV (tipo H) ao longo de um ano.

FIGURA 27 - Média da frequência de distribuição da potência de saída da TEEV



Fonte: O autor, (2015)

3.7. Instalação do banco de baterias

O dimensionamento das baterias está intimamente ligado à quantidade de energia que estas baterias devem fornecer à carga. Este dimensionamento consiste em armazenar toda a energia proveniente gerada pelo aerogerador durante um período de 2 dias sem o funcionamento do aerogerador. A demanda de energia do local a ser instalado é de 18 W, ou seja, demanda para iluminação de duas lâmpadas de LED de 9 W cada. Isto resulta que se o banco de baterias estiver carregado, tem-se energia para alimentar essas duas lâmpadas por dois dias.

3.8. Dimensionamento de baterias para armazenar a energia do aerogerador.

Conforme descreve Mineiro (2004), o banco de baterias deve armazenar a energia proveniente do aerogerador e fornece a energia para a carga caso ocorra alguma interrupção de geração de energia. Ele descreve o conjunto de equações necessárias para obter a quantidade de baterias para o sistema eólico.

A potência média fornecida pelo banco de baterias é dada por (3).

$$P_{bat} = \frac{P_{out}}{n} \quad (3)$$

Já o consumo do sistema em um dia (Ah/dia) e dado por (4).

$$A_{hl} = \frac{P_{bat} \cdot t_{func}}{V_{CC}} \quad (4)$$

A capacidade total das baterias é dada por (5).

$$C_{bat} = \frac{A_{hl} \cdot d}{D_C} \quad (5)$$

De posse dessas equações e sabendo que o aerogerador poderá fornecer uma potência de no máximo 60 W e, definindo o rendimento do inversor em 80%, a tensão de barramento de 12 V e o tempo de funcionamento de 240 minutos (4 horas). Utilizando a equação (3) tem-se uma potência média fornecida pela bateria de:

$$P_{bat} = \frac{P_{out}}{n} = \frac{60}{0.8} = 75W$$

Como a tensão do barramento é de 12 V, o tempo de descarga de uma bateria é 4 horas, tanto para bateria de 7 Ah quanto de 10 Ah. Com base na equação (4) tem-se o consumo diário da carga:

$$A_{hl} = \frac{P_{bat} \cdot t_{func}}{V_{cc}} = \frac{75 \cdot 4}{12} = 25 Ah / dia$$

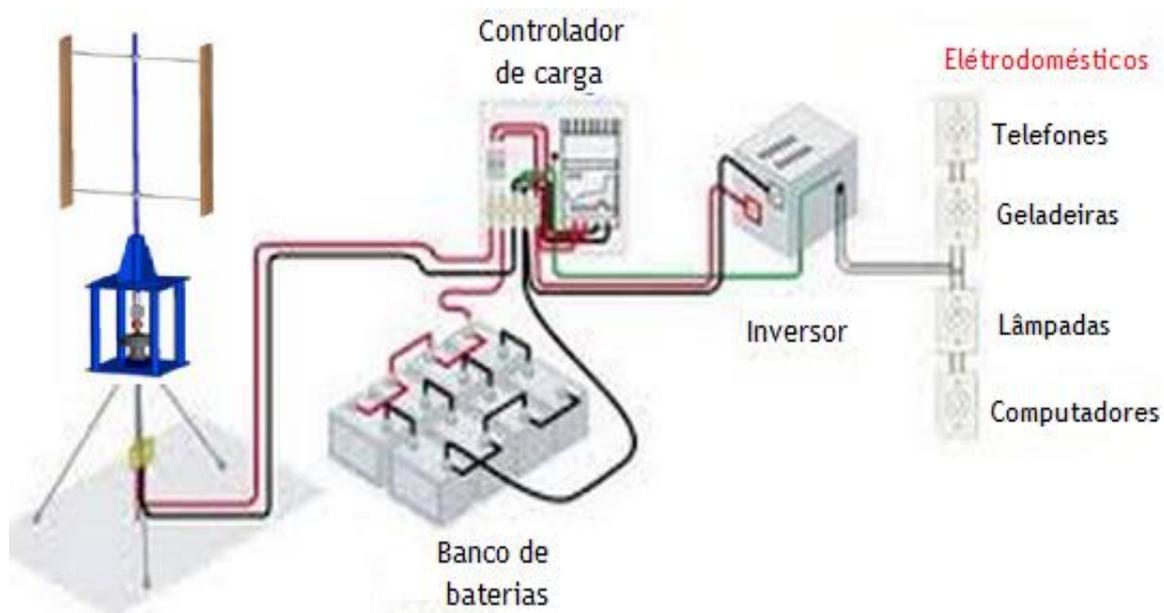
Estipulando que o banco de baterias tenha uma autonomia de um dia, então, com base na equação (5), tem-se a seguinte capacidade total de baterias.

$$C_{bat} = \frac{A_{hl} \cdot d}{D_c} = \frac{25 \cdot 1}{0.8} \approx 31,25 Ah$$

Sendo assim, o número de baterias que podem ser escolhidas para atender o sistema de geração de energia eólica é de 5 baterias de 7 Ah ou 4 baterias de 10 Ah.

A Figura 28 mostra o desenho esquemático da Turbina TEEV (tipo H) conectada ao banco de baterias, controlador de carga e inversor.

FIGURA 28 - Aerogerador conectado ao sistema



Fonte: CRESESB, (2014), p.30.

4. RESULTADOS OBTIDOS

A confecção do das pás e o perfil de um aerogerador de eixo vertical foram realizados a partir dos dados disponíveis da área urbana do município de Bagé/RS. As pás foram desenvolvidas em madeira, aço 1020 e cano PVC.

A partir dos resultados adquiridos, realizou-se o modelamento geométrico de um dos modelos de pás. Após o desenvolvimento de um modelo de pá no *software* CAD SolidWorks 2012, desenvolveram – se os 3 modelos de pá em diferentes materiais. O modelo de pá escolhido para se acoplar ao aerogerador é o de cano PVC 150 mm (dimensão da pá (0,15 m x 1,0 m)). A Figura 29 representa o modelo de pá desenvolvido artesanalmente em laboratório em cano PVC.

FIGURA 29 - Modelo de pá do aerogerador desenvolvido em cano PVC 150 mm



Fonte: O autor, (2015)

Em seguida montou-se o eixo do rotor vertical em aço 1020. A Figura 30 ilustra o eixo do rotor desenvolvido na Universidade.

FIGURA 30 - Eixo do rotor desenvolvido em aço 1020



Fonte: O autor, (2015)

Em seguida analisaram-se os dados da intensidade do vento que foram extraídos de um levantamento de dados ao longo de um ano a partir do estudo de Coletto, (2012).

Posteriormente desenvolveu-se o aerogerador, cuja ordem de confecção seguiu as respectivas etapas:

- Desenvolvimento do rotor de eixo vertical do aerogerador em aço 1020 com diâmetro (\varnothing) de 0,0175 m;
- 2 (duas) Hastes cilíndricas de aço 1020 para suporte das pás com diâmetro (\varnothing) de 0,016 m;
- 1(Um) Tirante de aço 1045 servindo de suporte do rolamento fixado ao rotor vertical da turbina;
- 2 (Duas) Pás de cano PVC 150 mm e 1 m de comprimento;
- Parafusos e porcas para fixação.

A Tabela 5 representa os custos contidos na construção do aerogerador.

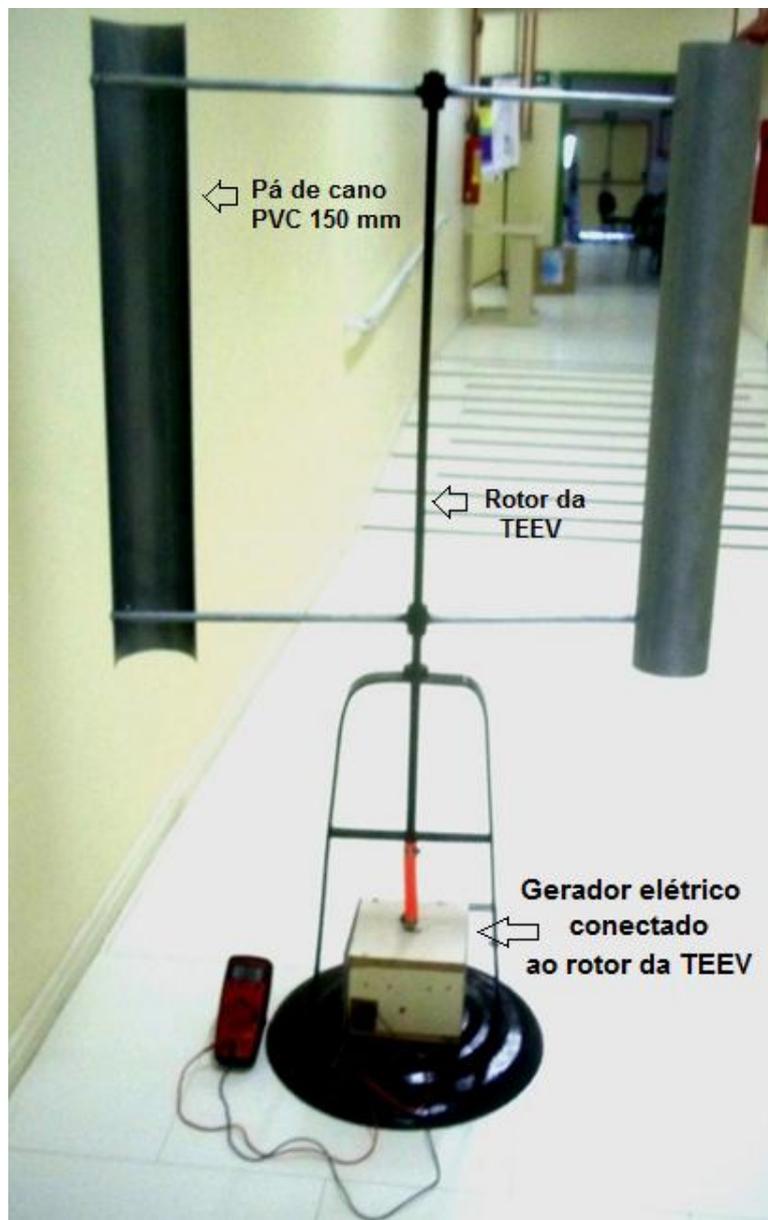
Tabela 5 - Custos do aerogerador

Componente	Valor
Eixo do rotor de aço 1020	R\$ 28,00
Hastes cilíndricas de aço 1020	R\$ 20,00
Tirante de aço 1045	R\$ 28,00
Pás feitas em cano PVC 150 mm	R\$ 21,00
Parafusos e porcas de fixação	R\$ 2,40
Tinta	R\$ 23,00
Total	R\$ 122,40

Fonte: O autor (2015)

Fazendo uso destes equipamentos, montou-se o aerogerador. A Figura 31 mostra o aerogerador montado em um dos laboratórios da Universidade, conectado a um gerador artesanal de corrente alternada composto de ímãs.

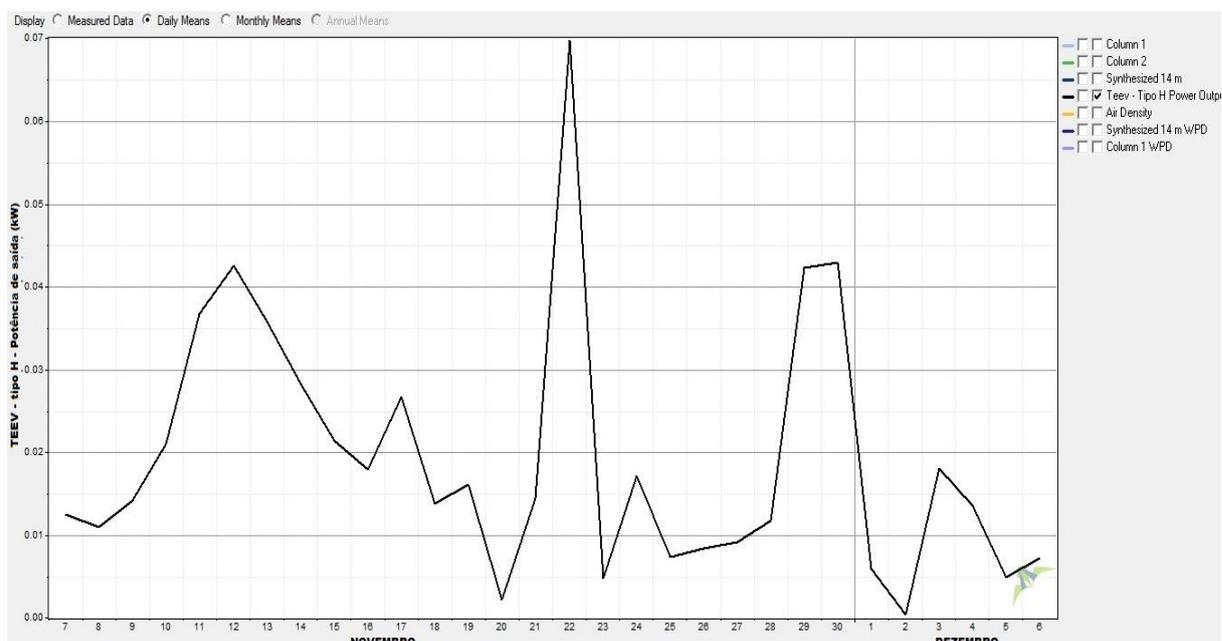
FIGURA 31 - aerogerador montado conectado a um gerador artesanal de corrente alternada composto por ímãs



Fonte: O autor, (2015)

Com o aerogerador montado e acoplado a um motor trifásico obteve-se dados experimentais da potência de saída do mesmo. Na Figura 32 tem-se a representação de mais de 700 pontos plotados entre os dias 6 de Novembro e 6 de Dezembro de 2015 (datas dos testes realizados com o aerogerador).

FIGURA 32 - Resultados experimentais de 30 dias plotados no Windographer



Fonte: O autor, (2015).

Posteriormente fez-se uso dos dados da velocidade dos ventos obtidos ao longo de um ano por Coletto (2012) na Unipampa Bagé e assim calculou-se esses dados com o auxílio do *software* Matlab fazendo uso da equação (1). Por fim, compararam-se esses dados com a média de valores fornecidos pelo *software* Windographer, representados na Tabela 6.

Tabela 6 - Comparativo de resultados da potência de saída do aerogerador através de dados experimentais.

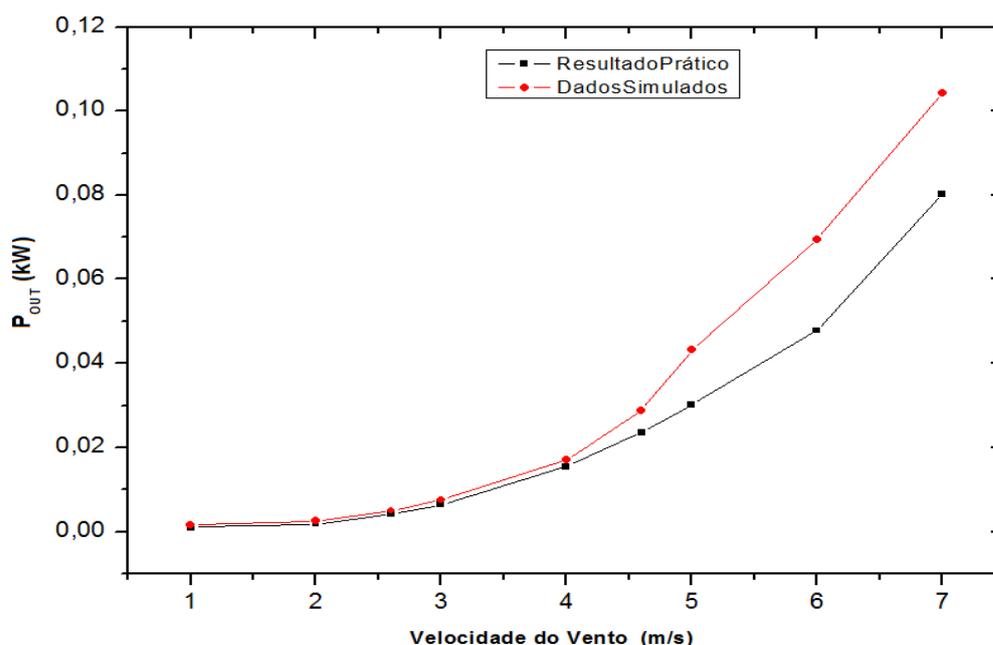
Velocidade do Vento [m/s]	Windographer $P_{out} \rightarrow [kW]$	Matlab $P_{out} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_r \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta$ [kW]	Resultados Obtidos $P_{out} \rightarrow [kW]$
1,0	0,0015	0,0011	0,0010
2,0	0,0025	0,0020	0,0018
2,6	0,0050	0,0044	0,0041
3,0	0,0075	0,0068	0,0064
4,0	0,0170	0,0161	0,0155
4,6	0,0288	0,0244	0,0236
5,0	0,0432	0,0314	0,0301
6,0	0,0695	0,0542	0,0478
7,0	0,1042	0,0860	0,0603

Fonte: O autor, (2015)

Com base nesses resultados pode-se inferir que houve variações de resultados da potência de saída nas comparações entre os valores de levantamentos de dados de 2012 pelo Windographer e os valores obtidos experimentalmente através do aerogerador nas mesmas velocidades. Essa perda de energia deu-se em virtude de perdas por atrito no eixo do rotor com o tirante de fixação, perdas nas conexões da mangueira entre o eixo do rotor e o eixo do motor trifásico, perdas por inércia do conjunto e perdas suplementares (perdas mecânicas).

A Figura 33 representa o gráfico da comparação entre dados computacionais (Windographer) e dados experimentais.

FIGURA 33 - Comparação entre dados computacionais e dados experimentais



Fonte: O autor, (2015).

O *software* utilizado para plotar esse gráfico que compara dados Simulados e computacionais foi o OriginPro. Nesta incumbência, analisaram-se dados experimentais com ventos de até 7,0 m/s (dia 22/11/2015), acima desses valores, desconsideram-se os testes para cuidar da vida útil do aerogerador que fora projetado para potências de saída (P_{OUT}) de até 0,06 kW.

4.1. Equipamentos Utilizados na obtenção de Dados Experimentais

- (1) um tacômetro digital de contato axial Politerm POL-19A modelo DT6236B;
- (1) um anemômetro sigital Portátil TFA modelo 42.6000.06;
- (1) um gerador artesanal de corrente alternada composto por ímas potência conectado no rotor do aerogerador;
- (1) um multímetro digital Amprobe modelo 30XR-A.

Primeiro verificaram-se as características de motor de trifásico de indução, para assim conectar o sistema. Em seguida, mediu-se com o tacômetro à velocidade do aerogerador de maneira axial verificando simultaneamente a velocidade do vento no local, com um Anemômetro. Na Tabela 7 têm-se os valores em RPM (Rotações Por Minuto) que se obteve em um dos locais de teste para coleta de dados de velocidade do aerogerador.

Tabela 7 - Velocidade do vento, resultando em valores de RPM na TEEV

Velocidade do Vento no Local [m/s]	Número de rotações fornecidas pela Turbina [RPM]
1,0	5,0
2,0	9,0
2,6	10,0
3,0	16,0
4,0	37,0
4,6	56,0
5,0	72,0
6,0	114,0
7,0	191,0

Fonte: O autor, (2015)

Os valores em negrito de velocidade dos ventos representam as médias que temos nas 4 estações do ano (Primavera e Verão) **4,6 m/s** e (Inverno e Outono) **2,6 m/s**. Nestas condições pode-se inferir que o aerogerador terá uma média de

rotações para às estações (Primavera e Verão) de **56 RPM** e (Inverno e Outono) de **10 RPM** .

A Tabela 8 demonstra os possíveis custos contidos na construção do aerogerador juntamente com o Sistema.

Tabela 8 - Custos do sistema completo

Equipamento	Valor
Controlador de carga 12V	R\$ 130,00
Inversor de Frequência 12V/220V	R\$ 100,00
4 Baterias 10Ah/dia	R\$ 180,00
Eletrodutos	R\$ 30,00
Fios Bitola 2,5 mm ²	R\$ 25,00
Motor Trifásico / Monofásico	R\$ 400,00
Aerogerador Montado	R\$ 122,40
Total	R\$ 987,40

Fonte: O autor, (2015)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A continuidade deste projeto visa aprimorar mais os estudos desenvolvidos a respeito das fontes alternativas de energia, tornando-as cada dia mais usual para atender as demandas da sociedade e principalmente visando o meio ambiente.

O interesse pela energia eólica aumentou nos últimos anos, principalmente depois do disparo do preço do petróleo e conseqüentemente da energia elétrica. O custo de pequenas turbinas eólicas tem um preço relativamente pequeno, sem contar que o vento é uma fonte inesgotável, enquanto o petróleo não.

5.1 Conclusão

Considerando a média anual da velocidade dos ventos para às estações de Primavera e Verão onde o vento é maior, tem-se uma média de 4,6 m/s proporcionando assim uma rotação média de 56,0 RPM e uma potência média de saída calculada para o aerogerador é 19,55 W possibilitando assim a instalação das lâmpadas de LED para o estacionamento.

Pode-se dizer também que as TEEV's podem ser empregadas na geração de energia elétrica como sistemas interligados na rede ou como sistemas independentes, possibilitando assim que nos momentos que não tiver nenhuma carga sendo acionada a turbina estará gerando créditos à Universidade.

Considerando o valor do kW/h e levando-se em conta o valor gasto em todo o projeto (R\$ 987,40), levaria-se quase 2 anos para se obter o retorno do valor investido, considerando resultados obtidos a partir de uma média de velocidade dos ventos de 4,6 m/s.

Vale ressaltar também que mesmo com esse tempo de investimento considerável, o trabalho foi bastante profícuo do ponto de vista geral, pois, várias pessoas mostraram interesse em desenvolver protótipos similares, como forma de auxílio nas taxas mensais de consumo de energia elétrica.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Pode-se dizer ao término deste trabalho, que é viável a instalação de um aerogerador de pequeno porte no campus da Unipampa-Bagé para abastecer duas lâmpadas de LED (9 W cada uma) como forma de suporte para a iluminação de um dos estacionamentos da Universidade, levando-se em conta os dados obtidos da velocidade dos ventos sobre o local ao longo do ano. O local que se escolheu para a instalação desta turbina é acima do Bloco 3 da Unipampa- (Campus Bagé).

O local para instalações de outros aerogeradores similares seria acima do 4º andar (no telhado da Universidade) alimentando o sistema de iluminação dos banheiros do 4º andar.

Neste caso precisar-se-ia de um banco de baterias contendo (4) quatro unidades de 10 Ah/dia, (1) um controlador de carga de 12 V / 20 A, (1) um inversor de frequência de 12V/220V (100 W), eletrodutos, (1) motor trifásico de indução e fios de bitola 2,5 mm².

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACIOLI, J. L. **Fontes de Energia**. Brasília/DF: Editora Universidade de Brasília, 1994. Acessado em: 01 nov. 2015, 09:52.

ALÉ, J. V.; LOPES, H. F.; WENZEL, G. M. **Aproveitamento de sistemas eólicos em áreas urbanas: estudo do caso de Porto Alegre**. In: SEMESAM - Seminário de Meio Ambiente –USFC, 2006, Santa Catarina Acessado em: 18 out. 2015, 16:59.

APPIO, A. J. **Energia Eólica – Evolução e Perspectiva no Brasil**. Disponível em <<http://www.appio.org/energiaEolica.htm>.> Acessado em 17 de out. 2015, 11:11.

BURTON, T.; SHARPE, D.; JENKINS.; BOSSANYI, E. **Wind energy: handbook**. England: Ed John Wiley & sons, 2001. Acessado em 9 out. 2015, 16:25.

CAMARGO, O. **A Atlas Eólico: Rio Grande Do sul**. Porto Alegre/RS: Secretaria de Energia Minas e Comunicações – SEMC, 2002. Acessado em: 10 out. 2015, 09:13.

CARVALHO, P. **Geração Eólica**. Fortaleza/CE: Imprensa Universitária, 2003. Acessado em: 10 out. 2015, 10:52.

CBEE - **Centro Brasileiro de Energia Eólica**. Simulador de Consumo. Disponível em <www.ceee.com.br> Acessado em 11 out. 2015, 16:18.

COLETO, M. **LEVANTAMENTO DO POTENCIAL EÓLICO E SOLAR NA REGIÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA/CAMPUS BAGÉ**. Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé-RS. 2012. Acessado em 10 out. 2015, 15:37.

CRESESB – **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito**. Disponível em <www.cresesb.cepel.br> 2009. Acessado em: 13 nov. 2015, 20:16.

DALMAZ, A. **Estudo do Potencial Eólico e previsão de ventos para a geração de eletricidade em Santa Catarina**. Florianópolis/SC, p.175, 2007 Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Santa Catarina. Acessado em 11 out. 2015, 19:21.

FEITOSA, E. A. N. et al. **Panorama do Potencial Eólico no Brasil**. Brasília: Dupligráfica, 2003. Acessado em 11 out. 2015, 20:50.

FIGUEIREDO, J. A. G.; GAMBOA, P. V., SIVESTRE, M. A. **Novo conceito de Turbina Eólica**. Conferência Engenharia 2003 Inovação e Desenvolvimento. 2003, Covilhã, Portugal. Acessado em: 17 out. 2015, 09:31.

GUIPE, P. **Wind Energy Basic: a guide to small and micro Wind systems**. Vermont Totnes, Inglaterra: Chelsea Green Publishing Company, 1999. Acessado em: 17 out. de 2015, 10:03.

HABALI, S. M.; SALEH, I. A. **Local design, testing and manufacturing of small mixed airfoil Wind turbine blades of glass fiber reinforced plastics Part I: Design of the blade and root**. Energy Conversion & Management, p.249-280, 2000. Acessado em: 17 out. 2015, 15:53.

HASHIN, Z. **Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites**. Journal of Applied Mechanics, v.47, p.329-334, 1980. Acessado em: 25 out. 2015, 22:38.
HEPPERLE, M. **JavaFoil – free software**. www.mh-aerotoools.de. 2004. Acessado em: 17 out. 2015, 15:53.

MACHADO, I. R. **Sistema Eólico para carregamento de baterias**. Fortaleza/CE, 162 P., 2007. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará. Acessado em: 01 nov. 2015, 07:51.

MARSCHOFF, C. M. **Las fuentes de energia en el siglo XXI**. Buenos Aires, Argentina: Fondo de Cultura Económica de Argentina S.A., 1992. Acessado em: 01 nov. 2015, 10:45.

PINHO, J. **MANUAL DE IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS FOTOVOLTAICO-EÓLICO-DIESEL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**. Projeto BRA/99/011. Carta de Acordo 001/2007.MME-PNUD-UFPA-FADESP- 2008.

SECRETARIA DE ENERGIA, MINAS E COMUNICAÇÃO DO RS, 2002. Disponível em http://www.sema.rs.gov.br/upload/ATLAS_EOLICO_RS_parte_001.pdf. Acessado em: 14 nov. 2015, 08:18.

SECRETARIA DE ENERGIA, MINAS E COMUNICAÇÃO DO RS, 2002. Disponível em http://www.sema.rs.gov.br/upload/ATLAS_EOLICO_RS_parte006.pdf. Acessado em: 14 nov. 2015, 09:47.

SECRETARIA DE ENERGIA, MINAS E COMUNICAÇÃO DO RS, 2002. Disponível em http://www.sema.rs.gov.br/upload/ATLAS_EOLICO_RS_parte008.pdf. Acessado em: 14 nov. 2015, 12:55.

STEADMAN, P. **Energía, médio ambiente y edificación**. Madrid: Herman Blume Ediciones 1978. Acessado em: 07 nov. 2015, 09:14.

TOLMASQUIM, M. T. **Fontes renováveis de energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciencia, 2003. Acessado em: 10 de nov. 2015, 23:18.

APÊNDICE A – Coleta de dados através de medição de RPM no aerogerador



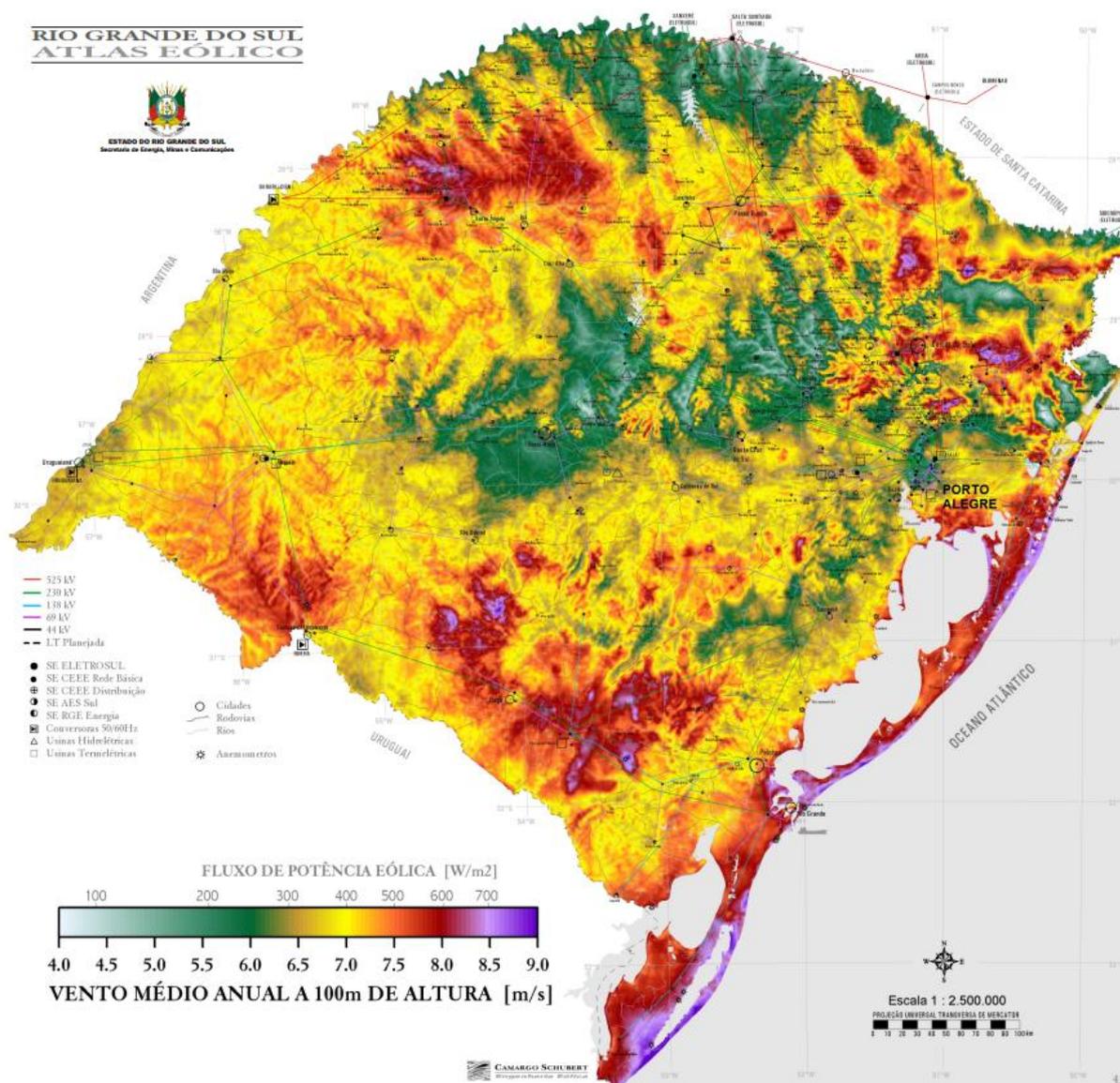
Fonte: o autor, (2015)



Fonte: o autor, (2015)

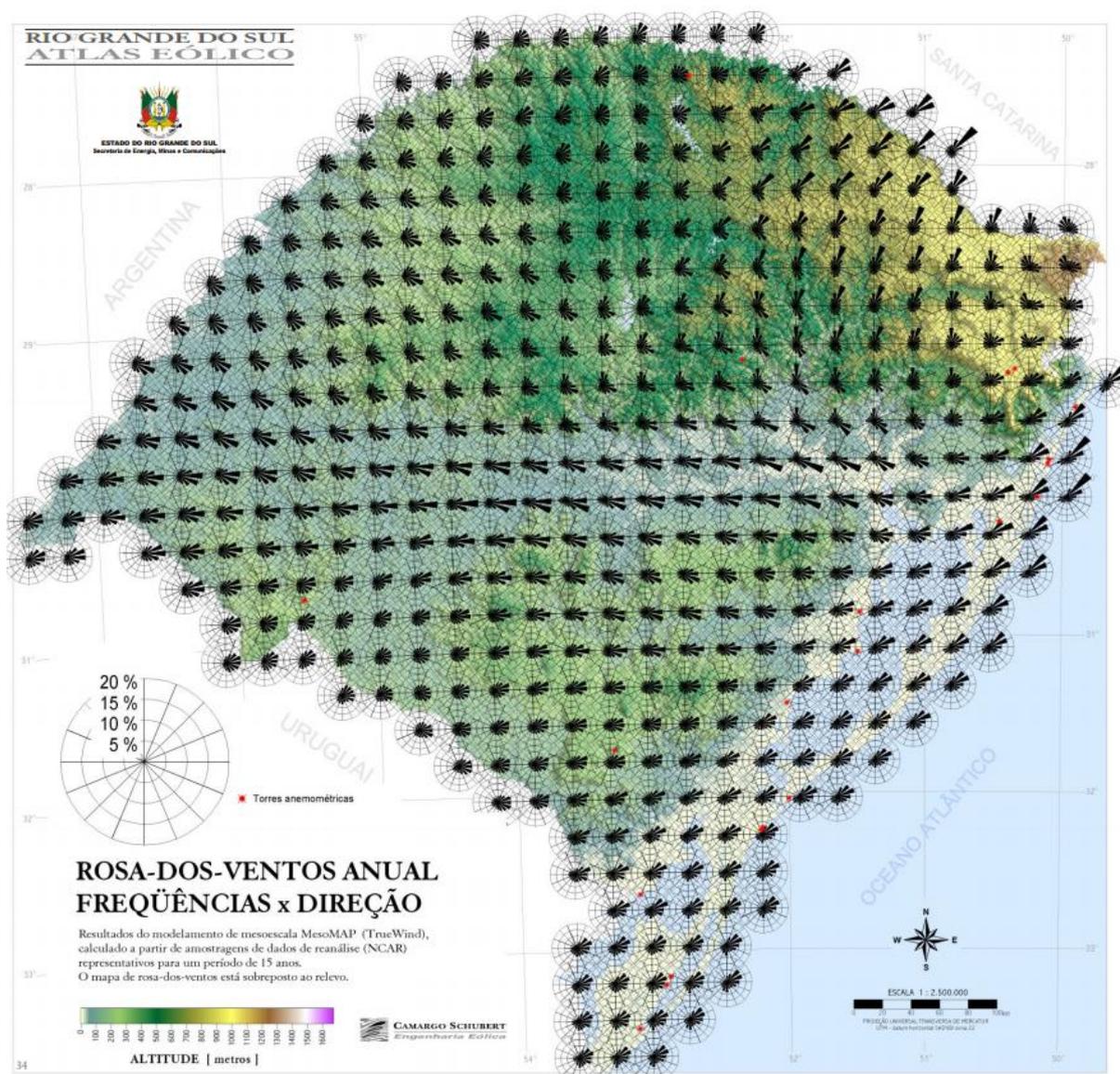
O local onde se coletou os dados nas imagens do APÊNDICE A é a rampa de acesso ao planetário da Unipampa Campus Bagé.

ANEXO I - Vento médio anual no Rio Grande do Sul a 100m de altura



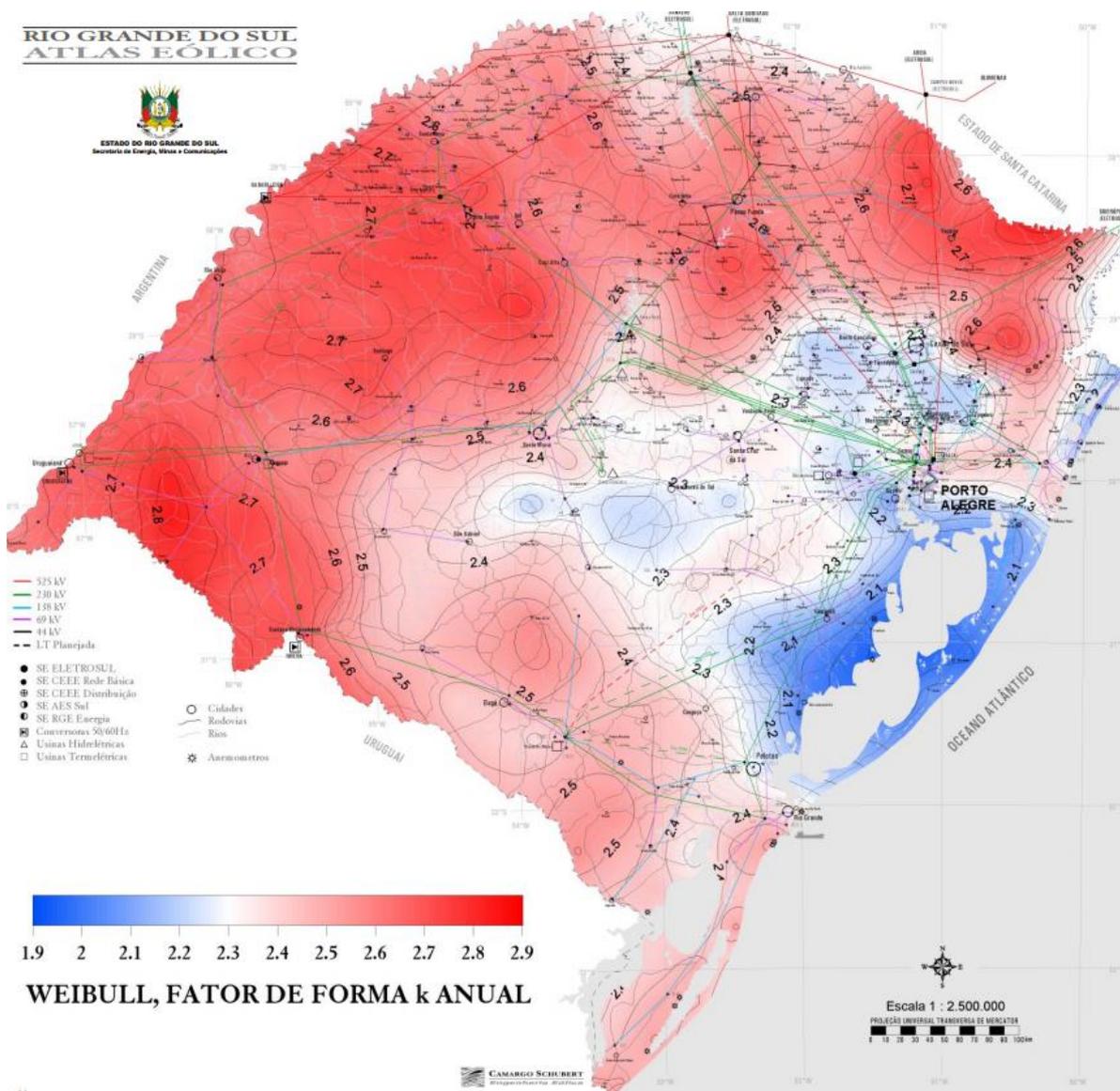
Fonte: Secretária de energia, minas e comunicação do RS, 2002.

ANEXO II - Rosa de ventos anual do Rio Grande do Sul com frequência x direção dos ventos



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

ANEXO III - Distribuição de Weibull e fator de forma (K) anual no Rio Grande do Sul



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