ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TURBINA EÓLICA PARA INSTALAÇÕES COMERCIAIS E RESIDENCIAIS

FÁBIO LUIZ ARGENTINO
SÉRGIO KATSUMI BEPPU

São Paulo
2007

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TURBINA EÓLICA PARA INSTALAÇÕES COMERCIAIS E RESIDENCIAIS

Projeto de Formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Graduação em Engenharia Mecânica.

Fábio Luiz Argentino
Sérgio Katsumi Beppu

Orientador: Prof. Dr. Eitaro Yamane

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Beppu, Sérgio Katsumi
Projeto e construção de turbina eólica para instalações comerciais e residenciais / S.K. Beppu. – São Paulo, 2007.
92 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Energia elétrica 2.Distribuição de energia elétrica 3.Desenvolvimento de produtos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos especialmente ao Prof. Dr. Eitaro Yamane pela orientação ao longo da realização deste projeto.

Agradecimentos ao nosso colega Artur Max por ajudar na construção do protótipo, disponibilizando as ferramentas e dicas na usinagem das peças.

Aos nossos Pais. Dedicamos este trabalho a eles, por sempre nos darem apoio, incentivo e todas as condições favoráveis para realização deste trabalho de conclusão de curso.

Às nossas namoradas, pela paciência nos momentos mais críticos e ajuda nos momentos mais ilustres do trabalho.

RESUMO

Prelimirnamente este trabalho demonstrará um panorama da situação energética da atualidade, alertando para o possível colapso do sistema e pontuando as formas de energia limpas e renováveis, como por exemplo, a eólica na matriz energética brasileira e mundial.

Particularmente, serão abordados no trabalho os tipos de turbinas eólicas existentes e suas diversas formas e aplicações, assim como o funcionamento e características dos componentes do conjunto elétrico necessário para a produção de energia elétrica para uma pequena instalação.

Porém a ênfase deste projeto será dada ao estudo e construção (fabricação do protótipo) de uma turbina eólica de eixo horizontal de pequeno porte. A turbina construída neste projeto revelou ser capaz de fornecer potência da pordem de 2 a 3 W, insuficientes para suprir a demanda de uma instalaçãocomercial ou residencial.

Secundariamente foi abordada a aplicação da turbina eólica desenvolvida com dimensões superiores em um sistema de conversão eólico-elétrico para suprir a demanda de energia de uma pequena instalação residencial.

Utilizando-se um modelo com diâmetro 5 vezes superior e com o dobro de largura seriam necessárias a instalação de 12 conjuntos turbina-gerador capaz de gerar 395W e capaz de suprir a demanda de 5 kWh de uma residência.

Para este conjunto ainda deveria ser utilizado um inversor de corrente já que a energia gerada pelo conjunto eólico-elétrico é em corrente contínua e 4 baterias de 12 Volts do tipo estacionárias com capacidade de carga de 150Ah.

ABSTRACT

First of all this work will show a view from energy situation nowadays, warning about a possibly crash on the system, and showing energy diversity clean and renewable, like wind energy in Brazil's and World's energy base.

Particularly, this work will show the different types of existing wind turbines and its types and applications. The system working and components characteristics of electrical kit necessary for a small installation will be shown too.

The main part of this project will be the study and construction (prototype) of wind turbine with horizontal axis of small size.

Secondarily will be studied the application of wind turbine developed in a system of conversion wind-electrical for supplying the demand of a small installation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Esquema da origem dos ventos globais. 15
Figura 1.2 - Esquema das brisas marinhas durante o dia e a noite. 16
Figura 1.3 - Esquema de ventos da montanha..... 16
Figura 1.4 - Modelo de Moinho de Vento de 4 pás projetado no Século XV. .. 18
Figura 1.5 - Moinho de Vento - Zaandjik (Holanda)..... 19
Figura 1.6 - Carro a Vela de Nassau. 19
Figura 2.1 - Potência Eólica Instalada na Europa (EWEA) [12]. 23
Figura 2.2 - Fazenda eólica em Kappel - Dinamarca [10]..... 24
Figura 2.3 - Turbinas Eólicas instaladas Off-Shore (Litoral da Dinamarca) [10]. 24
Figura 3.1 - Parque Eólico de Osório-RS. Fonte: Wikipedia [14]. 29
Figura 3.2 - Projetos de Energia Eólica no Brasil. Fonte CBEE [5]. 29
Figura 3.3 - Mapa de ventos do Brasil. Resultados preliminares do CBEE [5] e ANEEL [15]. 31
Figura 3.4 - Potencial Eólico do Brasil - Velocidade Média Anual do vento. Fonte CRESESB[16]. 34
Figura 3.5 - Potencial Eólico da Região Sudeste. Fonte CRESESB[16]. 34
Figura 4.1 - Desenho Esquemático de uma Turbina Eólica. 36
Figura 4.2 - Turbina eólica de eixo horizontal de 3 pás. 38
Figura 4.3 - Detalhe das pás dos rotores da turbina de eixo horizontal. 38
Figura 4.4 - Gerador Eólico do tipo Darrieus. 39
Figura 5.1 - Protótipo de Rotor Eólico de 3 pás curvas. 44
Figura 5.2 - Protótipo de Rotor Eólico de 3 pás curvas - Vista Frontal. 44
Figura 5. 1 – Protótipo do rotor eólico, com pás mais largas (vista frontal). 45
Figura 5. 2 – Detalhe da pá do rotor 1..... 45
Figura 5. 3 – Detalhe da pá do rotor 2..... 45
Figura 6. 1 – Cilindro ficticio por onde atravessa a massa de ar. 46
Figura 6. 2 – Esquema da conversão da energia cinética do vento em energia mecânica. 48
Figura 6. 3 – Gráfico da variação do C_p em função de v_2/v. 50
Figura 6. 4 – Perfil do rotor eólico em função de λ e do número de pás. 50
Figura 6. 5 – Tipos de rotores eólicos em função de C_p e λ. 51
Figura 6. 6 – Comportamento de um rotor de 2 pás [18]. 52
Figura 7. 1 – Esquema do rotor eólico 53
Figura 7. 2 – Detalhe do fluxo de ar que age sobre a pá do rotor 55
Figura 8.1 – Esquema de um gerador elétrico. 60
Figura 8.2 – Funcionamento de um gerador elementar. 60
Figura 8.3 – Esquema de um condutor metálico submetido à uma força F e inserido em um campo magnético..... 61
Figura 8.4 – Alternador..... 62
Figura 8.5 – Dados do alternador Alxion. 63
Figura 8.6 – Cooler utilizado em computadores. 64
Figura 8.7 – Dínamo utilizado em bicicletas. 65
Figura 10.1 – Fotos do modelo construído em papel cartonado do rotor eólico difinido no projeto. 73
Figura 10.2 – Desenho esquemático do rotor éolico para o sistema de conversão eólico-elétrico..... 73
Figura 10.3 – Desenho 3D do rotor éolico para o sistema de conversão eólico-elétrico..... 74

Figura 10.4 – Esquema da curvatura das pás do protótipo do rotor eólico. 74
Figura 11.1 – Turbina eólica com seus componentes. 77
Figura 11.2 – Perfil da pá gerada em CAD. 78
Figura 11.3 – Perfil elíptico da pá gerada em CAD. 78
Figura 11.4 – Gabaritos utilizados como moldes das pás. 78
Figura 11.5 – Pás do rotor eólico. 79
Figura 11.6 – Protótipo do rotor eólico montado. 80
Figura 11.7 – Protótipo do rotor eólico montado exposto para teste – Vista lateral. 80
Figura 11.8 – Protótipo do rotor eólico montado com o freio de Proni. 81
Figura 11.9 – Protótipo do rotor eólico com o freio de Proni – Vista frontal. 81
Figura 12.1 – Esquema do ensaio com o protótipo. 84

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Potencial Eólico Instalado. Fonte Wikipedia [14]. 22
Tabela 3.1 - BEN [1] – Matriz energética 2006. 28
Tabela 3.2 - Classificação de Energia e Velocidades dos Ventos..... 32
Tabela 3.3 - Potencial Eólico - Elétrico Brasileiro. Fonte CRESESB [16]. 33
Tabela 6. 1 – Potência disponível no vento..... 47
Tabela 7. 1 – dimensões do rotor eólico 56
Tabela 7. 2 – Torque produzido sobre o rotor 57
Tabela 7. 3 – Rotação do rotor..... 58
Tabela 7. 4 – Potência gerada pelo rotor 58
Tabela 9.1 – Comparativo das tensões (cargas) entre baterias ácidas e alcalinas. 70
Tabela 10. 1 – dimensões do rotor eólico para o sistema de conversão eólico-elétrico..... 74
Tabela 10. 2 – Torque gerado no rotor eólico. 75
Tabela 10. 3 – Rotação do rotor..... 75
Tabela 10. 4 – Potência gerada pelo rotor. 76
Tabela 11. 1 – Lista de Materiais utilizados na construção do protótipo. 82
Tabela 11. 2 – Custo total do protótipo. 82
Tabela 13.1 – Consumo total diário estimado de uma residência simples..... 85
Tabela 13.2 – Rendimentos e Carga do sistema. 87
Tabela 13.3 – Características do rotor. 87
Tabela 13.4 – Torque, Potência e rotação do rotor eólico do sistema. 87

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS 3
RESUMO 4
ABSTRACT 4
1. ENERGIA EÓLICA 14
1.1. Introdução 14
1.2. Formação dos Ventos – "Combustível Eólico" 15
1.3. História da Energia Eólica 17
2. PANORAMA DA ENERGIA EÓLICA MUNDIAL 21
3. PANORAMA DA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL 26
3.1. Balanço Energético Nacional (BEN) 26
3.2. Situação Brasileira (Matriz Energética) 26
3.3. Panorama da Energia Eólica no Brasil 27
3.4. Potencial Eólico Brasileiro 30
4. GERADOR EÓLICO 36
4.1. Turbina Eólica 36
4.2. Rotor eólico 37
4.2.1. Rotores de Eixo Horizontal 37
4.2.2. Rotores de Eixo Vertical 39
4.3. Transmissão e caixa multiplicadora 40
4.4. Mecanismos de Controle 40
4.5 Controle de Potência 40
4.6. Gerador 41
4.7. Torre 42
4.8. Sistema de armazenamento de Energia 42
4.9. Transformador 42
5. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO 43
6. CARACTERÍSTICAS DA TURBINA EÓLICA 46
6.1 Energia do vento [17] 46
6.2 Características dos rotores eólicos[17] 47
6.2.1 Coeficiente de Potência 49
6.2.2 Lei de Betz 49
6.2.3 Coeficiente de velocidade de ponta (Tip speed ratio, λ) 50
6.2.4 Velocidade angular no eixo do rotor 51
6.3 Comportamento de um rotor 51
7. DIMENSIONAMENTO DO ROTOR EÓLICO 53
7.1 Dimensões da turbina e condições ambientais 56
7.2 Cálculo do torque na turbina eólica 56
7.3 Cálculo da rotação na turbina eólica 57
7.4 Cálculo da potência na turbina eólica 58
8. CIRCUITO ELÉTRICO 59
8.1 Gerador Elétrico 59
8.2 Componentes de um gerador elétrico de corrente continua 59
8.3 Principio de funcionamento do gerador 60
8.4 Seleção do gerador elétrico 62
8.4.1 Alternador comercial 62
8.4.2 Cooler 64
8.4.3 Dínamo 65
9. SISTEMAS AUXILIARES 66

9.1 Armazenamento de Energia 66
9.2 Conjunto de baterias 66
9.3 Tipos de baterias 67
9.3.1 Bateria selada 67
9.3.2 Bateria ácida 67
9.3.2 Bateria alcalina 68
9.4 Propriedades das baterias 68
9.4.1 Tensões das baterias 68
9.4.2 Capacidade das baterias 69
9.4.3 Rendimento da Bateria 69
9.4.4 Influência da temperatura nas baterias 69
9.5 Controlador de carga 71
10. DEFINIÇÃO DO MODELO DO ROTOR EÓLICO 72
10.1 Dimensões do modelo e condições ambientais de operação 73
10.2 Cálculo do torque no rotor eólico 75
10.3 Cálculo da rotação no rotor eólico 75
10.4 Cálculo da potência no rotor eólico 75
11. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO 77
11.1 Discos e pás 77
11.2 Eixo e mancais de rolamento 79
11.3 Suporte e base do rotor eólico 80
11.4 Freio de Proni 81
11.5 Custo de fabricação do protótipo 82
12. TESTES E ENSAIOS COM O PROTÓTIPO DO ROTOR EÓLICO 83
12.1 Metodologia experimental 83
13. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE CONVERSÃO EÓLICO-ELÉTRICO DE UMA PEQUENA INSTALAÇÃO 85
13.1 Dimensionamento do rotor eólico para a instalação 86
13.2 Dimensionamento do banco de baterias 88
14. CONCLUSÕES 89
15. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 90
16. ANEXOS 1

VARIÁVEIS UTILIZADAS

A: área de captação de ar do rotor eólico

C_p: coeficiente de potência

d: diâmetro do rotor

$d\forall$: volume diferencial

E_c: energia cinética

E_r: energia mecânica transferida para o rotor

$\vec{F}_s$: forças de superfície

f_r: frequência do rotor

$\vec{g}$: aceleração da gravidade

L: largura do rotor

L_c: comprimento de um cilindro fictício, em que está contido ar

m: massa de ar

n: número de rotações por minuto (RPM) do rotor

P_t: potência da turbina

P_v: potência do vento

R: raio do rotor

$\vec{r}$: comprimento medido na direção radial

$\vec{T}$: torque

t: tempo

V: volume de masa de ar

$\vec{V}_{xyz}$: velocidade em relação ao referencial inercial xyz

v: velocidade do ar à montante do rotor

v_1: *velocidade do ar no rotor*

v_2: *velocidade do ar à jusante do rotor*

θ: *ângulo de curvatura da pá do rotor*

λ: *coeficiente de velocidade de ponta*

ρ: *densidade do ar*

ω_r: *velocidade angular do rotor*

1. ENERGIA EÓLICA

1.1. Introdução

Estudos e pesquisas comprovam que a energia solar recebida pela Terra a cada ano é dez vezes superior à contida em toda a reserva de combustíveis fósseis. Mas, atualmente a maior parte da energia utilizada pela humanidade provém de combustíveis fósseis (Petróleo, Gás Natural, Xisto, etc).

Uma das maiores preocupações do século XXI é com a escassez das reservas naturais de combustíveis fósseis chamadas de fontes de energia não renováveis. Em contrapartida, desenvolvimento científico e tecnológico proporciona um grande aumento da utilização de fontes de energia renováveis: Energia eólica, solar, das marés, geotérmica, biomassa, entre outras.

A vida moderna tem sido movida à custa de recursos esgotáveis que levaram milhões de anos para se formar. O uso desses combustíveis em larga escala tem mudado substancialmente a composição da atmosfera e o balanço térmico do Planeta provocando o aquecimento global, degelo nos pólos, chuvas ácidas e envenenamento da atmosfera e todo meio-ambiente. As previsões dos efeitos decorrentes para um futuro próximo, são catastróficas. Alternativas como a energia nuclear, que eram apontadas como solução definitiva, já mostrou que só podem piorar a situação. Com certeza, ou buscamos soluções limpas e ambientalmente corretas ou seremos obrigados a mudar nossos hábitos e costumes de maneira traumática.

É com base de observação dos fatos atuais da situação energética mundial, que este trabalho tem como objetivo a construção de uma pequena turbina eólica para instalações residenciais ou comerciais de pequeno porte, demonstrando que de forma racional é possível aproveitar uma fonte de energia limpa, renovável e abundante e grande parte do Brasil e do Mundo.

1.2. Formação dos Ventos – "Combustível Eólico"

Sabe-se que a energia eólica é a energia cinética do deslocamento de massas de ar, ou do vento.

Os ventos são causados pelo aquecimento diferenciado da superfície da Terra. Esta não uniformidade na temperatura da superfície da Terra, e conseqüentemente, na atmosfera, é devida principalmente à orientação da Terra no espaço e a seus movimentos de rotação e translação. Em última análise, os regimes de ventos são causados por efeitos locais como a orografia e a rugosidade do solo.

Os ventos podem ser classificados como: Ventos globais, Ventos de superfície e Ventos locais (brisas marinhas e ventos da montanha).

Os ventos globais são os que sobem desde o Equador para os pólos, o qual circula pelas camadas mais altas da atmosfera, por volta dos 30º de latitude, a força de Coriolis evita que continue em direção aos pólos. Nessa latitude encontra-se uma zona de altas pressões, pelo que o ar começa a descer de novo. Quando o vento sobe desde o Equador origina uma zona de baixas pressões perto do solo o que atrai ventos do Norte e do Sul. Nos pólos, devido ao ar frio, são originadas zonas de altas pressões.

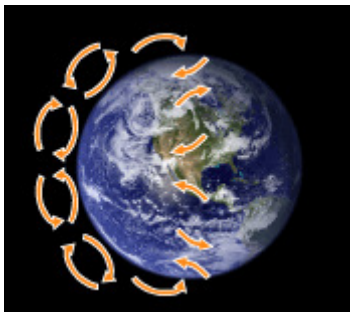


Figura 1.1 - Esquema da origem dos ventos globais.

Os ventos de superfície são muito influenciados pela superfície terrestre até altitudes de 100 metros. O vento é travado pela rugosidade da superfície da terra e pelos obstáculos. A direção perto da superfície é ligeiramente diferente das dos ventos globais, devido à rotação da terra.

Apesar da importância dos ventos locais na determinação dos ventos dominantes numa determinada área, as condições climáticas locais podem influenciar as direções do vento. A direção do vento é influenciada pela soma dos efeitos globais e locais. Quando os ventos globais são suaves, os ventos locais podem dominar o regime de ventos:

Brisas marinhas: durante o dia, a terra aquece mais rapidamente pela influência do sol que o mar. O ar sobe e circula para o mar, criando uma depressão ao nível do solo, que atrai o ar frio do mar. Normalmente ao entardecer há um período de calma, quando as temperaturas do solo e do mar se igualam. Durante a noite os ventos sopram em sentido contrário, tendo a brisa terrestre, normalmente, velocidades inferiores, uma vez que a diferença entre a temperatura do solo e do mar é menor.

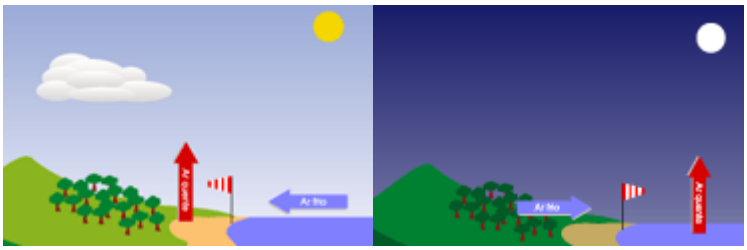


Figura 1.2 - Esquema das brisas marinhas durante o dia e a noite.

Ventos da montanha: um exemplo é o vento do vale o qual tem origem nos declives orientados a sul no hemisfério norte e nos declives orientados a norte no hemisfério sul. O ar quente, com densidade menor, quando se encontra próximo ao declive, sobe seguindo a superfície do declive. Durante a noite a direção do vento inverte-se, passando a descer o declive. Se o fundo do vale for inclinado o ar pode ascender e descender pelo vale, este efeito tem o nome de vento canhão.

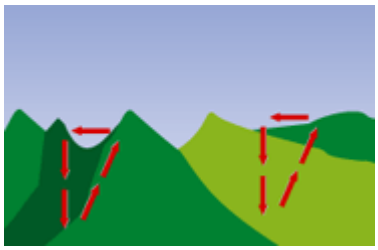


Figura 1.3 - Esquema de ventos da montanha.

As direções dominantes do vento são importantes na localização das turbinas eólicas, no entanto a geografia local também pode influenciar as direções acima indicadas.

O aproveitamento dos ventos ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, para a geração de eletricidade, ou cata-ventos (e moinhos), para trabalhos mecânicos como bombeamento de água.

A energia eólica pode ser medida através de sensores de velocidade e direção do vento, denominados anemômetros. Em geral, a velocidade do vento é medida em m/s (metros/segundo), podendo ainda ser medida em outras unidades, tais como nós, km/h, etc. O parâmetro mais importante é a velocidade média do vento, mas é desejável conhecer também a sua distribuição estatística de velocidades.

1.3. História da Energia Eólica

Desde cedo o Homem beneficiou-se da utilização dos ventos para ventilar naturalmente suas moradias ou secar roupas, tecidos, etc. Porém, é datado de aproximadamente 4.000 a.C. que o Homem, na região da Suméria, enfim utilizou-se das forças geradas pelos ventos, a energia eólica, para a movimentação de embarcações à vela.

Por volta de 3.600 a.C. supõe-se que os Chineses e os Egípcios começaram a utilizar-se da força dos ventos para mover moinhos de eixo vertical, também conhecidos como panémones (ou pananémones), onde o elemento essencial era um rotor que o vento fazia girá-lo. Porém, foi por volta de 1.000 a.C. que os Persas aperfeiçoaram este modelo, canalizando o vento que era direcionado sobre um rotor que se assemelhava a um carrossel com placas verticais.

Foi em torno de 1.000 d.C. que surgiram os primeiros modelos de eixo horizontal, também desenvolvidos pelos Persas. O movimento das Cruzadas, por volta de 1.050 d.C. fez com que essa invenção se espalhasse por toda a Europa, mas este tipo de máquina ainda era muito ineficiente.

Foi no século XII, na Holanda e Grã-Bretanha, que modelos mais sofisticados e eficientes começaram a ser projetados. Mecanismos de mudança de direção do eixo dos "cata-ventos" ou moinhos foram construídos para aproveitar melhor a energia eólica em função da direção e intensidade dos ventos.

No século XV, surgiram moinhos de vento com 4 pás (hélices), com as velas em madeira persiana. Possuíam até 30 metros de envergadura e com potência próxima dos 50 CV para ventos de velocidade média de 7m/s.

Na Holanda principalmente, a partir de 1.450 d.C. aproximadamente, este tipo de moinho foi bastante utilizado para bombear e drenar os campos alagados desta região. Estes moinhos em geral eram construídos em um edifício que servia de estrutura sólida para a parte mecânica do moinho.

Figura 1.4 - Modelo de Moinho de Vento de 4 pás projetado no Século XV.

Figura 1.5 - Moinho de Vento - Zaandjik (Holanda).

Por volta de 1.600 d.C., Maurício de Nassau, um almirante holandês, -, durante a luta da independência da Holanda contra a Espanha, idealizou uma canhoneira posicionada sobre um carro com rodas e movida pela energia eólica, onde o veículo seria impulsionado por velas idênticas as das embarcações marítimas. Este famoso invento ficou conhecido como "O Carro A Vela de Nassau". A construção ficou a cargo do seu engenheiro Symon Stevin, tendo a mesma sido construída com madeira e lona, conseguindo a façanha de, com 28 homens a bordo e favorecida pelos ventos fortes e constantes da costa holandesa, cobrir os 80 km que separam Le Havre de Petten, em exatamente duas horas, surpreendendo os espanhóis num ataque surpresa.

Figura 1.6 - Carro a Vela de Nassau.

Apesar de ocorrer uma grande evolução dos moinhos de vento entre os séculos XVI e XVIII, foram em meados do século XIX que alguns engenheiros e projetistas, patrocinados por burgueses, iniciaram o projeto de novos modelos de moinhos com o propósito de conseguir gerar grandes potências. Nos EUA, em 1883, uma indústria chamada Batavia, projetou e construiu um modelo com 6 pás de 3,6 metros de diâmetro, fornecendo mais de 1KW para ventos de 9m/s e 20W para ventos próximos de 2 m/s. Esse modelo foi aperfeiçoado e em 1.900 construíram um modelo com rotor feito de multilâminas metálicas.

O aperfeiçoamento destas máquinas e com o aparecimento da civilização eletrificada, foram projetados novos sistemas que acoplados aos moinhos, ou rotores, eram capazes de gerar energia elétrica, surgiram então, os Aerogeradores.

Porém devido ao preço baixo dos combustíveis fósseis (petróleo, óleos minerais, etc.), foi somente após a crise mundial do petróleo de 1.973 que o mundo começou a olhar com especial consideração para outras fontes de energia, principalmente as fontes renováveis e limpas, e também relacionadas com o impacto ambiental causado pela emissão de poluentes dos combustíveis fósseis na atmosfera terrestre.

2. PANORAMA DA ENERGIA EÓLICA MUNDIAL

A energia dos ventos é uma abundante fonte de energia renovável, limpa e disponível em todos os lugares. A utilização desta fonte energética para a geração de eletricidade, em escala comercial, teve início há pouco mais de 30 anos e através de conhecimentos da indústria aeronáutica os equipamentos para geração eólica evoluíram rapidamente em termos de idéias e conceitos preliminares para produtos de alta tecnologia.

No início da década de 70, com a crise mundial do petróleo, houve um grande interesse de países europeus e dos Estados Unidos em desenvolver equipamentos para produção de eletricidade que ajudassem a diminuir a dependência do petróleo e carvão.

Segundo a revista DEWI MAGAZINE (Windpower Monthly) apud Secretaria de Energia, Minas e Comunicações do Rio Grande do Sul – SEMC (RS) [9], houve um enorme crescimento da potência eólica Instalada no mundo a partir da década de 90, especialmente na Europa (Alemanha, Dinamarca e Espanha).

Explica-se este espantoso aumento da capacidade de geração de energia eólica na Europa especialmente na segunda metade da década de 90, devido à vertiginosa queda do uso do carvão como alternativa principal para a geração de eletricidade neste mesmo período e também pelo desenvolvimento tecnológico dos projetos de energia eólica que consistem em sistemas avançados de transmissão, melhor aerodinâmica, estratégias de controle e operação das turbinas, etc.

Mas foi principalmente devido à redução dos custos do projeto, que era um dos principais entraves ao aproveitamento comercial da energia eólica, que houve este significativo avanço nas últimas duas décadas. Segundo EWEA (European Wind Energy Association) e o GREENPEACE (2003) apud CBEE - Centro de Referencia para Energia Solar e Eólica [5], projetos eólicos em 2002, utilizando modernas turbinas eólicas em condições favoráveis, apresentaram custos na ordem de 820 Euros por kW instalado e produção de energia a 4 centavos de euros por kWh.

Segundo a WWEA [13] (World Wind Energy Association) ao final de 2006 a capacidade instalada de produção de energia eólica chegou a 73,5 GW. Esta mesma entidade acredita chegarmos a 160GW instalados em 2010, isto em vista do crescimento anual de 25% nos últimos dois anos.

Atualmente temos a Alemanha como o país com a maior potência instalada para geração de Energia Eólica, seguida pela Espanha, Estados Unidos, Índia e Dinamarca. Os 10 maiores países em capacidade instalada podem ser observados na *tabela 2.1*.

Tabela 2.1 - Potencial Eólico Instalado. Fonte Wikipedia [14].

	País	MW
1º	Alemanha	20.622
2º	Espanha	11.615
3º	EUA	11.603
4º	Índia	6.270
5º	Dinamarca	3.136
6º	China	2.604
7º	Itália	2.123
8º	Reino Unido	1.963
9º	Portugal	1.716
10º	França	1.567

Atualmente, a indústria de turbinas eólicas vem acumulando crescimentos anuais acima de 20% e movimentando cerca de 9 bilhões de Euros em vendas por ano. Em 2006 este crescimento ficou na casa dos 23% segundo a EWEA [12], ou seja, um incremento de aproximadamente 8.500 MW na matriz energética eólica instalada, totalizando valor superior a 48 GW na matriz européia representada pela EWEA. A *Figura 2.1* ilustra a participação de cada país (Europa) na matriz energética eólica da EWEA.

A Alemanha possui uma produção de aproximadamente 20,6 GW, totalizando quase um quarto da produção mundial atual, isso devido a grandes investimentos tecnológicos e científicos neste setor.

Os Estados Unidos, com 11,6 GW de potência eólica instalada ao lado da Espanha com os mesmos 11,6 GW são países com forte investimento, desenvolvimento e avanço tecnológico.

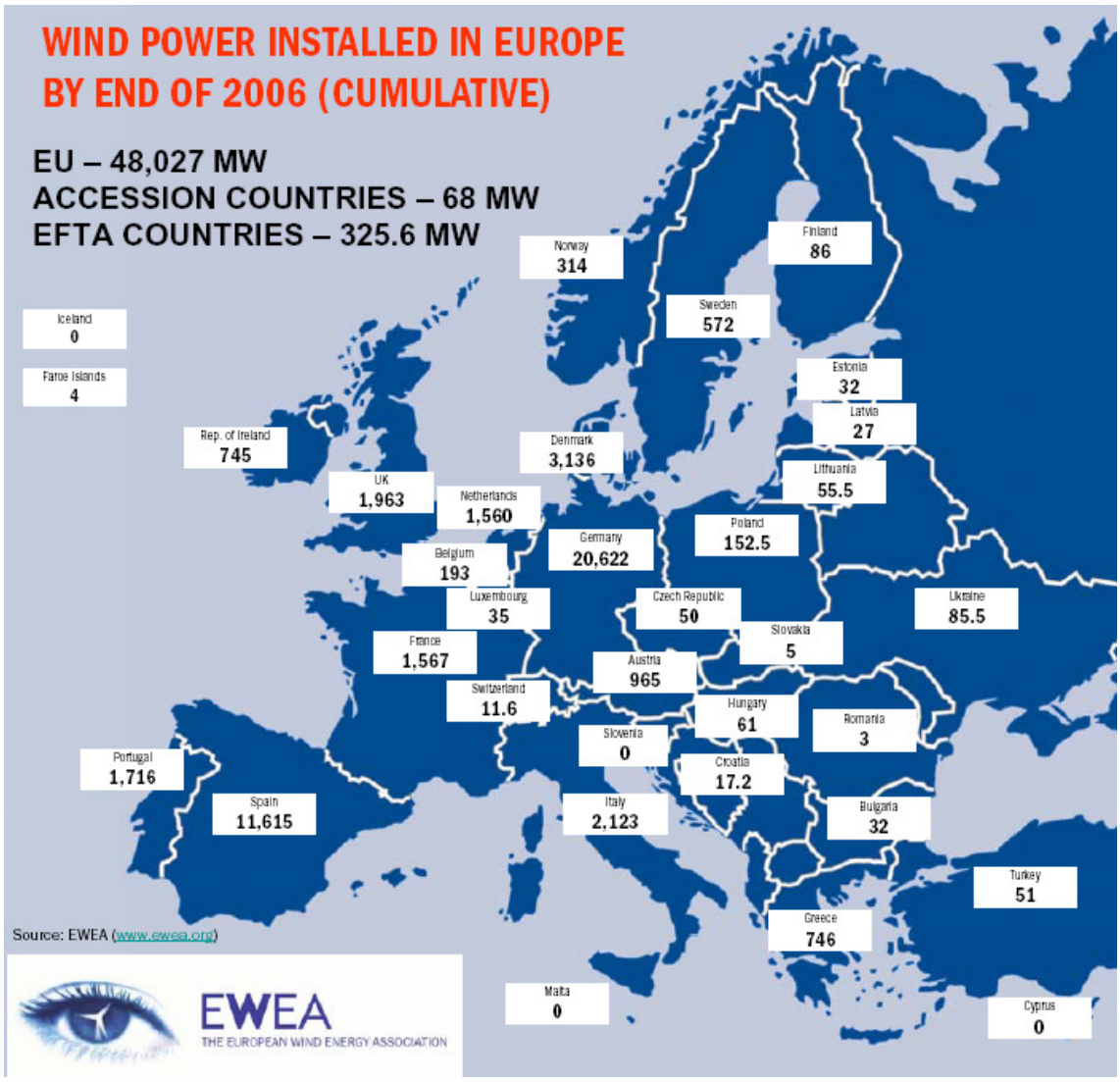


Figura 2.1 - Potência Eólica Instalada na Europa (EWEA) [12].

Surpreendentemente logo a seguir, aparece a Dinamarca (*Figura 2.2*) com expressivos 3,2 GW de potência instalada. Apesar de apresentar uma pequena extensão territorial, aproveita intensamente sua costa marítima para explorar o potencial eólico da região.

Figura 2.2 - Fazenda eólica em Kappel - Dinamarca [10].

Na Dinamarca, a contribuição da energia eólica é de 12% da energia elétrica total produzida, no norte da Alemanha (região de Schleswig Holstein) a contribuição eólica já passou de 16% e a União Européia apoiada na EWEA (European Wind Energy Association) tem como meta gerar 10% de toda eletricidade a partir do vento até 2030.

Figura 2.3 - Turbinas Eólicas instaladas Off-Shore (Litoral da Dinamarca) [10].

Nos Estados Unidos, segundo a AWEA [11] a capacidade de geração eólica está aumentando aceleradamente também. Em 2006 cresceu 27% em relação ao ano anterior e foram investidos 2,4 Bilhões de Dólares, incrementando assim 2.454 MW à matriz de energia eólica, totalizando os 11,6 GW instalados. Para 2007, espera-se um crescimento da ordem de 27% chegando a quase 15GW de potência instalada.

Os 5 Estados com maior capacidade instalada são: Texas (774 MW), Washington (428 MW), Califórnia (212 MW), New York (185 MW) and Minnesota (150 MW).

O Brasil não desponta de uma grande capacidade instalada, apenas 237 MW é a capacidade atual, porém recentemente em 2006 foi construída a segunda maior “Wind Farm” do mundo com 150MW. Este projeto grandioso significou um crescimento de mais de 500% na matriz de energia eólica do país.

3. PANORAMA DA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

3.1. Balanço Energético Nacional (BEN)

O Balanço Energético Nacional tem o objetivo de informar o panorama mundial e brasileiro de oferta e consumo de insumos energéticos. Desta forma, os projetos térmicos ou transformadores de energia podem verificar a viabilidade de consumo destes insumos, definirem estratégias econômicas e padrões de eficiência a fim de garantir o sucesso de um empreendimento.

O relatório anual divulgado revela dados relevantes no que se refere ao consumo industrial de insumos. Assim é possível identificar setorialmente qual é a melhor opção de uso do insumo para o processo no qual o projeto será baseado.

O uso destes insumos também é descrito. Desta forma pode-se verificar a relação entre consumo e demanda de cada setor e, conseqüentemente, verificar o nível de nacionalização embutido e traçar tendências de mercado.

São divulgados dados econômicos mostrando como variou o preço do insumo. Este parâmetro é útil para a viabilização e garantia do investimento a curto, médio e longo prazo.

A capacidade instalada também é um fator indispensável para determinação da localização onde será realizado o empreendimento. Por meio disto, parâmetros importantes de projeto podem ser obtidos.

Além do mais, uma análise econômica e política são necessárias para confirmarmos a validade dos parâmetros apresentados no BEN.

3.2. Situação Brasileira (Matriz Energética)

O Brasil, apesar de ser considerado um país subdesenvolvido, ou em ainda em desenvolvimento, como algumas pessoas preferem dizer, é muito rico em termos energéticos. Possui diversas fontes de obtenção de energia e um potencial muito elevado a ser aproveitado no futuro.

O potencial hidráulico disponível é enorme. Existe uma riqueza enorme do solo onde pode ser aproveitada para produzir a biomassa. Em 2006 o Brasil

alcançou sua auto-suficiência na produção de petróleo, mostrando assim um enorme potencial.

Apesar de tudo, existem problemas para a geração de energia elétrica, que no Brasil pode ser proveniente de: usinas hidrelétrica, termelétricas, nucleares, eólicas entre outras, sendo que a primeira, as usinas hidrelétricas representam algo em torno de 90% da produção.

Apesar de estimarem que apenas 25% do potencial hidráulico brasileiro sejam aproveitados atualmente, existe um grande problema. A região Sul e Sudeste já possuem seus recursos hídricos praticamente saturados e o restante do potencial hidráulico encontram-se muito distantes dos grandes centros de consumo e inviabilizam os seus projetos.

Como o "apagão" tornou-se evidente e, conseqüentemente, o possível racionamento de energia. Assim, começaram as discussões sobre a matriz energética brasileira.

Com isso existe a necessidade de reformularmos o modelo energético utilizado no país, buscando não somente novas fontes de geração, explorando principalmente as fontes renováveis (Biomassa, Eólica, Solar), mas também buscar a otimização dos processos já existentes.

3.3. Panorama da Energia Eólica no Brasil

Como foi visto, o Brasil encontra-se em situação privilegiada no que se refere a suas fontes primárias de oferta de energia. Verifica-se que a maioria da energia consumida no país é proveniente de fontes renováveis de energia (hidroeletricidade, biomassa em forma de lenha e derivados da madeira, como serragem, carvão vegetal, derivados da cana-de-açúcar, eólica e outras mais).

A Tabela 3.1 revela que a utilização de Turbinas eólicas para gerar energia elétrica é insignificante, porém de 2005 para 2006 houve um crescimento muito significativo de 263%, totalizando 236 GWh na matriz energética brasileira. Isto se deve a efetivação de um grandioso projeto, o

Parque (Usina) Eólico de Osório (RS), levando o Brasil aos atuais 237 MW de capacidade instalada.

Tabela 3.1 - BEN[1] – Matriz energética 2006.

SELEÇÃO DE INDICADORES ENERGÉTICOS						
ESPECIFICAÇÃO	**UNIDADE**	**2005**	**2006**	**%06/05**	**Estrutura (%) 2005**	**Estrutura (%) 2006**
OFERTA INTERNA DE ENERGIA	mil tep	218.663	225.744	3,2	100,0	100,0
PERDAS NA DISTRIBUIÇÃO E TRANSFORMAÇÃO	mil tep	22.754	23.256	2,2	10,4	10,3
CONSUMO FINAL	mil tep	195.909	202.488	3,4	89,6	89,7
PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E ÓLEO DE XISTO	mil m³	94.997	100.093	5,4		
COMÉRCIO EXTERNO LÍQUIDO DE PETRÓLEO E DERIVA	mil m³	1.647	-3.197	-294,1		
Nota: sinal negativo representa exportação líquida						
PRODUÇÃO DE GÁS NATURAL	milhões m³	17.699	17.706	0,0		
IMPORTAÇÃO DE GÁS NATURAL	milhões m³	8.998	9.789	8,8		
PRODUÇÃO DE LÍQUIDOS DE GÁS NATURAL	mil m³	4.602	5.013	8,9		
OFERTA TOTAL DE ENERGIA ELÉTRICA	GWh	441.980	459.640	4,0	100,0	100,0
GERAÇÃO INTERNA PÚBLICA	GWh	363.156	376.817	3,8	82,2	82,0
HIDRÁULICA	GWh	325.053	335.076	3,1	73,5	72,9
TÉRMICA	GWh	38.038	41.505	9,1	8,6	9,0
EÓLICA	GWh	65	236	263,1	0,0	0,1
GERAÇÃO INTERNA DE AUTOPRODUTOR	GWh	39.782	41.668	4,7	9,0	9,1
HIDRÁULICA	GWh	12.404	12.744	2,7	2,8	2,8
TÉRMICA	GWh	27.378	28.924	5,6	6,2	6,3
IMPORTAÇÃO	GWh	39.042	41.155	5,4	8,8	9,0

A Usina Eólica de Osório contribui atualmente com 150 MW de potência instalada a partir de 75 torres de aerogeradores de 98 metros de altura e 810 toneladas de peso cada uma, modelo E-70/2000 KW, sendo que com as hélices atinge 140 metros de altura (as pás têm 70 metros de comprimento cada.

Os módulos das torres são construídos em Gravataí e montados em Osório. As pás dos aerogeradores são fabricadas em Sorocaba (SP) pela Wobben Windpower, subsidiária da ENERCON GmbH, da Alemanha.

O Parque de Osório é um empreendimento da Ventos do Sul Energia, pertencente à espanhola Enerfin/Enervento (Grupo Elecnor) com 90%, à alemã Wobben com 9% e à brasileira CIP Brasil, com 1%. O empreendimento envolveu um aporte de R$ 670 milhões, dos quais 69% financiados pelo BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social).

Figura 3.1 - Parque Eólico de Osório-RS. Fonte: Wikipedia[14].

Outra Usina eólica de grande capacidade instalada no Brasil é a de Rio do Fogo, situada no Estado do Rio Grande do Norte, também com sua operação iniciada recentemente.

.Além do Parque Eólico de Osório (RS) e a de Rio do Fogo (RN), existem outros projetos de energia eólica em atividade no Brasil conforme se vê na figura 3.2.

Figura 3.2 - Projetos de Energia Eólica no Brasil. Fonte CBEE[5].

Voltando um pouco ao passado, várias pesquisas científicas foram realizadas nas décadas de 70 e 80 voltadas à geração de energia a partir de aerogeradores, porém pelos altos custos de implementação e manutenção deste tipo de projeto e principalmente pelo aspecto da facilidade de geração de

energia através de turbinas hidráulicas demorou-se para a implementação da primeira turbina eólica brasileira.

Foi em julho de 1992, que através do CBEE (Centro Brasileiro de Energia Eólica) e da COELPE (Companhia Energética de Pernambuco) que foi instalado na ilha de Fernando de Noronha uma turbina eólica de 75 KW de potência.

Este projeto serviu para o inicio da exploração desta fonte de energia inesgotável e limpa no nosso país, principalmente por ter sido situado numa área de total preservação e proteção ambiental, como a ilha de Fernando de Noronha, umas das mais belas paisagens do nosso planeta.

3.4. Potencial Eólico Brasileiro

Para a avaliação do potencial eólico de uma região faz-se necessária à coleta de dados de vento com precisão e qualidade, pois este será o primeiro e fundamental passo a um projeto de aproveitamento do recurso eólico como fonte de energia.

Estudos recentes de diversas instituições ligadas à geração de energia através do vento estimam que o potencial eólico brasileiro seja de 60 GW.

Os primeiros anemógrafos computadorizados e sensores especiais para energia eólica foram instalados no Ceará e em Fernando de Noronha/Pernambuco apenas no início dos anos 90. Os bons resultados obtidos com aquelas medições favoreceram a determinação precisa do potencial eólico daqueles locais e a instalação de turbinas eólicas. Outros estados brasileiros seguiram o exemplo e com o apoio da CBEE [5] e da ANEEL [15] em 1998, consegui-se levantar um mapa preliminar dos ventos no Brasil gerado a partir de simulações computacionais com modelos atmosféricos.

Os recursos apresentados na legenda da *Figura 3.3* referem-se à velocidade média do vento e energia eólica média a uma altura de 50m acima da superfície para 5 condições topográficas distintas.

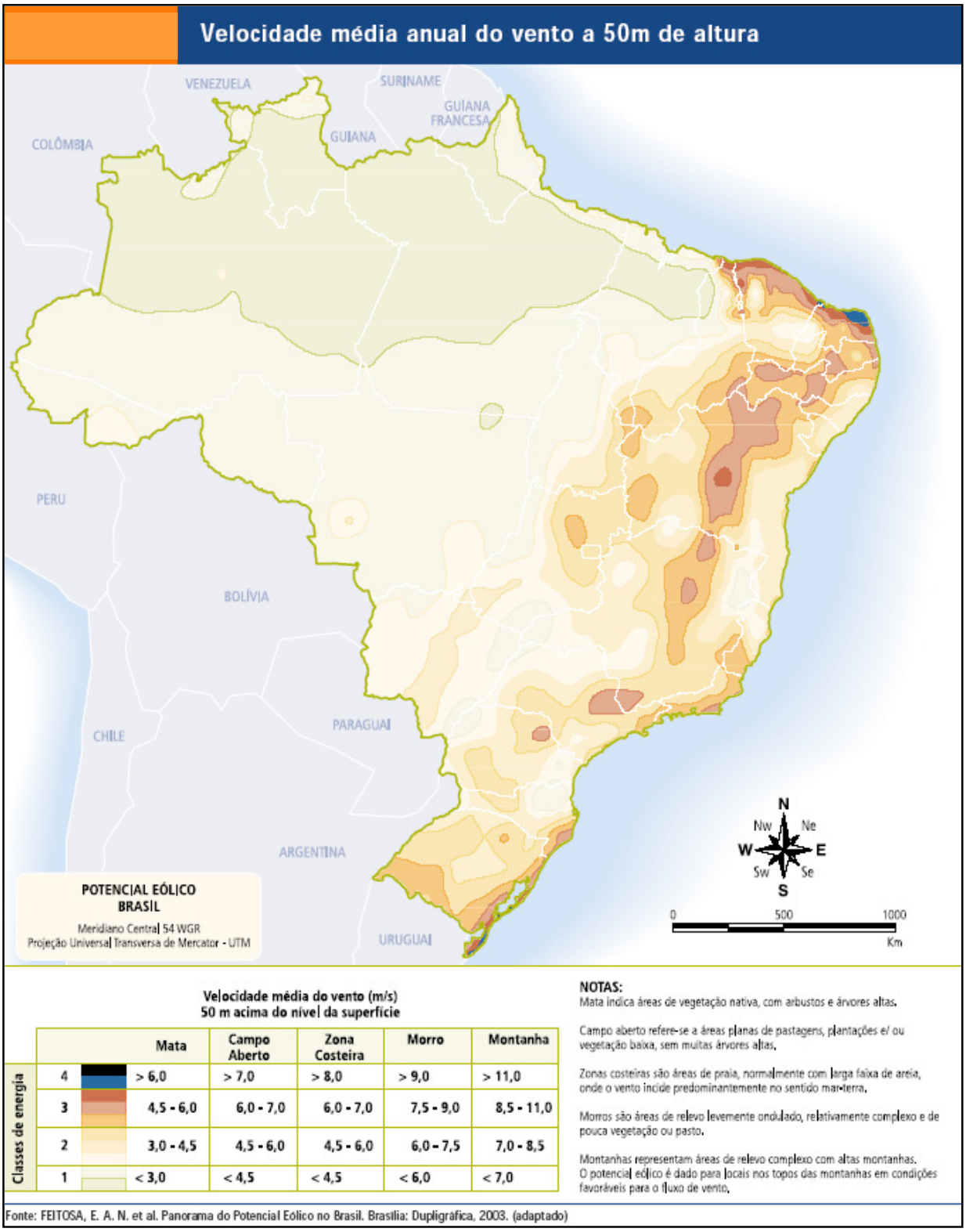


Figura 3.3 - Mapa de ventos do Brasil. Resultados preliminares do CBEE[5] e ANEEL[15].

Ainda na legenda, a classe 1 representa regiões de baixo potencial eólico, de pouco ou nenhum interesse para o aproveitamento da energia eólica. A classe 4 corresponde aos melhores locais para aproveitamento dos ventos

no Brasil. As classes 2 e 3 podem ou não ser favoráveis, dependendo das condições topográficas.

Por exemplo: um local de classe 3 na costa do Nordeste (zona costeira) pode apresentar velocidades médias anuais entre 6,5 e 8 m/s, enquanto que um local de classe 3 no interior do Maranhão (mata) apresentará apenas valores entre 4,5 e 6 m/s.

A *Tabela 3.2* mostra a classificação das velocidades de vento e regiões topográficas utilizadas no mapa da *Figura 3.3*. Os valores correspondem à velocidade média anual do vento a 50 m de altura em m/s (Vm) e à densidade média de energia média (EM) em W/m2.

Tabela 3.2 - Classificação de Energia e Velocidades dos Ventos.

TABELA — Definição das classes de energia

	Mata		Campo aberto		Zona costeira		Morros		Montanhas	
Classe	V_m (m/s)	E_m (W/m²)	V_m (m/s)	E_m (W/m²)	V_m (m/s)	E_m (W/m²)	V_m (m/s)	E_m (W/m²)	V_m(m/s)	E_m (W/m²)
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	5 – 6,5	100 - 250	6 – 7,5	200 – 380	7 – 8,5	300 - 650
1	< 3	< 25	< 4,5	< 80	< 5	< 100	< 6	< 200	< 7	< 300

Fonte: FEITOSA, E. A. N. et al. Panorama do Potencial Eólico no Brasil. Brasília: Dupligráfica, 2003.

Outro estudo importante, em âmbito nacional, foi publicado pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica – CRESESB [16]. Trata-se do ***Atlas do Potencial Eólico Brasileiro***. Nesse estudo estimou-se um potencial eólico brasileiro da ordem de 143,47 GW ou 272,2 TWh/ano.

Conforme a Tabela 3.3, este potencial eólico do Brasil estimado foi calculado por integração de áreas nos mapas temáticos apresentados nas *figuras 3.4 e 3.5* e a partir de algumas premissas significativas.

Tabela 3.3 - Potencial Eólico - Elétrico Brasileiro. Fonte CRESESB[16].

	INTEGRAÇÃO POR FAIXAS DE VELOCIDADES					INTEGRAÇÃO CUMULATIVA			
REGIÃO	VENTO [m/s]	ÁREA [km²]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [GW]	FATOR DE CAPACIDADE	ENERGIA ANUAL [TWh/ano]	VENTO [m/s]	ÁREA (CUMULATIVA) [km²]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [GW]	ENERGIA ANUAL [TWh/ano]
NORTE	6 - 6,5	11460	22,92	0,13	25,58	>6	24206	48,41	70,49
	6,5 - 7	6326	12,65	0,17	18,46	>6,5	12746	25,49	44,91
	7 - 7,5	3300	6,60	0,20	11,33	**> 7 m/s**	**6420**	**12,84**	**26,45**
	7,5 - 8	1666	3,33	0,25	7,15	>7,5	3120	6,24	15,11
	8 - 8,5	903	1,81	0,30	4,65	>8	1454	2,91	7,96
	>8,5	551	1,10	0,35	3,31	>8,5	551	1,10	3,31
NORDESTE	6 - 6,5	146589	293,18	0,13	327,19	>6	245105	490,21	649,50
	6,5 - 7	60990	121,98	0,17	178,02	>6,5	98516	197,03	322,31
	7 - 7,5	24383	48,77	0,20	83,73	**> 7 m/s**	**37526**	**75,05**	**144,29**
	7,5 - 8	9185	18,37	0,25	39,43	>7,5	13143	26,29	60,56
	8 - 8,5	3088	6,18	0,30	15,91	>8	3958	7,92	21,13
	>8,5	870	1,74	0,35	5,23	>8,5	870	1,74	5,23
CENTRO-OESTE	6 - 6,5	41110	82,22	0,13	91,76	>6	50752	101,50	120,83
	6,5 - 7	8101	16,20	0,17	23,65	>6,5	9642	19,28	29,07
	7 - 7,5	1395	2,79	0,20	4,79	**> 7 m/s**	**1541**	**3,08**	**5,42**
	7,5 - 8	140	0,28	0,25	0,60	>7,5	146	0,29	0,63
	8 - 8,5	6	0,01	0,30	0,03	>8	6	0,01	0,03
	>8,5	0	0,00	0,35	0,00	>8,5	0	0,00	0,00
SUDESTE	6 - 6,5	114688	229,38	0,13	255,99	>6	175859	351,72	446,07
	6,5 - 7	46302	92,60	0,17	135,15	>6,5	61171	122,34	190,08
	7 - 7,5	11545	23,09	0,20	39,64	**> 7 m/s**	**14869**	**29,74**	**54,93**
	7,5 - 8	2433	4,87	0,25	10,44	>7,5	3324	6,65	15,29
	8 - 8,5	594	1,19	0,30	3,06	>8	891	1,78	4,84
	>8,5	297	0,59	0,35	1,78	>8,5	297	0,59	1,78
SUL	6 - 6,5	121798	243,60	0,13	271,86	>6	171469	342,94	424,74
	6,5 - 7	38292	76,58	0,17	111,77	>6,5	49671	99,34	152,88
	7 - 7,5	9436	18,87	0,20	32,40	**> 7 m/s**	**11379**	**22,76**	**41,11**
	7,5 - 8	1573	3,15	0,25	6,75	>7,5	1943	3,89	8,71
	8 - 8,5	313	0,63	0,30	1,61	>8	370	0,74	1,95
	>8,5	57	0,11	0,35	0,34	>8,5	57	0,11	0,34
TOTAL BRASIL ESTIMADO						>6	667391	1334,78	1711,62
						>6,5	231746	463,49	739,24
						> 7 m/s	**71735**	**143,47**	**272,20**
						>7,5	21676	43,35	100,30
						>8	6679	13,36	35,93
						>8,5	1775	3,55	10,67

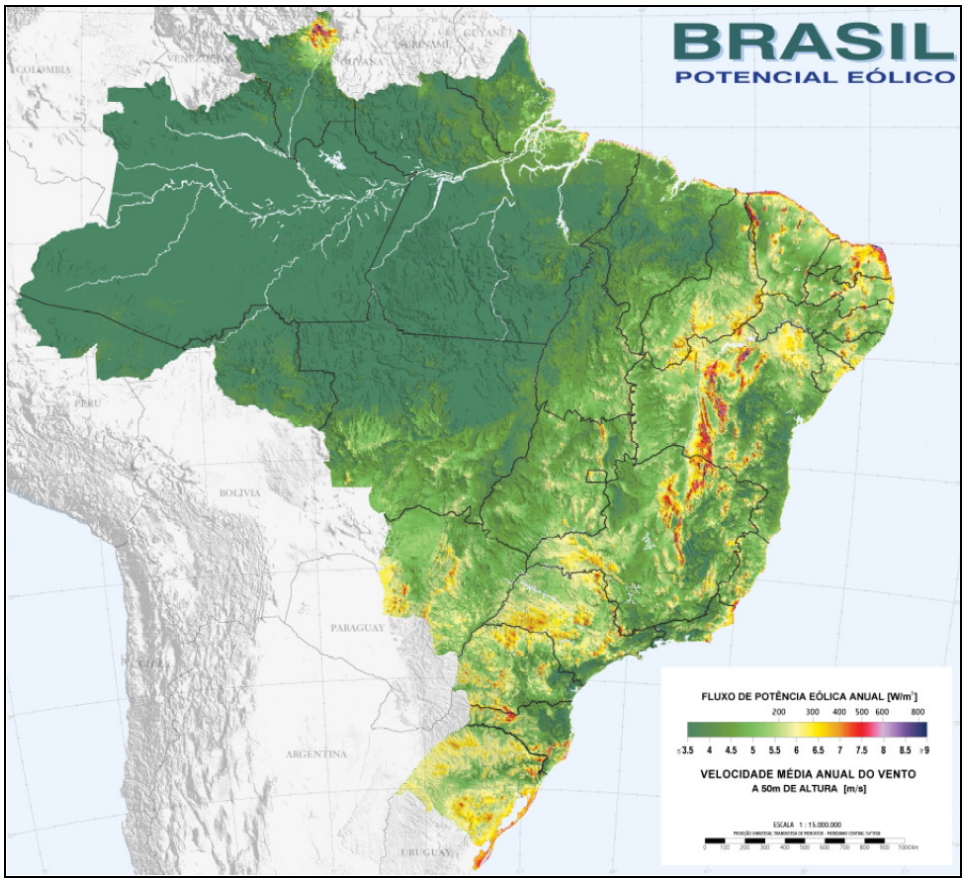


Figura 3.4 - Potencial Eólico do Brasil - Velocidade Média Anual do vento. Fonte CRESESB[16].

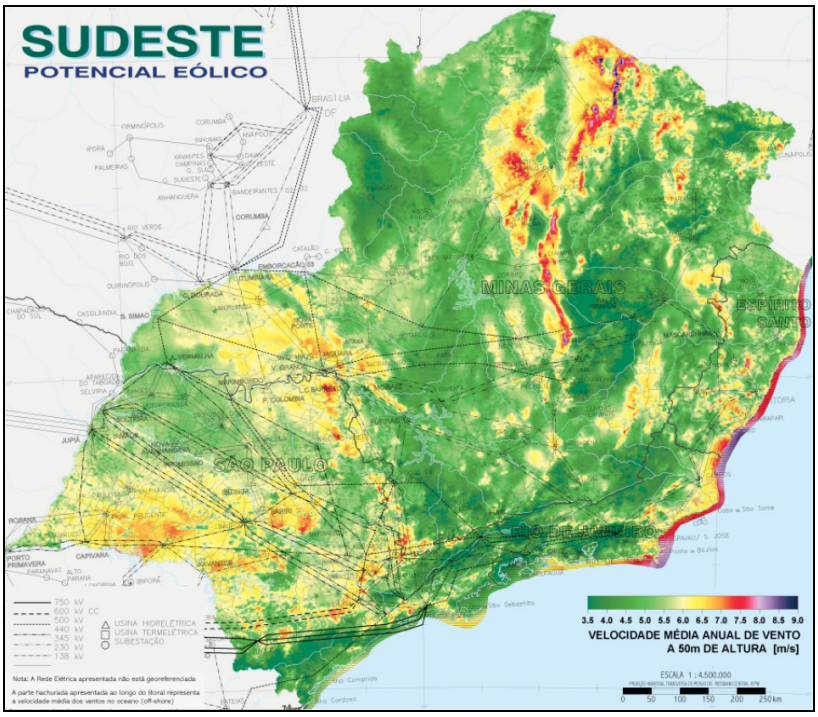


Figura 3.5 - Potencial Eólico da Região Sudeste. Fonte CRESESB[16].

Analisando o gráfico do potencial eólico brasileiro, percebe-se que grande parte do Sul do país apresenta índices de velocidades de ventos superiores a 6,5m/s e favoráveis a construção de parques eólicos, como o de Osório no Rio Grande do Sul.

Outra faixa com ótimo potencial a ser explorado é o litoral do Nordeste. Alguns projetos já são desenvolvidos nesta área, porém a demanda de energia desta região é pequena quando comparada às Regiões Sul e Sudeste.

Pensando em um projeto de menor escala, no caso específico deste trabalho, que visa construir uma turbina eólica de pequeno porte para pequenas instalações comerciais e residenciais, a Região Sudeste é uma região de grande população, portanto de grande consumo energético devido ao seu vasto pólo industrial e comercial. Seria interessante, tanto no ponto de vista ambiental, como econômico encontrar áreas dentro desta região para implementar pequenas turbinas eólicas e gerar energia elétrica de forma limpa e renovável.

4. GERADOR EÓLICO

4.1. Turbina Eólica

A Turbina eólica é a máquina que faz a conversão da energia cinética do vento em energia elétrica. Ela ganhou uma grande popularidade rapidamente, pois a energia eólica é um tipo de energia renovável, diferente da queima de combustíveis fósseis.

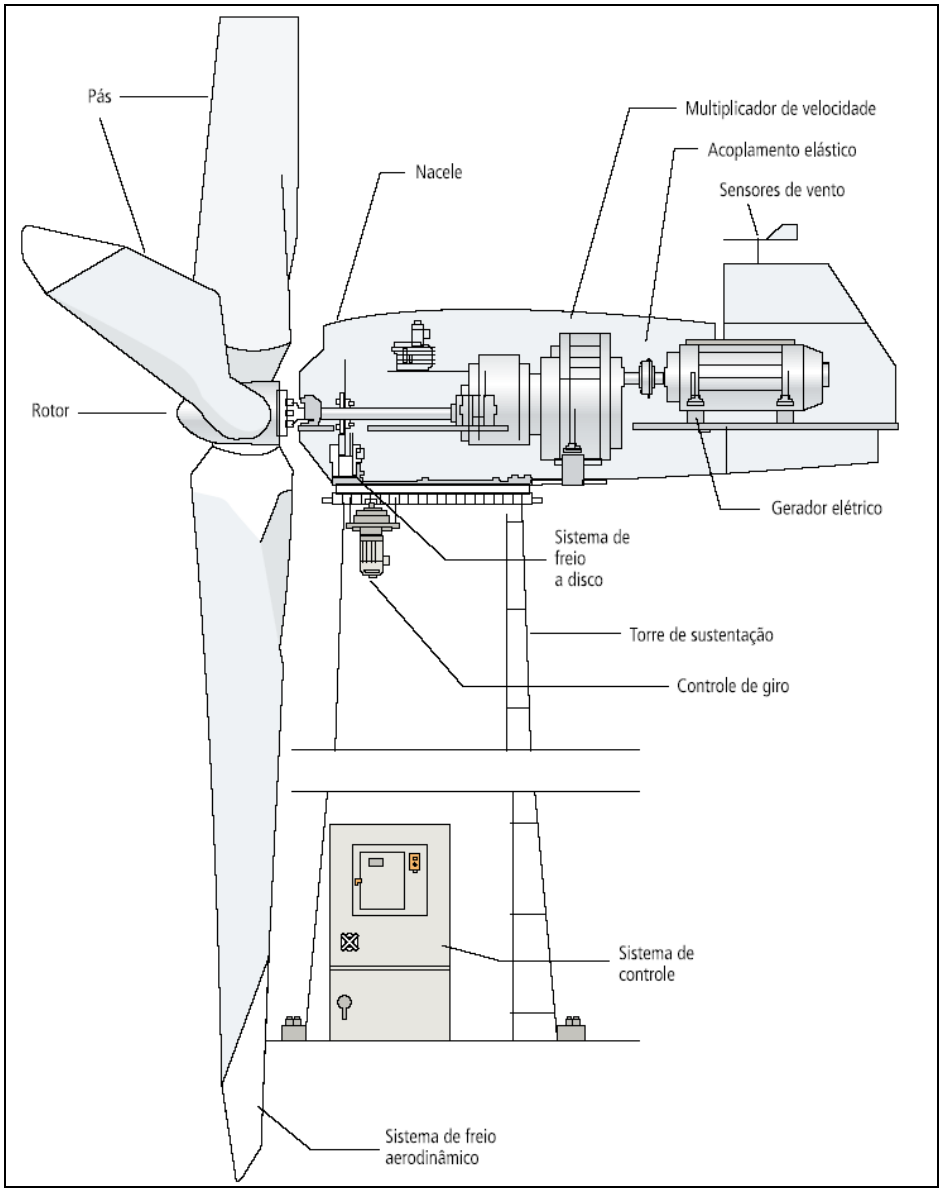


Figura 4.1 - Desenho Esquemático de uma Turbina Eólica.

Ela é composta por vários componentes, que trabalham em harmonia para conseguir um maior rendimento final. Basicamente são considerados:

rotor; transmissão e caixa multiplicadora; gerador elétrico; mecanismo de controle; torre; sistema de armazenamento; transformador; acessórios.

4.2. Rotor eólico

O rotor é à parte da máquina responsável por captar a energia do vento e transformar em energia mecânica de rotação. Os rotores possuem um perfil especialmente projetado e são muito similares àqueles utilizados em asas de avião.

Existem vários tipos de rotores e eles podem ser classificados de várias formas, mas a principal é a orientação do eixo, dessa forma estes podem ser rotores de eixo horizontal ou rotores de eixo vertical.

4.2.1. Rotores de Eixo Horizontal

São os tipos mais comuns de rotor encontrados para geração de energia elétrica. O seu principio de funcionamento baseia-se nas forças aerodinâmicas de sustentação e arrasto. A força de sustentação ocorre quando um corpo obstrui o movimento do vento e sofre forças perpendiculares ao escoamento, já às forças de arrasto ocorrem quando as forças atuam na direção do escoamento.

Os rotores que funcionam com a ação das forças de sustentação permitem liberar uma maior potência que aqueles que funcionam com as forças de arrasto.

Esse tipo de rotor deve possuir mecanismos de controle e atuadores que permitam que o disco formado pelas pás sempre fique em posição perpendicular ao vento.

Os principais tipos são:

- **Rotor multipás**

A sua principal aplicação é o bombeamento de água. Possuem uma boa relação entre o torque de partida e a área de varredura do rotor, mesmo para ventos fracos, sendo o seu melhor rendimento às baixas velocidades. Dessa forma há uma limitação da potência máxima extraída por área do rotor, sendo o seu uso indicado mais para aeromotores do que geração de energia elétrica.

- **Rotor de três ou duas pás**

É o tipo mais utilizado para geração de energia elétrica, pois possui uma grande relação de potência extraída por área de varredura do rotor. O seu melhor rendimento ocorre para velocidade de vento alto (12 m/s), mas possui um torque de partida e um rendimento baixo, para velocidade de vento baixa, incompatibilizando o seu uso para sistemas que requeiram altos momentos de força ou carga variável.

Geralmente são utilizadas 3 pás (*Figura 4.1*). , mas para regiões com velocidades médias muito altas são utilizados rotores de 1 ou 2 pás devido à maior geração de ruído acústico. E normalmente são utilizadas pás rígidas de madeira, alumínio ou fibra de vidro reforçada. Na *Figura 4.2*, pode ser observado em detalhe o rotor desse tipo de turbina e a sua forma em asa.

Figura 4.2 - Turbina eólica de eixo horizontal de 3 pás.

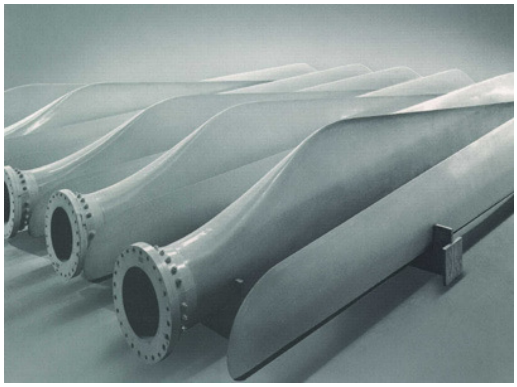


Figura 4.3 - Detalhe das pás dos rotores da turbina de eixo horizontal.

4.2.2. Rotores de Eixo Vertical

A grande vantagem dos rotores de eixo vertical é não necessitarem de um sistema de orientação para acompanhar a direção do vento, reduzindo à complexidade de construção e os esforços devidos às forças de Coriolis.

Mas a grande desvantagem é possuírem o ângulo de ataque e de deslocamento em relação à direção dos ventos das pás constantemente alterados devido ao movimento de rotação. Gerando dessa forma forças resultantes alternadas que limitam o seu rendimento e causam vibrações acentuadas em toda estrutura

Os principais tipos de rotores de eixo vertical são:

- **Darrieus**

Possuem a curva de rendimento próxima aos rotores de três pás de eixo horizontal, dessa forma são mais utilizados para a geração de energia elétrica.

Eles são movidos por forças de sustentação e construídos com lâminas curvas, geralmente duas ou três, de perfil aerodinâmico, tendo as duas pontas atadas ao eixo vertical.

Figura 4.4 - Gerador Eólico do tipo Darrieus.

Comparando-se os rotores de três pás com o Darrieus, ambos possuem um sistema de transmissão bastante simples e a dificuldade do rotor de três pás terem que funcionar somente na direção do vento é compensado pela facilidade na implementação dos sistemas aerodinâmicos e de controle de potência, ampliando a sua faixa de utilização e deixando menos susceptível

aos danos causados pelos ventos fortes, diferente do Darrieus que deve possui um sistema de controle de potência mais aprimorado.

Com isso esse rotor fica em desvantagem ao rotor de eixo horizontal, sendo pouco utilizado.

- **Savonius**

Ele apresenta uma curva de rendimento em relação à velocidade do vento próxima aos rotores multipás, mas numa faixa mais estreita e de menor amplitude. Com essas características ele é mais indicado para a utilização em aeromotores, principalmente para bombeamento de água. Ele possui um custo final baixo, devido à simplicidade do sistema de transmissão e construção do rotor, podendo compensar o seu menor rendimento.

4.3. Transmissão e caixa multiplicadora

A transmissão serve para transmitir a energia mecânica do rotor até o gerador, sendo composta por eixos, mancais, engrenagens de transmissão e acoplamentos. Tradicionalmente é colocada uma caixa de transmissão entre o rotor e o gerador de forma a adaptar a baixa velocidade do rotor à velocidade mais elevada dos geradores convencionais, pois a velocidade angular dos rotores varia de 20 a 150 RPM enquanto os geradores trabalham a rotações mais elevadas na faixa de 1220 a 1800 RPM.

Alguns fabricantes utilizando geradores multipólos de baixa velocidade e grandes dimensões conseguiram abandonar a utilização da caixa de transmissão.

4.4. Mecanismos de Controle

Os mecanismos de controle são utilizados para orientar o rotor na direção do vento, controlar a velocidade e carga, etc. E os mecanismos podem ser mecânicos, aerodinâmicos ou eletrônicos.

4.5 Controle de Potência

O aumento do fluxo de ar faz com que as forças de sustentação aerodinâmicas aumentem, conseqüentemente há um aumento na energia extraída da turbina, dessa forma é necessário um sistema de controle de potência do rotor para evitar o sobrecarregamento elétrico e do sistema de

transmissão. Atualmente são utilizados dois diferentes tipos de controle de potência, o controle estol (stall) e controle de passo (pitch).

- Controle de estol

Esse tipo de controle é passivo, sendo as pás fixas. O ângulo de passo das pás e escolhido de forma que, para velocidades de vento superior à velocidade nominal ocorra um descolamento do escoamento. Dessa forma a força de sustentação é reduzida e a força de arrasto aumenta

- Controle de Passo

Ele é um controle ativo, necessitando do um sinal do controlador de potência. Quando a potência nominal do gerador e ultrapassada, devido ao aumento da velocidade do vento, as pás do rotor giram em torno do seu próprio eixo, alterando o ângulo de passo. Dessa forma, elas funcionam como as turbinas com controle de estol, fazendo com que ocorra um descolamento do ar para velocidades acima da nominal, diminuindo a força de sustentação e aumentando a força de arrasto.

4.6. Gerador

O gerador é o equipamento responsável pela conversão eletro-mecânica e é um problema tecnologicamente dominado. Mas a integração com sistemas eólicos faz surgir uma série de problemas, dos quais são:

- Variação na velocidade do vento, afetando a velocidade de rotação de entrada no gerador.
- Variação do torque de entrada.
- A exigência dos geradores de terem uma freqüência e tensão constante na energia final produzida.
- Necessita ter uma facilidade de instalação, operação, manutenção devido ao isolamento que o gerador se encontra no topo da turbina eólica a grandes altitudes.

Para resolver esses problemas, há uma série de alternativas de conjuntos moto-geradores como geradores de corrente contínua, geradores

síncronos, geradores assíncronos, geradores de comutador de corrente alternada.

4.7. Torre

A torre é a parte estrutural do sistema responsável por agüentar todo o peso e carga da turbina eólica e posicionar o rotor a uma altitude necessária para o seu funcionamento. Elas são fabricadas de metal ou de concreto e algumas são sustentadas por cabos tensores.

4.8. Sistema de armazenamento de Energia

O vento possui um comportamento variável e por isso é necessário um sistema de armazenamento para suprir a demanda. Uma forma de se fazer isso é armazenar o excesso de energia produzida durante os períodos de ventos de alta velocidade, e usá-la quando o consumo não puder ser atendido devido à insuficiência de vento. Essa forma de armazenamento pode ser através de baterias ou sob a forma de energia potencial gravitacional.

4.9. Transformador

Ele e responsável por fazer o acoplamento elétrico entre o aerogerador e a rede elétrica. Através dele e possível alterar a tensão do gerador para a tensão da rede elétrica, tornando possível à transmissão de energia elétrica.

5. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

Inicialmente, antes de iniciar o projeto e construção da turbina eólica, entrando em seus detalhes: determinação de potência, material, cálculos de eficiência, aerodinâmica, resistência à fadiga, etc, foi proposta a construção de um protótipo, utilizando material de baixo valor comercial, apenas para visualizar o funcionamento de um pequeno rotor eólico para pequenas instalações, que este projeto visa obter ao seu final.

Decidiu-se que seria construído um protótipo de turbina de eixo horizontal, com diâmetro de aproximadamente 60 cm a 70 cm. Para este primeiro protótipo ficou determinado que ele fosse de 3 pás curvas.

A curvatura destas pás inicialmente não foi motivo de estudos mais profundos e cálculos, apenas concebido a partir da observação do funcionamento de rotores de bombas hidráulicas, construídos de forma que consiga transferir a máxima quantidade de energia ao fluído que esteja sendo bombeado. Neste caso, deseja-se obter o maior aproveitamento da energia do vento para girar um eixo e produzir energia elétrica através do mesmo.

Para a construção do primeiro protótipo, o rotor eólico de 3 pás curvas, usou-se apenas material de baixo valor como já foi mencionado. Varetas de bambu, barbante, mídias de cd usadas, cartolina e cola adesiva tipo Super Bonder. As *Figuras 5.1* e *5.2* ilustram o protótipo de 3 pás curvas construído.

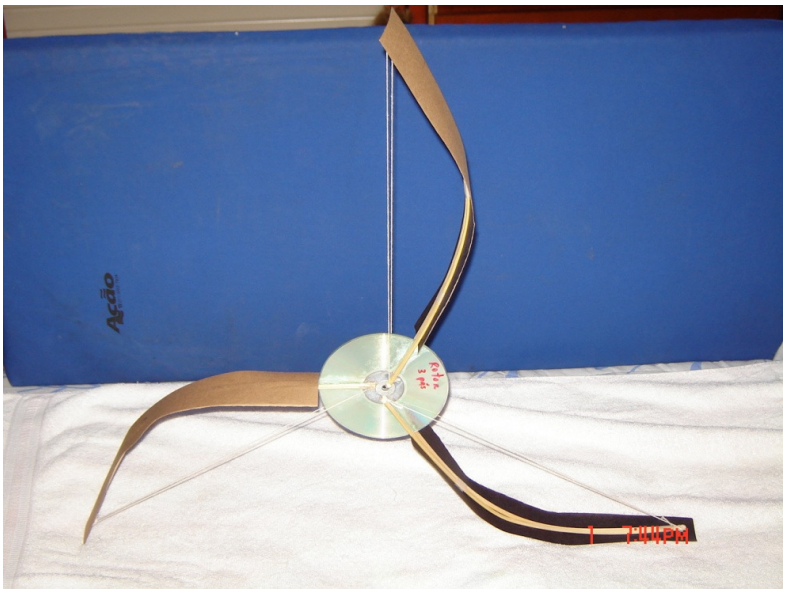


Figura 5.1 - Protótipo de Rotor Eólico de 3 pás curvas.

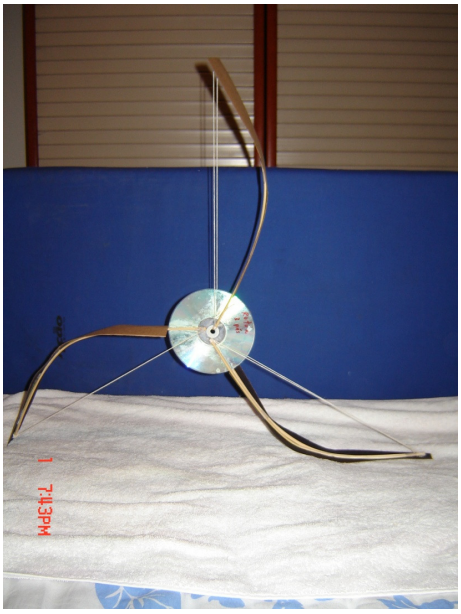


Figura 5.2 - Protótipo de Rotor Eólico de 3 pás curvas - Vista Frontal.

Também foi construído um rotor com pás mais largas para um aproveitamento melhor da potência fornecida pelo ar. E a partir das dimensões desse protótipo foram realizados cálculos de torque, rotação e potência que estão descritos nas próximas páginas do trabalho.

Figura 5. 1 – Protótipo do rotor eólico, com pás mais largas (vista frontal).

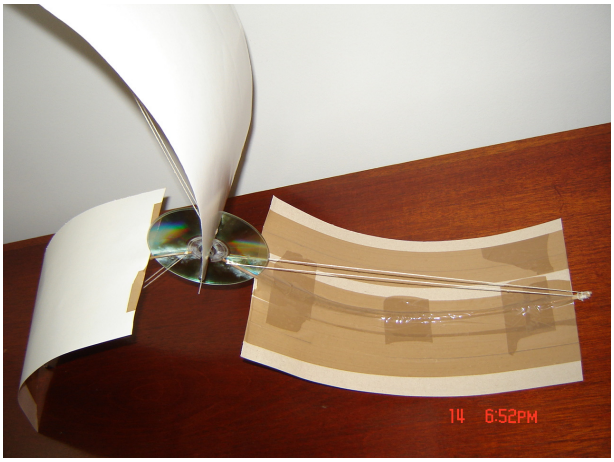


Figura 5. 2 – Detalhe da pá do rotor 1.

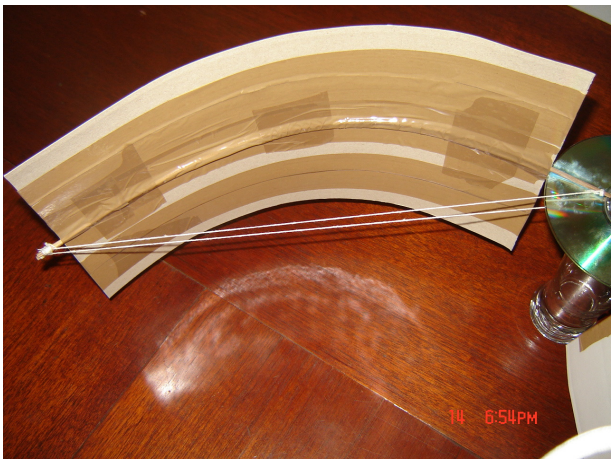


Figura 5. 3 – Detalhe da pá do rotor 2.

6. CARACTERÍSTICAS DA TURBINA EÓLICA

6.1 Energia do vento [17]

A energia proveniente do vento consiste na energia cinética da massa de ar em movimento. Considerando uma velocidade constante e direção fixa do vento, pode ser calculada a potência fornecida pelo vento a partir de uma determinada área de captação.

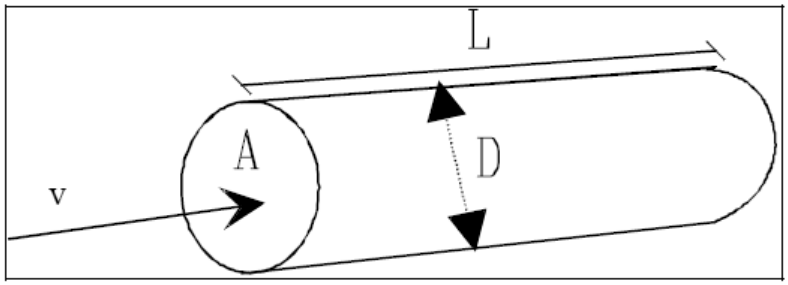


Figura 6. 1 – Cilindro ficticio por onde atravessa a massa de ar.

Dessa forma o volume de massa de ar contido em um cilindro fictício é dado por:

$$V = AL \qquad \textit{(eq. 6. 1)}$$

A massa de ar contida nesse volume é igual à densidade do ar multiplicada pelo volume:

$$m = \rho V = \rho AL \qquad \textit{(eq. 6. 2)}$$

A energia cinética da massa de ar em deslocamento é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \qquad \textit{(eq. 6. 3)}$$

Assim:

$$E_c = \frac{1}{2} \rho A L_c v^2 \qquad \textit{(eq. 6. 4)}$$

A potência média é igual à energia cinética dividida pelo intervalo de tempo, dessa forma a potência média associada é dada por:

$$P_v = \frac{1}{2}\rho A \frac{L_c}{t} v^2 \qquad \textit{(eq. 6. 5)}$$

Como considerou-se que a velocidade do vento é constante, a razão L_c/t é a própria velocidade do vento, assim:

$$P_v = \frac{1}{2}\rho A v^3 \qquad \textit{(eq. 6. 6)}$$

E substituindo A, pela área frontal da turbina eólica, onde d é o diâmetro do rotor eólico e L é a largura do rotor:

$$P_v = \frac{1}{2}\rho L \frac{d}{2} v^3 = \frac{1}{4}\rho L d v^3 \qquad \textit{(eq. 6. 7)}$$

Assim é possível calcular a potência do vento, considerando que a densidade do ar sendo:

$$\rho = 1{,}15 \ kg/m^3$$

Tem-se na Tabela 6. 1, a potência do vento em função da área da turbina eólica e a velocidade do vento:

Tabela 6. 1 – Potência disponível no vento.

Área (m^2)	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
Vel. Vento (m/s)	Potência do vento (W)						
3	0,78	1,16	1,55	1,94	2,33	2,72	3,11
4	1,84	2,76	3,68	4,60	5,52	6,44	7,36
5	3,59	5,39	7,19	8,98	10,78	12,58	14,38
6	6,21	9,32	12,42	15,53	18,63	21,74	24,84
7	9,86	14,79	19,72	24,65	29,58	34,51	39,45
8	14,72	22,08	29,44	36,80	44,16	51,52	58,88
9	20,96	31,44	41,92	52,40	62,88	73,36	83,84

6.2 Características dos rotores eólicos[17]

A característica de um rotor eólico depende do seu tipo, perfil aerodinâmico, tamanho e número de pás.

A conversão da energia cinética do vento em energia mecânica no rotor, pode ser esquematizada na Figura 6. 2:

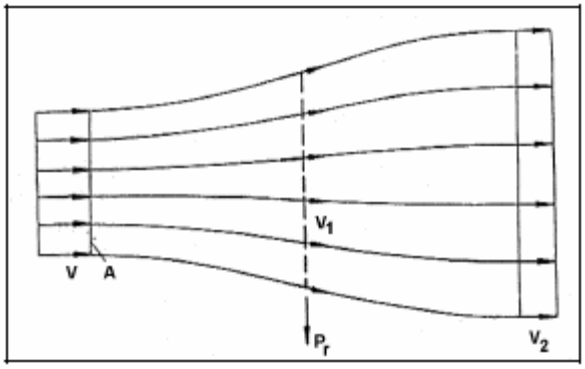


Figura 6. 2 – Esquema da conversão da energia cinética do vento em energia mecânica.

Quando o vento passa pelo rotor há uma redução na sua velocidade de v para v_2 e a energia cinética do vento que segue em direção ao rotor é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \qquad \textit{(eq. 6. 8)}$$

E da mesma forma a energia cinética após passar pelo rotor é dada por:

$$E_{c2} = \frac{1}{2}mv_2^2 \qquad \textit{(eq. 6. 9)}$$

Assim, a energia que é retida pelo rotor e convertida em energia mecânica é a diferença entre a energia cinética à montante e à jusante do rotor:

$$E_r = \frac{1}{2}m\left(v^2 - v_2^2\right) \qquad \textit{(eq. 6. 10)}$$

E a potência absorvida pelo rotor é obtida derivando a equação da energia em relação ao tempo:

$$P_t = \frac{d}{dt}\left[\frac{1}{2}m\left(v^2 - v_2^2\right)\right] \qquad \textit{(eq. 6. 11)}$$

Considerando que as velocidades do vento á jusante e à montante do rotor são constantes, a única derivada em relação ao tempo é dada pela massa de ar em movimento:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt}\rho V = \rho\frac{dV}{dt} = \rho Q = \rho A v_1 \qquad \textit{(eq. 6. 12)}$$

E de acordo com a teoria da mecânica dos fluidos a velocidade v_1 é igual a média aritmética da velocidade à jusante e á montante, dada por:

$$v_1 = \frac{v+v_2}{2} \qquad \textit{(eq. 6. 13)}$$

Assim, substituindo as equações 6.12 e 6.13 na equação de potência da turbina:

$$P_t = \frac{1}{4}\rho A\left(v^2 - v_2^2\right)(v + v_2) \qquad \textit{(eq. 6. 14)}$$

6.2.1 Coeficiente de Potência

O coeficiente de potência C_p, é a razão entre a potência mecânica realmente convertida pelo rotor e a potência disponível no vento:

$$C_p = \frac{\textit{Potência disponível no eixo}}{\textit{Potência disponível (recuperável)}} = \frac{P_t}{P_v} = \frac{\frac{1}{4}\rho A\left(v^2 - v_2^2\right)(v+v_2)}{\frac{1}{2}\rho A v^3} == \frac{1}{2}\left[1 - \left(\frac{v_3}{v}\right)^2\right]\left[1 + \frac{v_3}{v}\right]$$

(eq. 6. 15)

6.2.2 Lei de Betz

Devido às conversões de energia em calor e som devido ao atrito e outros fatores, não é possível converter toda a energia eólica em energia mecânica para o rotor. Dessa forma analisando a equação do coeficiente de potência, pode -se traçar um gráfico do C_p em função de v_2/v, mostrado na Figura 6.3.

$$C_p = \frac{P_t}{P_v} = \frac{1}{2}\left[1 - \left(\frac{v_3}{v}\right)^2\right]\left[1 + \frac{v_3}{v}\right] \qquad \textit{(eq. 6. 16)}$$

Da Figura 6. 3, observa-se que ele atinge o máximo para a razão $v_2/v = 1/3$, onde o C_p é 0,593, ou seja a potência máxima extraída é de 59%. Esse é o resultado de um cálculo teórico para um rotor ideal, na prática esse valor varia de acordo com o tipo e perfil aerodinâmico do rotor.

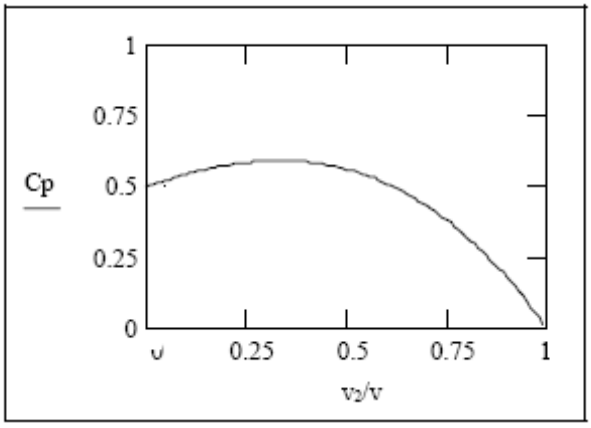


Figura 6. 3 – Gráfico da variação doC_p em função de v_2/v.

6.2.3 Coeficiente de velocidade de ponta (Tip speed ratio, λ)

O coeficiente de velocidade de ponta é a razão entre a velocidade da ponta do rotor e a velocidade do vento, sendo definido por:

$$\lambda = \frac{Velocidade\ linear\ da\ ponta\ do\ rotor}{Velocidade\ do\ vento\ livre} = \frac{R\omega_r}{v} = \frac{2\pi f_r R}{v} \qquad \textit{(eq. 6. 17)}$$

O aumento de λ_{max} pode ser obtido diminuindo as inclinações do perfil do rotor. Além disso, fixado o valor de λ_{max}, quanto maior o número de pás do rotor, mais suave será o seu perfil. Na prático, os perfis muito suaves não são práticos, na Figura 6.4 estão representadas as características do perfil em função de λ_{max} e do número de pás.

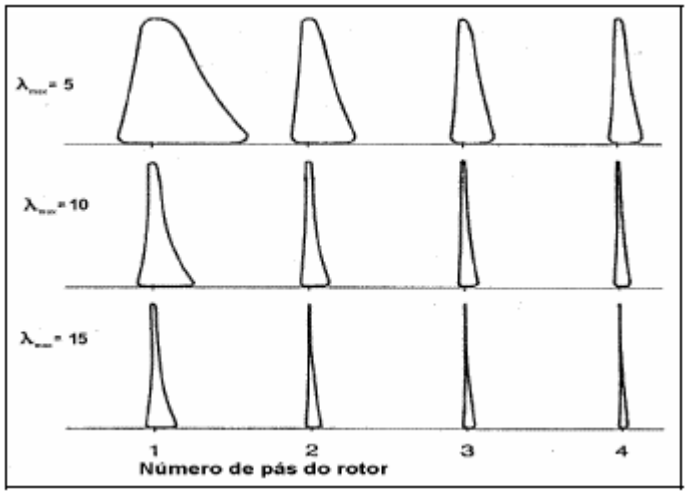


Figura 6. 4 – Perfil do rotor eólico em função de λ e do número de pás.

O tipo de rotor também influencia na sua característica de operação, na Figura 6.5 estão mostrados vários tipos de rotores, em função do C_p e λ_{max}. Pode-se notar que os rotores mais modernos, projetados em estudos aerodinâmicos mais avançados apresentam melhores características de desempenho.

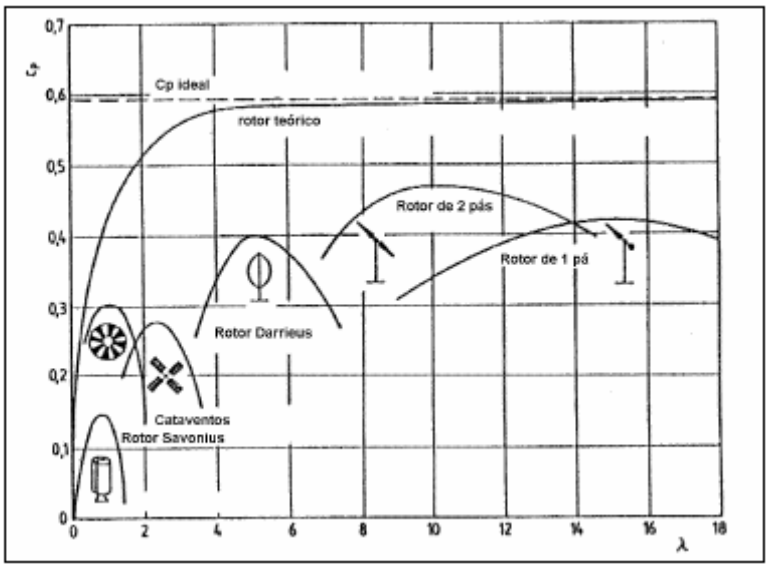


Figura 6. 5 – Tipos de rotores eólicos em função de C_p e λ.

6.2.4 Velocidade angular no eixo do rotor

A velocidade angular do eixo do rotor pode ser obtida diretamente através da velocidade do vento, do coeficiente de velocidade de ponta e do raio do rotor, através de:

$$n = \frac{30\lambda v}{\pi R} \qquad \textit{(eq. 6. 18)}$$

6.3 Comportamento de um rotor

Geralmente o comportamento do rotor é fornecido por um gráfico que relaciona os coeficientes C_p e λ. Na Figura 6.6, tem-se o exemplo de um gráfico que mostra a característica de um rotor de duas pás de eixo horizontal para diferentes ângulos de inclinação das pás.

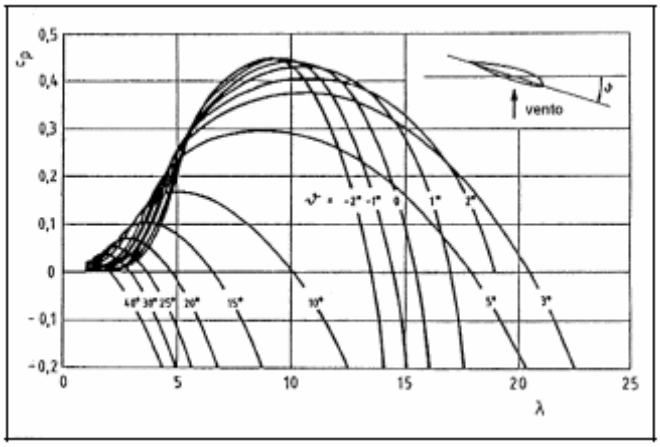


Figura 6. 6 – Comportamento de um rotor de 2 pás [18].

7. DIMENSIONAMENTO DO ROTOR EÓLICO

A pá do rotor tem o principio de funcionamento similar a uma turbina de impulsão (Pelton), por isso os dimensionamentos realizados para cálculo do torque, potência e rotação seguem a mesma formulação utilizada no cálculo desse tipo de turbina.

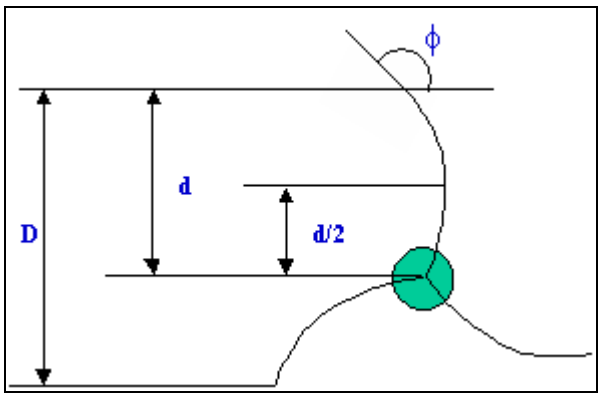


Figura 7. 1 – Esquema do rotor eólico

A partir da equação da quantidade de movimento angular para um volume de controle rotativo[19]:

$$\vec{r} \times \vec{F_s} + \int_{VC} \vec{r} \times \vec{g} \rho d\forall + \vec{T}_{eixo} - \int_{VC} \vec{r} \times \left[2\vec{\omega} \times \vec{V}_{xyz} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) + \vec{\omega} \times \vec{r}\right] \rho \, d\forall = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \vec{r} \times \vec{V}_{xyz} \rho d\forall + \int_{SC} \vec{r} \times \vec{V}_{xyz} \rho \vec{V}_{xyz} \cdot d\vec{A}$$

(eq. 7. 1)

E considerando as seguintes hipóteses:

1. O torque devido às forças de superfície é desprezado $\Rightarrow \vec{F}_s = 0$
2. O torque devido às forças de campo é desprezado$\Rightarrow \vec{g} \rho d\forall = 0$
3. A massa de água sobre a pá é desprezada $\Rightarrow \rho d\forall = 0$
4. Ocorre escoamento permanente sobre a pá $\Rightarrow \frac{\partial}{\partial t} = 0$

5. Todo o ar que passa sobre o rotor coincide com as pás
6. Ocorre escoamento uniforme em cada seção
7. Não há variação da velocidade do ar em relação à pá

Assim:

$$\vec{T}_{eixo} = \int_{SC} \vec{r} \times \vec{V}_{xyz} \rho \vec{V}_{xyz} \cdot d\vec{A} \qquad \textit{(eq. 7. 2)}$$

E desde que todo o ar cruza as pás:

$$\vec{T}_{eixo} = \vec{r}_1 \times \vec{V}_1\{-|\rho VA|\} + \vec{r}_2 \times \vec{V}_2\{+|\rho VA|\} \qquad \textit{(eq. 7. 3)}$$

E como:

$$\vec{r}_1 = R\hat{e}_r \qquad \textit{(eq. 7. 4)}$$

$$\vec{r}_2 = R\hat{e}_r \qquad \textit{(eq. 7. 5)}$$

$$\vec{V}_1 = (V - U)\hat{e}_\theta \qquad \textit{(eq. 7. 6)}$$

$$\vec{V}_2 = (V - U)cos\theta\ \hat{e}_\theta + (V - U)sen\theta\ \hat{e}_r \qquad \textit{(eq. 7. 7)}$$

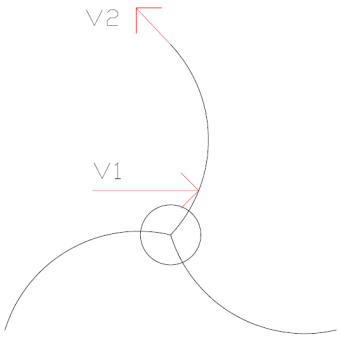


Figura 7. 2 – Detalhe do fluxo de ar que age sobre a pá do rotor

Assim:

$$\vec{T}_{eixo} = R\hat{e}_r \times (V-U)\hat{e}_\theta\{-|\rho VA|\} + R\hat{e}_r \times (V-U)cos\theta\ \hat{e}_\theta + (V-U)sen\theta\ \hat{e}_r\{+|\rho VA|\}$$

(eq. 7. 8)

$$T_{eixo}\hat{k} = R(V-U)\hat{k}(-\rho VA) + R(V-U)cos\theta\ \hat{k}(\rho VA) \qquad \textbf{(eq. 7. 9)}$$

De modo que:

$$T_{eixo}\hat{k} = -R(1-cos\theta)\rho VA(V-U)\hat{k} \qquad \textbf{(eq. 7. 10)}$$

Esse é o torque externo que o eixo faz sobre a pá. O torque que o ar faz sobre a pá é igual e oposto:

$$\vec{T}_{saída} = -\vec{T}_{eixo} = R(1-cos\theta)\rho VA(V-U)\hat{k} = \rho QR(V-U)(1-cos\theta)\hat{k}$$

(eq. 7. 11)

E a potência produzida correspondente é:

$$\dot{W}_{saída} = \vec{\omega}\cdot\vec{T}_{saída} = R\omega(1-cos\theta)\rho VA(V-U) = \rho QU(V-U)(1-cos\theta)$$

(eq. 7. 12)

A máxima potência da turbina é obtida derivando a equação da potência em relação à velocidade da pá U e igualando o resultado a zero:

$$\frac{d\dot{W}_{saída}}{dU} = \rho Q(V-U)(1-cos\theta) + \rho QU(-1)(1-cos\theta) = 0 \quad \textit{(eq. 7. 13)}$$

$$\therefore (V-U) - U = V - 2U = 0 \quad \textit{(eq. 7. 14)}$$

Assim a máxima potência ocorre para:

$$\frac{U}{V} = \frac{1}{2} \; ou \; U = \frac{V}{2} \quad \textit{(eq. 7. 15)}$$

E a potência máxima é dada por:

$$\dot{W}_{saída} = \rho Q \frac{V}{2}\left(V - \frac{V}{2}\right)(1-cos\theta) = \rho Q \frac{V^2}{4}(1-cos\theta) \quad \textit{(eq. 7. 16)}$$

A rotação da turbina é obtida da velocidade da pá:

$$U = \omega R \Rightarrow \omega = \frac{2U}{d} \quad \textit{(eq. 7. 17)}$$

E para a máxima potência:

$$\omega = \frac{2\frac{V}{2}}{d} = \frac{V}{d} \quad \textit{(eq. 7. 18)}$$

7.1 Dimensões da turbina e condições ambientais

Devido às dimensões reduzidas que essa turbina deve ter por ser de uso residencial, foi considerado que ela tem as seguintes dimensões:

Tabela 7. 1 – dimensões do rotor eólico

Diâmetro do rotor (m)	0,75
Largura do rotor (m)	0,20

E para as condições ambientes, foi considerado que a densidade do ar como $\rho = 1{,}15 \; kg/m^3$.

7.2 Cálculo do torque na turbina eólica

A partir da equação 7.19:

$$\vec{T}_{saída} = \rho QR(V - U)(1 - cos\theta)\hat{k} \qquad \textit{(eq. 7. 19)}$$

Calcula-se o torque que o vento aplica sobre a pá da turbina eólica, onde:

Que é a vazão de ar, dada por:

$$Q = AV = L\frac{d}{2}V \qquad \textit{(eq. 7. 20)}$$

Assim:

$$\vec{T}_{saída} = \rho L\frac{d}{2}V\frac{d}{2}(V - U)(1 - cos\theta)\hat{k} = \rho L\frac{d^2}{4}V(V - U)(1 - cos\theta)\hat{k}$$

(eq. 7. 21)

E para o máximo torque $U = \frac{V}{2}$:

$$\vec{T}_{saída} = \rho L\frac{d^2}{4}V\left(V - \frac{V}{2}\right)(1 - cos\theta)\hat{k} = \rho LV^2\frac{d^2}{8}(1 - cos\theta)\hat{k} \qquad \textit{(eq. 7. 22)}$$

Assim na Tabela 7. 2 têm-se os resultados dos cálculos para o torque de saída na turbina e variando a velocidade do vento e o ângulo de saída do ar:

Tabela 7. 2 – Torque produzido sobre o rotor

Ângulo (graus)	120	130	140	150	160	170	180
Vel. Vento (m/s)	Torque (Nm)						
3	0,22	0,24	0,26	0,27	0,28	0,29	0,29
4	0,39	0,43	0,46	0,48	0,50	0,51	0,52
5	0,61	0,66	0,71	0,75	0,78	0,80	0,81
6	0,87	0,96	1,03	1,09	1,13	1,16	1,16
7	1,19	1,30	1,40	1,48	1,54	1,57	1,58
8	1,55	1,70	1,83	1,93	2,01	2,05	2,07
9	1,96	2,15	2,31	2,44	2,54	2,60	2,62

7.3 Cálculo da rotação na turbina eólica

Com a equação 7.23, pode-se calcular a rotação da turbina:

$$\omega = \frac{V}{d} \qquad \textit{(eq. 7. 23)}$$

Assim, na Tabela 7. 3, tem-se os resultados da rotação da turbina em função da velocidade do vento, tanto em rad/s como em rpm:

Tabela 7. 3 – Rotação do rotor

Vel. Vento (m/s)	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00
rotação (rad/s)	2,00	2,67	3,33	4,00	4,67	5,33	6,00
n (rpm)	19,10	25,46	31,83	38,20	44,56	50,93	57,30

7.4 Cálculo da potência na turbina eólica

A partir da equação 7.24, pode-se calcular a potência na turbina eólica:

$$\dot{W}_{saída} = \rho L \frac{d}{2} \frac{V^3}{4} (1 - cos\theta) \qquad \textit{(eq. 7. 24)}$$

Na Tabela 7. 4 têm-se os resultados calculados de potência para variações na velocidade do vento e no ângulo de saída do ar:

Tabela 7. 4 – Potência gerada pelo rotor

Ângulo (graus)	120	130	140	150	160	170	180
Vel. Vento (m/s)	Potência (W)						
3	0,44	0,64	0,86	1,09	1,32	1,54	1,75
4	0,78	1,13	1,52	1,93	2,34	2,74	3,11
5	1,21	1,77	2,38	3,02	3,66	4,28	4,85
6	1,75	2,55	3,43	4,35	5,27	6,16	6,99
7	2,38	3,47	4,66	5,91	7,17	8,39	9,51
8	3,11	4,53	6,09	7,73	9,37	10,96	12,42
9	3,93	5,74	7,71	9,78	11,86	13,87	15,72

8. CIRCUITO ELÉTRICO

8.1 Gerador Elétrico

O gerador é a parte da máquina eólica responsável pela transformação da energia mecânica em energia elétrica. Ele foi inventado no século XIX por Michael Faraday na Inglaterra e por Joseph Henry nos Estados Unidos.

Consistia basicamente de um imã que se movimenta dentro de uma espira, ou vice-versa, provocando o aparecimento de uma força eletromotriz registrada em um galvanômetro.

Nesse trabalho será utilizado um gerador elétrico de corrente contínua devido às características do rotor eólico que opera com velocidade variável.

8.2 Componentes de um gerador elétrico de corrente continua

O gerador é formado pelo rotor (armadura), estator (campo) e comutador.

O rotor é a parte girante da máquina, montado sobre o eixo da mesma. Ele é constituído de um material ferromagnético envolto em um enrolamento chamado de enrolamento de armadura, que deve suportar uma alta corrente e o anel comutador.

O estator é a parte estática montada em volta do rotor, de forma que o mesmo possa girar internamente. Também é constituído por material ferromagnético, envolto em um enrolamento de baixa potência chamado de enrolamento de campo que tem a função apenas de produzir um campo magnético fixo para interagir com o campo da armadura.

O comutador é um dispositivo mecânico (tubo de cobre axialmente segmentado) no qual estão conectados os terminais das da armadura, cujo papel é inverter sistematicamente o sentido da corrente contínua que circula na armadura para garantir que o torque tenha sempre o mesmo sentido e impeça que a armadura fique parada em uma posição de equilíbrio.

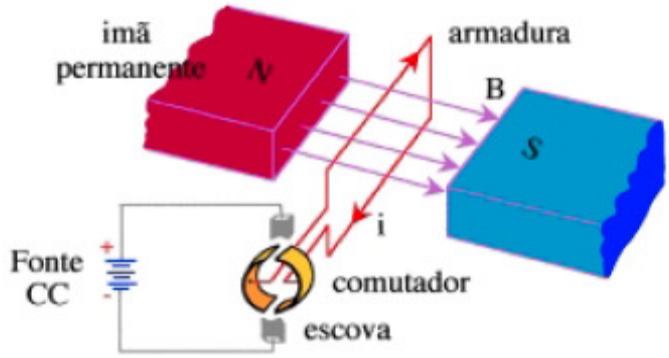


Figura 8.1 – Esquema de um gerador elétrico.

8.3 Principio de funcionamento do gerador

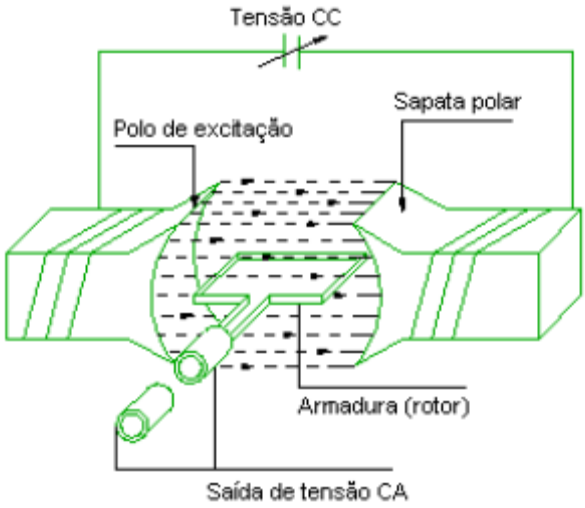


Figura 8.2 – Funcionamento de um gerador elementar.

O funcionamento de um motor de corrente continua baseia-se no principio do eletromagnetismo clássico. Através do movimento relativo entre uma espira e um campo magnético, sendo que os terminais da espira estão conectados a dois anéis ligados ao circuito externo através de escovas.

Através do movimento mecânico do eixo fornecido pela força do vento, a bobina pode girar com uma velocidade uniforme no sentido da flecha dentro do campo magnético “B” também uniforme (figura 8.2). Sendo “v” a velocidade linear do condutor em relação ao campo magnético, através da lei da indução

de Faraday, o valor instantâneo da força eletromotriz induzida no condutor em movimento de rotação é determinado por:

$$e = B.l.v.sen(B^{v}) \qquad \textit{(eq. 8.1)}$$

E para N espiras, têm-se:

$$e = B.l.v.sen(B^{v}).N \qquad \textit{(eq. 8.2)}$$

A variação da força eletromotriz no condutor em função do tempo pode ser determinada pela lei da indução magnética sob um pólo. Essa distribuição tem um caráter complexo e depende da forma da sapata polar. Projetando-se uma sapata de forma conveniente pode-se obter uma distribuição senoidal de induções, e nesse caso a força eletromotriz induzida também varia com o tempo sob uma forma senoidal.

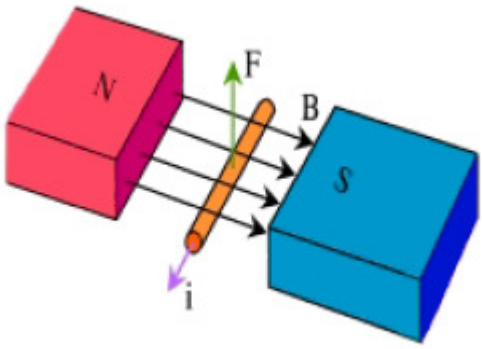


Figura 8.3 – Esquema de um condutor metálico submetido à uma força F e inserido em um campo magnético.

O fluxo magnético necessário para produzir corrente pode ser produzido por um imã permanente ou um eletroímã. Além disso, o sentido da força pode mudar se o sentido do fluxo ou o sentido da corrente mudar, sendo que as direções do fluxo, da corrente e da força eletromagnética são sempre ortogonais entre si.

Através da aplicação de um torque e da rotação do eixo do gerador eólico, há a produção de um movimento relativo entre os condutores elétricos dos enrolamentos da armadura e o campo magnético produzido pelo enrolamento de campo.

Ele deverá funcionar com uma tensão constante e uma corrente variável que alimentará o conjunto de baterias.

8.4 Seleção do gerador elétrico

Foram analisados diversos tipos de equipamentos que poderiam atender à geração de energia.

8.4.1 Alternador comercial

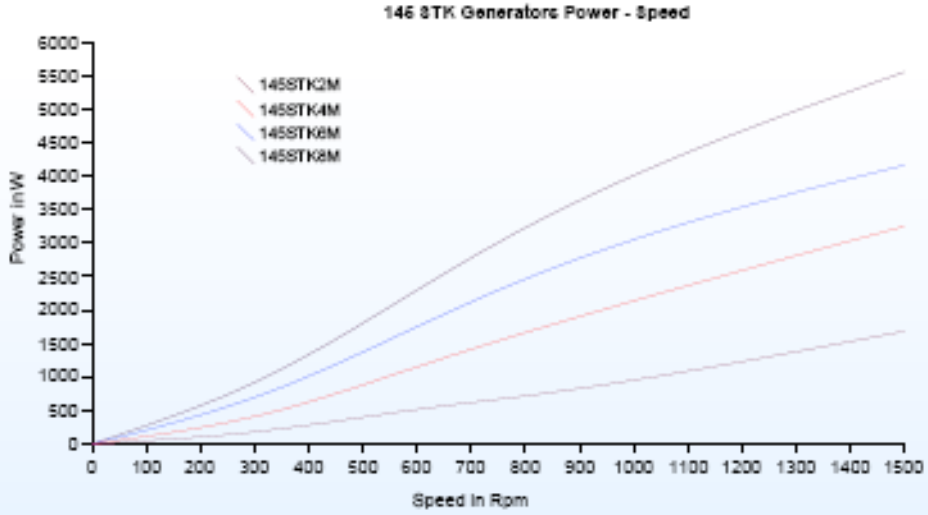
O alternador é uma máquina que transforma energia mecânica em energia elétrica e o seu nome é devido ao tipo de corrente gerada, que é a corrente alternada. Ele é um gerador síncrono, dessa forma num circuito fechado flui uma corrente alternada que se torna quanto mais alta quanta mais alta for a rotação e quanto mais forte for o campo magnético.

A intensidade da tensão e da corrente do alternador não é constante, após cada giro de 360 graus, o ciclo de tensão se repete. Por isso, em um giro uniforme consegue-se uma alteração periódica da tensão, que pode ser representada como onda senoidal com meia onda positiva e meia onda negativa.

Figura 8.4 – Alternador.

No mercado são encontrados diversos tipos de alternadores para turbinas eólicas. Um fabricante é a Alxion, que possui vários modelos, um deles é o 145 STK, que possui as seguintes características:

		145STK2M		145STK4M		145STK6M		145STK8M	
Rated speed	Rpm	650	1500	650	1500	650	1500	650	1500
Rated power (1)(2)	W	571	1683	1285	3250	1937	4163	2539	5550
Current at rated speed (1)	Amps	1.4	4.2	3.2	8.1	4.9	10.4	6.4	13.9
Voltage at rated power (1)(2)(3)	V	133	133	133	133	133	133	133	133
Power at half speed (1)(2)	W	204	667	460	1538	769	2296	1016	3007
Phase resistance at 20°C	Ohm	20.7	4.55	8.65	1.36	4.17	0.59	3.00	0.42
Phase inductance	mH	106.55	23.4	61.99	9.81	34.01	4.9	26.57	3.67
Phase emf at 20°C (4)	V	210.5	226.6	227.1	206.7	206.3	179.9	209.8	180.0
Rotor inertia	10^{-3}Kg.m²	1.28	1.28	2.24	2.24	3.19	3.19	4.14	4.14
Weight	Kg	6.2	6.2	10.4	10.4	14.5	14.5	18.7	18.7
Power cable square section	mm²	4x1.5	4x1.5	4x1.5	4x1.5	4x1.5	4x1.5	4x1.5	4x1.5



(1) Ambient temperature 40°C
Wind speed 10 m/s
Winding temperature rise < 100°C
Stator housing in contact with the ambient air or integral on all its peripheral area with a metallic armature in contact with the ambient air
Stator housing secured on a metallic frame getting an area equal to twice the cross section of the housing
(2) Operation with unitary power factor
(3) Single voltage, voltage is 230Vac phase to phase. Voltage level may be adapted according to the application
(4) Alternator at no load and rated speed
(5) For current at rated power

Figura 8.5 – Dados do alternador Alxion.

Através do gráfico fornecido pelo fabricante *(figura 8.5)*, pode-se calcular p torque necessário para movimentar o eixo do gerador. Para o modelo STK8M, tem-se:

$$T = \frac{P}{\omega} \Rightarrow T \cong \frac{500}{500 \times \left(\frac{2\pi}{60}\right)} \cong 9{,}55Nm \qquad \textit{(eq. 8.3)}$$

Como o torque necessário para movimentar o alternador é maior que o torque gerado pela turbina calculado no dimensionamento a rotação para o seu funcionamento também é maior que a turbina eólica pode fornecer.

A utilização do alternador tornará-se viável mediante a aplicação de uma caixa multiplicadora de torque (caixa de transmissão) que pode ser feita através do emprego de engrenagens ou de polias.

8.4.2 Cooler

O cooler é a ventoinha que faz a refrigeração em computadores, ele é formado por um motor elétrico e as pás que produzem o movimento do ar. Partindo do principio que um motor de corrente contínua funcionando em sentido inverso.

Figura 8.6 – Cooler utilizado em computadores.

Os dados de um cooler normalmente encontrado no mercado são:

Corrente (Amperes)	0,09
Tensão (VDC)	12
Potência (Watts)	1,08
Rotação (rpm)	2500

$$T = \frac{P}{\omega} \Rightarrow T \cong \frac{1{,}08}{2500 \times \left(\frac{2\pi}{60}\right)} \cong 0{,}004Nm \qquad \textit{(eq. 8.4)}$$

O cooler necessita de um baixo torque para iniciar o movimento, mas ele necessita de uma alta rotação para entrar em funcionamento e poder gerar

energia para o banco de baterias, fazendo-se necessário a utilização de um ampliador de velocidades.

8.4.3 Dínamo

O dínamo é um aparelho que converte a energia mecânica em energia elétrica, através de indução eletromagnética. Ele é acionado através de um eixo ao qual se encontra o imã, fazendo alternar os pólos norte e sul na bobina e por indução gera energia elétrica. Ele também pode ser montado de forma contraria, isto é, com a bobina no eixo. As polaridades são invertidas a cada 180 graus de rotação para que o dínamo gere uma corrente contínua, ao contrário do alternador que gera uma corrente alternada.

Figura 8.7 – Dínamo utilizado em bicicletas.

Os dínamos são facilmente encontrados em lanternas, que funcionam sem o uso de baterias. Em bicicletas o seu uso é bastante comum. Ele possui as seguintes características:

- Tensão gerada: 6 V
- Potência: 3W

O dínamo pode funcionar mesmo a baixas rotações, pois nessa condição a corrente fornecida por ele que é baixa, mas isso não impede dele fornecer energia para um banco de baterias, mesmo que o tempo necessário seja alto.

9. SISTEMAS AUXILIARES

9.1 Armazenamento de Energia

Como já foi citado anteriormente, o gerador eólico tem como função converter energia cinética proveniente do vento em energia elétrica, sendo que como objetivo deste projeto destinar esta energia para uma residência ou pequena instalação comercial.

Sabe-se que a velocidade e direção dos ventos sofrem aleatoriedade, são fenômenos naturais que não temos domínio, nem controle. É indispensável para o projeto um sistema que armazene a sobra de energia produzida para ser utilizada nos períodos em que há escassez do potencial eólico, ou também para suprir os picos de demanda de energia da residência ou instalação.

Geralmente para fazer a função de armazenamento de energia são utilizadas baterias, ou melhor, um conjunto de baterias agrupadas.

Em alguns sistemas pode-se aramzenar esta sobra de energia em forma de energia potencial gravitacional.

9.2 Conjunto de baterias

Baterias são dispositivos que armazenam energia elétrica através de reações químicas. São dispositivos eficientes, práticos e com uma ótima relação custo-benefício.

O conjunto de baterias ou banco de baterias é utilizado para armazenar energia e promover o equilíbrio entre a demanda e a disponibilidade energética em um sistema.

As baterias podem ser classificadas de acordo com sua aplicação:

Existem as baterias conhecidas como de ciclo raso ou popularmente também chamadas de bateriais automotivas.

São utilizadas em 100% dos automóveis com motores à combustão, responsáveis por dar a partida no motor de arranque e por o motor à combustão em funcionamento.

Estas baterias são projetadas para para suprir grande quantidade de carga sem perda de eletrólito e não aceitam serem descarregadas plenamente. O descarregamento repetitivo acima de 10% de sua capacidade faz com que sua vida útil seja encurtada de forma sintuosa.

Com essas características, não é viável utilizar este tipo de bateria no sistema turbina-gerador para uma instalaçao do porte deste projeto.

Para o fim que é necessário neste projeto, baterias conhecidas como de ciclo profundo ou baterias estacionárias são as recomendadas para compor o conjunto de baterias do sistema de armazenamento de energia.

Estas são projetadas para repetidas descargas em mais de 80% de sua capacidade. Elas fornecem uma pequena corrente por um longo período de tempo com uma corrente relativamente constante.

9.3 Tipos de baterias

9.3.1 Bateria selada

Este tipo de bateria não necessita de adição de água e carga de equalização. O eletrólito utilizado encontra-se na forma de gel o que permite que ela seja operada em qualquer posição e próxima de equipamentos sensíveis.

Resistente à choque, vibração e baixas temperaturas são ponto positivos deste tipo de bateria, em contra-partida, devido ao projeto do eletrodo, a bateria selada apresenta perda de capacidade prematura.

9.3.2 Bateria ácida

As baterias chumbo-ácida são as mais utilizadas em virtude do baixo custo e de sua ampla disseminação comercial.

São compostas por placas que contém o material ativo. As placas positivas são compostas de peróxido de Chumbo (PbO_2) e as negativas são de Chumbo puro (Pb) em forma esponjosa. O eletrólito é uma solução formada de ácido sulfúrico e água destilada com densidade entre 1200 Kg/m^3 e 1220 Kg/m^3, em temperatura aproximada de 25ºC.

A bateria chumbo-ácida deve ser manuseada com algum cuidado em virtude do ácido sulfúrico presente em sua composição.

Este tipo de bateria quando descarregada, a placa positiva passa de óxido de chumbo para sulfato de chumbo. Caso ela permaneça um longo período no formato de sulfato, a placa não retorna para a forma de óxido de Chumbo e assim perde permanentemente sua capacidade de armazenar energia elétrica.

9.3.2 Bateria alcalina

As baterias alcalinas de Níquel-Cádmio têm como material ativo na placa positiva o Níquel e na placa negativa o Cádmio. O eletrólito nesta bateria é uma solução de hidróxido de Potássio (KOH) com densidade de 1180 Kg/m³ à temperatura de 25ºC.

9.4 Propriedades das baterias

9.4.1 Tensões das baterias

A tensão de uma bateria é função apenas das propiredades químicas dos materiais das placas e do eletrólito. Esta tensão independe do volume ou quantidade utilizada na confecção das placas desta bateria.

A tensão de uma bateria ácida é dada pela fórmula:

$$V = 0{,}85 + \frac{\rho}{1000} \qquad \textit{(eq. 9.1)}$$

Nesta expressão, V é a tensão em volts e ρ é a densidade em Kg/m³.

Para uma bateria ácida com o eletrólito de ácido sulfúrico com densidade de 1220 Kg/m³ possuem uma tensão equivalente a 2,07 V.

A tensão de flutuação da bateria é a carga característica pouco acima da nominal que tem como finalidade mantê-la em carga permanente para compensar a autodescarga, mantendo pelna carga e evitando sulfatação das placas no caso das baterias ácidas.

Quanto maior for a temperatura do eletrólito, maior é a quantidade de perdas internas ou autodescarga, assim necessitando-se de uma tensão de flutuação superior.

As tensões de equalização e de carga profunda têm como objetivo compensar a diferença de tensão ou densidade entre os elementos.

A tensão final de descarga é o valor de tensão nominal onde é considerada a bateria como descarregada. Este valor pode variar entre 1,75 V e 1,85 V, ou até 1,0 V em casos excepcionais.

9.4.2 Capacidade das baterias

A capacidade das baterias são medidas em Ah (Ampere-hora), onde 1 Ah é o equivalente de fornecimento de uma corrente elétrica de um Ampere pelo período de uma hora. Existem baterias de 12 Volts com capacidade de 800 Ah disponíveis no mercado. Uma bateria deste tipo é capaz de drenar 100 Amperes pelo período de 8 horas, ou seja, acumular ou fornecer 1.200 W de potência durante 8 horas.

A corrente nominal das baterias é fornecida segundo a relação entre a capacidade e o tempo de descarga.

9.4.3 Rendimento da Bateria

Determina-se de rendimento de uma bateria a relação entre a energia de descarga (entregue) e a energia de carga (recebida).

$$\eta_{Bateria} = \frac{E_{Desc\,\mathrm{arg}\,a}}{E_{C\,\mathrm{arg}\,a}} \qquad \textit{(eq. 9.2)}$$

Não existem baterias com 100% de rendimento. Sempre a energia de descarga será menor que a energia carregada, ou seja, sempre há uma perda de energia. Alguns fatores podem piorar ou melhorar esta relação nas baterias.

9.4.4 Influência da temperatura nas baterias

A temperatura do eletrólito influi diretamente no comportamento das baterias.

Quando há um aumento de temperatura ocorre a diminuição da viscosidade do eletrólito e conseqüentemente aumenta-se a velocidade de difusão do eletrólito através das placas.

Isto significa, aumento na eficiência e na capacidade de carga da bateria, em contrapartida existe uma deterioração maior da bateria, diminuindo o seu tempo de vida.

A temperatura máxima que uma bateria deve operar é na faixa dos 45ºC. Normalmente elas são projetadas para operar à 25ºC.

9.5 Comparação entre as baterias

Comparando as baterias alcalinas com as baterias ácidas, as primeiras têm como vantagens: uma maior vida útil, menor autodescarga, maior resistência física, corrente de carga maior e capacidade maior às baixas temperaturas.

Uma grande desvantagem é o seu custo devido ao fato do Cádmio ser um elemento com reservar limitadas na natureza. Também tem dificuldades com seu descarte por causa de substância tóxicas que existem entre seus componentes.

Tanto as baterias ácidas, quanto às alcalinas possuem valores indicados de tensões para atuar. A tabela x abaixo indica os valores comparando-as para diversas cargas.

TIPO DE BATERIA	CARGA PROFUNDA	CARGA DE EQUALIZAÇÃO	CARGA DE FLUTUAÇÃO	CARGA NOMINAL	FINAL DE DESCARGA
	(V)	(V)	(V)	(V)	(V)
ÁCIDA	2,66	2,33	2,20	2,00	1,75
ALCALINA	1,70	1,55	1,40	1,25	1,10

Tabela 9.1 – Comparativo das tensões (cargas) entre baterias ácidas e alcalinas.

Para dimensionar o sistema de armazenamento de energias estas tensões são levadas em consideração para a seleção do tipo de bateria a ser utilizada no banco de baterias.

9.5 Controlador de carga

O controlador de carga tem como objetivo bloquear a corrente reversa e prevenir alguma sobrecarga no conjunto de baterias do sistema de armazenagem de energia.

O controlador de carga é definido pela tensão e corrente de trabalho dos equipamentos geradores. A sua capacidade sempres deve ultrapassar a corrente total do sistema gerador. Caso haja necessidade no projeto deve-se dividir a instalação por mais controladores e baterias.

A corrente reversa que é justamente um fluxo de corrente elétrica contrário, ou seja, quando o aparelho gerador tem sua função invertida e consome energia descarregando as baterias. Esta ocorrência pode ser controlada através da utilização de um transistor que age como uma válvula. Em pequenas instalações um diodo é recomendado para atuar contra as correntes reversas.

A sobrecorrente (corrente elétrica superior à projetada) pode causar sobreaquecimento trazendo danos enormes para os equipamentos e condutores. Podem ocasionar derretimento do condutor, vaporização da isolação, indução de forças magnéticas que retorcem os cabos elétricos, entre outras. A sobrecorrente pode causar curto-circuito ou sobrecarga.

Disjuntores ou fusíveis são utilizados como dispositivos de proteção para evitar que uma sobrecarga do sistema danifique os equipamentos.

10. DEFINIÇÃO DO MODELO DO ROTOR EÓLICO

Após estudar o comportamento dos protótipos construídos preliminarmente, viu-se a necessidade de pensar em uma máquina com maior capacidade para gerar energia elétrica e melhor aproveitar a potência fornecida pelo vento.

Foram esboçados desenhos de rotores onde as pás fossem fixadas diretamente no eixo principal onde a idéia seria aproveitar totalmente a passagem do vento pela área das pás.

Outro ponto que precisava ser definido eram as dimensões deste rotor. Como em todo momento deste projeto visou-se a construção de um modelo de turbina eólica que realmente pode ser operada, não podería-se partir para um protótipo com dimensões absurdas, o que tornaria a construção inviável.

Rascunharem-se alguns desenhos em que o protótipo poderia ter entre 300 e 400 mm de largura e diâmetro entre 200 e 250 mm, já que está sendo estudado um rotor eólico de eixo horizontal.

Para as pás, manteve-se a idéia de buscar uma curvatura próxima às apresentadas por rotores de bombas hidráulicas ou turbinas do tipo Pelton.

Partiu-se de uma curvatura circular, até que se decidiu experimentar uma curvatura elíptica no protótipo. Esta curvatura pareceu ser mais eficiente apesar da dificuldade de construí-la.

Utilizando material de baixo valor comercial (palpel cartonado, cola superbonder, fita adesiva e eixo de madeira), apenas para visualizar o funcionamento de um pequeno rotor eólico para pequenas instalações, enfim, foi construído o modelo da figura 10.1.

O modelo é composto por dois discos circulares que são peças das extremidades do rotor com a função de sustentar as pás curvas que serão encaixadas e afixadas entre estes dois discos. Além disso, possui furos centrais onde é encaixado o eixo central do rotor.

As pás são afixadas ao eixo central e sua curvatura segue o desenho na forma de uma semi-elipse apresentada na figura 10.1.

Figura 10.1 – Fotos do modelo construído em papel cartonado do rotor eólico difinido no projeto.

10.1 Dimensões do modelo e condições ambientais de operação

Definiu-se para o projeto do sistema de conversão eólico-elétrico que este rotor seria construído com as seguintes dimensões conforme se têm na figura 10.2 abaixo.

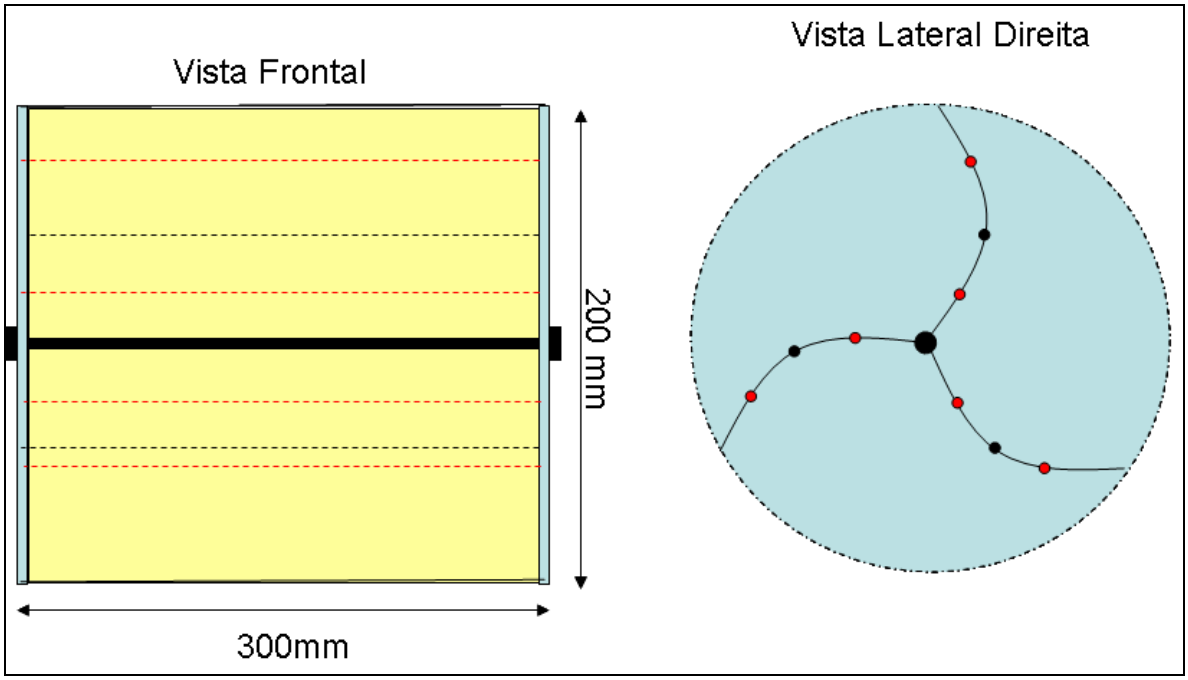


Figura 10.2 – Desenho esquemático do rotor éolico para o sistema de conversão eólico-elétrico.

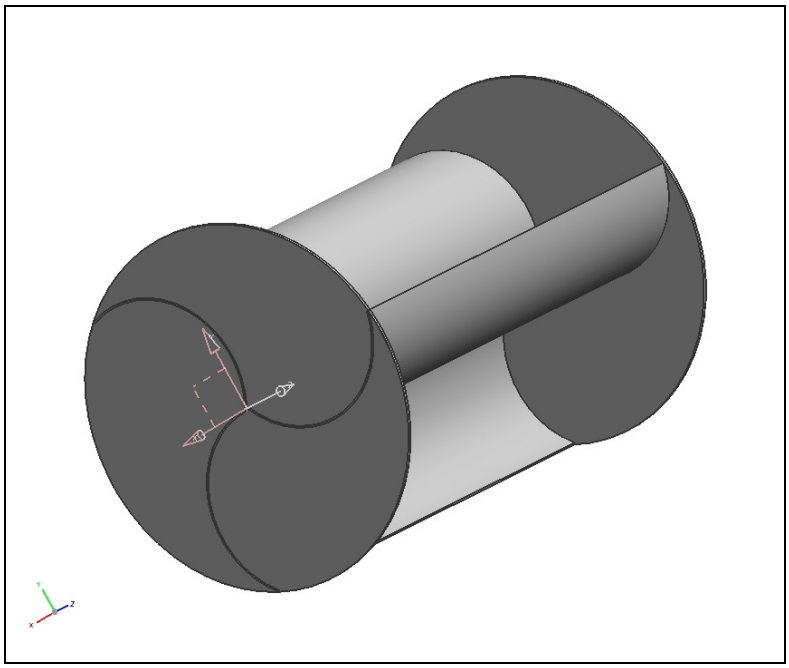


Figura 10.3 – Desenho 3D do rotor éolico para o sistema de conversão eólico-elétrico.

Na Figura 10.3 pode ser visto o modelo gerado tri-dimensionalmente em CAD (SOLIDWORKS).

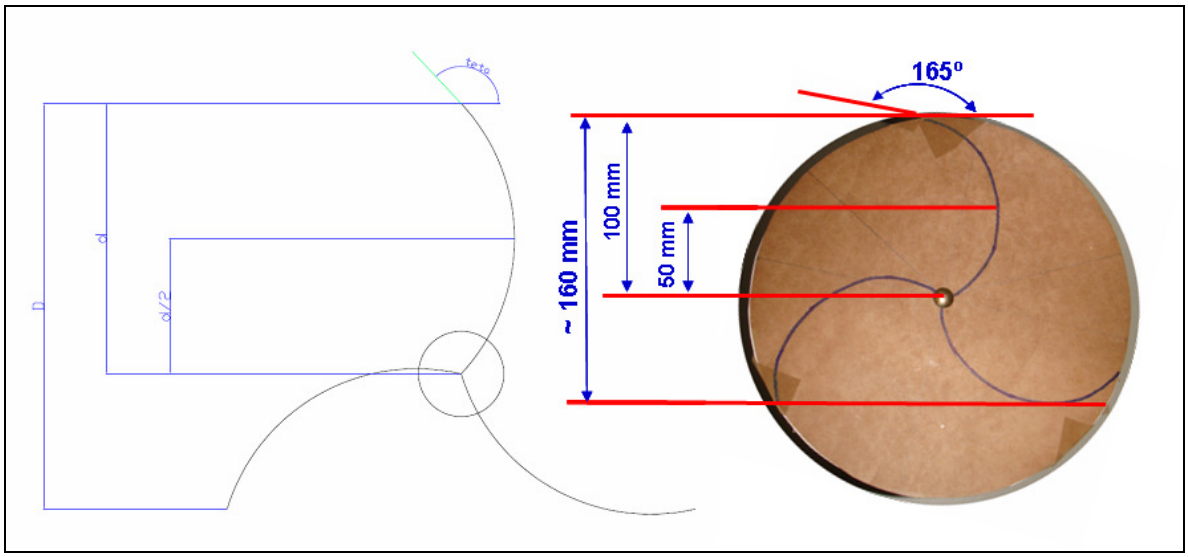


Figura 10.4 – Esquema da curvatura das pás do protótipo do rotor eólico.

Tabela 10. 5 – dimensões do rotor eólico para o sistema de conversão eólico-elétrico.

Dimensões do protótipo do Rotor	
Dâimetro do rotor (m)	0,2
Largura do rotor (m)	0,3
Ângulo teta (graus)	165°

E para as condições ambientes, foi considerado que a densidade do ar como $\rho = 1{,}15\ kg/m^3$.

Foi visto no capítulo 7 deste trabalho o equacionamento para o cálculo do torque produzido pelo rotor eólico, da rotação e da potência gerada pela mesma.

10.2 Cálculo do torque no rotor eólico

A partir das equações 7.19, 7.20, 7.21 e 7.22 podemos determinar o torque gerado pelo vento no rotor para diversas velocidades do vento conforme tabela 10.2 abaixo:

Tabela 10. 6 – Torque gerado no rotor eólico.

Vel. Vento (m/s)	Torque (Nm)
4	0,05
5	0,08
6	0,12
6,5	0,14
7	0,17
8	0,22
9	0,27

10.3 Cálculo da rotação no rotor eólico

A partir da equação 7.23, pode-se calcular a rotação da turbina:

Assim, vê-se na Tabela 7. 3 os resultados da rotação da turbina em função da velocidade do vento, tanto em rad/s como em rpm:

Tabela 10. 7 – Rotação do rotor.

Vel. Vento (m/s)	4,00	5,00	6,00	6,50	7,00	8,00	9,00
rotação (rad/s)	10,00	12,50	15,00	16,25	17,50	20,00	22,50
n (rpm)	95,49	119,37	143,24	155,18	167,11	190,99	214,86

10.4 Cálculo da potência no rotor eólico

A partir da equação 7.24, pode-se calcular a potência na turbina eólica:

Na Tabela 7. 4 têm-se os resultados calculados de potência para variações na velocidade do vento:

Tabela 10. 8 – Potência gerada pelo rotor.

Vel. Vento (m/s)	Potência (W)
4	0,54
5	0,85
6	1,22
6,5	1,43
7	1,66
8	2,17
9	2,75

11. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

Para construção, o protótipo foi dividido em três partes principais:

Na Figura 11.1 essas partes podem ser observadas e se dividem da seguinte forma:

1. Discos e pás da turbina
2. Eixo e alojamento dos rolamentos
3. Suporte e base do rotor

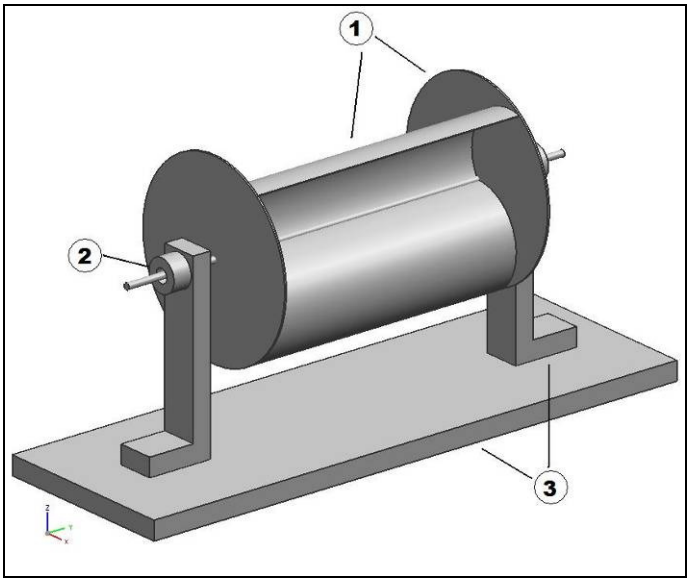


Figura 11.1 – Turbina eólica com seus componentes.

11.1 Discos e pás

Tendo o formato já definido do disco e das pás, essa última foi construída a partir de um gabarito que possui o perfil da pá. O gabarito foi desenhado a partir de um perfil gerado em CAD (Figuras 11.2 e 11.3), através de pontos que formavam uma elipse, em seguida a partir desse perfil foi recortada uma chapa de alumínio com 3 mm de espessura que serviu como molde para o perfil da pá (Figura 11.4).

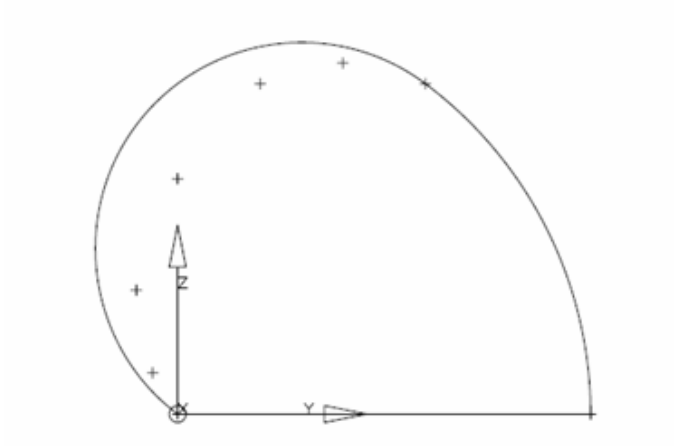


Figura 11.2 – Perfil da pá gerada em CAD.

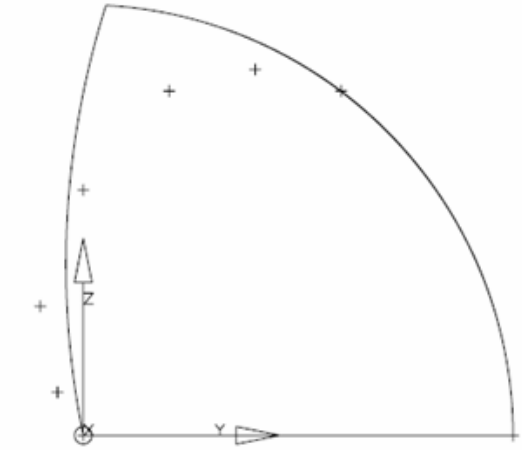


Figura 11.3 – Perfil elíptico da pá gerada em CAD.

Figura 11.4 – Gabaritos utilizados como moldes das pás.

Para a construção da pá foram utilizadas chapas de alumínio com 0,5 milimetro de espessura (Figura 11.5). Essas chapas foram moldadas com a utilização do gabarito. O alumínio foi utilizado devido ao seu baixo peso e grande maleabilidade, permitindo que a pá pudesse ter o formato conforme o projeto original.

Figura 11.5 – Pás do rotor eólico.

Para o disco foram utilizadas chapas de alumínio com 3 mm de espessura, devido ao baixo peso.

As pás foram parafusadas ao disco, com isso há a possibilidade de troca das pás, permitindo que sejam realizados testes para efeitos de comparação.

Tentou-se a utilização de chapas de aço carbono, mas devido ao seu grande peso esse material foi descartado, pois teria uma inércia muito grande, sendo necessários ventos de grande magnitude para a sua movimentação.

11.2 Eixo e mancais de rolamento

Para o eixo foi utilizada uma barra cilíndrica de aço carbono com 10 milímetros de espessura, ele foi torneado para que pudesse ser encaixado no mancal. O eixo foi soldado ao disco para que pudesse ser transmitido o torque.

O mancal é formado por 2 rolamentos 627 2Z posicionados um de cada lado do disco. Eles foram fixados ao alojamento e ao eixo através de um ajuste com interferência.

O alojamento dos mancais foi fabricado com uma barra cilíndrica de aço carbono, que foi torneado para atender às dimensões do rolamento.

11.3 Suporte e base do rotor eólico

O suporte e a base do rotor garantem a sua sustentação, sendo que são os apoios dos mancais.

O suporte foi fabricado a partir de duas chapas de aço carbono com 200 mm de espessura, que foi conformada em um “L”. A base foi feita a partir de uma chapa de aço carbono com 150 mm de espessura.

Para fixação, o suporte foi parafusado ao alojamento do mancal e à base, através de parafusos Allen.

Nas figuras 11.6 e 11.7 podem ser obsevadas a montagem final do protótipo.

Figura 11.6 – Protótipo do rotor eólico montado.

Figura 11.7 – Protótipo do rotor eólico montado exposto para teste – Vista lateral.

11.4 Freio de Proni

Para os testes de potência da turbina, foi construído um freio de Proni (Figuras 11.8 e 11.9) que quando utilizado em conjunto com uma balança é possível medir o torque gerado pela turbina.

O freio foi construído a partir de um disco de aço carbono, conectado ao eixo atraves do cubo com um parafuso Allen. Como sapata foi utilizada um pequeno sarrafo de madeira articulado em uma das suas extremidades.

Quando acionada a sapata é possível medir a força necessária para frear a turbina.

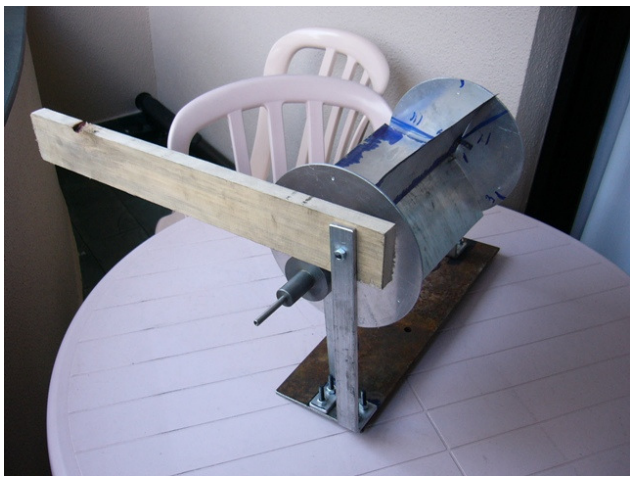


Figura 11.8 – Protótipo do rotor eólico montado com o freio de Proni.

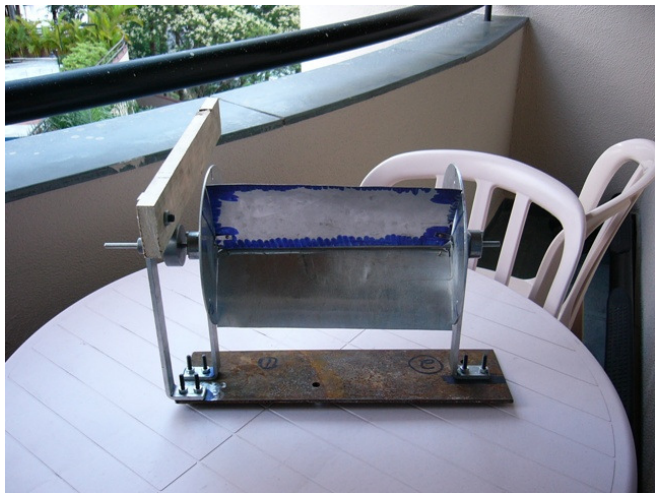


Figura 11.9 – Protótipo do rotor eólico com o freio de Proni – Vista frontal.

Em anexo (Anexo A) encontra-se um desenho de conjunto do protótipo do rotor eólico construído.

11.5 Custo de fabricação do protótipo

Na tabela 11.1 abaixo temos a lista de materiais utilizados na construção do protótipo com a quanitdade utilizada, custo e qual sua aplicação na montagem.

Tabela 11. 9 – Lista de Materiais utilizados na construção do protótipo.

Material	Quantidade	Custo	Aplicação
Chapa de alumínio com 0,5 mm de espessura	300.000 mm^2	R$ 28,00	Pás do rotor
Chapa de alumínio com 3 mm de espessura	70.000 mm^2	R$ 48,00	Disco do rotor
Barra cilíndrica de aço carbono com 10 mm de diâmetro	500 mm	R$ 3,00	Eixo
Tarugo cilíndrico de aço carbono com 50 mm de diâmetro	70 mm	R$ 10,00	Alojamento do rolamento
Barra retangular de aço carbono com 20 mm de espessura	20.000 mm	R$ 10,00	Suporte do rotor
Chapa de aço carbono com ½" de espessura	120.000 mm^2	R$ 10,00	Base do rotor
Rolamento 627 2Z	2	R$ 10,00	Mancal do eixo

Tabela 11. 2 – Custo total do protótipo.

Custos	
Materiais	R$ 109,00
Mão-de-Obra	R$ 150,00
Custo Total	**R$ 259,00**

O custo total para confecção deste protótipo ficou em R$259,00. Para efeito de comparação desta importância em tempos futuros ao da execução do projeto, com base no valor do Dólar Comercial (Moeda Norte-Americana), o custo do protótipo seria de aproximadamente U$ 150.00 (Preço do Dólar: R$1,746 em 09.11.2007).

12. TESTES E ENSAIOS COM O PROTÓTIPO DO ROTOR EÓLICO

Durante a execução da definição do modelo de rotor eólico e de sua construção posterio, houve uma série de problemas que não estavam estimados no cronograma do projeto, que causaram atrasos no andamento do projeto.

Estes atrasos impossibilitaram que fossem realizados os testes propostos pelo Prof. Eitaro em tempo hábil da entrega deste trabalho. Porém, já está sendo procurado o responsável pelo Laboratório de Mecânica dos Fluídos da Engenharia Mecânica para que seja feito alguns testes em laboratório com o protótipo do rotor eólico desenvolvido até aqui.

Neste laboratório teremos condições de fazer medições que poderam assegurar que o rotor produza a potência calculada na Tabela 10.4.

12.1 Metodologia experimental

O ensaio com o protótipo consiste em lermos os valores de Força aplicados à balança mostrada no esquema, em função da rotação do eixo do rotor eólico para determinada velocidade do vento que será simulado a partir de um ventilador com variador de velocidade.

A rotação do eixo do rotor eólico é controla pelo acionamento de um freio de cinta tipo Prony, que “segura” o movimento do eixo do rotor, transmitindo o momento torsor para a alavanca, que é apoiada ao centro da balança. A rotação do eixo do rotor pode ser medida com a utilização de um tacômetro digital. A velocidade do vento, simulada pelo ventilador, pode ser obtida através da utilização de um anemômetro digital.

Na figura 12.1 abaixo pode ser visto o esquema utilizado para ensaiar o protótipo do rotor eólico.

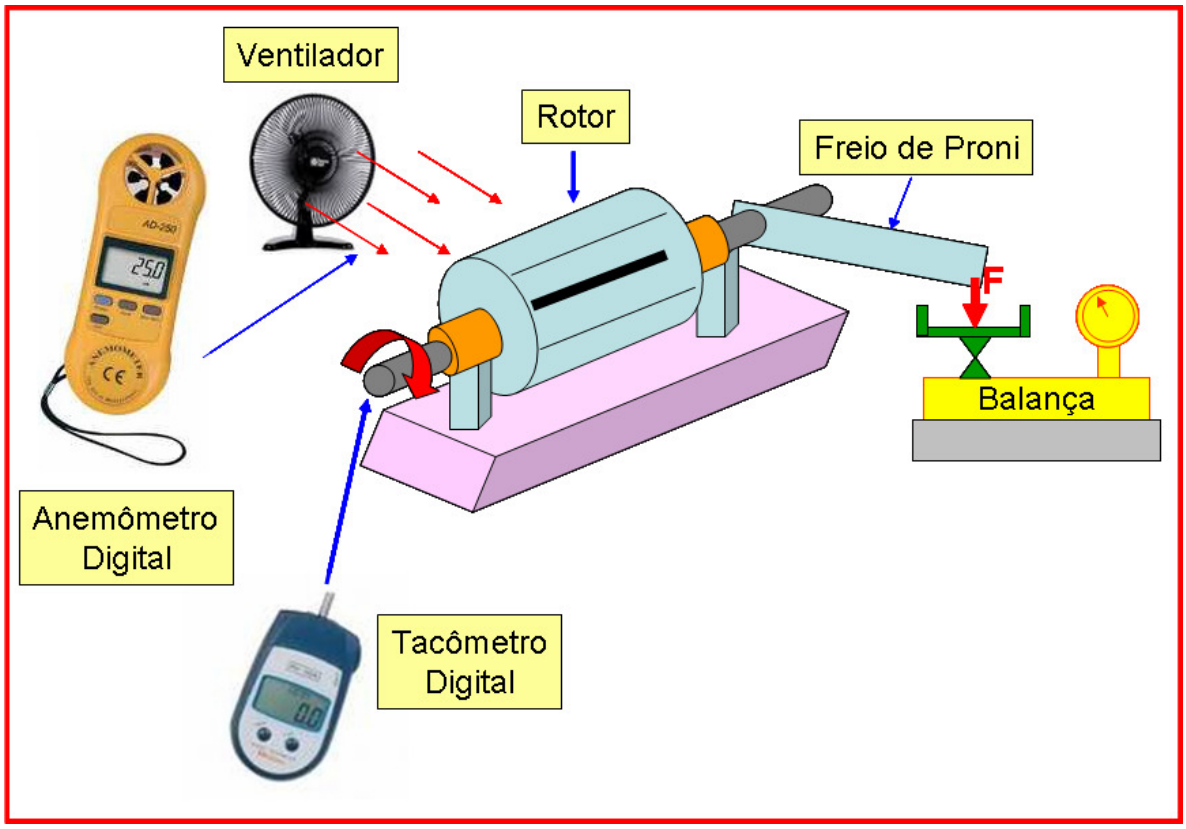


Figura 12.1 – Esquema do ensaio com o protótipo.

13. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE CONVERSÃO EÓLICO-ELÉTRICO DE UMA PEQUENA INSTALAÇÃO

Através do estudo abordado nos capítulos 6, 7, 8 e 9 é possível dimensionar e projetar um sistema de conversão eólico-elétrico para suprir as necessidades de energia em uma pequena instalação comercial ou residencial.

O local escolhido para implementação do projeto é na cidade de Iguape, litoral sul do Estado de São Paulo, onde a velocidade média do vento é de aproximadamente 6,5 m/s e com regime permanente durante o ano todo.

Nesse estudo de caso, serão estimadas as cargas, potência e consumo para uma residência simples. O consumo diário desta instalação pode ser obtido multiplicando-se a potência consumida pelos diversos aparelhos existentes na instalção, pela suas quantidades e tempo de uso diário conforme vê-se na tabela 13.1.

Tabela 13.1 – Consumo total diário estimado de uma residência simples.

Carga	Potência (W)	Quantidade	Tempo de uso (horas/dia)	Consumo diário (kWh)
Lâmpada Fluorescente	15	6	5,00	0,45
Lâmpada Incadescente	60	2	2,00	0,24
Geladeira	125	1	24,00	3,00
Televisor 20" Colorido	90	1	4,00	0,36
Televisor 14" Colorido	75	1	4,00	0,30
Ferro Elétrico	1000	1	0,25	0,25
Microondas	500	1	0,50	0,25
Chuveiro Elétrico	2500	1	0,75	1,88
CONSUMO TOTAL DIÁRIO (kWh)				6,73
CONSUMO TOTAL DIÁRIO S/ CHUVEIRO (kWh)				4,85

Observa-se que somente o chuveiro elétrico acaba sendo responsável por aproximadamente 27,8% do consumo médio diário. Analisando, consumiria menos que uma geladeira, porém devido à sazonalidade (estações do ano) este valor pode variar o consumo e implicar em demandas extras que faça que o sistema seja superdimensionado e acabe elevando o custo.

Para o caso do chuveiro elétrico uma simples solução seria instalar um sistema de aquecedor solar como sistema alternativo ou um sistema de

aquecimento central a gás, evitando o superdimensionamento e desgaste excessivo do sistema de conversão eólico-elétrico para a instalação.

O sistema proposto deverá atender então às necessidades de consumo diário de aproximadamente 5kWh, com capacidade de fornecimento contínuo de energia elétrica e baixa manutenção.

A potência média que o sistema deverá fornecer é dada por:

$$P_{Médio} = \frac{Consumo_diário}{24h} = \frac{5.000}{24} \approx 210W \qquad \text{(eq. 13.1)}$$

Viu-se no dimensionamento do modelo do rotor construído que na faixa de velocidade de vento atribuída para este estudo de caso, conseguiriá-se uma potência de aproximadamente 1,5 W que quando considerada todas as perdas mecânicas e elétricas do sistema eólico-elétrico seria ainda menor.

Existiria a necessidade da instalação de mais de 140 turbinas eólicas com as dimensões propostas para a demanda da instalação estudada.

Por este fato, será feito o dimensionamento de uma nova turbina eólica semelhante ao protótipo construído para fornecer e suprir a demanda de energia para esta pequena instalação.

A turbina construída neste caso, poderia ser utilizada para gerar energia elétrica para a iluminação de parques, onde o consumo é inúmeras vezes inferior ao consumo de uma residência.

No estado do Hawai (USA), existe este tipo de aplicação em parques e estacionamentos, com rotores eólicos de dimensões semelhantes à construída neste projeto.

13.1 Dimensionamento do rotor eólico para a instalação

O rotor deve ser dimensionado a partir dos dados de velocidade do vento e da potência mecânica necessária no eixo do gerador elétrico. Deve ser considerado o rendimento total do sistema eólico-elétrico, pois a potência convertida pelo rotor deve suprir a potência média da carga da instalação.

Será admitido que toda energia gerada seja armazenada no banco de baterias.

Considerando os rendimentos no sistema da tabela 13.2 e a partir da equação 13.2 obtêm-se a potência necessária que o rotor eólico deverá converter com a velocidade do vento estimada para o projeto.

$$P_T = \frac{P_{Med}}{\eta_G \cdot \eta_B \cdot \eta_I} \qquad \text{(eq. 13.2)}$$

Dessa forma, o rotor eólico deverá disponibilizar 395 W para o eixo do gerador elétrico.

Tabela 13.2 – Rendimentos e Carga do sistema.

Parâmetro	Valor
Pmed: Potência Média da carga	210 W
ηG: Rendimento do Gerador	0,7
ηB: Rendimento do banco de baterias	0,85
ηI: rendimento do inversor de cargas	0,9

$$P_T = \frac{P_{Med}}{\eta_G \cdot \eta_B \cdot \eta_I} = \frac{210}{0{,}7 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}9} \cong 395W \qquad \text{(eq. 13.3)}$$

Para um rotor com as seguintes características identificadas na Tabela 13.3 serão obtidos os seguintes resultados presentes na Tabela 13.4:

Tabela 13.3 – Características do rotor.

Dimensões do Rotor	
Dâimetro do rotor (m)	1,0
Largura do rotor (m)	0,8
Ângulo teta (graus)	165°

Tabela 13.4 – Torque, Potência e rotação do rotor eólico do sistema.

Ângulo	165
Vel. Vento (m/s)	**Torque (Nm)**
6,5	9,55
Vel. Vento (m/s)	6,50
rotação (rad/s)	3,25
n (rpm)	31,04
Vel. Vento (m/s)	**Potência (W)**
6,5	31,04

A partir destes cálculos observa-se a necessidade da instalação de 12 turbinas eólicas para suprir a demanda de energia desta instalação estudada.

13.2 Dimensionamento do banco de baterias

O banco de baterias da instalação deve ser capaz de suprir a carga durante todo o dia, sem que aja nenhuma geração.

Optando-se pela utilização de baterias de 12 volts, pode-se calcular a capacidade de armazenamento necessária a partir da equação 13.4.

$$Q_{bb} = \frac{Consumo_diáro(Wh)}{V_B} \qquad \text{(eq. 13.4)}$$

Então têm-se:

$$Q_{bb} = \frac{Consumo_diáro(Wh)}{V_B} = \frac{5000(Wh)}{12V} = 415[A \cdot h]$$

No catálogo online da Baterias Moura, opta-se pelo tipo de bateria Moura Clean[25] modelo 12MF150, pois ela é do tipo estacionária como foi visto no capítulo 9 deste trabalho, específica para a reserva de energias alternativas, com capacidade de carga de 150 Ah e um fator de carga de 80%, ou seja, pode ser descarregada até 80% de sua capacidade sem ser comprometida.

A partir da equação 13.5 calcula-se o número de baterias necessárias para a instalação.

$$N_{bat} = \frac{Q_{bb}}{F_c \cdot C_Q} = \frac{415}{0{,}80 \times 150} = 3{,}45 \approx 4 \qquad \text{(eq. 13.5)}$$

Será necessário um total de 4 baterias deste modelo para disponibilizar energia e suprir a carga por um dia inteiro. O custo de cada bateria é de aporximadamente R$635,00 (U$360.00). Ao total gastaria-se em torno de R$2.540,00 com o conjunto de baterias.

14. CONCLUSÕES

Como era previsto inicialmente o dimensionamento e construção de um modelo de rotor eólico para uma pequena instalação seria uma tarefa árdua.

Existem dezenas de tipos de rotores eólicos operando nos dias de hoje, porém buscou-se neste projeto algo inovador e que pudesse ser empregado para gerar energia elétrica a partir de uma fonte limpa e renovável que é a energia eólica.

Porém, percebeu-se desde o ínicio da pesquisa que mesmo para uma pequena instalação, seria necessário a construção de algo muito maior que o proposto diante da orientação do Prof. Eitaro. Ao equacionar o modelo percebeu-se que estaria sendo construindo um protótipo de um rotor eólico com fim meramente acadêmico onde no máximo conseguiriam-se potências da ordem de 2 a 3 W.

Esta comprovação infelizmente não foi feita mediante testes e ensaios até o presente momento da entrega deste projeto, mas verificamos o funcionamento do protótipo construído percebendo que o rotor tem facilidade para girar em torno do seu eixo quando exposto ao vento.

Ao final do trabalho, levantou-se o estudo de um caso para uma pequena instalação residencial.

Como foi visto que este modelo de certa forma poderia funcionar, dimensionou-se um novo modelo com as mesmas formas, porém de tamanho superior. Diâmetro 5 vezes superior e com o dobro da largura do protótipo construído.

Para uma instalação com uma demanda diária de 5 kWh, onde o local possui um regime de ventos perene com velocidade média de 6,5 m/s, para este modelo maior, seria necessária a colocação de 12 rotores eólicos em operação.

Para garantir o suprimento de carga desta instalação viu-se a necessidade de utilizar-se de 4 baterias de 12 V com capacidade de carga de 150 Ah.

15. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Ministério de Minas e Energia, Publicações: Balanço Energético Nacional Disponível em: http://www.mme.gov.br/. Acesso em 27/03/2007.

[2] Portal das Energias Renováveis – Portugal http://www.energiasrenovaveis.com/html/energias/eolica_fonte.asp. Acesso em 25/03/2007.

[3] Torres, H. J. R., Portugal, M. P. P., "Projeto de um Gerador Eólico para uso residencial",. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica - EPUSP. São Paulo. 2004.

[4] Aragona, M., Camacho, R. F., "Estudo sobre Turbinas Eólicas", Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica – EPUSP. São Paulo. 1994.

[5] CBEE - Centro Brasileiro de Energia Eólica. http://www.eolica.com.br/index_por.html. Acesso em 20/03/2007.

[6] Saheki, L., S., "Otimização de sistemas alternativos de geração de energia para aplicação em conjunto residencial (condomínio de casas)", Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica – EPUSP. São Paulo. 2005.

[7] Aonde Vamos? Energia Eólica – A Energia dos Ventos. http://www.aondevamos.eng.br/textos/texto01.htm. Acesso em 19/03/07.

[8] Site sobre Fontes Alternativas Renováveis e Energia Eólica. http://www.cerpch.unifei.edu.br/fontes_renovaveis/eolica.htm. Acesso em 20/03/07.

[9] Secretaria de Energia, Minas e Comunicações do Rio Grande do Sul – SEMC(RS). http://www.semc.rs.gov.br. Acesso em 20/04/07.

[10] "Associação dos Fabricantes de Turbinas Eólicas da Dinamarca". The Danish Wind Turbine Manufacturers Association Annual Report 2000-2001. http://www.windpower.org/tour/wres/euromap.htm. Acesso em 20/04/07.

[11] American Wind Energy Association (AWEA). http://www.awea.org. Acesso em 20/04/07.

[12] European Wind Energy Association (EWEA). http://www.ewea.org. Acesso em 20/04/07.

[13] World Wind Energy Association (WWEA). http://www.wwindea.org/home/index.php. Acesso em 20/04/07.

[14] Wikipédia. http://pt.wikipedia.org/wiki/Aerogerador. Acessado em 20/03/2007.

[15] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica - http://www.aneel.gov.br/. Acesso em 20/04/07.

[16] CRESESB - Centro de Referencia para Energia Solar e Eólica. http://www.cresesb.cepel.br/. Acesso em 20/03/2007.

[17] Daher, S et all. “Projeto e implantação experimental de um sistema de conversão eólio-elétrica operando em baixa velocidade”. Disponível em: www.dee.ufc.br/~fantunes/Gerais/Dissertacao_Daher/. Acesso em 02/06/2007.

[18] Hau E., “Windkraftanlagen - Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit”, Springer-Verlag, Berlin 1988.

[19] Fox, W. F., McDonald, A. T. “Introdução à Mecânica dos Fluidos”, 5 ed., Rio de Janeiro, Ed. LTC, 2001.

[20] WEG Motores e Geradores elétricos. www.weg.com.br. Acesso em 21/07/2007.

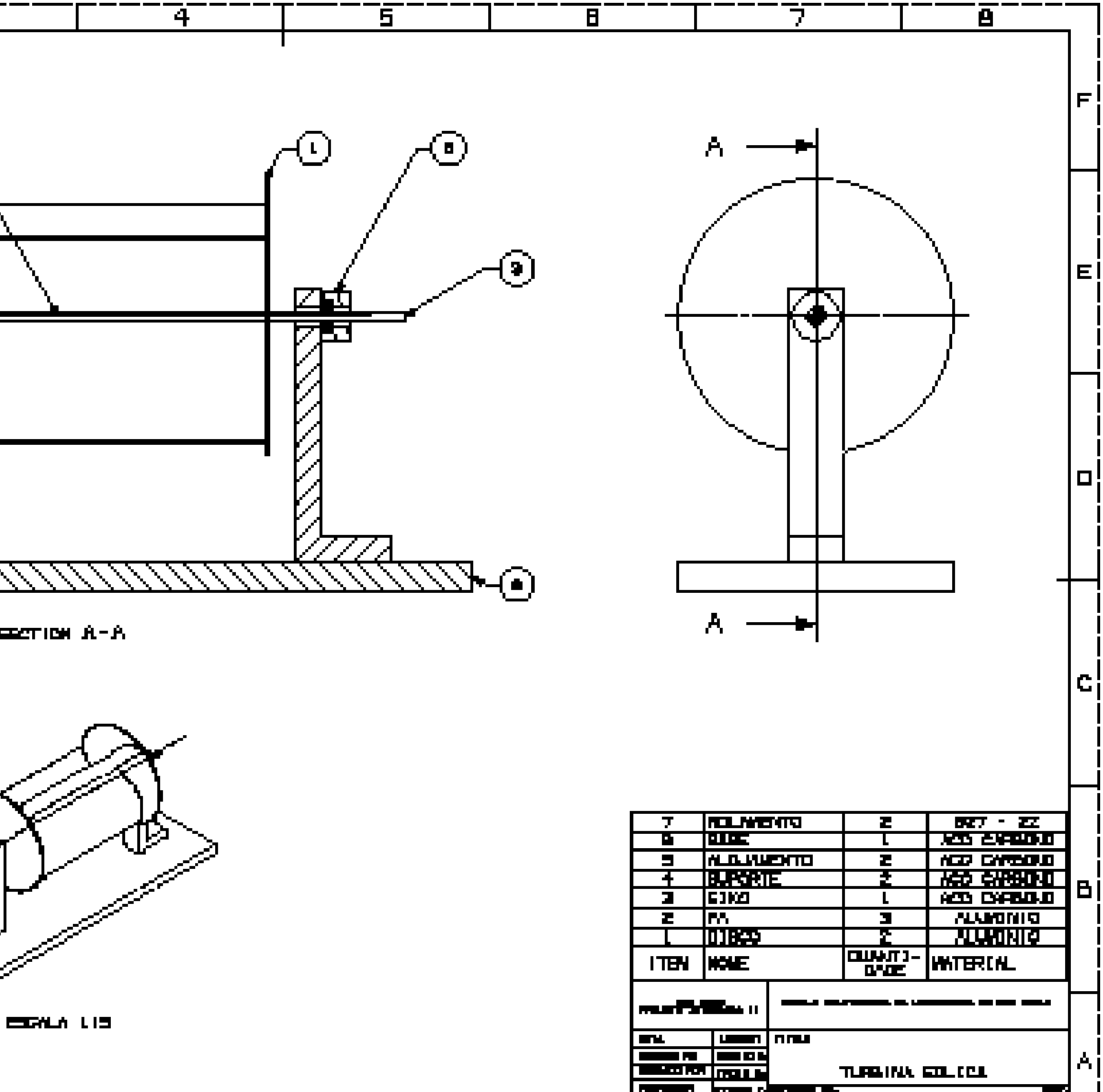
[21] Siemens – Geradores elétricos. www.siemens.com.br. Acesso em 21/07/2007.

[22] Alxion – Alternadores. www.alxion.com.br. Acesso em 28/07/2007.

[23] Coolemaster. www.coolemaster.com.br. Acesso em 28/07/2007.

[24] Baterias – Fique ligado. www.ilhavela.com.br. Acesso em 10/09/2007.

[25] Baterias Moura - http://www.moura.com.br/ . Acesso em 05/11/2007.

[26] CEB – Companhia Energética de Brasília. – http://www.ceb.com.br/. Acesso em 05/11/2007.

do rotor eólico construído: