

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

BRUNO YOKOYA KUBA

Projeto e construção de turbina eólica para
instalações comerciais e residenciais – São Paulo

São Paulo

2014

BRUNO YOKOYA KUBA

**Projeto e construção de turbina eólica para
instalações comerciais e residenciais – São Paulo**

Trabalho de formatura apresentado a
Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção de
graduação em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr.
Eitaro Yamane

São Paulo

2014

Kuba, Bruno Yokoya

**Projeto e construção de turbina eólica para instalações
comerciais e residenciais / B.Y. Kuba. – São Paulo, 2014.
81 p.**

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

**1.Turbinas (Projeto e construção) 2.Energia eólica I.Univer-
sidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia Mecânica II.t.**

Resumo

O presente trabalho apresenta um breve estudo teórico sobre turbinas eólicas de eixo vertical para a verificação sobre possíveis instalações comerciais e residenciais e uma análise sobre a matriz energética brasileira e como a energia eólica se encaixa nessa matriz. A intenção de tal estudo é de se levantar dentre os diversos tipos de rotores existentes e apontar aqueles que melhor se encaixam em uma turbina de eixo vertical para instalações comerciais e residenciais, bem como uma construção de um modelo. Para tal construção optou-se previamente por reduzir o custo final do modelo ao máximo, pois além da falta de verba levou-se em conta que se levado adiante o modelo deve possuir um preço aceitável pelo mercado.

Abstract

This paper presents a brief theoretical study of vertical axis wind turbines to check on possible commercial and residential facilities and an analysis of the Brazilian energy matrix and how wind energy fits into this matrix. The intent of this study is to stand among the various types of rotors and indicate those that best fit in a vertical axis turbine for commercial and residential installations, as well as a subsequent construction of a prototype. For such construction, it was chosen to reduce the final cost of the model to the fullest, because besides the lack of funds took into account that it carried, the model should possess an acceptable price for the market.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1.1 – Gastos energéticos para o setor residencial.....	3
Tabela 2.1.2 – Centrais eólicas em operação no Brasil	6
Tabela 4.1.1 – Parâmetros de referência para o regime do vento vs. altitude.....	31
Tabela 7.1.1.1 – Dimensões adotadas para o projeto do rotor.....	64
Tabela 7.1.2.1 – Torque gerado sobre o rotor para diversas velocidades do vento e ângulos de saída do ar.....	65
Tabela 7.1.3.1 – Velocidade de rotação do rotor da turbina eólica para diversas velocidades do vento.....	65
Tabela 7.1.4.1 – Potência gerada na turbina eólica para diversas velocidades do vento e diversos ângulos de saída do ar.....	66
Tabela 10.1.1 – Resultados obtidos com relação aos testes dos três rotores.....	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.1 – Distribuição da Matriz Energética Nacional.....	4
Figura 2.1.2 – Velocidade média anual do vento a 50m de altura.....	5
Figura 3.1 – Vantagens das VAWTs com relação as HAWTs.....	11
Figura 3.1.1 – Imagem da VAWT Eole C.....	13
Figura 3.1.2 – Princípio de funcionamento de uma turbina de eixo vertical do tipo Darrieus.....	14
Figura 3.2.1 – Forma mais simples de um rotor Savonius.....	15
Figura 3.3.1.1 – Imagem da VAWT 450.....	17
Figura 3.3.1.2 – Imagem de uma turbina com rotor H.....	18
Figura 3.3.2.1 – Imagens de Turbinas Venturi.....	19
Figura 3.3.3.1 – Imagem de uma turbina helicoidal.....	21
Figura 3.4.1 – Esquema dos principais componentes de uma VAWT moderna, com ênfase na configuração geral.....	22
Figura 3.4.2 – Esquema dos principais componentes de uma VAWT moderna, com ênfase no subsistema <i>power train</i>	23
Figura 4.1.1 – Funções de distribuição de frequência para velocidade do vento e densidade de energia eólica.....	30
Figura 4.2.1 – Funções de distribuição de frequência para velocidade do vento e densidade de energia eólica.....	30
Figura 5.1.1 – Condições do escoamento de ar devido a extração de energia mecânica de um fluxo livre de ar, de acordo com a teoria da conservação da quantidade de movimento.....	36
Figura 5.1.2 – Coeficiente de potência em função da relação de velocidades do escoamento a montante e a jusante do conversor de energia.....	38

Figura 5.2.1.1 – Condições de escoamento e forças aerodinâmicas com dispositivo empregador da força de arrasto.....	41
Figura 5.2.2.1 – Forças aerodinâmicas atuantes em um aerofólio exposto a um escoamento de ar.....	43
Figura 5.2.2.2 – Velocidade do fluxo e forças aerodinâmicas presentes em rotores que empregam forças de sustentação.....	44
Figura 6.1.1- Modelo de escoamento do teorema da quantidade de movimento de Betz.....	46
Figura 6.1.2 – Extensão da teoria da quantidade de movimento, levando-se em consideração o torque resistivo do rotor.....	47
Figura 6.1.3 – Componentes de velocidades do escoamento e forças aerodinâmicas em uma seção transversal de uma pá.....	49
Figura 6.1.4 – Modelo de vórtices gerados pelo escoamento ao redor do rotor.....	50
Figura 6.1.5 – Distribuição das forças aerodinâmicas ao longo do comprimento das pás e as forças e torques totais do rotor.....	51
Figura 6.1.6 – Aproximação da curva de potência de um rotor real em função de várias abordagens teóricas.....	52
Figura 6.2.1 – Características com relação à potência para a turbina eólica experimental WKA-60.....	54
Figura 6.2.2 – Torque característico do rotor da turbina eólica experimental WKA-60.....	54
Figura 6.2.3 – Coeficientes de potência de rotores eólicos de diferentes designs.....	56
Figura 6.2.4 – Coeficientes de torque de rotores eólicos de diferentes designs.....	56

Figura 6.3.1.1 – Influência do número de pás do rotor para o coeficiente de potência do rotor em função razão de velocidade de ponta.....	58
Figura 7.1.1 – Desenho 3D do rotor da turbina.....	60
Figura 7.1.2 – Esquema do rotor eólico a ser projetado.....	61
Figura 7.1.3 – Esquema do fluxo de ar que age sobre as pás do rotor.....	62
Figura 8.1.1 – Esquema de um gerador elétrico.....	67
Figura 9.1 – Foto do rotor projetado em acrílico.....	71
Figura 10.1.1 – Perfil do rotor de número 1 construído e ensaiado.....	73
Figura 10.1.2 – Perfil do rotor de número 2 construído e ensaiado.....	74
Figura 10.1.3 – Perfil do rotor de número 3 construído e ensaiado.....	74
Figura 10.1.4 – Foto do rotor de número 1 construído e ensaiado.....	75
Figura 10.1.5 – Foto do rotor de número 2 construído e ensaiado.....	76
Figura 10.1.6 – Foto do rotor de número 3 construído e ensaiado.....	76
Figura 10.1.7 – Foto do ventilador utilizado nos ensaios.....	77

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 ESCOPO.....	1
1.2 ANÁLISE E RESULTADOS PRELIMINARES.....	1
2. PRINCIPAIS APONTAMENTOS.....	2
2.1 A QUESTÃO ENERGÉTICA MUNDIAL.....	2
2.2 A FORMAÇÃO DOS VENTOS.....	7
2.3 ASPECTOS HISTÓRICOS.....	8
3. TURBINAS EÓLICAS DE EIXO VERTICAL.....	9
3.1 TURBINAS EÓLICAS DO TIPO DARRIEUS.....	12
3.2 TURBINAS SAVONIUS.....	15
3.3 TURBINAS DERIVADAS DAS DARRIEUS E SAVONIUS.....	16
3.3.1 Turbinas eólica com rotor H e de geometria variável.....	16
3.3.2 Turbinas Venturi.....	18
3.3.3 Turbinas Helicoidais.....	20
3.4 CONFIGURAÇÃO GERAL DE UMA VAWT.....	21
3.4.1 O subsistema <i>power train</i>	24
3.4.2 O subsistema da estrutura de apoio.....	25
3.4.3 O subsistema da fundação.....	25
4. DESEMPENHO DE TURBINAS EÓLICAS.....	26
4.1 REFERÊNCIA ANUAL PARA ENERGIA EÓLICA.....	27
4.2 REFERÊNCIA A PRODUÇÃO ANUAL DE ENERGIA.....	32
5. PRINCÍPIOS FÍSICOS DA CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA.....	34

5.1 TEORIA DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO DE BETZ.....	34
5.2 CONVERSORES DE ENERGIA EÓLICA QUE EMPREGAM AS FORÇAS AERODINÂMICAS DE ARRASTO E SUSTENTAÇÃO.....	40
5.2.1 Dispositivos que empregam a força de arrasto.....	40
5.2.2 Dispositivos que empregam a força de sustentação.....	42
6. AERODINÂMICA DE ROTORES.....	44
6.1 MODELOS MATEMÁTICOS E CÁLCULOS.....	45
6.2 CARACTERÍSTICAS DE POTÊNCIA DO ROTOR.....	53
6.3 CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DE DESIGN AERODINÂMICO DO ROTOR.....	57
6.3.1 Número de pás do rotor.....	58
7. PROJETO DA TURBINA.....	60
7.1 DIMENSIONAMENTO DO ROTOR.....	60
7.1.1 Dimensões adotadas pela turbina e condições ambientais.	64
7.1.2 Torque da turbina.....	64
7.1.3 Cálculo da rotação do rotor da turbina eólica.....	65
7.1.4 Cálculo da potência gerada na turbina eólica.....	66
8. SISTEMAS AUXILIARES.....	66
8.1 GERADORES ELÉTRICOS.....	67
8.1.1 Componentes de um gerador elétrico de corrente contínua.....	67
8.1.2 Princípio de funcionamento de um gerador elétrico de corrente contínua.....	68

8.2 SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	68
8.2.1 Conjunto de baterias.....	69
8.2.2 Controlador de carga.....	70
9. CONTRUÇÃO DO PROTÓTIPO.....	70
10. TESTES E ENSAIOS.....	72
10.1 ENSAIO COMPARATIVO DOS PROTÓTIPOS CONSTRUÍDOS.....	73
11. CONCLUSÕES.....	78
12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

1. INTRODUÇÃO

1.1 ESCOPO

O objetivo deste trabalho é de projetar e construir uma turbina eólica de eixo vertical de pequeno porte para instalações comerciais e residenciais.

Inicialmente o trabalho levanta a questão energética mundial e como a energia eólica se apresenta nesse contexto, em seguida é feita uma análise sobre as matrizes energéticas mundial e nacional.

A partir de tais apontamentos é feito um breve levantamento histórico das turbinas eólicas para em seguida apresentar um estudo teórico sobre as principais turbinas eólicas de eixo vertical, bem como um apontamento sobre as suas principais vantagens e desvantagens.

Por fim será apresentado o projeto de um rotor eólico e sua posterior construção, junto com alguns protótipos feitos e os ensaios realizados em cima de tais protótipos.

1.2 ANÁLISES E RESULTADOS PRELIMINARES

Segundo os estudos feitos até este presente momento fora constatado que é possível o uso de turbinas eólicas de pequeno porte para a redução dos custos com relação à energia elétrica. Porém deve-se levar em consideração a legislação atual, que não é clara com relação ao uso de equipamentos capazes de reduzirem o custo da energia elétrica, o que no futuro pode acabar se tornando um empecilho para a real instalação da turbina a ser projetada neste estudo.

Os custos inerentes com relação à construção do protótipo a princípio serão arcados pelo próprio autor deste projeto, porém caso tais custos se apresentem muito elevados será feito um estudo para que a comissão de graduação entre com alguma espécie de ajuda de custo, mas acredita-se que não isto não será necessário, pois o protótipo a ser construído a princípio o será feito com materiais recicláveis ou de baixo custo, justamente para a diminuição dos gastos.

2. PRINCIPAIS APONTAMENTOS

A seguir serão apresentados os principais apontamentos que servirão como base para os estudos posteriores.

2.1 A QUESTÃO ENERGÉTICA MUNDIAL

Usado pela primeira vez na Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento em 1987 o termo desenvolvimento sustentável é definido como sendo aquele que procura satisfazer as necessidades das gerações presentes sem prejudicar a capacidade das gerações futuras de atenderem suas próprias necessidades.

Desde a Revolução Industrial do século XVIII a preocupação com o meio ambiente e o desenvolvimento sustentável nunca fora uma preocupação. Ansiava-se muito mais o desenvolvimento econômico dos países frente ao meio ambiente. Um desenvolvimento maior significava mais fábricas, mais poluição e maior demanda de energia. Isso até aproximadamente 40 anos atrás, quando em 1972 fora realizada a Conferência Sobre o Meio Ambiente em Estocolmo.

A partir de tal data a preocupação com o meio ambiente e com a geração de uma energia mais limpa vem ganhando cada vez mais força e todos os dias surgem novos mercados e tecnologias embasadas com o conceito de sustentabilidade.

Apesar da preocupação com o meio ambiente e com o desenvolvimento sustentável o crescimento populacional e o anseio por uma melhor qualidade de vida elevou a demanda energética a níveis cada vez maiores. Os gastos energéticos das gerações passadas representa um pequeno percentual dos gastos energéticos das atuais gerações.

Tabela 2.1.1 – Gastos energéticos para o setor residencial brasileiro

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Unidade (Unit)
CONSUMO FINAL DE ENERGIA (1)	20.681	20.902	21.357	21.827	22.090	22.271	22.738	23.227	23.669	23.374	10^3 tep (toe)
CONSUMO FINAL DE ENERGIA PARA COCÇÃO ¹ (2)	14.374	14.339	14.586	14.672	14.710	14.456	14.518	14.474	14.342	13.637	
CONSUMO DE ELETRICIDADE (3)	72.752	76.143	78.577	83.193	85.810	90.881	95.585	101.779	108.457	113.221	GWh
POPULAÇÃO RESIDENTE (4)	176,4	179,0	181,6	184,2	182,9	185,0	187,2	189,4	191,6	193,2	10^6 hab (inhab)
(1)/(4)	0,117	0,117	0,118	0,119	0,121	0,120	0,121	0,123	0,124	0,121	tep/hab (toe/capita)
(2)/(4)	0,081	0,080	0,080	0,080	0,080	0,078	0,078	0,076	0,075	0,071	
(3)/(4)	0,412	0,425	0,433	0,452	0,469	0,491	0,511	0,537	0,566	0,586	MWh/hab (capita)

¹ Consumo Final Energético para Cocção considera GLP, gás canalizado, lenha e carvão vegetal, inclusive o Gás Natural.

Fonte: Balanço Energético Nacional (BEN, 2012)

Pode-se verificar de acordo com a tabela 2.1.1 que nos últimos anos que o consumo de eletricidade nacional vem aumentando, sendo que entre os anos de 2011 e 2002 obteve um aumento de 55%. Isso somente reforça o fato de que a demanda de energia na forma elétrica é cada vez maior.

Tendo tais levantamentos apontados anteriormente buscaram-se novos meios de se obter energia elétrica de forma sustentável. Uma das formas de se obter energia elétrica de forma renovável é o uso da energia eólica, que através de turbinas eólicas se utilizam da energia dos ventos para produzirem trabalho de eixo, que posteriormente pode ser convertido em energia elétrica. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2005, p. 93)

Denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento). Seu aproveitamento 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 cataventos (e moinhos), para trabalhos mecânicos como bombeamento d'água.

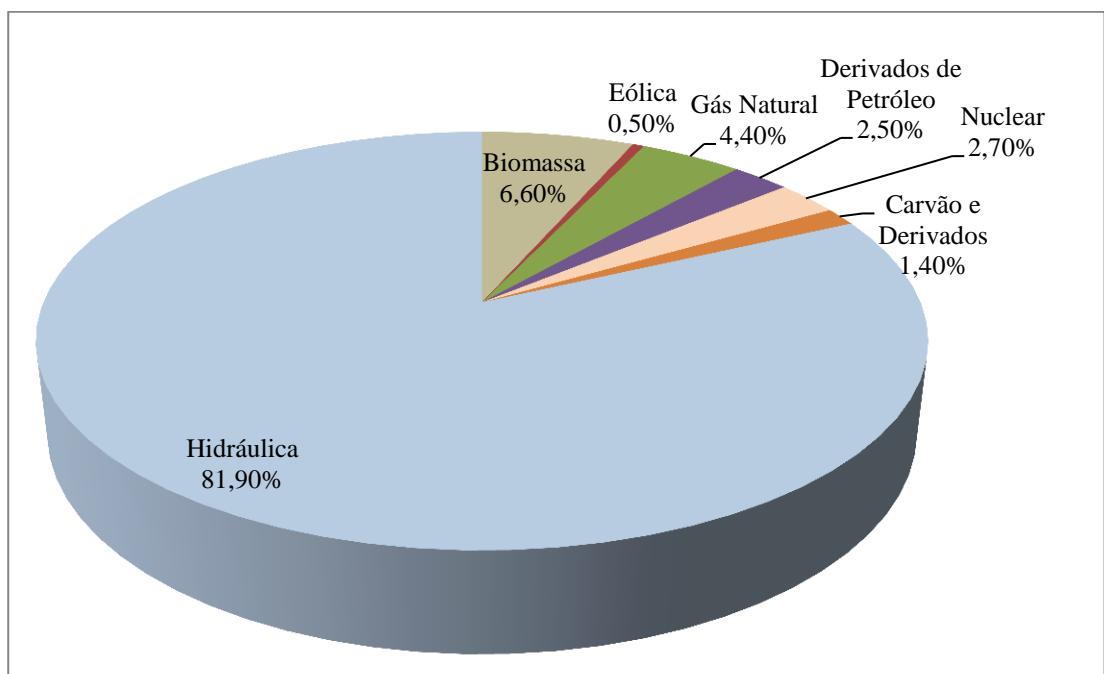
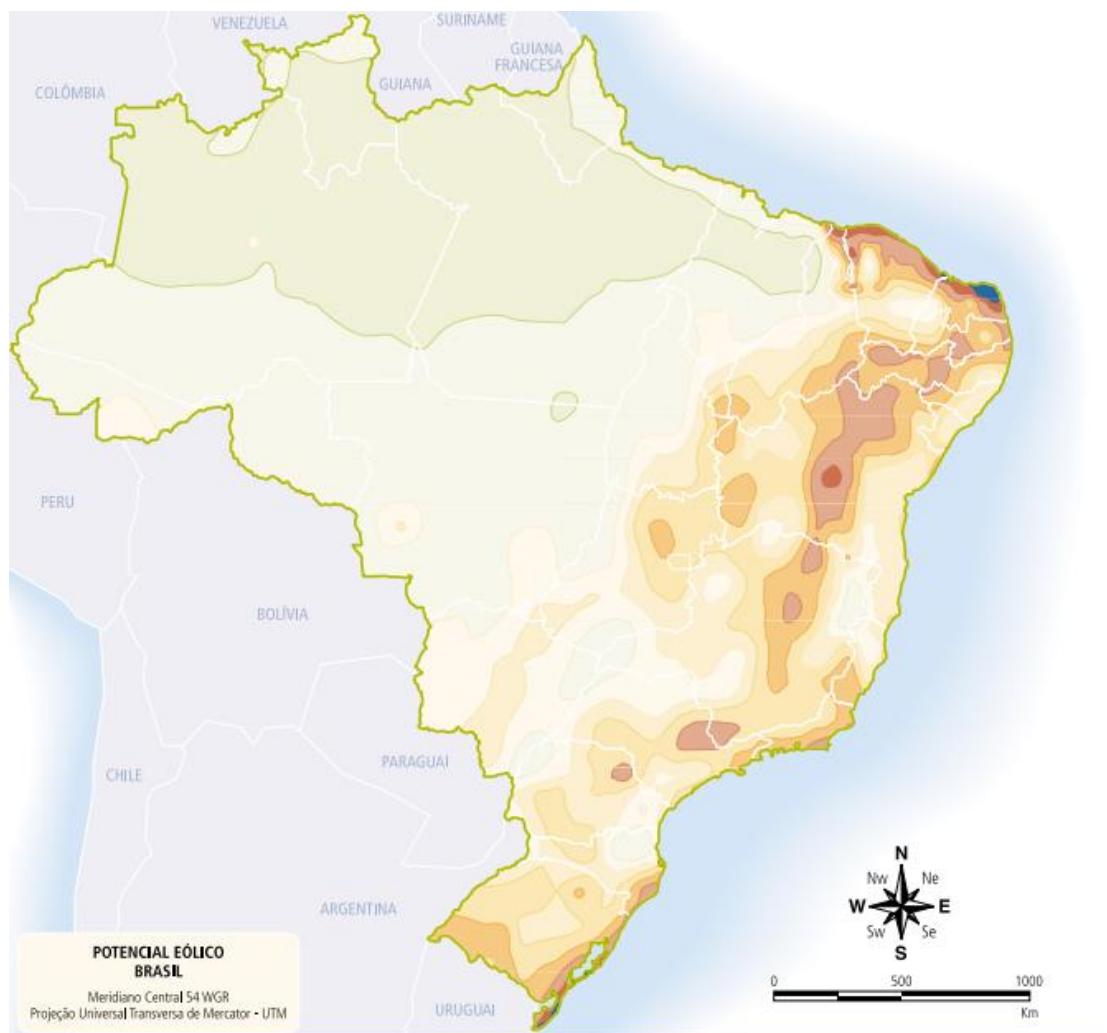


Figura 2.1.1 – Distribuição da Matriz Energética Nacional. Fonte BEN 2012

A figura 2.1.1 mostra a distribuição da matriz energética nacional.

Pode-se inferir que a matriz energética nacional é massivamente dominada pela energia hidráulica, que apesar de ser uma grande fonte energética renovável apresenta um fator limitante, por depender exclusivamente dos recursos hídricos locais.

Por isso a energia eólica vem a ser uma alternativa para suprir o crescente aumento da demanda de energia nacional. Segundo Grubb; Meyer (1993) apud ANEEL (Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2005) para que a energia eólica possa ser classificada tecnicamente como aproveitável é necessário que sua densidade seja de no mínimo 500W/m² em uma altura de 50 m, ou seja, o vento deve se apresentar a uma velocidade entre 7 e 8 m/s. Na figura 1.2 é apresentada a distribuição da área de cada continente segundo a velocidade média do vento.



Classes de energia	Mata	Campo Aberto	Zona Costeira	Morro	Montanha
4	> 6,0	> 7,0	> 8,0	> 9,0	> 11,0
3	4,5 - 6,0	6,0 - 7,0	6,0 - 7,0	7,5 - 9,0	8,5 - 11,0
2	3,0 - 4,5	4,5 - 6,0	4,5 - 6,0	6,0 - 7,5	7,0 - 8,5
1	< 3,0	< 4,5	< 4,5	< 6,0	< 7,0

Velocidade média do vento (m/s)
50 m acima do nível da superfície

Figura 2.1.2 – Velocidade média anual do vento a 50m de altura. Fonte: FEITOSA, E. A. N. et al. Panorama do Potencial Eólico no Brasil. Brasília: Dupligráfica, 2003. (adaptado) apud ANEEL (Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2005)

A legenda da figura 2.1.2 apresenta 5 condições topográficas distintas que são classificadas segundo ANEEL (Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2005) como:

- ◆ Zona costeira – áreas de praia, normalmente com larga faixa de areia, onde o vento incide predominantemente do sentido mar-terra;
- ◆ Campo aberto – áreas planas de pastagens, plantações e /ou vegetação baixa sem muitas árvores altas;
- ◆ Campo aberto – áreas planas de pastagens, plantações e /ou vegetação baixa sem muitas árvores altas;
- ◆ Morro – áreas de relevo levemente ondulado, relativamente complexo, com pouca vegetação ou pasto;
- ◆ Montanha – áreas de relevo complexo, com altas montanhas.

Ainda na legenda da figura 2.1.2 pode-se observar a classificação numérica. A classe 1 representa regiões de baixo potencial eólico, enquanto que a classe de número 4 apresenta regiões de alto potencial eólico. Já as classes 2 e 3 podem ou não serem favoráveis a exploração energética eólica.

Tabela 2.1.2 – Centrais eólicas em operação no Brasil – Situação em setembro de 2003

Nome da Usina	Potência (kW)	Município - UF
Eólica	75	Fernando de Noronha - PE
Eólica de Bom Jardim	600	Bom Jardim da Serra - SC
Eólica de Fernando de Noronha	225	Fernando de Noronha - PE
Eólica de Prainha	10.000	Aquiraz - CE
Eólica de Taiba	5.000	São Gonçalo do Amarante - CE
Eólica Olinda	225	Olinda - PE
Eólica-Elétrica Experimental do Morro de Camelinho	1.000	Gouveia - MG
Eólico - Elétrica de Palmas	2.500	Palmas -PR
Mucuripe	2.400	Fortaleza - CE

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Banco de Informações de Geração – BIG. 2003. Disponível em: <www.aneel.gov.br/15.htm>

Embora ainda haja divergências entre especialistas, vários estudos apontem que a energia eólica possui um grande potencial. Segundo um estudo feito pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio de

Salvo Brito, CRESESB (Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001) estimou-se que o potencial eólico brasileiro é da ordem de 143 GW.

Pode-se ver de acordo com a tabela 2.1.2 que no ano de 2003 a geração de energia elétrica a partir de fontes eólicas fora de 22 GW, o que mostra que há um grande espaço para o crescimento das centrais eólicas.

2.2 A FORMAÇÃO DOS VENTOS

Os ventos consistem no deslocamento de massas de ar devido à diferença da pressão atmosférica de regiões de alta para regiões de baixa pressão. Tal diferença se dá devido a não uniformidade do aquecimento da superfície terrestre, causada principalmente pela inclinação da Terra no espaço e seu movimento de rotação e translação. Por fim os ventos podem ser causados devido a efeitos locais como a topografia do terreno e a rugosidade do solo.

Existem diferentes tipos de ventos dentre os quais:

- ◆ Alísios – são aqueles que ocorrem durante todo o mês nas regiões subtropicais, muito comuns na América Central. Tais ventos são o resultado da interação entre as regiões de alta pressão localizadas nos trópicos e as regiões de baixa pressão localizadas no equador;
- ◆ Brisa – também conhecidos como ventos de superfície são aqueles que se encontram entre a superfície terrestre e uma altitude de até 100m. Os ventos de superfície são altamente influenciados pela topografia da região e pela rugosidade do solo e sua direção é ligeiramente diferente dos ventos globais devido a rotação da Terra;
- ◆ Monção – são aqueles ventos sazonais, em geral associados a troca da estação chuvosa para a estação da seca que ocorrem em grandes áreas de regiões costeiras tropicais e subtropicais;
- ◆ Ventos do Oeste – também conhecidos como corrente ocidental são aqueles ventos que se encontram em médias latitudes, entre

30º e 60º, que são resultado da iteração entre zonas de alta pressão em zonas tropicais e os polos.

2.3 ASPECTOS HISTÓRICOS

A utilização da energia dos ventos através do emprego de turbinas eólicas tem uma história singular dentre as primeiras máquinas que se tem conhecimento. A origem de tais turbinas não é certa, mas a sua utilização como umas das principais máquinas capazes de fornecer energia mecânica nos últimos séculos é inegável.

Os moinhos e as rodas d'água, que se desenvolveram na mesma época, foram umas das primeiras máquinas capazes de obter energia cinética através de fontes naturais, atingindo seu apogeu nos séculos XVII e XVIII. O seu uso, porém, começou a diminuir com o surgimento das primeiras máquinas movidas a energia térmica vinda da queima da lenha e do carvão. Motores e turbinas a vapor forneciam maiores potências com um maquinário menor, capazes de se adaptarem a múltiplos usos, ao contrário dos moinhos e rodas d'água que eram empregados apenas para moerem grãos e bombear água.

Tais motores e turbinas possuíam outro aspecto vantajoso, o fato de não dependerem de fontes naturais, o que possibilitava a sua locomoção até o local em que seriam empregados, ao contrário dos moinhos, que se fazia necessário o deslocamento do local de trabalho até onde se localizava tais moinhos.

Entretanto os moinhos perduraram através da revolução industrial e até continuaram sendo empregados em pequenas comunidades onde não se fazia necessário o uso de máquinas capazes de fornecer grandes potências e o uso constante de tal maquinário não era essencial. Contudo o uso de tais moinhos de vento não eram mais necessários em grandes centros industriais, que apresentavam grande densidade populacional e o crescimento industrial era regra.

Porém as máquinas eólicas ganharam força novamente a partir do aparecimento e propagação de duas importantes tecnologias: o uso e a rápida disseminação da energia elétrica como um meio versátil de se conectar a fonte da energia com o local do emprego desta e o aparecimento do estudo sobre aerodinâmica, que levou ao aparecimento dos primeiros aviões. Segundo David A. Spera (1994) entre os anos de 1888 e 1900 foram realizados diversos experimentos nos Estados Unidos e na Dinamarca que visavam a geração de energia elétrica a partir de moinhos de vento, que não necessitavam de nenhum tipo de combustível fóssil para o seu funcionamento.

Entre os anos de 1900 e 1910 muitos moinhos eram usados para a geração de energia elétrica, principalmente para o uso na agricultura, em países como a Dinamarca. Contudo o uso de motores diesel começara a apresentar uma grande competitividade entre os anos de 1910 e 1914, por serem mais convenientes e melhores economicamente, segundo Juul (1956, 1964) apud David A. Spera (1994). Porém devido a Primeira Guerra Mundial o suprimento de óleo diesel fora majoritariamente cortado, gerando mais uma chance aos moinhos capazes de gerar energia elétrica através da energia cinética dos ventos.

Após a guerra a eletricidade já tomava conta da Europa e novamente os moinhos foram deixados de lado. Mas em 1934 a Segunda Guerra Mundial novamente cortara o suprimento de óleo diesel, dando, novamente, mais uma chance para os moinhos de vento. Após o fim da guerra uma extensiva malha capaz de distribuir a energia elétrica por toda Dinamarca cresceu rapidamente, mas dessa vez os moinhos de vento não foram deixados de lado, pelo contrário, se iniciou diversos estudos para provar que era possível a instalação de grandes campos eólicos, capazes de gerar uma grande quantidade de energia elétrica através dos ventos.

Os perigos em se confiar nos combustíveis fósseis e o medo do fim das reservas destes levaram a estudos e pesquisas que transformaram os antigos moinhos de vento em turbinas eólicas. Nos períodos após 1945

haviam pesquisas não somente na Dinamarca, mas também na Alemanha, Inglaterra e França. Tais pesquisas provavelmente foram estimuladas devido a turbina de 12,5 MW de Smith-Putnam, que fora desenvolvida nos Estados Unidos, que operou ininterruptamente entre os anos de 1941 e 1945.

Todos esses acontecimentos levaram a um pequeno avanço no estudo sobre as turbinas eólicas, mas não foram capazes de solucionar um grande problema que fora o fato de as antigas turbinas eólicas não serem economicamente viáveis. Contudo tais estudos promoveram um ponto de partida para o renascimento do uso da energia eólica durante os anos de 1970, que fora provocado pela crise do petróleo em 1972.

3. TURBINAS EÓLICAS DE EIXO VERTICAL

Apesar das turbinas eólicas de eixo vertical, VAWT (do inglês vertical axis wind turbine), terem sido as primeiras turbinas eólicas utilizadas para a captação da energia eólica para posterior transformação em energia elétrica, as pesquisas dos últimos anos perderam interesse nas VAWT, pois constatou-se que a princípio as VAWT não são capazes de produzirem energia elétrica em larga escala, fazendo assim por consequência com que as turbinas eólicas de eixo horizontal, HAWT, permaneçam como foco das pesquisas em relação a obtenção de energia eólica nas últimas décadas.

Contudo, pesquisas em relação as VAWT continuam, porém em menor escala se comparado as pesquisas realizadas as HAWT. Cientistas e engenheiros desenvolveram diversas configurações e utilizaram diversos métodos para a realização de testes em VAWT, bem como as posteriores análises dos resultados encontrados, sendo possível obter com tais testes as condições ótimas de trabalho das VAWT.

Apesar de serem menos conhecidas e difundidas e do fato das pesquisas em relação a turbinas eólicas focarem menos nelas, as VAWT são adequadas para a geração de energia elétrica em condições de trabalho em que as tradicionais HAWT não são capazes de proporcionar uma eficiência energética aceitável, como em ventos com baixas velocidades e

em fluxos de vento no regime turbulento. Uma das maiores vantagens das VAWT com relação as HAWT é o fato de as primeiras serem omnidirecionais, ou seja, são capazes de captar o vento em vindo de qualquer direção, sem a necessidade de se empregar dispositivos de controle do seu movimento de guinada.

	Vertical axis wind turbine (VAWT)	Horizontal axis wind turbine (HAWT)
Tower sway	Small	Large
Yaw mechanism	No	Yes
Self starting	No	Yes
Overall formation	Simple	Complex
Generator location	On ground	Not on ground
Height from ground	Small	Large
Blade's operation space	Small	Large
Noise produced	Less	Relatively high
Wind direction	Independent	Dependent
Obstruction for birds	Less	High
Ideal efficiency	More than 70%	50–60%

Figura 3.1 – Vantagens das VAWTs com relação as HAWTs. Fonte Bhutta, M. M. A. et al. Vertical axis wind turbine – A review of various configurations and design techniques. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Colorado, v. 16, p 1926-1940, 2012.

A figura acima apresenta uma comparação entre as VAWTs e HAWTs. É evidente da figura acima que as VAWTs possuem um grande número de recursos que se explorados corretamente podem transformar as VAWT em uma alternativa para a obtenção de energia eólica.

Soluções para problemas inerentes das VAWTs, como por exemplo, a força de elevação das pás e a fadiga das pás causada pela variação da carga devido a escoamentos turbulentos, serão tratados mais adiante, quando forem apresentados os diferentes tipos de VAWTs e suas principais vantagens.

Atualmente, as VAWTs de larga escala não são economicamente viáveis, porém são uma alternativa para o problema de oferecimento de energia a locais afastados das principais linhas de distribuição e regiões

onde grandes fazendas eólicas não podem vir a ser construídas devido a problemas ambientais e geradores de pequeno porte são mais adequados. Isso justifica o fato da recente produção em massa de VAWTs como unidades geradoras de energia elétrica de pequeno porte, de acordo com Islam M, Fartaj A, Ting DSK (2004), apud Bhutta, M. M. A. et al. (2012).

Existem basicamente dois tipos de turbinas eólicas, as Darrieus e as Savonius, porém hoje em dia os engenheiros e cinetistas adaptaram tais turbinas, sendo que atualmente existe uma vasta variedade de modelos de VAWT, todos provenientes das turbinas Darrieus, Savonius ou de uma hibridização de ambas, sendo que tais modelos se diferenciam principalmente de acordo com o tipo de rotor utilizado a cada modelo. Porém existem problemas inerentes para cada destes, sendo que os mais comuns são: baixo torque de partida, força de elevação das pás, baixa eficiência e dificuldades em relação a montagem das turbinas. Nos últimos anos, os engenheiros inovaram criando novos designs de VAWT a fim de resolver tais problemas, que serão apresentados a seguir.

3.1 TURBINAS EÓLICAS DO TIPO DARRIEUS

As turbinas eólicas do tipo Darrieus foram desenvolvidas pelo francês Georges Darrieus e posteriormente patenteada em 1931 (Bhutta, M. M. A. et al., 2012). Tais turbinas consistem em duas ou mais lâminas flexíveis com o formato de aerofólio que são acopladas em cima e em baixo em um eixo vertical. Embora quase nenhuma pesquisa tenha sido feita em cima de tal modelo de turbina eólica, se comparado com as turbinas de eixo vertical, ambos Estados Unidos e Canadá fizeram um extenso estudo sobre as turbinas do tipo Darrieus durante a década de 1970 e 1980, que acabou gerando na construção de uma turbina eólica de 4,2 MW, conhecida como “Eole C” que se localiza em Cap Chat, Québec, Canadá.



Figura 3.1.1 – Imagem da VAWT Eole C. Fonte: Dijk, T., Delta: Magazine Van de Technische Universiteit Delft, Delft, Holanda, 2011. Disponível em <<http://delta.tudelft.nl/article/seven-veni-s-for-tu/23661>>. Acessado em novembro de 2013.

O princípio de funcionamento das turbinas Darrieus se baseia no fato de que a velocidade das pás da turbina sempre será um múltiplo da velocidade do vento, resultando em uma velocidade aparente durante toda revolução, gerando um vento contrário que apresenta uma pequena variação de ângulo. Pode-se entender melhor tal fenômeno imaginando um ciclista, independente de sua velocidade, sempre haverá um vento contrário.

O movimento giratório das pás gera um vento contrário, que combinado com o vento já existente forma o vento aparente. Se o ângulo de ataque do vento aparente na pá for maior que zero, a força de sustentação da pá irá gerar uma componente para a frente, que impulsiona a turbina.

O ângulo de ataque, que pode variar a cada volta da turbina, deve ser entre 0 a 20º, sendo que o ângulo de 20º não deve ser ultrapassado, pois a partir deste ponto a escoamento através da pá não é mais laminar, que é uma condição para que a força de sustentação seja gerada, caso contrário o escoamento turbulento pode acabar gerando *stall*, condição altamente

indesejada para o funcionamento da turbina. Tais ângulos de ataque exigem uma velocidade do vento relativamente alta, sendo que os turbinas do tipo Darrieus não conseguem se auto-iniciarem, ou seja, tais turbinas necessitam de um meio externo até se atingir uma velocidade da pá suficientemente alta suficiente para que esta mantenha a sua velocidade, porém o fato de não se necessitar um mecanismo de controle para se direcionar a turbina em relação ao vento compensa tal déficit.

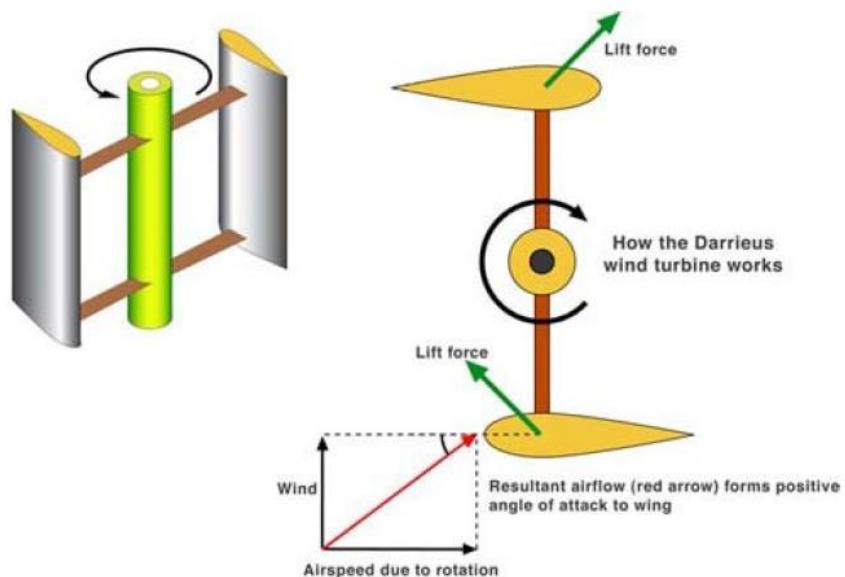


Figura 3.1.2 – Princípio de funcionamento de uma turbina de eixo vertical do tipo Darrieus. Fonte: Ragheb, M. Vertical Axis Wind Turbines, 2013.

Há atualmente um número significativo de turbinas Darrieus construídas comercialmente em fazendas nos Estados Unidos, onde a grande maioria de tais turbinas foram construídas pela The Flow Wind Corporation. Tais turbinas se provaram eficientes e confiáveis, porém algumas delas apresentaram problemas com relação a fadiga das pás, pois estas foram projetadas para fletirem, o que gera um aumento da força centrífuga quando há aumento da velocidade do vento e das pás. A flexão das pás acabou causando a falha por fadiga de algumas destas, onde ocorreu a fadiga do material das pás.

As VAWTs Darrieus construídas e testadas durante as décadas de 1970 e 1980 utilizavam um perfil simétrico de asa para as pás, pois acreditava-se que com uma pá simétrica conseguia-se uma força de sustentação de ambos os lados da pá, gerando por consequência uma força de sustentação durante toda revolução do rotor. Acreditava-se também que uma força de sustentação era somente gerada quando uma pá se movimentava na direção contrária do vento e que a força de arrasto criada pela pá oposta que se movimentava a favor do vento era um efeito indesejado.

Porém sabe-se hoje em dia que pás com perfil simétrico não são as mais eficientes quando relacionadas à força de sustentação. Nos dias atuais existe uma procura por um perfil de asa que maximize a força de sustentação e que de alguma forma utilize a força de arrasto gerada pela pá oposta.

3.2 TURBINAS SAVONIUS

A turbina Savonius é uma turbina eólica de eixo vertical que utiliza um rotor que fora idealizado pelo engenheiro finlandês Sigurd Johannes Savonius em 1922. Tal turbina é uma das turbinas mais simples já concebidas sendo que a forma mais simples apresenta um rotor que se resume em duas metades de copos fixados em um eixo central em direções opostas, conforme figura 3.2.1.

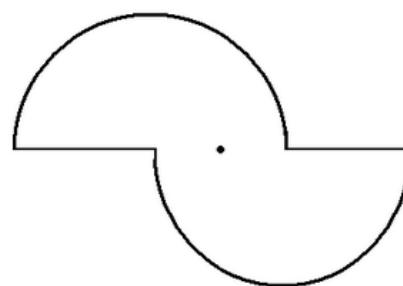


Figura 3.2.1 – Forma mais simples de um rotor Savonius. Fonte: The Creative Science Center. Disponível em <<http://www.creative-science.org.uk/sav.html>>, visualizado em novembro de 2013.

Quando uma metade do rotor capta o vento, esta acaba por consequência girando o rotor, fazendo com que a outra metade capte o vento, repetindo o processo, fazendo com que o rotor repita o processo até que seja feita uma rotação completa. Este processo ocorre durante todo o tempo em que haja um fluxo de vento. Tais tipos de rotor são comumente usados também em instrumentos de medição, para se medir a velocidade dos ventos em certa localização, como por exemplo, os anemômetros.

O princípio de funcionamento da turbina Savonius é o fato de o vento, ao se chocar com uma superfície, gerar uma força de arrasto, que pode ser aproveitada para se realizar trabalho, como por exemplo, a geração de energia elétrica.

3.3 TURBINAS DERIVADAS DAS DARRIEUS E SAVONIUS

A fim de se obter maiores eficiência e solucionar problemas inerentes das VAWTs concebidas no início do século XX, o engenheiros e cientistas modernos vem desenvolvendo turbinas eólicas que derivam daquelas já apresentadas, as Darrieus e Savonius. A seguir será apresentado algumas delas, sendo que algumas são uma mistura das duas turbinas originais.

3.3.1 Turbinas eólica com rotor H e de geometria variável

Peter Musgrove em 1975 liderou um série de pesquisas no Reino Unido, cujo propósito era eliminar a fadiga das pás e aumentar a eficiência de uma turbina Darrieus desentortando suas pás. Tais pesquisas levaram a um novo modelo de rotor para turbinas eólica de eixo vertical conhecido como rotor H.

Na época pensava-se que a simples configuração do rotor pudesse, em altas velocidades pudesse ultrapassar um limite para uma velocidade segura e vir a se tornar estável. Foi então proposto que se utilizasse um mecanismo incorporado na turbina que controlasse a angulação das pás

para que se pudesse controlar o ângulo de ataque de cada pá. Tais turbinas ficaram conhecidas como turbinas de geometria variável.

Houve diversas tentativas de se controlar a geometria das pás durante a década de 1970, onde foram feitos testes em túneis de vento e a construção de diversos protótipos capazes de gerar entre 40 a 100 KW. Tal trabalho resultou em uma turbina com 25 metros de diâmetro capaz de gerar 130 KW de potência, conhecida como VAWT 450 e que se encontra em Carmarthen Bay ao sul do País de Gales.



Figura 3.3.1.1 – Imagem da VAWT 450. Fonte: Peace, S. The American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2004. Disponível em <<http://www.windturbine-performance.com/www/another%20approach%20to%20wind-apptowind.html>>. Acesso em novembro de 2013.

Porém a partir de tais estudos feitos por Musgrove houve aqueles que acreditavam que o uso de mecanismos de controle de velocidade das pás era algo desnecessário pois as forças de arrasto e o efeito de stall gerados por uma pá deixando o escoamento do vento limitava a velocidade da pá

oposta que adentrava o escoamento do vento pudesse atingir. Tal fato levou a um grupo de engenheiros a acreditar que o rotor H por si só se auto regulava para qualquer velocidade do vento, fazendo com que o rotor atingisse uma velocidade ótima instantes antes de este entrar em contato com o escoamento do vento.



Figura 3.3.1.2 – Imagem de uma turbina com rotor H. Fonte: Disponível em <http://users.xplornet.com/~rmanzer/windmill/hrotor_calculator.html>. Acesso em novembro de 2013.

3.3.2 Turbinas Venturi

Em turbinas de eixo horizontal as pás giram e descrevem uma superfície circular, onde o rotor extraí a energia do escoamento do ar que passa pela superfície do rotor e tem uma eficiência máxima de 59%, segundo a lei de Betz.

Nas turbinas Venturi, as pás do rotor estão acopladas ao eixo em ambas as pontas, e quando o rotor gira uma superfície esférica é gerada. Devido a esse comportamento aerodinâmico, as turbinas Venturi criam um escoamento de vento de padrão convergente. Dentro da esfera uma área de

baixa pressão é gerada, o que faz com que o ar em volta da esfera converja para o rotor.

O fluxo de ar através da turbina e o ar em volta do rotor são usados de uma forma mais eficaz, resultando em um aumento da efetividade das turbinas Venturi em relação as turbinas eólicas convencionais.

Outra característica importante das turbinas Venturi é o fato destas desenvolverem velocidades maiores do que as turbinas eólicas convencionais, fazendo com que as turbinas Venturi sejam capazes de gerar eletricidade mesma em baixas velocidades do vento. Pequenas rajadas de vento podem ser utilizadas para gerar eletricidade, onde turbinas convencionais utilizariam tais rajadas para começarem a rodar.



Figura 3.3.2.1 – Imagens de Turbinas Venturi. Fonte: Ragheb, M. Vertical Axis Wind Turbines, 2013.

Testes feitos nos túneis de vento da Universidade Técnica de Delft mostraram que uma turbina Venturi de três pás pode chegar a uma eficiência de até 85%, 40% mais do que a eficiência máxima teórica de 59% da Lei de Betz.

Outro aspecto vantajoso das turbinas Venturi é o baixo nível de ruído gerado, quase inexistente, se comparado com as turbinas eólicas convencionais. Isso se deve ao fato de que as turbinas Venturi não

utilizarem uma caixa de transmissão e também o número de pás reduz a velocidade de rotação.

Um rotor de seis pás, que é o mais convencional, necessita de um momento de partida relativamente alto, porém uma vez em movimento a turbina é capaz de girar quase que continuamente, sendo que a turbina só irá parar realmente se realmente não houver vento algum. Tais turbinas são capazes de funcionar de 80 a 90% do tempo, enquanto que turbinas convencionais funcionam somente 50% do tempo total. Isso resulta em um suprimento de energia mais constante para um centro consumidor.

3.3.3 Turbinas Helicoidais

As turbinas helicoidais vêm se tornando cada vez mais populares devido ao seu uso em regiões urbanizadas, especialmente para uso doméstico. A grande maioria das turbinas helicoidais possuem uma estrutura parecida com o DNA ou grandes brocas. As turbinas helicoidais são, assim como as turbinas Venturi, mais silenciosas do que as turbinas eólicas convencionais, pois a velocidade nas pontas de sua pá é menor do que nas turbinas convencionais. Outra vantagem das turbinas helicoidais é o fato destas exigirem menores velocidades para iniciarem a rotação de seus rotores.

Tipicamente as turbinas helicoidais são utilizadas em centros urbanos pois estas podem ser instaladas tanto no chão quanto em cima das casas e prédios, e ainda assim serem eficientes, sem contar o fato de não necessitarem de um mecanismo de controle de velocidade, pois tais turbinas podem ser usadas para ventos mais elevados.



Figura 3.3.3.1 – Imagem de uma turbina helicoidal. Fonte: Xconomy.
Disponível em <<http://www.xconomy.com/san-diego/2009/07/08/small-is-beautiful-helix-powers-weinbrandt-sees-a-small-wind-turbine-on-every-rooftop/attachment/helix-turbine-640/>>,. Acesso novembro 2013.

3.4 CONFIGURAÇÃO GERAL DE UMA VAWT

Como fora apresentado acima existe inúmeros modelos de VAWTs, cada um com suas peculiaridades, com suas vantagens e desvantagens. A figura 3.4.1 apresenta uma configuração geral de uma VAWT moderna do tipo Darrieus. Seus principais subsistemas são o rotor, o *power train*, a estrutura de suporte, a fundação e a estação de base. Enquanto alguns dos subsistemas e componentes são comuns para VAWTs e HAWTs suas configurações são completamente diferentes.

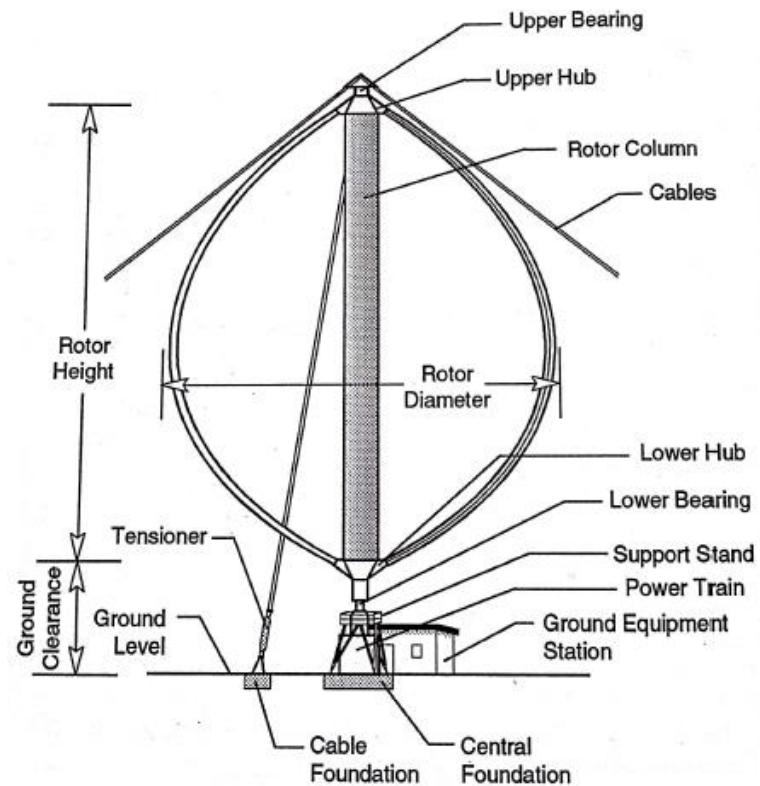


Figura 3.4.1 – Esquema dos principais componentes de uma VAWT moderna, com ênfase na configuração geral. Fonte: Spera, 1994.

Como a figura 3.4.1 mostra, o principal componente em uma VAWT Darrieus são suas pás encurvadas fixas no eixo central através dos apoios superior e inferior.

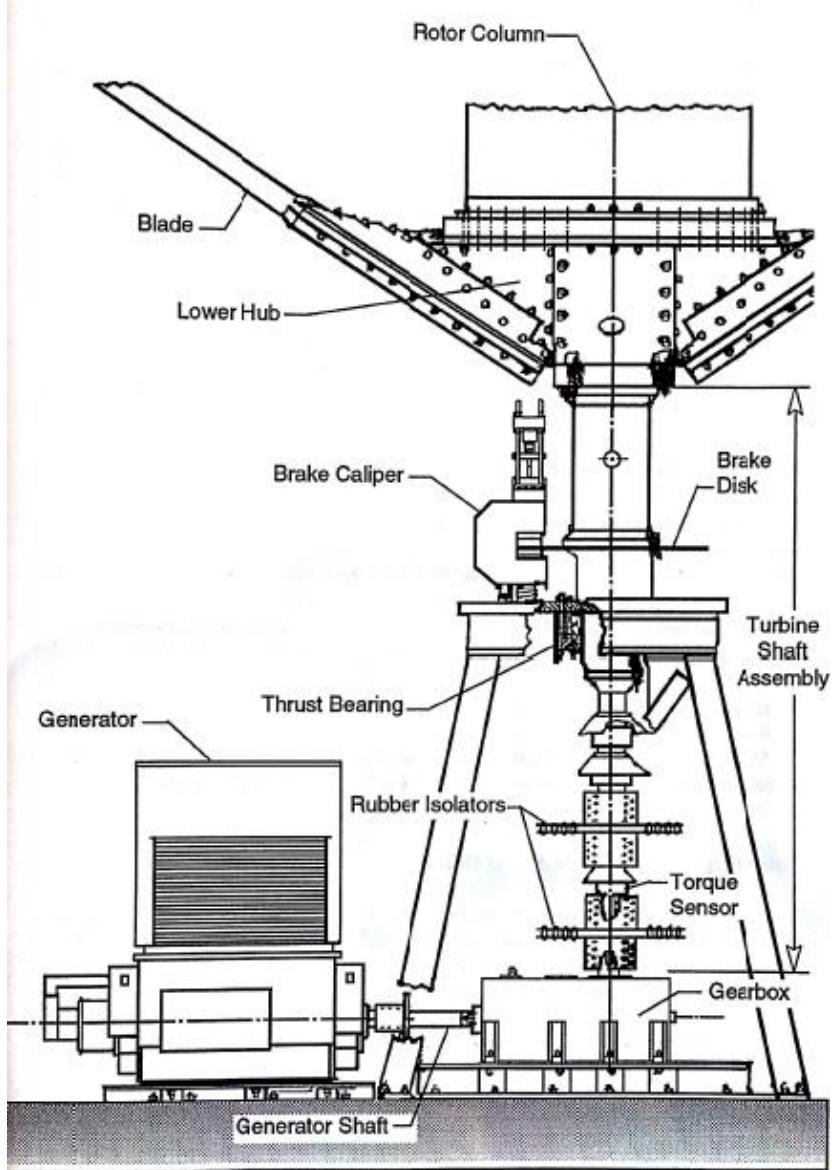


Figura 3.4.2 – Esquema dos principais componentes de uma VAWT moderna, com ênfase no subsistema *power train*. Fonte: Spera, 1994.

Para minimizar as tensões internas de flexão durante a rotação, as pás são conformadas para se parecerem a uma corda torcida, um formato no qual as tensões de flexão são nulas. Os rotores das VAWTs possuem, em sua generalidade dois ou três pás para cada rotor, simétricas em relação ao eixo do rotor sem apresentarem torção ou conicidade. Um aspecto importante para as VAWTs são a sua área varrida, que no caso das VAWTs é definido como a projeção em um plano vertical da superfície gerada pelo movimento das pás, sendo que o diâmetro do rotor é o comprimento da área

varrida em seu equador. A altura do rotor, outro aspecto importante nas VAWTs, é definido como a distância entre o apoio superior e inferior (*upper hub* e *lower hub*) e é usualmente 15 a 30% maior que o diâmetro.

Um dos métodos mais utilizados para se começar a mover um rotor Darrieus é acoplando-se um motor elétrico, já que as pás desenvolvem a força de sustentação e o torque somente quando há a sobreposição do movimento circular do rotor com a velocidade do vento, o que faz com que a grande maioria das VAWT com rotor Darrieus não sejam auto-iniciantes. Os rotores de VAWTs em sua maioria são parados com o emprego de um freio localizado no subsistema *power train*, embora que há atualmente pás com flaps em suas extremidades que causam uma força de arrasto que acabam por parar o movimento do rotor.

O material mais comum usado na construção das pás de rotores Darrieus são ligas de alumínio. As pás são aparafusadas nos apoios, que são rigidamente conectados ao eixo central do rotor, que capta o torque e o transmite para o subsistema *power train*. A resistência a flambagem é um dos requisitos principais para o eixo do rotor, já que este está submetido a altas forças descendentes geradas pelos cabos de sustentação.

3.4.1 O subsistema *power train*

O subsistema *power train* de uma turbina eólica consiste de uma série de componentes mecânicos e elétricos, necessários para que ocorra a conversão da energia mecânica em elétrica. Há três principais diferenças entre o subsistema empregado em VAWTs e HAWTs. Primeiramente o subsistema em VAWTs é localizado em sua base, próximo do chão, ao contrário de VAWTs, em que o subsistema se localiza a altura do eixo do rotor, a vários metros do chão, o que acaba por dificultar a manutenção e aumentando o tamanho do seu suporte de apoio.

A segunda principal diferença é o fato de que em VAWTs o eixo do rotor está submetido apenas ao torque gerado pelo movimento das pás, enquanto que em HAWTs o eixo está submetido em uma de suas

extremidades ao peso das pás. E por último os freios empregados em VAWTs são muito maiores do que os normalmente utilizados em HAWTs, pois estes devem ser capazes de frear um rotor Darrieus operando em velocidade máxima.

3.4.2 O subsistema da estrutura de apoio

A estrutura de apoio de VAWTs consiste nos rolamentos superior e inferior, cabos de sustentação com mecanismos de tensionamento e um suporte de apoio. Geralmente os rotores Darrieus empregam três ou quatro cabos de sustentação para apoiarem a ponta superior do eixo do rotor. Tais cabos se estendem desde o topo superior do eixo do rotor até o chão, formando um ângulo de 30º a 40º. A tensão empregada nos cabos geram uma força descendente no rolamento superior do rotor superior ou igual a metade da tensão existente em todos os cabos. Tal tensão é transmitida pelo eixo central do rotor até o rolamento inferior, o suporte de apoio e por fim a fundação da turbina.

A estrutura de apoio em VAWTs é determinada em função da tensão empregada nos cabos de sustentação, pois estes são os responsáveis por restringirem o movimento do centro de massa do rotor da turbina. Tais cabos em sua maioria são dimensionados e tensionados para possuírem uma frequência natural superior ao do rotor em movimento, porém inferior a das pás (*i.e.* o número de pás vezes a velocidade do rotor).

3.4.3 O subsistema da fundação

A fundação de VAWTs incluem a fundação central embaixo do suporte de apoio e a fundação dos cabos de sustentação localizada na extremidade inferior de cada cabo de sustentação. Devido ao fato da fundação central não ser submetida a esforços ascendentes, o seu peso é geralmente menos do que o peso combinado da fundação dos cabos de sustentação e geralmente não é tão reforçado quanto no caso da fundação de HAWTs. A fundação dos cabos de sustentação de VAWTs contém âncoras de aço

altamente reforçadas para resistirem à tensão de tração e são dimensionados para prevenirem um deslocamento ascendente que resultaria em uma perda da tensão nos cabos.

4. DESEMPENHO DE TURBINAS EÓLICAS

A principal medida do desempenho de turbinas eólicas é conhecida como a produção anual de energia, que é a energia elétrica entregue para um consumidor durante um ano inteiro [American Society of Mechanical Engineers, ASME 1989, apud Spera 1994]. A saída de energia do sistema é uma medida intermediária de performance e é definida pela geração de energia elétrica em função da velocidade do vento constante. Obviamente a energia elétrica líquida produzida pela turbina eólica irá depender da energia do vento que passa pela área varrida, assim como a eficiência dos componentes.

Uma medida da eficiência da conversão de energia da uma turbina eólica é o coeficiente de energia ou o fator de recuperação de energia, definido com a razão entre a energia elétrica produzida e a energia do vento absorvida ao longo do ano, ou seja

$$C_E = \frac{\text{Produção Anual de Energia}}{\text{Energia Eólica Anual Absorvida}} = \frac{AEO}{E_W} = \frac{\int_{\text{Ano}} P_o dt}{\int_A \left(\int_{\text{Ano}} p_W dt \right) dA} \quad (4-1)$$

Onde:

- ♦ C_E = coeficiente de energia ou fator de recuperação de energia;
- ♦ P_o = potência de saída do sistema;
- ♦ A = área varrida do rotor da turbina;
- ♦ p_W = densidade da potência eólica (W/m^2).

Muitas vezes é conveniente calcular o coeficiente de energia durante o projeto, tomando como base um regime hipotético do vento, que sirva como representação da distribuição da velocidade do vento, da duração e da magnitude deste esperado durante a operação da turbina.

4.1 REFERÊNCIA ANUAL PARA ENERGIA EÓLICA

Considere um escoamento tubular horizontal de vento, onde o ar flui através de um tubo imaginário onde todas as suas partículas passam por uma dada seção transversal com a mesma velocidade. A densidade da potência eólica em um ponto deste escoamento é a potência fluido-dinâmica por unidade de área da seção transversal, dada pela seguinte equação:

$$p_w = 0,5 \rho U^3 \quad (4 - 2)$$

Onde:

- ◆ ρ = densidade do ar $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$;
- ◆ U = componente horizontal da velocidade do vento constante (m/s).

Assim a densidade da potência eólica é diretamente proporcional ao cubo da velocidade do vento. Este fato é fundamental para o projeto da turbina eólica e a escolha de sua localização.

Para propósitos de cálculos da densidade da potência eólica, a velocidade do vento geralmente é calculada para 0,1 hora para se obter a velocidade constante do vento. Este processo do cálculo da velocidade do vento elimina turbulências de alta frequência (desvios instantâneos da velocidade do vento e sua direção) cujo efeito seria muito locais e rápidos para influenciarem a longo prazo a conversão de energia. O termo constante é relativo e se refere somente a uma média de um período junto com a altitude medida. O vento constante por si só varia ao em períodos muito longos de tempo e com mudanças da altitude escolhida. Devido a tais variantes, uma medida significativa do vento como fonte de energia é a densidade anual de energia eólica, dada por:

$$e_w(z) = \int_{Ano} p_w(z) dt = 0,5\rho \int_0^{\infty} U^3 f_w(z) dU \quad (4 - 3)$$

Onde:

- ◆ e_W = densidade anual de energia eólica para a altitude z ($Wh/m^2/ano$);
- ◆ t = tempo decorrido (h);
- ◆ f_W = função de distribuição da frequência de U para a altitude z [$(h/ano)/(m/s)$].

Dois modelos simples são comumente usados juntos para se calcular a função de distribuição da frequência da função f_W em termos de velocidade do vento e altitude. Tais modelos são o Modelo de Weibull para a função de distribuição da frequência da velocidade do vento para uma altitude de referência específica e o Modelo da Lei de Potência para a variação da velocidade do vento com a altitude. A equação do Modelo da Lei de Potência para o perfil vertical da velocidade do vento constante é:

$$U(z) = U_R(z/z_R)^\alpha \quad (4-4)$$

Onde:

- ◆ z = altitude em relação ao chão (m);
- ◆ z_R = altitude de referência (m);
- ◆ U_R = velocidade do vento constante para a altitude de referência, calculada para o mesmo tempo de U (m/s);
- ◆ α = expoente empírico do cisalhamento do vento.

O expoente α não é uma constante, mas varia de acordo com a irregularidade do terreno, gradiente de temperatura atmosférico para o local escolhido para a instalação da turbina e a velocidade constante do vento [Justus e Mikhail, 1976, Spera e Richards, 1979, apud Spera 1994]. As equações (4-3) e (4-4) podem ser combinadas, onde obtém-se:

$$e_W(z) = 0,5\rho \int_0^{\infty} U_R^3 (z/z_R)^{3\alpha} f_W(z_R) dU \quad (4-5)$$

Colocar α dentro da integral permite variar α com a velocidade do vento U . O Modelo de Weibull para f_W para a altitude de referência z_R é dada por:

$$f_W(z_R) = \left(\frac{8760}{C_R}\right) k_R \left(\frac{U}{C_R}\right)^{k_R-1} \exp\left[-\left(\frac{U}{C_R}\right)^{k_R}\right] \quad (4-6)$$

Onde:

- ◆ C_R = fator de escala empírico de Weibull para ventos na altitude de referência (m/s);
- ◆ k_R = fator de forma empírico de Weibull para ventos na altitude de referência.

A média anual da velocidade do vento pode ser expressa em termos de fatores de Weibull como:

$$U_{A,R} = C_R \Gamma\left(1 + \frac{1}{k_R}\right) \cong (0,90 \pm 0,01) C_R \quad (4-7)$$

Onde:

- ◆ $U_{A,R}$ = média da velocidade do vento anual para a altitude de referência (m/s);
- ◆ $\Gamma(\)$ = função gama de ().

As variáveis de referência foram especificadas pelo *U.S. Federal Wind Energy Program* (Programa Federal Estadunidense de Energia Eólica) na década de 1970 a fim de promover uma base uniforme para pesquisadores. As variáveis obtidas foram: velocidade do vento anual de 6,24 m/s com uma altitude de referência de 9,1m. Estudos anteriores ao descrito acima indicaram que os dados acima poderiam ser usados para representar uma grande porcentagem do mundo para o projeto de turbinas eólicas. Na década de 1980, com o avanço da tecnologia, passou-se a obter escalas de Megawatts. Com isso, os cientistas norte americanos aperfeiçoaram o regime do vento de referência para os seguintes termos:

- ◆ $z_R = 10,0 \text{ m}$ (4 - 8 a);

- ◆ $\alpha_R = 0,351 - 0,192 \log(U_R)$ (4 – 8 b);
- ◆ $C_R = 7,17 \text{ m/s}$ (4 – 8 c);
- ◆ $k_R = 2,29$ (4 – 8 d);
- ◆ $\rho_R = 1,225 \text{ kg/m}^3$ (Padrão à nível do mar) (4 – 8 e).

A figura 4.1.1 apresenta uma distribuição da frequência de da velocidade do vento constante e da densidade da potência eólica a uma altitude de 10 m. A velocidade do vento para a qual a frequência da energia eólica é maior se denomina como velocidade do vento de projeto, U_D , porque a produção anual de energia normalmente é máxima se uma turbina eólica é projetada para uma máxima eficiência aerodinâmica em $U \sim U_D$. Com os modelos do perfil vertical da velocidade do vento, a distribuição das variáveis podem ser calculadas para qualquer altitude. Os parâmetros C, k, U_A, U_D , e e_W para o regime de vento de referência são dados segundo a tabela 4.1.1 em função da altitude. Pode-se ver que a densidade da potência eólica de referência aumenta significativamente com a altitude.

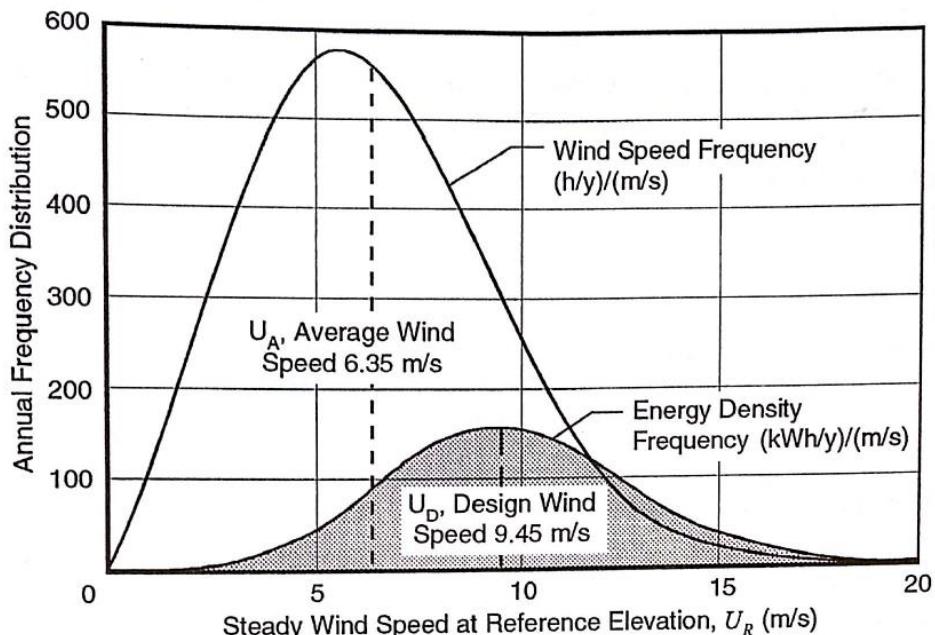


Figura 4.1.1 – Funções de distribuição de frequência para velocidade do vento e densidade de energia eólica. Altitude: 10 m, densidade do ar: $1,225 \text{ kg/m}^3$.

Fonte : Spera, 1994.

Com as equações (4-1) e (4-3), tem-se que a referência anual do vento é:

$$E_W = \int_A e_W(z) dA = \int_H e_W(z) w(z) dz \quad (4 - 9)$$

Onde:

- ♦ E_W = referência de entrada anual de energia eólica para a área varrida pelo rotor (W/ano);
- ♦ H = altura vertical da área varrida; inclui inclinação, se houver (m);
- ♦ w = largura da área varrida na altitude z (m).

Tabela 4.1.1 – Parâmetros de referência para o regime do vento vs. altitude. Fonte: Spera, 1994.

Elevation z (m)	Scale C (m/s)	Shape k	Average Speed U_A (m/s)	Design Speed U_D (m/s)	Energy Density e_W (kWh/m²/y)
5	6.30	2.16	5.58	8.55	1,656
10	7.17	2.29	6.35	9.45	2,324
15	7.73	2.37	6.85	10.05	2,836
20	8.16	2.43	7.24	10.50	3,276
25	8.51	2.48	7.54	10.85	3,664
30	8.80	2.52	7.80	11.15	4,009
35	9.06	2.56	8.04	11.40	4,331
40	9.28	2.59	8.24	11.65	4,621
45	9.49	2.62	8.44	11.85	4,907
50	9.68	2.64	8.60	12.00	5,183
55	9.85	2.67	8.76	12.20	5,425
60	10.01	2.69	8.90	12.35	5,669
65	10.16	2.71	9.03	12.50	5,902
70	10.30	2.73	9.16	12.65	6,123
75	10.44	2.75	9.29	12.77	6,350
80	10.56	2.77	9.40	12.90	6,545
85	10.68	2.79	9.51	13.00	6,744
90	10.80	2.80	9.61	13.10	6,958
95	10.91	2.82	9.72	13.22	7,145
100	11.01	2.83	9.81	13.30	7,327

4.2 REFERÊNCIA A PRODUÇÃO ANUAL DE ENERGIA

A medida usual da performance aerodinâmica do rotor de uma turbina eólica (independentemente da configuração) é o coeficiente de potência do rotor, que é a razão da densidade de potência do rotor (potência mecânica no eixo da turbina por unidade de área varrida) pelo densidade de potência do vento, ou seja:

$$C_{P,r} = \frac{P_r/A}{p_w} = \frac{P_r}{0,5\rho U^3 A} \quad (4-10)$$

Onde:

- ♦ $C_{P,r}$ = Coeficiente de potência do rotor;
- ♦ P_r = potência mecânica da turbina do eixo do rotor (W);
- ♦ A = área varrida do rotor (m^2).

Um parâmetro de escala convencional que integra os principais efeitos aerodinâmicos da velocidade do vento, da velocidade do rotor e o tamanho do rotor para cálculo do coeficiente de potência do rotor é a relação da velocidade de ponta:

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U} \quad (4-11)$$

Onde:

- ♦ λ = relação da velocidade de ponta;
- ♦ Ω = velocidade do rotor (rad/s);
- ♦ R = raio do rotor (m).

Dois efeitos físicos básicos limitam o coeficiente de potência máxima do rotor de uma turbina eólica. Primeiro, o rotor aumenta a pressão estática contra o vento, reduzindo a taxa do fluxo de massa que passa pelo área varrida do rotor e a energia eólica disponível para conversão. Segundo, um rotor converte uma parte da energia cinética linear do vento em energia cinética rotacional, que não pode ser convertida em energia mecânica. A

figura 4.2.1 apresenta um gráfico típico do coeficiente de potência do rotor vs. a relação da velocidade de ponta e exibe os efeitos de ambos os processos limitantes. O primeiro, ou processo de retardamento limita o coeficiente de potência do rotor para qualquer relação da velocidade de ponta a 0,593 (16/27), que é referido a primeira lei de Betz, ou mais precisamente ao Limite de Lanchester-Betz [Bergey, 1980, apud Spera, 1994]. O segundo, ou fluxo tangencial (*wake rotation*) reduz o coeficiente de potência máxima do rotor ainda mais, porém este efeito somente passa a fazer efeito para relações de velocidade de ponta acima de 3.

Para HAWTs com controle das pás, quando a velocidade do vento ultrapassa a velocidade do vento avaliado a potência da turbina é limitada a um máximo permitido pelo subsistema *power train*. O coeficiente de potência do rotor tem pouca significância para regiões acima do regime avaliado.

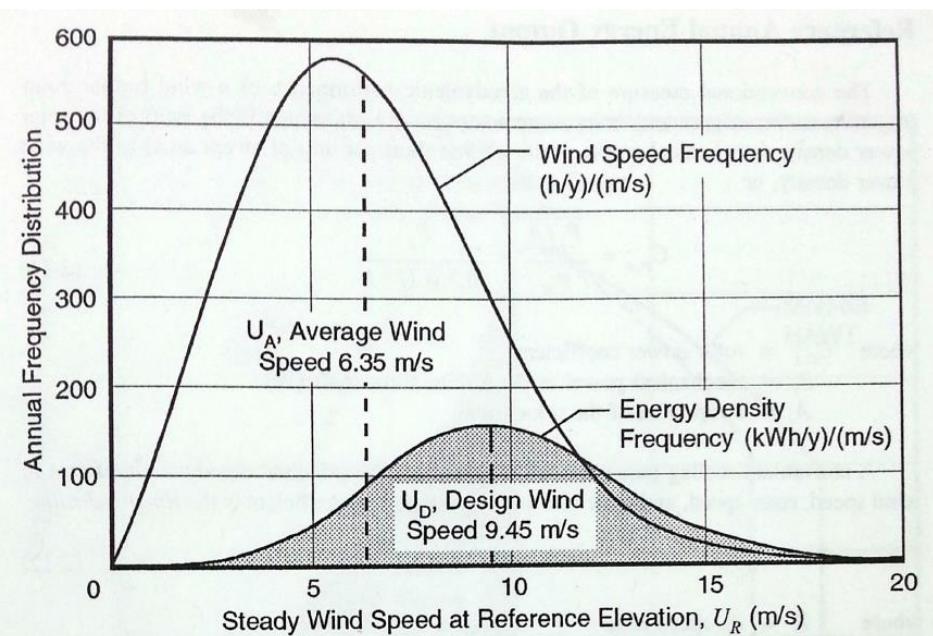


Figura 4.2.1 – Funções de distribuição de frequência para velocidade do vento e densidade de energia eólica. Altitude = 10m; densidade do ar = 1,225Kg/m³.

Fonte: Spera, 1994.

5. PRINCÍPIOS FÍSICOS DA CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA

O principal emprego de uma turbina eólica é para a conversão da energia cinética contida no ar em movimento em energia mecânica. A origem da energia mecânica a partir de uma corrente de ar com o auxílio de um dispositivo rotativo com formato de disco segue suas próprias regras básicas.

Segundo Hau (2006), o primeiro a estudar tal fenômeno fora Albert Betz. Entre os anos de 1922 e 1925, Betz publicou artigos onde este mostrava que, ao se aplicar leis básicas de física, a energia mecânica extraível a partir de um fluxo de ar que passa por uma seção perpendicular a tal fluxo está restrita a uma certa proporção fixa de energia contida no fluxo de ar. Além disto, Betz estabeleceu que a extração de potência máxima poderia ser realizada em uma determinada relação entre a velocidade do fluxo de ar antes do conversor de energia com a velocidade do fluxo de ar depois deste.

Apesar da teoria da quantidade de movimento de Betz, que admitia um conversor de energia funcionando sem perdas em um fluxo de ar sem atrito, apresentar simplificações, seus resultados são bastante úteis para se realizar cálculos aproximados em engenharia prática. Porém a sua verdadeira significância se deu pelo fato de que sua teoria promoveu uma base comum da física para o entendimento e para a operação de conversores de energia eólica com diversos desenhos. A seguir será apresentado um resumo matemático derivado da teoria da quantidade de movimento de Bentz.

5.1 TEORIA DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO DE BETZ

A energia cinética de uma massa de ar com peso m e velocidade v pode ser expressa pela seguinte equação:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (5.1 - 1)$$

Considerando uma certa seção transversal de área A , por onde o ar passa com velocidade v , o volume de ar \dot{V} que passa através de tal seção por um certo período de tempo, também conhecido como volume volumétrico é dado por:

$$\dot{V} = vA \quad (5.1 - 2)$$

E a vazão mássica, levando-se em conta a densidade do ar ρ é:

$$\dot{m} = \rho v A \quad (5.1 - 3)$$

As equações que representam a quantidade de energia cinética do fluxo de ar e o fluxo de massa que produz uma quantidade de energia através de uma seção transversal de área A por unidade de tempo é fisicamente idêntica à potência P :

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 A \quad (5.1 - 4)$$

O grande desafio é saber quanta energia mecânica pode ser extraída do fluxo livre de ar por energia convertida. Como a energia mecânica pode ser obtida através da energia cinética contida em um fluxo de ar, significando que, com um fluxo mássico constante, a velocidade do fluxo depois do conversor de energia eólico cai. Velocidades reduzidas, entretanto, denotam ao mesmo tempo a uma ampliação da seção transversal, já que o fluxo mássico que passa através de tal seção deve ser constante. Portanto, deve-se considerar as condições antes e depois do conversor conforme ilustra a figura 5.1.1.

Na figura v_1 é a velocidade do fluxo livre, ou seja, a velocidade do fluxo antes deste atingir o conversor, enquanto que v_2 é a velocidade após o conversor.

A energia mecânica que o conversor em formato de disco extrai do fluxo de ar corresponde à diferença de potencial do fluxo de ar a montante e a jusante do conversor.

$$P = \frac{1}{2} \rho A_1 v_1^3 - \frac{1}{2} \rho A_2 v_2^3 = \frac{1}{2} \rho (A_1 v_1^3 - A_2 v_2^3) \quad (5.1 - 5)$$

Mantendo o fluxo de massa (equação da continuidade) obtém-se:

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 \quad (5.1 - 6)$$

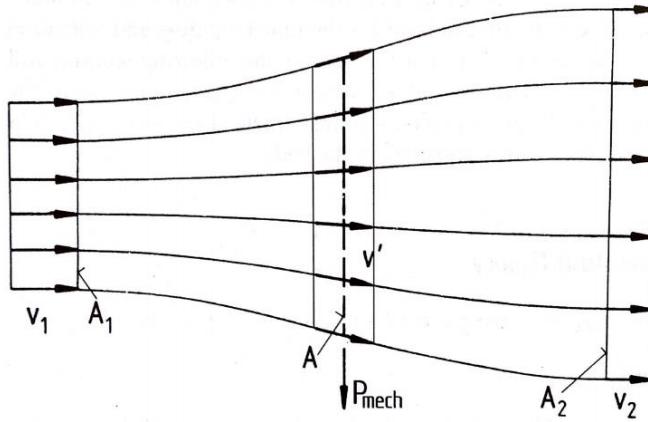


Figura 5.1.1 – Condições do escoamento de ar devido a extração de energia mecânica de um fluxo livre de ar, de acordo com a teoria da conservação da quantidade de movimento. Fonte: Hau, 2006.

Deste modo,

$$P = \frac{1}{2} \rho v_1 A_1 (v_1^2 - v_2^2) \quad (5.1 - 7)$$

Ou,

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_2^2) \quad (5.1 - 8)$$

A partir das equações acima se pode concluir que a potência máxima é alcançada quando tem-se v_2 igual a zero, ou seja, quando o ar é levada a uma condição de paralisação completa pelo conversor. Porém se a velocidade após o conversor é zero, a velocidade a montante do conversor também deve ser zero, implicando a uma condição de estagnação do ar,

onde não se tem um fluxo através do conversor. Contudo pode-se calcular a máxima potência extraível por uma relação v_2/v_1 .

Isto exige uma nova equação que expressa a potência mecânica do conversor. Usando a equação da conservação da quantidade de movimento, a força que o ar exerce sobre o conversor pode ser expressa pela seguinte equação:

$$F = \dot{m}(v_1 - v_2) \quad (5.1 - 9)$$

De acordo com o princípio de ação e reação, tal força, o impulso, deve ser igualada a uma força de mesma intensidade exercida pelo conversor para o fluxo de ar. Tal impulso empurra a massa de ar à velocidade v' , presente no plano de fluxo do conversor. A potência requerida para tal é:

$$P = Fv' = \dot{m}(v_1 - v_2)v' \quad (5.1 - 10)$$

Desta maneira, a potência mecânica obtida do fluxo de ar pode ser calculada tanto a partir da diferença de energia ou da diferença da potência antes e depois do conversor quanto pelo impulso e velocidade do fluxo de ar. Igualando ambas as equações obtém-se a expressão para a velocidade do fluxo v' :

$$\frac{1}{2}\dot{m}(v_1^2 - v_2^2) = \dot{m}(v_1 - v_2)v' \quad (5.1 - 11)$$

$$v' = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) \quad (5.1 - 12)$$

Assim a velocidade do fluxo através o conversor é igual a média aritmética de v_1 e v_2 . Assim o fluxo mássico pode ser expresso por:

$$\dot{m} = \rho A v' = \frac{1}{2} \rho A (v_1 + v_2) \quad (5.1 - 13)$$

A potência mecânica gerada pelo conversor pode ser expressa por:

$$P = \frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2) \quad (5.1 - 14)$$

A fim de promover a uma referência para tal potência gerada, compara-se tal potência a potência de uma corrente de ar livre que flui através de uma seção transversal de mesma área A , sem a extração da potência mecânica desta. Tal potência pode ser expressa por:

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho v_1^3 A \quad (5.1 - 14)$$

A razão entre a potência mecânica extraída pelo conversor e o fluxo de ar não perturbado é chamado de coeficiente de potência, C_p :

$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2)}{\frac{1}{2} \rho v_1^3 A} = \frac{1}{2} \left| 1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right| \left| 1 + \frac{v_2}{v_1} \right| \quad (5.1 - 15)$$

Como a equação acima ilustra, o coeficiente de potência depende apenas da relação da velocidade do ar a montante e a jusante do conversor. Plotando tal relação graficamente, pode-se ver pela figura 5.1.2 que o coeficiente de potência atinge um máximo a uma certa relação de velocidades.



Figura 5.1.2 – Coeficiente de potência em função da relação de velocidades do escoamento a montante e a jusante do conversor de energia. Fonte: Hau, 2006.

Com $v_2/v_1 = 1/3$, o ponto onde obtém-se o máximo coeficiente de potência temos:

$$C_p = \frac{16}{27} = 0,593$$

Betz foi o primeiro a obter tal valor, por isso, tal fator é comumente conhecido como “Fator de Betz”. Uma vez conhecida a relação $v_2/v_1 = 1/3$ que fornece o coeficiente de potência máximo, a velocidade do fluxo v' é:

$$v' = \frac{2}{3} v_1$$

E a velocidade a jusante do conversor de energia pode ser calculado com sendo:

$$v_2 = \frac{1}{3} v_1$$

É importante ressaltar que as equações apresentadas acima derivam de hipóteses simplificadoras, como fluxo de ar sem atrito, e que os resultados obtidos não levam em consideração aspectos referentes ao conversor de energia em si. Em casos reais, o coeficiente de potência sempre será menor que o valor ideal de Betz. Os principais resultados decorridos da teoria da quantidade de movimento podem ser resumidos, onde:

- ◆ A potência mecânica que pode ser obtida por um conversor de energia, a partir de um fluxo livre de ar, aumenta segundo a terceira potência da velocidade do fluxo;
- ◆ A potência aumenta linearmente com o aumento da seção transversal do conversor de energia em relação ao fluxo de ar, porém aumenta com o quadrado do diâmetro;
- ◆ Mesmo com um fluxo de ar ideal e com perdas na conversão da energia, a razão de potência mecânica a ser extraída a partir da energia contida em um fluxo de ar é limitada a um valor de 0,593. Consequentemente, somente cerca de 60% da energia contida em um fluxo de ar que atravessa uma certa seção transversal pode ser convertida em trabalho mecânico;

- ◆ Quando o coeficiente de potência ideal atinge seu valor máximo ($C_p = 0,593$), a velocidade do vento no plano do fluxo do conversor equivale a dois terços da velocidade do fluxo livre e é reduzido a um terço a jusante do conversor.

5.2 CONVERSORES DE ENERGIA EÓLICA QUE EMPREGAM AS FORÇAS AERODINÂMICAS DE ARRASTO E SUSTENTAÇÃO

A teoria da quantidade de movimento de Betz aponta a base física para a conversão de energia eólica em energia mecânica, apresentando o valor limite ideal para a extração da potência mecânica a partir de um fluxo livre de ar sem considerar aspectos de design do conversor de energia. Porém a potência que pode ser atingida sobre circunstâncias reais depende das características do conversor de energia.

A primeira diferença fundamental que influencia consideravelmente a potência real extraída depende de qual força aerodinâmica é utilizada para se produzir trabalho mecânico. Todos os corpos expostos a um escoamento de ar sofrem de forças aerodinâmicas cujos componentes são definidos como força de arrasto, que se apresenta na direção do escoamento, e força de sustentação, cuja componente se localiza em uma direção inclinada de um certo ângulo com relação a direção do escoamento. O coeficiente de potência real varia significativamente caso seja empregada a força de arrasto ou a força de sustentação.

5.2.1 Dispositivos que empregam a força de arrasto

O modelo mais simples de conversor de energia eólica pode ser obtido por meio de superfícies que se utilizam da força de arrasto, como ilustra a figura 5.2.1.1. O ar colide na superfície A com velocidade v , a potência obtida P que pode ser calculada pelo arrasto aerodinâmico D e a velocidade v_r a qual a superfície se move:

$$P = Dv_r \quad (5.2.1 - 1)$$

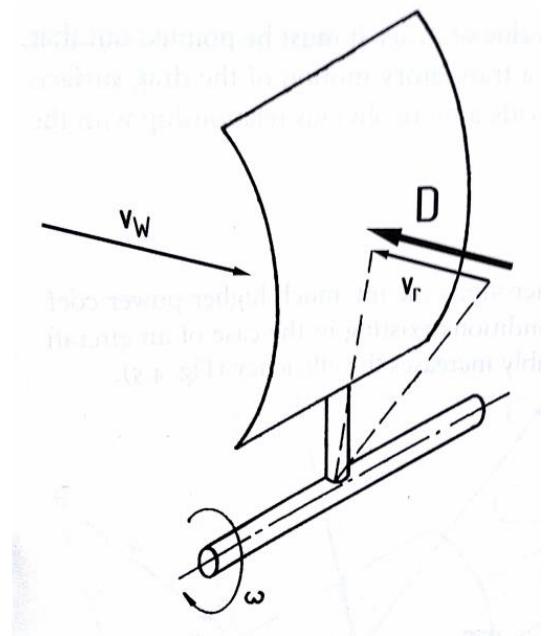


Figura 5.2.1.1 – Condições de escoamento e forças aerodinâmicas com dispositivo empregador da força de arrasto. Fonte: Hau, 2006.

A velocidade relativa $v_r = v_w - v$ que efetivamente colide na área de arrasto é decisiva para a força de arrasto. Empregando o coeficiente de arrasto aerodinâmico comum C_D , o arrasto aerodinâmico pode ser calculado por:

$$D = C_D \frac{\rho}{2} (v_w - v_r)^2 F \quad (5.2.1 - 2)$$

A potência resultante é:

$$P = \frac{\rho}{2} C_D (v_w - v_r)^2 A v_r \quad (5.2.1 - 3)$$

Expressando a potência em termos da potência contida em um fluxo livre de ar, obtém-se o seguinte coeficiente de potência:

$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{\rho}{2} C_D (v_w - v_r)^2 A v_r}{\frac{\rho}{2} v_w^3 A} \quad (5.2.1 - 4)$$

Analogamente a abordagem apresentada na seção 5.1, pode-se mostrar que C_p alcança um valor máximo com a razão de velocidade $v/v_W = 1/3$. Tal valor máximo é:

$$C_{p_{MAX}} = \frac{4}{27} C_D$$

A ordem da magnitude dos resultados se torna mais clara quando leva-se em consideração que o coeficiente de arrasto de uma superfície côncava encurvada contrária a direção do escoamento do ar raramente apresenta valores superiores a 1,3. Deste modo o valor máximo do coeficiente de potência de um rotor que emprega somente a força de arrasto é:

$$C_{p_{MAX}} \approx 0,2$$

Portanto tal coeficiente alcança somente um terço do valor ideal de Betz de 0,593. Deve-se pontuar porém que tais apontamentos foram efetuados segunda a hipótese de um movimento de translação puro, porém a figura 5.2.1.1 apresenta um movimento rotativo a fim de promover uma relação com os rotores existentes.

5.2.2 Dispositivos que empregam a força de sustentação

Se o formato das pás do rotor permitirem o uso de forças aerodinâmicas de sustentação pode-se obter um coeficiente de potência muito maior. Analogamente as condições existentes em aerofólios de aeronaves, a utilização de forças de sustentação aumentam consideravelmente a eficiência.

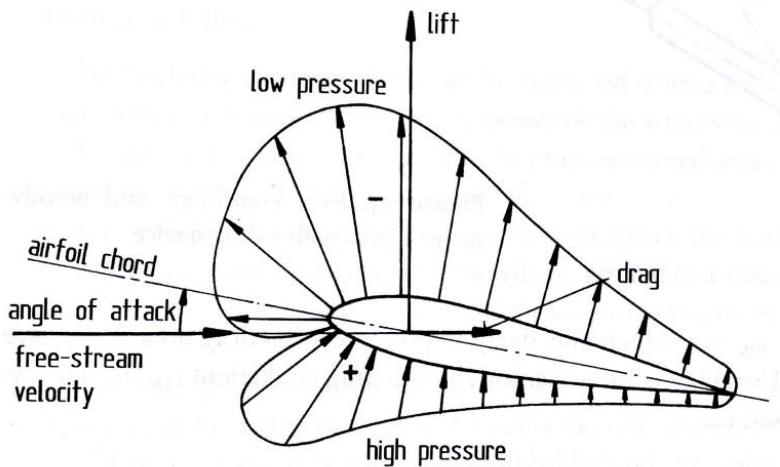


Figura 5.2.2.1 – Forças aerodinâmicas atuantes em um aerofólio exposto a um escoamento de ar. Fonte: Hau, 2006

Todos os rotores de turbina eólicas modernas dão desenhados para utilizarem tal força de sustentação e o rotor que melhor se emprega para tal propósito é aquele mais comumente conhecido, os de hélices com eixo de rotação horizontal. A velocidade do vento v_W é vetorialmente combinada com a velocidade periférica das pás do rotor. O perfil das pás junto com a velocidade do fluxo livre v_r , formam o ângulo de ataque aerodinâmico. A força aerodinâmica gerada possui duas componentes, a força de arrasto D , que possui a mesma direção do fluxo, e a força de sustentação L , que é perpendicular a direção do fluxo. A força de sustentação L , por sua vez, pode ser decomposta em uma componente L_{torque} que está no plano de rotação do rotor, e em uma segunda componente perpendicular a tal plano de rotação. A componente tangencial L_{torque} é responsável pelo binário de acionamento do rotor, enquanto que a componente L_{thrust} é responsável por uma pressão longitudinal sentida pelo rotor.

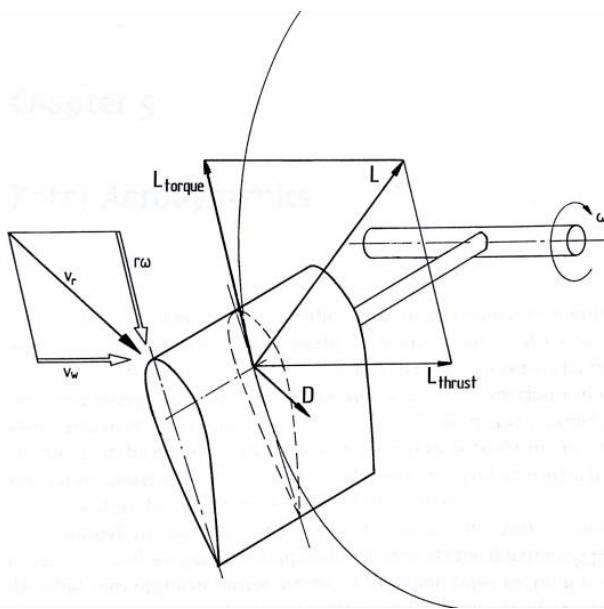


Figura 5.2.2.2 – Velocidade do fluxo e forças aerodinâmicas presentes em rotores que empregam forças de sustentação. Fonte: Hau, 2006

6. AERODINÂMICA DE ROTORES

O rotor é o principal elemento no processo de conversão de energia em uma turbina eólica. Suas propriedades dinâmicas e aerodinâmicas, portanto, apresentam uma influência decisiva sobre todo o sistema com respeito a diversos aspectos. A capacidade do rotor de converter uma proporção máxima de energia eólica, que flui através de sua área varrida, em energia mecânica é obviamente um resultado direto das propriedades aerodinâmicas do rotor, que, por sua vez, em grande parte determinam o rendimento global da conversão de energia em uma turbina eólica. Como em qualquer outro sistema de geração de energia regenerativa, é o rendimento do coletor de energia que é de primordial importância no que diz respeito à economia global do sistema.

Menos óbvio, porém de igual importância, são as propriedades dinâmicas e aerodinâmicas do rotor no que diz respeito a sua capacidade de converter a entrada de energia flutuante fornecida pelo vento em um torque de saída constante, ao passo que, ao mesmo tempo, mantendo as inevitáveis cargas dinâmicas do sistema o mais baixo possível. A magnitude

das cargas impostas nos elementos mecânicos e elétricos vai depender de quanto bem as exigências acima sejam atendidas pelo rotor. O sistema de controle de turbinas eólicas é outro aspecto a ser considerado quando examinados as propriedades aerodinâmicas. Baixo torque característico ou características de escoamento crítico das pás do rotor podem ser uma série desvantagem para a condição operacional de controle e assim, o sistema de controle deve, portanto, ser adaptado para as qualidades aerodinâmicas do rotor.

Esses aspectos ilustram a importância do rotor para todo o sistema. Não seria possível alcançar níveis de rendimento operacionais de uma turbina eólica sem, ao menos, algum conhecimento das características aerodinâmicas do rotor e de seus parâmetros mais importantes. Além disso, até certo ponto, o rotor de uma turbina eólica é o elemento específico da turbina eólica e consequentemente deve ser projetado e construído sem se basear em outros campos da tecnologia.

6.1 MODELOS MATEMÁTICOS E CÁLCULOS

O projeto aerodinâmico do rotor de uma turbina eólica requer mais do que somente o conhecimento das leis físicas de conversão de energia. O projetista encara o problema de encontrar as relações entre a forma real do rotor, como por exemplo, o número de pás ou o perfil que tais pás terão, e as propriedades aerodinâmicas.

Assim como grande parte dos projetos técnicos, o processo de design é realizado empiricamente. Primeiramente existe o conceito de que rotor deva apresentar certas propriedades desejadas. Alguns cálculos são executados posteriormente em função de tal configuração e examinados para se verificar se os resultados obtidos são os desejados. Via de regra, os resultados não serão completamente satisfatórios em primeira instância, porém o modelo matemático e/ou físico fornece um conhecimento de como os parâmetros dados do projeto do rotor afetam o resultado final. Tais

ensaios fornecem uma oportunidade de se melhorar o projeto aplicando certas correções apropriadas.

O fundamento teórico abordado se baseia em diversos trabalhos apresentados principalmente na década de 1920, onde, ao se defrontarem com a missão de prover cálculos confiáveis com fundamentos teóricos, os engenheiros aeroespaciais, que vinham trabalhando em fundamentos mais empíricos, passaram a desenvolver. A missão fora de se obter uma asa aerodinamicamente otimizada, que for de suma importância para o advento da aviação e que resultou nos estudos posteriores na teoria de asa. Com tal estudo sobre a teoria de asa fora possível desenvolver modelos teóricos de hélices e turbinas que possibilitou o cálculo das propriedades aerodinâmicas dos rotores das turbinas eólicas.

Como já citado anteriormente, foi o alemão Albert Betz que formulou não somente as leis físicas básicas de conversão de energia, mas também uma teoria completa de rotores eólicos. A básica teoria da quantidade de movimento de Betz é baseada no modelo de um escoamento em duas dimensões através de um aturador em formato de disco. O fluxo de ar é desacelerado e as linhas de corrente são desviadas somente em um plano, segundo figura 6.1.1.

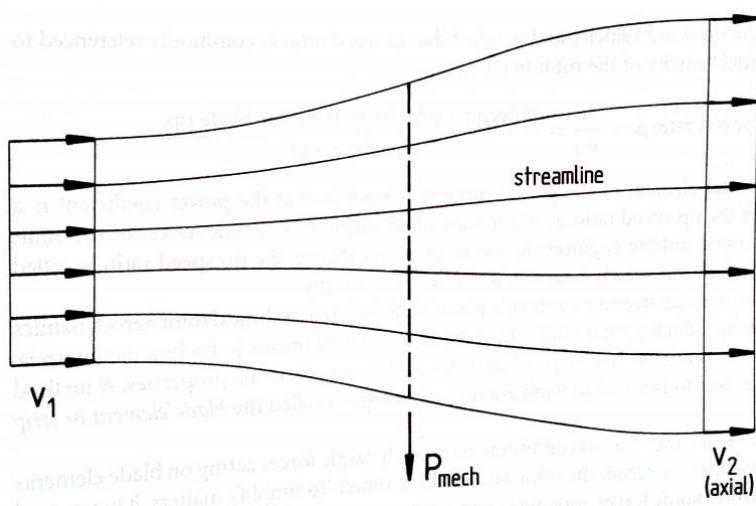


Figura 6.1.1- Modelo de escoamento do teorema da quantidade de movimento de Betz. Fonte: Hau, 2006.

Na realidade, entretanto, um rotor vai adicionalmente transmitir um movimento rotativo para o início do movimento do rotor. Para manter o momento angular constante, a rotação para início de movimento deve se opor ao torque resistivo do rotor.

Uma vez que o rotor se encontra em movimento tal torque resistivo atua de maneira a diminuir o torque de saída da turbina. A energia contida em tal movimento rotativo reduz a proporção utilizável da energia eólica total contida no escoamento de ar, diminuindo a energia mecânica extraída. Estendendo-se a teoria da quantidade de movimento, ou seja, quando leva-se em consideração o torque resistivo do rotor, o coeficiente de potência da turbina será menor do que o calculado segundo o teorema de Betz. Além deste fato, o coeficiente de potência a partir desta constatação se torna dependente da razão entre os componentes da energia do movimento rotativo e do movimento translacional do fluxo de ar. Tal razão é determinada pela relação da velocidade tangencial das pás do rotor e o fluxo de ar imperturbado e é chamada de relação de velocidade de ponta λ , comumente referenciada a velocidade tangencial da ponta da pá do rotor.

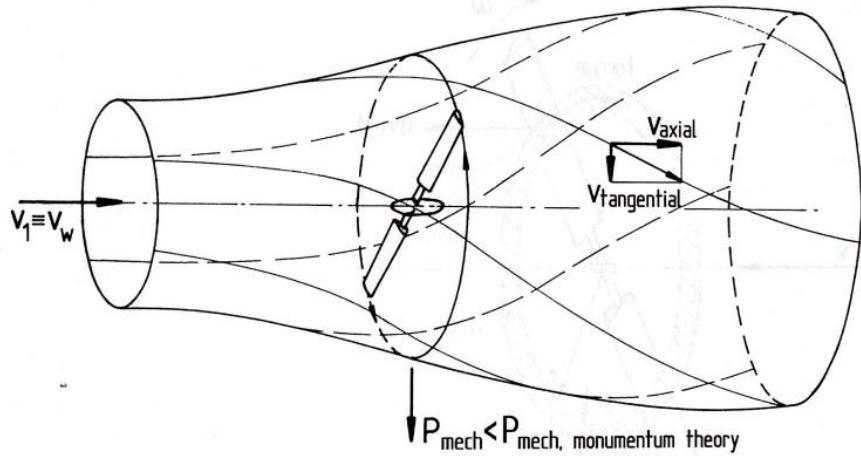


Figura 6.1.2 – Extensão da teoria da quantidade de movimento, levando-se em consideração o torque resistivo do rotor. Fonte: Hau, 2006.

$$\lambda = \frac{u}{v_w} = \frac{\text{Velocidade tangencial da ponta da pá do rotor}}{\text{Velocidade do vento}}$$

Um aspecto fundamental da curva de potência de um rotor se dá devido ao fato de que o coeficiente de potência é função da relação de velocidade de ponta, como em qualquer outra máquina cujo movimento principal se dá em função de componentes do tipo turbina. Na engenharia convencional de turbinas e na teoria de hélices a relação de velocidade de ponta é chamada de coeficiente de avanço.

O passo decisivo para se passar de uma abordagem essencialmente física para uma abordagem aerodinâmica técnica do rotor se dá com a introdução da geometria das pás do rotor. É o único meio para se encontrar as relações entre a real geometria do rotor e suas propriedades aerodinâmicas.

A seção transversal da pá em um raio r é fixada para um ângulo de arfagem ϑ (*pitch angle*) local com respeito ao plano de rotação do rotor, com ilustra a figura 6.1.3. A velocidade axial do escoamento livre v_a no plano do rotor e a velocidade tangencial u no raio da seção transversal da pá se combinam formando uma resultante de velocidade v_r . Junto com a uma linha reta que conecta as duas pontas da pá, mais conhecida como *chord line*, formam o ângulo de ataque local α .

Utilizando às relações de mecânica dos fluidos para a quantidade de movimento das componentes axial e tangencial de um escoamento necessário para vencer o torque resistivo, junto com as formulações das forças aerodinâmicas nos elementos das pás, permitem determinar as condições de escoamento em um elemento das pás de modo que os coeficientes de sustentação e arrasto locais possam ser determinados a partir de curvas polares de aerofólios.

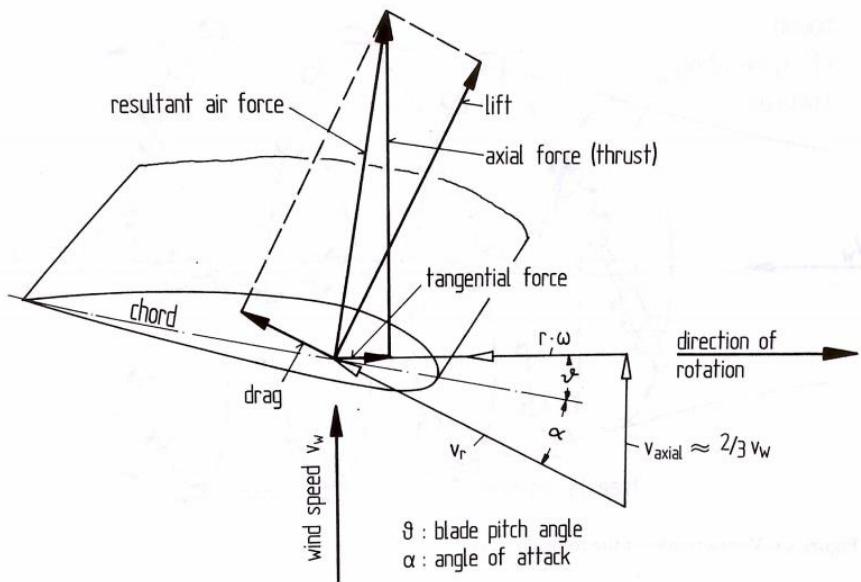


Figura 6.1.3 – Componentes de velocidades do escoamento e forças aerodinâmicas em uma seção transversal de uma pá. Fonte: Hau, 2006.

Os cálculos das forças de equilíbrio incluem não somente a força de arrasto gerada pelas pás, mas também as forças de arrasto geradas pelo fluxo espacial ao redor das pás do rotor. Em particular, o escoamento ao redor da ponta de uma pá, produz os chamados vórtices de ponta livre, gerados pela diferença de pressão entre a parte superior e inferior da pá. A força de arrasto resultante é conhecida como força de arrasto induzido, que é função do coeficiente de sustentação local e da relação de aspecto, ou ‘esbeltez’ das pás. Quanto maior a relação de aspecto, isto é, quanto mais alongadas forem as pás, menor será o arrasto induzido. As perdas na ponta das pás são introduzidas como uma componente adicional da força de arrasto, assim como as perdas na base das pás que são resultados de vórtices gerados devido ao escoamento ao redor da base das pás, necessário para se vencer o torque resistivo. Tais perdas são decorridas de um modelo complexo de vórtices gerados pelo escoamento ao redor do rotor, como ilustra a figura 6.1.4.

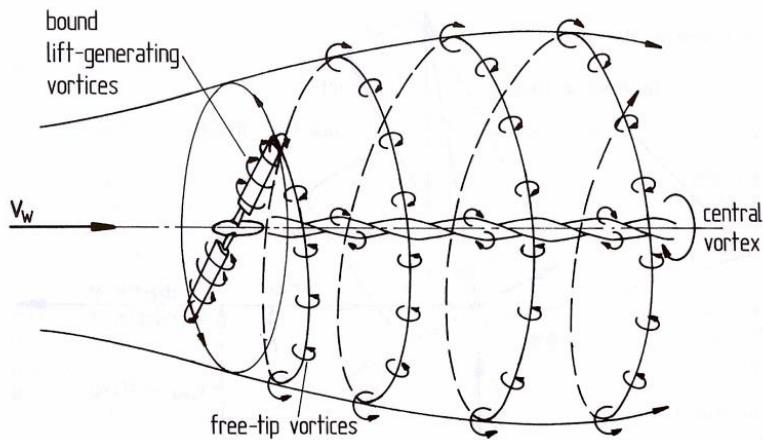


Figura 6.1.4 – Modelo de vórtices gerados pelo escoamento ao redor do rotor.

Fonte: Hau, 2006.

Com os cálculos dos coeficientes das forças aerodinâmicas de arrasto e sustentação locais, o elemento de pá teórico fornece a distribuição das forças aerodinâmicas ao longo do comprimento da pá. Tais forças são usualmente divididas em duas componentes, uma no plano de rotação do rotor, que gera a distribuição força tangencial, e uma em um ângulo direito a esta, que gera a distribuição de forças de impulso (*thrust*), como ilustra a figura 6.1.5. Integrando a distribuição da força tangencial ao longo do raio do rotor fornece o torque de acionamento do rotor e, com a velocidade angular do rotor, pode-se determinar a potência do rotor e o coeficiente de potência do rotor. Integrando a distribuição da força de impulso se obtém o impulso total que o rotor aplica na torre. Portanto pode-se calcular a potência do rotor e as cargas aerodinâmicas de um escoamento permanente para uma dada geometria da pá.

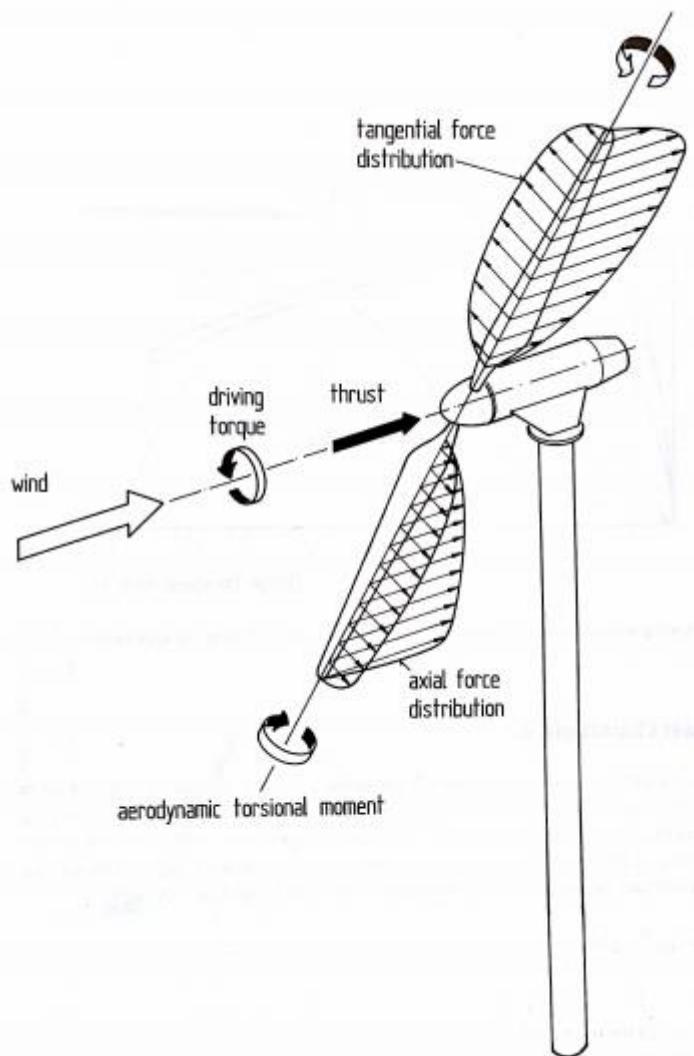


Figura 6.1.5 – Distribuição das forças aerodinâmicas ao longo do comprimento das pás e as forças e torques totais do rotor. Fonte: Hau, 2006.

Estudando as características da potência do rotor, como por exemplo, a variação do coeficiente de potência como função da razão de velocidade de ponta, obtém-se a aproximação o modelo teórico para a realidade através de gráfico, como o que ilustrada a figura 6.1.6. Com relação à potência estimada do fluxo de ar, a teoria Betz fornece a constante de potência ideal de 0,593 que independe da razão de velocidade de ponta. Levando-se em consideração o momento angular do torque resistivo do rotor pode-se concluir que o coeficiente de potência se torna uma função da razão de velocidade de ponta. Somente quando a razão de velocidade de ponta se torna infinitamente alta é que o coeficiente de potência se aproxima do valor

ideal de Betz. Ao se introduzir as forças aerodinâmicas que agem nas pás do rotor, em particular a força de arrasto, o valor do coeficiente de potência diminui ainda mais, além de que a partir de tais considerações, o coeficiente de potência possui um valor ótimo para uma certa razão de velocidade de ponta.

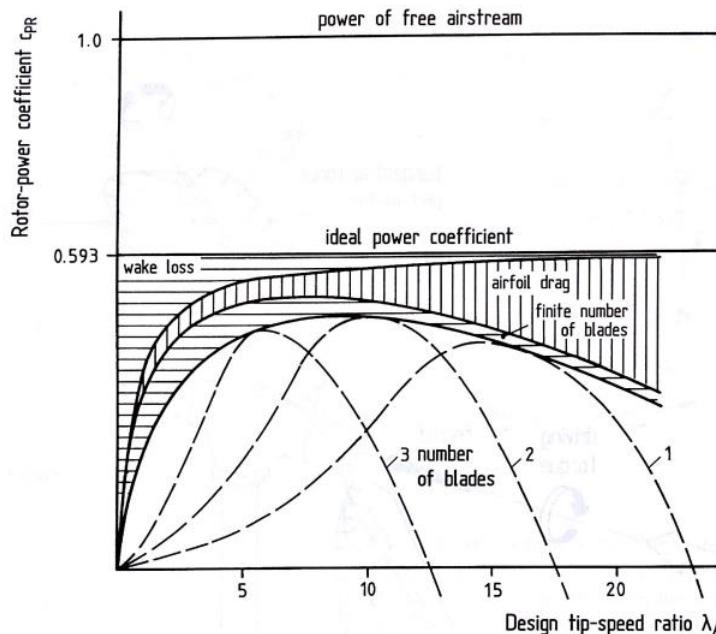


Figura 6.1.6 – Aproximação da curva de potência de um rotor real em função de várias abordagens teóricas. Fonte: Hau, 2006.

A teoria aerodinâmica do rotor que tem como base a teoria da quantidade de movimento produz uma curva de potência de um rotor real com boa aproximação. Entretanto deve-se levar em consideração que a teoria da quantidade de movimento apresenta diversas simplificações que limitam a sua validação para um conversor de energia eólica em forma de disco. Em algumas ocasiões a teoria da quantidade de movimento é chamada de teoria do disco atuador. Os tipos de rotores que apresentam um formato de hélice se aproximam bastante do modelo adotado na teoria, porém existem dispositivos não convencionais que não apresentam um formato de disco, que acabam por converter a energia eólica em energia mecânica em somente uma fase.

6.2 CARACTERÍSTICAS DE POTÊNCIA DO ROTOR

A teoria da quantidade de movimento forneceu as relações básicas para se obter a ordem de grandeza de potência mecânica que pode ser extraída de um rotor. A teoria aerodinâmica do rotor forneceu a relação entre a configuração da forma geométrica de um rotor real e suas características de potência detalhadas. Utilizando o coeficiente de potência do rotor c_{PR} , a potência do rotor pode ser calculada como uma função da velocidade do vento, segundo a equação abaixo.

$$P_R = c_{PR} \frac{\rho}{2} v_w^2 A \quad (6.2 - 1)$$

Onde:

A = área varrida do rotor (m^2);

v_w = velocidade do vento (m/s);

c_{PR} = coeficiente de potência do rotor (-);

ρ = densidade do ar (kg/m^3);

P_R = potência do rotor (W).

O coeficiente de potência c_{PR} será calculado usando-se a teoria de lâmina para uma determinada relação entre a velocidade do rotor e a velocidade do vento, isto é, a relação de velocidade de ponta. Repetindo o processo para diversas relações entre as velocidades do rotor e do vento pode-se determinar o coeficiente de potência em função da relação de velocidade de ponta. Isso fornece o coeficiente de potência do rotor para diferentes velocidades do vento com uma rotação do rotor fixa ou vice-versa. Caso o rotor seja equipado com um sistema de controle do ângulo de arfagem, as curvas do coeficiente de potência devem ser calculadas para cada ângulo de arfagem da pá utilizado em sua operação. Deste modo a curva do coeficiente de potência de rotores com pás fixas torna-se uma

família das curvas de potência de rotores com controle do ângulo de arfagem, como ilustra a figura 6.2.1.

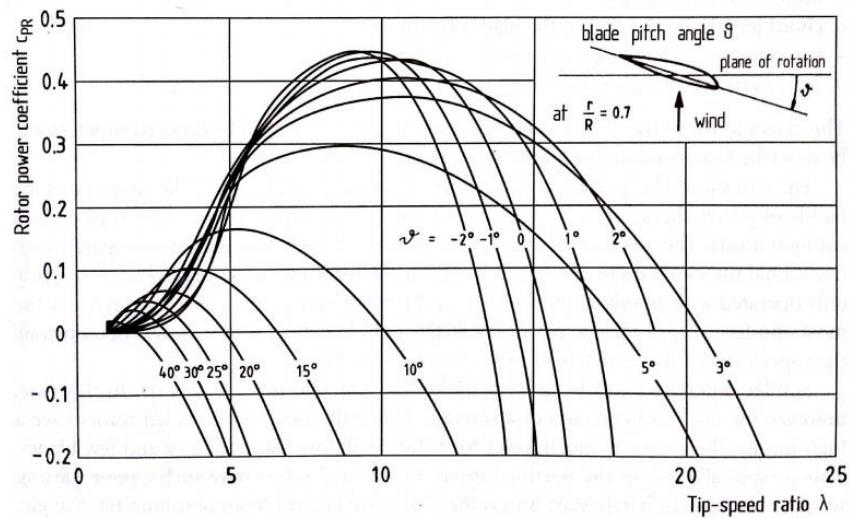


Figura 6.2.1 – Características com relação à potência para a turbina eólica experimental WKA-60. Fonte: Hau, 2006.

Além da potência gerada pelo rotor, existem outros parâmetros significantes na hora de se caracterizar o desempenho de um rotor. O mais importante destes é como o torque se comporta, como ilustra a figura 6.2.2.

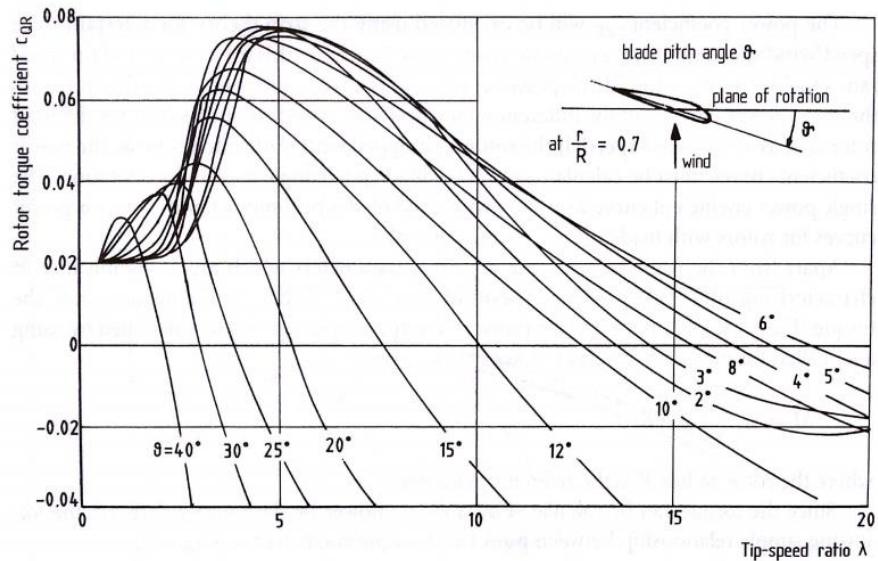


Figura 6.2.2 – Torque característico do rotor da turbina eólica experimental WKA-60. Fonte: Hau, 2006.

Analogamente à potência, o torque do rotor pode ser calculado pelo chamado coeficiente de torque, segundo a equação abaixo.

$$M = c_Q \frac{\rho}{2} v_w^2 AR \quad (6.2 - 2)$$

onde o raio do rotor R é o parâmetro de referência.

Já que o torque pode ser calculado dividindo-se a potência pela velocidade angular, a seguinte relação entre os coeficientes de potência e torque pode ser estabelecida:

$$c_{PR} = \lambda c_Q \quad (6.2 - 3)$$

As curvas de potência e de torque do rotor são os aspectos característicos da configuração de cada rotor. A magnitude do coeficiente de potência e a forma das curvas apresentam diferenças distintas. Os principais parâmetros que influenciam na forma de c_{PR} são:

- ◆ Número de pás do rotor;
- ◆ O comprimento entre as pontas das pás;
- ◆ Características aerodinâmicas das pás;
- ◆ Variação da torção das pás.

A figura 6.2.3 ilustra as diferenças qualitativas no coeficiente de potência para rotores de diversas configurações. A vantagem de rotores modernos com altas velocidades de ponta se comparados com rotores tradicionais são bastante óbvias. Enquanto que os clássicos moinhos de vento, que essencialmente operavam segundo arrasto aerodinâmico, somente alcançavam coeficientes de potência da ordem de 0,3, rotores modernos alcançam coeficientes de potência da ordem de 0,5 que claramente demonstra a influência da força de sustentação para um maior rendimento.

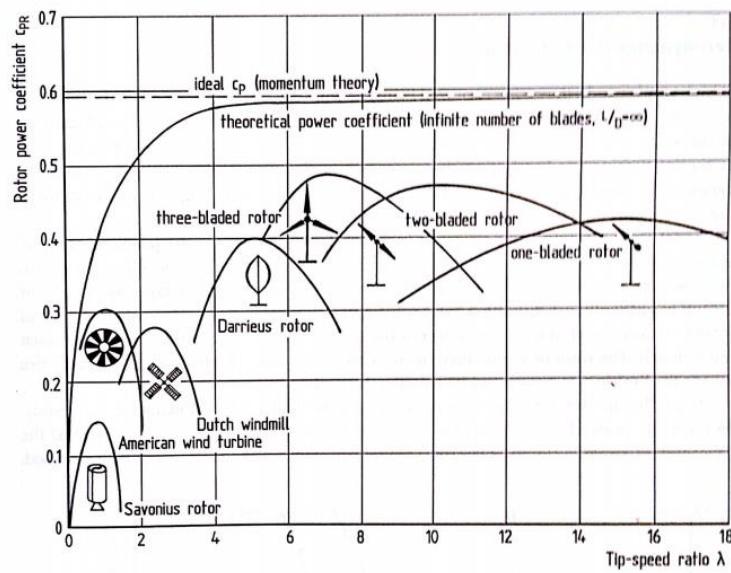


Figura 6.2.3 – Coeficientes de potência de rotores eólicos de diferentes designs. Fonte: Hau, 2006.

Diferenças similares podem ser percebidas no torque característico, como ilustra a figura 6.2.4. Neste caso, entretanto, os rotores com maiores velocidades de ponta apresentam menores coeficientes de potência se comparados com aqueles que apresentam uma velocidade de ponta menor. Enquanto que rotores de menor velocidade com múltiplas pás apresentam um torque de saída maior, o torque gerado é muito menor para aqueles rotores com pás sólidas e baixo número de pás.

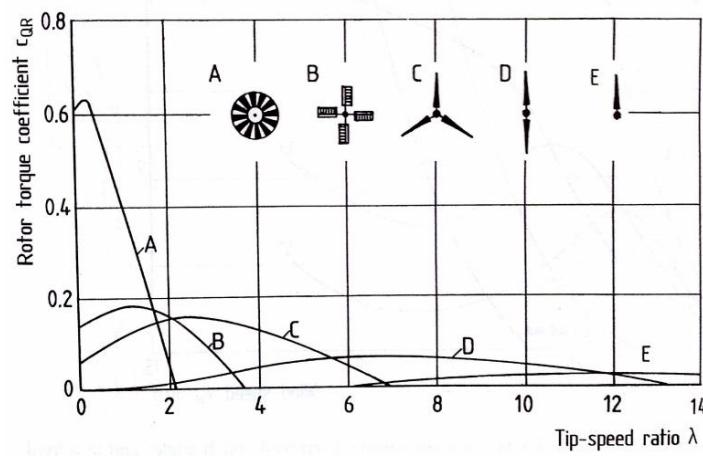


Figura 6.2.4 – Coeficientes de torque de rotores eólicos de diferentes designs. Fonte: Hau, 2006.

6.3 CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DE DESIGN AERODINÂMICO DO ROTOR

Até este ponto, a discussão das características de performance aerodinâmicas do rotor foram baseadas na hipótese de que o design do rotor já é conhecido. Tal abordagem fora necessária para o desenvolvimento das ferramentas teóricas.

Porém o projetista de turbinas eólicas deve resolver os problemas na ordem inversa. Sua tarefa é de encontrar o melhor rotor possível que atenda a certos pré-requisitos e objetivos. Como regra geral, o ponto de partida de tal tarefa de engenharia complexa está em se ter uma ideia da potência de saída da turbina eólica para uma velocidade do vento particular. A partir deste ponto, o diâmetro do rotor pode ser grosseiramente estimado pelo coeficiente de potência do rotor. Esta primeira suposição do diâmetro do rotor é geralmente o ponto inicial do projeto aerodinâmico do rotor. Assim como todas as características da turbina abordadas pelo projetista, as características aerodinâmicas do rotor, não é um problema que possa ser resolvido matematicamente. Embora, sob certas condições, se possa obter as formas de pás ótimas, por exemplo, por meios matemáticos, esta serve somente para se obter uma ajuda na orientação no processo do design da turbina eólica. A tarefa, na prática, é achar o melhor design possível do rotor da turbina capaz de satisfazer os requisitos de projeto, como performance aerodinâmica, resistência e rigidez e técnicas de produção econômicas. Tal resultado pode ser alcançado somente através de um processo iterativo.

A tarefa de se projetar um rotor, portanto, consiste em primeiro se achar a forma do rotor ótima e então, considerando-se que os ajustes feitos sejam inevitáveis, quantificar a influência aerodinâmica devida dos rotes desejados. No começo, tal processo de otimização deve ser realizado tomando-se como base o coeficiente de potência do rotor. Porém no fim do projeto, a geração de energia da turbina que se torna o fator mais importante. Porém este pode ser influenciado por diversos parâmetros, como por exemplo, o gerador elétrico.

6.3.1 Número de pás do rotor

O número de pás do rotor é a característica mais obvia e é frequentemente fruto de extensas discussões. Anteriormente fora apresentado que é possível calcular a energia mecânica que pode ser extraída de um fluxo de ar existente, sem saber exatamente qual a configuração do rotor, ou seja, sem levar em consideração o número de pás do rotor. Tal fato indica que a influência do número de pás do rotor na potência deste deve ser pequena. Simplificadamente, rotores com um menor número de pás giram com velocidades maiores, porém tal fato é compensado pela desvantagem apresentada por uma menor área física da pás.

A figura 6.3.1.1 apresenta a influência do número de pás do rotor no coeficiente de potência do rotor. Em teoria o coeficiente de potência cresce com o aumento do número de pás, porém na prática observa-se que rotores com um elevado número de pás apresentam um baixo coeficiente de potência. Quando o número de pás é muito elevado, as condições do escoamento aerodinâmico se tornam muito complicadas e não podem mais ser descritas pelos modelos teóricos já existentes.

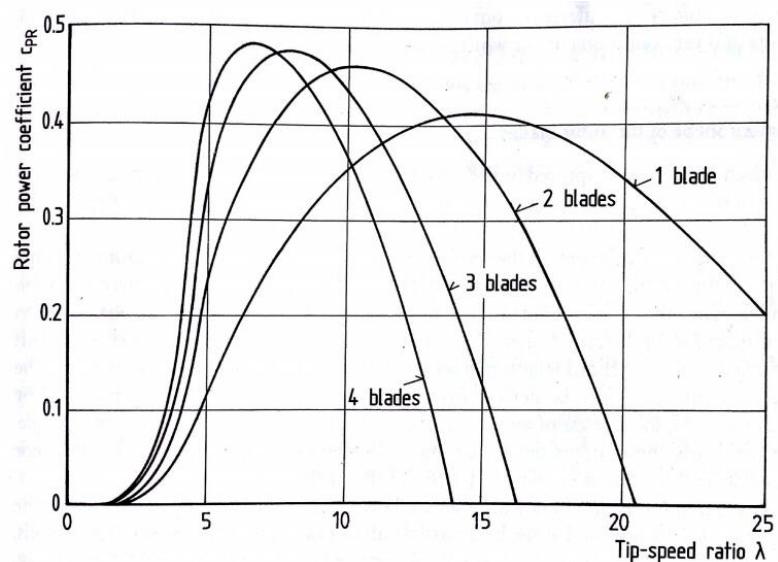


Figura 6.3.1.1 – Influência do número de pás do rotor para o coeficiente de potência do rotor em função razão de velocidade de ponta. Fonte: Hau, 2006.

A variação da curva de c_{PR} como função da razão de velocidade de ponta mostra a extensão na qual a razão de velocidade de ponta ótima começa a cair para diferentes números de pás. Enquanto o rotor com três pás apresenta uma performance ótima para uma razão de velocidade de ponta entre 7 e 8, um rotor com duas pás alcança um c_{PR} ótimo com uma razão de velocidade de ponta de aproximadamente 10. A razão de velocidade de ponta ótima é ligeiramente influenciada pelo design da pá em si, essencialmente, porém, somente os valores máximos de c_{PR} são modificados em função do desenho da pá, mantendo assim a correlação entre o número das pás, o coeficiente de potência e a razão de velocidade de ponta.

Observando-se a dependência do coeficiente de potência em função do número de pás do rotor, pode-se concluir de imediato o porquê do emprego, em sua maioria, de rotores com um baixo número de pás, como por exemplo, de duas e três pás. Como regra geral, o possível ganho de potência e produção de energia não compensa o custo de se adicionar uma pá no rotor.

Tal afirmação seria incontestável se não fosse por outros critérios. Quanto menor a quantidade de pás existentes, mais desvantajoso será o comportamento dinâmico do rotor. Rotores com maiores velocidades de ponta, como por exemplo os de uma ou duas pás, causam uma emissão de ruído que é inaceitável em diversos locais. O efeito visual de um rotor de duas, ou mesmo de uma pá, é também em sua maioria considerado desconfortante se comparados com rotores de três pás. Todos estes aspectos contribuíram para que os rotores de três pás fossem hoje os mais empregados nas turbinas eólicas comercializadas hoje em dia. A escolha do número de pás do rotor é, portanto, não somente uma questão de potências aerodinâmicas diferentes, mas também requerem uma consideração completa da turbina eólica e as condições em que esta é submetida.

7. PROJETO DA TURBINA

O projeto da turbina irá se concentrar principalmente no rotor a ser desenvolvido, justamente por este ser o principal componente de uma turbina eólica. Os outros sistemas também serão desenvolvidos porém com menor importância.

Segundo os levantamentos anteriores, fora optado por se desenvolver uma turbina cujo rotor possua três pás. Devido ao baixo orçamento do projeto, optou-se por uma turbina cujo rotor possua como princípio de funcionamento a força de arrasto, ou o impulso, gerado pelo vento, ao contrário das principais turbinas, que utilizam a força de sustentação gerada pelas pás com perfil de asa para o seu funcionamento.

7.1 DIMENSIONAMENTO DO ROTOR

O princípio de funcionamento do rotor escolhido para ser desenvolvido se assemelha a de um rotor do tipo Pelton, por este fato o dimensionamento a ser realizado para o cálculo do torque, potência e rotação apresentam a mesma formulação utilizada para o projeto de tais turbinas. A figura 7.1.1 mostra o um desenho 3D do rotor que será desenvolvido no projeto.

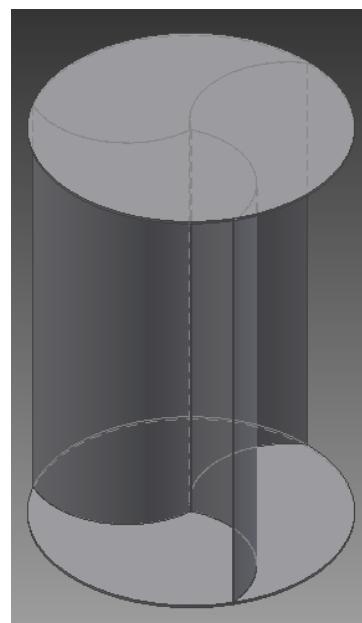


Figura 7.1.1 – Desenho 3D do rotor da turbina

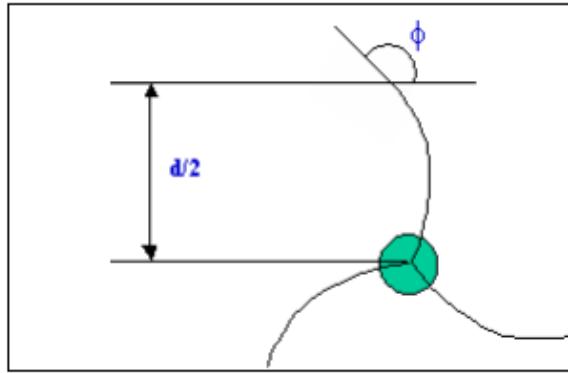


Figura 7.1.2 – Esquema do rotor eólico a ser projetado

Segundo Hau, a partir da equação da quantidade de movimento angular para um volume de controle rotativo tem-se:

$$\vec{r} \times \vec{F}_s + \int_{VC} \vec{r} \times \vec{g} \rho dV + \vec{T}_{eixo} - \int_{VC} \vec{r} \times [2\vec{\omega} \times \vec{V}_{xyz} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) + \vec{\omega} \times \vec{r}] \rho dV \\ = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \vec{r} \times \vec{V}_{xyz} \rho dV + \int_{VC} \vec{r} \times \vec{V}_{xyz} \rho \vec{V}_{xyz} \cdot d\vec{A} \quad (7.3 - 1)$$

Pode-se considerar as seguintes hipótese:

- ◆ Torque devido às forças de superfície desprezível: $\vec{F}_s = 0$;
- ◆ Torque devido às forças de campo desprezível: $\vec{g} \rho dV = 0$;
- ◆ Massa de água sobre a pá desprezível: $\rho dV = 0$;
- ◆ Escoamento permanente: $\frac{\partial}{\partial t} = 0$;
- ◆ Todo o ar que passa sobre o rotor coincide com a pá;
- ◆ Escoamento uniforme em cada seção;
- ◆ Não há variação de velocidade do ar em relação à pá.

Obtendo assim:

$$\vec{T}_{eixo} = \int_{VC} \vec{r} \times \vec{V}_{xyz} \rho \vec{V}_{xyz} \cdot d\vec{A} \quad (7.3 - 2)$$

Devido o fato de ter sido levantada a hipótese de todo o ar cruza as pás tem-se:

$$\vec{T}_{eixo} = \vec{r}_1 \times \vec{V}_1 \{-|\rho VA|\} + \vec{r}_2 \times \vec{V}_2 \{+|\rho VA|\} \quad (7.3 - 3)$$

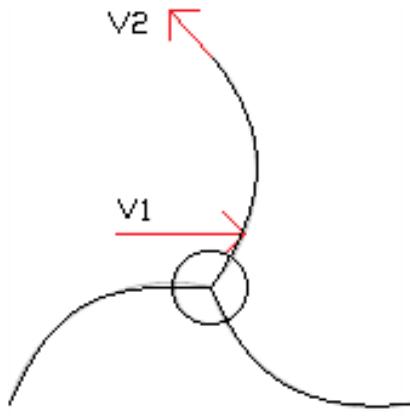


Figura 7.1.3 – Esquema do fluxo de ar que age sobre as pás do rotor

Como:

$$\vec{r}_1 = R\vec{e}_r \quad (7.3 - 4)$$

$$\vec{r}_2 = R\vec{e}_r \quad (7.3 - 5)$$

$$\vec{V}_1 = (V - U)\vec{e}_\theta \quad (7.3 - 6)$$

$$\vec{V}_2 = (V - U) \cos \theta \vec{e}_\theta + (V - U) \sin \theta \vec{e}_r \quad (7.3 - 7)$$

Obtém-se:

$$\begin{aligned} \vec{T}_{eixo} &= R\vec{e}_r \times (V - U)\vec{e}_\theta \{-|\rho VA|\} \\ &\quad + R\vec{e}_r \times ((V - U) \cos \theta \vec{e}_\theta + (V - U) \sin \theta \vec{e}_r) \{+|\rho VA|\} \end{aligned} \quad (7.3 - 8)$$

$$\vec{T}_{eixo}\vec{k} = R(V - U)\vec{k}(-\rho VA) + R(V - U) \cos \theta \vec{k}(\rho VA) \quad (7.3 - 9)$$

Assim:

$$\vec{T}_{eixo}\vec{k} = -R(1 - \cos \theta)\rho VA(V - U)\vec{k} \quad (7.3 - 10)$$

O torque apresentado pela equação (7.3 - 10) é o torque externo que o eixo exerce sobre as pás. O torque que o ar faz sobre as pás pode ser calculado por:

$$\begin{aligned} \vec{T}_{saída} &= -\vec{T}_{eixo} = R(1 - \cos \theta)\rho VA(V - U)\vec{k} \\ &= \rho QR(V - U)(1 - \cos \theta)\vec{k} \end{aligned} \quad (7.3 - 11)$$

A potência gerada pode ser calculada por:

$$\begin{aligned}\dot{W}_{saída} &= \vec{\omega} \cdot \vec{T}_{saída} = R\omega(1 - \cos \theta)\rho VA(V - U) \\ &= \rho Q U(V - U)(1 - \cos \theta) \quad (7.3 - 12)\end{aligned}$$

A potência máxima que a turbina consegue gerar pode ser obtida derivando-se a equação da potência em relação à velocidade da pá, U , e igualando tal resultado à zero.

$$\frac{d\dot{W}_{saída}}{dU} = \rho Q(1 - \cos \theta)(V - 2U) = 0 \quad (7.3 - 13)$$

Portanto:

$$V - 2U = 0$$

Assim a máxima potência ocorre para:

$$U = \frac{V}{2}$$

Logo a máxima potência é dada pela seguinte equação:

$$\dot{W}_{saída} = \rho Q \frac{V}{2} \left(V - \frac{V}{2} \right) (1 - \cos \theta) = \rho Q \frac{V^2}{4} (1 - \cos \theta) \quad (7.3 - 14)$$

A rotação do rotor pode ser determinada a partir da velocidade das pás segundo a seguinte equação:

$$U = \omega R \Rightarrow \omega = \frac{2U}{d} \quad (7.3 - 15)$$

Que para a máxima potência fica:

$$\omega = \frac{2 \frac{V}{2}}{d} = \frac{V}{d} \quad (7.3 - 16)$$

7.1.1 Dimensões adotadas pela turbina e condições ambientais

Como o projeto é voltado a turbinas de uso residencial foram adotadas dimensões reduzidas no dimensionamento do rotor da turbina, considerando-se as seguintes dimensões para o rotor:

Tabela 7.1.1.1 – Dimensões adotadas para o projeto do rotor

Diâmetro do rotor (m)	0,35
Largura do rotor (m)	0,50

Com relação às condições ambientais fora considerado uma densidade de $\rho = 1,15 \text{ kg/m}^3$.

7.1.2 Torque da turbina

A partir da equação (7.3 – 11) pode-se calcular o torque que o vento aplica sobre a pá da turbina eólica, onde:

$$Q = AV = L \frac{d}{2} V \quad (7.3 - 17)$$

Q é a de ar.

Assim obtém-se:

$$\vec{T}_{saída} = \rho L \frac{d}{2} V \frac{d}{2} (V - U)(1 - \cos \theta) \vec{k} = \rho L \frac{d^2}{4} V (V - U)(1 - \cos \theta) \vec{k} \quad (7.3 - 18)$$

Onde para o máximo torque, $U = \frac{V}{2}$, obtém-se:

$$\vec{T}_{saída} = \rho L \frac{d^2}{4} V \left(V - \frac{V}{2} \right) (1 - \cos \theta) \vec{k} = \rho L \frac{d^2}{8} V^2 (1 - \cos \theta) \vec{k} \quad (7.3 - 19)$$

A tabela 7.1.2.1 apresenta os resultados para o cálculo do torque de saída na turbina para diferentes velocidades do vento e ângulos de saída do ar.

Tabela 7.1.2.1 – Torque gerado sobre o rotor para diversas velocidades do vento e ângulos de saída do ar

Ângulo (graus)	120	130	140	150	160	170	180
Vel. Vento (m/s)	Torque (Nm)						
3	0,119	0,130	0,140	0,148	0,154	0,157	0,158
4	0,211	0,231	0,249	0,263	0,273	0,280	0,282
5	0,330	0,362	0,389	0,411	0,427	0,437	0,440
6	0,475	0,521	0,560	0,591	0,615	0,629	0,634
7	0,647	0,709	0,762	0,805	0,837	0,856	0,863
8	0,845	0,926	0,995	1,052	1,093	1,118	1,127
9	1,070	1,172	1,260	1,331	1,383	1,416	1,426

7.1.3 Cálculo da rotação do rotor da turbina eólica

A partir da equação (7.3 – 16) pode-se calcular a rotação do rotor da turbina eólica. A tabela 7.1.3.1 apresenta a velocidade de rotação da turbina para diversas velocidades do vento.

Tabela 7.1.3.1 – Velocidade de rotação do rotor da turbina eólica para diversas velocidades do vento

Vel. Vento (m/s)	3	4	5	6	7	8	9
Rotação (rad/s)	8,57	11,43	14,29	17,14	20,00	22,86	25,71
n (rpm)	81,85	109,13	136,42	163,70	190,99	218,27	245,55

7.1.4 Cálculo da potência gerada na turbina eólica

Combinando as equações (7.3 – 14) e (7.3 – 17) obtém se a equação (7.3 – 20) que pode ser utilizada para calcular a potência gerada na turbina eólica.

$$\dot{W}_{saída} = \rho L \frac{d}{2} \frac{V^3}{4} (1 - \cos \theta) \quad (7.3 - 20)$$

A tabela 7.1.4.1 apresenta a potência gerada na turbina eólica para diversas velocidades do vento e diversos ângulos de saída do ar.

Tabela 7.1.4.1 – Potência gerada na turbina eólica para diversas velocidades do vento e diversos ângulos de saída do ar

Ângulo (graus)	120	130	140	150	160	170	180
Vel. Vento (m/s)	Potência (W)						
3	1,02	1,12	1,20	1,27	1,32	1,35	1,36
4	2,42	2,64	2,84	3,00	3,12	3,20	3,22
5	4,72	5,17	5,55	5,87	6,10	6,24	6,29
6	8,15	8,93	9,60	10,14	10,54	10,78	10,87
7	12,94	14,17	15,24	16,10	16,74	17,13	17,26
8	19,32	21,16	22,75	24,03	24,98	25,56	25,76
9	27,51	30,13	32,39	34,22	35,57	36,40	36,68

8. SISTEMAS AUXILIARES

Apesar deste projeto se tratar somente do projeto e construção de um rotor de uma turbina eólica. Será apresentados a seguir outros sistemas auxiliares importantes que constituem uma turbina eólica como um todo.

Como muitos sabem, rotor é o principal componente de uma turbina eólica, porém este somente não é capaz de gerar a energia elétrica. Para tanto são necessários outros sistemas capazes de transformar a energia mecânica, obtida do vento pelo rotor, em energia elétrica.

Os principais sistemas capazes de realizar tal feito serão apresentados abaixo, junto com uma breve explicação sobre cada um deles.

8.1 GERADORES ELÉTRICOS

Um gerador elétrico é uma máquina capaz de converter energia mecânica, química ou outra forma de energia em energia elétrica.

Os geradores elétricos mais comuns, conhecidos como dínamos, convertem a energia mecânica de um eixo rotativo em energia elétrica utilizando o princípio da indução eletromagnética.

Devido ao fato de o rotor eólico operar com velocidades variáveis, optou-se por se utilizar um gerador elétrico de corrente contínua.

8.1.1 Componentes de um gerador elétrico de corrente contínua

Um gerador elétrico de corrente contínua é formado essencialmente por um rotor, um estator e um comutador.

O rotor do gerador é a parte girante deste, que muitas vezes está acoplada a parte girante da fonte de energia mecânica. O rotor é composto de um material ferromagnético, envolto em um enrolamento de baixa potência chamado de enrolamento de armadura, que deve ser capaz de suportar altas correntes.

O estator constitui a parte estática do gerador, montado em volta do rotor, de forma com que o rotor gire internamente a este. O estator também é composto por um material ferromagnético, envolto por um enrolamento de baixa potência, mais conhecido como enrolamento de campo, cuja função é a de gerar um campo magnético estático, que interage com o campo do rotor.

O comutador é um componente mecânico cuja função é a de inverter sistematicamente o sentido da corrente contínua que circula na armadura,

garantindo assim com que o torque tenha sempre o mesmo sentido, impedindo assim com que a armadura fique parada em uma posição de equilíbrio.

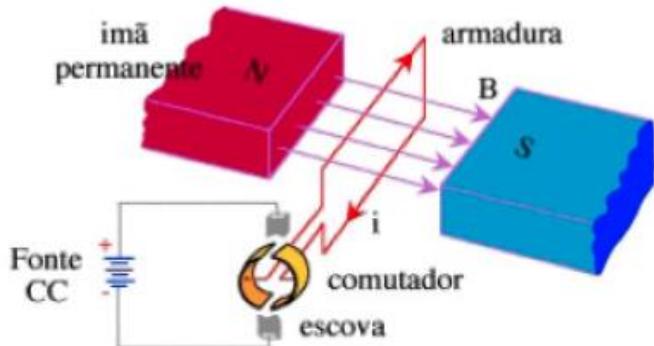


Figura 8.1.1 – Esquema de um gerador elétrico. Fonte: Argentino, F. L.; Beppu, S. K. 2007.

8.1.2 Princípio de funcionamento de um gerador elétrico de corrente contínua

Como apontado anteriormente o princípio de funcionamento de um gerador elétrico de corrente contínua se baseia no princípio da indução elétrica. Através do movimento mecânico do eixo do rotor a bobina gira em torno de um campo magnético uniforme gerado por um ímã permanente ou por um eletroímã, gerando assim um fluxo magnético, que por sua vez gera uma corrente elétrica ortogonal ao campo magnético.

8.2 SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Como já fora citado anteriormente, um gerador eólico tem como função fornecer energia elétrica através da energia cinética proveniente dos ventos. Sendo um fenômeno natural aleatório, não se pode controlar ou dominar a velocidade e a direção de uma corrente de ar.

Devido a tal fato, um sistema de armazenamento da energia elétrica gerada se torna indispensável para o projeto de uma turbina eólica, possibilitando assim o fornecimento da energia elétrica mesmo em tempos de escassez do potencial eólico.

Geralmente, para se atingir tal armazenamento são utilizadas baterias, ou um conjunto de baterias, capazes de realizar tal armazenamento.

8.2.1 Conjunto de baterias

Baterias são dispositivos capazes de armazenar energia elétrica através de reações químicas. Em sua grande maioria são dispositivos eficientes, práticos e que apresentam uma ótima relação custo benefício.

Um conjunto, ou banco de baterias é constituído por diversas baterias e é utilizado para armazenar uma maior quantidade de energia e promover o equilíbrio entre a demanda e a disponibilidade energética em um sistema.

Existem diversos tipos de baterias, onde entre elas existam as baterias conhecidas como de ciclo raso, mais popularmente conhecidas como de baterias automotivas.

Tais baterias são utilizadas em 100% dos automóveis com motores a combustão interna. E são responsáveis principalmente por dar a partida no motor de arranque, fazendo assim com que o motor a combustão interna entre um funcionamento.

Essas baterias são projetadas para suprirem uma grande quantidade de carga sem que ocorra a perda de eletrólitos, porém tais baterias não aceitam sua descarga completa. O descarregamento repetitivo faz com que a sua vida útil seja encurtada significativamente.

Por este fato, tais baterias não são viáveis para uma turbina eólica do porte estabelecido para este projeto.

Para este projeto se faz necessário o uso da baterias conhecidas como de ciclo profundo ou baterias estacionárias, que são projetadas para

repetidas cargas em mais de 80% de sua capacidade e são capazes de fornecer uma corrente elétrica relativamente constante por um longo período de tempo.

8.2.2 Controlador de carga

O controlador de carga tem como função bloquear a corrente reversa e prevenir qualquer sobrecarga no banco de baterias do sistema de armazenamento de energia.

A corrente reversa ocorre quando há um fluxo de corrente elétrica contrário, ou seja, quando o aparelho gerador consome a energia elétrica, ocasionado o descarregamento das baterias.

O controlador de carga é definido pela corrente e tensão de trabalho dos equipamentos geradores e sua capacidade deve sempre ultrapassar a corrente total do sistema gerador e caso haja a necessidade no projeto, deve-se dividir o conjunto elétrico por mais controladores e baterias.

Além dos sistemas apresentados acima há também a necessidade de dispositivos de proteção capazes de evitar a sobrecorrente, que pode causar danos permanentes no sistema elétrico. Tais dispositivos são os fusíveis ou disjuntores comumente utilizados, evitando assim uma sobrecarga do sistema.

9. CONTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

Para a construção do protótipo optou-se por se utilizar acrílico, pelo fato de ser um material barato e que não se deteriora tão facilmente se comparado com materiais ferrosos e também pelo fator estético do acrílico quando comparado com os materiais ferrosos.

Porém, devido à dificuldade de se trabalhar com acrílico, principalmente se tratando das curvas apresentadas pelas pás do rotor projetado, optou-se por se terceirizar a construção deste.

O rotor fora construído pela empresa Usa acrílicos do Brasil, localizada na Rua Luís Góes, 235, Chácara Inglesa, São Paulo com o custo de R\$180,00.



Figura 9.1 – Foto do rotor projetado em acrílico.

Devido a falta de ferramentas e material para a construção dos mancais e da base do rotor, não fora possível a construção destes. Outro fator que levou a não construção dos mancais e da base do rotor fora a dificuldade encontrada para se testar e ensaiar o rotor, já que este, nos cálculos teóricos, possui uma potência muito baixa, mesmo quando submetido a grandes velocidades de vento.

Tal fato faz com que se obter a potência desenvolvida pelo rotor seja algo de grande dificuldade, pois as incertezas presentes nos instrumentos de medição podem ser muitas vezes maiores que a potência gerada pelo rotor em si.

10. TESTES E ENSAIOS

Para os testes e ensaios do rotor considerou-se a possibilidade de se construir um Freio de Prony, que é utilizado principalmente para pequenas potências.

O Freio de Prony se baseia no fato de que o torque gerado pelo rotor provoca uma aceleração angular do eixo do mesmo. Ao se acionar o freio sobre o rotor, uma força de atrito é aplicada sobre o mesmo, através da qual pode-se atingir uma situação de equilíbrio dinâmico, fazendo assim com que a rotação permaneça constante.

Quando isto ocorre o torque se iguala a força de atrito, pois não há uma aceleração angular. Já a força de atrito é transmitida em sentido contrário no freio, que tenderia a girar no mesmo sentido do rotor, se não fosse o apoio na balança que o mantém em equilíbrio estático.

Conhecendo-se a força aplicada na balança e o braço do freio, pode-se calcular o torque pela equação apresentada a seguir.

$$T = F \cdot R \quad (10 - 1)$$

Onde:

- ♦ T é o torque gerado no rotor (Nm);
- ♦ F é a força lida na balança (N);
- ♦ R é tamanho do braço do Freio de Prony (m).

E conhecendo-se o torque e a rotação do rotor, pode-se calcular a potência do mesmo pela seguinte equação:

$$N = T \cdot \omega \quad (10 - 2)$$

Onde:

- ♦ N é a potência gerada pelo rotor (W);
- ♦ T é o torque gerado na turbina (Nm);
- ♦ ω é a rotação do rotor (rps).

Como fora levantado anteriormente, os testes e ensaios referentes ao rotor proposto não foram realizados devido a dificuldade de se obter de forma precisa a potência gerada pelo rotor, ainda mais se considerando a construção de um Freio de Prony, que para tão baixas potência teria que possuir uma altíssima precisão, algo que apresentaria uma alta dificuldade, se considerado o fato de que este trabalho se concentra em apresentar uma turbina eólica de eixo vertical de baixa potência e não a construção de um protótipo de Freio de Prony de alta precisão.

10.1 ENSAIO COMPARATIVO DOS PROTÓTIPOS CONSTRUÍDOS

Devido a tais fatos, com a sugestão do Professor Eitaro Yamane, se construiu três protótipos para se obter uma comparação qualitativa entre eles. Ambos possuindo o mesmo tamanho e número de pás, e se diferenciam somente pelo formato das pás.

Tais protótipos foram construídos com papel cartão e palitos de churrasco, visando o custo e tempo de construção de tais protótipos.

A seguir será apresentado o perfil dos três rotores que foram construídos e ensaiados.

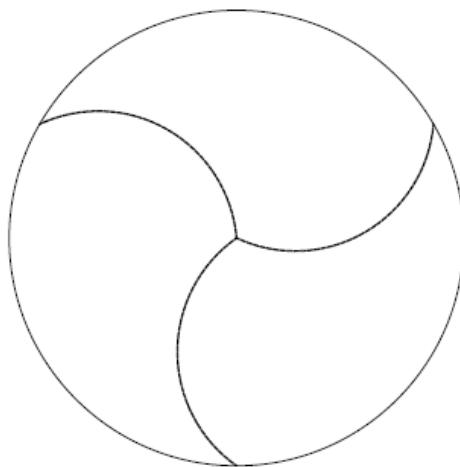


Figura 10.1.1 – Perfil do rotor de número 1 construído e ensaiado.

As pás do rotor representado pela figura 10.1.1 possuem o mesmo perfil do rotor anteriormente e que fora construído em acrílico. Tais pás apresentam como perfil um segmento de uma circunferência.

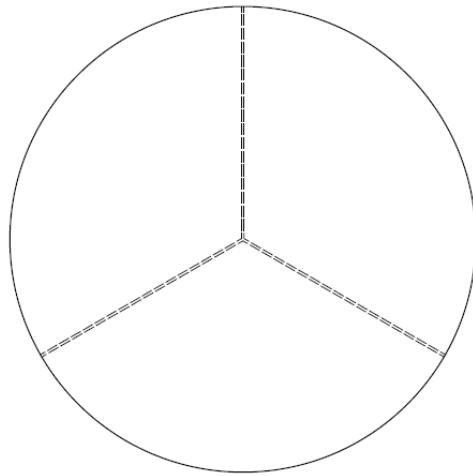


Figura 10.1.2 – Perfil do rotor de número 2 construído e ensaiado.

As pás do rotor representado pela figura 10.1.2 são retas. Tal escolha fora considerada levando em consideração a facilidade na construção do protótipo, mas também para poder se comparar a diferença entre uma pá reta e uma pá com um perfil mais trabalhado.

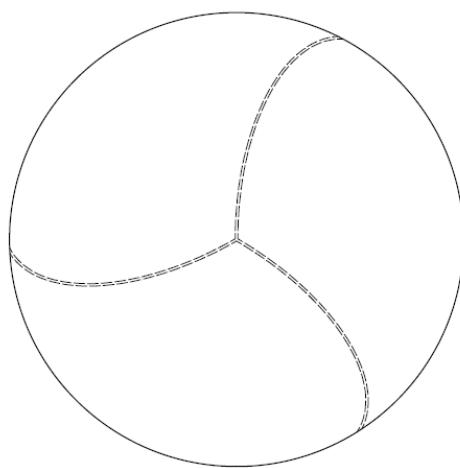


Figura 10.1.3 – Perfil do rotor de número 3 construído e ensaiado.

As pás do rotor representado pela figura 10.1.3 apresentam um perfil elíptico.

Todos os protótipos construídos possuem 175mm de diâmetro e 250mm de comprimento. Tais dimensões se devem a facilidade de construção dos protótipos, pois com um diâmetro de 175mm, tais protótipos apresentam uma escala de 2:1 com relação ao rotor construído em acrílico e também pelo fato de que com tais dimensões, o perfil das pás podem ser impressas em uma folha A4, facilitando a construção destas, quando levado em conta que o perfil destas fora impresso e usado como gabarito para sua construção.

A seguir é apresentado as fotos dos três protótipos.

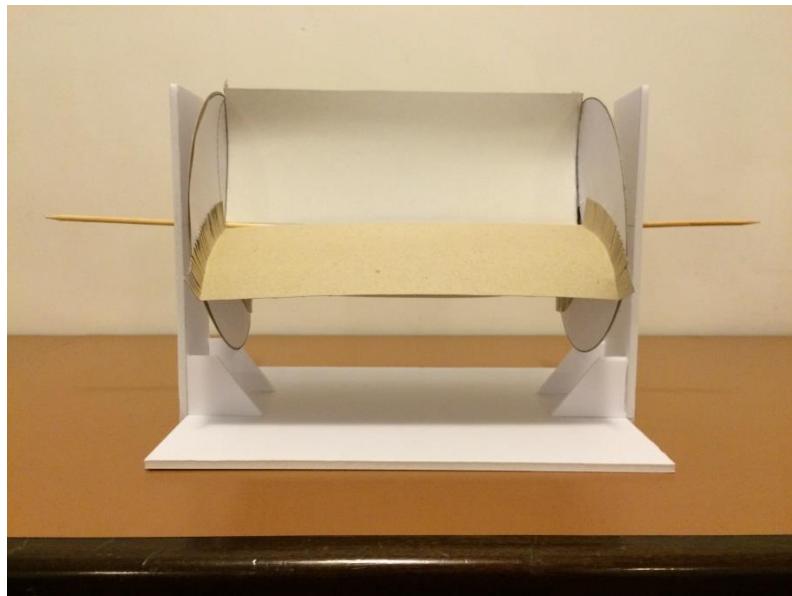


Figura 10.1.4 – Foto do rotor de número 1 construído e ensaiado.

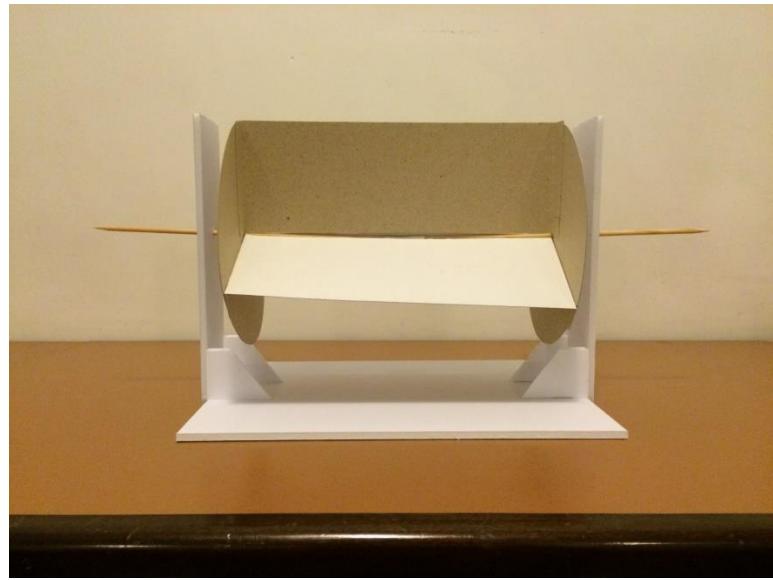


Figura 10.1.5 – Foto do rotor de número 2 construído e ensaiado.



Figura 10.1.6 – Foto do rotor de número 3 construído e ensaiado.

Para poder se comparar os protótipos entre si fora amarrado no eixo de ambos os rotores um barbante com 5 metros de comprimento e fora cronometrado o tempo que estes levaram para que o eixo destes enrolassem todo o barbante. Devido a aceleração inicial do rotor com relação ao vento inicial, desconsiderou-se o trecho inicial de um metro, contando somente os últimos nove metros.

Para se simular um vento utilizou-se um ventilador da marca Mondial de modelo NV-41 com 400mm de diâmetro e com 80W de potência. Devido a falta de instrumentação para se obter a velocidade do vento, utilizou-se somente o ventilador na menor velocidade disponível, para se obter uma comparação qualitativa entre os três protótipos. A figura 10.1.7 apresenta uma foto do ventilador utilizado.



Figura 10.1.7 – Foto do ventilador utilizado nos ensaios.

Para se obter uma consistência nos resultados obtidos, se testou cada protótipo dez vezes, onde após os testes, se calculou a média e se comparou os resultados. A tabela 10.1.1 apresenta os resultados obtidos para os três rotores.

Tabela 10.1.1 – Resultados obtidos com relação aos testes dos três rotores

	Rotor 1	Rotor 2	Rotor 3
Teste nº 1 (s)	30,27	27,36	32,06
Teste nº 2 (s)	23,83	34,45	30,57
Teste nº 3 (s)	22,47	31,55	29,35
Teste nº 4 (s)	20,98	30,70	31,10
Teste nº 5 (s)	20,96	28,08	25,00
Teste nº 6 (s)	21,90	32,50	34,43
Teste nº 7 (s)	21,45	32,78	33,48
Teste nº 8 (s)	15,50	28,40	30,00
Teste nº 9 (s)	19,38	35,31	33,30
Teste nº 10 (s)	19,03	34,22	32,46
Média (s)	21,58	31,53	31,17

11. CONCLUSÕES

Segundo os resultados levantados, o rotor que levou o menor tempo para enrolar todo o barbante fora o rotor 1, que possui as pás com o formato de um segmento de circunferência. Os outros dois rotores não apresentaram, na média, uma diferença significativa com relação ao tempo necessário para que estes enrolassem todo o barbante, e que ao se levar em conta a incerteza do operador com relação ao cronômetro, a diferença é zero.

Apesar da precariedade dos protótipos desenvolvidos, os testes forneceram uma boa comparação entre o formato das pás, onde pode-se observar claramente que tal formato possui uma grande influência na velocidade e consequente potência gerada pelo rotor da turbina eólica.

Devido a falta de ferramentas e de verba, não foi possível desenvolver uma turbina eólica funcional capaz de gerar energia elétrica através da ação do vento, porém este estudo pode apresentar algumas das

diferenças que o formato das pás de um rotor de uma turbina eólica é capaz de gerar.

Os próximos passos deste estudo seria projetar o formato de uma pá capaz de desenvolver ainda maiores velocidades e consequentemente maiores potências. Em seguida poderia se construir um protótipo capaz de gerar energia elétrica, acoplado a um conjunto de baterias, tornando possível assim a utilização desta turbina para fins residenciais e comerciais.

Desde o começo do projeto já se sabia que a construção de uma turbina eólica funcional seria uma tarefa árdua, pois além da dificuldade com relação as ferramentas e ao capital necessário para a construção de tal turbina, ainda existe o fato de que há diversos modelos de rotores eólicos e a escolha de um para se aprofundar e construir leva muito tempo de estudo.

Segundo este projeto, caso se construísse uma turbina nas dimensões e com o rotor apresentado, a potência gerada seria muito baixa, da ordem de 10W, potência esta muito pequena se comparada com as necessidades diárias de uma residência, porém com maiores dimensões e com o emprego de baterias capazes de armazenar a energia gerada, é possível se desenvolver uma turbina eólica de eixo vertical para uso residencial e comercial.

12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA: **Atlas de Energia Elétrica**, Brasília, 2005. Disponível em:
<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/download.htm>. Acesso em: outubro de 2013.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAER E EÓLICASERGIO DE SALVO BRITO: **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**, Brasília 2001. Disponível em:
<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/index.php?task=livro&cid=1>. Acesso em: outubro de 2013.

Spera, D. A. **Wind Turbine Technology**: fundamental concepts of wind turbine engineering. New York, 1994.

Hau, E. **Wind Turbines**: Fundamentals, Technologies, Application, Economics. Berlin, 2006.

Bhutta, M. M. A. et al. **Vertical axis wind turbine – A review of various configurations and design techniques**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Colorado, v. 16, p 1926-1940, 2012.

Dijk, T., Delta: Magazine Van de Technische Universiteit Delft, Delft, Holanda, 2011. Disponível em <http://delta.tudelft.nl/article/seven-veni-s-for-tu/23661>. Acessado em novembro de 2013.

Ragheb, M. **Vertical Axis Wind Turbines**, 2013.

The Creative Science Center. Disponível em <http://www.creative-science.org.uk/sav.html>, visualizado em novembro de 2013.

Peace, S. The American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2004.

Disponível em <<http://www.windturbine-performance.com/www/another%20approach%20to%20wind-apptowind.html>>. Acesso em novembro de 2013.

XplorNet. Disponível em
<http://users.xplornet.com/~rmanzer/windmill/hrotor_calculator.html>. Acesso em novembro de 2013.

Xconomy. Disponível em <<http://www.xconomy.com/san-diego/2009/07/08/small-is-beautiful-helix-powers-weinbrandt-sees-a-small-wind-turbine-on-every-rooftop/attachment/helix-turbine-640/>>. Acesso em novembro 2013.

Argentino, F. L.; Beppu, S. K. **Projeto e construção de turbinas eólicas para instalações comerciais e residenciais**. São Paulo, 2007.