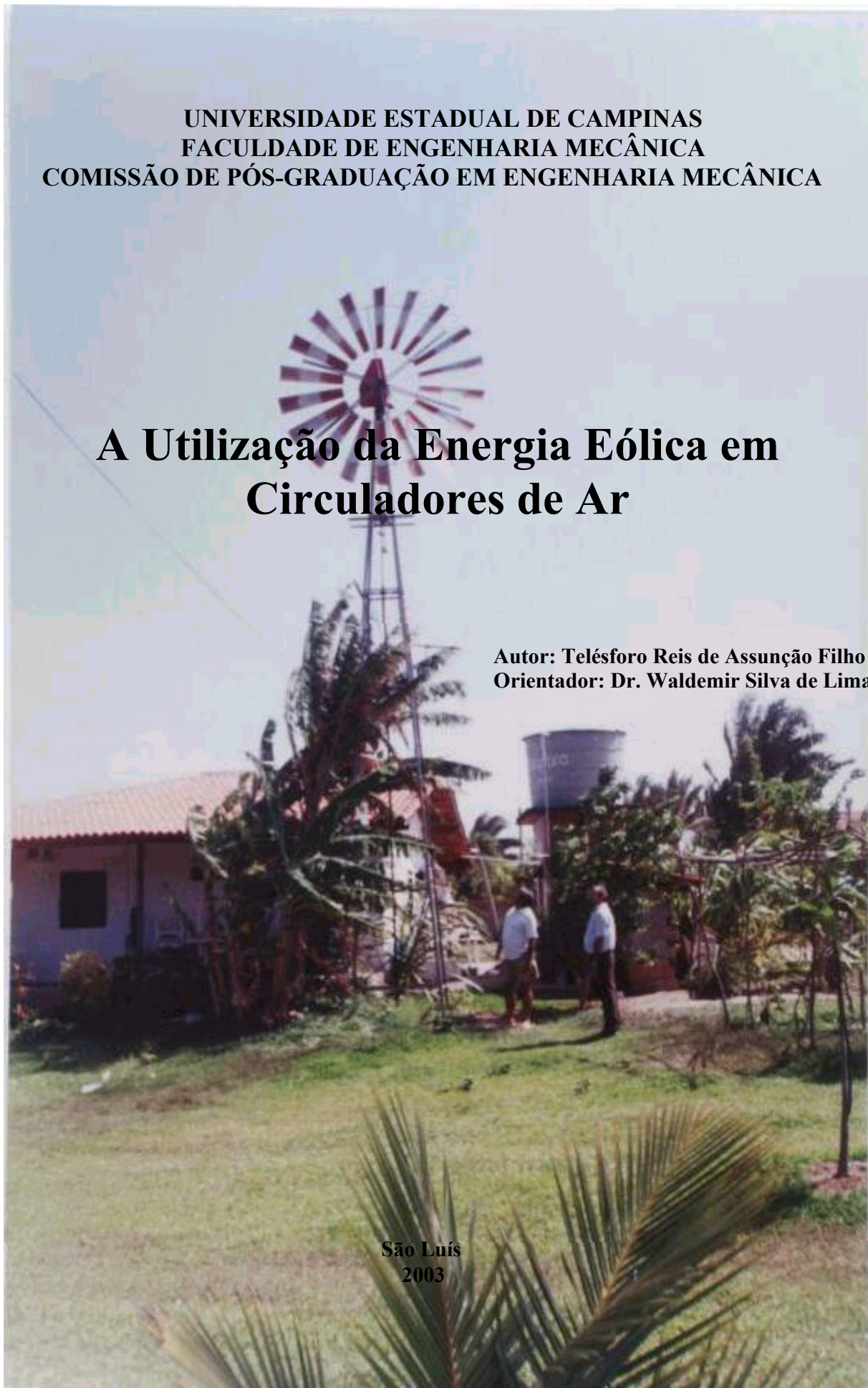


**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

# **A Utilização da Energia Eólica em Circuladores de Ar**

**Autor: Telésforo Reis de Assunção Filho  
Orientador: Dr. Waldemir Silva de Lima**

**São Luís  
2003**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

# **A Utilização da Energia Eólica em Circuladores de Ar**

Autor: Telésforo Reis de Assunção Filho  
Orientador: Dr. Waldemir Silva de Lima

Curso: Engenharia Mecânica - Mestrado Profissional  
Área de Concentração: Refrigeração e Condicionamento Ambiental

Trabalho Final de Mestrado Profissional apresentado à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre Profissional em Engenharia Mecânica/ Refrigeração e Condicionamento Ambiental.

São Luís, 2003  
MA – Brasil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Trabalho Final de mestrado Profissional

# **A Utilização da Energia Eólica em Circuladores de Ar**

Autor: Telésforo Reis de Assunção Filho  
Orientador: Dr. Waldemir Silva de Lima

---

**Prof. Dr. Waldemir Silva de Lima ,Orientador  
Instituição UEMA**

---

**Prof. Dr. Kamal A. R. Ismail  
Instituição Unicamp**

---

**Prof. Dr. Valdemar Silva Leal  
Instituição UEMA**

São Luís, 10 de junho de 2003

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho aos meus pais: Telesforo Reis de Assunção e Maria Brito Assunção, meus filhos e minha esposa.

## **Agradecimentos**

Para mim, o conhecimento significou crescer, assim agradeço a DEUS pela preciosidade da vida, e como esta vida é o conjunto geral de muitas vidas, agradeço aos que estão bem próximo, pois sei que a emoção é deles também.

Este trabalho não poderia ser concluído sem ajuda de diversas pessoas às quais gostaria de deixar minha homenagem:

Aos meus pais Telésforo e Maria Brito, pelo carinho incentivo e amor em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador, Dr. Valdemir Silva de Lima que me mostrou os caminhos a serem seguidos.

Ao prof. Ms Jorge de Jesus Passinho e Silva pela ajuda inestimável.

Ao prof. Ms Ubiraci Silva Nascimento pelo apoio e credibilidade.

Ao prof. Ms José de Ribamar Pestana Filho pelo companheirismo e os engenheiros Caubi Nascimento e Luís do Rosário pela contribuição.

A meu irmão Manoel Luís de Assunção Neto pela grande ajuda e confiança.

Aos colegas profs do Departamento de Engenharia Mecânica: Valdison, Leal Paulino, Pinto, Chicão, Adelman e demais colegas.

A minha turma companheira e alegre pelo tempo de experiência dividida.

A UNICAMP pela oportunidade que nos foi oferecido para melhorar nosso grau de conhecimentos.

A UEMA que nos facilitou esta aprendizagem.

Aos professores DR. Kamal A. R. Ismail e Dr. Luís Felipe Mendes de Moura por compreensão e convivência harmoniosa.

À minha família – irmãos, sobrinhos, cunhados – pela ajuda, estímulo, apoio, carinho e compreensão, com muito amor.

A todos aqueles que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

“Que o reter na memória do cabedal científico”,  
não fique amontoado no cérebro  
Telésforo Assunção F<sup>o</sup>

## **Resumo**

ASSUNÇÃO FILHO, Telésforo Reis de, A Utilização da Energia Eólica em Circuladores de Ar, Campinas, : Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003, 101p. Trabalho Final de Mestrado Profissional.

O presente trabalho consiste numa pesquisa teórica sobre aproveitar a energia cinética do vento a partir de um rotor tipo Savonius, fazendo a conversão em energia mecânica, através da utilização de circuladores de ar visando propiciar um conforto térmico, partindo inicialmente de uma introdução sobre a utilização da energia eólica seu aproveitamento e seus objetivos relacionando nome de vários pesquisadores. Mostramos as condições de diversos tipos de locais e comportamento influenciados pela mecânica das massas de ar. Fez-se uma estatística destas massas de ar e um breve estudo das turbinas eólicas suas características e seus designe, sua vantagens e desvantagens, foi feito ainda uma análise experimental na região de São Luís, usando a frequência do vento com o objetivo de obter um bom rendimento, com isso este trabalho visa contribuir como pesquisa e implementação de projetos nessa área usando processos básicos de obtenção do potencial eólico. Encerrar-se o trabalho com a caracterização e discernimento entre os principais tipos de rotores que vêm sendo utilizados atualmente.

### *Palavras chave*

Circuladores de ar, Energia cinética, Implementação, Rotor Eólico

## **Abstract**

ASSUNÇÃO FILHO, Telésforo Reis of, Utilização da Energia Eólica in Fans, Campinas,: Mechanical Engineering Faculty, University Estadual de Campinas, 2003, 101p. Work Final de Mestrado Profissional.

The present work consists in a theoretical research about wind kinetic energy utilization from a rotor kind Savonius, doing the conversion in mechanical energy, through the fans utilization aiming propitiate a thermal comfort, departing initially of an introduction on the energy eólica your utilization utilization and your objective relating several researchers name. We show the several local and behavior kinds conditions influenced by the air masses mechanics. It did an air statistical destas masses and a turbines eólicas brief her study characteristic and your designates, your advantages and disadvantages, was going done still an experimental analysis in São Luís' region, using the wind frequency with the goal of obtaining a good revenue, with that this work aims contribute like projects research and implementation in this area using obtainment potential eólico basic processes. Contain the work with the characterization and discernment between rotors main kinds that have been used nowadays.

### *Key words*

Fans, Kinetic Energy, Implementation, Rotor Eólico



<b>Índice</b>	<b>p</b>
Listas de Figuras	v
Listas de Tabelas	vi
Listas de Gráficos	vii
Nomenclatura	viii
Capítulo 1	01
Introdução	01
Capítulo 2	05
2.1 - Revisão da literatura	05
2.2 - Mecânica do vento	11
2.2.1 – Gradiente de pressão	11
2.2.2 – Força de coriolis	13
2.3 – Vento geostrófico	14
2.4 – Gradiente de vento	16
2.5 – A fricção da superfície da terra	18
2.6 – O vento a superfície	18
2.7 – Classificação da circulação do ar	19
2.7.1 – Circulação geral	19
2.7.2 – Circulação secundária	21
2.7.2.1 – Furacões	21
2.7.2.2 – Circulações monçônicas	21
2.7.2.3 – Circulações extratropicais	21
2.7.3 – Circulações terciárias	22
2.7.3.1 – Brisas terra-mar e mar-terra	23
2.7.3.2 – Ventos entre vales e montanhas	23
2.8 – Medição da velocidade do vento	23

2.9 – Classificação das turbinas eólicas	25
2.9.1 – Rotor tipo savonius	28
2.9.1.1 – Principais características	28
2.9.1.2 – Aspecto do design	29
2.9.2 – Rotor tipo darrieus	33
2.9.2.1 – Características básica e aspecto do design	33
2.9.2.2 – Comportamento do rotor darrieus	34
2.9.3 – Rotor multipás de eixo horizontal	36
2.9.3.1 – Características básicas	37
2.9.3.2 – Rotores de eixo horizontal de alta velocidade	38
2.9.3.3 – Controles de orientação	39
2.9.3.4 – Controles de sobre velocidades	39
2.9.3.5 – Controles de interrupção	40
Capítulo 3	42
Análise experimental	42
3.1 – Energia eólica	42
3.2 – Energia disponível	42
3.3 – Potência extraível e limite de Betz	44
3.4 – Fatores que interferem na velocidade do vento	46
3.4.1 – Rugosidade do terreno e perfil vertical do vento	47
3.4.1.1 – Perfil vertical e lei potencial	50
3.4.2 – Turbulência	51
3.4.3 – Aceleração no topo de colinas	51
E – Estatística da velocidade do vento	53
E.1 – Estimação empírica da velocidade do vento e a escala de Beaufort	53
E.2 – Análise estatística	55

E.2.1 – Média e desvio padrão	56
E.2.2 – Distribuição do tempo	57
E.2.3 – Distribuição de frequência	58
E.2.3.1 – Na falta dos dados originais	65
E.2.4 – Estimação do potencial eólico	67
Capítulo 4	68
Resultados e Discussões	68
4.1 – Conversão de energia e dimensionamento do rotor e circuladores	68
4.1.1 – Princípio da extração de energia por meio da força de arrasto exercida pelo vento	68
4.1.2 – Aerodinâmica nos aerofólios	73
4.2 – Características do projeto	75
4.2.1 – Análise do projeto	80
4.2.2 – Resultados obtidos	83
Conclusão e Sugestões para próximos trabalhos	84
Referências bibliográficas	85
Anexos	88

## Lista de Figuras

2.1 – Gradiente de pressão horizontal	12
2.2 – Força de coriolis	13
2.3 – Movimento da partícula em uma região de gradiente de pressão horizontal	15
2.4 – Movimento ciclônico no hemisfério norte	17
2.5 – Movimento anticiclônico no hemisfério norte	17
2.6 – Circulação atmosférica e triclular	20
2.7 – Anemômetro de gazoleta	24
2.8 – Turbinas eólicas mais comuns	26
2.9 – Turbinas eólicas mais comuns	27
2.11 – Opções de design para rotor savonius	30
2.12A – Área varrida e dimensões básica de um rotor savonius	31
2.12B – Área varrida e dimensões básica de um rotor savonius	32
2.16 – Diagrama de vetores para um aerofólio em baixas razões de velocidade de ponta	35
2.24 – Rotores a jusante e a montante da torre	41
2.25 – Sistemas de segurança. O rotor não enfrenta mais o vento	41
3.1 – Fluxo de ar atravessando um rotor eólico	42
3.2 – Desaceleração do fluxo de ar ao passar por um rotor eólico	45
3.5 – Alcance da turbulência do vento gente a um obstáculo	51
3.6 – Aceleração no topo de colinas	52
4.1 – Tipo de mecanismo que se move a arrasto pelo vento	69
4.2 – Atuação da força de arrasto do vento em uma pá plana	70
4.3 – Relação entre força de arrasto do e a razão de velocidade	73
4.4 – Atuação do fluxo do ar em corpos diferentes	74

## **Listas de Tabelas**

2.1 – Valores aproximados de parâmetros de rugosidade e expoente de potência para vários tipos de terrenos	48
3.1 – Avaliação da velocidade do vento pela escala de Beaufort	54
3.2 – Distribuição de frequência absoluta e relativa	60
3.3 – Distribuição de frequência absoluta relativa, acumulada	61
3.4 – Distribuição de frequência	64
3.5 – Distribuição de frequência considerando os valores médios em cada classe	66

## Listas de Gráficos

2.13 – Curva de torque e potência para dois rotores savonius diferentes	32
3.3 – Potência máxima alcançada quando $V_2/V_1 = 1/3$	46
3.4 – Perfil logaritmo do vento tendo uma altura de 10m para vários valores de $Z_0$	49
3.5 – Padrão diário do vento relativo ao mês de dezembro	58
3.6 – Distribuição de frequência absoluta e relativa	60
3.7a – Frequência absoluta acumulada	62
3.7b – Frequência absoluta acumulada percentagem	62
3.7c – Frequência relativa e absoluta acumulada	63
3.8a – Frequência relativa de duração hora-mês	64
3.8b – Frequência absoluta de duração hora-mês	65
3.8c – Frequência relativa e absoluta de duração hora-mês	65

## Nomenclatura

### Letras Gregas

$\rho$ - densidade do ar	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\Omega$ - velocidade angular	[rad/s]
$\phi$ - latitude	[graus]
$\lambda$ - velocidade de ponta	[m/s]
$\Delta x$ – unidade de área	[m <sup>2</sup> ]
$\bar{\rho}$ – densidade média	kg/m <sup>3</sup>
$\Delta P$ – unidade de pressão	[Nm]
$\Delta z$ – unidade de altura	[m]

### Letras Latinas

P – pressão	[Nm <sup>2</sup> ]
a – aceleração	[m/s <sup>2</sup> ]
v – velocidade	[m/s]
C – força de coriolis	[N]
r – raio em relação ao vento	[m]
$V_t$ – velocidade tangencial	[m/s]
$V_z$ – velocidade na altura h	[m/s]
$V_{zh}$ – velocidade média na altura de referência $h_r$	[m/s]
$h_r$ – altura de referência	[m]
$\bar{e}$ – média aritmética	[m/s]
$S_x^2$ – variância	[m/s]
$S_x$ – desvio padrão	[m/s]
$f_i$ – frequência relativa	[m/s]

$F_{ai}$ – frequência absoluta acumulada	[m/s]
$F_{ai\%}$ – frequência relativa acumulada	[m/s]
$\bar{P}$ – potência eólica média	[W]
D – força de arrasto	[N]
T – torque	[N.m]
L – força de sustentação	[N]
R – raio do rotor	[m]
$F_x$ – força resultante	[N]
g – gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
m – massa	[kg]
h – altura	[m]
$Z_o$ – rugosidade	[mm]
$P_{máx}$ – potência máxima	[m/s <sup>2</sup> ]
A – área	[m <sup>2</sup> ]
$E_c$ – energia cinética	[J]

#### Siglas

**COELCE** – Companhia Energética do Ceará

**CBEE** – Centro Brasileira de Energia Eólica

**CEPEL** – Centro de Pesquisa Elétrica

**PRODEEM** – Programa de Desenvolvimento Energético de Estado e Municípios

**SECTEC** – Secretaria de Tecnologia

**SEAS** – Companhia de Serviço Público

**SBSL** – Serviço de Base de São Luís

**CHESF** – Companhia Hidrelétrica do São Francisco

**EDF** – Electricité de France

**ADEME** – Agence de l’Environnement et de la maîtrise de l’Energie

**EWEA** – Associação europeia de Energia Eólica

**PROEÓLICA** – Programa Emergencial de Energia Eólica

**CDC** – Docas do Ceará

**SETECO** – Secretaria de transporte, Energia, Comunicação e Obras



## **Capítulo 1**

### **Introdução**

Ha milhares de anos, o homem aprendeu a usar a força do vento em seu benefício. Uma das primeiras utilidades foi, talvez, o barco à vela, que com essa força dispensava os remos. E se a energia eólica consegue mover barcos, porque não poderia ter outras utilidades? Muito tempo depois, no século XX, surgiram as chamadas turbinas eólicas espécies de moinho de vento mais potentes e modernos, capazes de gerar eletricidade.

Os mais antigos documentos conhecidos que mostram o uso de moinhos de vento datam do ano de 915 a.C. e do ano de 644 a.C. Eles foram encontrados na Pérsia, onde se localiza o Irã, no continente asiático. Mas há indicações não documentadas do emprego de moinhos de vento, em tempos mais antigos no Iraque, no Egito e na China, GEOCITES (2002).

Por volta do século XII, a utilização dos moinhos de vento se espalhou pela Europa. Primeiro chegou à Itália, em seguida à França; depois, alcançou a Península Ibérica, onde hoje se localizam Espanha e Portugal. Por último, podiam ser vistos também na Inglaterra, na Holanda e Alemanha.

Os moinhos na Europa, nessa época, já tinham o eixo horizontal e possuíam quatro grandes pás colocadas em forma de cruz. Sua principal função, mais uma vez, era para moer grãos. Na Holanda, os moinhos foram muitos utilizados na secagem de terrenos alagados. Outras de suas aplicações eram a extração de óleo de nozes e grãos, a serragem de madeira, a transformação de panos velhos em papel e a preparação de pós-coloridos para fazer tinturas,

GEOCITES (2002).

Durante 650 anos, os moinhos de vento espalharam-se amplamente pela Europa, até começaram a perder importância, no início do século XIX. Essa lenta queda de utilização durou cerca de cem anos e teve como causa o desenvolvimento da máquina a vapor. Depois da Primeira Guerra Mundial (1914 a 1918), por causa do desenvolvimento dos chamados motores a explosão – como aqueles usados em automóveis – e do emprego cada vez maior da energia elétrica, os moinhos de vento caíram em desuso, WINDPOWER (2001).

Após mais de um século de consumo fácil, quase nós tínhamos esquecido dela. Hoje, com o fim da abundância do petróleo e carvão, volta-se a falar nessa energia só que de uma maneira diferente, voltada como energia alternativa. A utilização desta fonte energética para geração em escala comercial teve início há pouco mais de 30 anos. No Brasil, embora o aproveitamento dos recursos eólico tenha sido feito tradicionalmente com a utilização de cata-ventos múltiplos para bombeamento de água, algumas medidas precisas de vento, realizadas recentemente em diversos pontos do território nacional, indicam a existência de um imenso potencial eólico ainda não explorado.

A energia eólica é uma variável da energia solar, pois deriva do aquecimento diferenciado da atmosfera e das irregularidades de relevos da superfície terrestre.

Durante o dia o sol esquenta o ar sobre a terra mais que o ar que está sobre o mar. O ar continental se expande e eleva, diminuindo assim a pressão sobre o terreno e fazendo que o vento sopra desde o mar produzido nas costas terrestres. A rotação terrestre, a diferença de temperatura e a pressão atmosférica têm influência na direção do vento. O conteúdo energético do vento depende de sua velocidade. Perto do solo, a velocidade é baixa, porém aumenta rapidamente com a altura. Quanto mais acidentada é a superfície do terreno, mais diminuirá a velocidade do vento.

O vento sopra com menos velocidade nas depressões terrestres e em pontos sobre as colinas, porém em grandes vales e terrenos montanhosos nós encontramos o efeito túnel que pode proporcionar boas velocidades do vento. Não obstante, o vento sopra com mais força sobre o mar que em terra. É por isso, que as melhores localizações para as turbinas se encontram no mar, sobre colinas, arredores das costas e com pouca vegetação.

Outro aspecto da motivação por fontes alternativas de energia é porque, principalmente em se tratando de energia solar e eólica, podem ser transformadas no local de utilização, ou seja, não necessitam de transporte, e também por requererem baixos custos de manutenção o que em certas circunstâncias compensa o alto custo da instalação. Esta característica habilita a servir como meio mais indicado para se levar a regiões remotas, possibilitando, portanto, seu desenvolvimento e, conseqüentemente, evitando a evasão da população local para os grandes centros, o que vem implicando nos grandes “bolsões de miséria” que se formam pela falta de estrutura daqueles que atendem ao fluxo populacional.

A energia eólica, fonte alternativa, atende a todos os pré-requisitos discutidos acima: é renovável, é ecologicamente correta, pois não agride o meio ambiente, é de fácil instalação e requer pouca manutenção, o que capacita como forma de gerar energia nos locais onde não há viabilidade do uso dos sistemas convencionais. Portanto, já há algum tempo, vem sendo amplamente pesquisada com o intuito de obter seu aproveitamento da forma mais eficiente possível.

No Brasil, iniciativas como a do CEPEL (Centro de Pesquisa Elétricas), que deu origem ao Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, mostrando grande interesse na evolução de projetos nessa área, e vem promovendo a disseminação do uso das energias solar e eólica por todo o país através de orientação a projeto e cursos. O Ministério de Minas e Energia através do PRODEEM (Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios), busca a descentralização da energia elétrica dos Estados e Municípios principalmente no que diz respeito às regiões menos desenvolvida, PEREIRA (1995).

O Estado do Maranhão, entretanto somente agora vem demonstrando interesse na área da utilização de fontes alternativas, principalmente devido à iniciativa do PRODEEM. Alguns esforços vêm sendo feitos por parte da Secretaria de Tecnologia (SECTEC), mas de concreto obteve-se somente o Seminário Sobre Aplicações de Energia Solar e Autônoma e nos desenvolvimentos de Projetos (04/96), e do projeto de instalação de um aerogerador (10KW) na ilha do Cajual, mediante financiamento do PRODEEM. Não há quase participação das Universidades, e nenhum projeto na área de Energia Eólica foi implementado, até então. Portanto está em estudo através de professores da Universidade Federal do Maranhão a

implantação de um Projeto sobre a aplicação da energia eólica em energia elétrica usando um rotor tipo Savonius Figura 1.1, ver anexo I

Considerando que a massa de ar pode ser utilizada para diversos tipos de aplicações, logo apresentaremos uma alternativa para a utilização da Energia Eólica em Circuladores de Ar, Esperando assim, contribuir com a pesquisa e implementação de projetos nesta área tão importante de energia.

## Capítulo 2

### 2.1 Revisão da Literatura

Charles F. Brush é um pioneiro no estudo da energia elétrica americana. Inventou por exemplo um dínamo muito eficiente de corrente contínua utilizada na rede elétrica pública, a primeira luz de arco elétrico comercial, assim como um eficiente método para a fabricação de baterias de chumbo-ácido. Durante o inverno de 1887-88 Brush construiu a que hoje se crer a primeira turbina eólica de funcionamento Automático para geração de eletricidade. Era uma gigante a maior do mundo o diâmetro do rotor era de 17m e 144 pás fabricadas de madeiras de cedro, gerando somente 12KW. A turbina funcionou durante 20 anos e carregava as baterias que se encontravam no sótão de sua mansão, WINDPOWER (2001).

Em 20 de dezembro de 1890 a revista “Scientific American” publicava uma descrição muito detalhada da turbina eólica de Charles Brush. É particularmente célebre por seu sistema de controle elétrico totalmente automatizado. Difícil estimar o efeito de um invento em práticas de indústrias existentes. De vez em quando aparecerá um novo invento que afetará enormemente a todo um conjunto de inventos industriais relacionados, de tal maneira que muda totalmente os costumes consagrados. O desenvolvimento comercial da eletricidade é um exemplo notável sobre isto, WINDPOWER (2001).

Depois que Mr. Brush lograra com êxito uma iluminação elétrica praticada mediante um arco de luzes, a iluminação incandescente foi rapidamente adiantada e aperfeiçoada. A iluminação de gás também foi melhorada de diversas formas. Simultaneamente, a distribuição elétrica de energia avançou e tiveram importantes melhoras em fontes de energia primárias

para o acionamento de dínamos tanto em motores a vapor como de água.

A energia eólica tem sido sugerida em diversas ocasiões para o acionamento de dínamos, para adaptações nos moinhos de ventos, mas este uso não foi de grande utilidade, pois havia sido um problema carregado de grandes dificuldades. Na avenida Euclid da cidade de Cleveland, onde se encontra a magnífica residência de Mr. Brush, trás um pouco mais abaixo onde e, pode ver no parque, montado sobre uma alta torre, a imensa roda que movimenta a planta elétrica. A torre tem forma retangular com 18,32 metros de altura. Está montada sobre um parafuso de 0,355 metro de diâmetro e que se envolve com 2,44 metros de concreto sólido ao nível do solo. O parafuso se projeta 3,66 metros sobre o solo que se encaixa na estrutura de ferro da torre, o peso da torre possui 352.000 Newton, sendo suportado por um degrau que descansa na parte superior do parafuso. O degrau é segurado por uma cruzeta firmada na parte inferior da estrutura da torre. O dínamo, que é um desenho próprio do Mr. Brush está montado em suporte que desliza verticalmente e está parcialmente equilibrado com uma alavanca pesada. O eixo secundário está suspenso do eixo principal por uma correia principal, e o dínamo também está suspenso do eixo principal pelas correias motrizes. Desta forma as tensões adequadas das correias estão sempre asseguradas, sendo a carga total as correias do dínamo de 5280 Newton, e sobre a correia principal de 18480 Newton. Os extremos do eixo secundário estão suportados por mancais em caixas distribuídas e conectadas por alavancas niveladoras que conseguem que os extremos dos eixos se movem por vez. As polias estão proporcionadas de tal forma que o dínamo realiza cinquenta revoluções por uma volta. A velocidade do dínamo a plena carga é de 500 revoluções por minuto, e a capacidade normal à plena carga é de 12000 Watts, WINDPOWER (2001).

Poul La Cour que teve uma formação como meteorólogo, foi o pioneiro das turbinas eólicas geradoras de eletricidade, WINDPOWER (2001).

Poul la Cour foi um dos pioneiros da moderna aerodinâmica, e construiu seu próprio túnel de vento para realizar experimentos. La Cour se preocupava com o armazenamento de energia e utilizava a eletricidade de suas turbinas eólicas para produzir eletrólises e obter assim hidrogênio para as lâmpadas de gás de sua escola.

Vindeby – O primeiro parque eólico marinho do mundo se encontra ao norte da ilha de

Lolland, na parte sul da Dinamarca. O parque eólico de Vindeby (32KW) na costa do mar báltico da Dinamarca foi construído em 1991 pela companhia de serviço público SEAS. O parque eólico consta de 11 aerogeradores Bônus de 450 KW com regulação por perda aerodinâmica e está situado entre 1,5 e 3 Km ao norte da costa da ilha de Lolland, perto da população de Vindeby. As turbinas foram modificadas para permitir acomodar grandes transformadores de alta tensão no interior das torres das turbinas, e as portas de entradas estão situadas a um nível mais elevado do normal, WINDPOWER (2001).

Tuno Knob – O segundo parque maior do mundo está situado entre a península de Jutlandia e a pequena ilha de Tuno na Dinamarca. O parque eólico marinho de Tuno Knob (36km) na costa danesa do mar de kattegat, foi construído em 1995 pela companhia de serviço público Midtkraft. Consta com 10 aerogeradores comportando 500KW com regulação por mudança de ângulo de passo. As turbinas foram adaptadas ao ambiente marinho. Equipando cada turbina com um guindaste elétrico que permite a substituição das partes principais, como geradores, sem necessidade de utilizar um guindaste flutuante. Os demais multiplicadores foram modificados para permitir uma velocidade de giro de 10% superior a da turbina de terra firme, WINDPOWER (2001).

O maior parque eólico da Dinamarca: Middelgrunden – Atualmente dispõe de uns 2000MW de potência, e de umas 6.000 turbinas em operação. Sendo 80 por cento das turbinas pertencentes a particulares ou a cooperativas locais de aerogeradores. O parque de Middelgrunden possui 20 aerogeradores valendo cada um 2MW de potência – concluindo uma potência total de 40MW, WINDPOWER (2001).

O maior parque eólico da Dinamarca fabricado em terra firme é o de Syltholm, na ilha de Lolland, constituída de 35 aerogeradores NEG Micon de 750KW – dando uma potência total de 26,25MW, WINDPOWER (2001).

O principal impasse da expansão na utilização de energia eólica na França tem sido o poder público que não deseja dividir com empresas privadas e pagar uma tarifa comparável ao custo de geração de energia elétrica. *Électricité de France* (EDF), controla toda demanda para o mercado. Depois de uma iminente falta de energia durante a década de 80, a França reiniciou um pequeno projeto de implantar a utilização de energia eólica durante o começo

dos anos 90. A mudança chegou a tempo, justamente quando a França enfrentava a constante pressão da Comunidade Européia para abrir o seu mercado de eletricidade para competição e o surgimento de novas questões relativas à dependência da energia nuclear. O programa desenvolvido pela *Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie* (ADEME), estava concentrada no uso de pequenas turbinas geradas a diesel que se localizavam no além mar da costa francesa, em áreas remotas no continente Francês, e duas usinas eólicas interligadas com as linhas de EDF, UNICAMP (2002).

Apenas 2,5 MW foram instalados até 1994, a maioria na primeira usina eólica francesa. Localizada em Port-la-Nouvelle no Sul da França a pequena usina de apenas 5 (cinco) turbinas rende 5,1 milhões de kWh de produção anual. Seguindo a instalação de uma turbina na costa de Dunkerque no começo de 1990, um segundo projeto seria completado em 1995 perto da fronteira com a Bélgica.

A energia eólica é muito difundida nos EUA, são recursos que se distribuem desde o nível menos classificado até a mais alta classificação. Como exemplo tem-se Dakota do Norte, que sozinha, possui a capacidade de produzir energia que conseguiria suprir 36% da eletricidade de 48 estados. Alguns projetos que estão em andamento nos EUA atingiram uma meta que é muito importante para o desenvolvimento futuro da utilização da energia eólica, conseguiu diminuir drasticamente o custo do kWh, que variam de 3,9 centavos (em algumas usinas nos Texas) a 5 (cinco) centavos ou mais (no Pacífico Noroeste). Estes custos são similares de muitas formas convencionais de geração de energia, e se espera que tais custos diminuam ainda mais em um intervalo de 10 anos.

Atualmente a energia eólica é responsável por apenas 1% de toda energia produzida no país. O Departamento de Energia espera um aumento de 600% na utilização de energia eólica nos próximos 15 anos. Espera-se que no meio do próximo século o vento possa ser responsável por 10% de toda energia norte-americana, o mesmo que a parcela produzida pela energia hidrelétrica, UNICAMP (2002).

Na edição especial da revista Motor 3 - "100 Anos do Automóvel" -, é mencionado que no ano de 1600, o Almirante holandês Maurício de Nassau - Tio do administrador,



homônimo, do território brasileiro dominado pela Holanda de 1.636 a 1644 -, durante a luta da independência da Holanda contra a Espanha, idealizou uma cachoeira terrestre dotada de rodas, sendo as traseiras providas de mecanismo estressante controlado por tirante, o veículo seria impulsionado por velas idênticas as das embarcações marítimas. A construção ficou a cargo do seu engenheiro Symon Stevin, tendo a mesma, sido construído com madeira e lona, conseguindo a façanha de, com vinte e oito homens a bordo e favorecida pelos ventos fortes e constantes da costa holandesa, cobrir os 80 Km que separam Le Havre de Petten, em exatamente duas horas, surpreendendo os espanhóis num ataque surpresa.

Este veículo batizado por seu construtor de "zeylwagen", ou carro à vela, aparece como o primeiro a não depender da propulsão muscular.

Nos anos 70/80 surgiram, inicialmente no Estados Unidos, pequenos veículos de lazer com três rodas e propulsão similar ao carro de Nassau, que logo se tornaram muito comuns, tendo se popularizado também nas principais praias brasileiras, eram os chamados windcar, AONDEVAMOS (2002).

A Companhia Energética do Ceará - COELCE inaugurou, em novembro de 1996, o parque anemométrico de Mucuripe. Esse parque eólico está instalado na Praia Mansa do Porto do Mucuripe, Município de Fortaleza do Estado do Ceará, e tem uma potência nominal de 1200 quilowatts, capaz de produzir cerca de 3,8 milhões de quilowatts-hora por ano, energia elétrica suficiente para abastecer uma cidade de 15.000 habitantes com 3.000 residências de porte médio.

O projeto recebeu recursos subsidiados do Governo da Alemanha, através do "Programa Eldorado". A implantação foi viabilizada por um convênio de cooperação firmado entre a COELCE, a Companhia Hidroelétrica do São Francisco - CHESF e a Companhia Docas do Ceará - CDC, com a interveniência das Secretarias Estaduais dos Transportes, Energia, Comunicação e Obras - SETECO e de Ciência e Tecnologia – SECITECE, tendo como objetivo geral desse projeto a demonstração da viabilidade técnica e econômica da produção de eletricidade em escala comercial, através da energia eólica, no litoral do Ceará.

A energia do vento (eólica) pode garantir 10 por cento das necessidades mundiais de eletricidade até o ano 2020, criar 1,7 milhão de novos empregos e reduzir a emissão global de dióxido de carbono na atmosfera em mais de 10 bilhões de toneladas. Estes são os principais dados de um novo relatório internacional elaborado pelo Greenpeace, pela Associação Européia de Energia Eólica (EWEA) e pelo Fórum pela Energia e Desenvolvimento, lançado em Bruxelas (Bélgica) durante um seminário sobre fontes de energias renováveis.

"A assinatura do Protocolo de Kyoto sinalizou para a indústria de energia o início do fim do uso de combustíveis fósseis", diz Corin Millais, da Campanha de Energia Renovável do Greenpeace. "Os governos devem agora agir para estabelecer um marco legal que inclua prazos para implantação de fontes energéticas renováveis. Não há desculpa para a passividade porque a energia eólica tem todas as condições de substituir de forma lucrativa as fontes tradicionais de energia", UNICAMP (2002).

A energia eólica no Brasil não contribui, ainda, com parcela considerável da geração de energia elétrica. No entanto, com a crise energética que afeta o país, o governo tem procurado formas de geração de energia que solucionem o mais rápido possível o problema da falta de energia, e uma dessas formas é a eólica. A utilização da energia eólica no Brasil teve início em 1992 com a instalação de uma turbina de 75kW em Fernando de Noronha, em um projeto do CBEE (Centro Brasileiro de Energia Eólica).

Há hoje no Brasil diversos institutos e centros de pesquisa voltados para o desenvolvimento da exploração das fontes de energia renováveis. Esses centros vêm desenvolvendo diversos projetos na área de energia eólica, muitas vezes em parceria com concessionárias de energia, com a Eletrobrás e com Universidades. Devido a grande extensão territorial que possui, o Brasil apresenta diversas regiões propícias para a implantação de usinas eólicas.

Diversos estudos foram realizados no país para a medição das características dos ventos em todas as regiões, para que se possa realizar a análise da viabilidade da instalação de usinas eólicas. Em geral, necessita-se de ventos com velocidade média superior a 5,5 metros por segundo. Observa-se que o interior do País tem menos vento que o litoral. Aglomerações

urbanas, florestas e áreas muitas acidentadas também não costumam oferecer bom potencial eólico.

No mês de julho/2001, o governo aprovou o Proeólica (Programa Emergencial de Energia Eólica) com o objetivo de aumentar a capacidade de geração para 1050 MW, através da garantia de compra da energia eólica produzida por parte da empresa estatal Eletrobrás, e suas subsidiárias, durante 15 anos, a um preço mínimo de US\$ 60,00 o megawatt. Além disso, o programa tende a favorecer os projetos que começarem a operar rapidamente. Este programa tende a criar um atrativo mercado para empresas nacionais e estrangeiras.

Os CIRCULADORES DE AR são aparelhos que não trocam o ar ambiente, nem refrigeram, apenas distribuem o ar de forma a trazer conforto ambiental. A troca de calor é proporcional à velocidade ao quadrado. A velocidade ( $v$ ) ideal do ar sobre um indivíduo segundo as normas da ABNT, para ambientes normais é de 3,0m/s (máximo) e 0,03m/s (mínimo). Um circulador joga o ar para frente até uma distância de 8 metros, a partir dessa distância o ar é pouco sentido em suas posições de velocidade máxima, ventilam uma área de 50m<sup>2</sup>. Por serem oscilante praticamente toda área é varrida pelo vento. Daí o nosso interesse em apresentar uma alternativa para a utilização da energia eólica em circuladores de ar. O qual será de muita utilidade na pesquisa e implementações de projetos como veremos em nosso estudo.

## **2.2 Mecânica do Vento**

### **2.2.1 Gradientes de Pressão**

A principal causa da movimentação do ar é o gradiente de pressão horizontal. Este fato pode ser ilustrado como segue, ROTHATGI & NELSON (1994):

Considere um volume com seção transversal unitária e comprimento  $\Delta x$  (Fig. 2.1). Sendo  $P$  a pressão em um extremo e  $P + \Delta P$  a pressão na outra extremidade, a diferença de pressão  $\Delta P$  atua movendo o ar da extremidade de alta para a de baixa pressão.

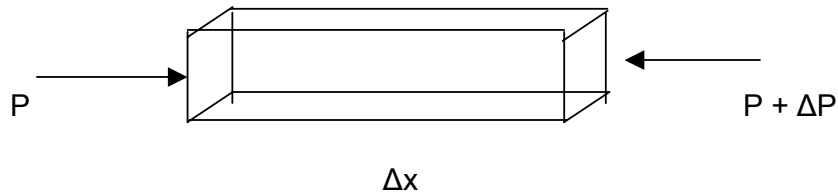


Figura 2.1 - Gradiente de pressão horizontal, ROTHATGI & NELSON (1994)

Sendo  $\rho$  a densidade do ar (em unidade de massa por unidade de volume) e integrando-o ao longo de  $\Delta x$ , obter-se-á o fluxo (por unidade de área), e a força resultante por unidade de massa será:

$$F_x = - \left[ \frac{1}{\rho} \right] \left[ \frac{\Delta P_x}{\Delta x} \right] \quad (2.1)$$

Da mesma forma o gradiente de pressão na direção vertical é:

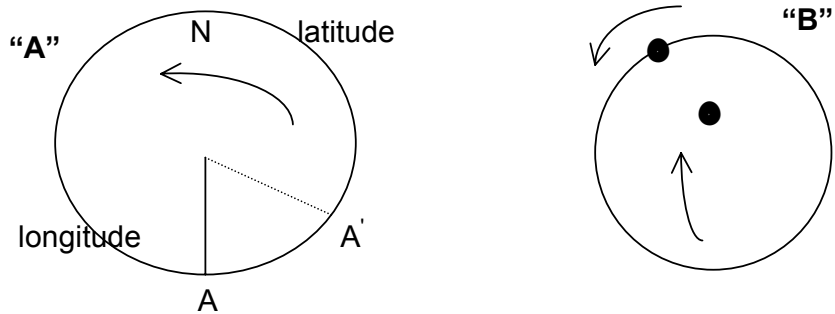
$$\Delta P_z = -\{\rho \cdot g\} \Delta z \quad (2.2)$$

A pressão é determinada, portanto, pelo peso do ar acima do ponto de interesse, e varia com a altura ( $\Delta z$ ) proporcionalmente ao peso da coluna de ar ( $\rho \cdot g$ ) com seção transversal unitária.

É certo, porém, que a força devida ao gradiente de pressão vertical geralmente é compensada pela gravidade, excetuando-se quando influenciada pela topografia ROTHATGI & NELSON (1994).

### 2.2.2 Força de Coriolis

Esta força é devido à rotação da terra, ROTHATGI & NELSON (1994); Fig. 2.2 (A e B)



Figuras 2.2 (A e B) - Força de Coriolis atuando devido à rotação da Terra, ROTHATGI & NELSON (1994).

A força de Coriolis é definida na seguinte expressão:

$$C = 2 \cdot \Omega \cdot V \cdot \sin \Phi \quad (2.3)$$

Onde  $\Omega$  é a velocidade angular (que para Terra é de  $7,29 \times 10^{-5}$  rad/s),  $V$  é a velocidade da partícula e  $(\Phi)$  é a latitude.

Considere nas Figuras 2.2 (A e B) N sendo o pólo Norte. A princípio, uma partícula iniciando o movimento em N, o tempo ( $t=0$ ) e movendo-se na direção NA alcançaria num determinado tempo  $t$  o ponto A. Porém, para um observador situado na terra, a partícula no tempo  $t$  está agora em A'. Ou seja, devido à rotação da Terra a partícula foi desviada de uma distância AA'.

Sendo assim no hemisfério Norte o vento inicialmente direcionado ao longo de uma determinada longitude vira para a direita de sua direção inicial, ou seja, se segue para o Norte ele vira para o Leste (vento oeste), se segue para o Sul ele vira para o Oeste (vento leste). Se o movimento é iniciado no hemisfério Sul, o contrário é o verdadeiro.

Logo, as diferenças de pressão na superfície onde o gradiente de pressão - devido à diferença de massa nas camadas de ar por cima dela - causam o movimento do ar (vento) das altas para as baixas pressões, num esforço para conseguir um equilíbrio. Sendo assim como vimos para um observador na Terra, no Hemisfério Norte, o vento parece desviar-se para a direita do seu caminho (e, no Hemisfério Sul, para a esquerda). Este efeito aumenta com a velocidade do vento e com a latitude, sendo nulo no equador, e deve-se à rotação da Terra. Para um observador na Terra, o vento parece ser desviado por uma força – **força de Coriolis**. A força de Coriolis tem uma influência importante no sistema global de circulação atmosférica.

### **2.3 Vento Geostrófico**

No equador, onde tem-se o ângulo ( $\Phi=0$ ). A força de Coriolis é igual à zero, e algum gradiente de pressão fará com que as massas de ar movam-se para as regiões de menor pressão, sendo que nenhuma força será contra ao movimento com exceção da fricção com a superfície da Terra.

No final o fluxo reduzirá o gradiente de pressão à zero. Daí que não pode haver regiões de alta ou baixa pressão próximas ao equador, ROTHATGI & NELSON (1994).

Fora da região equatorial, a massa de ar move-se em caminhos curvos como se vê na Figura 2.3, ROTHATGI & NELSON (1994).

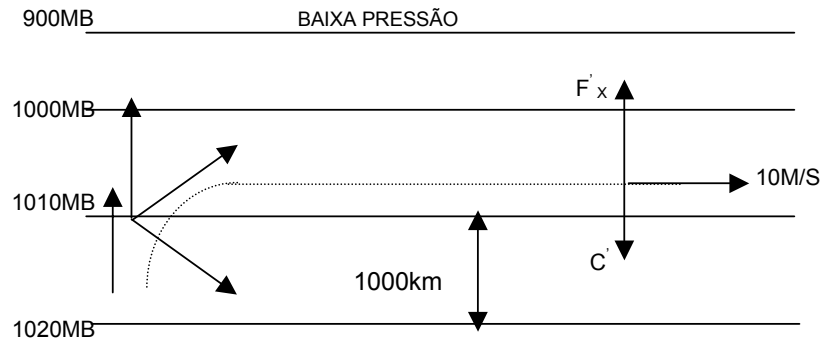


Figura 2.3 - Movimento de uma partícula que se desloca em uma região de gradiente de pressão horizontal, ROTHATGI & NELSON (1994).

Um fluxo de ar inicialmente começa a se mover perpendicularmente às linhas isobáricas (linhas com pressão constante) quando forçadas (impulsionadas) pela força de gradiente de pressão (diferença de pressão / distância). A partir do momento que a massa de ar acelera, a força de Coriolis age perpendicularmente à direção do movimento fazendo com que esta sofra um desvio para a direita (no Hemisfério Norte). Devido a esta mudança e a ausência de outras forças (como o atrito na superfície) nestas condições somente uma parte da força devida ao gradiente de pressão atua na direção do movimento para aumentar a velocidade. Pouco a pouco, a direção muda e, assim sendo, a massa de ar acelerará até uma determinada velocidade quando o movimento estará direcionado paralelamente às linhas isobáricas, e a força de Coriolis balanceará a força devida ao gradiente de pressão horizontal, onde ambas ficarão com sentido opostos sendo de um valor igual a ela. O fluxo de ar resultante é o chamado vento geostrófico, que é paralelo às linhas isóbaras e tem sempre as baixas pressões à sua esquerda (no Hemisfério Norte), causando assim um movimento uniforme. Esta velocidade pode ser calculada pela seguinte expressão: ROTHATGI & NELSON (1994).

$$2 \cdot \Omega \cdot V \cdot \sin \Phi = \left[ \frac{1}{\rho} \right] \left[ \frac{\Delta P_x}{\Delta x} \right] \quad (2.4)$$

Ao valor da velocidade  $v$  que satisfaz esta equação dá-se o nome de vento geostrófico, ROTHATGI & NELSON (1994).

Esta equação mostra que em uma determinada latitude, ao utilizar um valor médio para a pressão, há um único valor para a velocidade que satisfaz o balanço entre uma força de gradiente de pressão e a força de Coriolis resultante.

Mas o vento geostrófico não é uma boa aproximação da velocidade real se observado nas baixas e turbulentas camadas da atmosfera e nos trópicos. Uma melhor aproximação é observada na atmosfera livre em sistemas de clima estacionário.

## 2.4 Gradiente de Vento

Este fenômeno ocorre quando o ar movimenta-se em caminhos curvos, paralelamente a linhas isobáricas, sofrendo além do efeito do balanceamento entre a força de Coriolis e a força devida ao gradiente de pressão – similar ao que ocorre ao vento geostrófico uma força centrífuga por unidade de massa  $V^2/r$ , onde  $r$  é o raio para simplificar considerar-se-á um círculo fechado, ROTHATGI & NELSON (1994); Figuras 2.4 e 2.5.

Ao redor do centro de baixa pressão (Figura 2.4) a força de gradiente de pressão em uma partícula atua para dentro - em direção ao centro - e a força de Coriolis atua em direção oposta. Naturalmente a força centrífuga atua para fora, assim tem-se: ROTHATGI & NELSON (1994).

$$\left[ \frac{1}{\rho} \right] \left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right] = 2 \cdot \Omega \cdot v \cdot \sin \Phi + \frac{v^2}{r} \quad (2.5)$$

Esta expressão é chamada equação do gradiente de vento, ROTHATGI & NELSON (1994).



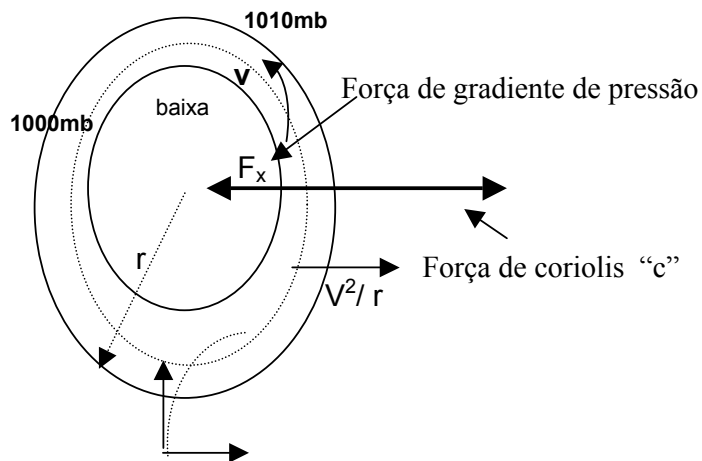


Figura 2.4 - Movimento Ciclônico no Hemisfério Norte, ROTHATGI & NELSON (1994).

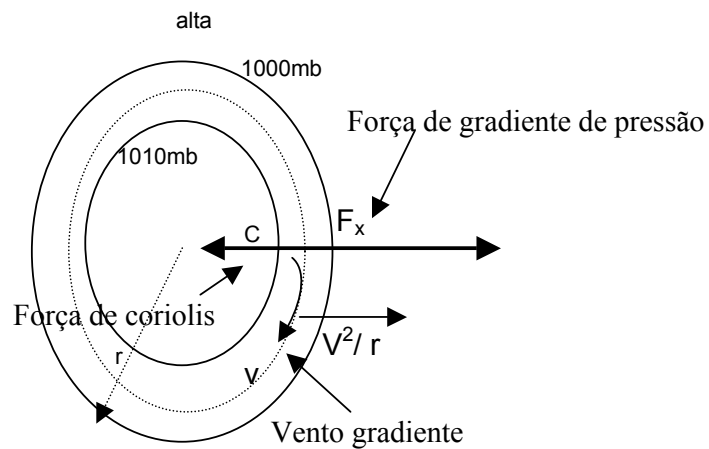


Figura 2.5 - Movimento Anticiclônico no Hemisfério Norte, ROTHATGI & NELSON (1994).

Considerando o fluxo ao redor de um centro de alta pressão, Figura 2.5, o balanço das forças inverte-se já que a força devida ao gradiente de pressão direciona-se para fora e a força de Coriolis, para dentro. Tem-se então:

$$2 \cdot \Omega \cdot v \cdot \sin \Phi = \left[ \frac{1}{\rho} \right] \cdot \left[ \frac{\Delta P}{\Delta x} \right] + \frac{v^2}{r} \quad (2.6)$$

As equações 2.5 e 2.6 produzem movimentos ciclônico e anticiclônico. Este tipo de movimento pode ser esperado em regiões de baixa latitude, onde a força de Coriolis é pequena. Furacões, tornados e similares devem-se a este tipo de movimento.

### 2.5 A Fricção da Superfície Terrestre

A superfície terrestre exerce uma força contrária ao movimento do fluxo de ar tendendo a retardá-lo. Esta força diminui com a altura considerada para o fluxo. Ou seja, quanto mais distante da superfície, menor a ação da fricção, tornando-se insignificante na fronteira da atmosfera, WINDPOWER (2001).

### 2.6 O Vento a Superfície

O efeito da fricção na superfície faz-se sentir apenas na camada mais baixa da atmosfera, até cerca de 1km de altitude – a chamada camada de fricção. A fricção diminui a velocidade do vento e, conseqüentemente, a força de Coriolis diminui também. (Os ventos geostrófico têm uma velocidade cerca de 50% maior que os ventos de superfície, por estarem livres dos efeitos de fricção). O equilíbrio geostrófico é substituído pelo equilíbrio de três (3) forças vetoriais: a força de Coriolis, a força de gradiente de pressão e a força de fricção na superfície, que no sentido diretamente oposto ao vento (as fricções entre o ar e a superfície tendem a atrasar o fluxo e desviá-lo no sentido das baixas pressões). Devido ao efeito de fricção, os ventos (chamados barostrófico, por causa da pressão atmosférica) não soprarão por isso paralelos às isóbaras, mas sim ligeiramente inclinados, na direção das baixas pressões. A inclinação média devida ao efeito da fricção é cerca de 10° sobre o mar, 45° sobre a Terra e 70° em montanhas.

## **2.7 Classificação da Circulação do ar**

O movimento do ar pode ser levado em consideração dependendo da amplitude geográfica tomada como referência. Assim, tem-se vento de larga escala (circulação geral), que englobam toda a atmosfera terrestre; vento de média escala, cujas causas e efeitos se limitam a uma determinada região (como os ventos monçônicos e furacões) e a circulação terciária ou ventos locais.

### **2.7.1 Circulação Geral**

Já foi exposto que a radiação solar é a principal causa do movimento do ar. Isto se deve a um aquecimento desigual da atmosfera terrestre pelo Sol durante todo o ano. Como o eixo de rotação da Terra está inclinado em aproximadamente  $23^{\circ}30'$  em relação ao plano de translação (órbita ao redor do Sol) a média da intensidade anual de irradiação solar é maior na região equatorial que nas regiões polares.

A priori, pode-se dizer que o ar mais frio dos pólos – região de alta pressão – movimenta-se para a região equatorial, aquecida e, portanto de baixa pressão. A inclinação faz com que haja variações sazonais no calor recebido do Sol em cada região, havendo, portanto diferenças na característica dos ventos de cada época do ano.

Sendo mais específico, pode-se dividir cada hemisfério em três células individuais: tropical, temperada e polar, sendo que na região equatorial (que divide os dois hemisférios), há um cinturão contínuo de baixa pressão que origina uma região de calmarias.

Nas células tropicais são produzidos ventos alísios nordeste e sudeste. nos hemisférios norte e sul, respectivamente. Nas regiões compreendidas pelas células temperadas a direção inverte-se, sendo produzidos ventos sudoeste e noroeste nos hemisférios norte e sul, respectivamente. São chamados ventos ocidentais. Estes são separados por uma região de alta pressão. Nas células polares tem-se o vento polar oriental ROTHATGI & NELSON (1994); Figura 2.6.

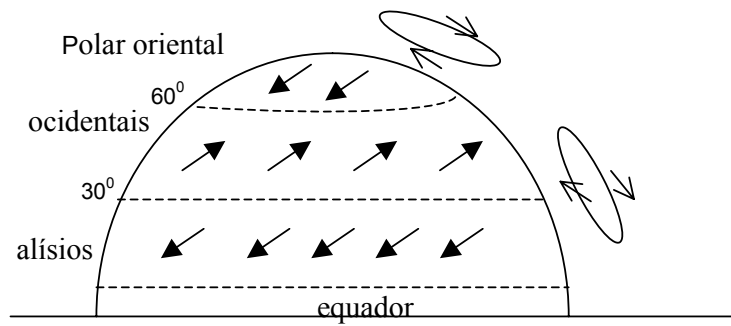
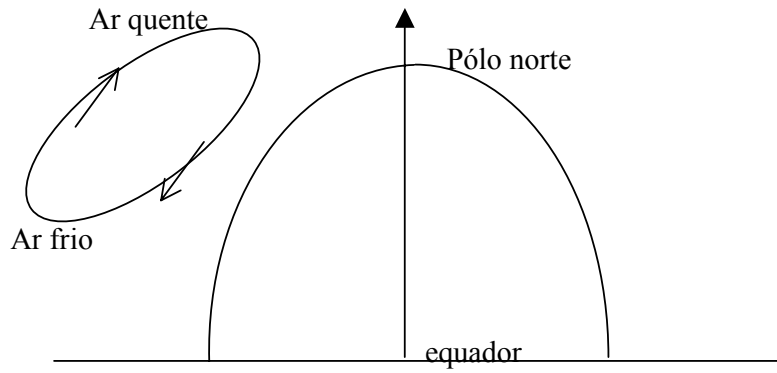


Figura 2.6 - Acima o modelo simplificado da circulação atmosférica. Abaixo: Modelo da circulação geral tricelular, ROTHATGI & NELSON (1994).

## **2.7.2 Circulação Secundária**

Este tipo de circulação do ar acontece se os centros de alta ou baixa pressão são causados pelo aquecimento ou esfriamento da baixa atmosfera. Incluem furacões, ventos monçônicos e ciclone extratropicais.

### **2.7.2.1 Furacões**

Furacões são definidos como ciclones tropicais com velocidades de vento de superfície maiores que 80 m/s. Ocorrem mais freqüentemente durante o fim do verão e início do outono (agosto - setembro no hemisfério norte e fevereiro - março no hemisfério sul). Ocorrem devido ao calor latente liberado pela condensação do vapor d'água. Seu diâmetro está em torno de vários milhares de quilômetros, e a altura da atmosfera envolvida é cerca de 10 quilômetros.

### **2.7.2.2 Circulações Monçônicas**

Sua origem deve-se a princípio por certa característica climática do continente asiático: no verão o continente é aquecido consideravelmente. Enquanto que no inverno é submetido a um forte esfriamento. No inverno o ar nas baixas camadas é mais pesado, criando uma zona de alta pressão que envolve toda a Ásia. No verão as massas terrestres são fortemente aquecidas criando uma zona de baixa pressão. Assim sendo, as circulações de monção, ou monçônicas, são geradas por esta diferença de pressão.

### **2.7.2.3 Ciclones Extratropicais**

Os ciclones extratropicais são produzidos pela ação mecânica de obstáculos montanhosos ou correntes atmosféricas de larga escala, ou pela interação de massas atmosféricas ao longo de um front. Front é como é chamada a zona de transição entre duas massas de ar com densidades diferentes.

Tecnicamente, massas de ar são grandes quantidades de ar, em torno de 1000 km<sup>2</sup>, que têm em toda extensão horizontal a mesma temperatura e umidade, sendo que variações verticais na umidade ou temperatura são as mesmas em toda sua extensão.

### 2.7.3 Circulação Terciária

São consideradas as circulações de ar de pequena escala, circulações locais caracterizadas por ventos locais. Considerar-se à somente as circulações entre mar e terra e entre vales e montanhas.

As altitudes baixas (até 100 metros de altitude) os ventos são extremamente influenciados pela superfície, sendo defletidos por obstáculos e zonas mais rugosas, e a sua direção resulta da soma dos efeitos globais e locais. No começo do dia, o aquecimento do sol faz com que o ar estagnado no fundo, mais denso e pesado, começa a fluir ao longo das encostas sob a forma de ventos de vales. Quando os ventos globais são fracos, os ventos locais podem dominar. É o caso das brisas marítimas.

Numa depressão ciclônica (no Hemisfério Norte), os ventos convergirão para o centro originando a ascensão de ar, a formação de nuvens, precipitação, etc. Num anticiclone, os ventos divergirão do centro. Para substituir esse ar, formar-se-á uma corrente descendente de ar no centro anticiclônico, originando céu claro e temperaturas mais quentes, à medida que o ar é adiabaticamente comprimido.

Note que, embora a força de Coriolis faça com que um objeto em movimento fique sujeito a uma força para a direita (esquerda) da sua trajetória no hemisfério Norte (Sul), isso não quer dizer que dela resulte necessariamente um movimento para a direita (esquerda). Ambas as direções de rotação estão presentes no Hemisfério Norte, dependendo do fluxo se da em torno de uma zona de altas pressões (em que a força de gradiente de pressão aponta radialmente para fora) ou em torno de uma zona de baixas pressões (em que a força de gradiente de pressão aponta radialmente para dentro). A rotação, se ocorrer, será o resultado da soma das forças atuantes. E, num fluxo geofísico, como o movimento na atmosfera e nos oceanos, há sempre outra força presente que é a geradora do movimento em si (no caso da atmosfera, normalmente, há por isso que considerar também a força do gradiente de pressão). Em torno de uma zona de baixas pressões, embora a força de Coriolis aponte para a direita, a força de gradiente de pressão é ligeiramente superior e é isso que cria a trajetória curva do fluido para a esquerda.

### **2.7.3.1 Brisas terra-mar e mar-terra**

São ventos causados pelas diferenças de pressão entre a porção de ar acima da terra e a porção de ar acima do mar em regiões costeiras. Isto acontece sempre que há um contraste térmico muito grande entre a terra e a porção de água adjacente. É importante notar que se há no local vento associado a circulações de larga escala os efeitos da brisa podem ser imperceptíveis.

Durante o dia, o ar sobre a terra aquece-se mais que o ar sobre a superfície do mar, já que o aquecimento do mar é mais lento e requer mais energia. Cria-se então uma zona de baixa pressão sobre a terra e de alta pressão sobre o mar, criando as brisas mar-terra. À noite ocorre o contrário, a terra mais rapidamente aquecida durante o dia perde energia mais rapidamente esfriando o ar sobre a mesma. O mar como perde energia mais lentamente faz com que a camada de ar sobre o mesmo permaneça mais aquecida, invertendo, como já foi dito, o fluxo ocorrido durante o dia. É interessante notar que devido a uma menor diferença de temperatura durante a noite as brisas terra-mar são de menor intensidade que as ocorridas durante o dia (mar-terra).

### **2.7.3.2 Ventos entre Vales e Montanhas**

Neste sistema o movimento do ar também é causado por diferença de pressão. Durante o dia o ar mais aquecido da encosta da montanha eleva-se e substitui o ar frio mais pesado que estava sobre a mesma (ventos vale-montanha) Durante a noite a direção se inverte. O ar frio desce as encostas e estagna-se no vale (ventos montanha-vale).

## **2.8 Medição da Velocidade do Vento: Anemômetro**

A medição da velocidade do vento se realiza normalmente usando um anemômetro de gazoleta. O anemômetro de gazoleta tem um eixo vertical e três gazoletas que capturam o vento. Os números de revoluções por minuto são registrados eletronicamente.

Normalmente o anemômetro está equipado por um cata-vento para detectar a direção do vento.

Em lugar de gazoletas o anemômetro pode estar equipado com hélices que não é comum.

Outros tipos de anemômetro incluem ultra-som, anemômetros equipados com laser que detectam a passagem do ruído e a luz coerente refletida pelas moléculas do ar. O anemômetro de fio eletrificado detecta a velocidade do vento mediante as pequenas diferenças de temperatura entre os cabos situados entre o vento e a sombra do vento (cara e sotavento).

A vantagem dos anemômetros não mecânicos é que são menos sensíveis às formações de gelo. Sem impedir a prática dos anemômetros de gazoletas que são amplamente utilizados, e modelos especiais com eixo e gazoletas eletricamente calibrados podem ser usados nas zonas árticas. Na figura 2.7 temos um modelo de anemômetro.

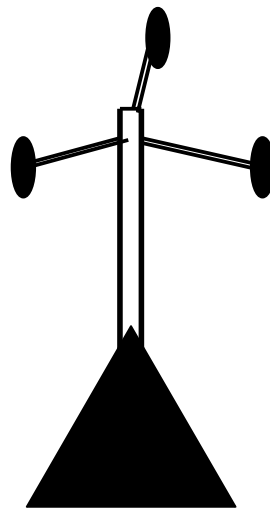


Figura 2.7 Anemômetro de gazoleta



## 2.9 Classificação das Turbinas Eólicas

Usualmente a literatura classifica as turbinas eólicas no que diz respeito a duas características: MACEDO (1989).

♣ Quanto á orientação do eixo de rotação => Se o plano de rotação está paralelo (eixo vertical) ou perpendicular ao solo (eixo horizontal).

♣ Quanto ao tipo de propulsão => Se a força predominante na movimentação do rotor é à força de sustentação L ou arrasto D.

Assim as turbinas eólicas Figuras 2.8 e 2.9 podem ser classificadas nos seguintes grupos:

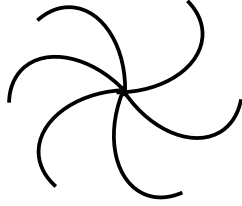
1. Turbinas eólicas de eixo horizontal com propulsão à sustentação, ou tipo sustentação (Exemplo: rotores bi-pás ou os multipás característicos de fazendas).

2. Turbinas eólicas de eixo vertical com propulsão a arrasto, ou tipo-arrasto. (Exemplo: Savonius).

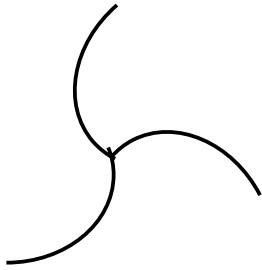
3. Turbinas eólicas de eixo vertical com propulsão à sustentação, ou tipo de sustentação. (Exemplo: Darrieus).

Há também as combinações entre tipo-arrasto e tipo-sustentação, onde, entretanto, o módulo tipo-arrasto apenas serve para "dar a partida" ao conjunto, que é caracterizado como sendo sustentação. Figuras em anexo

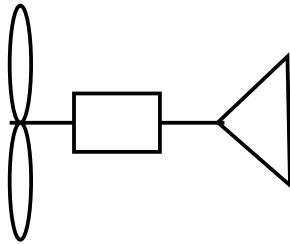
As Turbinas eólicas de eixo horizontal: podem ser de uma, duas, três, quatro pás ou multipás. A de uma pá requer um contrapeso para eliminar a vibração. As de duas pás são mais usadas por serem fortes, simples e mais baratas do que as de três pás. As de três pás, no entanto, distribui as tensões melhor quando a máquina gira durante as mudanças de direção do vento. As multipás não são muito usadas, pois são menos eficientes.



Eixo horizontal multipás velocidade lenta (tipo sustentação)



Eixo horizontal 3 pás velocidade rápida (tipo sustentação)



Eixo horizontal 2 pás velocidade rápida (tipo sustentação)

Figura 2.8 – Turbinas eólicas mais comuns, MACEDO (1989).

Turbinas eólicas do eixo vertical: não são muito usadas, pois o aproveitamento do vento é menor. As mais comuns são três: SAVONIUS, DARRIEUS E MOLINETE.

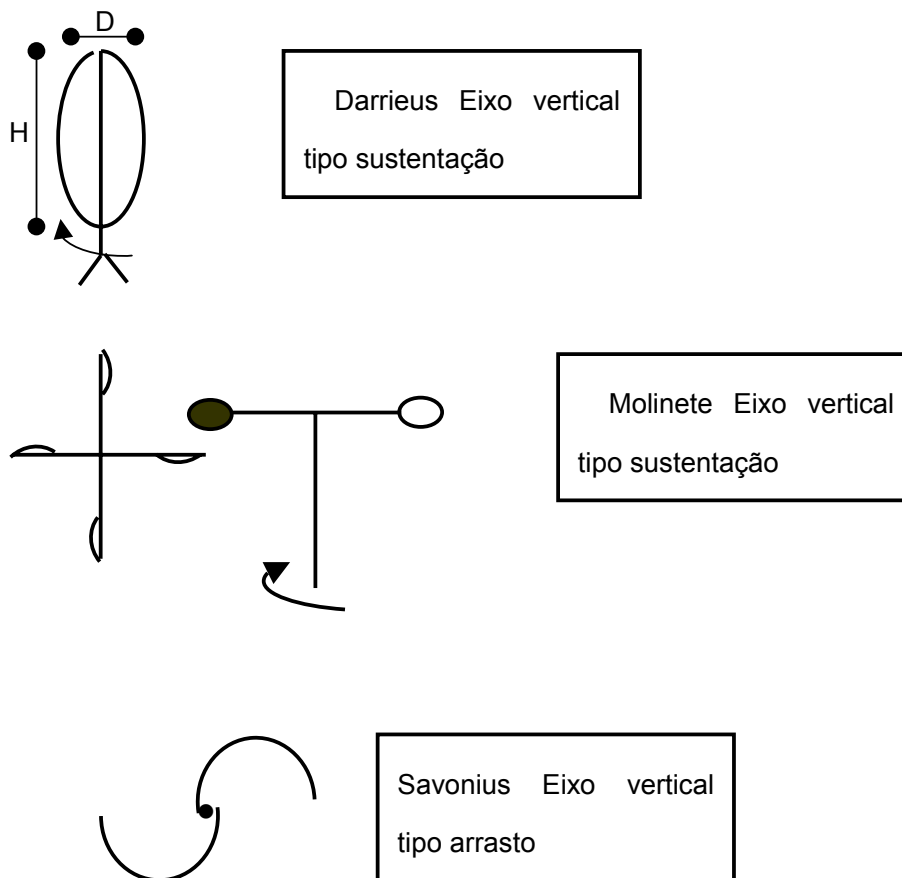


Figura 2.9 – Turbinas eólicas mais comuns, MACEDO (1989).

## 2.9.1 Rotor tipo Savonius

O rotor Savonius foi oficialmente inventado pelo finlandês *Sigurd J. Savonius*, em 1925, e iniciou-se sua comercialização em 1929 para bombeamento d'água NÓBREGA, (1989). O rotor Savonius é composto por módulos do mesmo feitio, ver Figura 2.10, ver anexo II, que basicamente é um cilindro cortado ao meio cujas partes foram rearranjadas para assumir a forma da Figura 2.9.

### 2.9.1.1 Principais Características

Por ser de eixo vertical não perde eficiência com uma mudança rápida de direção do vento. Porém, segundo PARK (1981) esta não é uma característica tão importante, já que os ventos que representam a principal porção de energia para o sistema não mudam de direção, e as rajadas freqüentemente são maiores que a velocidade nominal dos rotores, ou seja, não são aproveitadas.

Quanto à eficiência do rotor, PARK (1981) afirma não alcançar 25%. MOORE (1976 *apud* MACEDO (1989), observou que o máximo de potência extraída em um túnel de vento foi de 27%, atribuindo este resultado, porém, a erros de medição. MACEDO (1989), no NERG (Núcleo de energia Eólica) em Campina Grande-Pb, obteve no seu experimento um rendimento um pouco acima dos 14%, o que permite se estabelecer para efeito de comparação um rendimento em torno de 15%).

Tendo tão pouca eficiência, para o rotor Savonius é necessário que se aproveite ao máximo dentro das limitações. Entretanto uma das formas de se maximizar a potência extraída é, como será comentado na seção 3.1, aumentando a diferença entre os coeficientes de arrasto entre as pás que se movem contra o vento e a favor do vento, o que requer certa tecnologia pois dependerá da forma dada às pás.

Há, porém, uma maneira mais simples de se aumentar o rendimento do rotor: é diminuindo-se a força do vento na pá que se move contra o vento, ou seja, a pá com o lado convexo voltado para o mesmo. Isto pode ser conseguido construindo-se um obstáculo em frente a esta pá PARK (1981).

Outro detalhe importante é que, como todo corpo que experimenta diferença de fluxo de ar entre as suas faces, é submetido ao efeito Magnus, ou seja, alguma força de sustentação

– direcionada perpendicularmente à direção do vento – é gerada. E segundo PARK (1981), esta força de sustentação, por menor que seja, chega a ser duas ou três vezes maior que a força de arrasto aplicada na torre que sustenta o rotor. Não se levando em consideração este fator haverá provavelmente queda da estrutura, na primeira rajada acima do limite.

Outra desvantagem do Savonius é que este tipo de rotor é muito difícil de ser governado, ou seja, ter sua velocidade angular controlada para que não se ultrapasse os limites aceitáveis para a estrutura.

A principal vantagem do rotor Savonius é que este é caracterizado por ser um rotor com alto torque de partida que pode ser construído com técnicas simples aproveitando-se de materiais que podem ser facilmente encontrados como, por exemplo, folhas de compensado, chapas de ferro galvanizado MACEDO (1989) e, até mesmo, latões de óleo PARK (1981). O alto torque de partida favorece seu uso em bombeamento direto de água, ou em outras formas de conversão direta eólico-mecânica. Claro que também pode ser utilizado para geração de eletricidade para pequenas cargas, e são muitos os exemplos, mas não é o ideal devido aos baixos valores de razão de velocidades de ponta  $\lambda$ .

### **2.9.1.2 Aspectos do "design"**

Foram muitas as formas de "design" estudadas para que se alcance o máximo coeficiente de potência  $C_p$ , ou seja, o maior rendimento possível. Algumas destas podem ser visualizadas nas Figuras 9.4. Note que a maioria inclui um vazio denominado "gap", - como nos circuitos magnéticos - entre as pás, que permite que o ar passe por elas. Compare as Figuras 2.11 A, B e C.

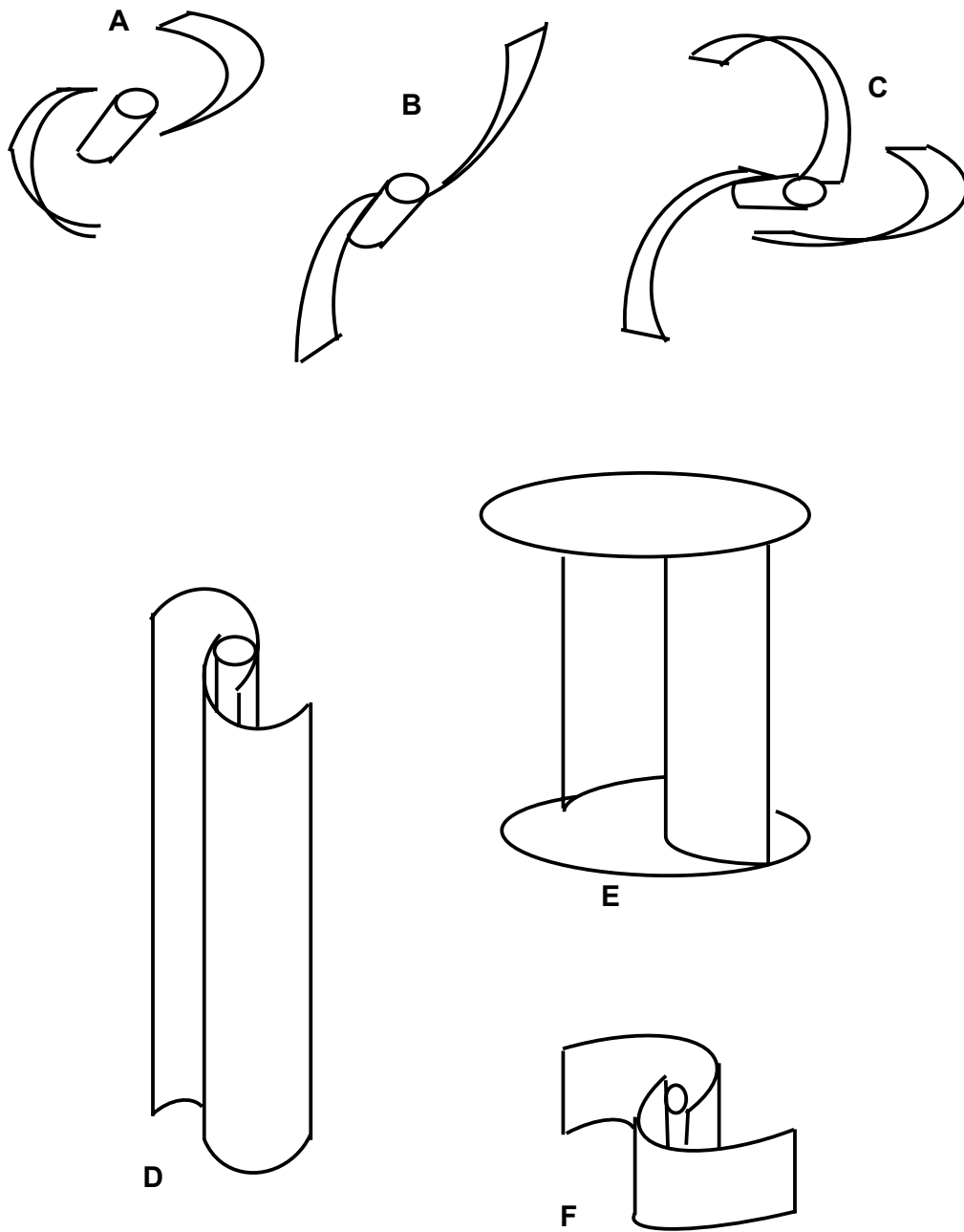


Figura 2.11 – Algumas opções de design para o rotor Savonius. PARK (1981).

Devido à disposição das pás, a primeira configuração permite que o ar flua através do “gap” e empurre a pá que está se movendo contra o vento, reduzindo a força de arrasto nesta pá e aumentando o torque. O mesmo não é permitido nas demais configurações. Quanto ao número de pás, um rotor com duas pás tem demonstrado um melhor desempenho PARK (1981).

Outro aspecto importante no design de rotores Savonius é que PARK (1981) denomina por razão de aspecto da pá. Esta é dada pela razão entre a altura e o diâmetro das pás  $h/2R$  (Figura 2.12A e B). Segundo este autor, para uma dada área frontal quanto maior este parâmetro, maior será a velocidade angular e menor será o torque desenvolvido.

Na verdade são muitas as divergências no que diz respeito à dimensão dos parâmetros de design das pás de um rotor Savonius que resultam numa melhor performance. MACEDO (1989). Também é interessante colocar um disco plano (uma “tampa”) no topo dos módulos. Segundo PARK (1981) isto vem melhorar um pouco mais o desempenho do rotor, principalmente na ocasião da partida.

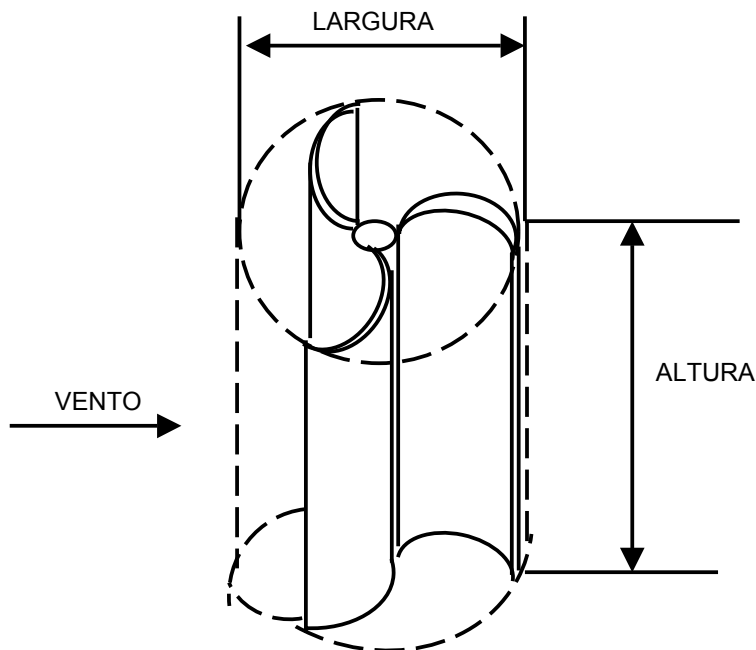


Figura 2.12 A – Área varrida e dimensões básicas de um rotor Savonius, PARK (1981)

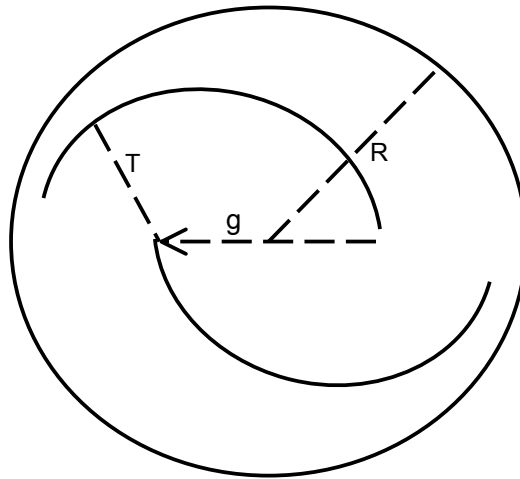


Figura 2.12 B – Área varrida e dimensões básicas de um rotor Savonius, PARK (1981)

A Figura 2.13 – traz as curvas de torque e potência (coeficientes) contra a razão de velocidades de ponta de dois rotores Savonius com design diferentes. Nota-se que um “gap” muito grande prejudica o desempenho. Veja também o alto torque de partida, que, é bom chamar a atenção, tem que ter, tanto quanto a potência requerida, um valor aproximado ao da carga.

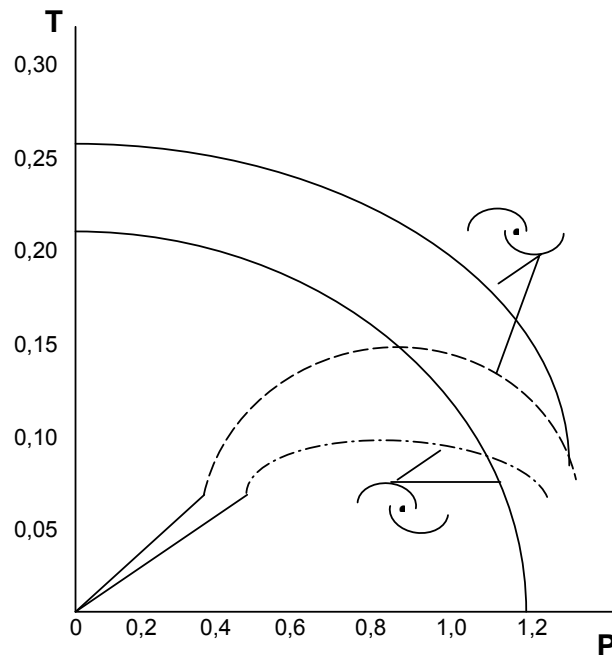


Figura 2.13 – Curvas de Torque e Potência para dois rotores Savonius diferentes, MACEDO (1989).



## 2.9.2 Rotor tipo Darrieus

Inventado em 1931 (Sistema Know How-MG) pelo engenheiro francês G. Darrieus, caracterizado por ser de eixo vertical com propulsão à sustentação, tem dois tipos básicos (PARK, 1981); o de "hélices planas" Figura 2.14 ver anexo III e o de "hélices tipo-curva Troposkein". Figura 2.15 ver anexo IV.

### 2.9.2.1 Características básicas e aspectos do design

Por ser um rotor de eixo vertical, a carga do gerador, por exemplo, pode ser colocada no chão, diminuindo o esforço para a manutenção. Ainda por ter eixo vertical, tem também a vantagem, como o Savonius, de não sofrer perda de eficiência com a mudança de direção do vento.

Por ser um rotor tipo-sustentação trabalha numa faixa bem maior de razões de velocidade de ponta  $\lambda$ , e geralmente o seu rendimento máximo pode ser alcançado com a razão de velocidades de ponta estando entre  $5 < \lambda_d < 6$  PARK (1981).

Ainda quanto ao rendimento máximo, segundo PARK (1981), alguns estudos teóricos indicam a possibilidade de rendimento por volta de 54%, não incluindo as perdas triviais no processo de transformação de energia até a utilização (transmissão, geradores, etc.).

A British Wind Energy Association (1982) cita conforme South & Rangi (1975) que construíram e testaram uma série de rotores eólicos Darrieus em túneis de vento obtendo rendimentos por volta de 30%. PARK (1981) cita que em testes cuidadosos pode se obter rendimentos que vão de 20% para hélices-troposkein a 50% para sofisticadas "pás-planas".

Outra característica muito importante é a facilidade com que o rotor Darrieus tem em entrar em "stall", ou seja, "morrer", parar quando sobrecarregado ou quando sofre uma maior velocidade do vento permanecendo constante sua carga. Há também o fato de que o rotor Darrieus não parte sozinho, necessitando de alguns artificios.

Outras características são PARK (1981):

Interessantes:

1. Facilidade de construção se não houver necessidade de uma alta performance. Uma

das referências aqui citadas é um manual tipo "faça você mesmo" que ensina a construir um Darrieus tipo-Troposkein (Sistema Know How - MG).

2. Utilização de pouco material para se conseguir uma eficiência relativamente alta.

Ruins:

3. Rotores Darrieus de alta performance necessitam de um complexo sistema de controle para prevenir o "stall" do rotor.

Quanto a diferenças entre os dois principais modelos de rotores Darrieus, tem-se que estruturalmente a tipo-troposkein é melhor que a de "pás-planas", British Energy Association (1982), porém tem uma grande desvantagem aerodinâmica que é ter uma geometria fixa, ou seja, não há possibilidade de mudança no ângulo de inclinação das pás em relação à direção do vento, não havendo, portanto, controle da velocidade. Já a tipo "pás-planas pode ser controlada".

### **2.9.2.1. Comportamento do rotor Darrieus**

Por ser um rotor tipo sustentação de eixo vertical, tendo, portanto o seu plano de rotação paralelo á direção do vento, o comportamento aerodinâmico de suas pás durante o movimento é um pouco diferente do comportamento das pás de um rotor tipo-sustentação de eixo horizontal.

Veja agora a Figura 2.16. Ela representa a composição de vetores num aerofólio da pá de uma turbina Darrieus, trabalhando numa baixa razão de velocidade de ponta  $\lambda$ , o que implica em um ângulo de ataque muito grande. É mostrada a diferença de tamanho entre o vetor da velocidade tangencial  $V_t$ , bem mais curto, e o vetor da velocidade original do vento  $V_0$  (Sistema Know How - MG).

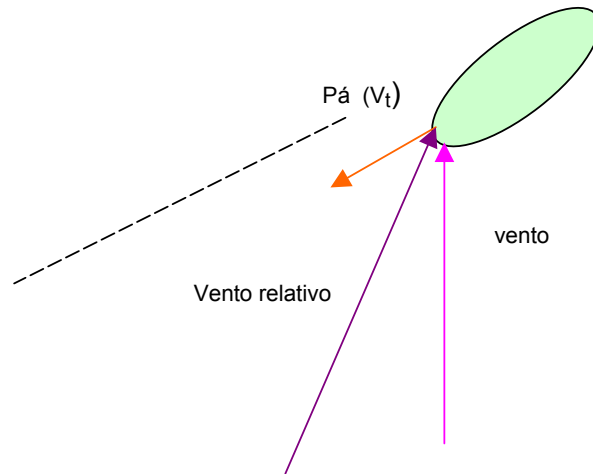


Figura 2.16 – Diagrama de vetores para um aerofólio em baixas razões de velocidade de ponta, (Sistema Know How - MG).

Baixas razões de velocidade podem ocorrer quando:

Há sobrecarga – O rotor girará mais lentamente que o ideal devido ao esforço acima do aceitável imposto pela carga.

Há rajadas de vento com a carga permanecendo constante – Neste caso a velocidade de rotação permanece constante, mas a razão de velocidade de ponta diminui devido ao aumento da velocidade do vento. Esta situação é mais traumática porque um aumento na velocidade do vento significa mais potência disponível, e justamente nessa hora o rotor pode parar (“stall”).

Na partida do rotor – rotor estando parado a velocidade angular é zero e razão de velocidade de ponta igual a zero.

Isto mostra que o rotor tipo Darrieus tem que ter algum mecanismo que o ajude tanto a partir quanto a vencer os momentos de "stall" iminente. A seguir são apresentados alguns dos mais comuns meios de "dar partida" nos rotores Darrieus PARK (1981).

Motores Elétricos – Motores elétricos de partida estão associados a sensores de velocidade do vento que, através de um circuito lógico comunicam o momento certo de energizar o motor.

Associação com o rotor Savonius, Figura 2.17 ver anexo V. O alto torque de partida do rotor Savonius o permite a ajudar o Darrieus a quando necessitar de Torque para não entrar no "stall". Note que o stall se dá quando em baixas razões de velocidade, justamente na faixa de trabalho do Savonius. Geralmente são utilizados dois módulos de Savonius defasados em  $90^\circ$ , para que enquanto um estiver com torque nulo, o outro esteja com torque máximo. Ressalte-se também que devido à faixa de relações de velocidades do Darrieus, o Savonius não contribuirá em nada na potência operacional.

Todos os métodos citados acima servem para as duas versões de Darrieus mais comum. Porém, devido à sua configuração geométrica o Darrieus tipo "pás-planas" permite um controle no ângulo de passo da pá, ou seja, na sua inclinação, sendo que desta maneira se possa sempre se achar uma posição ótima entre a linha de referência do aerofólio e direção do vento, procurando-se sempre posicionar a pá de uma forma onde o ângulo de ataque  $\alpha$  permita a sustentação  $L$  máxima. Este tipo de controle se denomina articulação de pás de passo variável, ou inclinação variável.

Imagine que haja uma sobre carga no momento em que a pá se posicione em **D**. Devido à queda na velocidade e de rotação ocasionada pela sobrecarga, a razão de velocidades de ponta atinge um determinado valor onde o "stall" é iminente, pois o ângulo de ataque será muito grande. Porém se for possível que a pá seja articulada por meio de braços acoplados a um determinado tipo de comando, e que posicionada de modo a diminuir o ângulo de ataque, o rotor não correrá perigo de "stall", PARK (1981).

### **2.9.3 Rotores Multipás de Eixo Horizontal**

São os rotores mais fáceis de ser encontrados, principalmente nas fazendas, para bombeamento de água. Os primeiros registros de uso deste tipo de rotor datam de meados de 1800 quando foram construídas as primeiras bombas de água, por Halliday, PARK (1981). Estes rotores usavam ripas planas de madeira como pás. Com o passar dos anos, a evolução nos estudos de aerodinâmica, estas pás de madeira plana foram sendo substituídas por chapas de metal curvadas que geram muito mais força de sustentação e, assim, mais eficiência na conversão de energia, Figura 2.18 ver anexo VI.

### 2.9.3.1 Características Básicas

A principal característica dos rotores multipás de eixo horizontal é o alto torque de partida. Por esta razão recomendada-se seu uso para operações que exigem um alto torque já no seu início, como bombeamento d'água.

Sabe-se, porém que um alto torque de partida está associado a baixas razões de velocidade de ponta  $\lambda$  e implica numa grande área de captação: pás largas e em grande número. Ou seja, uma alta solidez.

O resultado de uma alta solidez é que as pás ficam muito próximas uma da outra, fazendo com que parte do fluxo de ar que encontra uma determinada pá seja direcionada por esta para a pá adjacente este é o chamado efeito cascata.

Em baixas razões de velocidade de ponta o fluxo de ar está num ângulo quase que perfeito para cada pá gerar o máximo de sustentação. Em altas razões de velocidade, este ângulo se afasta muito do "ótimo", e a rotação tende a diminuir. Vê-se, portanto que o efeito cascata tende a limitar razão de velocidade de ponta  $\lambda_d$ , PARK (1981). Daí por que, mesmo sendo um rotor tipo-sustentação, não consegue desenvolver altas velocidades, como era de se esperar. É interessante notar que na hipótese de se deixar somente uma pá no rotor. o fluxo de vento determinará um ângulo de ataque tão alto em baixas razões de velocidades de ponta que o aerofólio entrará fatalmente em "stall".

Quanto à eficiência, a máxima que pode ser atingido é de 30 %, sendo encontradas, de uma maneira geral eficiências na faixa de 15% a 20%, MACEDO (1989).

Outras características básicas são PARK (1981):

Interessantes:

1. Design e construção simples – Note que o "multipás" por ser pouco sensível aos fatores de aerodinâmica não exige grande tecnologia na sua construção.

2. Requer sistemas de controle simples.

Ruins:

3. Seu uso em operações que implicam em altas velocidades de rotação (geração elétrica, por exemplo), não é aconselhável – mesmo que possível – pois exige um valor muito alto para a taxa de multiplicação de velocidades, o que implica em maiores cuidados.

4. Devido à grande área total, o rotor sofre uma força de arrasto muito grande que se refletirá na torre, exigindo, portanto, maiores cuidados para se evitar o tombamento.

### **2.9.3.2 Rotores de eixo horizontal de alta velocidade**

Indubitavelmente são as mais usadas na produção de energia principalmente elétricas. O fato de poder desenvolver altas velocidades de rotações para determinada velocidade do vento, ou seja, trabalhar em altas razões de velocidades, facilitam seu acoplamento a geradores elétricos que, como se sabe, trabalham com valores ainda mais altos de velocidade de rotação. Portanto, muito raramente e somente em situações muito especiais, como locais extremamente favoráveis, pode se dispensar um multiplicador de velocidades.

Máquinas menores operam numa faixa de razão de velocidades de ponta de 5 ( $\lambda_d = 5$ ), e sua eficiência chegam perto de 45%, sendo mais comum 40%. Já máquinas maiores, com maior atenção no design, trabalham numa faixa de 8 -10 de razões de velocidade de ponta, e podem alcançar até 50% de eficiência, sendo mais comum 45%, PARK (1981), onde cita como exemplo a turbina Hutter que, já contando as perdas na transmissão e na carga, chega a valores entre 40% e 50% de eficiência global para o sistema em razões de velocidade de ponta de 13 e 16.

Um aspecto importante a ser considerado no design das pás de um rotor de eixo horizontal é que a razão de velocidades ao longo da pá muda, aumentando à medida que se afasta do eixo de rotação. Este fato implica que a pá, ao longo do seu comprimento, "vê" de modo diferente o vento (o vento original  $V_0$ ), fazendo com que a sustentação não seja uniforme (alguns exemplos podem ser vistos nas Figuras 2.19, 2.20, 2.21 e 2.22 ver anexos VII, VIII, IX e X).

Outras características importantes são, PARK (1981):

Interessantes:

1. As pás mais delgadas e em menor número representam economia de material.

2. As cargas nas torres, ao contrário dos multipás, são bem menores, devido à área total reduzida.

3. Níveis maiores de potência são mais facilmente alcançados, pois há uma relativa facilidade de se construir rotores com diâmetros maiores, podendo chegar a mais de 50 m, para grandes máquinas.

Ruins:

4. Baixo torque de partida

5. Muito cuidado no design da pá, o que requer uma alta tecnologia.

6. Prováveis problemas de vibração.

### **2.9.3.3 Controles de orientação**

Há, porém um grande problema que é a perturbação causada pela torre de suporte. Esta turbulência no fluxo do ar logo em frente ao rotor causa sérias vibrações, PARK (1981) nas pás e, claro, problemas de fadiga. Sendo assim, a escolha entre configurações "a montante" ou a "jusante" da torre envolvem sérios estudos de engenharia. É claro que para pequenas máquinas sai mais barato o rotor a "montante" da torre, direcionando-o com pás de cauda PARK (1981). Na Figura 2.23 ver anexo XI mostra um rotor com pá de cauda.

### **2.9.3.4 Controles de sobre velocidades**

Já se sabe que a potência mecânica da pá é diretamente proporcional ao cubo da velocidade do vento. Isto quer dizer que acréscimos de 10 vezes à velocidade do vento, correspondem a um aumento de 1000 vezes na potência mecânica do rotor. O investimento na estrutura do rotor para que consiga absorver tanta potência com certeza inviabilizará o investimento. Por isto os rotores são dimensionados para permitirem no máximo uma determinada potência nominal de saída, a uma velocidade de vento também considerada nominal. Acima desta velocidade mecanismos de controle mantêm a potência de saída constante, para que a resistência da máquina não seja ultrapassada.

Há muitos tipos de controles sobre velocidades, alguns deles estão relacionados abaixo BRITISH WIND ENERGY ASSOCIATION (1982); NELSON et al, (1994); PARK (1981):

1) Permitindo que as pás do rotor se inclinem, formando um cone Figura 2.24 – Como foram comentados na seção anteriores, rotores à jusante da torre permitem este procedimento. A configuração de cone reduz a área frontal, diminuindo, portanto a captação de potência e , por conseguinte, a velocidade de rotação. Consegue-se isto permitindo que as pás girem livremente, ou mesmo presas a pequenas molas que as mantêm firmes durante a partida. As forças centrífugas as manterão na posição natural durante a operação normal, porém quando a velocidade do vento ultrapassa certos limites a força de arrasto faz com que as pás se inclinem, formando um cone.

2) Fazendo com que o rotor não enfrente mais o vento => isto pode ser feito girando o rotor para o lado ou inclinando-o para cima Figura 2.25, quando as forças de arrasto forem excessivas.

3) Controles aerodinâmicos – Pode-se reduzir a potência captada alterando o ângulo de inclinação da pá, de modo parecido com o que já fora explicado com o rotor Darrieus "pás planas", pois se sabe que alterando o ângulo de inclinação, alterar-se-á o ângulo de ataque no aerofólio, o que acarretará diminuição na sustentação.

### **2.9.3.5 Controles de Interrupção**

Sob determinadas velocidades fica perigoso até mesmo controlar a potência de saída da máquina, sendo necessário interromper seu funcionamento. Também há necessidade de que a máquina pare para manutenção, ou mesmo que seu funcionamento seja interrompido por condições anormais de funcionamento, ou em situações que tragam iminência de perigo para a máquina: pás desbalanceadas, pedras ou pássaros que ao colidir com o rotor gerem problemas de estrutura, curto-circuito no gerador ou qualquer outra situação que leve um sobre carregamento, permitindo com que o rotor, girando livremente, atinja velocidades perigosas. Situações como esta exigem interrupção imediata do funcionamento do sistema. Os controles de interrupção podem estar associados a alguns controles de velocidade. Porém há muitos outros que envolvem complexos sensores eletrônicos que possibilitam a detecção imediata do problema e a rápida interrupção do sistema BRITH WIND ENERGY ASSOCIATION (1982).



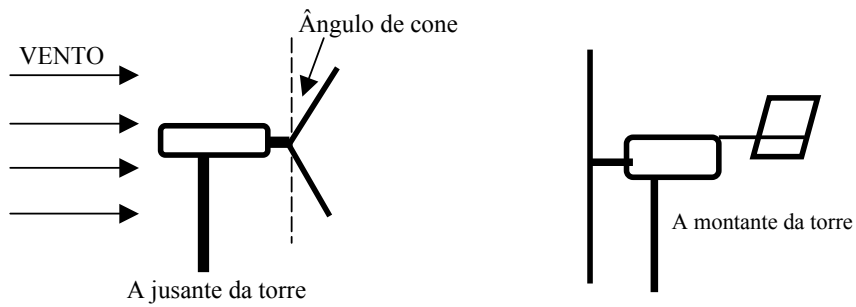


Figura 2.24 – Rotores a jusante e a montante da torre, BRITH WIND ENERGY ASSOCIATION (1982).

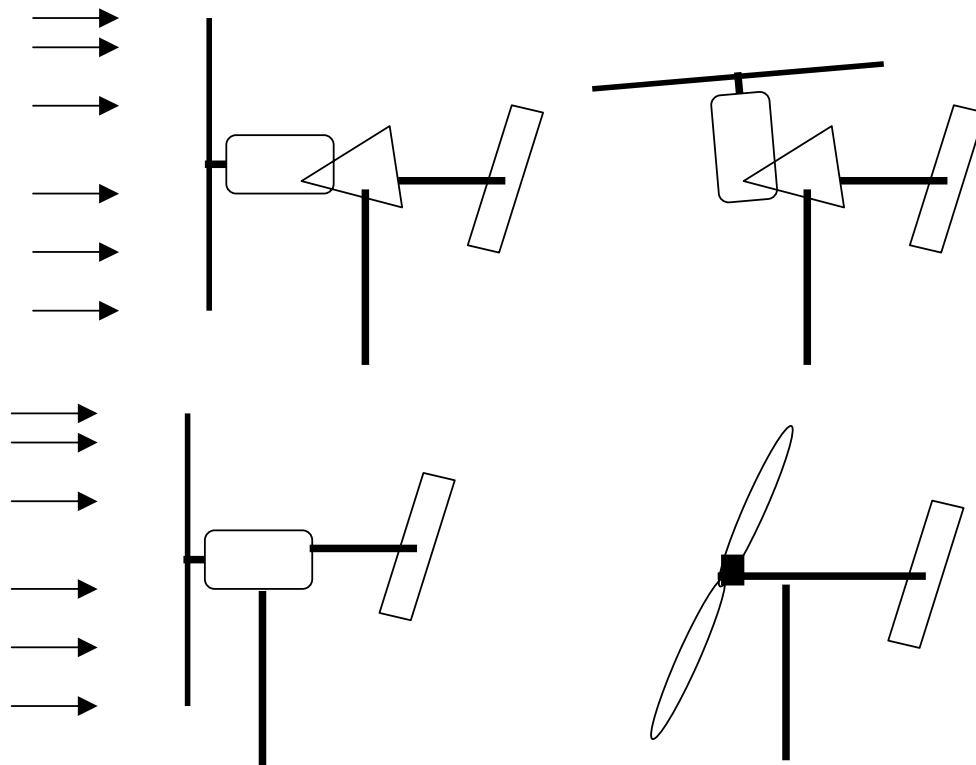


Figura 2.25 – Sistema de segurança. O rotor não enfrenta mais o vento, BRITH WIND ENERGY ASSOCIATION (1982).

## Capítulo 3

### Análise Experimental

#### 3.1 – Energia Eólica

##### 3.1.1 Energia Disponível

Considere uma massa de ar fluindo com uma velocidade  $v$ , através de um cilindro de seção transversal  $A$ , Figura 3.1.

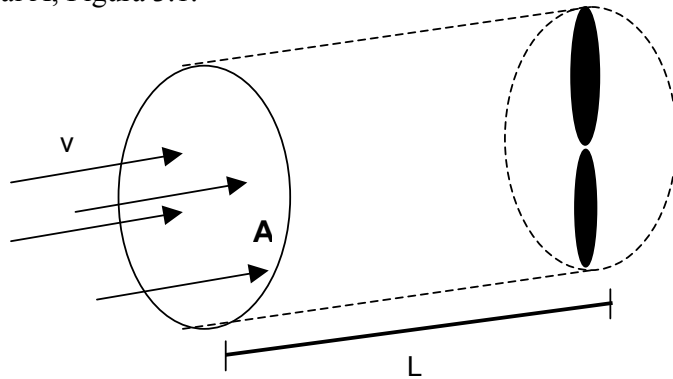


Figura 3.1 - Fluxo de ar atravessando um rotor eólico, LYSEN (1983).

A energia cinética  $E_{\text{cinética}}$  da massa de ar é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2 \quad (3.1)$$

A quantidade de massa de ar que ocupa o cilindro será:

$$m = \rho \cdot V \quad (3.2)$$

Onde  $\rho$  é a densidade do ar e  $V$  é o volume do cilindro, sendo  $V = A \times L$ . A taxa de fluxo da massa de ar fluindo pelo cilindro numa unidade de tempo, onde derivando os termos temos:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} (\rho \cdot A \cdot L) \quad (3.3)$$

Sendo  $\rho$  e  $A$  constantes ter-se-á apenas o comprimento  $L$  variando com o tempo; sendo  $dL/dt = V$ ; tem-se, então, a taxa de fluxo igual a:

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot A \cdot V \quad (3.4)$$

Considerando-se a taxa de fluxo da massa de ar na expressão 3.1 em vez da massa propriamente dita obtém-se a taxa de energia na unidade de tempo, que, como se sabe, nada mais é que potência. Assim:

$$P = \frac{1}{2} (\rho \cdot A \cdot v) v^2 \rightarrow P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (3.5)$$

Passando a área  $A$  para o primeiro membro na equação 3.5 tem-se a equação do potencial de energia eólica disponível:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho \cdot v^3 \quad (3.6)$$

No sistema internacional (SI) a potência  $P$  é dada em watt (W), a área  $A$  em metros quadrados ( $m^2$ ), a densidade  $\rho$  em quilogramas por metro cúbico ( $kg/m^3$ ), e a velocidade  $v$  em metros por segundo (m/s).

Na equação 3.6 percebe-se três fatos muito importantes, LYSÉN (1983):

- A potência eólica disponível é diretamente proporcional à densidade do ar. Assim, como a densidade do ar vai diminuindo com a altitude, em locais de grande altitude consegue-se extrair menos potência que ao nível do mar, para uma mesma velocidade.

- A potência eólica disponível será maior quanto maior for a área varrida pelas pás do rotor, sendo proporcional ao quadrado do diâmetro do rotor.

- A potência eólica disponível é diretamente proporcional ao cubo da velocidade do vento. Isto leva a tomar-se um grande cuidado na escolha do local para a instalação dos aerogeradores.

### 3.2 Potência Extraível e o Limite de Betz

Nem toda potência eólica disponível pode ser extraída pelo aerogerador. Isto se deve ao fato de que a energia extraída é fornecida pela diferença entre a energia cinética do vento à frente do rotor (para uma velocidade vento não perturbado) com velocidade  $V_1$ , e a energia cinética do vento atrás do rotor, já desacelerado  $V_2$ . PARK (1981); Figura 3.2. Ou seja:

$$E_{\text{extraída}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (3.7)$$

Se não há variação da energia cinética, o vento passa livremente ( $V_2=V_1$ ), ou se o aerogerador intercepta todo o vento ( $V_2=0$ ), nenhuma energia será extraída, pois nenhum ar fluiu através do rotor. Assim, a primeira impressão de que para  $V_2=0$  a energia extraída máxima, é falsa.

A taxa de fluxo da massa que passa pelo rotor é dada considerando-se a média aritmética entre as velocidades  $V_1$  e  $V_2$ . Assim tem-se:

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot A \cdot \left[ \frac{V_1 + V_2}{2} \right] \quad (3.8)$$

Substituindo a equação 3.8 pela massa  $m$  da equação 3.7, tem-se:

$$P_{\text{extraída}} = \frac{1}{2} \cdot \left[ \rho \cdot A \cdot \left( \frac{v_1 + v_2}{2} \right) \right] \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (3.9)$$

Betz descobriu que a máxima potência é extraída quando  $v_2 = v_1/3$  (Figura 3.3). Tem-se então que a máxima potência que pode ser extraída por um rotor é: JUSTUS (1978).

$$P_{\text{máx}} = \left( \frac{16}{27} \right) \cdot \frac{1}{2} (\rho \cdot A \cdot v^3) = \left( \frac{16}{27} \right) \cdot P \quad (3.10)$$

Em outras palavras, a eficiência máxima teórica possível de um aerogerador é de 16/27, ou de 59%. A este valor denomina-se Limite de Betz, JUSTUS (1978); et al.

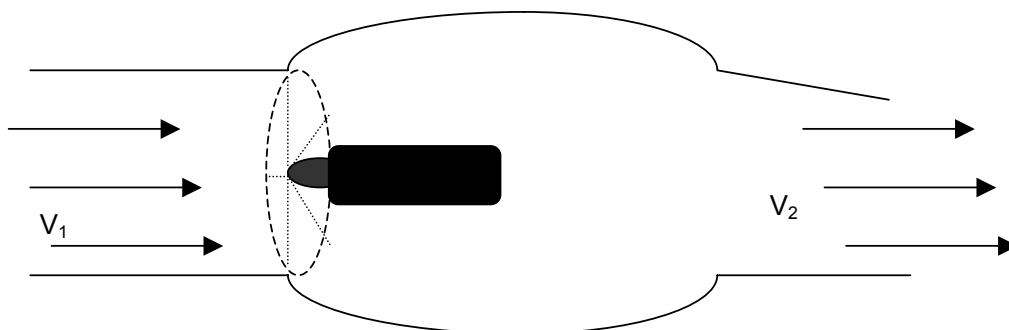


Figura 3.2 Desaceleração do fluxo de ar ao passar por um rotor eólico, JUSTUS (1978).

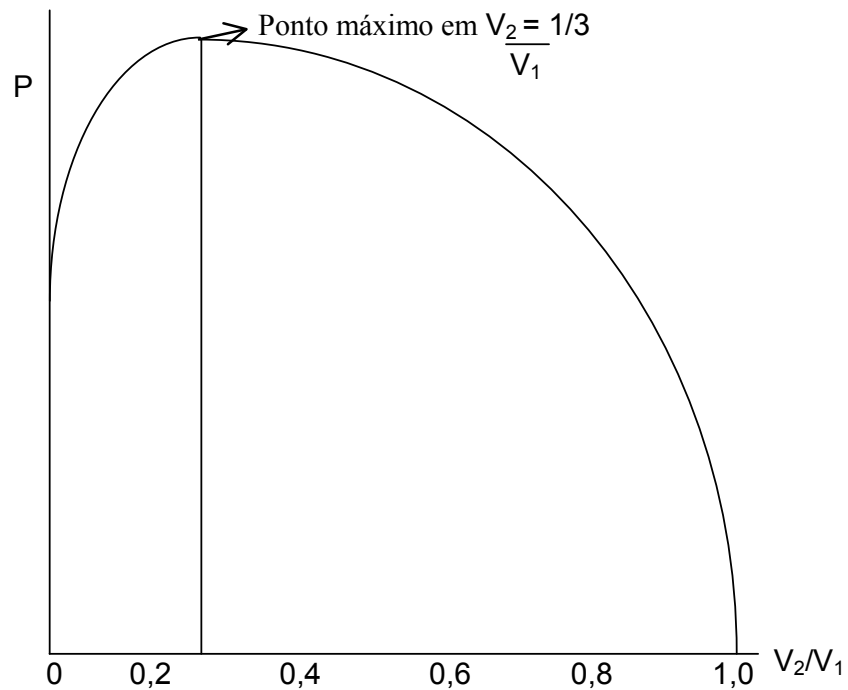


Figura 3.3 -Potência máxima alcançada quando  $V_2/V_1=1/3$ , JUSTUS (1978).

### 3.3 Fatores que Interferem na Velocidade do Vento

A potência eólica, como sabemos, é proporcional ao cubo da velocidade do vento. Portanto, ao se pesquisar uma determinada área para a instalação de aerogeradores, deve-se levar em consideração uma série de fatores que vão interferir diretamente na velocidade do vento, para que o local escolhido seja o melhor possível.

Os principais fatores a serem considerados serão, LYSEN (1983):

- Rugosidade do terreno: o vento diminui com a fricção com a superfície.
- Turbulência: interferência de prédios, árvores, pontes, etc.
- Aceleração no topo de colinas, montes, etc.

### 3.3.1 Rugosidade do Terreno e Perfil Vertical do Vento

Dependendo da área selecionada uma maior ou menor desaceleração do vento será percebida quanto mais próximo se estiver da superfície. Assim, cada tipo de superfície será caracterizado por um parâmetro de rugosidade  $Z_0$  que determinará quanto à velocidade variará com a altura referida à superfície; e assim, conhecendo o perfil vertical da área, pode-se determinar a velocidade na altura desejada, tendo-se como dado à velocidade medida a uma determinada altura de referência.

A equação que leva em consideração a rugosidade do terreno denomina-se perfil logaritmo do vento, LYSEN (1983); ROTHATGI & NELSON (1994) e é representado matematicamente pela seguinte equação:

$$\frac{V_z}{V_{zr}} = \frac{\ln \left[ \frac{h}{Z_0} \right]}{\ln \left[ \frac{h_r}{Z_0} \right]} \quad (3.11)$$

Onde  $V_z$  é a velocidade procurada na altura  $h$ , e  $V_{zr}$  é a velocidade medida na altura de referência  $h_r$ .

A classificação das superfícies de acordo com  $Z_0$  não é padronizada (na literatura pesquisada percebe-se algumas diferenças na apresentação), e será mostrada aqui uma classificação baseada nos valores dados por ROTHATGI & NELSON (1994), que parece o mais detalhado Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Valores aproximados de parâmetros de rugosidade e expoente de potência para vários tipos de terrenos, ROTHATGI & NELSON (1994)

Tipo de superfície	Zo (mm)	a
Muito plano: gelo ou lama	0.01	0.10
Mar aberto calmo	0.20	
Mar agitado	0.50	
Neve	3.00	
Gramado, relva	8.00	
Pastagem não plana	10.00	
Campo alqueivado	30.00	0.13
Campo de colheita	50.00	0.19
Poucas árvores	100.00	
Muitas árvores, poucos edifícios	250.00	
Florestas, bosques	500.00	
Subúrbios	1500.00	0.32
Centros de cidades com edifícios altos	3000.00	

Para melhor ilustração a Figura 3.4 mostra o perfil logaritmo para diversas superfícies com diferentes valores para  $Z_0$ .



Perfis Verticais Logaritmos do vento para vários coeficientes de rugosidade referidos a uma altura de 10 m.

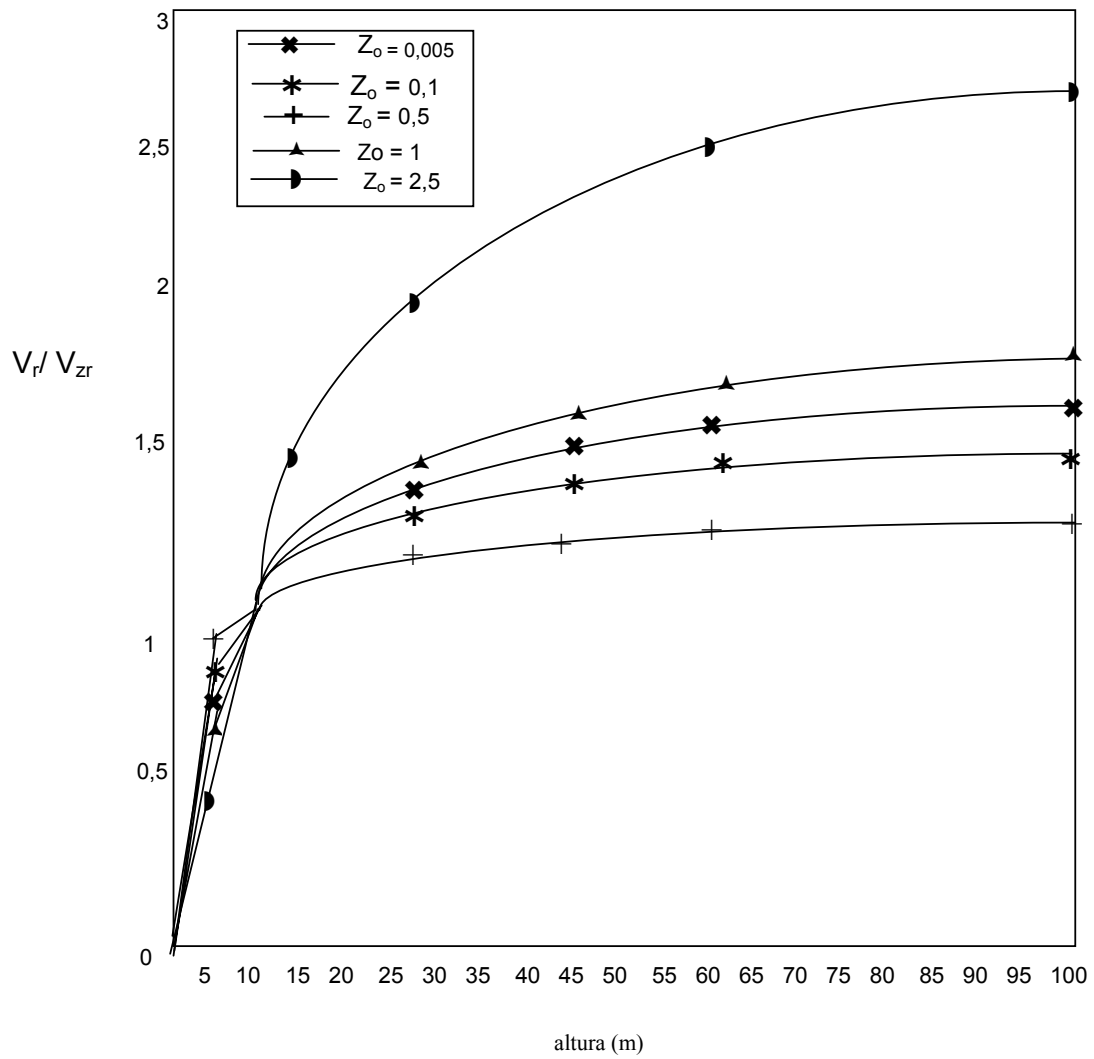


Figura 3.4 - Perfil logaritmo do vento tendo uma altura de 10 m como referência, para vários valores de  $Z_0$ , ROTHATGI & NELSON (1994)

A equação 3.11 dá o perfil logaritmo em uma locação. No caso de comparar duas locações com parâmetros de rugosidade distintos, presume-se que a velocidade do vento a 60 metros de altura não é afetada pela fricção, tendo-se, assim, a equação LYSEN (1983):

$$\frac{v_z}{v_{zr}} = \frac{\ln \left[ \frac{60}{Z_{0r}} \right]}{\ln \left[ \frac{60}{Z_0} \right]} \cdot \frac{\ln \left[ \frac{h}{Z_0} \right]}{\ln \left[ \frac{h_r}{Z_{0r}} \right]} \quad (3.12)$$

Onde  $Z_{0r}$  é o parâmetro de rugosidade no local de referência – por exemplo: uma estação meteorológica próxima ao local de interesse – onde a velocidade foi medida em uma altura  $h_r$ .

### 3.3.1.1 Perfil Vertical e Lei Potencial

Uma aproximação menos realista, porém mais fácil de ser interpretada, do perfil vertical do vento é a Lei Potencial, uma equação exponencial simples que utiliza como parâmetro o expoente de potencial  $a$ , que também variará com o tipo de terreno, porém de uma maneira mais abrangente, ou seja, cada valor de  $a$  está associado a uma maior quantidade de tipos de superfície, englobando mais de um valor de  $Z_0$ , classificando, portanto, de forma mais grosseira, os tipos de superfície.

$$\frac{v_z}{v_{zr}} = \left[ \frac{h}{h_r} \right]^a \quad (3.13)$$

Esta é a equação mais freqüentemente utilizada para traçar o perfil vertical do vento. Valores associando a tipos de superfície são dados no Quadro 3.1.

### 3.3.2 Turbulência

O vento ao fluir ao redor de prédios ou sobre superfícies muito rugosas manifesta rápidas mudanças na velocidade ou direção do vento, que se denomina turbulência, LYSEN (1983). Esta turbulência diminui a potência de saída do aerogerador e pode levar a vibração indesejada na máquina Figura 3.5.

Esta situação também se aplica próximo a copas de árvores. A turbulência é sentida a uma distância a sotavento (o lado contrário de onde sopra o vento) de dez a quinze vezes a alturas das árvores, e a uma distância de barlavento (o lado de onde sopra o vento) de cinco vezes.

LYSEN (1983) cita um método simples para detectar a turbulência e a altura até a qual é sentida: ata-se uma fita de 1 metro de comprimento a um mastro longo ou a uma pipa (papagaio). A agitação da fita indicará a intensidade da turbulência.

### 3.3.3 Aceleração nos topos de colinas

Além do fato de que no topo de colinas são percebidas maiores velocidades de vento devido ao efeito da rugosidade (seção 3.3.1), há a interferência do cume das colinas que atuam como concentradores de fluxo de ar. Fazendo com que o ar acelere próximo ao topo, LYSEN (1983).

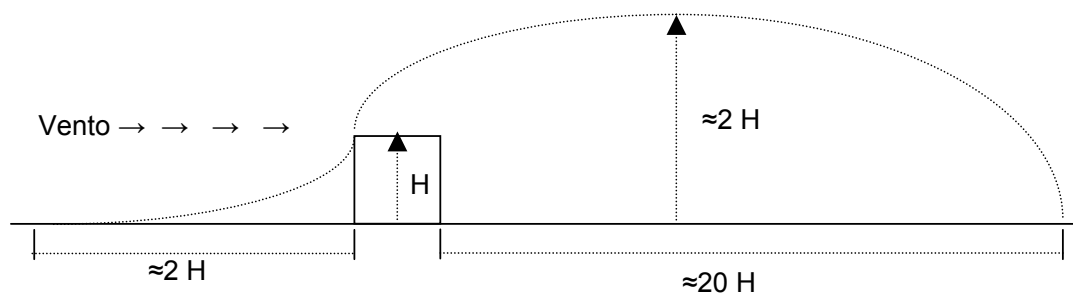


Figura 3.5 – Alcance da turbulência do vento frente a um obstáculo

Pode-se considerar que o efeito é mais forte quando o cume é um tanto plano, suavemente inclinado - nem tão íngreme, nem totalmente plano, LYSEN (1983). O ângulo considerado ideal é de  $16^\circ$ . mas ângulos entre  $6^\circ$  e  $16^\circ$  são bons. Ângulos acima de  $27^\circ$  devem ser evitados. Cumes triangulares são melhores que cumes arredondados.

A orientação dos cumes deveria ser de preferência perpendicular à direção predominante do vento. Se o cume é curvo, é melhor que o vento sopra no lado côncavo.

É difícil dar uma indicação quantitativa, mas incrementos de 10% a 20% são facilmente percebidos LYSEN (1983), Figura 3.6.

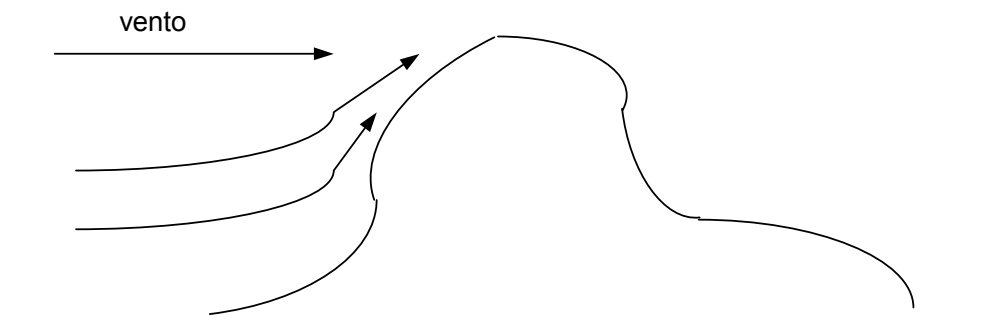


Figura 3.6 -Aceleração no topo das colinas, LYSEN (1983)

### **3.4 Estatística da Velocidade do Vento**

A avaliação do local depende diretamente da quantidade de energia que se pode extrair durante um ano, e isto é diretamente ligado ao regime de vento no local escolhido para análise.

Uma primeira estimativa da energia anual disponível pode ser feita utilizando a velocidade de vento média anual para obter a potência média através da equação 3.6 e multiplicá-la pelo número de horas de um ano que é 8760 h. É claro que esta é uma estimativa grosseira, pois a média anual só seria realmente representativa se a variação do vento fosse mínima, o que é pouco provável já que o clima varia consideravelmente ao longo de um ano, gerando um efeito sazonal no comportamento do vento durante o período.

O método adequado para a obtenção da energia anual depende principalmente da forma como os dados estão disponíveis, e alguns destes serão apresentados mais tarde associando-os diretamente com a disposição dos dados.

Antes, porém, de partir-se para a avaliação mais pormenorizada do local com os processos de medição para a coleta de dados e posterior tratamento estatístico, seria aconselhável uma argüição junto à população local sobre a "força do vento" no local, e utilizar a Escala de Beaufort, HIRATA (1984) para uma estimativa da sua velocidade média.

#### **3.4.1 Estimativa Empírica da Velocidade do Vento e a Escala de Beaufort**

Se possível, uma primeira avaliação empírica é aconselhável para diminuir a probabilidade de se investir em vão na medição do vento de um determinado local, que envolve custos muitas vezes elevados. Isto, a não ser que haja o interesse de um mapeamento da região.

Este tipo de análise também se torna o último recurso, quando não há nenhum dado disponível, para a localização e implementação de um aerogerador no local pretendido.

A Escala de Beaufort consiste na atribuição de números de 0 a 10 numa escala crescente – cada um envolvendo um intervalo de valores para a velocidade média do vento – aos efeitos observados da ação do vento Quadro 3.2, HIRATA (1984).

Quadro 3.2 - Avaliação da velocidade do vento pela escala de Beaufort.

Nºde Beaufort	v (m/s)	Classificação <sup>13</sup>	Efeitos Observados na Terra
0	0-0,2	Tranquilo	Calma. Fumaça sobe verticalmente
1	0,3-1,5	Ar leve	Fumaça se inclina indicando a direção do vento
2	1,6-3,3	Brisa leve	Sente-se o vento na face, folhas balançam, indicador da direção do vento começa a se manifestar.
3	3,4-5,4	Brisa de Gentie	As folhas adquirem movimentos constantes; bandeiras leves se estendem.
4	5,5-7,9	Brisa moderada	Poeira, folhas e pedaços de papel são levantados; galhos pequenos se movem.
5	8,0-10,7	Brisa fresca	Pequenas árvores começam a balançar.
6	10,8-13,8	Brisa forte	Galhos grandes das árvores em movimentos, os fios assobiam.
7	13,9-17,1	Vento quase forte	Toda a árvore se move; sente-se resistência ao se andar contra o vento.
8	17,2-20,7	Vento forte	Brotos e galhos pequenos são arrancados das árvores
9	20,8-24,4	Vento muito forte	Pequenos danos estruturais ocorrem; telhas são arrancadas dos telhados.
10	24,5-28,5	Tempestade	Ocorre muito raramente na terra; árvores são quebradas e arrancadas; danos estruturais consideráveis.

#### Observação

1 - Esta classificação é fornecida pela Organização meteorológica Internacional

2 – A tabela mostra os intervalos de velocidade em metros por segundo

### 3.4.2 Análise Estatística

O correto tratamento estatístico dos dados coletados é de fundamental importância na avaliação da potencialidade de uma região. Assim, a confiabilidade dos dados coletados é condição *sine qua nom* para uma precisa avaliação do potencial energético da região estudada.

Portanto, quando os dados forem fornecidos por terceiros – uma estação meteorológica na maioria das vezes – faz-se necessário à averiguação do local onde está instalado o anemômetro, a possibilidade de interferência de obstáculos (edifícios, árvores, etc.) situados próximos à área de medição, o tipo e qualidade dos anemômetros, o método de leitura e registro dos dados, e ainda – por mais banal que isto possa parecer, – a unidade utilizada na medição: metros por segundo, quilômetros por hora, milhas por hora, entre outras.

Inicialmente será dado o conjunto ideal de dados que devem ser obtidos para a melhor avaliação possível do local pretendido (FONTES DE ENERGIA ALTERNATIVA PARA A AGRICULTURA...), CDCC.SC (2001).

A distribuição da média horária de velocidade do vento;

A distribuição da média horária da direção do vento;

As características de rajadas e turbulências dos locais;

A persistência da velocidade e da direção do vento no local pretendido, e os ventos predominantes ao longo do ano;

As feições do terreno e rugosidade da superfície a montante do local pretendido na direção do vento predominante;

A presença de obstáculos e locais de aceleração na área;

A frequência de ciclones;

A mudança de direção do vento e o cisalhamento do vento como funções da estabilidade atmosférica e condições superficiais; a frequência e duração dos períodos de tempo de ventos aproximadamente calmos (calmaria);

A frequência de tempestades severas de trovões, assim como tempestades com rajadas

severas, raios, granizos e possíveis furacões;

A densidade média do ar, radiação solar anual, horário das alvoradas e as temperaturas médias anuais e sazonais;

As temperaturas extremas;

A precipitação média, as nevasdas médias e extremas;

A frequência de precipitações congeladas e congelamentos;

A ocorrência de jateamento de sal e poeira;

A possibilidade de inundações;

A possibilidade de ocorrer terremotos.

Desses os quatro primeiros itens são os mais importantes, principalmente os associados à velocidade do vento (FONTES DE ENERGIA ALTERNATIVA PARA A AGRICULTURA...), CDCC.SC (2001).

#### **3.4.2.1 Média e Desvio Padrão**

Para ilustrar os conceitos e métodos aqui apresentados serão utilizados dados fornecidos pelo comando da aeronáutica, serviço regional de proteção ao vôo de Belém, fornecidos pela estação SBSL (Serviço da Base da aeronáutica de São Luís), localizado no aeroporto, referentes ao mês de dezembro/2002 Tabela 3.1, ver anexo XII.

De posse de um conjunto de dados, o primeiro passo é obter um valor que represente o melhor possível todo o conjunto dos dados, é que se pode denominar de medida de tendência central. A medida de tendência central que interessa no tratamento estatístico de dados de vento é a média aritmética  $\bar{e}$ , que é assim calculada, STEVENSON (1981).

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (3.14)$$



Onde  $x_i$  é o dado coletado e  $N$  é a quantidade total de dados coletados. Há também a necessidade de se saber o quanto estes dados estão dispersos em relação à média. Dentre as medidas de dispersão as mais utilizadas são a variância  $S_x^2$  e o desvio padrão  $S_x$ . O desvio padrão é ainda mais utilizado porque sua unidade é a mesma dos dados em estudo. Assim, quanto maior o desvio padrão (ou a variância, se for o caso) maior a diferença quantitativa entre os dados e menos representativa é a média. O desvio padrão é calculado da seguinte forma, STEVENSON(1981).

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{e})^2}{N}} \quad (3.15)$$

A variância nada mais é que o quadrado do desvio padrão.

Para o conjunto de dados em estudo, verifica-se que a média é  $\bar{e} = 5,5 \text{ m/s}$ , o desvio padrão é  $S_x = 2,29$ . Pode-se dizer, portanto, que a maioria dos dados encontram-se entre  $\bar{e} - S_x = 3,21 \text{ m/s}$  e  $\bar{e} + S_x = 7,76 \text{ m/s}$ . Vê-se, que a dispersão não é grande, e que a média é bem representativa Tabela 3.1, ver anexo XII.

### 3.4.2.2 Distribuição no tempo

Um estudo importante é verificar como o vento se comporta ao longo do dia (de 0h00 às 23h00), através das velocidades médias obtidas para cada hora do dia durante o mês. Obtém-se, assim, o padrão diário da velocidade, um gráfico que mostra uma aproximação da variação da velocidade do vento ao longo das 24 h do dia para determinado mês.

Não há necessidade deste tipo de avaliação para a estimativa do potencial energético, que é o interesse no momento. Não deixa de ser interessante, porém. O conhecimento destes dados, associando-os, inclusive – por serem dados de um local situado no litoral – com o fato de que, como já foi observado na seção 2.7.3.1, os ventos durante o dia são mais "fortes" que à noite se estão sob a influência das brisas entre terra e mar. Isto pode ser observado no Gráfico 3.5.

Seria interessante, também, a construção de um gráfico que mostre a variação da velocidade do vento ao longo do ano, através das médias de cada mês. Poderia ser observado, então, a influência das estações e outros fatores.

### Padrão diário do vento relativo ao mês de dezembro

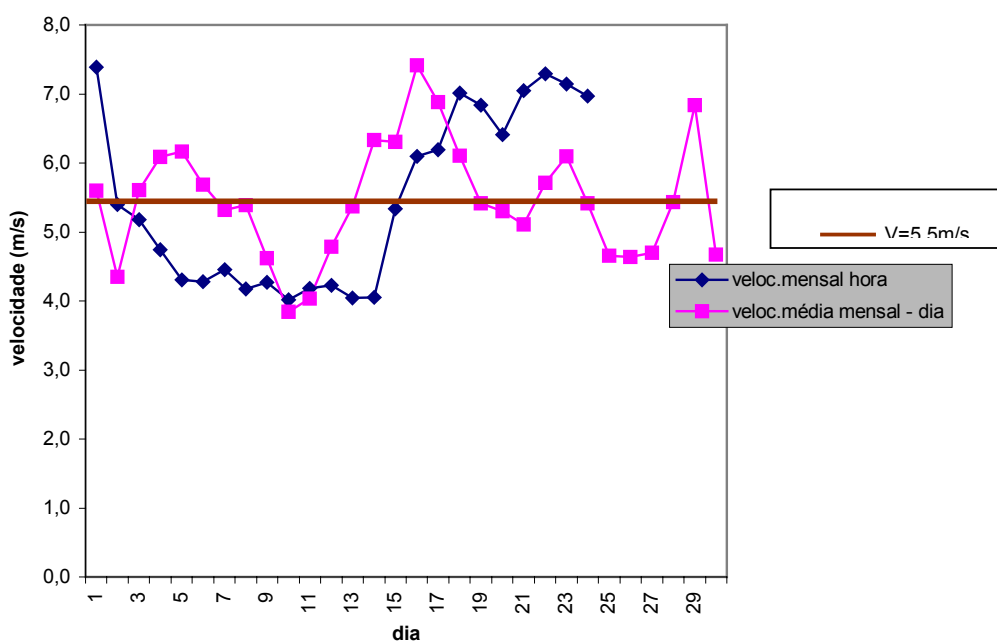


Gráfico 3.5 – Padrão diário do vento relacionado ao exemplo dado cidade de São Luís, conforme seção 3.4.2.1.

**Observação:** ver tabela 3.1 ver anexo XII correspondente ao gráfico 3.1

#### 3.4.2.3 Distribuição de Freqüência

Tendo acesso aos dados originais, ou seja, às velocidades horárias, a primeira atitude a se tomar é fazer a classificação dos dados coletados por intervalos de velocidade, quantificar os dados em cada intervalo, e assim obter o que se denomina distribuição de freqüência. Ou seja, com que freqüência os ventos durante as 720h do mês se apresentaram dentro de um determinado intervalo de velocidades.

Antes se tem que se ter consciência que este é um conjunto de dados contínuos, não só

devido à quantidade, mas também ao fato da velocidade do vento poder assumir qualquer valor real, ou melhor, infinitos valores dentro de um intervalo por menor que seja. Assim todo o tratamento aqui exposto é para um conjunto de dados contínuos.

No caso específico de velocidades de vento é aconselhável fugir um pouco da metodologia formal, onde se classifica o dado conforme o seu intervalo, STEVENSON (1981); neste caso, entre 1,40 m/s e 14,2 m/s, e determinar para quaisquer conjuntos de dados desta natureza:

- como valor mínimo: 0 m/s (zero metro por segundo);
- como amplitude de classe: 1m/s;
- como valor máximo: o inteiro imediatamente superior ao maior valor encontrado no conjunto de dados;

No momento da contagem surgirá a dúvida: em qual intervalo estará classificado o limite de cada classe, se estes forem observados?

É claro que cada valor dado tem que estar contido em um único intervalo. O melhor seria utilizar intervalos cujos limites não fossem dados observados, mas tem-se que considerar o tamanho do conjunto, além do fato de já se ter estabelecido os critérios acima. Assim, ou se fecha o intervalo no limite superior, ou no limite inferior.

Classificados os dados, designa-se cada classe por um índice  $i$ , referindo-o ao limite superior, para se ter uma melhor visualização nos gráficos. Assim, na Tabela 3.2, a frequência absoluta para o intervalo  $i = 3$  é  $f_i = 38$ . ou seja, foram observados ventos entre  $2 < v \leq 3$  (m/s) com trinta e oito em todo o mês.

O próximo passo é dividir a frequência absoluta de cada classe pelo total de dados (neste caso, 720) obtendo-se, assim, a frequência relativa  $f_i\%$ , que significa a percentagem em relação ao total com que cada classe  $i$  foi observada. Para o exemplo em estudo, ver a Tabela 3.2 que pode ser representada pelo Gráfico 3.6. combinando frequência absoluta com frequência relativa.

Tabela 3.2 - Distribuição de Frequência absoluta e relativa.

Intervalo (m/s)	i	fi (h)	fi%
0 — 1	1	5	0,69
1 — 2	2	10	1,39
2 — 3	3	38	5,27
3 — 4	4	87	12,08
4 — 5	5	119	16,52
5 — 6	6	155	21,52
6 — 7	7	134	18,6
7 — 8	8	98	13,6
8 — 9	9	41	5,69
9 — 10	10	23	3,19
10 — 11	11	06	0,83
11 — 12	12	02	0,28
12 — 13	13	0	0
13 — 14	14	0	0
14 < 50	15	2	0,28
Total		720	100,00

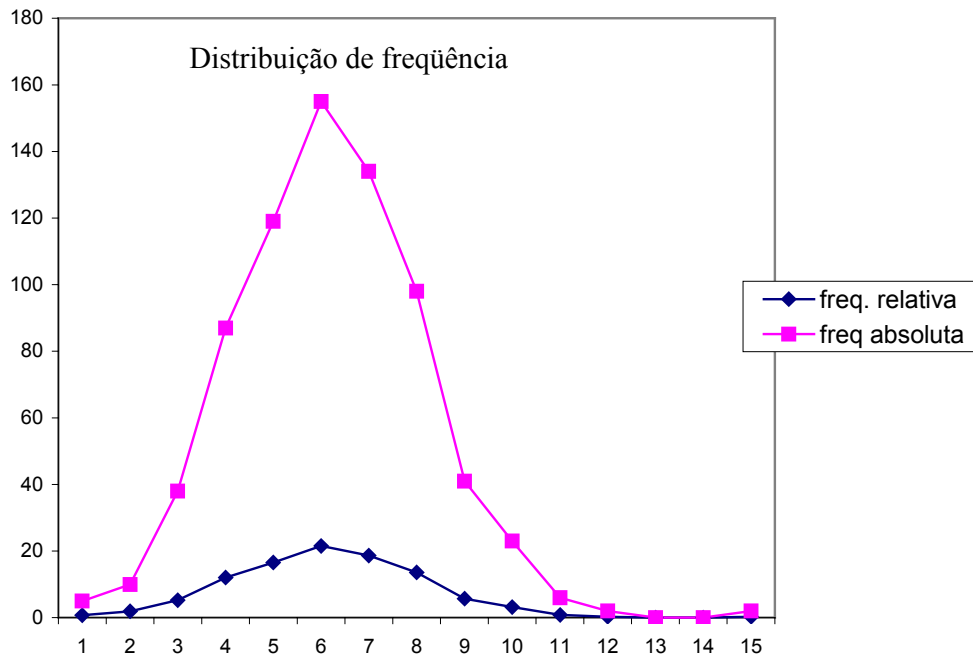


Gráfico 3.6 – Distribuição de Frequência absoluta e relativa

Também é necessário se conhecer a quantidade de dados que assumiram valores menores ou iguais a uma velocidade de referência, que aqui será o limite superior de cada

classe. Normalmente isto é feito somando-se a frequência absoluta de cada classe com as das classes posicionadas acima, de cima para baixo na tabela. Porém isto pode ser feito automaticamente em qualquer planilha eletrônica, junto com a quantificação da frequência absoluta, ordenando-a que quantifique todos os valores menores ou iguais a  $i$ . Feito isto, tem-se a frequência absoluta acumulada  $F_{ai}$  para cada valor de  $i$ . Dividindo-a pelo total de dados (720h) tem-se a frequência relativa acumulada  $F_{ai}\%$ . Para o exemplo estudado tem-se a tabela 3.3 que resulta nos gráficos 3.7a, 3.7b, 3.7c.

**Tabela 3.3 - Distribuição de frequência absoluta relativa, acumulada.**

Intervalo	i	fi(h)	fi%	Fai	Fai%
0	1	5	0,69	5	0,69
1_____	2	10	1,39	15	2,08
2_____	3	38	5,27	53	7,35
3_____	4	87	12,0	140	19,43
4_____	5	119	16,5	259	35,95
5_____	6	155	21,5	414	57,53
6_____	7	134	18,6	548	76,13
7_____	8	98	13,6	646	89,73
8_____	9	41	5,69	687	95,42
9_____	10	23	3,19	710	98,61
10_____	11	06	0,83	716	99,44
11_____	12	02	0,28	718	99,72
12_____	13	0	0	718	99,72
13_____	14	0	0	718	99,72
14 < 50	15	02	0,28	720	100,00
Total		720	100,00		

freq. absoluta acumulada (h-mês)

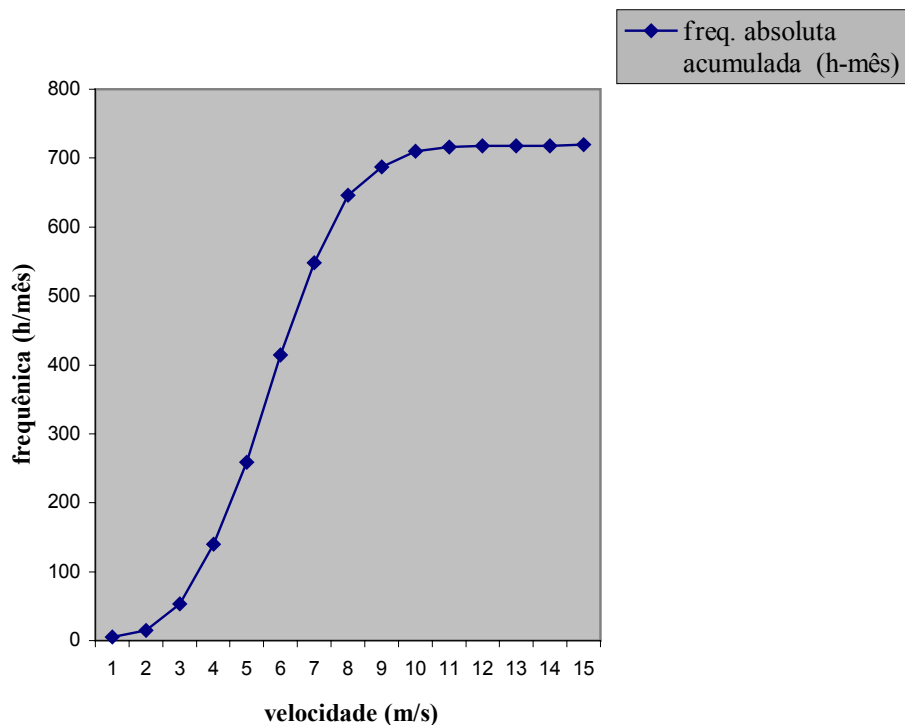


Gráfico 3.7a – Frequência absoluta acumulada

Distribuição de frequência acumulada

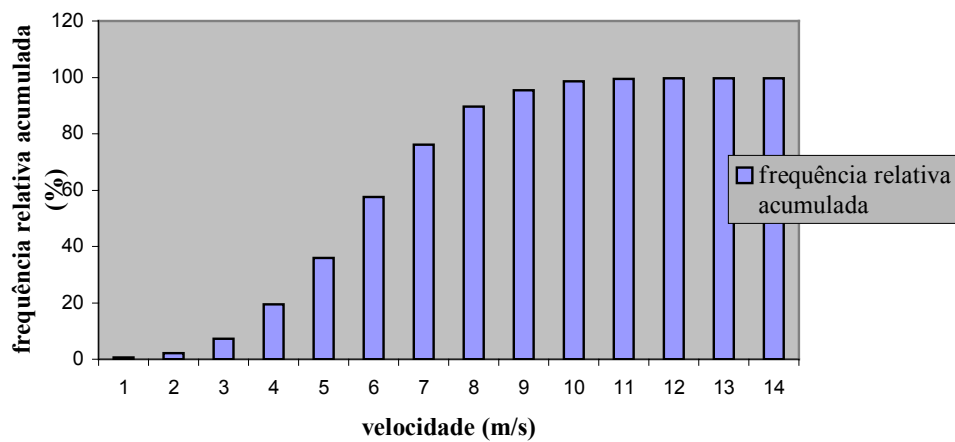


Gráfico 3.7b – Frequência relativa acumulada %

### Distribuição de frequência acumulada

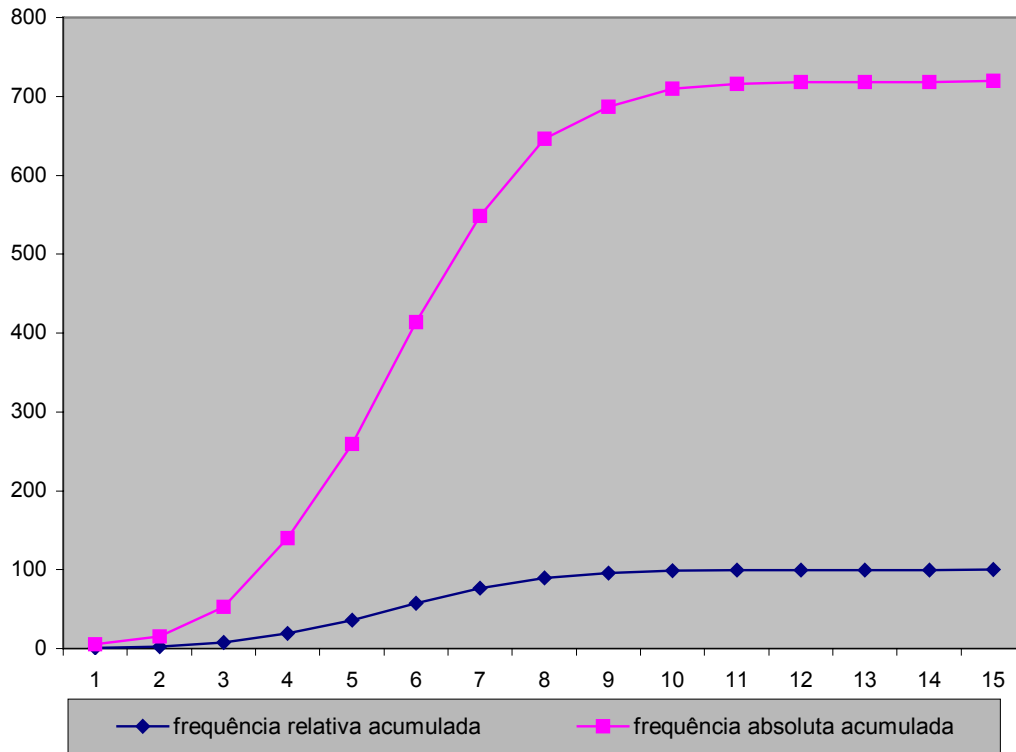


Gráfico 3.7c – Frequência relativa e absoluta acumulada

Outros aspectos importantes na distribuição de frequência para a análise de dados de velocidade de vento são a quantidade de horas no período de tempo (neste caso, mês) estudado que se parece ventos com velocidades maiores que determinado no valor de referência (aqui, o limite superior de cada classe). Esta quantidade se denomina frequência absoluta de duração  $S_{ai}$ , e nada mais é que subtrair do total de horas computadas (720h) a frequência absoluta acumulada de cada classe. Dividindo-a pelo total obtém-se a frequência relativa de duração  $S_{ai} \%$ . Tem-se agora a tabela completa das distribuições de frequência Tabela 3.4. A visualização gráfica da frequência absoluta acumulada está no Gráfico 3.4.

Tabela 3.4 - Distribuição de frequência.

intervalo (m/s)	i	fi(h)	fi%	Fai(h)	Fai%	Sai (h)	Sai%
0-----1	1	5	0,69	5	0,69	715	99,30
1-----2	2	10	1,83	15	2,08	705	97,91
2-----3	3	38	5,27	53	7,35	667	92,64
3-----4	4	87	12,08	140	19,43	580	80,5
4-----5	5	119	16,52	259	35,95	461	64,03
5-----6	6	155	21,58	414	57,53	306	42,5
6-----7	7	134	18,6	548	76,13	172	23,88
7-----8	8	98	13,6	646	89,73	74	10,28
8-----9	9	41	5,69	687	95,42	33	4,58
9-----10	10	23	3,19	710	98,61	10	1,38
10-----11	11	06	0,83	716	99,44	4	0,55
11-----12	12	02	0,28	718	99,72	2	0,27
12-----13	13	0	0	718	99,72	2	0,27
13-----14	14	0	0	718	99,72	2	0,27
14 < 50	15	02	0,28	720	100,00	0	0
<b>Total</b>		<b>720</b>	<b>100,00</b>				

frequência relativa de duração

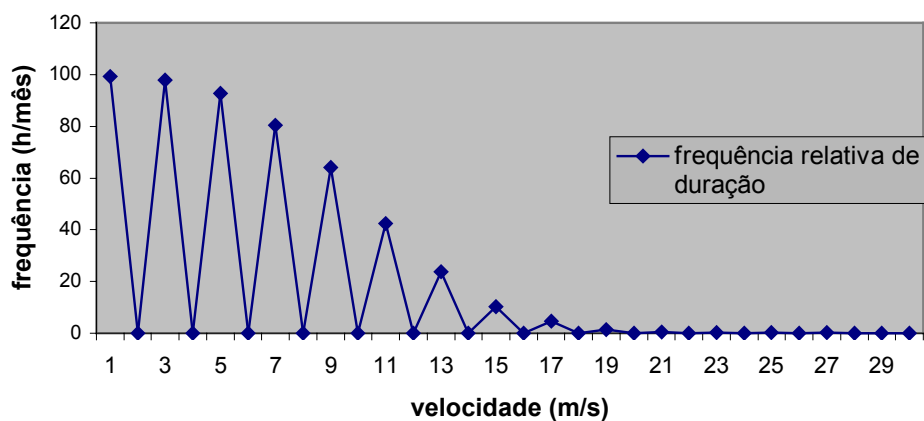


Gráfico 3.8a – Frequência relativa de duração hora - mês



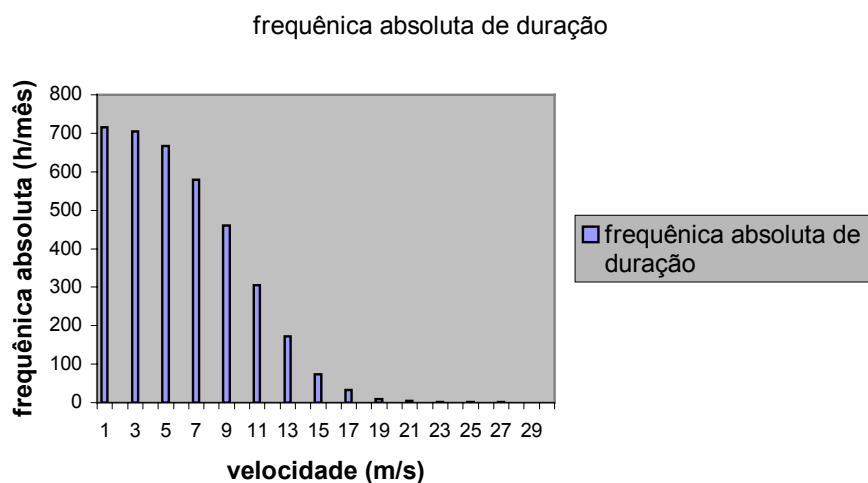


Gráfico 3.8b – Frequência absoluta de duração hora - mês

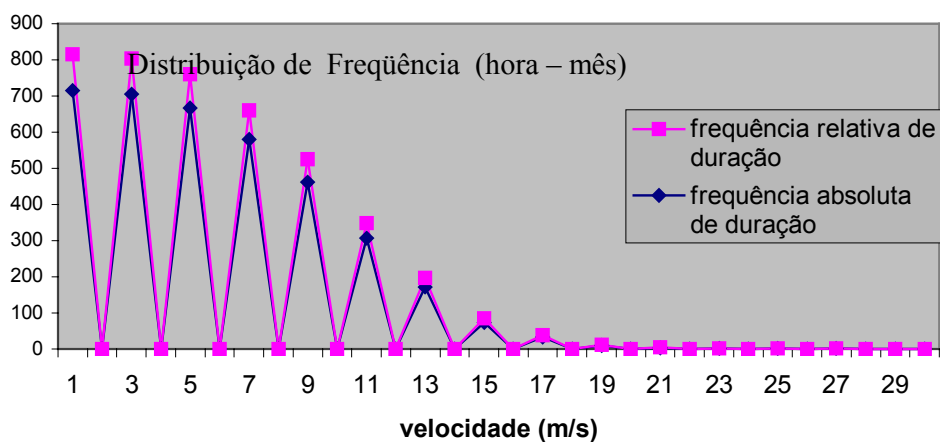


Gráfico 3.8c – Frequência relativa e absoluta de duração hora - mês

### 3.4.2.4 Na Falta dos Dados Originais

Deve ser evitado, mas pode acontecer, o fato de não se ter acesso aos dados originais, ou, pior, não se dispor de recursos computacionais. Sendo, assim há métodos que podem conduzir a uma boa aproximação.

Supondo-se que se dispusesse apenas dos dados de frequência absoluta. na Tabela 3.2, a média seria calculada pela média dos pontos médios de cada classe através da equação:

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i v_i}{N} \quad (3.16)$$

Onde  $f_i$  é a frequência da  $i$ ésima classe  $v_i$  é o seu ponto médio,  $N$  é o número total de dados.

Da mesma forma o desvio padrão será, STEVENSON (1981).

$$S_x = \frac{\sum_{i=1}^n f_i (v_i - \bar{v})^2}{N} \quad (3.17)$$

Definido em qual limite o intervalo estava fechado, obtém a Tabela 3.5.

**Tabela 3.5 - Distribuição de frequência considerando os valores médios em cada classe**

Intervalo	(m/s)	i	$V_i$	$f_i(h)$	$f_i\%$
0	1	1	0,5	0	0,00
1	2	2	1,5	6	0,83
2	3	3	2,5	14	1,94
3	4	4	3,5	31	4,31
4	5	5	4,5	95	13,19
5	6	6	5,5	95	13,19
6	7	7	6,5	126	17,50
7	8	8	7,5	56	7,78
8	9	9	8,5	89	12,36
9	10	10	9,5	105	14,58
10	11	11	10,5	40	5,56
11	12	12	11,5	42	5,83
12	13	13	12,5	11	1,53
13	14	14	13,5	9	1,25
14 < 50	15	15	14,5	1	0,14
Total				720	100,00

E assim a velocidade média do mês estudado (720 h) e o desvio padrão, serão:

$$v = 5,5 \text{ m/s}$$

$$S_x = 2,29$$

### 3.4.2.5 Estimação do Potencial Eólico

A estimação do potencial eólico só tem sentido quando feita para um período de um ano. Ao longo deste período, muito provavelmente ocorre mudança – cuja amplitude será significativa dependendo do local estudado – na temperatura do ar, na pressão atmosférica e velocidade do vento. Para uma maior precisão é aconselhável a coleta simultânea destes três fatores e, para cada hora calcular a potência disponível utilizando-se a equação 3.5, onde a densidade do ar  $\rho$  seria calculada por:

$$\rho = 1.299 \frac{Pr \cdot 273}{760 \cdot T} \quad (3.18)$$

Onde a temperatura do ar  $T$  é dada em graus Kelvin, e a pressão atmosférica  $Pr$  é dada em milímetros de mercúrio.

Assim, a potência eólica média disponível por unidade de área é calculada por:

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{\sum_{i=1}^n 0,5 \cdot \rho \cdot v_i^3}{N} \quad (3.19)$$

se desprezar as variações na densidade do ar:

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{0,5 \cdot \bar{\rho} \cdot \sum_{i=1}^n v_i^3}{N} \quad (3.20)$$

Onde  $\bar{\rho}$  é a densidade média do vento,  $v_i$  é a velocidade do vento em cada hora, e  $N$  é o número total de horas, no caso 720h.

## **Capítulo 4**

### **Resultados e Discussões**

#### **4.1 Conversão de Energia e Dimensionamento do Rotor e Circuladores**

Um cata-vento funciona extraíndo a energia cinética do vento transformando-a em movimento rotacional de suas pás que, por conseguinte, estão acopladas a um eixo, responsável por transformar esta energia mecânica em trabalho útil.

Basicamente há duas formas de transformar a energia cinética do vento em movimento relacionado das pás. A mais simples é aproveitar a força do vento para empurrar uma pá, arrastando-a na mesma direção em que sopra. Esta força será denominada desde já como força de arrasto  $D$ . Outra, mais eficiente, é aproveitar o efeito do fluxo do vento ao redor de corpos cujas formas especiais faz com que se crie uma força capaz de não somente direcioná-lo quase que perpendicularmente à direção do vento, como também fazê-lo girar muito mais rápido que o próprio vento que o impulsiona. Este fato se nota principalmente em aerofólios, como as asas de um avião.

##### **4.1.1 Princípio da Extração de Energia por meio da força de arrasto exercida pelo vento.**

A forma mais simples de extração de energia do vento é fazendo com que ele empurre uma pá presa a um eixo de rotação. A Figura 4.1 mostra modelo que pretendemos usar no nosso estudo para transformar esta energia em energia mecânica onde através de um mecanismo bastante simples se movimenta devido ao "empurrão" do vento, ou como se verá mais adiante, devido principalmente à "força de arrasto".

É claro que nesta situação a força do vento em um das pás tem que ser maior que na outra pá. Isto pode ser conseguido fazendo com que as pás tenham o formato de um cilindro cortado ao meio. O fluxo de ar na pá com o lado convexo voltado para o vento é maior do que na outra pá, ou seja, o vento escoar mais rapidamente pela pá com o lado convexo voltado para si. Assim sendo, a força do vento no lado côncavo é maior que no lado convexo, e deste modo o rotor se move. Note que quanto maior a diferença entre estas forças, maior será a eficiência obtida. A figura F.1 nos mostra um mecanismo onde o modelo tipo Savonius (que veremos mais adiante) em movimento procura através do eixo central movimentar uma roldana dentada fixa onde acoplada a uma correia que também acoplada em circuladores e através destas rotações fazer circular o ar em ambientes menos arejados contribuindo na economia de energia elétrica (ambientes como galpões, armazéns, igrejas e etc...)

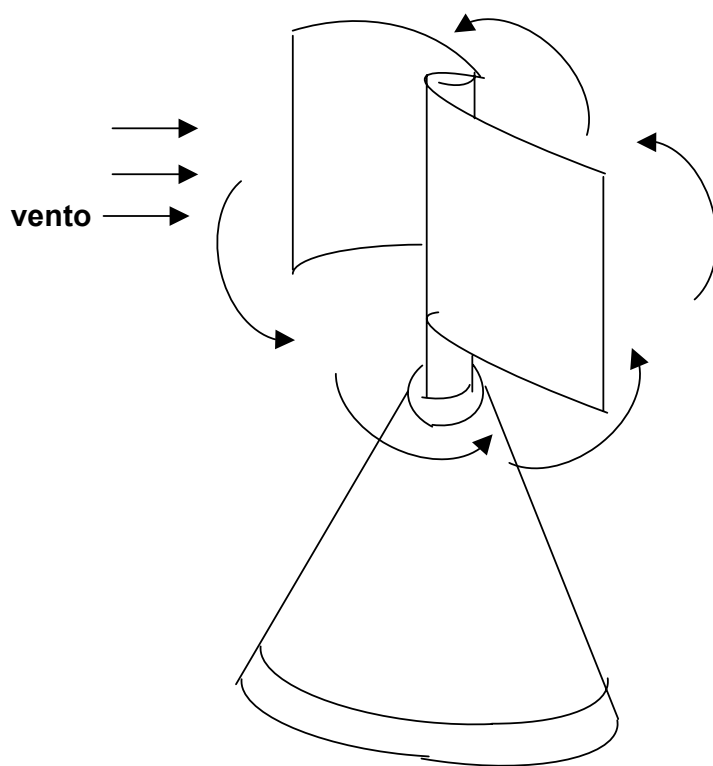


Figura 4.1 – Tipo de mecanismo que se move arrastado pelo vento.

Obtém-se uma melhor compreensão analisando-se a situação apresentada na Figura 4.2, onde há uma placa plana presa por um braço giratório a um eixo vertical.

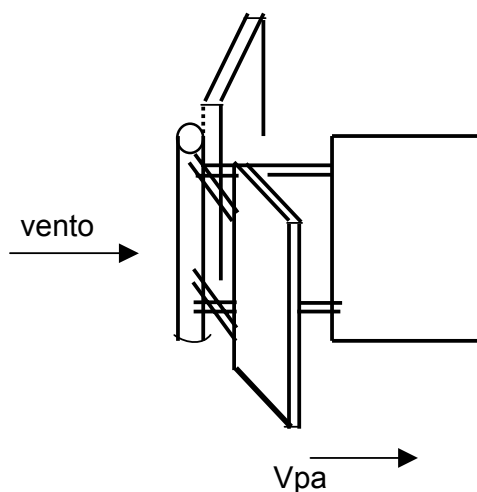


Figura 4.2 - Atuação da força de arrasto do vento em uma pá plana.

A força de arrasto  $D$  é obtida da equação:

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (V - V_{pa})^2 \cdot A \cdot C_D \quad (4.1)$$

onde:

- ♣  $\rho$  é a densidade do ar ( $\text{kg/m}^3$ )
- ♣  $V$  é a velocidade do vento ( $\text{m/s}$ )
- ♣  $V_{pa}$  é a velocidade linear da pá
- ♣  $A$  é a área da pá ( $\text{m}^2$ )
- ♣  $C_D$  é o coeficiente de arrasto da pá.

Veja que  $V - V_{pa}$  é o valor da velocidade relativa entre a pá e o vento, ou seja, é a velocidade do vento "observada" pela pá.  $C_D$  é um coeficiente adimensional que determina a proporção da força do vento que é realmente utilizada na força de arrasto  $D$  que impulsiona a

pá, e que depende de sua forma. Por exemplo, a placa curvada da Figura 4.1 quando com o lado convexo voltado para o vento tem seu coeficiente de arrasto variando entre 0.12 a 0,25. Já quando o lado côncavo está voltado para o vento, o coeficiente de arrasto alcança quase que o valor unitário, aproveitando, portanto quase totalmente a força do vento na direção do movimento, PARK (1981). O coeficiente de arrasto geralmente varia entre zero e um.

Observa-se que o valor máximo da força é alcançado com o rotor parado ( $V_{pa}=0$ ) e a pá posicionada perpendicularmente em relação ao vento. Sabe-se que o torque relaciona-se com a força pela seguinte equação:

$$T = D \cdot r \quad (4.2)$$

Onde  $r$  é à distância da extremidade até o centro de rotação.

Tem-se então que, neste caso, o torque tem seu valor máximo na partida. Porém, quando se trata da máquina da Figura 4.1 - mais próxima do real - tem que ser levada em consideração a força do vento contra a pá oposta. Assim sendo o torque líquido será menor, e pode ser estimado pela diferença entre as forças de arrasto nos dois lados, tendo-se pelo menos uma boa aproximação para os valores do coeficiente de arrasto.

A potência desenvolvida pela força de arrasto é dada pela equação 4.3, PARK (1981):

$$P = D \cdot V_{pa} = \left[ \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot [\bar{V} - v_{pa}]^2 \cdot A \cdot C_D \right] V_{pa}$$

$$P = \left[ \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_D \right] V_{pa} [\bar{V} - v_{pa}]^2 \quad (4.3)$$

Pode-se obter o valor máximo para a potência obtida dada uma determinada velocidade do vento  $V$ , derivando-a em relação à velocidade da pá  $V_{pa}$  e igualando-a a zero:

$$\frac{dP}{dV_{pa}} = \left\{ \frac{d}{dV_{pa}} \left[ \left[ \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_D \right] V_{pa} \right] \right\} [V - V_{pa}]^2 + \left[ \left[ \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_D \right] V_{pa} \right] \frac{d}{dV_{pa}} [V - V_{pa}]^2$$

$$\frac{dP}{dV_{pa}} = \left[ \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_D \right] [V - V_{pa}]^2 + \left[ \left[ \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_D \right] V_{pa} \right] \left[ 2 [V - V_{pa}] (-1) \right] =$$

$$\left[ \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_D \right] [V - V_{pa}] [V - V_{pa}] \cdot -2V_{pa} =$$

$$\left[ \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_D \right] [V - V_{pa}] [V - 3V_{pa}] = [V - V_{pa}] [V - 3V_{pa}] = 0$$

$$\text{Logo isso implica que } \begin{cases} V_{pa} = V \\ V_{pa} = 1/3V \end{cases} \quad (4.4)$$

E como a velocidade da pá não pode ser igual à do vento  $V$ , o que anularia a Equação 4.3, o ponto de máximo ocorre quando  $V_{pa} = (1/3)V$ , conforme a figura 4.3.



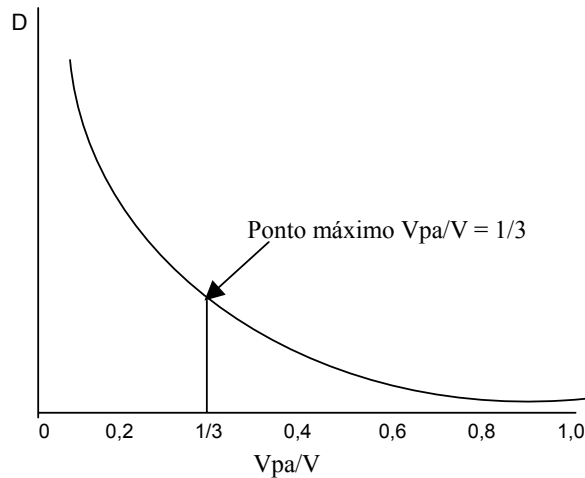


Figura 4.3- Relação entre a força de arrasto do vento e a razão de velocidades entre a velocidade da pá e a do vento. Como se vê, o ponto máximo para extração de potência se dá quando a relação entre as duas velocidades está em  $1/3$ . Total para a máquina da Figura 4.1 (rotor tipo de savonius) será obtido levando-se em consideração a potência na pá que se move contra o vento, tomando-se cuidado para atribuir  $(V+V_{pa})$  para a velocidade relativa que tem em relação ao vento.

#### 4.1.2 Aerodinâmica nos aerofólios

Um corpo qualquer atingido por um fluxo uniforme é impulsionado por uma força que geralmente não é paralela à direção do fluxo não perturbado. Esta força pode ser decomposta em duas, LYSÉN (1983); et al:

- A Força de arrasto ( $D$ ): componente paralela ao fluxo não perturbado.
- A Força de sustentação ( $L$ ): componente perpendicular à direção do fluxo não perturbado

Dependendo da forma do corpo haverá maior ou menor influência de cada uma das componentes na força resultante, como se pode ver na Figura F.4. No caso de um aerofólio a influência da componente de sustentação é quase que total, LYSÉN (1983)

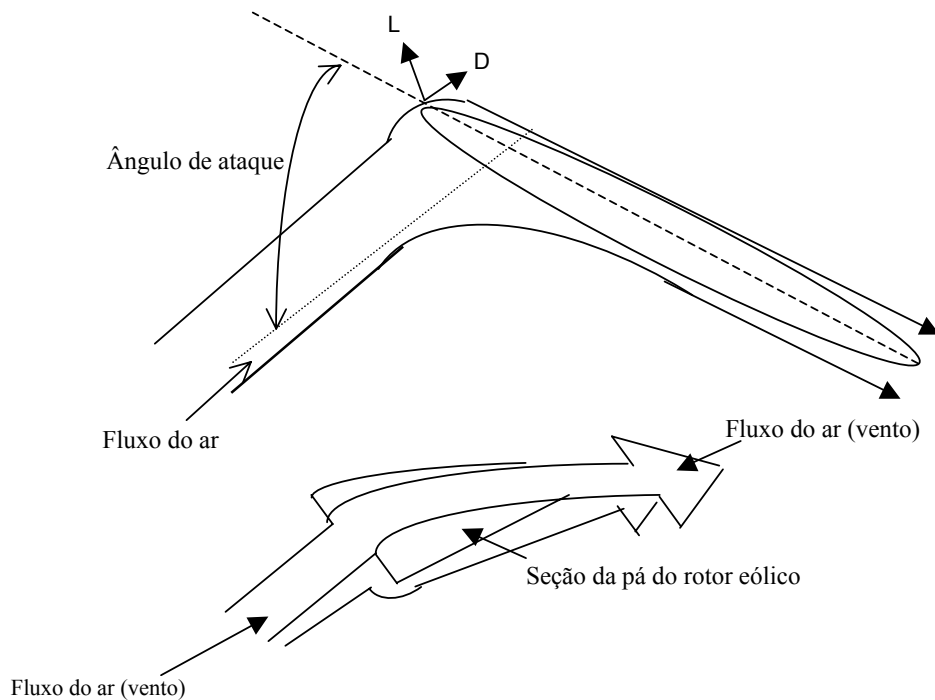


Figura 4.4 – Atuação do fluxo do ar em corpos diferentes. Acima: em um aerofólio. Abaixo: em um corpo qualquer.

Esta força resultante é causada porque o fluxo sofre mudança em sua velocidade ao escoar em torno do aerofólio. No lado superior do aerofólio o vento escoar mais rapidamente que em seu lado inferior, resultando numa maior pressão no lado inferior. Esta diferença de pressão faz surgir uma força orientada do lado inferior para o superior.

Em um aerofólio, no lado inferior o trânsito de moléculas de ar é mais lento, criando uma concentração maior do que no lado superior e forçando, por conseguinte, a passagem para outro lado "empurrando" o aerofólio numa direção quase que perpendicular à direção do fluxo.

## 4.2 Características do Projeto

O rotor funcionará em um galpão com área de  $300 \text{ m}^2$ , (10 x 30) m com altura de pé direito medindo 3 m para criar galinhas de granjas de postura, três circuladores divididos em partes iguais no local, conforme indicados nas figuras abaixo, segundo Sarkis Melconian (2000).

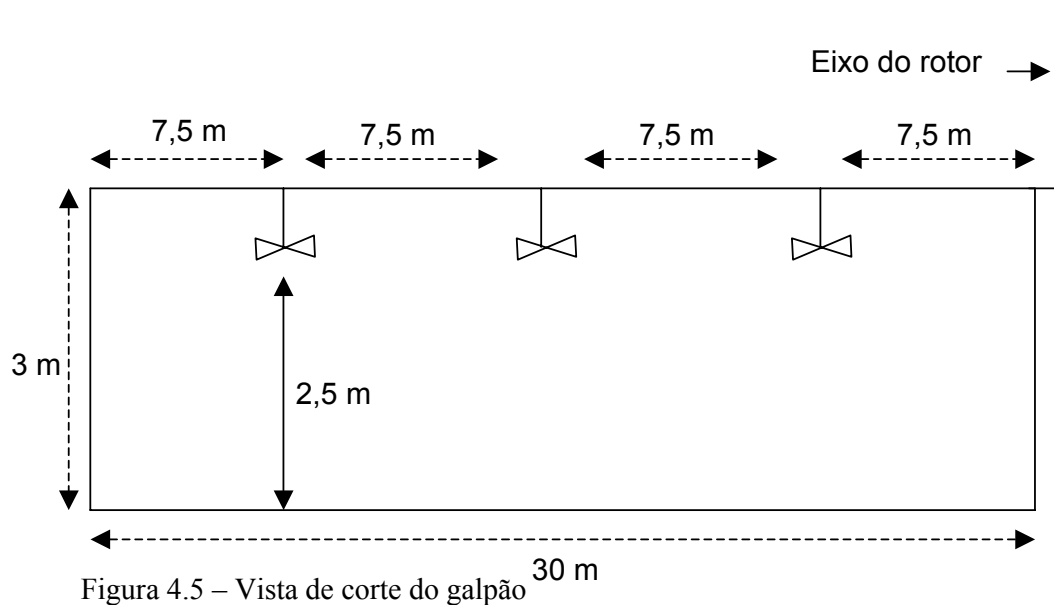


Figura 4.5 – Vista de corte do galpão

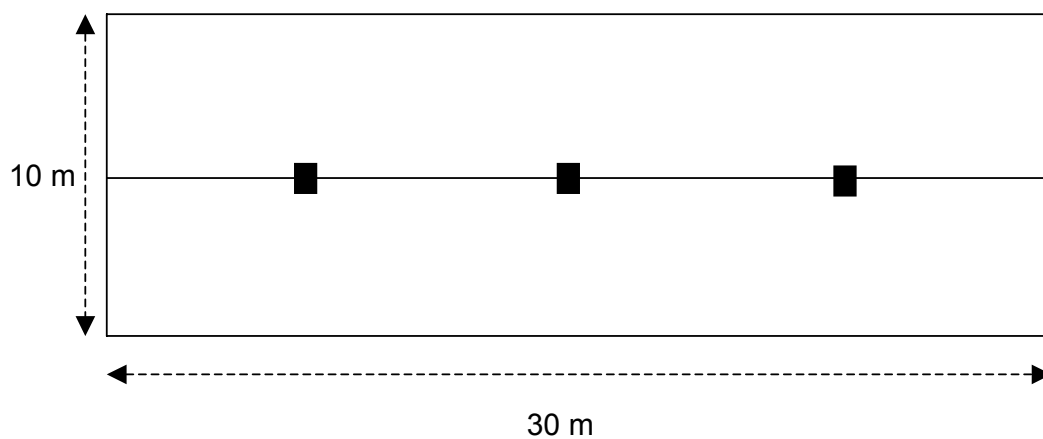
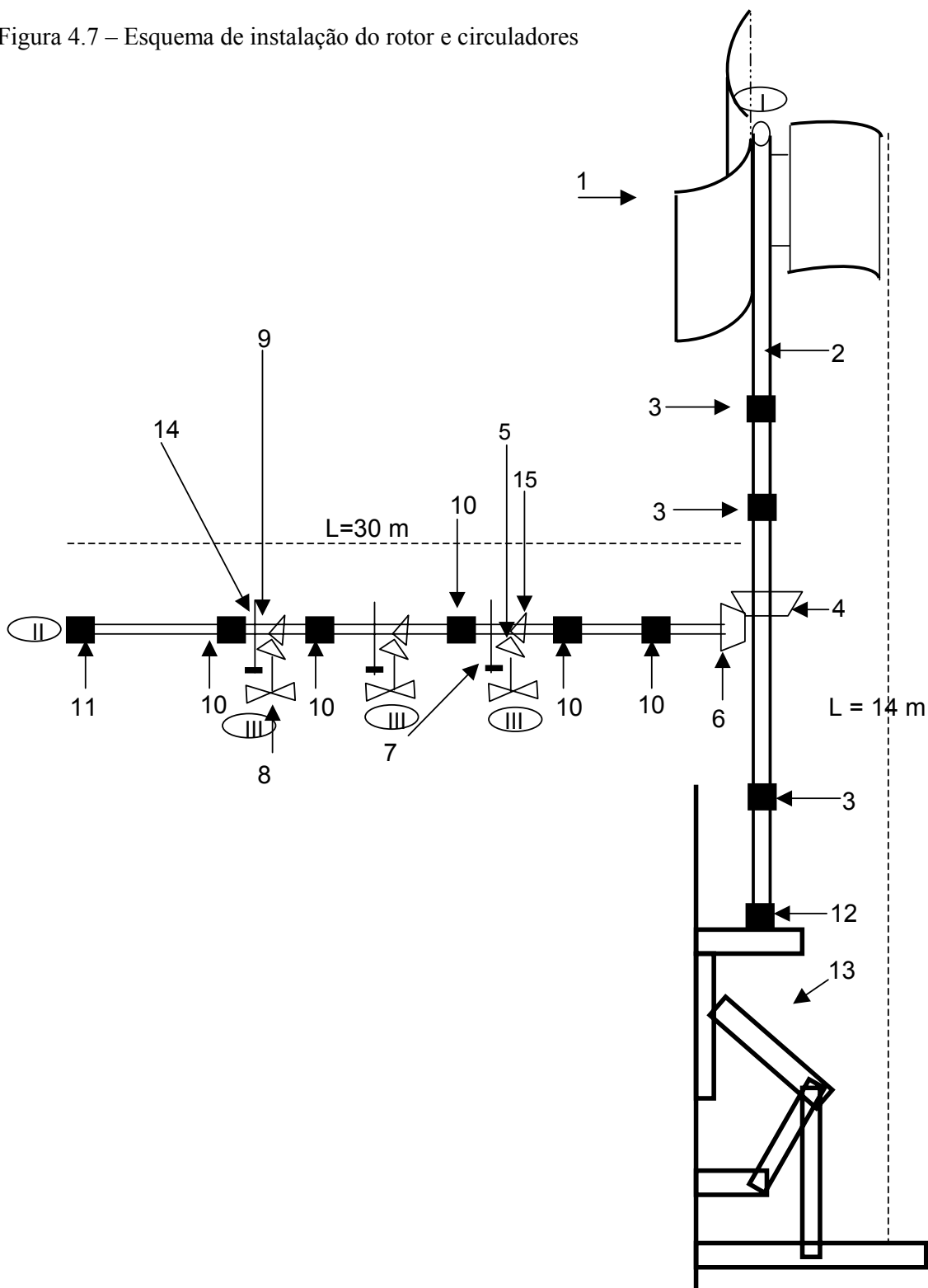


Figura 4.6 – Vista em plano do galpão

Figura 4.7 – Esquema de instalação do rotor e circuladores



01 – Rotor tipo Savonius – confeccionado de latão, com 800 cm de altura e 50 cm de largura, côncavo;

02 – Eixo Vertical com 14 metros de comprimento de 2 (duas) polegadas galvanizado;

03 – Mancais guia do eixo vertical (deslizamento);

04 – Engrenagem cônica com  $Z_4 = 95$  dentes;

05 – Engrenagem cônica com  $Z_5 = 13$  dentes;

06 – Engrenagem cônica com  $Z_6 = 19$  dentes;

07 – Mancal de rolamento tipo “y” ;

08 – Circuladores = fabricado em PVC com três hélices, 50 cm de raio, 50 cm de altura e com massa de 500 g;

09 – Eixo horizontal com 30 metros de comprimento de 1 (uma) polegada galvanizado;

10 – Mancal de rolamento axial;

11 – Mancal de rolamento axial com fundo fechado;

12 – Mancal de rolamento axial;

13 – Mecanismo para acoplamento e desacoplamento do eixo vertical;

14 – Suporte de fixação do mancal do circulador.

15 – Engrenagem cônica com  $Z_{15} = 57$  dentes.

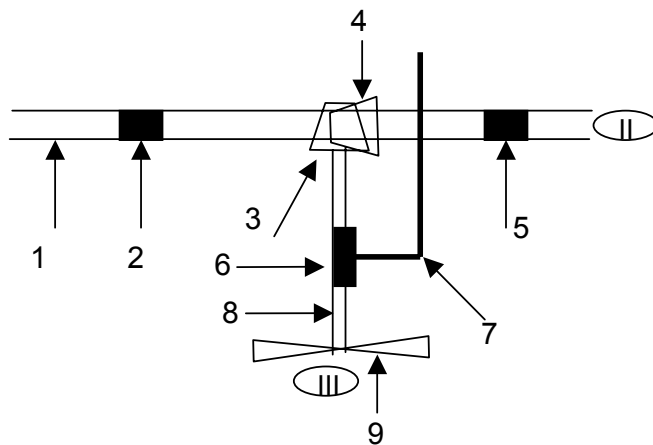


Figura 4.8 - Detalhe da transmissão do movimento dos circuladores

- 01 – Eixo horizontal de 1 (uma) polegada;
- 02 – Mancal axial de rolamento;
- 03 – Engrenagem cônica com  $Z_5 = 13$  dentes;
- 04 – Engrenagem cônica com  $Z_{15} = 57$  dentes;
- 05 – mancal axial de rolamento;
- 06 – Mancal tipo “y” de rolamento;
- 07 – Suporte de sustentação do mancal do circulador;
- 08 – Eixo do circulador de 1/2 polegada;
- 09 – Ventilador com três pás.

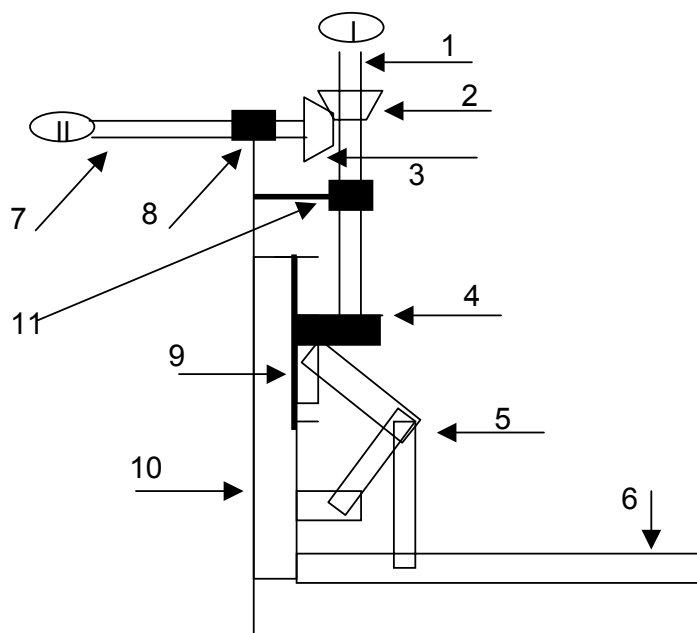


Figura 4.9 - Detalhe do mecanismo para acoplamento e desacoplamento do eixo vertical/horizontal.

- 01 – Eixo vertical acionado pelo rotor;
- 02 – Engrenagem cônica  $Z_4 = 95$  dentes;
- 03 – Engrenagem cônica com  $Z_6 = 19$  dentes;
- 04 – Mancal de rolamento axial acoplado junto ao suporte de sustentação/ limitação do eixo vertical;
- 05 – Mecanismo articulável para acionamento do suporte de sustentação;
- 06 – Dispositivo tipo alavanca do eixo vertical/ horizontal para acionamento do sistema de acoplamento/desacoplamento;
- 07 – Eixo horizontal;

08 – Mancal axial de rolamento;

09 – Dispositivo de deslizamento (trilho) para movimento do suporte de sustentação;

10 – Parede do galpão;

11 – Mancal guia do eixo vertical (deslizamento) e suporte de sustentação.

#### 4.2.1 Análise do projeto

Valores aproximados dos rendimentos dos elementos de máquina, segundo Sarkis Melconian (2000) e Pro-tec (1984).

$n_m = 0,98$  (mancais de escorregamento, par)

$n_{rol} = 0,99$  (mancais de rolamentos, par)

$n_e = 0,98$  (engrenagens cônicas)

© Análise do Rotor

\* Potencial médio estimado

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{V}^3 \cdot A \Rightarrow$$

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \cdot 1,3 \cdot (5,5)^3 \cdot 12 \Rightarrow \bar{P} = 1297,7 \text{ W}$$

$\rho \Rightarrow$  Densidade do ar

$\bar{V} \Rightarrow$  Velocidade média diária do vento

$A \Rightarrow$  Área do rotor

\* Velocidade angular média

$$\bar{\Omega} = \bar{V} / R = 5,5 / 0,5 = 11 \text{ rad/s}$$

\* Freqüência média

$$\bar{\Omega} = 2\pi \cdot \bar{f} \Rightarrow \bar{f} = 2\pi / \bar{\Omega} \Rightarrow \bar{f} = 2\pi / 3,6 \Rightarrow \bar{f} = 1,75 \text{ Hz} \text{ ou } 105 \text{ rpm}$$



\* Rotação do eixo “I”

Mesma do rotor  $\Rightarrow n_1 = 105 \text{ rpm}$

\* Rotação do eixo “II”

De acordo com o livro elementos de máquinas, Sarkis Melconian (2000), pág. 131 a relação de transmissão máxima que pode ser utilizada é 1: 6, logo, usaremos 1: 5.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{Z_3}{Z_2} \Rightarrow n_2 = 105.95 / 19 \Rightarrow n_2 = 525 \text{ rpm}$$

\* Rotação no eixo III

$$\frac{n_2}{n_3} = \frac{Z_5}{Z_4} \Rightarrow n_3 = 525.57 / 13 \Rightarrow n_3 = 2302 \text{ rpm}$$

\* Cálculo do rendimento do eixo “I”

- No eixo I temos a rotação do rotor  $\eta_r = 100\%$ , dois pares de mancais deslizante e uma engrenagem.

$$\eta_1 = \eta_r \cdot \eta_m^2 \cdot \eta_e \Rightarrow \eta_1 = 1.0,98^2 \cdot 0,99 = 0,95$$

\* Cálculo do rendimento do eixo “II” (horizontal)

- Considerando o sistema de transmissão deste o início. Assim, até o eixo II, temos: dois pares de mancais lisos um par de engrenagens, quatro pares de mancais rolamentos e três engrenagens.

$$\eta_2 = \eta_m^2 \cdot \eta_e^2 \cdot \eta_m^4 \cdot \eta_e^3 \Rightarrow \eta_2 = (0,98)^2 \cdot (0,98)^2 \cdot (0,99)^4 \cdot (0,98)^3 \Rightarrow \eta_2 = 0,83$$

\* Cálculo do rendimento do eixo “III” (ventiladores)

- Considerando o sistema de transmissão deste o início. Assim, até o eixo III, temos; todos os itens acima mais uma engrenagem e um mancal de rolamento.

$$\eta_3 = \eta_2 \cdot \eta_e \cdot \eta_{rol} \Rightarrow \eta_3 = (0,83) \cdot (0,98) \cdot (0,99) \Rightarrow \eta_3 = 0,80$$

Obs: todos os ventiladores terão em média uma porcentagem de 0,80, ou seja ,

$$\eta_3 = \eta_4 = \eta_5$$

\* Cálculo da Potência no eixo “I”

$$N_1 = \eta_1 \cdot N_r = 0,95 \cdot 1297,7 = 1232,8 \text{ W}$$

\* Cálculo da Potência no eixo “II”

$$N_2 = \eta_2 \cdot N_r = 0,83 \cdot 1297,7 = 1077,1 \text{ W}$$

\* Cálculo da Potência no eixo “III”

$$N_3 = \eta_3 \cdot N_r = 0,80 \cdot 1297,7 = 1038,16 \text{ W}$$

\* Cálculo do Torque

- No eixo “I”

$$M_{t1} = 716,2 \cdot N_1 / n_1 = 716,2 \cdot 1232,8 / 750.105 = 11,21 \text{ kgf.m ou } 1121 \text{ kgf.cm}$$

- No eixo “II”

$$M_{t2} = 716,2 \cdot N_2 / n_2 = 716,2 \cdot 1077,1 / 750.525 = 1,959 \text{ kgf.m ou } 195,9 \text{ kgf.cm}$$

- No eixo “III”

$$M_{t3} = 716,2 \cdot N_3 / n_3 = 716,2 \cdot 1038,16 / 750.2302 = 0,43 \text{ kgf.m ou } 43 \text{ kgf.cm}$$

## 4.2.2 Resultados obtidos

Tendo visto no capítulo 3, seção 4 a possível avaliação empírica da velocidade do vento para diminuir as possibilidades de erros sendo como último recurso, para quando não houver nenhuma possibilidade de obter os dados das massas de ar, na localização e implementação de um aerogerador em determinado local pretendido.

Como os dados adquiridos para análise do nosso estudo foram referentes ao mês de dezembro fornecido pelo comando de base da aeronáutica de São Luís, localizado no aeroporto no bairro do São Cristóvão. Observamos que a média das massas de ar não ultrapassou a velocidade de 6m/s, lançado no gráfico do padrão diário, verificamos uma variação relativamente aceitável tendo um pico maior entre os dias quatorze e dezessete, na distribuição de frequência conforme a tabela observamos que a velocidade com mais frequência esta em torno de 4 a 7 m/s, conforme beaufort é classificada como brisa moderada. Por isso que o pico fica de maneira bem elevada onde se nota a diferença em relação às outras ocorrências que são bem razoáveis, partindo assim para a frequência acumulada nota-se que os intervalos superiores a sete não modificam bruscamente devido a ocorrência mínimas de velocidades baixas neste período sendo de maneira bem satisfatória para o nosso estudo onde com essa velocidade a massa de ar não causa muito transtorno assim sendo para haver uma compreensão melhor colocamos esta estatística em gráficos, com a estimação do potencial eólico nos proporcionando de quanto é preciso para designar ou estipular as rotações dos circuladores e usando os acoplamentos das engrenagens conforme Sarkis Melconian (2000), obtivemos um rendimento dos circuladores em torno de oitenta por cento com potencial bom para os seus movimentos.

## Conclusão

A variação da potência com o cubo da velocidade do vento implicam em um cuidado especial na escolha do lugar onde vai ser implantado o projeto. Obstáculos próximos podem interferir na eficiência do sistema, se não forem levados em consideração. Outro fator importante é o perfil logaritmo do vento, que pode levar a grandes erros, quando negligenciados, tanto nas medições quanto na implementação do projeto.

O levantamento estatístico dos dados coletados é extremamente importante porque é a partir dos resultados obtidos que se poderá prever a viabilidade do projeto, principalmente para aproveitamento em larga escala.

Quanto à geração elétrica para utilização direta, é necessário a retificação e/ou posterior conversão devido à constante variação na velocidade do vento, que induz, tanto em máquinas síncronas quanto assíncronas, variação na frequência de saída.

Também no que diz respeito ao acoplamento à rede, no caso de se trabalhar com velocidades constantes, o comprometimento entre a velocidade síncrona da máquina, fixada pela rede, e o seu torque, que deve acompanhá-la, implica em um sistema de controle da velocidade do rotor eólico para que a maior parte da energia disponível, seja aproveitada.

Portanto, mesmo com algumas desvantagens apresentada por este tipo de energia, a utilização da energia eólica para geração de energia seja elétrica ou outra qualquer é totalmente viável quando o regime de vento da região permitir. E, no que diz respeito à sua utilização para alimentação direta, o procedimento é relativamente simples, demandando pouco ou quase nenhum recurso de manutenção, com exceção em casa da energia elétrica é claro, das baterias, que continuam sendo o grande problema na utilização de recursos renováveis.

A despeito do potencial eólico do Maranhão, infelizmente não se dispunha de uma quantidade significativa de dados para a análise. Mas com nossa análise da para termos uma conclusão que bem viável e satisfatório o uso da energia eólica.

## Referências Bibliográficas

- Acioli, J. L. *Fontes de energia*. Brasília: Editora da Universidade de Brasília, 1994. 1389 p.
- Allen, J. Bird, R. A the prospects for generation of elecicity from wind energy in the United Kingdom. *Energy Paper*. Department of energy, Londn, 1977. 66 p.
- Antunes, Izildo. *Elementos de máquinas/ Izildo Antunes, Marcos A. C. Freire*.São Paulo, Érica Ltda, 1997.
- Branco, S. M. *Energia e meio ambiente*. São Paulo: Moderna, 1990. 46 p.
- British Wind Energy Association. *Guia de Fontes de Informações tecnológicas*. São Paulo, 1995, 220p.
- Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. *Guia de fontes de informações tecnológicas*. São Paulo, 1995, 220 p.
- Energia Eólica: banco de dados. Disponível em: <[http://www.Centros 5 pretec.mec.es/iesvitoria kente.htm](http://www.Centros5pretec.mec.es/iesvitoria.kente.htm)>. Acesso em: 05 março 2002.
- Eólica: banco de dados.Disponível em: <<http://cdcc.sc.usp.br/escolas/juliano/energia>>. Acesso em: 12 outubro de 2001.
- Eólica: banco de dados.Disponível em: <<http://Windpower.org/es/tom/energia>>. Acesso em: 15 março de 2002.
- Física. Banco de dados. Disponível em: <[http://Br. Geocites. Com/sala de Física.htm](http://Br.Geocites.Com/sala%20de%20Fisica.htm)> Acesso em: 21 outubro 2002
- Fox, Robert W., McDonald, Alan T. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. School of Mechanical Engeneering, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Quinta edição 2001. 498 p.
- Fundação Universidade do Rio Grande. *Estudo da viabilidade do aproveitamento da energia eólica na região da bacia da Lagoa Mirim*, Brasil, Rio Grande, 1982. 39 p.

- Hirata, M. H. *Energia eólica: conversão e aproveitamento*. Apostila do Curso de Economia e Tecnologia da Energia. Salvador: AIE/COPPE-UFRJ, 1984. 144 p.
- Incropera, Frank P., Dewitt, David P. *Fundamentos de transferência de Calor e de Massa*. School of Mechanical Engineering, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Quarta edição 1996. 475 p.
- Ismail, Abdel Radi Kamal. *Técnicas de medidas e instrumentação*. Campinas, SP: Ed. do autor, 2000. 360 p.
- Ismail, Abdel Radi Kamal. *Técnicas experimentais em fenômenos de transferência*. Campinas, SP: Ed. do autor, 2000. 480 p.
- Justus, C. G. *Winds and system performance*. Philadelphia: the Franklin Institute press, 1978. 120 p.
- Lysen, E. H. *Introduction to wind energy*. Amersfoort: CWD, 1983. 310 p.
- Macedo, Pierre. *Estudo das estratégias de controle de um SCEE de pequeno porte pra geração elétrica, aplicado ao carregamento de bateria*. Dissertação de Mestrado. Campina Grande, Universidade Federal da Paraíba, 1989. 151 p.
- Melconian, Sarkis. *Elementos de Máquinas*. São Paulo: Érica Ltda, 2000.
- Nelson, V. Gilmore, E. H. Starcher, K. *Introduction to wind energy*. Canion: Alternative Energy Institute, 1994. 39 p.
- Niemann, Gustav. *Elementos de Máquinas*. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, Volume II e III. 1971.
- Nóbrega, J.C.C *Sistema de Conversão de energia eólica com transmissão elétrica para bombeamento de água com controle de campo a fluxo constante*. Dissertação de Mestrado. Campina Grande, Universidade Federal da Paraíba, 1989. 139 p.
- Park, J. *The Wind power book*. Palo Alto: Cheshire Books, 1981. 253 p.
- Pereira, Oswaldo. *A experiência nacional na disseminação de energias renováveis solar e*

- eólica*. CRESESB informe, Rio de Janeiro, n.1.p.1-8.set/1995.
- Projeto eólico piloto de 4,2 no porto de mucuripe. Fortaleza, 1994. 14 p.
- Pro-tec, *Mecânica Aplicada*. São Paulo, 1984.
- Rothatgi, J.S. *A metodologia de estimativa do rendimento de energia para um sistema de conversão de energia eólica*. Dissertação de Mestrado. Natal Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 1982. 111 p.
- Rothatgi, J.S., Nelson, V. *wind characteristics: na analysis for the generation of wind power*. Canyon: Alternative Energy Institute/West Texas A & M University, 1994. 294 p.
- Sandhu, D. Silveira, M. Perspectiva de aplicação de energia eólica em meio rural da América Latina. IN: *V congresso latino-americano de energia solar e energia eólica. Anais. Chile*, 1986. p. 16-222.
- Scarlato, F.C., Pontini, J.A. *Do nicho ao lixo: ambiente sociedade e educação*. São Paulo: Atual, 1992. 117 p.
- Scheer, H. *O manifesto solar: energia renovável e a renovação da sociedade*. Rio Janeiro: CEPTEL, 1995. 263 p.
- Seminário Sobre as Aplicações das Energias Solar e Eólica Autônomas e Desenvolvimento de Projetos. *Manual de instrução*. São Luís: USAID/IIE/CEPEL, 1996 150 p.
- Sistema Know How. *O gerador eólico de Darrieus*. Belo Horizonte, 1996. 19 p.
- Stevenson, W.J. *Estatística aplicada à administração*. São Paulo: Harper & Row do Brasil, 1981. 495 p.
- Stoecker, W. F., Jones, J. W. *Refrigeração e ar condicionado*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985, 481p.

# ANEXOS



Ver anexo I



Figura 1.1 – Rotor Savonius Implementação UFMA

Ver anexo II



Figura 2.10 – Rotor Savonius de dois estágios

Ver anexo III

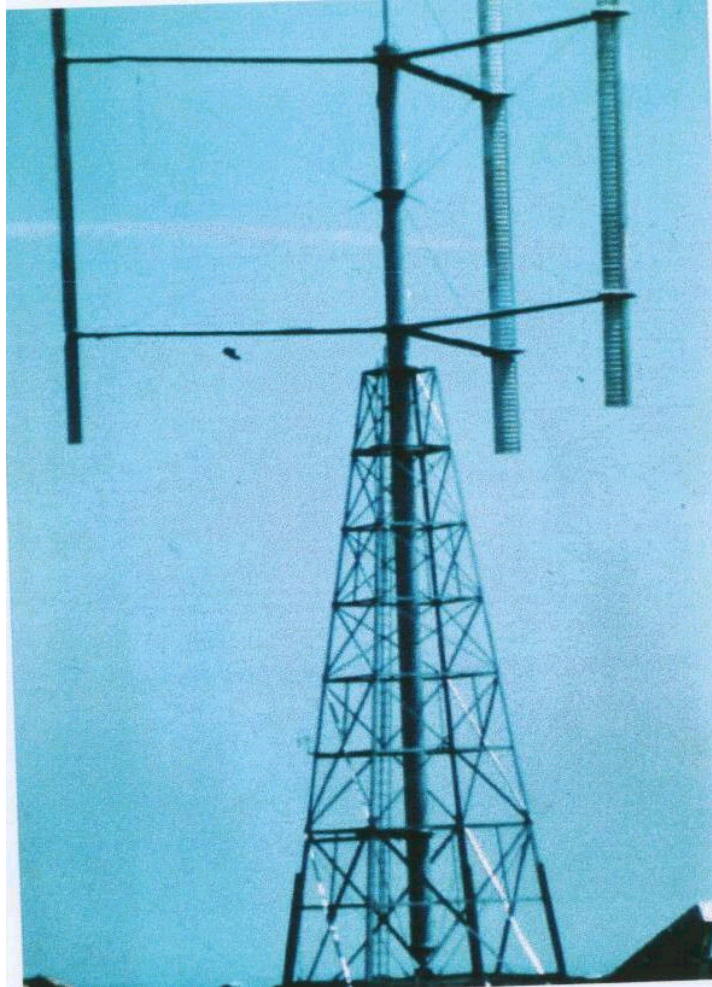


Figura 2.14 – Rotor Darrieus Hélices planas

Ver anexo IV

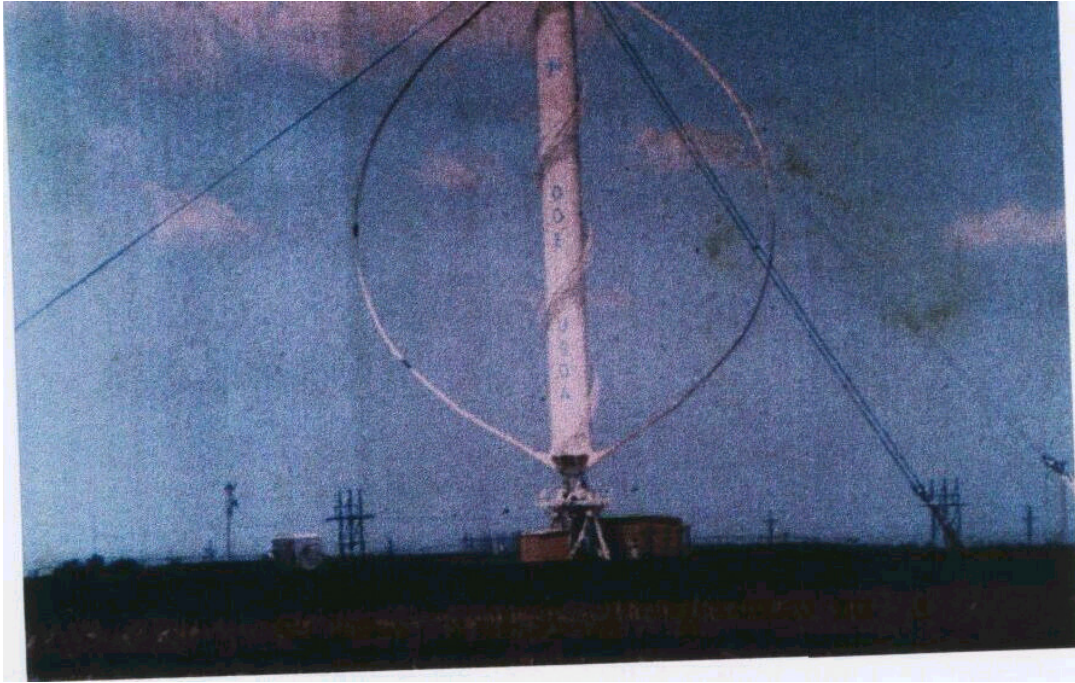


Figura 2.15 – Rotor Darrieus Hélices troposkein

Ver anexo V

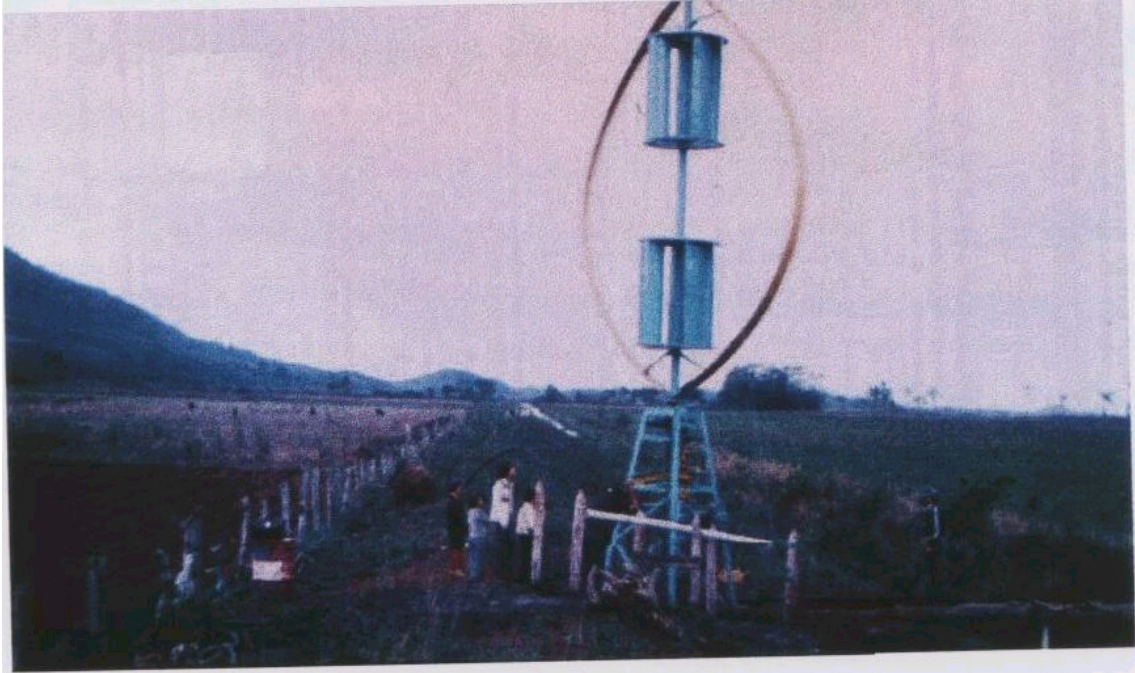


Figura 2.17 – Rotor Darrieus “Hélices Troposkein” com Savonius

Ver anexo VI



Figura 2.18 – rotor Multipás

Ver anexo VII



Figura 2.19 – Rotor tripás de grande porte

Ver anexo VIII



Figura 2.20 – Fazenda eólica para geração de eletricidade em grande porte



Ver anexo IX



Figura 2.21 – Fazenda eólica ultramarina

Ver anexo X



Figura 2.22 – Aero geradores de eixo horizontal para geração de eletricidade acoplado diretamente com a carga.

Ver anexo XI



Figura 2.23 – Pá de cauda servindo como controle de orientação.