

**Universidade Santa Cecília**

**PROJETO DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA**

**Santos - 2006**

# **PROJETO DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA**

**Projeto de Graduação do  
Curso de Engenharia Industrial  
Mecânica.**

Alison Alves dos Santos  
Daniel Silva Ramos  
Nilson Tadeu Fernandes dos Santos  
Pedro Porto de Oliveira

**Santos – 2006**

## **Agradecimentos**

Prof.º Valmir Demarchi

Prof.º Carlos Alberto Amaral Moino

# Sumário

<b>1) Introdução .....</b>	<b>01</b>
1.1) Objetivos .....	01
1.2) Introdução a Energia Eólica .....	01
1.3) Energia renovável .....	02
1.4) Origens históricas.....	03
<b>2) Energia Eólica no Brasil .....</b>	<b>06</b>
2.1) Potencial Eólico brasileiro .....	07
2.2) Aproveitamento da energia eólica no Brasil.....	09
2.3) Projetos de energia eólica no Brasil.....	10
2.4) O custo da energia eólica no Brasil.....	11
<b>3) Ventos .....</b>	<b>13</b>
3.1) Tipos de Ventos.....	13
3.1.1) <i>Ventos globais</i> .....	13
3.1.2) <i>Ventos de Superfície</i> .....	14
3.1.3) <i>Ventos locais</i> .....	14
3.2) Fatores que influenciam a energia proveniente do vento.....	16
3.2.1) <i>Densidade do ar</i> .....	16
3.2.2) <i>Área de varrimento do rotor</i> .....	16
3.2.3) <i>Distribuição da pressão no rotor</i> .....	16

3.3) Lei de BETZ.....	17
3.4) Armazenamento de Energia.....	18
<b>4) Funcionamento .....</b>	<b>19</b>
4.1) Sistemas de Energia eólica.....	19
4.2) Aplicações do sistema Eólico.....	22
4.3) Sistemas Isolados .....	23
4.4) Sistemas Híbridos.....	23
4.5) Sistemas Interligados à Rede.....	24
4.6) Relação entre velocidade do vento e altura.....	24
4.7) Circulação global do vento.....	26
4.8) Turbina de vento.....	26
4.9) Geradores .....	29
4.10) Rotor .....	31
4.10.1) Rotores de Eixo Horizontal.....	31
4.10.2) Rotores de Eixo Vertical.....	32
4.11) Transmissão e Caixa Multiplicadora.....	32
4.12) Mecanismos de Controle .....	33
4.13) Controle de Passo.....	34
4.14) Controle Estol .....	36

<b>5) Meio Ambiente</b> .....	<b>38</b>
5.1) Recursos Energéticos e Meio Ambiente.....	38
5.2) Impactos Socioambientais.....	38
<b>6) Aerogerador com rotor Savonius</b> .....	<b>42</b>
6.1) Rotor de Eixo Vertical .....	42
6.2) Origens do rotor Savonius .....	43
6.3) Características do rotor Savonius .....	44
6.4) Exemplos de poder disponível de Rotores Savonius .....	49
<b>7) Construção de uma Unidade Eólica Savonius</b> .....	<b>55</b>
7.1) Objetivos .....	55
7.2) Montagem do Aerogerador Savonius.....	57
<b>8) Conclusão</b> .....	<b>64</b>
<b>9) Bibliografia</b> .....	<b>66</b>

# Índice de Figuras

## 1) Introdução

1.1) As forças aerodinâmicas .....	42
------------------------------------	----

## 2) Energia Eólica no Brasil

2.1) Aerogeradores construídos na cidade de Taíba no Ceará.....	7
2.2) Caracterização dos recursos eólicos no território brasileiro.....	8
2.3) Principais cidades com projetos para instalação de usinas eólicas.....	11

## 3) Ventos

3.1) Brisas Marinhas ao dia.....	15
3.2) Brisas Marinhas a noite.....	15

## 4) Funcionamento

4.1) Exemplo de uma instalação eólica.....	19
4.2) Diversas partes constituintes de um rotor de sistema eólico.....	22
4.3) Diferentes ares e relação entre suas alturas e velocidades de ventos.....	25
4.4) Turbina Savonius de eixo vertical.....	27
4.5) Turbina Darrieus de eixo vertical.....	27
4.6) Turbina Darrieus de eixo vertical e pá reta.....	28
4.7) Turbina de eixo horizontal tripá com gerador de 75KW.....	28

4.8) Fluxo aderente ao perfil.....	35
4.9) Fluxo separado (estol) em volta do perfil.....	36

## **5) Meio Ambiente**

5.1) Aerogerador de múltiplas pás.....	39
5.2) Aerogerador de hélice de alta velocidade.....	39
5.3) Impacto visual de uma Estação Eólica.....	40
5.4) Agrupamento de aerogeradores sobre água.....	41

## **6) Aerogerador com rotor Savonius**

6.1) Perfil da hélice de um rotor do tipo savonius.....	42
6.2) Unidade eólica com rotor savonius de fazenda.....	43
6.3) Pás com perfil de pá semicircular com fixação.....	45
6.4) Perfil de pá semicircular com passagem de ar.....	45
6.5) Perfil de pá com aletas 45.....	45
6.6) Unidade Eólica Caseira.....	47
6.7) Foto de um Aerogerador Savonius na Inglaterra .....	48
6.8) Aerogerador Savonius no Japão.....	48
6.9) Coeficientes de Potência para várias configurações de rotores.....	49
6.10) Gráfico de Energia de entrada em função da velocidade do vento .....	51
6.11) Gráfico de energia de entrada em função da velocidade do vento .....	52



## **7) Construção de uma Unidade Eólica Savonius**

7.1) Projeto de uma mini unidade eólica (Savonius) .....	56
7.2) Foto de um Mini aerogerador eólico Savonius .....	57
7.3) Foto do rolamento posicionado no respectivo manca l.....	59
7.4) Foto da estrutura do aerogerador Savonius.....	60
7.5) Foto dos tambores cortados (pás) .....	60
7.6) Foto dos tambores Fixos no Eixo Vertical do rotor Savonius .....	61
7.7) Vista dinâmica do projeto .....	62

# 1) Introdução

## 1.1) Objetivos

Este trabalho tem como objetivo a análise do aproveitamento da energia eólica, que como todas as demais energias possuem certas vantagens e desvantagens; o que a faz diferente não é só um fato ou outro, é o conjunto como um todo. Além de esta ser uma fonte de energia renovável, ela pode ser utilizada para o fornecimento de energia para pequenas populações onde não há um acesso de energia direto e também não necessita de grandes investimentos.

O aproveitamento deste tipo de energia decorrente dos avanços tecnológicos do setor contribuiu bastante para a definição deste tema como um trabalho de estudo em fase do término do curso de graduação de Engenharia. Com isso, o foco desse projeto é ressaltar a importância do uso da energia renovável neste início do século XXI e demonstrar o diferencial da energia proveniente dos ventos.

## 1.2) Introdução a Energia Eólica

Um dos grandes tormentos do mundo de hoje é a questão relativa à energia: o aproveitamento desta ainda não atingiu um nível satisfatório, visto que a imensa maioria da energia utilizada no planeta é de origem não renovável, seja de fonte mineral ou atômica.

Atualmente, quando falamos em geração de energia, em qualquer parte do mundo a primeira visão que se tem é a de maior distribuição possível juntamente com a maior economia envolvida. Esses foram os principais fatores que nos levaram a desenvolver um trabalho relacionado à energia renovável. E, através desse conhecimento aponta-se a *energia eólica* como um tipo de energia bem diferenciado dos demais e que vem indicando resultados significativos de crescimento tanto em países desenvolvidos como em países emergentes.

Esta última vantagem pode ser explorada por pessoas que queiram montar um módulo de energia próprio ao redor de suas casas e não precisar mais se filiar às empresas. Mas

claro também há desvantagens que devem ser levadas em conta, como o barulho provocado, que não é muito elevado se o módulo for freqüentemente monitorado, a área ocupada que deve ser específica (sem muitas elevações e habitações por perto), e principalmente que hoje como esta tecnologia ainda não está totalmente desenvolvida e o seu custo ainda é um pouco elevado, de modo que é muito difícil uma população ter o seu próprio fornecimento de energia elétrica gerada por meios eólicos e também que seu aproveitamento ainda não é satisfatoriamente elevado, entretanto esses fatores podem ser superados com o desenvolvimento desta tecnologia.[1]

### **1.3) Energia renovável**

Para esclarecimentos sobre os tipos de energias que dispomos atualmente, as mesmas são divididas basicamente em dois tipos de acordo com as suas fontes.

Uma delas é a energia de fonte não-renovável onde se pode dizer que são aquelas que se encontram na natureza em quantidades limitadas e se extinguem com a sua utilização como, por exemplo, os combustíveis fósseis (carvão, petróleo bruto e gás natural) e o urânio, que é a matéria-prima necessária para obter a energia resultante do processo de fusão nuclear.

O outro tipo de energia utilizada em larga escala é a energia renovável onde não é possível estabelecer um fim temporal para a sua utilização como, por exemplo, o calor emitido pelo sol, a existência do vento, das marés ou dos cursos de água sendo assim consideradas, justamente, inesgotáveis, mas limitadas em termos da quantidade de energia que é possível extrair em cada momento.

Para justificar o desenvolvimento de energias do tipo “renováveis” podemos analisar, primeiramente, a atual dependência que temos de recursos energéticos não-renováveis que pela estimativa se pode prever a futura escassez que haverá dos mesmos. Outro fator importante é a busca permanente de novas opções tecnológicas energéticas que não geram degradação da atmosfera, do solo, de recursos hídricos e do meio ambiente de uma maneira geral, sempre levando em conta as fontes de energia intermináveis que temos no planeta. [9]

Apesar desses fatores, as fontes de energia renováveis ainda são pouco utilizadas devido aos custos de instalação, à inexistência de tecnologias e redes de distribuição experimentadas e, em geral, ao desconhecimento e falta de sensibilização para o assunto por parte dos consumidores e dos municípios.

Ao ritmo que cresce o consumo dos combustíveis fósseis, e tendo em conta que se prevê um aumento ainda maior em médio prazo, colocam-se dois importantes problemas: o primeiro são questões de ordem ambiental que se destacam mais detalhadamente a seguir e o segundo é o fato dos recursos energéticos fósseis serem esgotáveis. As fontes de energias renováveis surgem como uma alternativa ou complemento às convencionais. [4]

#### **1.4) Origens Históricas**

É impossível apontar o preciso momento na história em que foi descoberta ou desenvolvida a energia proveniente dos ventos. Mas é possível analisar e relacionar alguns períodos de maior incidência do uso desta energia.

Os princípios de estudos científicos são relacionados com a tentativa de entender o meio ambiente; infelizmente, na época, os homens não eram incentivados para a autocrítica e não praticavam a experimentação.

Acredita-se que foram os egípcios os primeiros a fazer uso prático do vento. Em torno do ano 2800 a.C. eles começaram a usar velas para ajudar a força dos remos dos escravos. Eventualmente, as velas ajudavam o trabalho da força animal em tarefas como moagem de grãos e bombeamento de água. [2]

Os persas começaram a usar a força do vento poucos séculos antes de Cristo, e por volta de 700 d.C. eles estavam construindo moinhos de vento verticais elevados para serem usados como força nas mós, na moagem de grãos. [2]

Outras civilizações do oriente médio, mais notavelmente os muçulmanos, continuaram onde persas deixaram e construíram seus próprios moinhos de vento. Com o retorno das cruzadas, pensou-se que eles tinham trazido idéias sobre moinhos de vento e

desenhos para a Europa, mas provavelmente foram os holandeses que desenvolveram o moinho de vento horizontal, com hélices, comuns nos campos dos holandeses e ingleses.

As forças do vento e da água logo se tornaram a fonte primária da energia mecânica medieval inglesa. Durante esse período, os holandeses contaram com a força do vento para bombeamento de água, moagem de grãos e operações de serraria.

Os primeiros moinhos de vento nas novas colônias inglesas eram duplicatas das máquinas inglesas. Muitos dos desenhos melhorados na Holanda eram virtualmente ignorados. Por volta de 1850, Daniel Halliday começou a desenvolver o famoso moinho de vento americano de fazenda. Usado principalmente para bombear água, essa máquina é o familiar moinho de vento multi-lâmina, ainda visto hoje em muitas áreas rurais. Mesmo hoje, as fazendas de gado, não seriam possíveis em muitas partes da América e Europa sem essa máquina. [2]

A geração de eletricidade pelo vento começou em torno do início do século, com alguns dos primeiros desenvolvimentos creditados aos dinamarqueses. Pelo ano de 1930, cerca de uma dúzia de firmas americanas estavam fazendo e vendendo esses "carregadores de vento", na maior parte aos fazendeiros do ventoso Great Plains. Tipicamente, essas máquinas poderiam fornecer até 1000 Watts de potência quando o vento estivesse soprando. [2]

Muitos países europeus construíram enormes geradores de vento. Durante os anos 1950 e 1960, os franceses construíram desenhos avançados de unidades de 100 kW a 300 kW. Os alemães construíram geradores de vento para prover força extra para sua linha de utilidades, mas por causa da rígida competição dos geradores de fluido fóssil, essas máquinas experimentais foram eventualmente descartadas.[2]

Uma das mais memoráveis máquinas de vento, foi a máquina de Smith-Putman, construída perto de Rutland, Vermont- USA, durante os anos 1940. Esta enorme máquina com lâminas de 50 m, foi desenhada para fornecer 1250 kW, para a malha de forças de Vermont.

## **2) Energia Eólica no Brasil**

Atualmente, na grande maioria dos casos, a utilização da energia eólica ocorre com a finalidade de gerar energia elétrica para, possivelmente, bombear água, aquecer ambientes, ligar máquinas diversas, moer grãos, usos domésticos ou de pequenas empresas, entre outros. Isso ocorre pelo fato da eletricidade ser uma forma muito cômoda e usual de

distribuição de energia [8]. O Brasil é hoje o 12º maior consumidor de energia do mundo, com um nível de consumo equiparado ao da Itália e da Espanha.

No País, embora o aproveitamento dos recursos eólicos 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 de energia eólica ainda não explorado.

Grande atenção tem sido dirigida para o estado do Ceará, por ter sido um dos primeiros locais a realizar um programa de levantamento do potencial de energia eólica através de medidas de vento com modernos sensores especiais. Entretanto, não foi apenas na costa do Nordeste que áreas de grande potencial eólico foram identificadas. Em Minas Gerais, por exemplo, uma central de energia eólica está em funcionamento, desde 1994, em um local (afastado mais de 1000 km da costa), com excelentes condições de vento.

A capacidade instalada no Brasil está acima de 20 MW, com turbinas eólicas de médios e grandes portes conectadas à rede elétrica. Além disso, existem dezenas de turbinas eólicas de pequeno porte funcionando em locais isolados da rede convencional para aplicações diversas, tais como bombeamento, carregamento de baterias, telecomunicações e eletrificação rural.[5]

No Brasil podemos destacar a usina energia eólica de Taíba, no Ceará - a primeira do mundo construída sobre dunas de areia. A capacidade instalada do complexo, inaugurado em 1999, é de 5 MW , como pode ser observado na figura 2.1.



*Figura 2.1 – Aerogeradores construídos sobre dunas de areia na cidade de Taíba no Ceará.[6]*

## **2.1) Potencial Eólico brasileiro**

A avaliação precisa do potencial de vento em uma região é o primeiro e fundamental passo para o aproveitamento do recurso eólico como fonte de energia.

No Brasil, assim como em várias partes do mundo, quase não existem dados de vento com qualidade para uma avaliação do potencial eólico. Os primeiros sensores especiais para energia eólica foram instalados no Ceará e em Fernando de Noronha, no estado de Pernambuco, apenas no início dos anos 90. Os bons resultados obtidos com aquelas medições favoreceram a determinação precisa do potencial de energia eólica daqueles locais e a instalação de aerogeradores. Vários estados brasileiros seguiram os passos de Ceará e Pernambuco e iniciaram programas de levantamento de dados de vento.[5]

A análise dos dados de vento de vários locais no Nordeste confirmou as características dos existentes na região, velocidades médias de vento altas, pouca variação nas direções do vento e pouca turbulência durante todo o ano. Diante da importância da caracterização dos recursos eólicos no Brasil, foi lançado o atlas eólico brasileiro, como pode ser visto na figura 2.2. Este atlas tem como objetivo principal desenvolver modelos atmosféricos, analisar dados de ventos e elaborar mapas eólicos. Atualmente podem ser

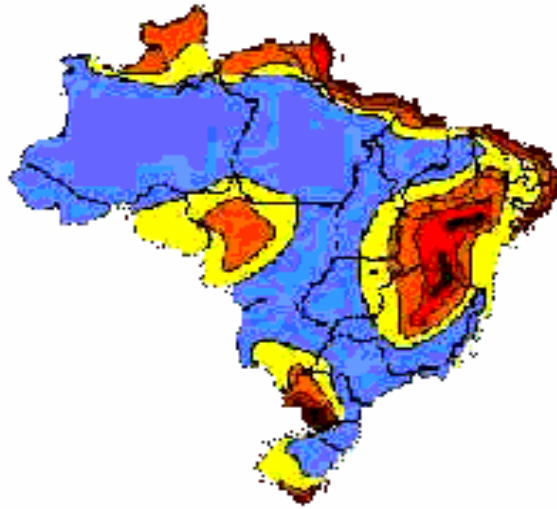


destacados alguns projetos implementados no Brasil como pode ser observado na tabela 2.1.[5]

*Tabela 2.1- Projetos de geração de energia eólica Implementados no Brasil.*

<b>Estado</b>	<b>Local</b>	<b>Capacidade Instalada</b>	<b>Produção anual prevista</b>	<b>Estado atual</b>
<b>Ceará</b>	Taíba	5MW	17500MWh	Operação
<b>Ceará</b>	Prainha	10MW	35000MWh	Operação
<b>Ceará</b>	Mucuripe	1,2MW	3800MWh	Operação
<b>Ceará</b>	Paracurú	30MW	-----	Estudo
<b>Ceará</b>	Camocim	30MW	-----	Estudo
<b>Minas Gerais</b>	Morro Camelinho	1,0MW	800MWh	Operação
<b>Pará</b>	Vila Joanes	40KW	32MWh	Operação
<b>Pará</b>	Costa NE	100MW	-----	Estudo
<b>Paraná</b>	Palmas I	2,5MW	7000MWh	Operação
<b>Paraná</b>	Palmas II	9,5MW	-----	Estudo
<b>Paraná</b>	Palmas III	75MW	-----	Estudo
<b>Pernambuco</b>	F.Noronha	75KW	60MWh	Operação
<b>Rio de Janeiro</b>	Cabo Frio	10MW	-----	Estudo

*Fonte: CBEE – Centro Brasileiro de Energia Eólica*



---

*Figura 2.2 - Caracterização dos recursos eólicos no território brasileiro. Área marrom velocidade do vento maior que 8,5 m/s, vermelho varia de 7,0 a 8,5m/s, laranja de 6,0 a 7,0 m/s, amarelo de 5,0 a 6,0m/s e Azul 5,0 m/s. [1]*

## **2.2) Aproveitamento da energia eólica no Brasil.**

Com o crescimento da demanda e do consumo de energia em todo o mundo (notadamente no Brasil), a crescente escassez de combustíveis fósseis e não renováveis, as necessidades de controle ambiental, preservação da natureza e crescimento auto-sustentado, e por outro lado, o enorme desenvolvimento da tecnologia Eólica e a constante redução de custos nessa área, o aproveitamento da força dos ventos é um dos setores de tecnologia de ponta que apresenta um dos maiores índices de crescimento relativo na economia global, com um enorme potencial de criação de riquezas ainda inexplorado, como ocorre em nosso país.

O Brasil possui um dos maiores potenciais para aproveitamento Eólico em todo o mundo, já comprovado em diversos estados, bem como pelo desempenho e produção das Usinas Eólicas de Taíba, Prainha e Mucuripe (Ceará), Palmas (Paraná) e Bom Jardim da Serra (Santa Catarina).

O Fator de Capacidade das Usinas Eólicas em regiões de ventos médios anuais superiores a 8m/s, atinge 40% e, em alguns locais como no litoral nordeste do Brasil, em alguns meses chega a atingir até 60%.

No Brasil, os períodos de menor capacidade dos reservatórios das hidrelétricas, coincidem exatamente com os períodos de maiores ventos e portanto de maior geração de energia nas Usinas Eólicas. Essa complementaridade já comprovada entre as fontes eólicas em nosso país, potencializa uma maior confiabilidade e estabilidade do Sistema Elétrico Brasileiro.

Mesmo assim, o Brasil possui uma produção de energia eólica muito pequena em relação a sua capacidade, dos quais (91%), operam comercialmente desde o início de 1999, com grande sucesso, fornecendo energia para o consumo de cerca de 200000 pessoas, no Ceará, no Paraná e em Santa Catarina. [7]

No caso da energia eólica, o local de maior exploração desse tipo de fonte no Brasil é o litoral do Nordeste, onde a intensidade e direção do vento são constantes. O norte da Bahia e de Minas Gerais, o oeste de Pernambuco, o estado de Roraima e o Sul do país também são regiões propícias para a geração de energia a partir do vento [7].

### **2.3) Projetos de energia eólica no Brasil**

Apesar de vários trabalhos e pesquisas científicas realizadas nas décadas de 70 e 80 a geração de energia a partir de turbinas eólicas no Brasil teve início apenas em julho de 1992, com a instalação de uma turbina de 75kW na ilha de Fernando de Noronha, através de iniciativa pioneira do Centro Brasileiro de Energia Eólica - CBEE, os principais projetos de energia eólica no Brasil são mostrados na figura abaixo 2.3. [6]



*Figura 2.3 – Principais cidades com projetos para instalação de usinas eólicas.*

No Brasil, embora o aproveitamento dos recursos eólicos tenha sido feito tradicionalmente com a utilização de cata-ventos multipás para bombeamento d'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. [6]

## **2.4) O custo da energia eólica no Brasil.**

Considerando o grande potencial eólico existente no Brasil, é possível produzir eletricidade a custos competitivos com centrais termoelétricas, nucleares e hidroelétricas. Análises dos recursos eólicos medidos em vários locais do Brasil, mostram a possibilidade de geração elétrica com custos da ordem de US\$ 70 - US\$ 80 por MWh.

O custo da energia elétrica gerada através de novas usinas hidroelétricas construídas na região amazônica será bem mais alto que os custos das usinas implantadas até hoje. Quase 70% dos projetos possíveis deverão ter custos de geração maiores do que a energia gerada por turbinas eólicas. Outra vantagem das centrais eólicas em relação às usinas hidroelétricas é que quase toda a área ocupada pela central eólica pode ser utilizada (para agricultura, pecuária, etc.) ou preservada como habitat natural.

No Brasil, assim como em várias partes do mundo, quase não existem dados de vento com qualidade para uma avaliação do potencial eólico. Os primeiros sensores especiais para energia eólica foram instalados no Ceará e em Fernando de Noronha/Pernambuco apenas no início dos anos 90. Os bons resultados obtidos com aquelas medições favoreceram a determinação precisa do potencial eólico daqueles locais e a instalação de turbinas eólicas. [6]

## **3) Ventos**

### **3.1) Tipos de Ventos**

Para realização de um trabalho acadêmico sobre energia eólica como esse, certamente não se poderia deixar de ressaltar a principal fonte natural de estudo dessa energia que é o vento.

O vento é a principal característica da movimentação das massas de ar existentes na atmosfera e o seu surgimento está diretamente relacionado às variações das pressões de ar que por sua vez é originada termicamente através da radiação solar e das fases de aquecimento das massas de ar.

Em torno de 1 a 2% da energia solar é convertida em energia dos ventos. As regiões onde esse tipo de conversão de energia inicia-se são nas regiões existentes na linha Equador, onde a latitude é 0° e ocorre um maior aquecimento nas massas de ar e posteriormente é estendida para as regiões norte e sul do planeta.

Os ventos podem ser classificados de acordo com suas origens, sendo assim divide-se da seguinte maneira:

#### ***3.1.1) Ventos globais***

O vento que sobe desde o Equador para os pólos, onde circula pelas camadas mais altas da atmosfera, por volta dos 30° de latitude, a força de Coriolis evita que continue em direção aos pólos. Nessa latitude encontra-se uma zona de altas pressões, pelo que o ar começa a descer de novo. [4]

Quando o vento sobe desde o Equador origina uma zona de baixas pressões perto do solo o que atrai ventos do Norte e do Sul. Nos pólos, devido ao ar frio, são originadas zonas de altas pressões. A Troposfera é onde ocorrem todos os fenômenos meteorológicos assim como o efeito de estufa.

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

Estes ventos na realidade são considerados como ventos geostróficos, e ocorrem a partir da altitude dos 1.000 m. A velocidades destes ventos pode ser medida por balões meteorológicos. [4]

### **3.1.2) Ventos de superfície**

Os ventos são muito influenciados pela superfície terrestre até altitudes de 100 metros. A intensidade do vento é reduzida pela rugosidade da superfície da terra e pelos obstáculos. As direções perto da superfície são diferentes das dos ventos geostróficos, devido à rotação da terra.

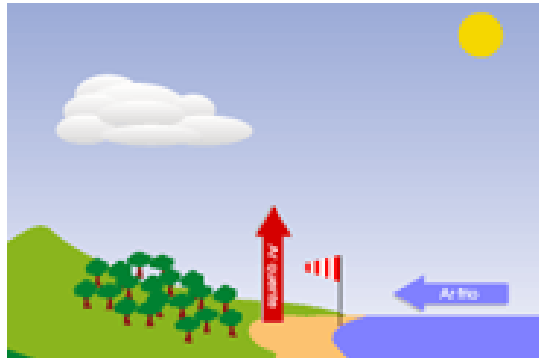
### **3.1.3) Ventos locais**

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

Os ventos locais podem ser subdivididos em dois tipos (neste caso, chamados de “A” e “B”), brisas marinhas e ventos da montanha ou vale:

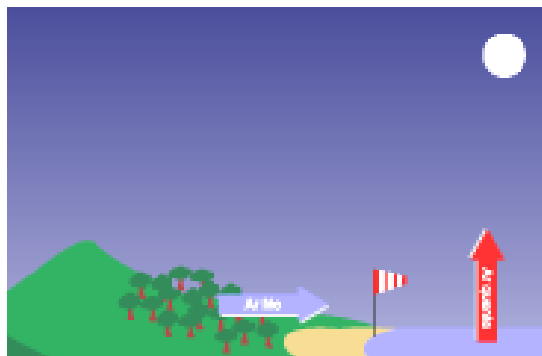
#### **A - Brisas marinhas:**

Durante o dia a terra aquece mais rapidamente pela influência do sol que o mar. O ar sobe e circula para o mar, criando uma depressão ao nível do solo, que atrai o ar frio do mar, conforme figura 3.1. A essa atração é dado o nome de brisa. Nas figuras 3.1 e 3.2 o ar frio está representado pelas setas na posição horizontal e o ar quente está representado pelas setas na vertical.



*Figura 3.1 – Brisas Marinhas ao dia [4]*

Normalmente ao entardecer há um período de calma, quando as temperaturas do solo e do mar se igualam. Durante a noite os ventos sopram em sentido contrário, tendo a brisa terrestre, normalmente, velocidades inferiores, uma vez que a diferença entre a temperatura do solo e do mar é menor.



*Figura 3.2 – Brisas Marinhas a noite [4]*

#### B - Ventos da montanha ou vale:

Um exemplo é o vento da montanha a qual tem origem nos declives orientados ao norte no hemisfério sul e ao sul no hemisfério norte. Quando o ar próximo das montanhas está quente a densidade do ar diminui, sobe seguindo a superfície do declive. Durante a noite a direção do vento inverte-se, passando a descer o declive. Se o fundo do vale for inclinado o ar pode ascender e descender pelo vale, a este efeito é dado o nome de vento canhão.



## **3.2) Fatores que influenciam a energia proveniente do vento**

O aerogerador obtém energia convertendo a energia do vento num binário atuando sobre as pás do rotor. A quantidade de energia transferida ao rotor pelo vento depende, basicamente, dos seguintes fatores:

### ***3.2.1) Densidade do ar***

A energia cinética de um corpo em movimento é proporcional a sua massa, assim a energia cinética do vento depende da densidade do ar e de sua massa por unidade de volume. Quanto mais denso seja o ar, maior quantidade de energia a turbina receberá. À pressão atmosférica normal a densidade do ar é de 1,225 kg/m<sup>3</sup>. A grandes altitudes a pressão do ar diminui e o ar é menos denso.[4]

### ***3.2.2) Área de varrimento do rotor***

A área de varrimento do rotor ou, pode-se dizer, a circunferência onde o rotor atua fisicamente é que determina quanta energia do vento a turbina eólica é capaz de captar. Dado que a área do rotor aumenta com o quadrado do raio, por exemplo, uma turbina duas vezes maior recebe quatro vezes mais energia.

### ***3.2.3) Distribuição da pressão no rotor***

A pressão do ar aumenta gradualmente à medida que o vento se aproxima do rotor, uma vez que o rotor atua como barreira ao vento, na parte posterior do rotor a pressão cai imediatamente, estabilizando gradualmente à medida que se afasta. À medida que o vento se afasta do rotor a turbulência do vento provoca que o vento mais lento se misture com o vento mais rápido da área circundante, reduzindo o efeito de “abrigo ao vento”.

### **3.3) Lei de Betz**

Quanto maior for a energia cinética extraída do vento pelo aerogerador de um sistema eólico, maior será a travagem que sofrerá o vento que deixa o aerogerador. Se teoricamente fosse possível extrair toda a energia do vento, o ar sairia com velocidade nula, ou melhor, o ar não poderia abandonar a turbina. Nesse caso não seria possível extrair nenhuma energia, uma vez que também não entraria ar no rotor do aerogerador. No outro caso extremo, consideramos o ar a passar pelo tubo de vento sem nenhum impedimento, também não será possível extrair energia do vento.

Entre estes dois extremos existe um valor para o qual é mais eficiente a conversão da energia do vento em energia mecânica : um aerogerador irá frear até cerca de 2/3 da sua velocidade inicial. Este valor é referente a uma formulação de 1919, realizada pelo físico Albert Betz, e conhecida como Lei de Betz.

A Lei de Betz diz que só se pode converter menos de 16/27 (59%) da energia cinética em energia mecânica ao utilizar um aerogerador.

Como a potência varia com o cubo da velocidade do vento, e proporcionalmente com a densidade do ar. A maior parte da energia eólica está localizada acima da velocidade média do vento de projeto. Para a produção de energia elétrica em grande escala só locais com valores de velocidades médias anuais superiores a 6 m/s são interessantes; abaixo deste valor já não existe viabilidade para este tipo de aplicações. [4]

De fato a velocidade à qual os aerogeradores começam a rodar situa-se entre 3 e 5 m/s, no entanto abaixo de 5 m/s a quantidade de energia no vento é muito baixa, e a turbina apenas começa a funcionar por volta dos 5 m/s. [4]

Os valores ideais de aproveitamento estão em torno dos 9 ou 10 m/s, porém as turbinas podem ser projetadas para uma eficiência máxima dependendo da zona de velocidade de vento onde esteja a maior parte da energia. [4]

### **3.4) Armazenamento de Energia**

Como o comportamento do vento muda ao longo do tempo, pode ser necessária a utilização de um sistema de armazenamento de energia que garanta o fornecimento adequado à demanda. Nos casos em que a energia eólica é utilizada para complementar a produção de energia convencional, a energia gerada é injetada diretamente na rede elétrica, não sendo necessário o armazenamento de energia, bastando que o sistema elétrico convencional de base esteja dimensionado para atender à demanda durante os períodos de calmaria.

Quando a energia eólica é utilizada como fonte primária de energia, uma forma de armazenamento é necessária para adaptar e “racionalizar” o perfil aleatório de produção energética ao perfil de consumo. Para isso, é necessário armazenar o excesso de energia durante os períodos de ventos de alta velocidade, para usá-la quando o consumo não puder ser atendido por insuficiência de vento, esse excesso de energia pode ser armazenada em baterias, deixando as carregadas para utilizar as mesmas mais tarde quando tiver insuficiência de vento.

#### **4) Funcionamento**

#### 4.1) Sistemas de Energia eólica

Um exemplo de um sistema eólico é apresentado na figura 4.1

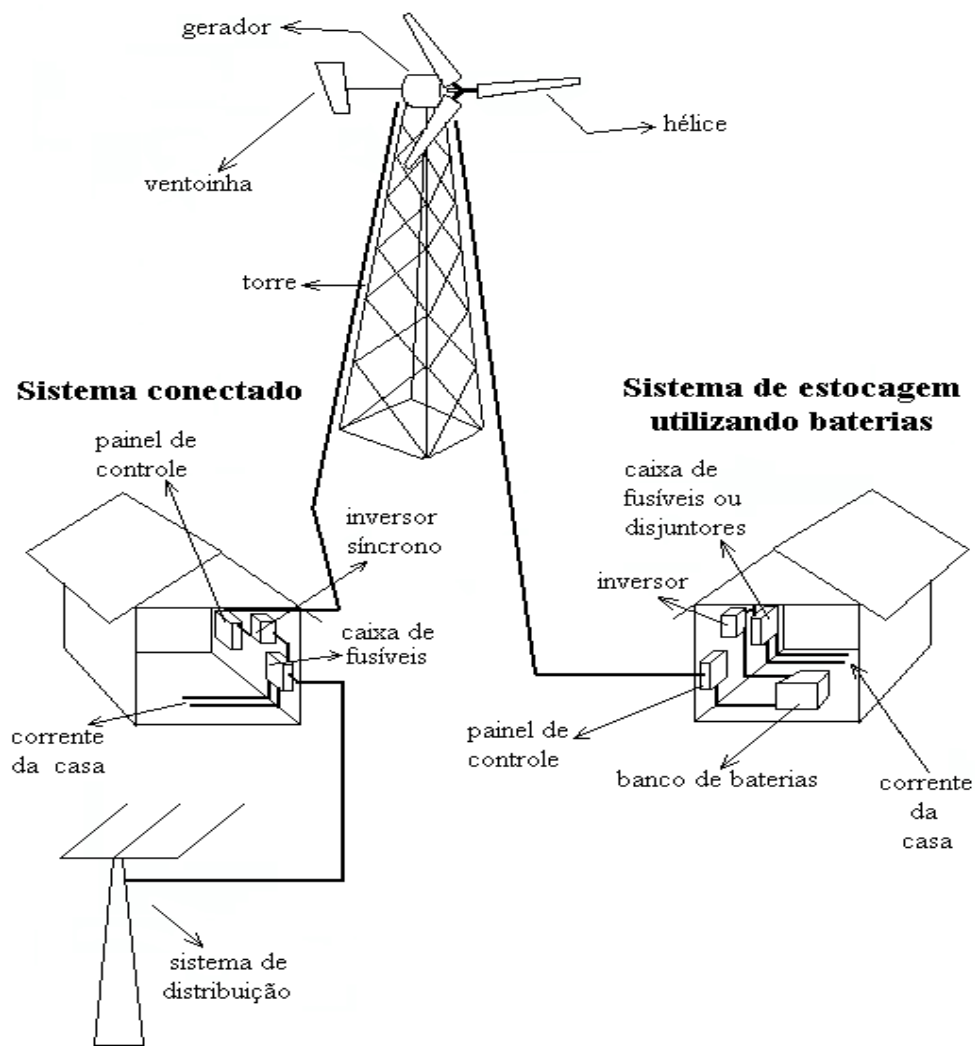


Figura 4.1 – Exemplo de uma instalação eólica [12]

Um sistema eólico é constituído por vários componentes que devem trabalhar em harmonia de forma a propiciar um maior rendimento final. Para efeito de estudo global da conversão eólica devem ser considerados os seguintes componentes:

- Vento: Disponibilidade energética do local destinado à instalação do sistema eólico.
- Rotor: Responsável por transformar a energia cinética do vento em energia mecânica de rotação.
- Transmissão e Caixa Multiplicadora: Responsável por transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até a carga. Alguns geradores não utilizam este componente; neste caso, o eixo do rotor é acoplado diretamente à carga.
- Gerador Elétrico: Responsável pela conversão da energia mecânica em energia elétrica.
- Mecanismo de Controle: Responsável pela orientação do rotor, controle de velocidade, controle da carga, etc.
- Torre: Responsável por sustentar e posicionar o rotor na altura conveniente.
- Sistema de Armazenamento: Responsável por armazenar a energia para produção de energia firme a partir de uma fonte intermitente.
- Transformador: Responsável pelo acoplamento elétrico entre o aerogerador e a rede elétrica.

O rendimento global do sistema eólico relaciona a potência disponível do vento com a potência final que é entregue pelo sistema. Os rotores eólicos ao extraírem a energia do vento reduzem a sua velocidade; ou seja, a velocidade do vento frontal ao rotor (velocidade não perturbada) é maior do que a velocidade do vento atrás do rotor (na esteira do rotor). Uma redução muito grande da velocidade do vento faz com que o ar circule em volta do rotor, ao invés de passar através dele, 59,3% da energia contida no fluxo de ar pode ser teoricamente extraída por uma turbina eólica. Na prática, entretanto, o rendimento aerodinâmico das pás reduz ainda mais este valor. Para um sistema eólico, existem ainda outras perdas, relacionadas com cada componente (rotor, transmissão, caixa multiplicadora e gerador). Além disso, o fato do rotor eólico funcionar em uma faixa limitada de velocidade de vento também irá contribuir para reduzir a energia por ele captada.

Todo sistema eólico somente começa a funcionar a partir de uma certa velocidade, chamada de velocidade de entrada, que é necessária para vencer algumas perdas. Quando o sistema atinge a chamada velocidade de corte um mecanismo de proteção é acionado com a finalidade de não causar riscos ao rotor e à estrutura.

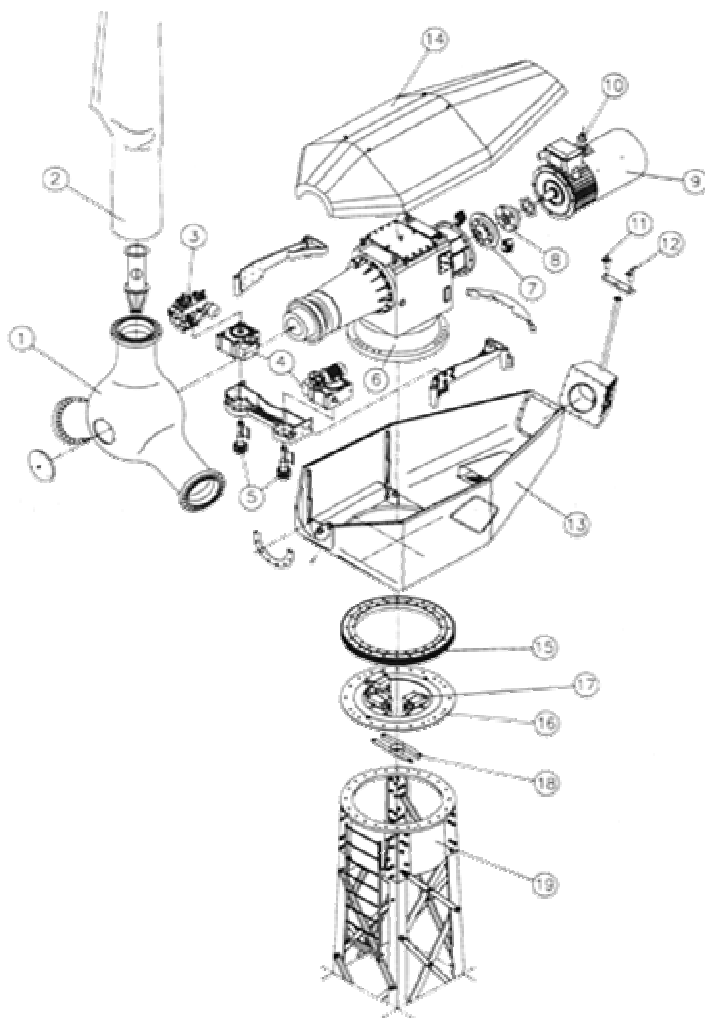
Para os sistemas eólicos, a velocidade de rotação ótima do rotor varia com a velocidade do vento. Um sistema eólico tem o seu rendimento máximo a uma dada velocidade do vento (chamada de velocidade de projeto ou velocidade nominal) e diminui para velocidades diferentes desta.

Projetar um sistema eólico, para um determinado tamanho de rotor e para uma carga pré-fixada, supõe trabalhar no intervalo ótimo de rendimento do sistema com relação a curva de potência disponível do vento local. Isto requer encontrar uma relação de multiplicação, de maneira que se tenha um bom acoplamento rotor/carga. É necessário também, ter mecanismos de controle apropriados para melhorar o rendimento em outras velocidades de vento e aumentar o intervalo de funcionamento do sistema eólico.

Um exemplo de mecanismo de controle é a utilização de rotores com ângulo de passo variável. Com este controle, a medida que a velocidade do vento varia, as pás mudam de posição, variando o rendimento do rotor. Com isto, pode-se aumentar o intervalo de funcionamento do sistema eólico e ainda manter uma determinada velocidade de rotação, que corresponde a eficiência máxima do gerador.

Como uma primeira aproximação, o rendimento global de um sistema eólico simples pode ser estimado em 20%. [1]

A Figura 4.2 apresenta as diversas partes constituintes de um sistema eólico.



1. Cubo do rotor
2. Pás do rotor
3. Sistema hidráulico
4. Sistema de posicionamento da nacele
5. Engrenagem de posicionamento
6. Caixa multiplicadora de rotação
7. Disco de freio
8. Acoplamento do gerador elétrico
9. Gerador elétrico
10. Sensor de vibração
11. Anemômetro
12. Sensor de direção
13. Nacele, parte inferior
14. Nacele, parte superior
15. Rolamento do posicionamento
16. Disco de freio do posicionamento
17. Pastilhas de freio
18. Suporte do cabo de força
19. Torre

Figura 4.2 - Apresentação das diversas partes constituintes de um rotor de sistema eólico.  
[12]

## **4.2. Aplicações do sistema Eólico**

Um sistema eólico pode ser utilizado em três aplicações distintas: sistemas isolados, sistemas híbridos e sistemas interligados à rede. Os sistemas obedecem a uma configuração básica, necessitam de uma unidade de controle de potência e, em determinados casos, conforme a aplicação, de uma unidade de armazenamento.

### **4.3) Sistemas Isolados**

Os sistemas isolados de pequeno porte, em geral, utilizam alguma forma de armazenamento de energia. Este armazenamento pode ser feito através de baterias ou na forma de energia potencial gravitacional com a finalidade de armazenar a água bombeada em reservatórios elevados para posterior utilização. Alguns sistemas isolados não necessitam de armazenamento, como no caso dos sistemas para irrigação onde toda a água bombeada é diretamente consumida.

Os sistemas que armazenam energia em baterias necessitam de um dispositivo para controlar a carga e a descarga da bateria. O controlador de carga tem como principal objetivo não deixar que haja danos ao sistema de bateria por sobrecargas ou descargas profundas. Para alimentação de equipamentos que operam com corrente alternada (CA) é necessário a utilização de um inversor. Este inversor pode ser de estado sólido (eletrônico) ou rotativo (mecânico).

### **4.4) Sistemas Híbridos**

Os sistemas híbridos são aqueles que apresentam mais de uma fonte de energia como, por exemplo, turbinas eólicas, geradores Diesel, módulos fotovoltaicos, entre outras. A utilização de várias formas de geração de energia elétrica aumenta a complexidade do sistema e exige a otimização do uso de cada uma das fontes. Nesses casos, é necessário realizar um controle de todas as fontes para que haja máxima eficiência e otimização dos fluxos energéticos na entrega da energia para o usuário.

Em geral, os sistemas híbridos são empregados em sistemas de médio porte destinados a atender um número maior de usuários. Por trabalhar com cargas em corrente



alternada, o sistema híbrido também necessita de um inversor. Devido à grande complexidade de arranjos e multiplicidade de opções, a forma de otimização do sistema torna-se um estudo particular a cada caso.

#### **4.5) Sistemas Interligados à Rede**

Os sistemas interligados à rede não necessitam de sistemas de armazenamento de energia, pois toda a geração é entregue diretamente à rede elétrica. Estes sistemas representam uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual estão interligados. Os sistemas eólicos interligados à rede apresentam as vantagens inerentes aos sistemas de geração distribuída tais como: a redução de perdas, o custo evitado de expansão de rede e a geração na hora de ponta quando o regime dos ventos coincide com o pico da curva de carga.

#### **4.6) Relação entre velocidade do vento e altura.**

A velocidade do vento em um determinado local aumenta drasticamente com a altura. A extensão pela qual a velocidade do vento aumenta com a altura é governada por um fenômeno chamado "wind shear". Fricção entre ar mais lentos e mais rápidos conduz ao aquecimento, velocidade do vento mais baixa e muito menos energia de vento disponível perto do solo.

A figura 4.3, ilustra as diferentes áreas (urbana, subúrbios, ou ao nível do mar) e a relação entre suas alturas e velocidades de ventos.

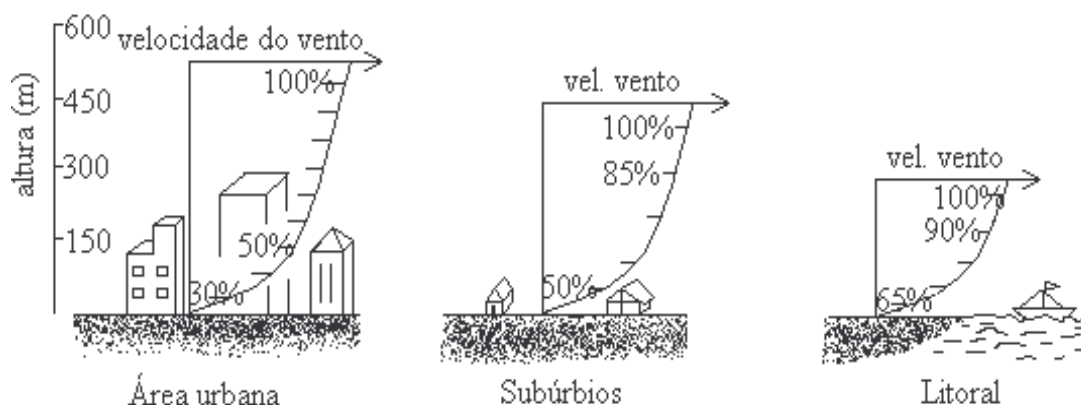


Figura 4.3 – Diferentes ares e relação entre suas alturas e velocidades de ventos.[12]

Com este esquema, pode-se perceber que regiões que possuem construções elevadas como prédios, só atingem velocidades razoáveis de vento após uma elevada altura. Já nas áreas em que só existem casas e pequenas construções, esta taxa diminui e assim, em alturas um pouco menores já temos ventos satisfatórios; no último caso mostrado, ao nível do mar, se vê que os ventos já são muito mais rápidos em altitudes menos elevadas que nos exemplos anteriores.

A potência teórica gerada pelas "máquinas de vento" varia com o cubo da velocidade do vento local. Isto, mais uma vez evidencia o quanto é necessário uma análise prévia do lugar onde se pretende instalar os equipamentos, para que se tenha um aproveitamento melhor da potencialidade da energia eólica. Assim, a conversão de energia eólica em regiões com muitos obstáculos fica prejudicada. Porém, mesmo nestas regiões é possível o aproveitamento, mesmo que já em escalas menores. O que é preciso saber é se nestas regiões onde há um aproveitamento mais restrito é ainda viável economicamente se construir tais equipamentos para se converter a energia eólica para eletricidade, por exemplo.

Existe uma regra prática que permite a utilização de cata-ventos em regiões que possuem construções e/ou obstáculos naturais, tais como árvores muito grandes ou elevações (morros) no solo. Esta regra diz que o cata-vento nestas regiões tem que ficar a

uma distância mínima de 7 vezes a altura que o obstáculo tem, ou seja, se numa casa de 5 metros de altura, por exemplo, se desejar implantar um sistema de captação e conversão da energia eólica, este sistema deverá estar a uma distância de 35 metros para que haja um aproveitamento melhor dos geradores e que as turbulências causada pela não uniformidade do chão, das construções e dos obstáculos naturais sejam minimizadas, não interferindo muito no aproveitamento do sistema.

#### **4.7) Circulação global do vento**

Os ventos aliviam a temperatura atmosférica e as diferenças de pressão causadas pelo aquecimento irregular da superfície da Terra. Enquanto o sol aquece o ar, água e terra de um lado da Terra, o outro lado é resfriado por radiação térmica para o espaço.

Diariamente a rotação da Terra espalha esse ciclo de aquecimento e resfriamento sobre sua superfície. Mas, nem toda superfície da Terra responde ao aquecimento da mesma forma. Por exemplo, um oceano se aquecerá mais lentamente que as terras adjacentes porque a água tem uma capacidade maior de "estocar" calor.

Da diferença dentre as taxas de aquecimento e resfriamento são criadas enormes massas de ar com temperatura, mistura e características de massas de ar oceânicas ou terrestres, ou quentes e frias. A colisão destas duas massas de ar, quente e fria, geram os ventos da Terra. [1]

#### **4.8) Turbina de vento**

O engenheiro francês chamado D. G. Darrieus inventou a moderna turbina de vento de eixo vertical, incluindo uma convencional de duas lâminas. Diferente das turbinas convencionais, que são reorientadas de acordo com o vento, esta é unidirecional, isto é, aceita o vento de qualquer direção vinda. Como o seu rotor e suas partes elétricas são na parte inferior da turbina, sua manutenção é muito mais simples, além de permitir uma variabilidade de aplicações elétricas e mecânicas maiores que as demais. Esta engenhosa contribuição que lâminas curvadas são de maior durabilidade que as lâminas verticais.

Como as outras turbinas , esta pode ser aplicada com duas, três ou mais lâminas. A Califórnia já mudou algumas de suas turbinas de duas para três lâminas durante o meio do ano de 1990.

Veja a seguir alguns exemplos de turbinas de eixo vertical e horizontal.



*Figura 4.4 - Turbina Savonius de eixo vertical. [12]*



*Figura 4.5 - Turbina Darrieus de eixo vertical. [12]*



*Figura 4.6 - Turbina Darrieus de eixo vertical e pá reta. [12]*



*Figura 4.7 - Turbina de eixo horizontal tripá com gerador de 75KW. [12]*

#### **4.9) Geradores**

A eletricidade é uma forma muito cômoda de se transmitir energia, assim, é importante falarmos um pouco sobre os instrumentos que fazem esta conversão, da energia mecânica - fornecida pelos ventos para a eletricidade, uma forma prática e limpa de se transmitir e usar a energia.

Esta conversão é feita pelos geradores elétricos, que nada mais são do que motores elétricos que ao girarem em torno de seus eixos induzem (pela lei de Faraday) uma corrente elétrica em seus pólos. [9]

Existe uma gama muito grande de tipos e tamanhos de geradores usados hoje em dia. Para dar um exemplo bem conhecido, pode-se citar o alternador dos automóveis, que é um pequeno gerador que converte a energia mecânica rotativa do motor de combustão interna para eletricidade e carrega-a na bateria do automóvel, para ser utilizada em momentos posteriores.

Os geradores podem ser basicamente dos tipos "AC" ou "DC", se converterem a energia para a forma de corrente alternada ou contínua (direta), respectivamente. Nos tipos de geradores de corrente contínua (DC), a energia é convertida, como o nome já indica para

a forma direta ou contínua de corrente elétrica e carrega uma bateria que acumula esta energia para uso posterior. Esta forma de conversão é um pouco incômoda, pois requer um banco relativamente grande de baterias para que se possa ter uma quantidade de energia razoável num determinado lugar. Além disto, os utensílios domésticos e a grande parte dos aparelhos elétricos e eletrônicos são projetados para funcionarem ligados a corrente alternada devido as facilidades de transporte que esta maneira proporciona. Assim, nos sistemas em que se usam geradores de corrente contínua, é necessário que se tenha ligado juntamente ao sistema um inversor para que se possa utilizar diretamente aparelhos elétricos. Em compensação, esta forma permite que mesmo sem vento por algum tempo se tenha energia disponível.

Já os geradores de corrente alternada (AC), geram a eletricidade, como o nome diz, na forma de corrente alternada e pode ser usado diretamente nos aparelhos elétricos e eletrônicos do dia a dia.

Existe, porém dois inconvenientes deste tipo de produção de eletricidade: o primeiro é que não se é possível estocar energia na forma de corrente alternada, tendo que retificá-la por meio de diodos, por exemplo, para a forma contínua e armazená-la em bancos de baterias; o segundo inconveniente é que os geradores de corrente alternada geram correntes em freqüências que variam com a velocidade de giro do rotor, e como os ventos variam muito, as freqüências geradas pelo gerador também variam muito.

Para controlar este problema, visto que nosso sistema de energia tem que estar em torno de 60 Hz (Hertz), é preciso ligar ao sistema um dispositivo que mantenha a freqüência em torno dos desejados 60 Hz; este dispositivo é chamado de inversor síncrono. [3]

No sistema de estocagem utilizando baterias, a energia mecânica é convertida para eletricidade na forma de corrente contínua e carrega um banco de baterias. Deste banco, a energia passa por um inversor que a deixa na forma de corrente alternada pronta para ser usada em suas aplicações.

No sistema conectado de energia, a conversão é feita diretamente para corrente alternada e passa por um inversor síncrono para que sua freqüência seja ideal. Após isto, a

corrente vai para a caixa de fusíveis e passa por um dispositivo seletor, que verifica se a corrente gerada pelo cata vento é suficiente para suprir as necessidades da casa; se for suficiente o dispositivo não atua, porém se a energia gerada pelo cata vento não for suficiente, este dispositivo seletor começa a "aceitar" também a energia fornecida pelo sistema de eletrificação das ruas. Desta maneira, o usuário deste sistema só usa a energia vinda da rua em situações em que o vento não é ideal ou quando sua demanda supera a energia gerada por seu equipamento.

#### **4.10) Rotor Eólico**

O rotor é o componente do sistema eólico responsável por captar a energia cinética dos ventos e transformá-la em energia mecânica de rotação. É o componente mais característico de um sistema eólico. Por este motivo, a configuração do rotor influenciará diretamente no rendimento global do sistema.

Os rotores eólicos podem ser classificados segundo vários critérios e o mais importante é aquele que utiliza a orientação do eixo como fator de classificação. Assim, temos os rotores de eixo horizontal e os rotores de eixo vertical.

##### ***4.10.1) Rotores de Eixo Horizontal***

Os rotores de eixo horizontal são os mais comuns e grande parte da experiência mundial está voltada para a sua utilização. São movidos por forças aerodinâmicas chamadas de forças de sustentação (*lift*) e forças de arrasto (*drag*). Um corpo que obstrui o movimento do vento sofre a ação de forças que atuam perpendicularmente ao escoamento (forças de sustentação) e de forças que atuam na direção do escoamento (forças de arrasto). Ambas são proporcionais ao quadrado da velocidade relativa do vento. Adicionalmente, as forças de sustentação dependem da geometria do corpo e do ângulo de ataque (formado entre a velocidade relativa do vento e o eixo do corpo).

Os rotores que giram predominantemente sob o efeito de forças de sustentação permitem liberar muito mais potência do que aqueles que giram sob efeito de forças de arrasto, para uma mesma velocidade de vento. Os rotores de eixo horizontal ao longo do



vento (aerogeradores convencionais) são predominantemente movidos por forças de sustentação e devem possuir mecanismos capazes de permitir que o disco varrido pelas pás esteja sempre em posição perpendicular ao vento. Tais rotores podem ser constituídos de uma pá e contrapeso, duas pás, três pás ou múltiplas pás (*multivane fans*).

Construtivamente, as pás podem ter as mais variadas formas e empregar os mais variados materiais. Em geral, utilizam-se pás rígidas de madeira, alumínio ou fibra de vidro reforçada.

Quanto à posição do rotor em relação à torre, o disco varrido pelas pás pode estar a jusante do vento (*down wind*) ou a montante do vento (*up wind*). No primeiro caso, a "sombra" da torre provoca vibrações nas pás. No segundo caso, a "sombra" das pás provoca esforços vibratórios na torre. Sistemas a montante do vento necessitam de mecanismos de orientação do rotor com o fluxo de vento, enquanto nos sistemas a jusante do vento, a orientação realiza-se automaticamente.

Os rotores mais utilizados para geração de energia elétrica são os de eixo horizontal do tipo hélice, normalmente compostos de 3 pás ou em alguns casos (velocidades médias muito altas e possibilidade de geração de maior ruído acústico) 1 ou 2 pás.

#### **4.10.2) Rotores de Eixo Vertical**

Em geral, os rotores de eixo vertical têm a vantagem de não necessitarem de mecanismos de acompanhamento para variações da direção do vento, o que reduz a complexidade do projeto e os esforços devidos as forças de *Coriolis*. Os rotores de eixo vertical também podem ser movidos por forças de sustentação (*lift*) e por forças de arrasto (*drag*). Os principais tipos de rotores de eixo vertical são *Darrieus*, *Savonius* e turbinas com torre de vórtices.

Os rotores do tipo *Darrieus* são movidos por forças de sustentação e constituem-se de lâminas curvas (duas ou três) de perfil aerodinâmico, atadas pelas duas pontas ao eixo vertical.

#### **4.11) Transmissão e Caixa Multiplicadora**

A transmissão, que engloba a caixa multiplicadora, possui a finalidade de transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até o gerador. É composta por eixos, mancais, engrenagens de transmissão e acoplamentos.

O projeto tradicional de uma turbina eólica consiste em colocar a caixa de transmissão mecânica entre o rotor e o gerador de forma a adaptar a baixa velocidade do rotor à velocidade de rotação mais elevada dos geradores convencionais.

A velocidade angular dos rotores geralmente varia na faixa de 20 a 150 RPM, devido às restrições de velocidade na ponta da pá (*tip speed*). Entretanto, geradores (sobretudo geradores síncronos) trabalham a rotações muito mais elevadas (em geral, entre 1200 a 1800 RPM), tornando necessário a instalação de um sistema de multiplicação entre os eixos. [2]

Mais recentemente, alguns fabricantes desenvolveram com sucesso aerogeradores sem a caixa multiplicadora e abandonaram a forma tradicional de construir turbinas eólicas. Assim, ao invés de utilizar a caixa de engrenagens com alta relação de transmissão, necessária para alcançar a elevada rotação dos geradores, utiliza-se geradores múltiplos de baixa velocidade e grandes dimensões.

#### **4.12) Mecanismos de Controle**

Os mecanismos de controle destinam-se à orientação do rotor, ao controle de velocidade, ao controle de carga, etc. Pela variedade de controles, existe uma enorme variedade de mecanismos que podem ser mecânicos (velocidade, passo, freio), aerodinâmicos (posicionamento do rotor) ou eletrônicos (controle da carga).

Devido a atuação das forças aerodinâmicas nas pás do rotor, uma turbina eólica converte a energia cinética do vento em energia mecânica rotacional. Estas forças aerodinâmicas são geradas ao longo das pás do rotor que necessitam de perfis especialmente projetados e que são muito similares àqueles usados para asas de aviões.

Com a velocidade do fluxo de ar aumentando, as forças de sustentação aerodinâmica aumentam com a segunda potência e a energia extraída da turbina com a terceira potência da velocidade do vento, uma situação que necessita de um controle de potência do rotor muito efetivo e rápido de modo a evitar sobrecarregamento elétrico e mecânico no sistema de transmissão.

Os modernos aerogeradores utilizam dois diferentes princípios de controle aerodinâmico para limitar a extração de potência à potência nominal do aerogerador. São chamados de controle estol (*stall*) e controle de passo (*pitch*). No passado, a maioria dos aerogeradores usavam o controle estol simples; atualmente, entretanto, com o aumento do tamanho das máquinas, os fabricantes estão optando pelo sistema de controle de passo que oferece maior flexibilidade na operação das turbinas eólicas.

#### **4.13) Controle de Passo**

O controle de passo é um sistema ativo que normalmente necessita de uma informação vinda do controlador do sistema. Sempre que a potência nominal do gerador é ultrapassada, devido à um aumento da velocidade do vento, as pás do rotor giram em torno do seu eixo longitudinal; em outras palavras, as pás mudam o seu ângulo de passo para reduzir o ângulo de ataque. Esta redução do ângulo de ataque diminui as forças aerodinâmicas atuantes e, conseqüentemente, a extração de potência. Para todas as velocidades do vento superiores à velocidade nominal, o ângulo é escolhido de forma que a turbina produza apenas a potência nominal. Sob todas as condições de vento, o escoamento em torno dos perfis das pás do rotor é bastante aderente à superfície produzindo sustentação aerodinâmica e pequenas forças de arrasto. [13]

Sob todas as condições de vento, o fluxo em torno dos perfis da pá do rotor é bem aderente à superfície (veja Figura 4.8), produzindo, portanto, sustentação aerodinâmica a pequenas forças de arrasto.

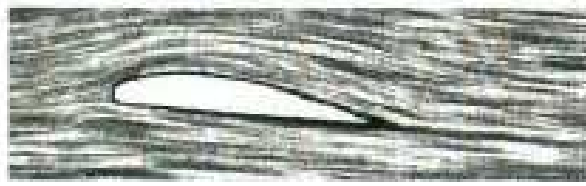


Figura 4.8 – Fluxo aderente ao perfil. [4]

11

Turbinas com controle de passo são mais sofisticadas do que as de passo fixo, controladas por estol porque estas necessitam de um sistema de variação de passo. Por outro lado, elas possuem certas vantagens:

- permitem controle de potência ativo sob todas as condições de vento, também sob potências parciais;
- alcançam a potência nominal mesmo sob condições de baixa massa específica do ar (grandes altitudes dos sítios, altas temperaturas);
- maior produção de energia sob as mesmas condições (sem diminuição da eficiência na adaptação ao estol da pá);
- partida simples do rotor pela mudança do passo;
- fortes freios desnecessários para paradas de emergência do rotor;
- cargas das pás do rotor decrescentes com ventos aumentando acima da potência nominal;
- posição de embandeiramento das pás do rotor para cargas pequenas em ventos extremos;
- massas das pás do rotor menores levam a massas menores dos aerogeradores.

Na Alemanha cerca de 50% de todos os aerogeradores instalados são do tipo controle de passo porque dois dos maiores fabricantes preferem este tipo de controle de aerogeradores. Na nova geração de turbinas da classe de megawatt, muitos fabricantes mudaram para sistemas de controle de passo.

#### 4.14) Controle Estol

O controle estol é um sistema passivo que reage à velocidade do vento. As pás do rotor são fixas em seu ângulo de passo e não podem girar em torno de seu eixo longitudinal. O ângulo de passo é escolhido de forma que, para velocidades de vento superiores a velocidade nominal, o escoamento em torno do perfil da pá do rotor descola da superfície da pá (estol), reduzindo as forças de sustentação e aumentando as forças de arrasto. Sob todas as condições de ventos, superiores à velocidade nominal, o escoamento em torno dos perfis das pás do rotor é, pelo menos parcialmente, descolado da superfície produzindo menores forças de sustentação e elevadas forças de arrasto. Menores sustentações e maiores arrastos atuam contra um aumento da potência do rotor. Para evitar que o efeito estol ocorra em todas as posições radiais das pás ao mesmo tempo, o que reduziria significativamente a potência do rotor, as pás possuem uma pequena torção longitudinal que as levam a um suave desenvolvimento deste efeito. [14]

Sob todas as condições de ventos superiores à velocidade nominal o fluxo em torno dos perfis das pás do rotor é, pelo menos, parcialmente descolado da superfície (veja Figura 4.9), produzindo, portanto sustentações menores e forças de arrasto muito mais elevadas.



Figura 4.9 – Fluxo separado (estol) em volta do perfil. [4]

Turbinas com controle estol são mais simples do que as de controle de passo porque elas não necessitam de um sistema de mudança de passo. Os aerogeradores com controle estol, em comparação com os aerogeradores com controle de passo possuem, em princípio, as seguintes vantagens:

- inexistência de sistema de controle de passo;
- estrutura de cubo do rotor simples;

- menor manutenção devido a um número menor de peças móveis;
- auto-confiabilidade do controle de potência.

Em termos mundiais, o conceito de controle através de estol domina. A maioria dos fabricantes utiliza esta possibilidade simples de controle de potência, que sempre necessita de uma velocidade constante do rotor, geralmente dada pelo gerador de indução diretamente acoplado à rede.

Mais recentemente surgiu uma concepção que mistura os mecanismos de controle por estol e de passo (denominada “estol ativo”). Neste caso, o passo da pá do rotor gira na direção do estol e não na direção da posição de embandeiramento (menor sustentação), como é feito em sistemas de passo normais. As vantagens deste sistema são:

- necessidade de reduzidas mudanças no ângulo do passo;
- possibilidade de controle da potência sob condições de potência parcial (baixas velocidades de vento);
- a posição de embandeiramento das pás do rotor para cargas pequenas em situação de altas velocidades de vento.

## **5) Meio Ambiente**

### **5.1) Recursos Energéticos e Meio Ambiente**

Recursos energéticos são de importância vital para o ser humano. Cientistas calculam que o Sol envia para a Terra energia equivalente a cerca de 10 mil vezes o consumo mundial de energia bruta. Todas as fontes renováveis de energia, exceto a geotérmica (atividade vulcânica), derivam da energia solar.

Os recursos energéticos são divididos em fontes primárias e secundárias. As primárias, supridas pela natureza, são subdivididas em duas categorias: renováveis e não renováveis.

Dentre as renováveis, encontram-se, além do Sol, as originadas de hidroelétricas, biomassa, ventos (eólica), marés, etc. Petróleo, carvão mineral e gás natural são fontes consideradas não renováveis, ou fósseis.

As fontes de energia secundárias são as que chegam até o usuário final, como eletricidade, gasolina, álcool, etc. Desta forma, uma mesma fonte de energia secundária pode ser obtida de modo renovável ou não renovável (fóssil).

A diferença entre a renovável e a fóssil é que a renovável significa sempre e a fóssil nunca mais.

## 5.2) Impactos Socioambientais

A geração de energia elétrica por meio de turbinas eólicas constitui uma alternativa para diversos níveis de demanda, sendo considerada a energia mais limpa do planeta, disponível em diversos lugares e em diferentes intensidades, uma boa alternativa às energias não-renováveis. As pequenas centrais podem suprir pequenas localidades distantes da rede, contribuindo para o processo de universalização do atendimento. Quanto às centrais de grande porte, estas têm potencial para atender uma significativa parcela do Sistema Interligado Nacional (SIN) com importantes ganhos: contribuindo para a redução da emissão, pelas usinas térmicas, de poluentes atmosféricos; diminuindo a necessidade da construção de grandes reservatórios.

Apesar de não queimarem combustíveis fósseis e não emitirem poluentes, centrais eólicas não são totalmente desprovidas de impactos ambientais. Entre os principais impactos socioambientais negativos das usinas eólicas destacam-se os sonoros e os visuais. Os impactos sonoros são devidos ao ruído dos rotores e variam de acordo com as especificações dos equipamentos. As turbinas de múltiplas pás conforme mostrado na figura 5.1, são menos eficientes e mais barulhentas que os aerogeradores de hélices de alta velocidade, mostrados na figura 5.2.



*Figura 5.1 – Aerogerador de múltiplas pás. [6]*

*Figura 5.2 - Aerogerador de hélice de alta velocidade. [6]*

A fim de evitar transtornos à população vizinha, o nível de ruído das turbinas deve atender às normas e padrões estabelecidos pela legislação vigente. Os impactos visuais são decorrentes do agrupamento de torres e aerogeradores, principalmente no caso de centrais eólicas com um número considerável de turbinas, também conhecidas como fazendas eólicas, como pode ser visto na figura 5.3.





*Figura 5.3 - Impacto visual de uma Estação Eólica nos montes [Tehachapi](#), na Califórnia. [8]*

Os impactos variam muito de acordo com o local das instalações, o arranjo das torres e as especificações das turbinas. Outra forma de central eólica pode ser visto na figura 5.4, onde os aerogeradores estão agrupados sobre a água, amenizando assim a poluição visual. [3]



*Figura 5.4 – Agrupamento de aerogeradores sobre água. [1]*

Apesar de efeitos negativos, como alterações na paisagem natural, esses impactos tendem a atrair turistas, gerando renda, emprego, arrecadações e promovendo o

desenvolvimento regional. Outro impacto negativo das centrais eólicas é a possibilidade de interferências eletromagnéticas, que podem causar perturbações nos sistemas de comunicação e transmissão de dados (rádio, televisão etc.). Essas interferências variam muito, segundo o local de instalação da usina e suas especificações técnicas, particularmente o material utilizado na fabricação das pás. Também a possível interferência nas rotas de aves deve ser devidamente considerada nos estudos e relatórios de impactos ambientais (EIA/RIMA).

## **7) Aerogerador com rotor Savonius**

### **6.1) Origens do rotor Savonius**

O aerogerador com rotor do tipo Savonius, ou rotor “S” como é mundialmente conhecido, foi inventado em 1922 e recebeu esse nome pelo seu criador o finlandês S J Savonius. Pode-se dizer que esse tipo de rotor é um dos mais simples e o principal foco de sua instalação é a economia financeira adquirida por seu comprador. [15]

No início da década de trinta, os aerogeradores Savonius ganharam bastante mercado nas zonas rurais, onde se obtêm suas melhores aplicações, com os moinhos de vento de fazenda que já existiam anteriormente e até então eram boas fontes de energia da época. Nesse período as construções eram extremamente robustas e a falta de

disponibilidade de materiais leves e de rendimentos significantes faziam com que suas aplicações fossem limitadas comparadas com o dimensionamento das peças de montagem como mostra na figura 6.1.

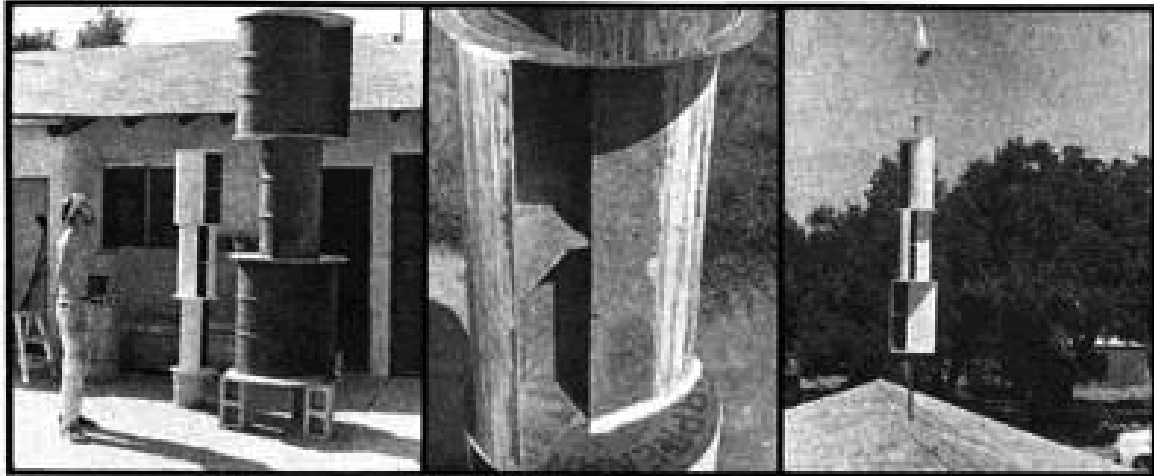
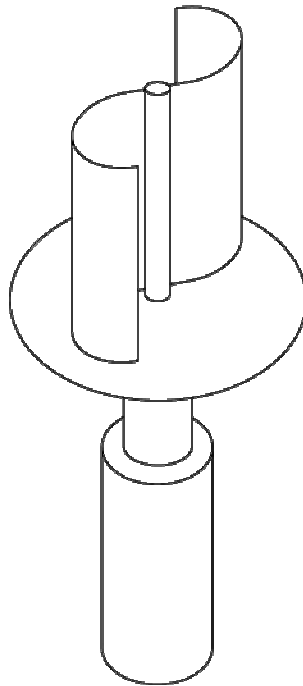


Figura 6.1 – Unidade eólica com rotor savonius de fazenda na Califórnia, EUA [15]

Apesar de a eficiência ser, relativamente, baixa os aerogeradores Savonius se diferencia dos demais aerogeradores de eixo vertical devido simplicidade de funcionamento e montagem.

## 6.2) Rotor de eixo vertical

A maior característica dos rotores de eixo vertical é o fato desse sistema de geração de energia não precisar de mecanismo e componentes para a captação de ventos em diferentes direções. O formato côncavo das pás utilizadas e suas distribuições na unidade eólica que tornam possível o aproveitamento de energia em todas direções, conforme representado na figura 6.2:



**Figura 6.2 – Perfil da hélice de um rotor do tipo savonius [16]**

Os rotores de eixo vertical também podem ser movidos por forças de sustentação e por forças de arrasto. Os principais tipos de rotores de eixo vertical são *Darrieus*, *Savonius* e turbinas com torre de vértices.

A eficiência do rotor semicilíndrico é baixa, 10 a 15%, em contraste com 30 a 40% do cata-vento de múltiplas pás e estes rotores só são empregados quando se requer a entrada em operação com baixas velocidades de vento e potências reduzidas.

### **6.3) Características do Rotor Savonius**

Os rotores savonius também são conhecidos como rotores “s” devido o rotor ser, basicamente, constituído por duas pás semi-circulares colocadas uma justaposta à outra em cada nível de pás. Esses rotores são muito utilizados como aeromotores, de baixa amplitude, em instalações de bombeamento de água em zonas rurais onde o custo final

devido a simplicidade do sistema de transmissão e construção do rotor propriamente dito, podem compensar seu menor rendimento.

A avaliação econômica deste sistema, em comparação com os atualmente utilizados na região, é realizada através do pré-dimensionamento de um protótipo de cataventos Savonius, capaz de satisfazer as necessidades hídricas mínimas da cana-de-açúcar produzida em áreas típicas de pequenos agricultores de Campo.

A análise custo-benefício dos sistemas eólicos do tipo Savonius identifica não só a viabilidade técnico-econômica de sua utilização para fins de irrigação em regiões afastadas das grandes metrópoles, como também um bom caminho pelo qual a agricultura pode seguir.

Existem diversos tipos de perfil de pá a ser utilizado num projeto Savonius, a relação de aplicação pode-se distinguir, basicamente, pela disponibilidade de material de construção das pás. Dentre os perfis geralmente utilizados têm-se os seguintes exemplos representados nas figuras a seguir:

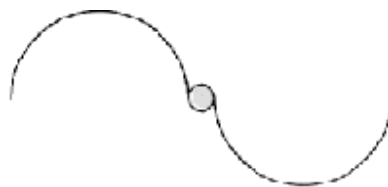


Figura 6.3 – Pás com perfil de pá semicircular com fixação no eixo central

A pá com perfil Semicircular com fixação no eixo central tem como característica uma forte fixação no eixo central, possibilitando uma resistência significativa nas pás e a opção do rotor suportado em somente uma extremidade. Porém propicia uma eficiência ligeiramente menor que os demais perfis.



Figura 6.4 Perfil de pá semicircular com passagem de ar

O perfil de pá semicircular com passagem de ar, representado na figura 6.4, possui uma eficiência um pouco maior do que o perfil mencionado anteriormente. Isso ocorre devido haver passagem de ar uma pá semicircular para outra de mesmo nível, favorecendo um pequeno impulso no mesmo sentido de rotação do eixo do aerogerador.

Os projetos com perfis de pás semicirculares têm uma vantagem dos demais: a aquisição das pás se torna mais fácil, necessitando apenas de cilindros ou latões, geralmente de metal, com seção circular aproveitando-se todo o material base.



Figura 6.5 - Perfil de pá com aletas

As pás com aletas são as mais eficientes dos aerogeradores Savonius pois além da passagem de ar entre as pás do mesmo nível, esse perfil de pá resulta numa passagem de ar com menos perdas para outra pá do mesmo nível. Isso ocorre através da aleta que direciona o vento mais rapidamente para o ponto desejado. Para esse projeto exige-se um custo mais elevado devido a mão-de-obra necessária para confecção das aletas com envergaduras

### 6.3.1) Tipos de rotor Savonius

Assim como os demais aerogeradores eólicos a grande variedade de rotores Savonius diferencia-se de acordo com seu custo destinado a construção e sua aplicação que está diretamente relacionada com seu dimensionamento e capacidade.

Na figura 6.6 observa-se que o aerogerador construído necessita apenas de alguns materiais de fácil aquisição e montagem. Necessitando de ferramentas manuais de baixa complexidade. Neste caso, as pás foram reaproveitadas de galões de água com capacidade de 20 litros fixos em discos laminados com massa de fixação, o eixo principal é um simples cabo de madeira de 25,4mm, a estrutura utilizada é uma cantoneira vazada de baixa espessura e para reforçar sua sustentação foram adotados cabos de aço nas quatro laterais como contraventamento.



Figura 6.6 – Unidade Eólica Caseira

Em alguns casos o aerogerador Savonius é comercializado e produzido em maiores quantidade. Como mostra a figura 6.7, a unidade eólica para fins residenciais instalada em um condomínio na cidade de Gateshead na Inglaterra. [15]





Figura 6.7 – Foto de um Aerogerador Savonius em Gateshead, Inglaterra [15]



Figura 6.8 – Aerogerador Savonius no Japão [15]

#### 6.4) Coeficiente de potência de Rotores Savonius;

Várias arquiteturas de máquinas eólicas foram criadas e testadas de modo a se obter bons rendimentos com custos de fabricação e operação baixos. Na figura 6.9 são mostradas as eficiências típicas para diversas configurações em função da razão de velocidades .

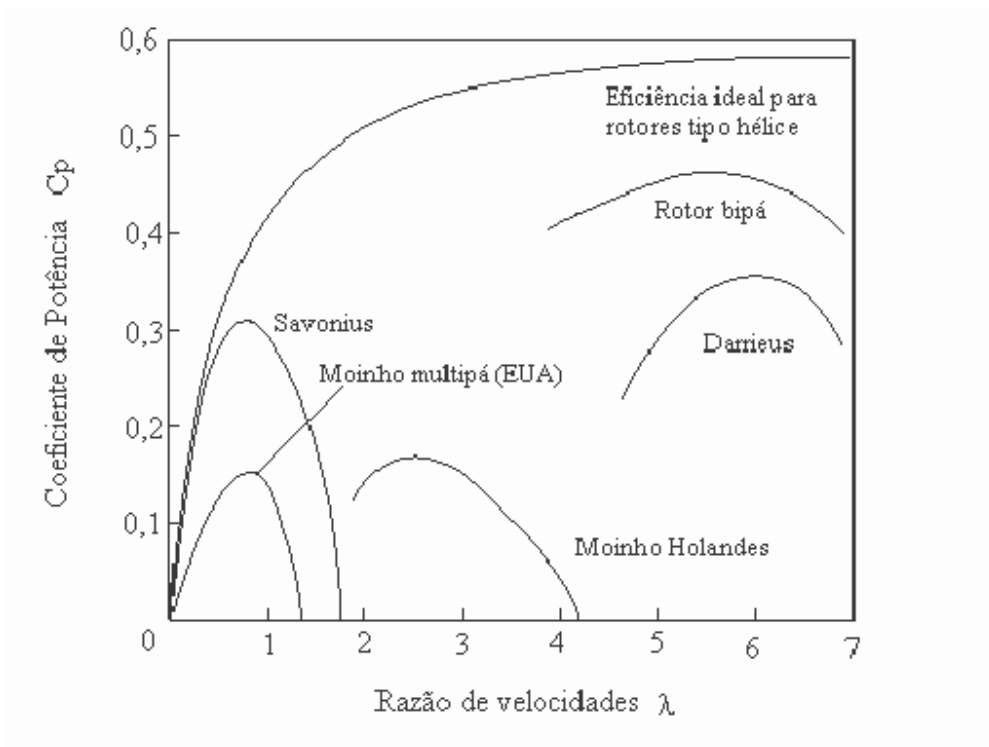


Figura 6.9

– Coeficientes de Potência para várias configurações de rotores

Em função da variação de rendimento observada para as diversas configurações a orientação do eixo dos rotores eólicos é a mais usual forma usada em sua classificação. Os dois grandes grupos compreendem os rotores de eixo horizontal e os rotores de eixo vertical.

Rotores diferentes, reduzidos ao mesmo tamanho são comparados pelos gráficos abaixo, de acordo com a seguinte tabela:

Velocidade do Vento (mph)	Energia de entrada na bomba de água At. 60% da Eficiência da Bomba						
5		0.45					
6							1.4
7		1.76					
8	7.62	2.86					3.34
9.2					0.95		
10							6.56
10.3	12.7	6.26	5.48				
10.6				11.40			
11.2					2.88		
11.6				13.50			
12	17.6	8.55	8.22				11.8
12.15					4.16		
13		9.92	9.57	18.5			
13.6				20.8			
13.8					5.24		
14	22.9		10.60				
14.3				22.8			
14.5					5.75		
15	26.9		12.0				
15.7					10.7		
16							26.9
18							38.8
20						49	52.7
22							70.0
24							91.5
25						125	
26							115.5
28							40.0
30						222	83.0

Tabela 6.1 – Valores dos gráficos 1 (Figura 6.10) e 2 (Figura 6.11)

Os gráficos seguintes provêm figuras específicas no poder disponível de rotores de Savonius.

Gráfico 1

Energia de entrada (watts/m<sup>2</sup>)

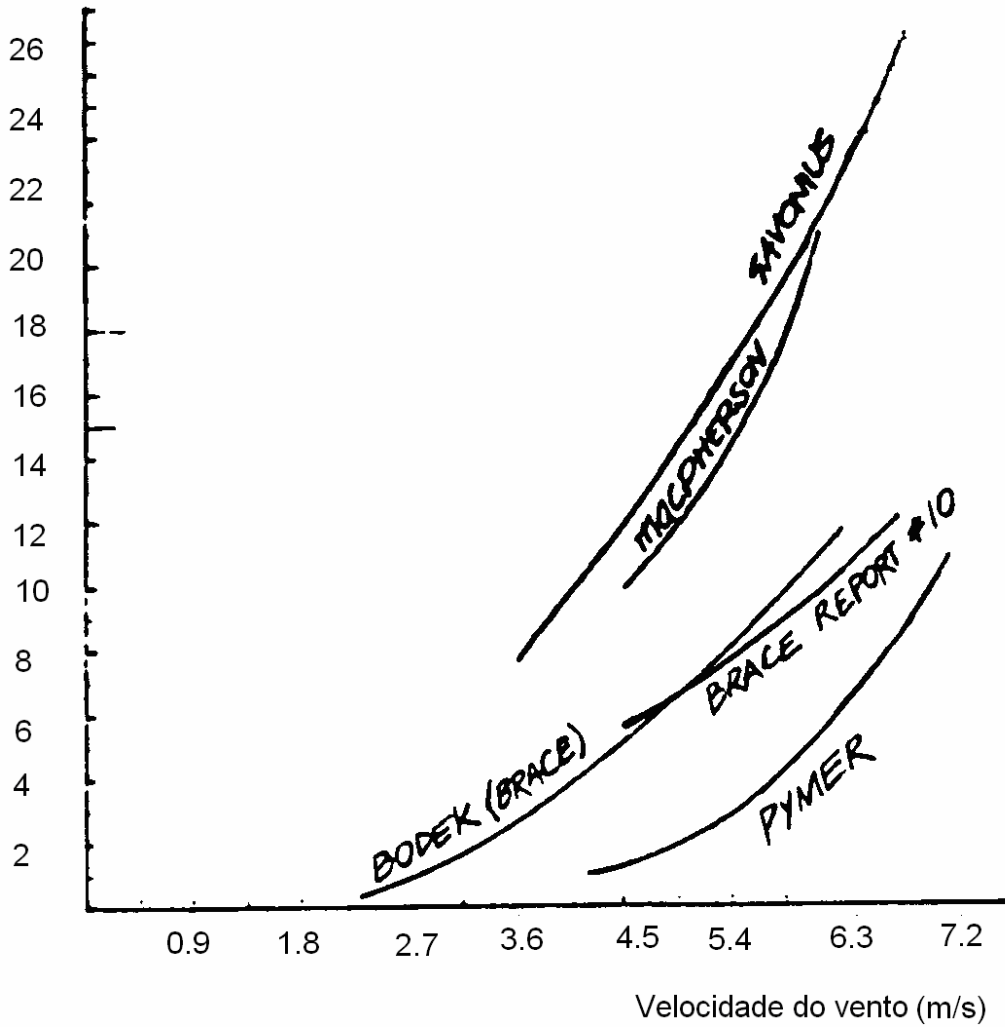


Figura 6.10 – Gráfico de Energia de entrada em função da velocidade do vento

Gráfico 2

Energia de saída para turbina savonius de 2 estágios

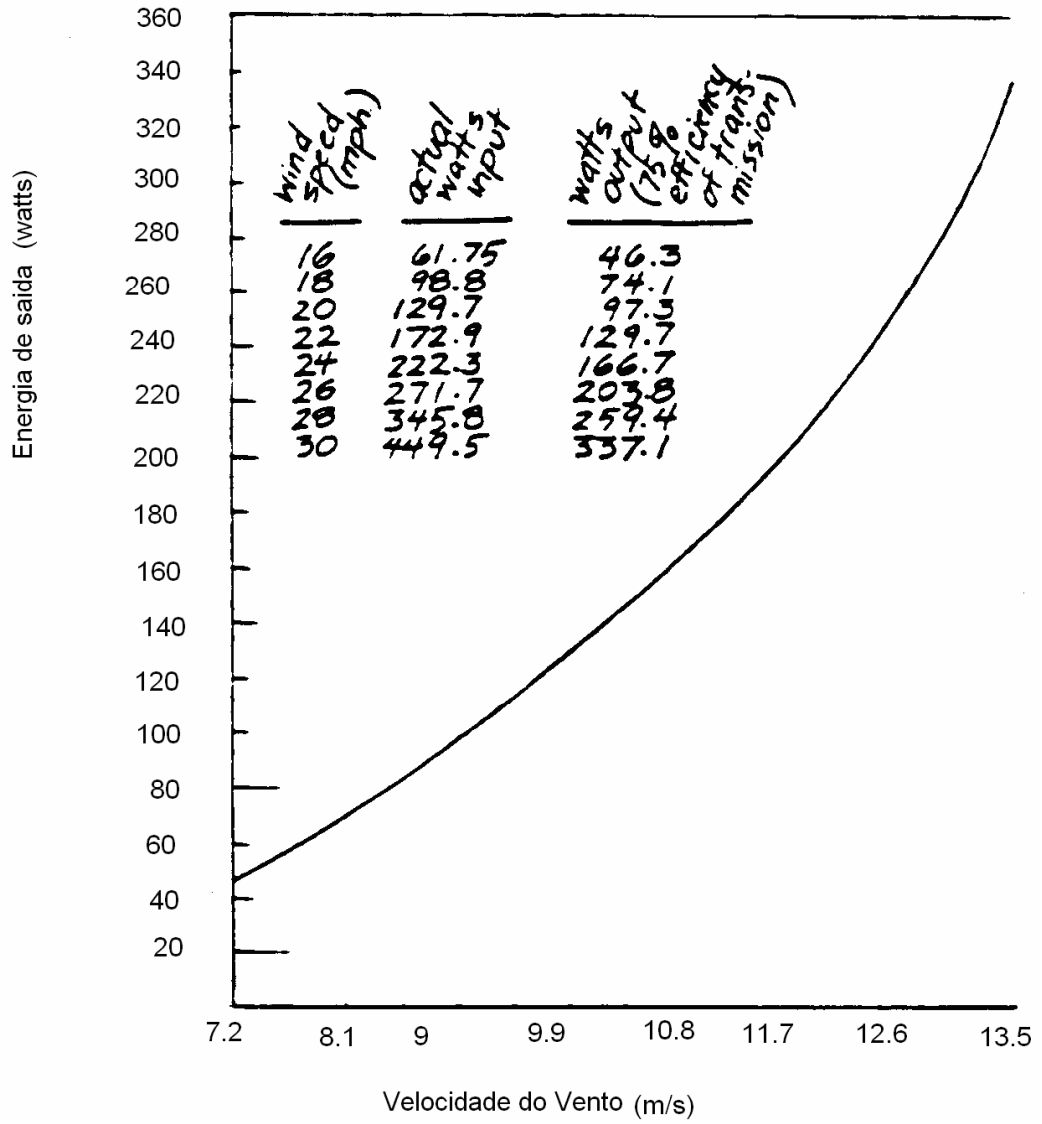


Figura 6.11- Gráfico 2 de energia de entrada em função da velocidade do vento

As figuras medem energia diretamente disponível do rotor baseado nas eficiências de bombas ou transmissão elétrica.

Nos gráficos 1 e 2 o poder por metro quadrado de área projetada de S-rotores são colocados contra a velocidade de vento, mas velocidades de vento abaixo de 9m/s a geração de energia é muito pequena.

Por exemplo, podemos dizer que a energia útil para ventos de 5,4m/s deu em água bombeada 8,5 watts/m<sup>2</sup>, quer dizer que pode bombear 75 galões por hora, e conseguimos 341 litros de água para 9,81m. Em 3,6m/s de vento a energia útil só são 2.8 watts/m<sup>2</sup> sendo que só conseguimos bombear 25 galões por hora (104 L/h) pode ser bombeada à mesma altura.

Cerca de 9m/s de vento adquirirá o gerador elétrico comercial, produzindo aproximadamente 100 watts de eletricidade. Sobre uns 13,5m/s de vento será requerido para um gerador de carro ou alternador para começar a carregar 12 Volts referindo-se a bateria de um carro.

É muito importante para estabelecer o seguinte antes de tentar construir qualquer máquina de vento:

Turbinas eólicas são equipamentos mecânicos complexos que exigem ampla variedade de conhecimentos em seu projeto. Ainda que a metodologia a ser empregada na execução do projeto deva atender aos requisitos básicos de engenharia para o tipo de produto em questão há ainda espaço para sua adaptação à experiência e ao gosto pessoal da equipe de projeto envolvida.

Ao longo das diversas etapas do trabalho os projetistas freqüentemente são levados a tomar decisões de escolha entre as alternativas possíveis para atender cada requisito ou necessidade de projeto.

Atualmente, existem várias alternativas de conjuntos eólicos, com o uso de geradores de corrente contínua, geradores síncronos, geradores assíncronos e geradores de comutador de corrente alternada.

Cada tipo oferece vantagens e desvantagens que devem ser analisadas com cuidado na sua incorporação aos sistemas de conversão de energia eólica.

Também devem ser estudadas e analisadas as seguintes condições:

- Regularidade do vento: variações na direção e intensidade da velocidade;
- Intensidade do vento: disponibilidade energética do local destinado à instalação do sistema eólico.
- Exigência de frequência e tensão constante na energia final produzida.
- Facilidade de instalação, operação e manutenção devido ao isolamento geográfico de tais sistemas, sobretudo em caso de pequena escala de produção implicando na necessidade de alta confiabilidade.

## 7) Construção de uma Unidade Eólica Savonius

### 7.1) Objetivos

Este projeto de graduação do curso de engenharia mecânica da Universidade Santa Cecília dos Bandeirantes consiste, basicamente, em duas etapas importantes. A primeira etapa, mencionada até o capítulo anterior, apresenta os diversos tipos de geração de energia eólica, suas vantagens e desvantagens, histórico do aproveitamento da energia dos ventos, diferenças de energia renovável e não-renovável, relação da energia com o meio ambiente e etc.

A segunda etapa deste projeto que se inicia neste momento. A partir deste capítulo, o conteúdo deste trabalho está focado no aproveitamento de energia eólica utilizando um aerogerador de eixo vertical, já mencionado anteriormente na página 27, denominado "Savonius".

O aerogerador do tipo Savonius é um dos mais utilizados para recarga de baterias, moagem de grãos, irrigação, ou seja, em locais onde a finalidade do uso da energia não necessita de grandes investimentos e também de produção de energia em grande escala.

A escolha de estudo e construção de uma unidade eólica com uma turbina savonius têm como objetivo demonstrar como um fenômeno da natureza presente em todos os lugares do mundo pode ser aproveitado em um projeto de construção mecânica de fácil compreensão quanto ao funcionamento e sistema de transmissão utilizado.

Tendo como foco principal a demonstração de funcionamento de um sistema eólico tradicionalmente conhecido, a aplicação da unidade a ser construída destina-se apenas para fins acadêmicos por isso a energia gerada na unidade eólica deste projeto é convertida em energia elétrica e representada através de diodos luminoso, LED's, (*Light Emitting Diode*) simbólicos diretamente relacionados com a rotação do eixo vertical do rotor Savonius.



Uma maneira bem fácil de exemplificar o foco desta construção é a mini unidade eólica mostrada na figura 7.1. Neste caso, a energia obtida dos ventos geradores através de um secador de cabelos é “absorvida” por duas pás feitas de uma garrafa de plástico de um litro e ao rotacionar o eixo vertical (uma caneta esferográfica), o mesmo transmite o giro, utilizando uma pequena transmissão ,para um motor elétrico de 12 Volts de tensão e 2400 rpm que acende um LED (Diodo Luminoso).

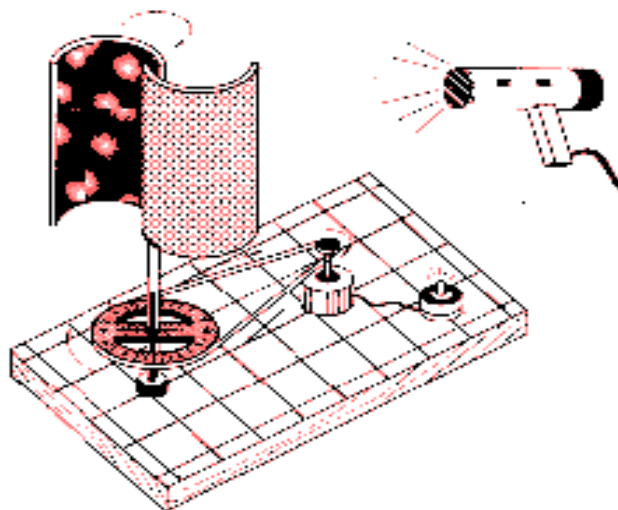


Figura 7.1 – Projeto de uma mini unidade eólica (Savonius) [18]

O resultado deste projeto está representado na figura 7.2 .Com isso se pode observar que a visualização do funcionamento dos componentes é de fácil compreensão até mesmo para quem desconhece o tipo de sistema.

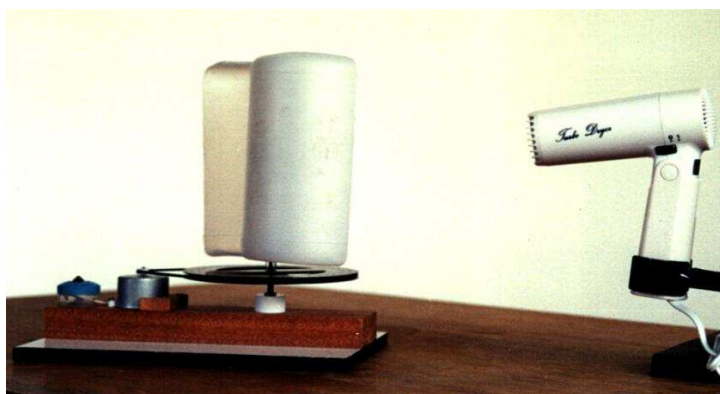


Figura 7.2 – Foto de um Mini aerogerador eólico Savonius [19]

## **7.2) Montagem do Aerogerador Savonius**

### 7.2.1) Materiais e peças utilizadas

Para execução da montagem da unidade eólica prevista neste projeto foram necessárias algumas aquisições específicas para o dimensionamento projetado e para garantir o funcionamento da unidade eólica.

Os materiais necessários para montagem da unidade eólica são:

- Vinte metros de tubos metálicos de 17,5 mm de diâmetro
- Quatro mancais de rolamento com 100,0 mm de diâmetro externo
- Três tambores metálicos cortados ao meio
- Eixo metálico com 26,8 mm de diâmetro e 1390,0 mm de comprimento
- Eixo metálico de entrada do gerador de energia elétrica
- Gerador elétrico de 24 V
- Regulador (com transistor) de Tensão de saída para 3,0 V
- Engrenagem de 20 dentes e 80,0 mm de diâmetro
- Corrente metálica para transmissão
- Placa em acrílico para fixação dos LED's
- Diodos Luminosos (LED's) – 260 unidades

Esses materiais utilizados tiveram um determinado custo para o grupo de formandos conforme mostra a tabela 7.1. Os itens que não constam o custo de aquisição foram doados

por fornecedores e adquiridos por outras doações de pessoas conhecidas não relacionadas diretamente ao projeto.

<b>Materiais utilizados para construção de um aerogerador Savonius</b>				
	<b>Item</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Custo (R\$)</b>
1	Tubos metálicos de 17,5 mm de diâmetro	20	metros	R\$ 120,00
2	Mancais de rolamento com 100,0 mm de diâmetro externo	4	pças	R\$ 75,00
3	Tambores metálicos cortados ao meio	3	pças	R\$16,00
4	Eixo metálico com 26,8 mm de diâmetro	1,39	metros	R\$ 40,00
5	Gerador elétrico de 12 V	1	pça	R\$ 95,00
6	Regulador (com transistor) de Tensão de saída para 3,0 V	1	pça	R\$ 45,00
7	Engrenagem de 50 dentes e 180,0 mm de diâmetro	1	pça	R\$ 78,00
8	Engrenagem de 20 dentes e 80,0 mm de diâmetro	1	pça	R\$ 66,00
9	Placa em acrílico para fixação dos LED's	1	pça	R\$ 19,00
10	Diodos Luminosos (LED's) – 260 unidades	260	pças	R\$ 130,00
11	Tintas - Esmalte Sintético (Azul, Cinza, Branco e Vermelho)	4	latas	R\$ 42,00
<b>CUSTO TOTAL</b>				<b>R\$ 726,00</b>

Tabela 7.1 – Custos de aquisição de materiais do projeto Savonius

#### 7.2.2) Etapas da montagem do rotor Savonius

A primeira etapa da montagem foi a soldagem dos tubos metálicos estruturais do aerogerador Savonius juntamente com os mancais de rolamento na seqüência já é possível posicionar os rolamentos nos mancais (Figura 7.3), e o eixo vertical do rotor, conforme mostra a figura 7.4.

Após a montagem estrutural do aerogerador Savonius, pode-se começar a fixar os tambores já cortados (Figura 7.5) no eixo vertical.



Figura 7.3 – Foto do rolamento posicionado no respectivo mancal



Figura 7.4 – Foto da estrutura do aerogerador Savonius



Figura 7.5 – Foto dos tambores cortados (pás)

Já com as devidos cortes dos tambores metálicos é possível executar a fixação dos mesmos utilizando três parafusos fixos diretamente no eixo vertical do rotor conforme mostra a figura 7.6, já com as peças devidamente pintadas.



Figura 7.6 – Foto dos tambores Fixos no Eixo Vertical do rotor Savonius

Para maior aproveitamento eólico, as pás são posicionadas com uma diferença de 60° de cada nível de pás.

Após o posicionamento e fixação das pás, é necessário incluir o sistema de transmissão do rotor Savonius para o gerador elétrico executar a conversão de energia mecânica para energia elétrica e consecutivamente repassar a tensão gerada para o regulador de tensão para compatibilizar a tensão de três Volts exigida nos LED's.

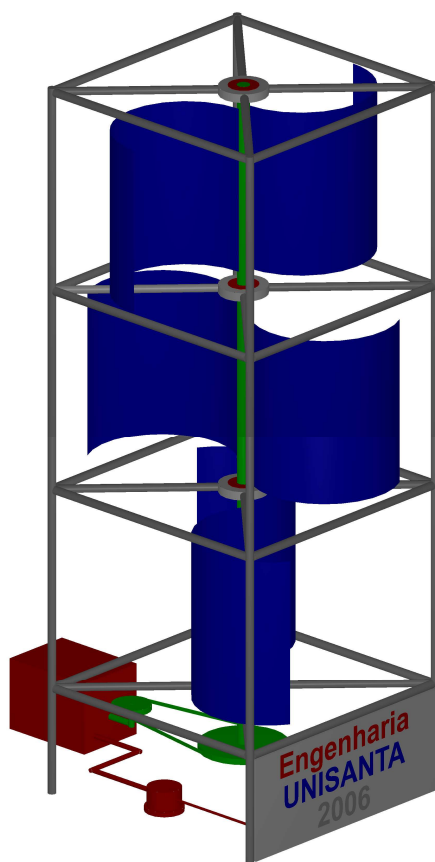


Figura 7.7 – Vista dinâmica do projeto

A união dos LED's indica as palavras "Engenharia UNISANTA 2006"

O processo de montagem do aerogerador Savonius especificado nesse projeto de graduação de Engenharia Industrial Mecânica foi baseado no desenho, formato A3, em anexo no final do trabalho.

A confirmação de aplicação do projeto realizou-se na prática utilizando um multímetro para medir a geração de corrente obtida através de uma determinada rotação e com isso ligou-se os diodos luminosos diretamente na saída do gerador mas a variação de tensão foi muito grande inicialmente e por isso houve a necessidade de um regulador de tensão DC/DC na instalação. Assim pode-se garantir a saída de 3 Volts na saída do rotor.



## 8.0) Conclusão

Com o estudo do desenvolvimento do projeto de uma turbina eólica, conclui-se que para um projeto deste porte, venha dar bons resultados, tem que haver altos investimentos em pesquisas. Essas pesquisas geram avanços tecnológicos que se refletem em otimização na performance dos equipamentos. Então, a implantação do uso de energia eólica, depende unicamente do crescimento tecnológico da humanidade com o objetivo de diminuir os custos relativos à manutenção, diminuir o efeito sonoro e aumentar o rendimento das turbinas eólicas. No entanto, o rendimento, a manutenção e o efeito sonoro de uma turbina são dependentes do avanço tecnológico de outros setores da indústria, como no caso da fabricação de materiais mais leves, baratos e resistentes e na produção de máquinas com maiores taxas de rendimento e aproveitamento de energia.

Desde os primeiros captadores de vento até os mais modernos aerogeradores verifica-se que em toda a sua construção estão embutidos grandes conhecimentos de aerodinâmica até o monitoramento por softwares sofisticados.

Sendo assim, acredita-se que o custo por kW gerado, em consequência está reduzindo e as vantagens da energia eólica, por ser totalmente renovável, pode viabilizar a auto-suficiência de regiões de consumo próximas. O fato de oferecer baixo impacto ambiental e preços cada vez mais competitivos quando comparada a outras fontes também auxilia no desenvolvimento desta fonte de energia.

Portanto, o aproveitamento da energia eólica será de vital importância em um futuro próximo, pois suprirá as necessidades de populações de pequeno porte, deixando a demanda maior de energia recair sobre as fontes convencionais de energia, pois como se sabe uma indústria necessita de uma demanda muito maior de energia que uma residência comum, entretanto espera-se que com o avanço da tecnologia a implantação de fontes de energia alternativas será suficiente para toda a demanda de energia do planeta.

Vale ressaltar as dificuldades que o grupo enfrentou para a obtenção de bibliografias específicas referentes ao assunto, devido até recentemente esta forma de geração ser vista como amadora e com pouco potencial de geração.

Hoje, percebe-se que é uma das formas de geração que mais tem conquistado espaço nas matrizes energéticas dos países desenvolvidos, principalmente na Europa.

Na segunda etapa deste projeto, pode-se considerar que a construção de um aerogerador com rotor Savonius apresenta muitas variantes em função de seu aproveitamento. O teste de viabilidade do projeto foi realizado na prática pelos componentes do grupo a fim de se obter um resultado positivo da finalidade do estudo específico sobre Savonius.

O teste realizado antes da construção do aerogerador foi realizado na prática através de um motor de limpador de pára-brisas veicular conectando-o numa fonte de energia “forçada” para simular a rotação de seu eixo principal. Realizando este teste prático, resultou-se num resultado positivo, confirmando a possibilidade de aproveitamento de uma rotação adequada e compatível em um eixo qualquer transferindo a energia para uma aplicação simples como acender uma pequena luz.

## **9.0) Bibliografia**

- 1] [www.energiaeolica.com](http://www.energiaeolica.com) em 22/04/06
- 2] [www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/eolica/eolica.htm](http://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/eolica/eolica.htm) em 01/05/06

- 3] [www.cresesb.cepel.br/](http://www.cresesb.cepel.br/) em 01/05/06
- 4] [www.energiasrenovaveis.com](http://www.energiasrenovaveis.com) em 23/04/06
- 5] [www.manualdepericias.com.br](http://www.manualdepericias.com.br) em 15/03/2006
- 6] [www.eolica.com.br](http://www.eolica.com.br) em 15/03/06
- 7] [www.gabeira.com.br](http://www.gabeira.com.br) em 20/03/2006
- 8] [www.unificado.com.br](http://www.unificado.com.br) em 20/03/2006
- 9] Wolfgang Palz, Energia Solar e Fontes Alternativas – Hemus, 1981.
  
- 10] Energia do vento e da água. Energia. São Paulo, Gecho, 1994 64p.
- 11] <http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/eolica/apstenergieolica.htm> em 12/04/2006
- 12] [www.nerg.com.br](http://www.nerg.com.br) em 15/05/2006
- 13] Krahe, Paulo Roberto. Estudo do potencial de mercado das fontes renováveis alternativas no Brasil: relatório final. Rio de Janeiro, INT/ FINEP, 2005.
- 14] Aldabó, Ricardo. Energia Eólica. Editora ArtLiber.
  
- 15] [http://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/AE\\_Savonius\\_turbine.html](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/AE_Savonius_turbine.html) em 01/10/06
  
- 16] [http://www.bellera.org/molins/aerogeneradors\\_savonius.htm](http://www.bellera.org/molins/aerogeneradors_savonius.htm) em 14/09/06
  
- 17] <http://www.cje.org/inice/Per/renovabl.htm> em 23/09/06