

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

PROJETO DE UM GERADOR EÓLICO PARA USO RESIDENCIAL

Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Graduação em Engenharia

**Henrique José Rodrigues Torres
Marcos Paulo Perestrelo Portugal**

Orientador: Prof. Dr. Demetrio Cornilios Zachariadis

**São Paulo
2004**

Aos nossos queridos pais, pelos anos de
carinho e empenho, sem os quais nada
seríamos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, pelas oportunidades oferecidas ao longo da vida, aos meus amigos e companheiros nesta jornada: Eduardo Zorzeto Junior, Alexandre Henrique Machado Braga do Carmo, Vladir Arienzo Junior, Daniel Augusto Dias, Felipe Mastrobuono de Camargo, Helder Stanquini pelo apoio em todos os momentos difíceis do curso.

Aos amigos que colaboraram diretamente para a realização deste trabalho: Maurício Daniel Formaggio, José Fábio Rohr Sammarone, Bruno Tebaldi e Thiago Hiromu Imai.

Ao meu professor orientador Demetrio Cornilios Zachariadis, que foi além de um orientador, mostrou-se um verdadeiro amigo.

Ao professor Fábio Saltara pelo auxílio nas simulações.

Finalmente ao meu amigo e companheiro neste trabalho, Marcos Paulo Perestrelo Portugal, pela paciência e persistência mesmo nos momentos em que parecia não haver saída.

Henrique José Rodrigues Torres

RESUMO

O presente trabalho visa o projeto básico de um gerador eólico para uso residencial. O trabalho mostra desde um estudo das condições eólicas do país indicando as regiões onde a instalação do equipamento é mais favorável até o projeto e dimensionamento dos subsistemas envolvidos. Também é mostrada uma teoria simplificada sobre a aerodinâmica dessas turbinas, é mostrado o resultado de algumas simulações preliminares assim como uma análise vibracional da estrutura.

ABSTRACT

The purpose of this research is to design a small wind turbine for domestic applications. The research shows a study of the wind conditions in Brazil, indicating the most applicable areas, and the design of the components of the subsystems involved. A simplified theory is used to analyse the aerodynamics of wind turbines. Some aerodynamics simulations are shown as a vibrational analysis of the wind turbine structure.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 ESTUDO DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO	2
2.1 Introdução	2
2.2 Regimes de ventos sobre o Brasil	3
2.2.1 Bacia Amazônica Ocidental e Central	3
2.2.2 Bacia Amazônica Oriental	3
2.2.3 Zona litorânea Norte - Nordeste	4
2.2.4 Zona litorânea Nordeste - Sudeste	4
2.2.5 Elevações Nordeste - Sudeste	4
2.2.6 Planalto central	5
2.2.7 Planaltos do Sul	5
2.3 Mapa do potencial eólico brasileiro	5
2.4 Potencial eólico brasileiro estimado	6
2.5 Conclusões sobre as condições eólicas do Brasil	8
3 O GERADOR EÓLICO	9
3.1 Introdução	9
3.2 Turbina eólica	9
3.3 Caixa de transmissão	11
3.4 Gerador elétrico	11
3.5 Acumulador	12
3.6 Estrutura	13
3.7 Acessórios	13
4 PROJETO DO GERADOR EÓLICO	14
4.1 Cálculo das necessidades energéticas	14
4.2 Modelagem aerodinâmica	14
4.3 Modelo físico	15
4.4 Modelo matemático	16
4.4.1 Lei de Betz	16
4.4.2 Turbina eólica	18
4.4.3 Simulação aerodinâmica preliminar	22
4.5 Dimensionamento da caixa de transmissão	26
4.6 Dimensionamento do eixo da turbina eólica	33
4.7 Seleção dos mancais de rolamento da SKF	40

4.8 Dimensionamento da estrutura da turbina eólica	41
4.9 Análise vibracional da estrutura	45
5. ANÁLISE DE CUSTOS	49
6. CONCLUSÕES	51
7. ANEXOS	53
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

Lista de símbolos

γ - Densidade linear do material.

ρ - Densidade do material.

σ - Tensão normal.

ω - Velocidade angular.

λ - Tip speed ratio.

V – Velocidade linear.

p – Pressão.

P – Potência.

T – Torque.

C_p – Coeficiente de potência.

A – Área.

C_l – Coeficiente de sustentação.

C_d – Coeficiente de arrasto.

Re – Número de Reynolds.

d_i – Diâmetro interno

d_e – Diâmetro externo.

L – Força de sustentação.

D – Força de arrasto.

Lista de figuras

Figura 2.3.1 – Mapa do potencial eólico brasileiro	6
Figura 2.4.1 – Potência instalável e energia anual gerada	7
Figura 3.2.1 – Típica turbina de eixo horizontal (HAWT)	10
Figura 3.2.2 – Turbina Darrieus	10
Figura 3.2.3 – Turbina Savonius	11
Figura 4.3.1 – Esquema geral da turbina a ser modelada	16
Figura 4.4.2.1 – Seção genérica de um aerofólio	18
Figura 4.4.2.2 – Geometria dos vetores que atuam numa seção da pá	19
Figura 4.4.3.1 – Desenho do gerador elétrico utilizado	23
Figura 4.8.1 – Gráfico $C_d \times Re$	42
Figura 4.9.1 – Sistema de coordenadas da barra	45
Figura 4.9.2 – Elemento infinitesimal da barra	45
Figura 4.9.3 – Diagrama de corpo livre de um elemento diferencial da barra	47
Figura 7.1 – Campo de velocidades nas pás	53
Figura 7.2 – Campo de pressões nas pás	54
Figura 7.3 – Turbulência nas pás	55

Lista de gráficos

Gráfico 4.4.3.1 – Gráfico de operação do gerador Alxion 145STK2M	24
Gráfico 4.4.3.2 – Potência gerada versus velocidade do vento	25
Gráfico 4.4.3.3 – Gráfico Coef. De potência versus “Tip speed ratio”	25

Lista de tabelas

Tabela 4.1.1 – Consumo energético residencial	14
Tabela 4.4.2.1 – Cálculos gerais da turbina	22

1. Introdução.

Este trabalho tem como objetivo o projeto de um pequeno gerador eólico para uso residencial.

A parte inicial deste trabalho é o estudo da viabilidade técnica de operação destes aerogeradores no Brasil, que por ser um país de dimensões continentais, será dividido em regiões.

Posteriormente, serão apresentados uma descrição geral de funcionamento e os diversos tipos de turbinas eólicas existentes.

Finalmente será apresentado o projeto do gerador eólico, que englobará os seguintes itens:

- Definição do problema;
- Projeto aerodinâmico;
- Detalhamento dos componentes mecânicos;
- Seleção de componentes elétricos;
- Projeto estrutural;
- Análise financeira;

2. Estudo do potencial eólico brasileiro.

2.1 Introdução.

O aproveitamento do potencial eólico no Brasil tem sido questionado desde os anos de 1970, quando institutos como o Centro Técnico Espacial disponibilizou anemômetros que foram instalados em aeroportos brasileiros, onde os primeiros dados indicando as velocidades médias anuais foram obtidos. Eram valores da ordem de 4m/s a 10 metros de altura, induzindo dessa forma a viabilidade técnica de se aprofundar no desenvolvimento de aerogeradores de pequeno porte para sistemas isolados.

Sendo assim, várias pequenas turbinas eólicas foram projetadas, com potências variando de 2 a 5kW, juntamente com o desenvolvimento de métodos mais precisos e confiáveis na medição das condições eólicas. Consequentemente, foram determinadas as velocidades médias de outras regiões a alturas maiores (20 m), evitando dessa forma a influência da rugosidade da superfície e obstáculos. Com o advento da informática, simulações computacionais foram criadas com o uso de curvas de desempenho de grandes turbinas entre 500 e 600kW indicando a possibilidade de geração de 3TWh/ano com uma ocupação de 10 % do litoral do Ceará e Rio Grande do Norte, regiões onde indicavam melhores condições eólicas.

Mais adiante, em 1999, foram empregados softwares (WindMap) utilizando modelos de geoprocessamento de relevos e de rugosidade, atrelados às médias obtidas no Estado do Paraná, superiores a 6,5m/s; indicando um grande potencial eólico na região de 5,8TWh/ano.

Atualmente, também com a utilização da metodologia WindMap, e com o uso de torres de 30-50m, equipamentos de precisão e procedimentos mais adequados, consegue-se destacar áreas de baixa rugosidade, revelando um potencial aproveitável de até 12TWh/ano a 50m ou mesmo de 52TWh/ano a 70m, com velocidade média anual superior a 7m/s na mesma região.

2.2 Regimes de ventos sobre o Brasil.

Para melhor análise e entendimento do comportamento dos ventos, o território nacional foi dividido em 7 regiões geográficas, onde foram levados em conta as altitudes dos terrenos, vegetação, propriedades de superfícies (como rugosidade). Sendo assim, características comuns foram reunidas e apresentadas a seguir:

2.2.1 Bacia Amazônica Ocidental e Central:

Abrange a região das grandes florestas amazônicas. As velocidades médias anuais dessa região são inferiores a 3,5m/s, dada a grande rugosidade do terreno proveniente das extensas áreas de florestas densas e também pelos gradientes fracos de pressão associados à zona difusa de baixa pressão localizada na Bacia Amazônica. De maneira geral a magnitude das velocidades dos ventos nessa região é muito baixa, devido principalmente a pequena variação de temperaturas, como consequência também reduzidas variações de pressões o que acarreta em baixas acelerações das massas de ar.

2.2.2 Bacia Amazônica Oriental:

Essa área abrange basicamente a região entre o Amapá e Maranhão, e também apresenta baixas velocidades dos ventos dada a alta rugosidade superficial e aos fracos gradientes de pressão. Porém, já existe um pequeno aumento nas velocidades de vento de oeste para leste, já que nesse sentido as áreas verdes são menores, como consequência menor rugosidade, atrelado ao fato de que com a aproximação litorânea encontram-se maiores contrastes térmicos entre continente e mar, provocando maiores gradientes de pressão acarretando em maiores acelerações de massas de ar. Além desses fenômenos, na porção nordeste existem extensas elevações de terreno que aceleram os ventos pelo efeito de compressão vertical do escoamento.

2.2.3 Zona Litorânea Norte-Nordeste:

É definida com a faixa costeira entre o norte da costa do Amapá e o Cabo de São Roque, no rio Grande do Norte. Nesta região, o regime dos ventos basicamente é controlado pelos alísios de leste e brisas marinhas e terrestres. Essa combinação, entre alísios e brisas, resulta ventos com velocidades médias anuais entre 5 e 7,5m/s (entre Amapá e Pará) e velocidades de 6 a 9m/s na parte sul, abrangendo os litorais do Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte. Nessa área (ao sul) as velocidades são maiores principalmente devido aos menores índices de vegetação e umidade do solo, promovendo menor rugosidade superficial e permitindo que a superfície atinja maiores temperaturas, consequentemente, acentuando os contrastes térmicos entre continente e mar, elevando as velocidades dos ventos.

2.2.4 Zona Litorânea Nordeste-Sudeste:

É definida pela área litorânea que se estende entre o Rio Grande do Norte e Rio de Janeiro. As velocidades dos ventos são decrescentes a medida em que avançamos para o sul, sendo na porção norte os ventos têm médias anuais entre 8-9m/s decrescendo até 3,5-6m/s na costa sul (RJ). Exceção feita a área entre Espírito Santo e região nordeste do Rio de Janeiro, onde as velocidades dos ventos são próximas a 7,5m/s. Tal fato é explicado pelo fenômeno denominado Anticiclone Subtropical Atlântico, que é uma aceleração causada por obstáculo, pois o ar acelera-se para sul para aliviar o acúmulo de massa causado pelo bloqueio das formações rochosas (montanhas).

2.2.5 Elevações Nordeste-Sudeste:

Engloba as regiões de serras e chapadas, que se estende desde o Rio Grande do Norte até Rio de Janeiro, com distâncias até 1000km da costa. As velocidades médias anuais variam de 6,5 a 8m/s, sendo que as áreas com maiores médias

ocorrem de forma localizada, devido ao fenômeno já explicado proveniente do efeito de compressão vertical. Assim os ventos mais intensos são encontrados nas maiores elevações, onde o efeito de compressão é mais acentuado.

2.2.6 Planalto Central:

Entende-se pelo sul da Bacia Amazônica, desde a margem da Bacia do Rio São Francisco até as fronteiras com a Bolívia e Paraguai. A velocidade média anual dos ventos nessa região situa-se entre 4 e 6m/s. A intensidade do escoamento do ar é mais intenso de norte para o sul, dada a menor rugosidade superficial, pois a vegetação se torna menos densa (Cerrado). Destacam-se regiões extremas, de fronteiras no Mato Grosso do Sul, onde as velocidades médias alcançam 7m/s, dada a elevação do terreno, ocasionando o efeito de compressão vertical.

2.2.7 Planaltos do Sul:

Na região mais ao sul do Brasil, de São Paulo até os limites do Rio Grande do Sul, o escoamento atmosférico apresenta baixa intensidade, uma vez que a região sul do país apresenta um relevo caracterizado por planícies secas, o que favorece o predomínio de baixas pressões. Porém, nas maiores elevações montanhosas, bem como em planaltos de baixa rugosidade, os ventos atingem velocidades entre 7 e 8m/s.

2.3 Mapa do potencial eólico brasileiro.

A seguir é apresentado o mapa eólico brasileiro, revelando a magnitude das velocidades dos ventos, conforme explicado.



Figura 2.3.1 – Mapa do potencial eólico brasileiro.

2.4 Potencial eólico brasileiro estimado.

Através da integração de mapas digitais, aliados ao uso de recursos de geoprocessamento, cálculos de desempenho e produção de energia elétrica a partir de curvas de potência de turbinas eólicas, foram obtidos resultados tais como velocidades médias anuais, potência instalável e a energia anual gerada.

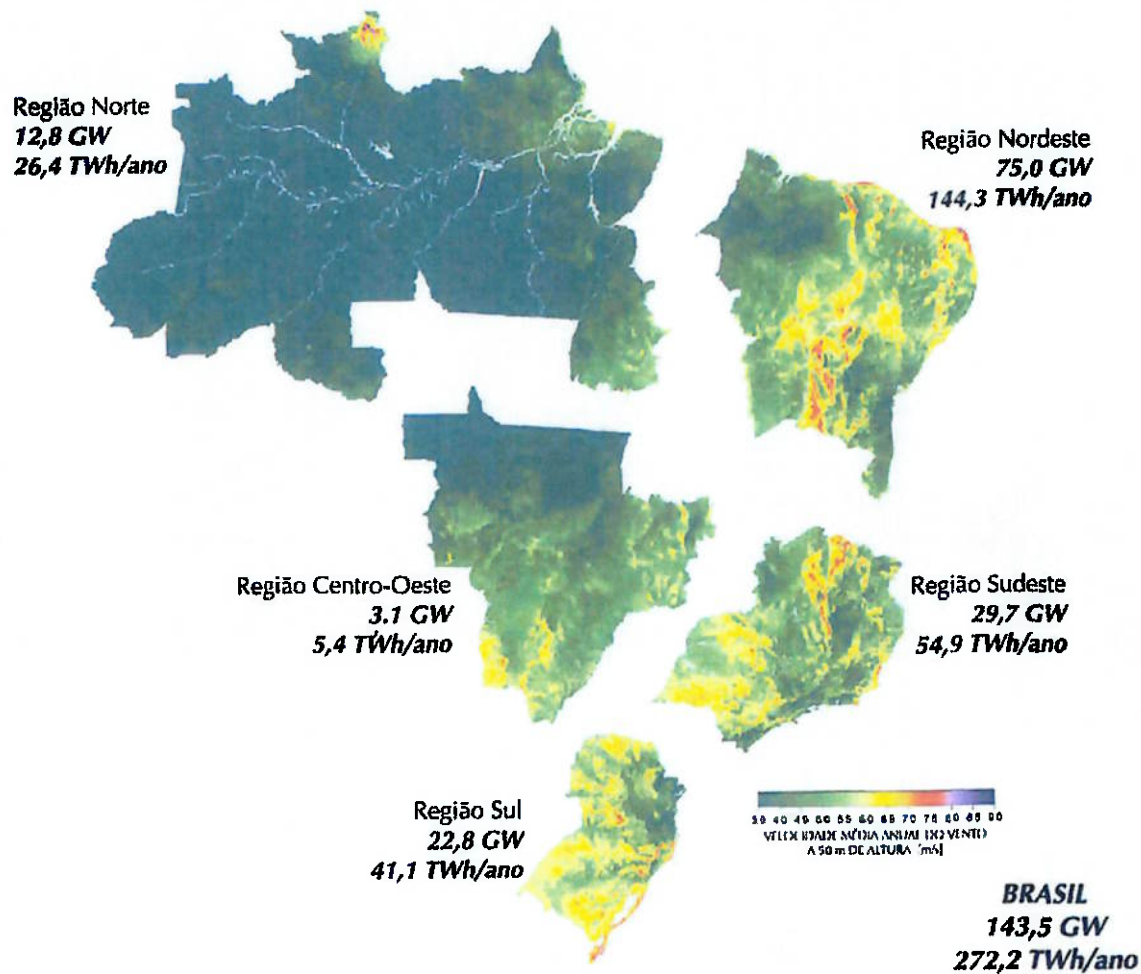


Figura 2.4.1 – Potência instalável e energia anual gerada.

O processo de obtenção dos resultados da figura anterior foi realizado considerando-se os seguintes aspectos:

- Só foram integradas as áreas que apresentam velocidades médias anuais maiores que 6m/s, isso porque reflete a faixa ótima de geração de energia das turbinas eólicas comerciais.
- Foram consideradas, conforme mencionado, curvas médias de desempenho de turbinas eólicas comerciais para o cálculo de produção de energia.
- Foram adotados intervalos com incrementos de 0,5 m/s, para as velocidades médias anuais.
- O desempenho das turbinas foi calculado dentro dos limites inferiores para cada intervalo demonstrado na tabela.

- Foi considerada uma estimativa de densidade de ocupação energética de 2MW/km^2 .

2.5 Conclusões sobre as condições eólicas do Brasil.

Sabendo-se que o desenvolvimento econômico do país potencializa necessidade de expansão da oferta de energia em níveis acima de 5% ao ano, e visto que regiões como Nordeste e Extremo Sul do Brasil estão afastados dos principais centros de geração elétrica, além de apresentarem os melhores índices de potencial eólico; torna-se, portanto, prioritário a criação de outros meios de “geração” de energia nestes locais, estendendo e otimizando novas tecnologias, buscando sempre melhores aproveitamentos dos recursos energéticos do país. A energia eólica assume, dessa forma, um papel fundamental como uma das alternativas de geração complementar, podendo ser aplicada e interligada diretamente ao seus centros consumidores, tais como residências, onde a energia proveniente de pequenas turbinas (1-2,5kW), utilizadas em grande escala por um grande número de residências, principalmente nas regiões litorâneas, implicaria certamente em uma expressiva redução e conseqüentemente economia do uso da energia hidrelétrica, já que os índices revelam que 93% do consumo total de energia elétrica no Brasil foram supridos por usinas hidrelétrica, e desse percentual 40% foram consumidos pelos setores residencial e comercial.

3. O gerador eólico.

3.1 Introdução.

O gerador eólico é um equipamento de conversão de energia, nele ocorre a transformação de energia mecânica proveniente do movimento das massas de ar (vento), em energia elétrica utilizável.

Pode-se dividir o gerador eólico em seis subsistemas, que serão analisados mais detalhadamente nos tópicos seguintes:

- Turbina eólica;
- Caixa de transmissão;
- Gerador elétrico;
- Acumulador;
- Estrutura;
- Acessórios.

3.2 Turbina eólica.

A turbina eólica é a responsável pela transformação da energia dos ventos em energia mecânica.

As turbinas podem ser classificadas de acordo com a direção de seus eixos de rotação:

- Eixo horizontal (HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine):

São turbinas caracterizadas pelo seu número de pás, podem ter 1,2,3 ou mais pás, a ilustração a seguir ilustra uma turbina de eixo horizontal típica:



Figura 3.2.1 – Típica turbina de eixo horizontal (HAWT).

- Eixo vertical (VAWT – Vertical Axis Wind Turbine):

Existem dois tipos de turbinas de eixo vertical:

- Turbina Darrieus, formada por aerofólios curvilíneos presos a um eixo central. Possuem como grande desvantagem o fato de não conseguirem partir sozinhas, neste caso podem usar turbinas Savonius para a sua partida.



Figura 3.2.2 – Turbina Darrieus.

- Turbina Savonius, formada por corpos rombudos presos a um eixo central, não são turbinas muito eficientes. Sua maior utilidade é como dispositivo de partida de turbinas do tipo Darrieus.



Figura 3.2.3 – Turbina Savonius.

3.3 Caixa de transmissão.

A caixa de transmissão é necessária para adequar os valores de torque e rotação da turbina aos valores necessários para o funcionamento eficiente do gerador elétrico. Na maioria dos casos, são utilizadas caixas multiplicadoras, que aumentam a velocidade de rotação e reduzem o torque aplicado ao gerador.

3.4 Gerador elétrico.

É responsável pela conversão eletro-mecânica. É uma tecnologia bem dominada de forma que no mercado existe diversos tipos e fabricantes de geradores elétricos.

Dentre os geradores elétricos, os mais importantes são: de corrente contínua, síncronos e assíncronos. Cada um com vantagens e desvantagens que devem ser analisadas detalhadamente, pois cada projeto exige parâmetros diferentes de funcionamento que devem ser obedecidos para se obter um funcionamento satisfatório do equipamento.

Os geradores elétricos acoplados a turbinas eólicas encontram problemas relacionados à potência de entrada, uma vez que freqüentes variações na velocidade do vento não são raras e tais variações produzem oscilações na potência de entrada do gerador, o que pode acarretar problemas operacionais.

3.5 Acumulador.

O acumulador nada mais é do que um banco de baterias que tem como função promover o equilíbrio entre a demanda e a disponibilidade energética promovida pelos ventos. Este equilíbrio é necessário uma vez que o consumo de energia é dado pelas necessidades do usuário, entretanto, a disponibilidade energética depende das condições eólicas do momento, desse modo, numa calmaria ter-se-ia um “black out”.

Para solucionar esse problema utiliza-se o acumulador, o acumulador fornece a energia ao consumidor, e, na medida que os ventos se tornam favoráveis, o gerador eólico carrega o acumulador. Resumindo, tem uma função análoga à uma caixa d’água.

É importante ressaltar que apesar da maioria das baterias utilizadas com essa finalidade ter uma tensão nominal de 12V, não se pode confundi-las com baterias automotivas, que são baterias de ciclo curto (alta frequência de carga-descarga). Já as baterias utilizadas especificamente para uso em sistemas de energia eólica são baterias de ciclo longo, pois podem ser submetidas a longos ciclos de descarga (calmaria).

3.6 Estrutura.

A estrutura tem como função o suporte mecânico do aerogerador, ela pode ser tubular ou treliçada, sendo que cada projeto deve ter analisado adequadamente para se concluir qual o melhor tipo de estrutura.

Em alguns casos (por exemplo nas turbinas de eixo vertical), o uso de cabos tensores é necessário.

3.7 Acessórios.

Os acessórios são equipamentos que podem ou não serem empregados dependendo do tipo de aplicação que o aerogerador será utilizado.

Como exemplo, pode-se citar o inversor, tal equipamento é responsável pela transformação do fornecimento de energia DC em AC. Outros acessórios também podem ser empregados tais como fusíveis, disjuntores, entre outros dispositivos de proteção tanto do acumulador quanto da carga alimentada.

4. Projeto do gerador eólico.

4.1 Cálculo das necessidades energéticas.

Considerando que o gerador eólico alimentará toda a iluminação de uma residência média, e ainda terá uma reserva de energia para atender alguma pequena demanda emergencial, pode-se dimensionar o consumo através de uma planilha de cálculo, como planilha apresentada a seguir:

Cálculo de consumo energético				
	Potência (W)	Quantidade	Horas por dia	Consumo diário (Wh)
Lâmpadas	16	15	5	1200
Equipamentos	150	1	4	600
Margem (%)	20%			
Total				2160

Tabela 4.1.1 – Consumo energético residencial

De acordo com a tabela, observa-se que o consumo diário atinge cerca de 2000 Wh, ou seja, a grosso modo uma turbina gerando 500 W por 4 horas supriria tal demanda, portanto será considerado para o projeto um aerogerador com potência máxima de cerca de 1000W com um vento incidente de aproximadamente 10 m/s.

Ainda considerando a estimativa acima, utilizando um banco de baterias composto por quatro baterias 12V e corrente máxima de 180 Ah (operando com uma profundidade de descarga de 60%), Ter-se-ia capacidade suficiente de alimentar todo o sistema proposto por dois dias sem vento.

4.2 Modelagem aerodinâmica.

As turbinas extraem a potência do vento através das forças de arrasto e sustentação.

A força de arrasto é proveniente da ação de um fluido (no caso o ar) sobre um corpo (no caso, as pás da turbina), essa força atua na direção do escoamento e

tem como origem duas componentes: a primeira é a diferença de pressão entre as partes da anterior e posterior do corpo; a segunda tem relação com a viscosidade do fluido, ou seja, é formada pelas tensões de cisalhamento atuantes ao longo de todo o corpo.

Já a força de sustentação atua numa direção perpendicular ao escoamento, pode ser explicada pela diferença de pressão entre o lado superior e o lado inferior (respectivamente extradorso e intradorso) do corpo.

Considerando o funcionamento das turbinas, existem aquelas cujo funcionamento depende primordialmente das forças de sustentação, e turbinas dependentes apenas das forças de arrasto. As do primeiro tipo (HAWT e Darrieus) possuem uma eficiência maior, de modo que na prática, são mais utilizadas.

Como ventos são fenômenos naturais e podem eventualmente atingir valores muito elevados, são necessários sistemas de proteção na turbina, tais sistemas devem de algum modo limitar a frequência de rotação do rotor de modo a proteger não só a turbina, mas também a caixa de transmissão e o gerador elétrico. Normalmente tais sistemas são baseados no controle do passo da pá, embandeirando-a (ou seja, deixando-a paralela ao fluxo de ar tal como uma bandeira) ou forçando a pá a estolar (ou seja forçar o descolamento do fluxo de ar sobre a pá, de modo que a sustentação caia drasticamente), este último obviamente só serve para o controle de turbinas dependentes de forças de sustentação, obviamente também podem ser utilizados freios para controlar a velocidade das turbinas.

4.3 Modelo físico.

Considerando os aspectos apresentados até aqui, a turbina selecionada para o projeto será uma turbina do tipo HAWT.

O modelo físico esquemático que será adotado para a obtenção do modelo matemático, será o apresentado na figura a seguir:

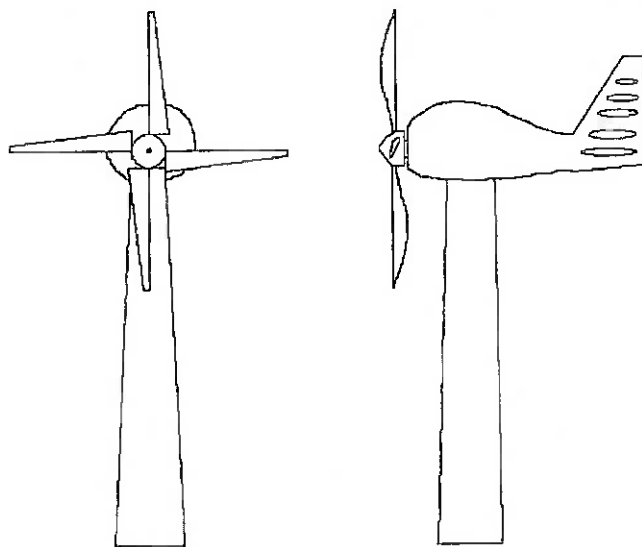


Figura 4.3.1 – Esquema geral da turbina a ser modelada.

Como o objetivo do presente trabalho não é a análise aerodinâmica de um aerogerador, será deduzido um modelo simplificado destinado à compreensão dos fenômenos envolvidos, e a busca por um rendimento satisfatório do equipamento.

4.4 Modelo matemático

4.4.1 Lei de Betz

Como qualquer equipamento de conversão de energia, a principal preocupação é a obtenção do maior rendimento possível. Sempre busca-se a conversão total da energia, entretanto, a natureza com suas peculiaridades e mistérios, não permite a totalidade da conversão e é nesse contexto que é apresentada a seguir a chamada Lei de Betz.

Supondo razoável a hipótese de que a velocidade média do vento sobre o rotor da turbina eólica é a média da velocidade do vento antes de passar pelo plano do rotor (V_1), e depois de passar pelo mesmo plano do rotor (V_2), ou seja, é :

Projeto de um gerador eólico para uso residencial

$$\frac{V_1 + V_2}{2} \quad (4.4.1.1)$$

A massa de ar que passa no rotor durante um segundo é:

$$m = \rho \cdot A_R \cdot \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (4.4.1.2)$$

Onde m é o fluxo mássico de ar que atravessa o rotor, ρ é a densidade do ar, A_R é a área varrida pelo rotor e $(V_1 + V_2)/2$ é a média da velocidade do vento através do rotor da turbina.

De acordo com a Segunda Lei de Newton, a potência extraída do vento pela

$$P = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (4.4.1.3)$$

turbina é:

Substituindo m na expressão, tem-se:

$$P = \frac{\rho}{4} \cdot (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 + V_2) \cdot A_R \quad (4.4.1.4)$$

A potência total do fluxo de ar que atravessaria o disco do rotor sem ser perturbado, seria:

$$P_0 = \frac{\rho}{2} \cdot V_1^3 \cdot A_R \quad (4.4.1.5)$$

Calculando a razão entre a potência extraída e a total, obtém-se a seguinte função:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right) \cdot \left(1 + \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \right) \quad (4.4.1.6)$$

Analisando tal equação, observa-se que ela atinge o máximo para a razão $V_2/V_1 = 1/3$, onde a máxima potência extraída é de $16/27$, ou 59%.

A conclusão que se tira, é que qualquer máquina eólica tem um rendimento máximo limitado de 59%. Obviamente o rendimento real que se obtém de um aerogerador é menor do que isso, uma vez que os rendimentos do gerador elétrico, mancais e ainda a não constância do fluxo de ar afetam o rendimento global do aparelho.

4.4.2 Turbina eólica.

A turbina eólica será modelada como um grupo de aerofólios, que através do fluxo de ar geram sustentação (L) e arrasto (D) (como a ilustração a seguir). Tal conjunto de forças provoca um torque no eixo da turbina, que aliado à rotação do mesmo, gera a potência mecânica.

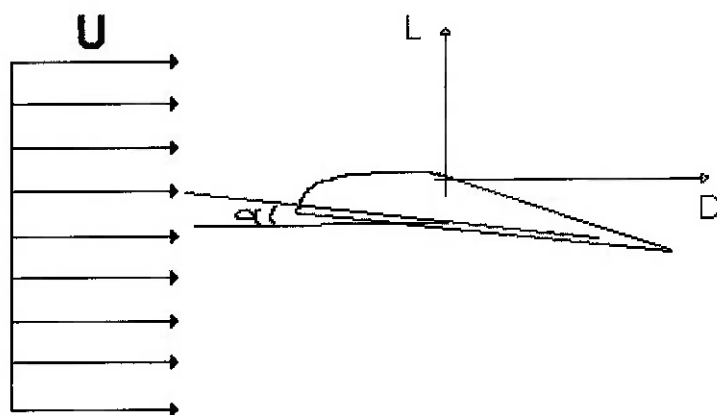


Figura 4.4.2.1 – Seção genérica de um aerofólio.

O objetivo da modelagem é a obtenção da potência que a turbina gera em função da velocidade do vento, para que se possa prever o comportamento da turbina com as mais diversas velocidades de ventos incidentes.

A potência desenvolvida na turbina é função da velocidade do vento, do aerofólio utilizado na pá, da densidade do ar, e do ângulo de ataque entre a pá e o vento incidente no rotor.

Modelando a pá como um aerofólio, tem-se:

$$L = f(\alpha) \quad (4.4.2.1)$$

e

$$D = f(\alpha) \quad (4.4.2.2)$$

Onde α é o ângulo entre a pá e o fluxo de ar. Quando a turbina está girando, o escoamento de ar que a pá “enxerga” é a soma de duas velocidades: A velocidade do vento ao longe “U” e velocidade relativa à rotação da turbina “ ωR ”, que evidentemente varia linearmente ao longo da pá.

Observando a figura abaixo, concluímos:

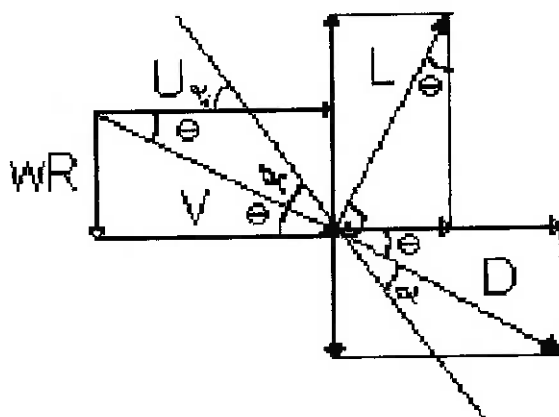


Figura 4.4.2.2 – Geometria dos vetores que atuam numa seção da pá.

Sendo o ângulo de ataque igual a α e ainda, conhecendo-se θ (que é definido pelas velocidades do vento e de rotação), pode-se concluir pela figura que a força útil sobre a seção da pá é dada por:

$$F = L \cdot \cos(\theta) - D \cdot \sin(\theta) \quad (4.4.2.3)$$

Mas, como L e D são modelos que dependem do ângulo de ataque, que por sua vez dependem da rotação do rotor, observa-se que é necessário que cada seção tenha um ângulo de ataque, daí surge a necessidade da torção das pás.

A torção das pás pode ser projetada levando-se em consideração quatro aspectos:

- Tipo de aerofólio utilizado;
- Ângulo de ataque desejado;
- Frequência de rotação desejada;
- Velocidade do vento incidente;

Conhecendo-se a curva do aerofólio utilizado, determina-se o ângulo de operação (de modo a se obter um maior coeficiente de sustentação), então através da rotação da turbina e da velocidade do vento incidente, determina-se o vetor da velocidade do vento. A partir desses parâmetros determina-se a torção da pá naquela seção.

Determinada a torção e sabendo-se dos demais parâmetros geométricos da pá, é possível fazer uma simulação, ainda que grosseira num primeiro momento do comportamento da turbina.

A potência de eixo produzida é então calculada utilizando-se a chamada “Strip Theory” que consiste em discretizar a pá em pequenos elementos. Em cada elemento, considera-se que age um escoamento sem turbulência e sem efeito de esteira, assim como são desprezados os efeitos de “ponta de asa”.

Como já é conhecido o ângulo de ataque entre a seção e o escoamento e ainda a área do elemento, calcula-se a força útil sobre o elemento pela fórmula (4.4.2.3), onde:

$$L = 0,5 \cdot C_L \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \quad (4.4.2.4)$$

e

$$D = 0,5 \cdot C_D \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \quad (4.4.2.5)$$

Obtém-se então o torque no eixo multiplicando cada força pela distância entre o elemento e o eixo, e finalmente obtém-se a potência:

$$P = T \cdot \omega \quad (4.4.2.6)$$

Agora, serão definidos dois importantes coeficientes adimensionais, que regem o comportamento geral de turbinas eólicas.

Coeficiente de potência:

$$C_P = \frac{\dot{W}}{0,5 \cdot \rho \cdot U^3 \cdot \pi \cdot R^2} \quad (4.4.2.7)$$

e

Razão de ponta (“tip speed ratio”):

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{U} \quad (4.4.2.8)$$

Todo esse cálculo é feito numa planilha de cálculo, que para um primeiro estudo é mostrada a seguir (é admitido $\lambda_{\max} \sim 10$):

Planilha de cálculo de turbinas eólicas

Rotação de operação	200,00 RPM	3,33 Hz	2094 rad/s
Raio do rotor	1,70 m		
Vel vento	5,00 m/s		
Alfa	8,00 graus	0,14 rad	
Número de pás	3,00		
Corda na base	0,40 m		
Corda no topo	0,40 m		
Densidade do ar	1,20 kg/m ³		
Coef. de sust.	1,40		
Coef. de arrasto	0,01		
Torque no eixo	16,23 Nm	5,41 Nm	(Por pá)
Potência	339,86 W		

Cálculos														
R	Vel. Perif.	Braco	Teta	Alfa iníc.	Alfa iníc g	Corda	Area	Força Sus	Torque	V	Força Arr	Força	Teta g	
0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	8,00	0,40	0,00	0,00	0,00	25,00	0,00	0,00	0,00	
0,11	2,37	0,03	0,44	0,55	33,40	0,40	0,09	1,72	0,10	25,00	0,01	1,71	25,40	
0,23	4,75	0,17	0,76	0,90	51,51	0,40	0,09	1,38	0,23	25,00	0,01	1,37	43,51	
0,34	7,12	0,28	0,96	1,10	62,98	0,40	0,09	1,09	0,31	25,00	0,01	1,08	54,98	
0,45	9,49	0,40	1,09	1,23	70,23	0,40	0,09	0,89	0,35	25,00	0,01	0,88	62,23	
0,57	11,87	0,51	1,17	1,31	75,15	0,40	0,09	0,74	0,37	25,00	0,01	0,73	67,15	
0,68	14,24	0,62	1,23	1,37	78,66	0,40	0,09	0,63	0,39	25,00	0,01	0,62	70,66	
0,79	16,62	0,74	1,28	1,42	81,25	0,40	0,09	0,55	0,39	25,00	0,01	0,54	73,25	
0,91	18,99	0,85	1,31	1,45	83,25	0,40	0,09	0,48	0,40	25,00	0,01	0,47	75,25	
1,02	21,36	0,96	1,34	1,48	84,83	0,40	0,09	0,43	0,41	25,00	0,01	0,42	76,83	
1,13	23,74	1,08	1,36	1,50	86,10	0,40	0,09	0,39	0,41	25,00	0,01	0,38	78,10	
1,25	26,11	1,19	1,38	1,52	87,16	0,40	0,09	0,36	0,41	25,00	0,01	0,34	79,16	
1,36	28,48	1,30	1,40	1,54	88,04	0,40	0,09	0,33	0,41	25,00	0,01	0,32	80,04	
1,47	30,86	1,42	1,41	1,55	88,80	0,40	0,09	0,30	0,41	25,00	0,01	0,29	80,80	
1,59	33,23	1,53	1,42	1,56	89,44	0,40	0,09	0,28	0,41	25,00	0,01	0,27	81,44	
1,70	35,60	1,64	1,43	1,57	90,01	0,40	0,09	0,26	0,41	25,00	0,01	0,25	82,01	

Tabela 4.4.2.1 – Cálculos gerais da turbina.

4.4.3 Simulação aerodinâmica preliminar.

Para simular o funcionamento da turbina desde a partida até a operação em várias velocidades de vento, é necessário conhecer a curva de operação do gerador elétrico e se ter uma idéia da relação de transmissão a ser utilizada para acoplar o gerador elétrico à turbina.

Projeto de um gerador eólico para uso residencial

Desse modo, admitindo que será utilizado o gerador elétrico Alxion modelo 145STK2M, apresentado na figura a seguir:

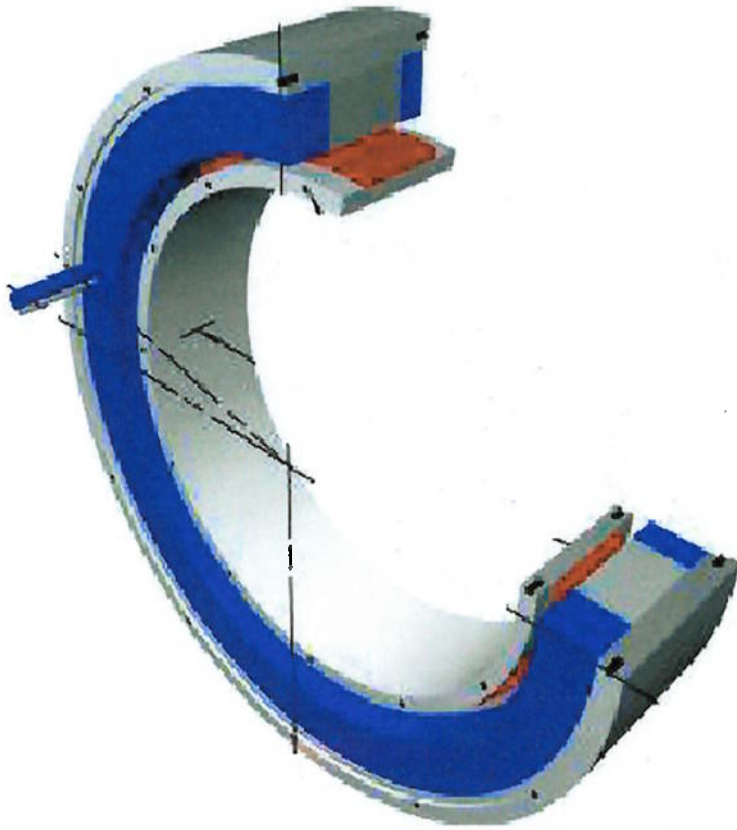


Figura 4.4.3.1 – Desenho do gerador elétrico utilizado.

Gráfico de operação:

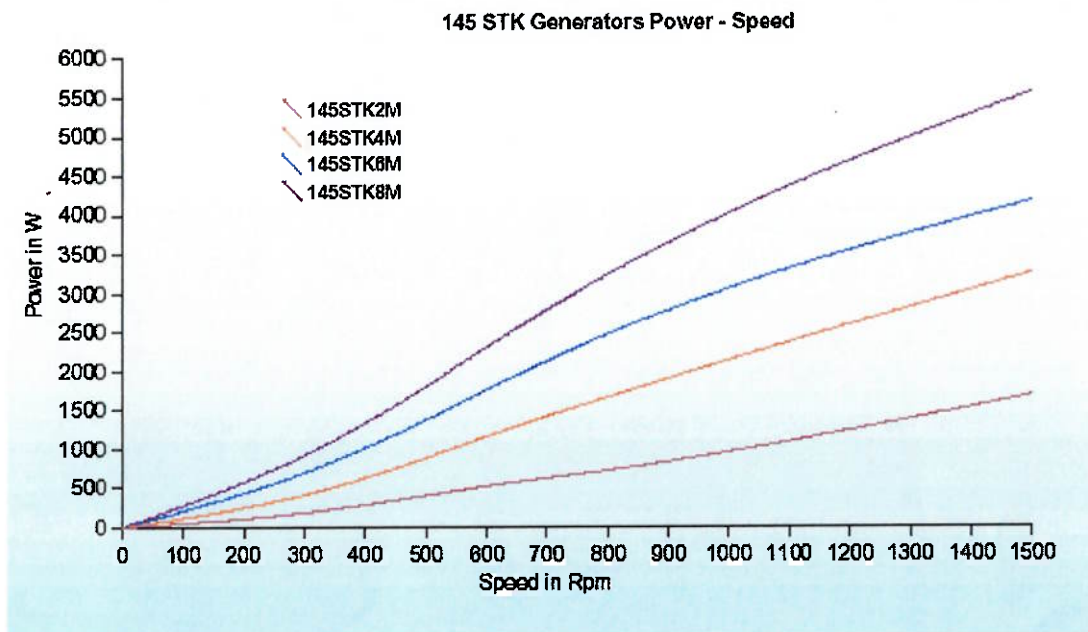


Gráfico 4.4.3.1 – Gráfico de operação do gerador Alxion 145STK2M

Aproximando a curva do gerador por uma reta, e relacionando a potência com a rotação no eixo, chega-se a um torque resistente no eixo constante (invariante com a rotação) de aproximadamente 11,1 N*m.

Para determinar a relação de transmissão, basta relacionar a rotação final da turbina (390 RPM) com uma rotação (um pouco menor que a máxima para se ter uma margem de segurança) de 900 rpm, Ter-se-ia uma relação de multiplicação de aproximadamente 2,45.

Considerando todo esse cálculo aproximado, a simulação revelaria o seguinte gráfico de potência gerada em função da velocidade do vento:

Projeto de um gerador eólico para uso residencial

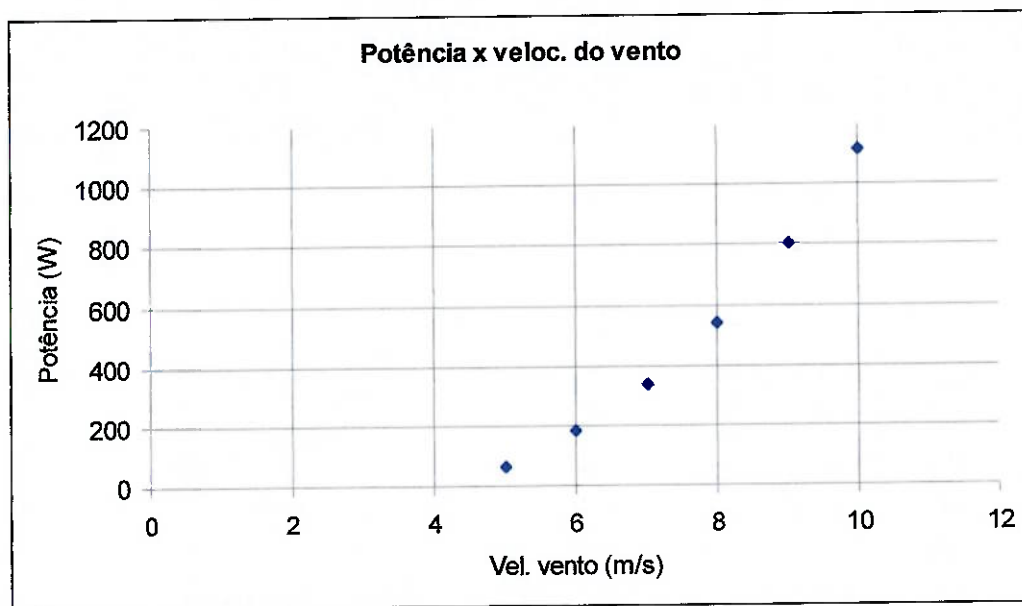


Gráfico 4.4.3.2 – Potência gerada versus velocidade do vento.

Agora, considerando os parâmetros adimensionais já apresentados, é possível plotar o seguinte gráfico:

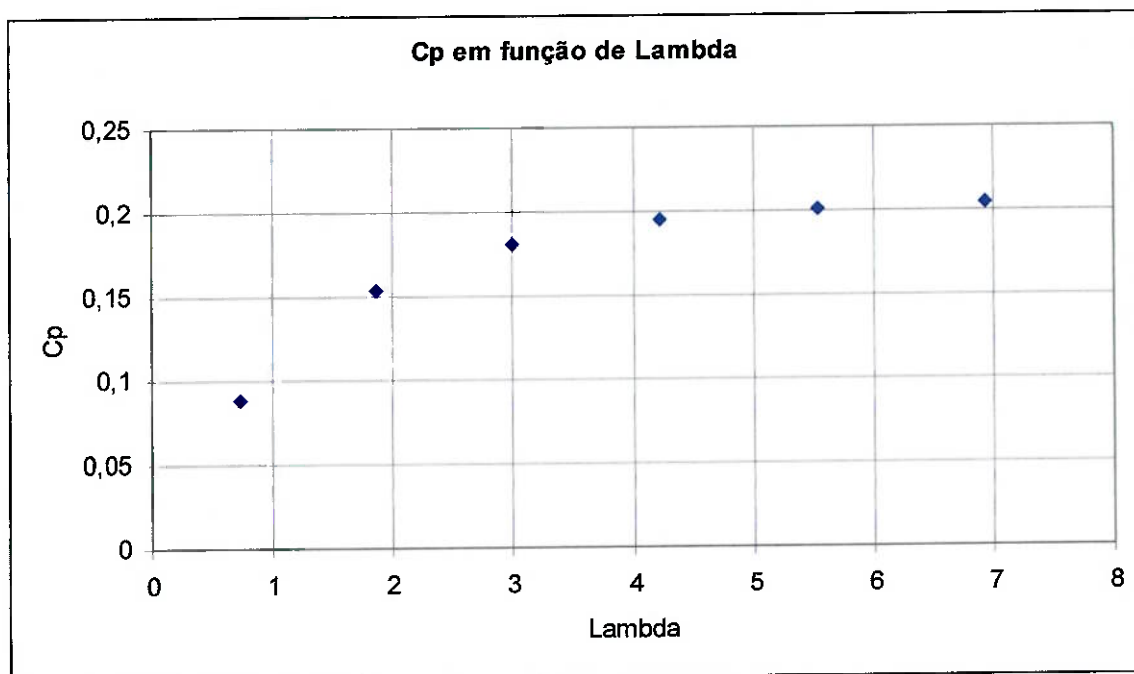


Gráfico 4.4.3.3 – Gráfico Coef. De potência versus "Tip speed ratio"

Simulando-se a geometria analisada acima em um software de elementos finitos, observa-se um comportamento razoavelmente diferente. Observa-se que a turbina parte

Projeto de um gerador eólico para uso residencial

com uma velocidade maior (7 m/s), além disso, na geometria analisada há uma grande dificuldade de partida (em baixas rotações, o torque gerado é insatisfatório). Em contrapartida o desempenho em alta rotação (cerca de 390 RPM) é muito bom, obtendo-se potências da ordem de 9000 W, ou seja, muito acima do esperado.

Tal desempenho pode ser explicado basicamente pelo ângulo de torção das pás. Como já foi explicado anteriormente, a turbina foi projetada para que cada seção “enxergue” o mesmo ângulo de ataque (o mais otimizado possível), desse modo, cada seção somente estará operando adequadamente quando estiver em uma rotação próxima à de projeto. Portanto, quando a mesma se encontra em baixa rotação, apenas a parte próxima ao cubo está gerando força de sustentação, e conseqüentemente torque, já as seções mais afastadas do cubo estão apenas contribuindo negativamente com suas inércias e arrastos. Assim, a conclusão que se chega é que deve-se analisar melhor a razão de torção das pás para se obter um melhor rendimento à baixa rotação e à velocidades de vento mais suaves. A partir daí iniciar um novo estudo aerodinâmico, até se chegar numa geometria final ótima.

4.5 Dimensionamento da caixa de transmissão

A partir dos resultados obtidos com o estudo aerodinâmico, consegue-se determinar os seguintes parâmetros:

Torque Máximo aplicado ao rotor da turbina.

Dados:

$$P_{\text{máx}} = 1116W$$

$$\varpi = 390\text{rpm} = 40,84\text{rad} / s$$

Portanto:

$$T_A = \frac{P_{\text{máx}}}{\varpi} = \frac{1116}{40,84} = 27,7Nm \quad (4.5.1)$$

Projeto de um gerador eólico para uso residencial

Assim, é determinado também a força tangencial aplicada às engrenagens

Dados:

$D_p = 98mm$ (Diâmetro primitivo do pinhão)

$$F_t = \frac{T_A}{D_p} = \frac{27,7}{96 \times 10^{-3}} = 288,5N \quad (4.5.2)$$

Dessa forma, pela formulação da AGMA para dimensionamento de engrenagens de dentes retos, vem:

- Cálculo da tensão de contato nos dentes:

$$\sigma_c = C_p \sqrt{F_t \cdot \frac{C_a}{C_v} \cdot \frac{1}{F \cdot D_p} \cdot \frac{C_s \cdot C_m}{I}} \quad (4.5.3)$$

Para aços em geral: $C_p = 191\sqrt{MPa}$

Ângulo de pressão (ϕ) = 20°

$$I = \frac{\cos \phi \cdot \sin \phi}{2} \cdot \left[\frac{i}{i+1} \right] = 0,11 \quad (4.5.4)$$

Para máquinas operando com choques: $C_a = 1,5$

$$C_v = \left[\frac{A}{A + (200v)^{0,5}} \right]^B \quad (4.5.5)$$

Tal que:

Projeto de um gerador eólico para uso residencial

$$A = 50 + 56 \cdot (1 - B) \quad (4.5.6)$$

Onde:

$$B = \frac{(12 - Q_v)^{2/3}}{4} \quad (4.5.7)$$

Sendo:

$$Q_v = 4 \quad (\text{qualidade das engrenagens comuns e comerciais})$$

Portanto:

$$V = \omega \cdot \frac{D_p}{2} = 40,84 \cdot \left(\frac{98 \times 10^{-3}}{2} \right) = 2 \text{ m/s} \quad (4.5.8)$$

$$B = \frac{(12 - 4)^{2/3}}{4} = 1$$

$$A = 50 + 56 \cdot (1 - 1) = 50$$

Logo:

$$C_v = \left[\frac{50}{50 + (200 \cdot 2)^{0,5}} \right]^1 = 0,71$$

Para engrenagens com módulos inferiores a 5mm: $C_s = 1,0$

Projeto de um gerador eólico para uso residencial

Para conjunto de transmissão com alta precisão e baixa deflexão: $C_m = 1,3$

Finalmente:

$$\sigma_c = 191 \sqrt{288,5 \cdot \frac{1,5}{0,71} \cdot \frac{1}{F \cdot 98} \cdot \frac{1,0 \cdot 1,3}{0,11}}$$

$$\sigma_c = 1543 \cdot \sqrt{\frac{1}{F}} \quad (I)$$

Calculando-se a tensão admissível de contato nas engrenagens:

$$\sigma_{call} = S_c \cdot \frac{Cl}{Cr \cdot Ct} \quad (4.5.9)$$

Onde:

$Cl = 0,95$ (Projetada para uma vida de 10^8 ciclos ou superior)

$Cr = 1,25$ (Projetado para uma confiabilidade de 99,9%)

$Ct = 1,0$ (Projetado para operar a temperaturas até 120°)

$S_c = 720\text{MPa}$ (limite de resistência a fadiga por contato do aço temperado 1040 com dureza superficial 240 BHN)

Então:

Projeto de um gerador eólico para uso residencial

$$\sigma_{call} = 720 \cdot \frac{0,95}{1,25 \cdot 1,0}$$

$$\sigma_{call} = 548 MPa \quad (II)$$

Igualando as equações (I) e (II):

$$\sigma_c = \sigma_{call}$$

$$1543 \cdot \sqrt{\frac{1}{F}} = 548$$

$$F = 8mm \quad (F = \text{Largura das engrenagens})$$

- Cálculo da tensão de flexão nos dentes:

$$\sigma_F = F_t \cdot \frac{K_a}{K_v} \cdot \frac{1}{F \cdot m} \cdot \frac{K_s \cdot K_m}{J} \quad (4.5.10)$$

Onde:

$$K_a = C_a = 1,50$$

$$K_v = C_v = 0,71$$

$$K_s = C_s = 1,00$$

$$K_m = C_m = 1,30$$

$$F = 8mm$$

$$J \cong 0,35 \quad (\text{Fator de geometria para aproximadamente 40 dentes})$$

Portanto:

Projeto de um gerador eólico para uso residencial

$$\sigma_F = 288,5 \cdot \frac{1,50}{0,71} \cdot \frac{1}{8 \times 10^{-3} \cdot m} \cdot \frac{1,0 \cdot 1,3}{0,35}$$

$$\sigma_F = \frac{251149,55}{m} \quad (\text{III})$$

Calculando-se a tensão admissível de flexão nas engrenagens:

$$\sigma_{fall} = Sf \cdot \frac{Kl}{Kr \cdot Kt} \quad (4.5.11)$$

Onde:

$$Kl = Cl = 0,95$$

$$Kr = Cr = 1,25$$

$$Kt = Ct = 1,00$$

$Sf = 210 \text{ MPa}$ (limite de resistência a fadiga por contato do aço temperado 1040 com dureza superficial 240 BHN)

Então:

$$\sigma_{fall} = 210 \cdot \frac{0,95}{1,25 \cdot 1,0}$$

$$\sigma_{call} = 160 \text{ MPa} \quad (\text{IV})$$

Igualando as equações (III) e (IV):

$$\sigma_F = \sigma_{fall}$$

Projeto de um gerador eólico para uso residencial

$$\frac{251149,55}{m} = 160 \times 10^6$$

$$m = 1,60 \text{ mm} \quad (\text{valor mínimo do módulo})$$

Assim, o valor mais adequado comercialmente é:

$$m = 2 \text{ mm}$$

- Resumindo os dados dos elementos da transmissão, fica:

Ângulo de pressão nos dentes = 20°

Módulo das engrenagens = 2 mm

Addendum = $1 \times m = 2 \text{ mm}$

Dedendum = $1,25 \times m = 2,5 \text{ mm}$

Relação de transmissão = 2,47

Largura das engrenagens = 8 mm

Diâmetro do pinhão = 98 mm

Número de dentes do pinhão = 49 (Diâmetro/módulo)

Diâmetro da coroa = 40 mm

Número de dentes da coroa = 20

4.6 Dimensionamento do eixo da turbina eólica

Sabendo-se que:

A = Ponto de aplicação do peso da turbina e do torque proveniente do vento;

B = Primeiro apoio (mancal de rolamento)

C = Ponto de aplicação do peso da engrenagem, da força tangencial aplicada ao pinhão com seu respectivo momento (dada a transferência de pólo) e da força radial também aplicada ao pinhão.

D = Segundo apoio (mancal de rolamento)

E conhecendo-se os seguintes valores:

$$P_A = 20N \text{ (Peso da Turbina)}$$

$$P_{eng} = (\pi R^2) \cdot F \cdot \rho \cdot g = \left(\pi \cdot \left(\frac{98 \times 10^{-3}}{2} \right)^2 \cdot 8 \times 10^{-3} \cdot 7854 \cdot 10 \right) = 4,74N \quad (4.6.1)$$

$$\overline{AB} = 0,3m$$

$$\overline{BC} = \overline{CD} = 0,2m$$

$$F_R = F_t \cdot \tan(\phi) = 105N$$

- Reações de Apoio:

Projeto de um gerador eólico para uso residencial

$$1-) \quad P_A + (F_t + P_{eng}) = V_B + V_D \quad (4.6.2)$$

$$V_D = P_A + (F_t + P_{eng}) - \left[\frac{P_A \cdot \overline{AD} + (F_t + P_{eng}) \cdot \overline{CD}}{\overline{BD}} \right] = 131,62N$$

$$2-) \quad H_B + F_R + H_D = 0 \quad (4.6.3)$$

$$H_D = F_R \cdot \left(\frac{\overline{CD}}{\overline{BD}} - 1 \right) = -52,5N$$

$$3-) \quad P_A \cdot (\overline{AD}) - V_B \cdot (\overline{BD}) + (F_t + P_{eng}) \cdot (\overline{CD}) = 0 \quad (4.6.4)$$

$$V_B = \frac{P_A \cdot (\overline{AD}) + (F_t + P_{eng}) \cdot (\overline{CD})}{\overline{BD}} = 181,62N$$

$$4-) \quad H_B \cdot (\overline{BD}) + F_R \cdot (\overline{CD}) = 0 \quad (4.6.5)$$

$$H_B = -\frac{F_R \cdot (\overline{CD})}{\overline{BD}} = -52,5N$$

• Esforços solicitantes sobre o eixo:

1-) Trecho AB ($0 \leq x \leq 0,3m$)

$$M_v = P_A \cdot x \quad (4.6.6)$$

$$T = T_A = 27,7Nm$$

2-) Trecho BC ($0 \leq x \leq 0,2m$)

$$M_v = (P_A - V_B) \cdot x + P_A \cdot \overline{AB} \quad (4.6.7)$$

Projeto de um gerador eólico para uso residencial

$$M_H = -H_B \cdot x \quad (4.6.8)$$

$$T = T_A = 27,7 Nm$$

3-) Trecho DC ($0 \leq x \leq 0,2m$)

$$M_v = V_D \cdot x \quad (4.6.9)$$

$$M_H = H_D \cdot x \quad (4.6.10)$$

$$T = 0$$

A partir das equações obtidas acima dos esforços solicitantes, verifica-se que a seção transversal crítica do eixo é aquela que contem o ponto C, sendo assim:

1-) Esforços Alternados (eixo = referencial):

$$M_C = \sqrt{(M_{vmáx})^2 + (M_{Hmáx})^2} = \sqrt{(10,5)^2 + (26,32)^2} = 28,34 Nm \quad (4.6.11)$$

2-) Esforços Constantes:

$$T_m = 27,7 Nm \quad (4.6.12)$$

- Primeira Iteração para o cálculo do diâmetro do eixo:

Considerando os seguintes fatores:

Fator de segurança: $\eta = 3$

$$\text{Fator de temperatura(até } 120^\circ\text{C)}: C_T = \frac{344,3}{273,3 + T} = \frac{344,3}{273,3 + 120} = 0,88 \quad (4.6.13)$$

Projeto de um gerador eólico para uso residencial

$C_O = 1$ (Não há tensões residuais no eixo)

$$C_G = 1 - \frac{d - 7,62}{380} = 1 \quad (\text{para primeira iteração, considera-se o fator unitário})$$

(4.6.14)

Projetando o eixo de aço 1040 Usinado, tal que:

$$S_u = 520 MPa$$

$$S_y = 354 MPa$$

$$S_n' = \frac{520}{2} = 260 MPa$$

(4.6.15)

Então:

Fator $C_S = 0,80$ (valor retirado do gráfico fator C_S x Tensão de ruptura)

Fator $C_R = 0,702$ (fator de confiabilidade, onde confiabilidade = 99,99%)

Fator $C_{TR} = 1,00$ (Sem tratamento superficial no eixo)

Portanto:

$$S_N = C_T \cdot C_S \cdot C_G \cdot C_R \cdot C_{TR} \cdot C_O \cdot S_N' \quad (4.6.16)$$

$$S_N = 0,88 \cdot 0,80 \cdot 1,00 \cdot 0,702 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 260$$

$$S_N = 128,49 MPa$$

Sabendo-se que:

$$\begin{aligned}M'_A &= M_A \cdot K_{ff} \\T'_M &= T_M \cdot K_{ft}\end{aligned}\quad (4.6.17)$$

E que para primeira iteração:

$$K_{ff} = K_{ft} = 1,6$$

Portanto, através da formulação da ASME:

$$d_{1^o} = \sqrt[3]{\frac{\eta}{0,1} \sqrt{\left[\left(\frac{M'_A}{S_N}\right)^2 + \frac{3}{4} \cdot \left(\frac{T'_M}{S_y}\right)^2\right]}} \quad (4.6.18)$$

$$d_{1^o} = \sqrt[3]{\frac{3}{0,1} \sqrt{\left[\left(\frac{28,34 \cdot 1,6}{128,49 \times 10^6}\right)^2 + \frac{3}{4} \cdot \left(\frac{27,7 \cdot 1,6}{354 \times 10^6}\right)^2\right]}}$$

$$d_{1^o} = 22,3mm$$

- Segunda Iteração para o cálculo do diâmetro do eixo:

Uma vez que o raio de arredondamento do rebaixo no eixo para inserção do anel elástico de fixação das engrenagens é $r = 1,5mm$:

$$\frac{r}{d} = \frac{1,5}{22,3} = 0,07 \quad (4.6.19)$$

Assim:

Projeto de um gerador eólico para uso residencial

$$S_{n2} = S_n \cdot C_G \quad (4.6.20)$$

$$S_{n2} = 128.49 \cdot \left(1 - \frac{d - 7,62}{380}\right) = 123.53 MPa$$

E o diâmetro do ressalto é dado por:

$$\begin{aligned} D &= d + 2r \\ D &= 22,3 + 2 \cdot (1,5) \\ D &= 25,3 mm \end{aligned} \quad (4.6.21)$$

Desta forma, obtém:

$$\frac{D}{d} = \frac{25,3}{22,3} = 1,13 \quad (4.6.22)$$

Aplicando os valores obtidos das relações nos gráficos de concentração de tensão para rebaixos de eixos, submetidos a flexão e torção:

1-) Flexão:

$$\begin{aligned} \text{Dados:} \quad \frac{D}{d} &= 1,13 \\ \frac{r}{d} &= 0,07 \end{aligned}$$

$$\text{Obtém:} \quad K_{tf} = 2,05$$

$$\begin{aligned} \text{Dados:} \quad r &= 1,5 mm \\ S_U &= 520 MPa \end{aligned}$$

Projeto de um gerador eólico para uso residencial

Obtém: $qf = 0,76$

2-) Torção:

Dados: $D/d = 1,13$
 $r/d = 0,07$

Obtém: $K_{tt} = 1,58$

Dados: $r = 1,5mm$
 $S_U = 520MPa$

Obtém: $qt = 0,80$

Portanto:

$$\begin{aligned}K_{ff} &= 1 + qf(K_{tf} - 1) \\K_{ff} &= 1 + 0,76 \cdot (2,05 - 1) \\K_{ff} &= 1,80\end{aligned}\tag{4.6.23}$$

$$\begin{aligned}K_{ft} &= 1 + qt(K_{tt} - 1) \\K_{ff} &= 1 + 0,80 \cdot (1,58 - 1) \\K_{ff} &= 1,46\end{aligned}\tag{4.6.24}$$

Finalizando:

$$d_{2^\circ} = \sqrt[3]{\frac{\eta}{0,1} \sqrt{\left[\left(\frac{M'_A}{S_N}\right)^2 + \frac{3}{4} \cdot \left(\frac{T'_M}{S_y}\right)^2\right]}}$$

$$d_{2^\circ} = \sqrt[3]{\frac{3}{0,1} \sqrt{\left[\left(\frac{28,34.1,8}{123,53 \times 10^6}\right)^2 + \frac{3}{4} \cdot \left(\frac{27,7.1,46}{354 \times 10^6}\right)^2\right]}}$$

$$d_{2^\circ} = 24mm$$

Fica determinado, então, o diâmetro do eixo da turbina em 24mm.

4.7 Seleção dos mancais de rolamentos da SKF:

I – Mancais do eixo motor:

1-) Aplicação do mancal de rolamento: Eixo de turbina de baixa potência (~1,3CV), e baixas rotações (~390rpm);

2-) Deve possuir diâmetro externo menor que 50 mm e diâmetro interno superior a 24mm;

3-) Deve suportar uma carga de $F_r = \frac{P_A \cdot (\overline{AD}) + (F_t + P_{eng}) \cdot \overline{CD}}{\overline{BD}} = 181,62N$;

4-) Deve ter uma vida nominal maior que 80.000 horas ($f_h \geq 5,5$; $f_n = 0,45$);

Pelo catálogo:

$$f_h = f_n \cdot \frac{C_r}{F_r} \Rightarrow f_n \cdot \frac{C_r}{F_r} \geq 5,5 \Rightarrow 0,45 \cdot \frac{C_r}{181,62} \geq 5,5 \Rightarrow C_r \geq 2220N$$

I- Mancais do eixo motor.

Projeto de um gerador eólico para uso residencial

- Mancal de rolamento fixo com uma carreira de esferas, aberto;
- Diâmetro externo do mancal: 37 mm;
- Diâmetro interno do mancal: 25 mm;
- Largura do mancal: 7 mm;
- Numeração do mancal: 61805 (SKF – Carga Dinâmica = 4360N).

II – Mancais do eixo movido.

Analogamente, pelo catálogo SKF, foram selecionados os mancais de rolamentos do eixo movido:

- Mancal de rolamento fixo com uma carreira de esferas, aberto;
- Diâmetro externo do mancal: 24 mm;
- Diâmetro interno do mancal: 15 mm;
- Largura do mancal: 5 mm;
- Numeração do mancal: 61802 (SKF – Carga Dinâmica = 1560N).

4.8 Dimensionamento da estrutura da turbina eólica:

Dados:

$$L = 3,5 \text{ m};$$

$$V = 50 \text{ m/s};$$

$$P = 101 \text{ KPa};$$

$$T = 15^\circ \text{ C};$$

$$\rho = 1,23 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1,78 \times 10^{-5}$$

$$De = 0,10 \text{ m}$$

Sabe-se que o coeficiente de arrasto é dado por:

$$C_D = \frac{F_D}{1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A} \quad (4.8.1)$$

Logo:

$$F_D = 1/2 \cdot C_D \cdot A \cdot \rho \cdot V^2 \quad (4.8.2)$$

Projeto de um gerador eólico para uso residencial

Sabendo-se que a força por unidade de comprimento é uniforme (carregamento uniforme) ao longo da estrutura, então F_D atuará no ponto médio da mesma.

Portanto, o momento de F_D em relação a base (engaste) será:

$$M_{base} = F_D \cdot \frac{L}{2} = C_D A \rho V^2 \frac{L}{2} = C_D D \frac{L^2}{4} \rho V^2 \quad (4.8.3)$$

Tal que:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{1,23 \cdot 50 \cdot 0,10}{1,78 \times 10^{-5}} = 3,5 \times 10^5$$

Do gráfico $C_D \times Re$:

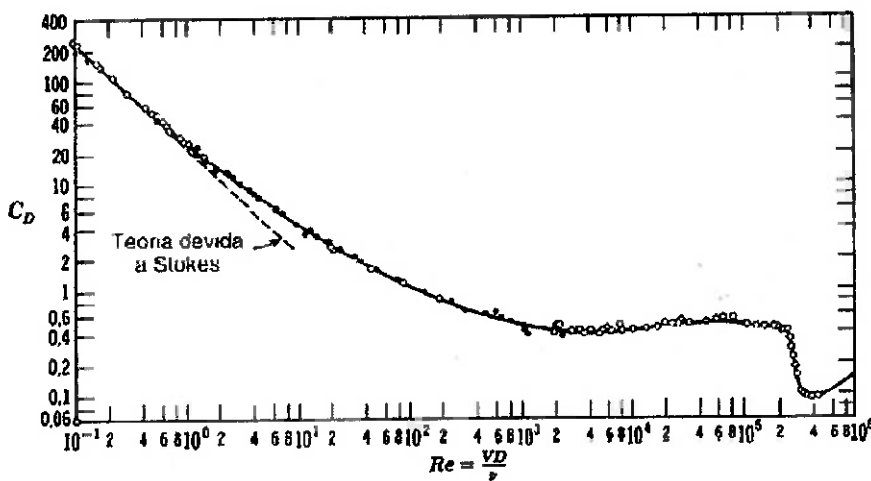


Fig. 4.8.1 – Gráfico $C_D \times Re$

$$C_D \approx 1,00$$

Logo, obtêm-se o momento na base proveniente do arrasto do vento:

$$M_{base} = F_D \cdot \frac{L}{2} = C_D A \rho V^2 \frac{L}{2} = C_D D \frac{L^2}{4} \rho V^2 = 941,72 \text{ N.m}$$

Projeto de um gerador eólico para uso residencial

Considerando também o momento na base proveniente do arrasto de pressão exercido nas pás, calcula-se primeiramente a força de arrasto nas pás, dada por:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D A \rho V^2$$

Onde:

$$R_e = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{1,23 \cdot 50 \cdot 0,35}{1,78 \times 10^{-5}} = 1,2 \times 10^6$$

Logo, através do gráfico $Re \times C_D$:

$$C_D \approx 0,20$$

Assim:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D A \rho V^2 = 0,5 \cdot 0,2 \cdot (1,6 \times 0,35) \cdot 1,23 \cdot 50^2$$

$$F_D = 172,20 N$$

Portanto, fica definido o momento na base proveniente do arrasto de pressão nas pás:

$$M_{base} = 3 \cdot F_D \cdot L \quad (3 \text{ pás})$$

$$M_{base} = 1808,10 N.m$$

Dessa forma o momento total na base da estrutura será:

$$M_{total} = 941,72 + 1808,10 = 2749,82 N.m$$

Aplicando o Critério de Tresca, consegue-se obter o diâmetro interno da estrutura do seguinte modo:

Projeto de um gerador eólico para uso residencial

Momento de inércia da seção transversal da estrutura:

$$I = \frac{\pi r_e^4}{4} - \frac{\pi r_i^4}{4} = \frac{\pi (d_e^4 - d_i^4)}{64} \quad (4.8.4)$$

Então a tensão principal no ponto mais solicitado na base da estrutura será:

$$\sigma = \frac{M_{total} (d_e/2)}{I} \quad (4.8.5)$$

$$\sigma = \frac{494,40 \cdot (0,075)}{\pi \cdot \left(\frac{0,001 - d_i^4}{64} \right)}$$

A tensão admissível para aço estrutural ($\sigma_e = 137 MPa$) é dada por:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_e}{F.S} = \frac{137}{2} = 68,5 MPa$$

Logo pelo Critério de Tresca:

$$\sigma = \sigma_{adm}$$

$$\frac{494,40 \cdot (0,075)}{\pi \cdot \left(\frac{0,001 - d_i^4}{64} \right)} = 68,5 \times 10^6$$

$$d_i = 0,09m$$

Ficam determinado também o diâmetro interno da estrutura ($d_i = 0,09m$).

4.9 Análise Vibracional da Estrutura

A estimativa do valor da frequência natural na estrutura de uma turbina eólica é extremamente importante, pois a estrutura deverá ser capaz de suportar as vibrações dinâmicas a que será submetida.

Desse modo, será estimado o valor da frequência natural de vibração da estrutura para que seja possível sua comparação com a faixa operacional da turbina.



Figura 4.9.1 – Sistema de coordenadas da barra.

Considerando a viga representada na figura acima, onde x é a coordenada ao longo da linha neutra, e y mede a deflexão da viga. É importante ressaltar que $y = f(x,t)$ (condição dinâmica).

Então, considerando uma pequena porção da viga sujeita a um carregamento estático, onde G-N representa a linha neutra, veremos que a seção da viga apresenta uma rotação plana, como ilustra a figura a seguir:

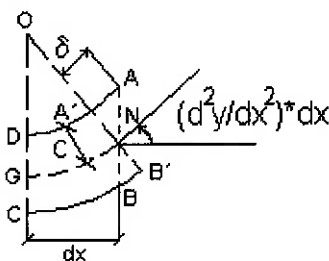


Figura 4.9.2 – Elemento infinitesimal da barra.

Projeto de um gerador eólico para uso residencial

Da figura anterior, inferimos que:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} dx = \frac{\delta}{c} \quad (4.9.1)$$

Portanto:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{\delta}{c dx} = \frac{\varepsilon}{c} \quad (4.9.2)$$

Onde ε é a deformação nas fibras mais distantes da linha neutra.

Da lei de Hooke, obtém-se:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{\sigma / E}{c} = \frac{Mc / I}{Ec} = \frac{M}{EI} \quad (4.9.3)$$

Onde σ é a tensão nas fibras mais distantes da linha neutra.

Portanto:

$$M = EI \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (4.9.4)$$

A figura a seguir é um diagrama de corpo livre de um elemento diferencial da viga com um carregamento estático aplicado. V representa a força cortante e M representa o momento fletor.

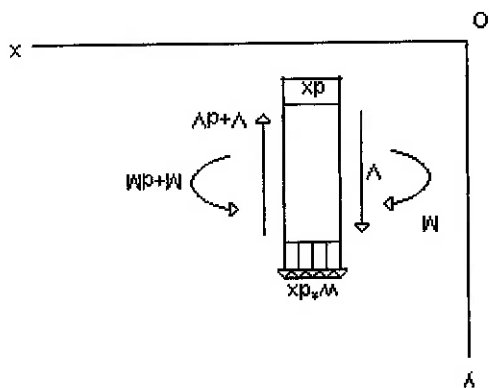


Figura 4.9.3 – Diagrama de corpo livre de um elemento diferencial da barra.

Do equilíbrio vem:

$$M + dM = M + Vdx = wdx \frac{dx}{2} \quad (4.9.5)$$

Desprezando o termo de segunda ordem:

$$dM = Vdx \quad (4.9.6)$$

Ainda do equilíbrio:

$$V + dV = V + wdx \quad (4.9.7)$$

Portanto:

$$dV = wdx \quad (4.9.8)$$

Substituindo as equações $dm=vdv$ e $dv=wdx$ na equação acima, e considerando a rigidez EI constante:

$$w = \frac{d}{dx} \left(\frac{dM}{dx} \right) = \frac{d^2 M}{dx^2} = \frac{d^2}{dx^2} \left(EI \frac{d^2 y}{dx^2} \right) = EI \frac{d^4 y}{dx^4} \quad (4.9.9)$$

Projeto de um gerador eólico para uso residencial

Portanto, podemos escrever:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = w \quad (4.9.10)$$

Admitindo agora um elemento incremental de comprimento dx , a força de aceleração atuante nessa massa é $\gamma dx \cdot \partial^2 y / \partial t^2$, onde γ é a densidade linear da viga (kg/m).. Desse modo a intensidade de força sobre a viga é:

$$w = -\gamma \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (4.9.11)$$

Portanto ficamos com a seguinte equação diferencial:

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + a^4 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (4.9.12)$$

Onde $a^4 = \gamma/EI$.

Resolvendo a equação diferencial, considerando as condições de contorno do problema (viga engastada), obtemos:

$$\omega_n = \frac{3,515}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\gamma}} \quad (4.9.13)$$

Considerando a estrutura como sendo um tubo circular vazado, onde o diâmetro externo vale 100 mm e o diâmetro interno vale 90 mm, teríamos:

$$\omega = 50.1 \text{ rad/s} = 478 \text{ rpm.}$$

Como a rotação máxima de operação da turbina é de 390 rpm, pode-se considerar que não haverá problema com relação à frequência de ressonância na estrutura.

5. Análise de Custos

Acumuladores:

1- Bateria Selada 33 Ah – 12V (MK Bateries)

US\$ 90,00

2 – Bateria Selada 50 Ah – 12V (MK Bateries)

US\$ 139,00

Estrutura de Tubular de Aço:

Peso da estrutura : 40,7 kg

Indicador (R\$/kg) do aço: 2,66 (Sidra-IBGE Nov/04)

Portanto, o custo final da estrutura fica estimado em:

US\$ 35,00

Pás da Turbina eólica (Espuma de PVC):

Densidade = 56kg/m^3

US\$ 80,00

Fibra de Carbono:

US\$ 70,00

Projeto de um gerador eólico para uso residencial

Resinas, Endurecedores:

US\$ 10,00

Diversos (Eixos, parafusos, engrenagens, chavetas, caixas)

US\$ 150,00

Custo Estimado do projeto: US\$ 450,00. (Sem o gerador elétrico)

Gerador Elétrico Alxion modelo 145STK2M :

US\$ 3000,00

Custo total estimado: US\$ 3500,00

6. Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo apresentar o projeto básico de um pequeno gerador eólico para uso residencial. A metodologia de trabalho utilizada foi baseada em três aspectos principais:

- Estudo de viabilidade;
- Estudos dos equipamentos já existentes;
- Projeto do gerador eólico;

O estudo de viabilidade mostrou o elevado potencial que um equipamento deste tipo tem no Brasil, pois o país apresenta em várias de suas regiões velocidades de vento satisfatórias para a operação de aerogeradores.

O segundo item da metodologia teve como resultado um breve estudo sobre os tipos de turbinas existentes e a seleção do tipo de turbina a ser utilizada no projeto, ou seja, uma turbina de eixo horizontal (HAWT).

A terceira parte, a mais complexa, mostra basicamente o memorial de cálculo dos subsistemas envolvidos. Desse modo, tem-se como resultado um projeto detalhado dos componentes mecânicos e estruturais do gerador (caixa de transmissão, estrutura, turbina, seleção de mancais, etc).

Do trabalho, alguns assuntos merecem uma atenção especial, a aerodinâmica envolvida nas pás das turbinas mostrou-se complexa e ao mesmo tempo fascinante. Mesmo utilizando uma teoria bastante simplificada observa-se o grande número de parâmetros que afetam operação da turbina, tais como:

- Rotação de operação;
- Torque desejado no eixo;
- Aerofólio utilizado na pá;
- Geometria da pá;
- Velocidades de vento;

Uma análise preliminar pode levar ao erro de se pensar que para obter um desempenho ótimo de uma turbina eólica, basta otimizar todos esses parâmetros. O que infelizmente não é verdade, cada decisão tomada em um parâmetro afeta

todos os demais, dessa forma, um estudo mais amplo e detalhado da aerodinâmica envolvida no projeto das pás seria de grande valia. Inclusive, alguns tópicos pertinentes à parte aerodinâmica não foram levados em consideração e necessitariam ser abordados num trabalho futuro. São eles:

- Vibração induzida na pá devido ao escoamento;
- Acústica;
- Aeroelasticidade;
- Interação aerodinâmica entre as pás, a nacele e a estrutura;

Outro assunto muito importante, que não foi detalhado, é o aspecto construtivo das pás. Elas devem ser extremamente leves (para se ter baixa inércia), resistentes à fadiga e à exposição ao tempo. No trabalho foi apenas considerada a forma mais usual de construção, e mesmo assim muito simplificada, de modo que um trabalho posterior detalhado tanto na parte estrutural da pá quanto na área de Materiais seria de suma importância.

Da parte mecânica, o componente que merece destaque é a caixa de transmissão. Seu projeto, apresentado de forma convencional pode não ser o mais indicado numa aplicação não usual como a deste trabalho, de forma que abre-se aqui mais uma oportunidade de estudo na parte de Materiais e na parte de Elementos de Máquinas.

Finalizando, o custo, ainda que estimado mostrou-se bastante elevado devido principalmente aos materiais e equipamentos necessários. Os materiais compósitos necessários para a construção das pás e o gerador elétrico são importados e portanto têm um elevado custo devido à alta do dólar em relação ao real. Dessa forma, atualmente, um equipamento deste tipo teria um tempo de retorno bastante elevado.

7- Anexos

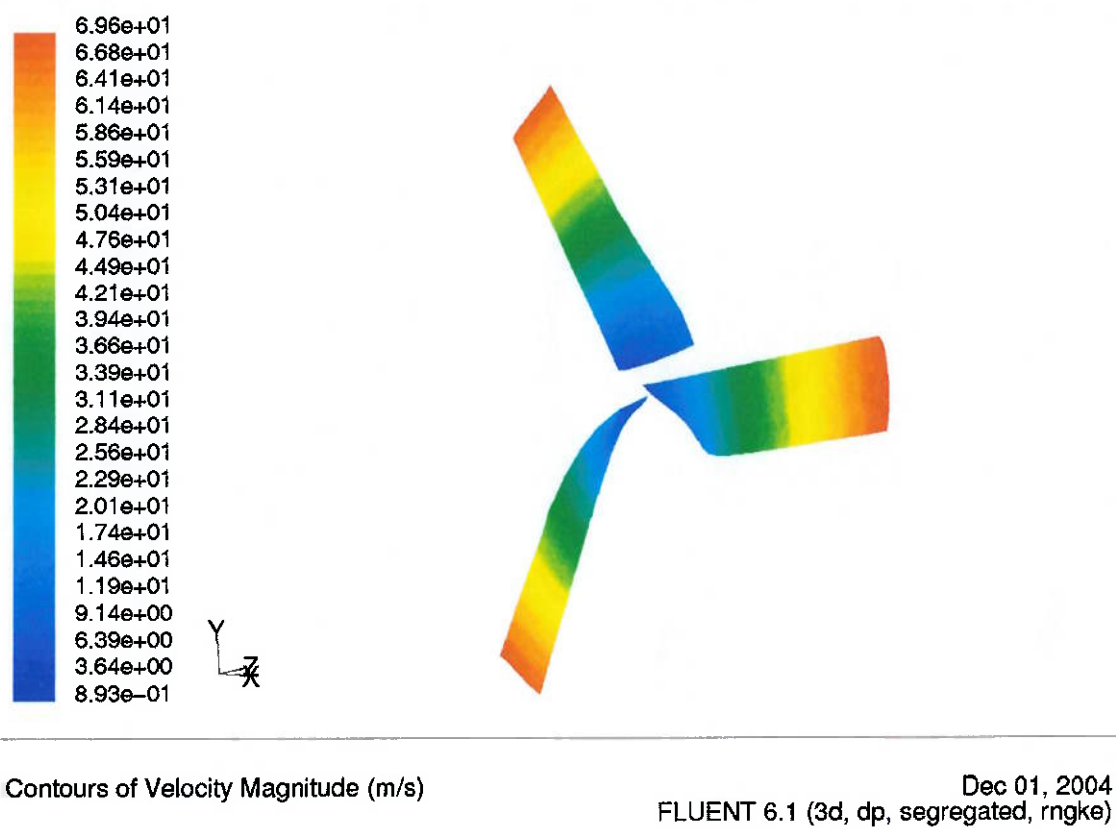
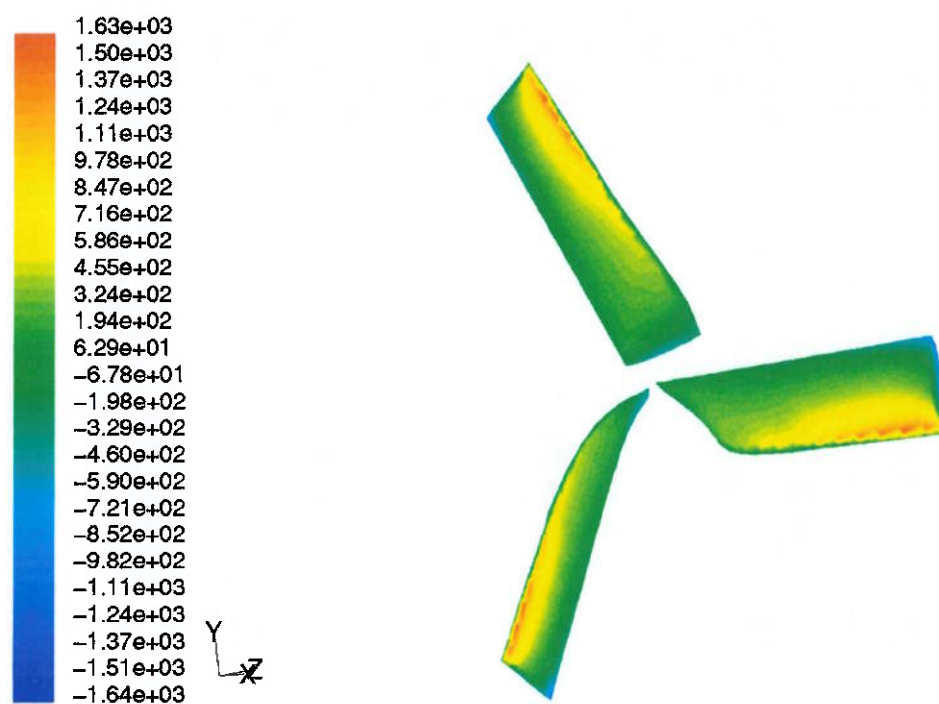


Figura 7.1 – Campo de velocidades nas pás

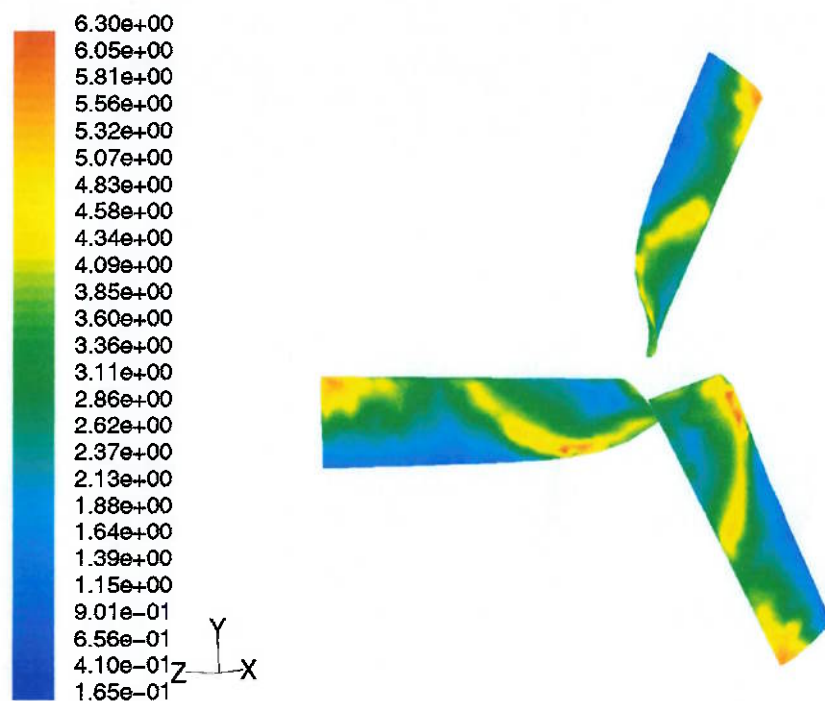
Projeto de um gerador eólico para uso residencial



Contours of Static Pressure (pascal)

Dec 01, 2004
FLUENT 6.1 (3d, dp, segregated, rngke)

Figura 7.2 – Campo de pressões nas pás.



Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m2/s2)

Dec 01, 2004
FLUENT 6.1 (3d, dp, segregated, rngke)

Figura 7.3 – Turbulência nas pás.

8. Referências Bibliográficas.

SPERA, DAVID A. **Wind Turbine Technology**. New York: Asme Press, 1994

FOX, ROBERT W. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 5ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2001

Shigley, J. E.; Mischke, C. R.; **Mechanical Engineering Design**, 5th edition, McGraw-Hill, 1989.

Juvinal, R. C.; Marshek, K. M.; **Fundamentals of Machine Component Design**, John-Wiley&Sons, 1993.

White, F.M. **Fluid Mechanics**. McGraw-Hill Book Company.

Vierck, R. K. **Vibration Analysis**, 1974.

Thomson. **Theory of Vibrations with Applications**, London, 4a. edição , 1993.

UNIVERSITY OF NEWCASTLE. **Wind Energy group**. Disponível em:

<<http://www.wind.newcastle.edu.au>>

Acesso em: 20 de out. 2004

ELETROVENTO. **Aerogerador Turbo 1000**. Disponível em:

< www.eletrovento.com.br>

Acesso em: 16 de abr. 2004

CENTRO BRASILEIRO DE ENERGIA EÓLICA. **Energia eólica**. Disponível em:

<www.eolica.com.br>

Acesso em: 16 de abr. 2004

Projeto de um gerador eólico para uso residencial

SOL & VENTO ENERGIA ALTERNATIVA. Preços de geradores eólicos.

Disponível em:

<www.energia-alternativa.com.br/turbinas.htm>

Acesso em: 12 de nov. 2004

PLANETA SOLAR. Energia eólica. Disponível em:

<<http://www.planetasolar.com.br/energiaeolica.htm>>

Acesso em: 10 de abr. 2004

SISTEMA IBGE DE RECUPERAÇÃO AUTOMÁTICA. Preços medianos na construção civil. Disponível em:

<<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/const/default.asp?t=2&z=t&o=7&u1=1&u2=1&u3=1>>

Acesso em: 27 de nov. 2004

ALXION. Wind turbine generators. Disponível em:

<<http://www.alxion.com>>

Acesso em: 08 de set. 2004