

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

**PROJETO DE UM AEROGERADOR PARA ATENDER COMUNIDADES  
DISTANTES DA REDE ELÉTRICA**

Saulo de Toledo Gallucci

São Paulo

2007

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

**PROJETO DE UM AEROGERADOR PARA ATENDER COMUNIDADES  
DISTANTES DA REDE ELÉTRICA**

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

Saulo de Toledo Gallucci

Orientador:  
Prof. Marcelo Alves

São Paulo

2007

## FICHA CATALOGRÁFICA

Gallucci, Saulo de Toledo

Projeto de um Aerogerador para Atender Comunidades Distantes da Rede Elétrica, por S. T. Gallucci. São Paulo: EPUSP, 2007. 85p

Trabalho de formatura– Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.  
Departamento de Engenharia Mecânica

1.Fontes alternativas de energia 2.Energia Eólica 3. Turbinas I.  
Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica III.t.

## RESUMO

Este trabalho visa obter um projeto básico de um aerogerador de pequeno porte. O equipamento é destinado a gerar energia de forma autônoma a comunidades isoladas, assim, torna-se uma opção à universalização de energia proposto pelo governo no programa “Luz para Todos”. O estudo busca reunir informações, avaliar custos, definir especificações que conduzirão na montagem de um gerador de energia pelo vento, eficiente e de baixo custo. O texto apresenta estudos teóricos conduzidos pelo autor ou por órgãos de pesquisa reconhecidos que auxiliam na obtenção de um projeto mais conciso. Este documento contém informações que demonstram a tendência ao uso de fontes alternativas de energia.

## ABSTRACT

The main objective of this paper is to obtain a project of a small wind turbine. The equipment is intended to generate energy off the grid to isolated communities as a alternative to the government program “Luz para Todos” that seeks universalization of energy in Brazil. This study looks for gathering information, evaluate costs and define specifications which conduct to mount a wind energy generator efficient and low cost. The text presents studies from the author and from respectable research institutions to help obtain a concise project. This paper is aligned with the current thought which is use renewable sources of energy in order to get a more sustainable way of living. That is what moves developing this work.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVO .....</b>	<b>3</b>
<b>3. O POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO .....</b>	<b>4</b>
3.1.    Introdução.....	4
3.2.    Regime dos ventos no Brasil .....	6
3.2.1.    Região Norte.....	7
3.2.2.    Região Nordeste .....	8
3.2.3.    Região Centro-Oeste .....	9
3.2.4.    Região Sudeste .....	10
3.2.5.    Região Sul .....	12
3.3.    Potencial Eólico Brasileiro.....	13
3.4.    Conclusão .....	14
<b>4. ANÁLISE DE CUSTOS.....</b>	<b>16</b>
4.1.    Custo do Sistema Eólico e Fotovoltaico.....	16
4.2.    Linhas de Transmissão .....	17
4.3.    Conclusão .....	17
<b>5. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS .....</b>	<b>19</b>
5.1.    Introdução.....	19
5.2.    O aerogerador .....	19
5.2.1.    Rotor Eólico .....	20
5.2.2.    Transmissão e Caixa Multiplicadora.....	22
5.2.3.    Mecanismos de Controle .....	23
5.2.4.    Gerador .....	24
5.2.5.    Torre .....	25
5.2.6.    Sistema de Armazenamento de Energia .....	25
5.3.    Especificações Funcionais.....	26
5.3.1.    De desempenho .....	26

5.3.2.	De conforto .....	26
5.3.3.	De segurança .....	26
5.4.	Especificações Operacionais .....	26
5.4.1.	De durabilidade .....	26
5.4.2.	De confiabilidade .....	27
5.4.3.	De operação .....	27
5.5.	Especificações Construtivas .....	27
5.5.1.	Do rotor .....	27
5.5.2.	Das pás .....	27
5.5.3.	Da transmissão .....	27
5.5.4.	Da torre.....	27
<b>6.</b>	<b>DEFINIÇÕES DO AEROGERADOR A SER DESENVOLVIDO .....</b>	<b>28</b>
6.1.	Matriz de Soluções .....	28
6.2.	Matriz de Decisão.....	29
6.3.	Conclusão .....	29
<b>7.</b>	<b>PROJETO BÁSICO.....</b>	<b>30</b>
7.1.	Cálculo da Energia Consumida .....	30
7.2.	Dimensionamento do rotor.....	31
7.2.1.	Diâmetro do rotor .....	31
7.2.2.	Perfil da pá.....	34
7.3.	Dimensionamento da transmissão multiplicadora de velocidades .....	39
7.3.1.	Tipo de correia.....	39
7.3.2.	Polias e distância entre centros.....	39
7.3.3.	Número de correias .....	40
7.4.	Dimensionamento do Eixo do rotor .....	40
7.4.1.	Calculo dos esforços.....	40
7.4.2.	Calculo para determinar o diâmetro do eixo (Soderberg) .....	42
7.5.	Seleção dos rolamentos .....	45
7.6.	Seleção do gerador .....	46
7.7.	Comprimento do braço do estabilizador .....	47
<b>8.</b>	<b>CUSTOS .....</b>	<b>51</b>
<b>9.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>52</b>

<b>10.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>54</b>
------------	---------------------------	-----------

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Custos dos sistemas eólico e fotovoltaico 17

Tabela 3.2 – Custo de Linhas de transmissão 17

Tabela 5.1 – Matriz de Alternativas 28

Tabela 5.2 – Matriz de Soluções 28

Tabela 5.3 – Matriz de Decisão 29

Tabela 6.1 – Consumo diário em Wh 30

Tabela 6.1 – Consumo diário em Wh 36

Tabela 6.2 – Seções e SRs respectivos 37

Tabela 6.3 – Seções e ângulo de vento e parâmetro de forma respectivos 37

Tabela 6.4 – Seções e comprimento de corda respectivos 38

Tabela 6.5 – Seções e ângulos de perfil respectivos 38

Tabela 6.6 – Custo dos componentes 51

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 – Distribuição geral dos ventos **4**
- Figura 1.2 – Modelo do relevo brasileiro **5**
- Figura 1.3 – Mapa das velocidades médias anuais da região norte **8**
- Figura 1.4 – Mapa das velocidades médias anuais da região nordeste **9**
- Figura 1.5 – Mapa das velocidades médias anuais dos ventos na região Centro-Oeste **10**
- Figura 1.6 – Mapa das velocidades médias anuais da região sudeste **12**
- Figura 1.7 – Mapa das velocidades média anuais dos ventos na região sul **13**
- Figura 1.8 – Potencial Eólico Brasileiro **14**
- Figura 4.1 – Esquema de um gerador de energia eólico **20**
- Figura 4.2 – Turbina eólica de eixo horizontal **21**
- Figura 4.3 – Turbina eólica de eixo vertical **22**
- Figura 6.2 – Perfil do vento ao longo da trajetória pelas pás de uma turbina **31**
- Figura 6.3 – Curva  $C_p$  em função com a velocidade do vento **32**
- Figura 6.4 – Eficiência dos tipos de turbina disponíveis em função da velocidade específica  $RV$  (razão entre a velocidade tangencial na ponta da pá e a velocidade do vento incidente) **33**
- Figura 6.5 – Diagrama da pá **35**

## 1. INTRODUÇÃO

A geração de eletricidade em quantidade sem os impactos ambientais de fontes convencionais pode ser traduzida na energia eólica. Cada vez mais, esse tipo de energia, se torna acessível por todos seus benefícios e pelo decréscimo constante do seu custo de implantação e operação.

A energia eólica é utilizada a milhares de anos de moagem de grãos a bombeamento de água. Somente 20 anos atrás a exploração dessa energia para geração de eletricidade começou a ganhar proporções comerciais, deixando de ser um objeto de estudos. O grande desenvolvimento tecnológico foi responsável pela melhoria da eficiência viabilizando as turbinas eólicas e hoje estão em expansão em todo o mundo.

A busca por alternativas leva vários países a investirem na transformação e complementação de seus parques energéticos, considerando como fator importante o impacto dessas formas de geração ao meio.

O crescimento contínuo da demanda por energia resulta em uma busca por estratégias que visão conciliar o suprimento com as questões ambientais, o que acaba em um planejamento mais rigoroso quanto às novas formas de energia e a busca por alternativas. Assim, as fontes renováveis ganham importância e hoje já participam expressivamente na complementação energética. A energia solar fotovoltaica, energia de biomassa, pequenas centrais hidrelétricas, energia eólica entre outras ganham espaço na busca por alternativas consistentes para diversificação do quadro energético em âmbito mundial.

Nesse contexto, a energia eólica se encaixa muito bem, o único fator limitante esta no preço da energia despachada. Ainda é alto o valor, mas já se equivale a outras fontes como a nuclear. Porém, o contínuo aprimoramento das tecnologias disponíveis permite um decréscimo no custo por kWh gerado. O curto período de instalação, não há necessidade de combustíveis, o baixo custo de manutenção e operação imediata são fatores que ampliam a competitividade de sistemas de conversão de energia eólica ou aerogeradores.

No Brasil é ainda incipiente a participação da energia elétrica gerada pela força do vento. Existem diversos projetos em pauta para a implantação de

aerogeradores, principalmente, na região nordeste. Esses projetos, são de fazendas de turbinas eólicas, portanto, para produção de energia elétrica em grande escala. Hoje, o principal uso corrente no Brasil é em comunidades carentes isolada dos grandes centros urbanos e da rede elétrica convencional de geração em pequena escala.

A aplicação de aerogeradores no Brasil é interessante devido aos seguintes aspectos:

- As dimensões do país fazem com que grandes distâncias têm que ser percorridas pelas linhas de transmissão dos centros geradores aos consumidores, encarecendo ao ponto de tornar inviável, em curto prazo, a eletrificação das zonas rurais
- Devido a essas distâncias, o transporte de combustível para geração de eletricidade eleva o custo do mesmo, inibindo a sua aplicação
- A diminuição gradual das fontes de combustíveis fósseis em escala mundial encarece esse produto e, assim, a operação de usinas termelétricas
- A busca por fontes renováveis em face as restrições ambientais
- A velocidade média dos ventos em alguns locais, apesar de baixa, não apresentam problemas para aplicações de baixa potência encontradas no meio rural

O presente trabalho se apoiará nesse cenário para elaborar um aerogerador de pequeno porte dispor um equipamento que possa proporcionar a geração de energia elétrica a uma residência onde não há rede elétrica.

## **2. OBJETIVO**

Estabelecer um equipamento que supra a necessidade energética de uma residência que se localiza em região isolada de energia elétrica que tenha bom regime de ventos. O presente trabalho estudar a montagem de uma turbina eólica de baixo custo. Para isso serão selecionados componentes que tenham disposição no mercado e, portanto, sejam produzidos em escala. Esse é um estudo preliminar para avaliar a oportunidade presente nessa aplicação, portanto, os dimensionamentos serão simplificados para obter os dados financeiros e compara-los ao que existe hoje.

### 3. O POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO

#### 3.1. Introdução

O início para o dimensionamento de um sistema de aproveitamento da energia eólica é ter um bom conhecimento do regime dos ventos. É extremamente importante uma vez que erros na predição do regime conduzem a um mau dimensionamento do sistema aerogerador e conseqüentemente na estimativa de produção de energia.

A energia eólica é originada pelo deslocamento do ar (ventos) na atmosfera próxima à superfície da Terra, devido a diferenças de pressão (centros de alta e de baixa), provocadas pelo aquecimento diferenciado do ar pela energia solar e também pelo movimento de rotação da Terra. Diferenças na superfície (topografia) também afetam o fluxo de ar devido à variações de pressão, absorção de radiação solar e umidade.

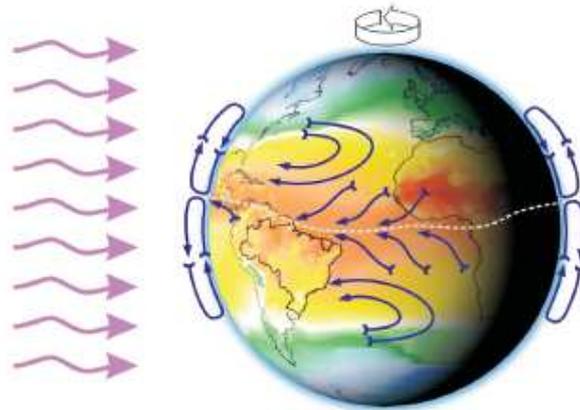


Figura 1.1 – Distribuição geral dos ventos



Figura 1.2 – Modelo do relevo brasileiro

O perfil do vento local sofre influência de diversos parâmetros:

- Obstáculos próximos aos locais de medição
- Rugosidade do terreno. Tipo de vegetação, tipo de utilização do terreno e construções
- Orografia, existência de colinas e depressões

O estudo do potencial eólico brasileiro tem, aproximadamente, 30 anos. Começou com a coleta de dados de anemômetros nos aeroportos realizada pelo Instituto de Atividades Especiais, IAE/CTA. Os resultados já induziam a viabilidade de máquinas de pequeno porte para sistemas isolados e indicavam a região nordestina como promissora para o desenvolvimento de tecnologias de aproveitamento eólico. Nessa nova perspectiva foram lançados novos projetos para geração de energia pelo vento, com turbinas de pequeno porte (até 10kW).

Em 1987 a CHESF – Companhia Hidro- Elétrica do São Francisco apresentou o inventário do potencial eólico da região Nordeste. Os dados foram coletados por anemômetros a 10m de altura. Outros estudos regionais de mapeamento do regime dos ventos foram conduzidos, em especial nos estados de Minas Gerais e do Rio Grande do Sul.

Em 1988 foi lançado o “Atlas do Potencial Eólico Nacional”, organizado pela ELETROBRÁS e a Fundação Padre Leonel Franca. Essa análise identificava velocidades maiores do vento no litoral brasileiro e a áreas no interior favorecidas pelo relevo e baixa rugosidade.

Até o final da década de 1980 os dados coletados eram de ventos a 10m de altura. A essa altura há muita influência de obstáculos próximos e a rugosidade do terreno, assim, não são representativos das áreas geográficas onde estão as estações de medição.

Somente a partir da década de 1990 iniciaram-se medições em locais específicos e a alturas maiores que 20m. Além disso, houve a introdução de novas ferramentas para uma análise mais precisa, softwares de mapeamento regime de vento, modelos de geoprocessamento e procedimentos requeridos para esta finalidade.

Em 2001 foi lançado o “Atlas do Potencial Eólico Brasileiro” que abrange todo o território do Brasil e contém mapas indicativos do regime dos ventos e fluxos de potência eólica na altura de 50m. Por meio destes mapas serão identificadas as regiões promissoras para a instalação do aerogerador que será objeto de estudo do presente trabalho.

### **3.2. Regime dos ventos no Brasil**

A determinação do regime dos ventos será caracterizada de acordo com a análise estabelecida pelo “Atlas do Potencial Eólico Brasileiro” elaborado pela CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, como dito anteriormente.

Através do sistema MesoMap foi construído um modelo do fluxo dos ventos. Esse sistema é um conjunto integrado de modelos de simulação atmosférica, base de dados meteorológicos e geográficos, redes de computadores e sistemas de armazenamento.

A distribuição dos ventos no Brasil é controlada pelos sistemas de alta pressão Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul e do Atlântico Norte e a faixa de baixas pressões da Depressão Equatorial.

Para definirmos as regiões mais consistentes quanto aos ventos para geração de energia elétrica, o estudo será organizado pelas regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul.

### 3.2.1. Região Norte

Na Bacia Amazônica as velocidades médias anuais são baixas não maiores que 3,5 m/s. O principal fator é o atrito do escoamento atmosférico com a superfície devido a trajetória sobre florestas densas e os fracos gradientes de pressão associados à zona difusa de baixa pressão localizada no centro da Bacia, na parte oriental a Depressão Equatorial é responsável pela baixa pressão . No extremo Norte, porém, há velocidades maiores devido a áreas elevadas em Roraima na divisa com a Venezuela. Nessa área, escoamentos de altitude (1.000 a 2.000m) alcançam a superfície grande parte coberto por savanas (baixa rugosidade) alcançando valores de 8 a 10m/s de média anual.

Na parte oriental da Bacia há um pequeno acréscimo de velocidade de oeste para leste, pois o escoamento de leste percorre trajetórias menores sobre vegetação densa e o contraste térmico mais acentuado entre continente e mar eleva o gradiente de pressão.

Na costa litorânea a combinação dos alísios de leste e brisas terrestres e marinhas resulta em valores de velocidade média anual de 5m/s a 7,5m/s. O vento decresce rapidamente à medida que se desloca para o interior devido ao aumento do atrito e da rugosidade da superfície e a diminuição da contribuição das brisas marinhas.

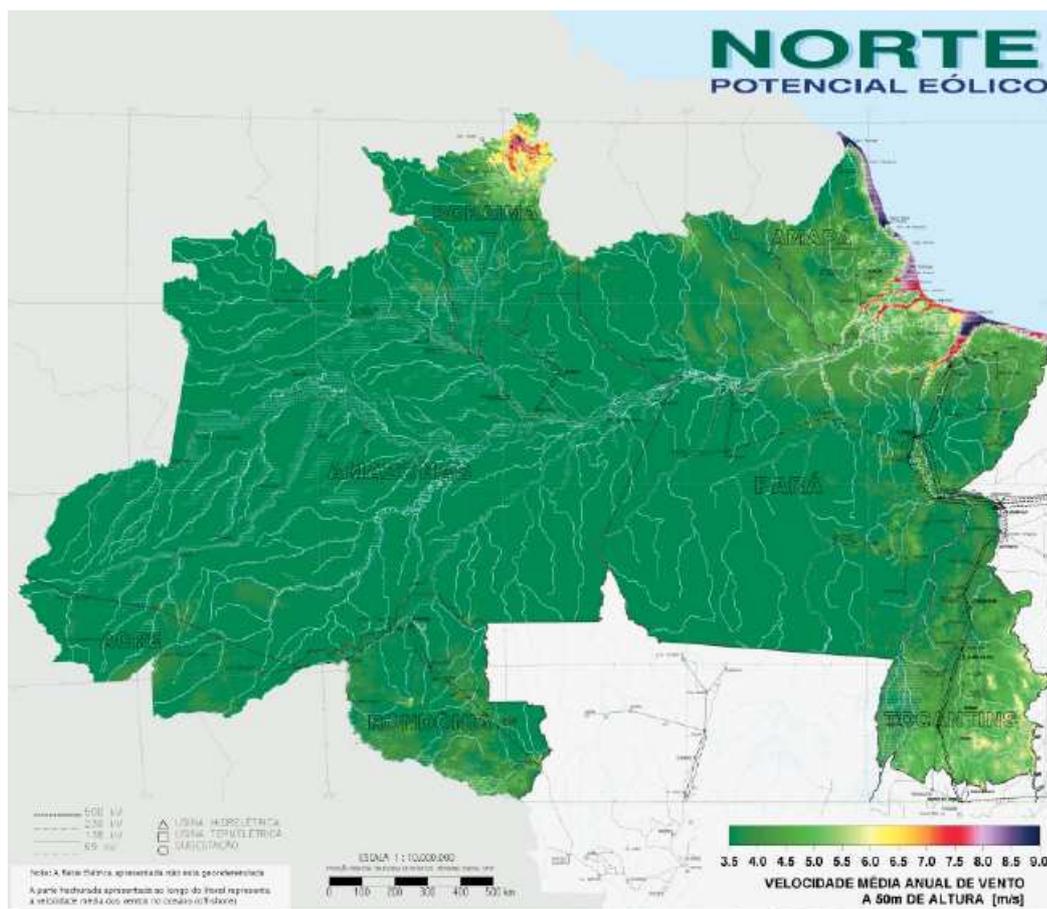


Figura 1.3 – Mapa das velocidades médias anuais da região norte

### 3.2.2. Região Nordeste

O litoral mais ao norte (Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte) beneficiado pela combinação dos alísios de leste e brisas terrestres e marinhas impõe médias anuais de velocidade na ordem de 6m/s a 9m/s. Essa área apresenta maiores médias em relação a zona litorânea do Amapá e Pará devido a menores índices de vegetação e umidade do solo, ou seja, menor rugosidade e maiores temperaturas acentuando o contraste térmico entre continente e mar.

A porção litorânea que se estende do Paraíba à Bahia apresenta velocidades de 3,5m/s a 6m/s.

No interior, as áreas de serras e chapadas que se estendem ao longo da costa (até 1.000km da costa) desde o Rio Grande do Norte até o Rio de Janeiro tem média de

ventos anuais de 6,5m/s a 8m/s nas áreas mais elevadas da Chapada Diamantina. Isso se deve pelo efeito de compressão vertical do escoamento quando ultrapassa a barreira das serras, além de aspectos topográficos e ao terreno.

A parte nordeste do Planalto Central, margem esquerda da Bacia do Rio São Francisco, os ventos chegam a 4m/s a 6m/s pelo efeito do escoamento de leste aumenta para o sul, o gradiente de pressão é mais acentuado e a vegetação é menos densa.

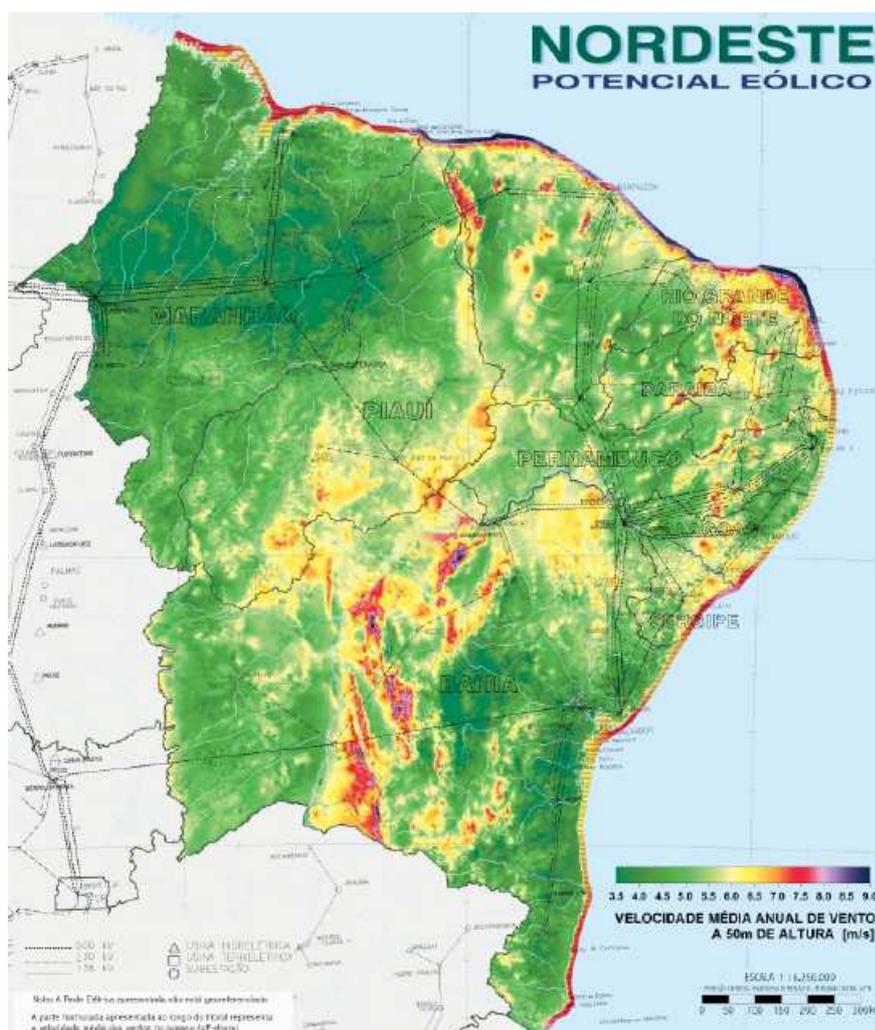


Figura 1.4 – Mapa das velocidades médias anuais da região nordeste

### 3.2.3. Região Centro-Oeste

A região Centro-Oeste, caracterizada pela porção sul do Planalto Central, apresenta ventos que chegam a 3m/s a 4m/s na parte norte e 5m/s a 6m/s na parte sul pelo efeito da intensidade do escoamento predominante de leste aumentar para o sul, onde o gradiente de pressão é mais acentuado e a vegetação é menos densa. Perto da fronteira com o Paraguai os ventos sofrem uma compressão vertical devido à transposição do escoamento a áreas elevadas, elevando as médias anuais a até 7m/s.

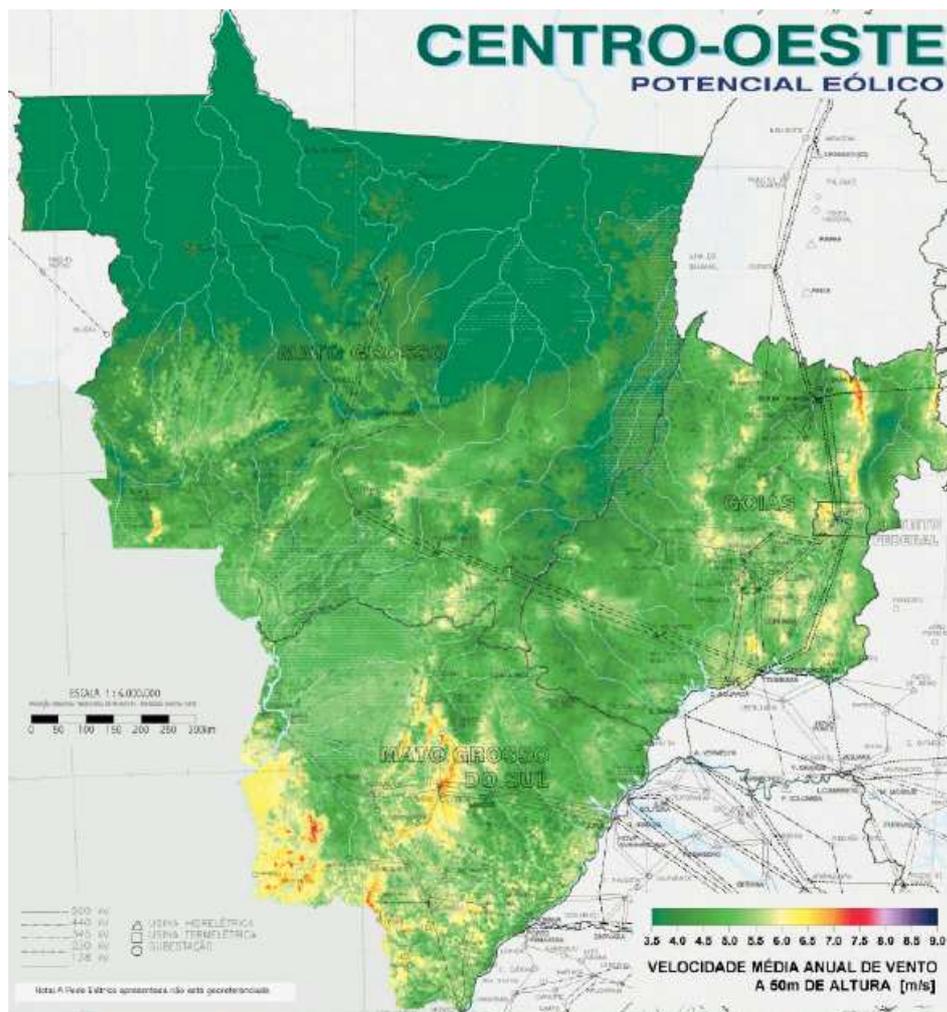


Figura 1.5 – Mapa das velocidades médias anuais dos ventos na região Centro-Oeste

### 3.2.4. Região Sudeste

No litoral da região sudeste os ventos têm a mesma característica daquele que atinge da Paraíba a Bahia com velocidades de 3,5m/s a 6m/s. Exceção feita ao sul do Espírito Santo e nordeste do Rio de Janeiro com velocidades de 7,5m/s de média anual. Isso é resultado do efeito de bloqueio pelas montanhas a oeste da costa ao escoamento. O ar acelera-se para o Sul para aliviar o acúmulo de massa causado pelo bloqueio. Conseqüentemente, menores velocidades na porção anterior ao bloqueio.

No interior, as áreas que se estendem ao longo da costa (até 1.000km da costa) desde o Rio Grande do Norte até o Rio de Janeiro tem média de ventos anuais de 6,5m/s a 8m/s nas áreas mais elevadas da Serra do Espinhaço. Isso se deve pelo efeito de compressão vertical do escoamento quando ultrapassa a barreira das serras, além de aspectos topográficos e ao terreno.

O escoamento ao sul da região Sudeste tem ventos de nordeste devido ao gradiente de pressão entre uma área de baixa a leste dos Andes e o Anticiclone Subtropical Atlântico (alta pressão). Desse escoamento resultam velocidades de 5,5m/s a 6,5m/s sobre grandes áreas, significativamente influenciado pelas características de relevo e terreno.

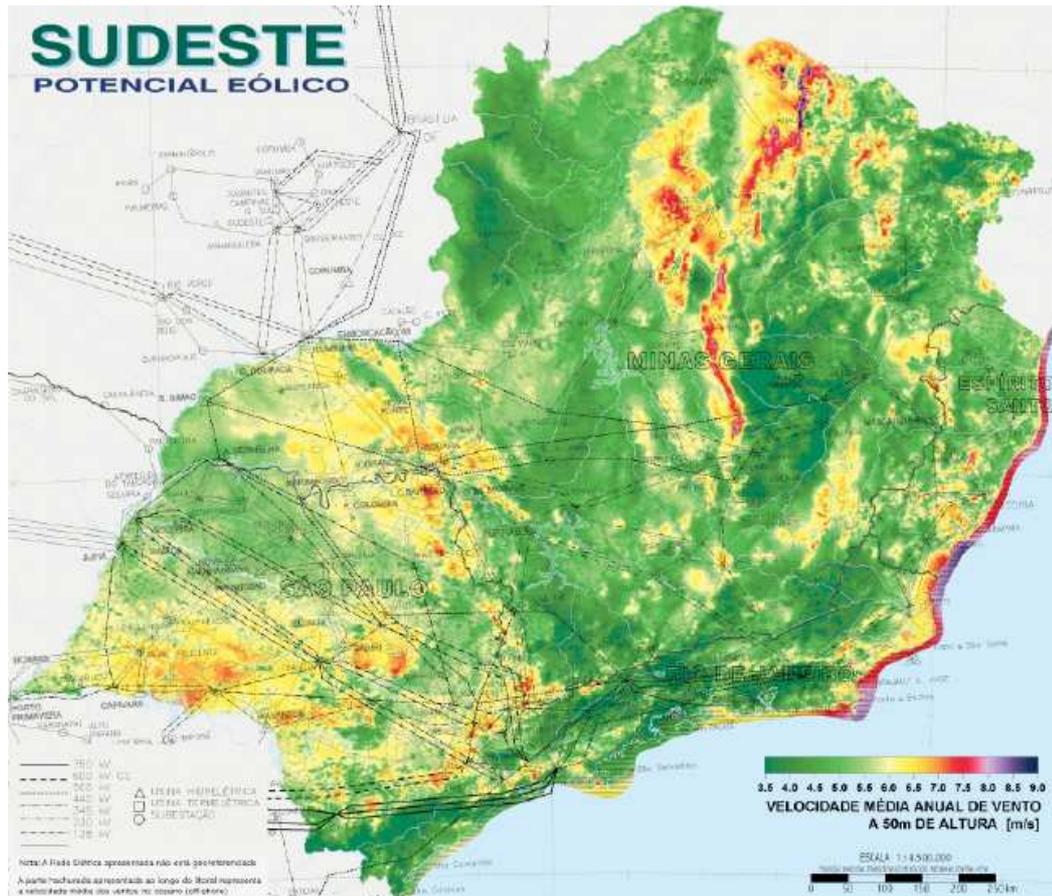


Figura 1.6 – Mapa das velocidades médias anuais da região sudeste

### 3.2.5. Região Sul

O escoamento da região Sul tem ventos de nordeste devido ao gradiente de pressão entre uma área de baixa a leste dos Andes e o Anticiclone Subtropical Atlântico (alta pressão). Desse escoamento resultam velocidades de 5,5m/s a 6,5m/s sobre grandes áreas, significativamente influenciado pelas características de relevo e terreno. Há ventos mais intensos que ocorrem nas áreas mais elevadas e nos planaltos de baixa rugosidade, atingindo de 7m/s a 8m/s. O litoral sul sofre a ação de ventos leste-nordeste acentuados pelas brisas marinhas que impõe médias de velocidade na ordem de 7 m/s.

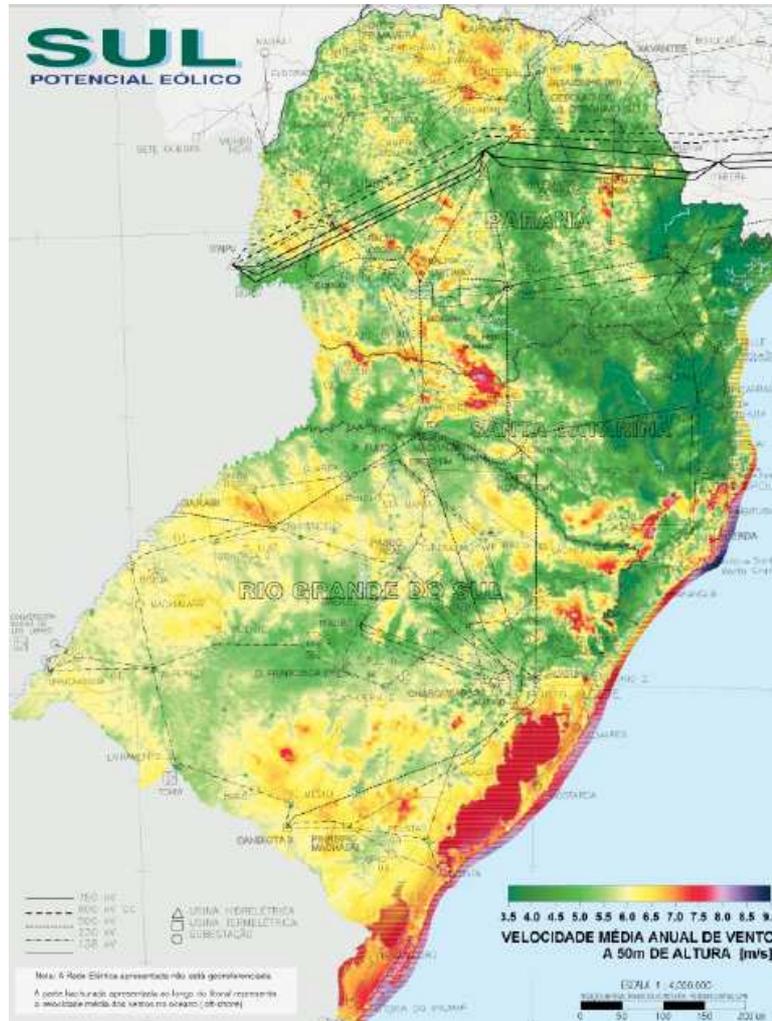


Figura 1.7 – Mapa das velocidades média anual dos ventos na região sul

### 3.3. Potencial Eólico Brasileiro

Por meio da integração dos mapas digitais, utilizando-se de recursos de geoprocessamento e cálculos de desempenho e produção de energia elétrica a partir de curvas de potência de turbinas eólicas comerciais foi estimado o potencial eólico brasileiro como apresentado no mapa.

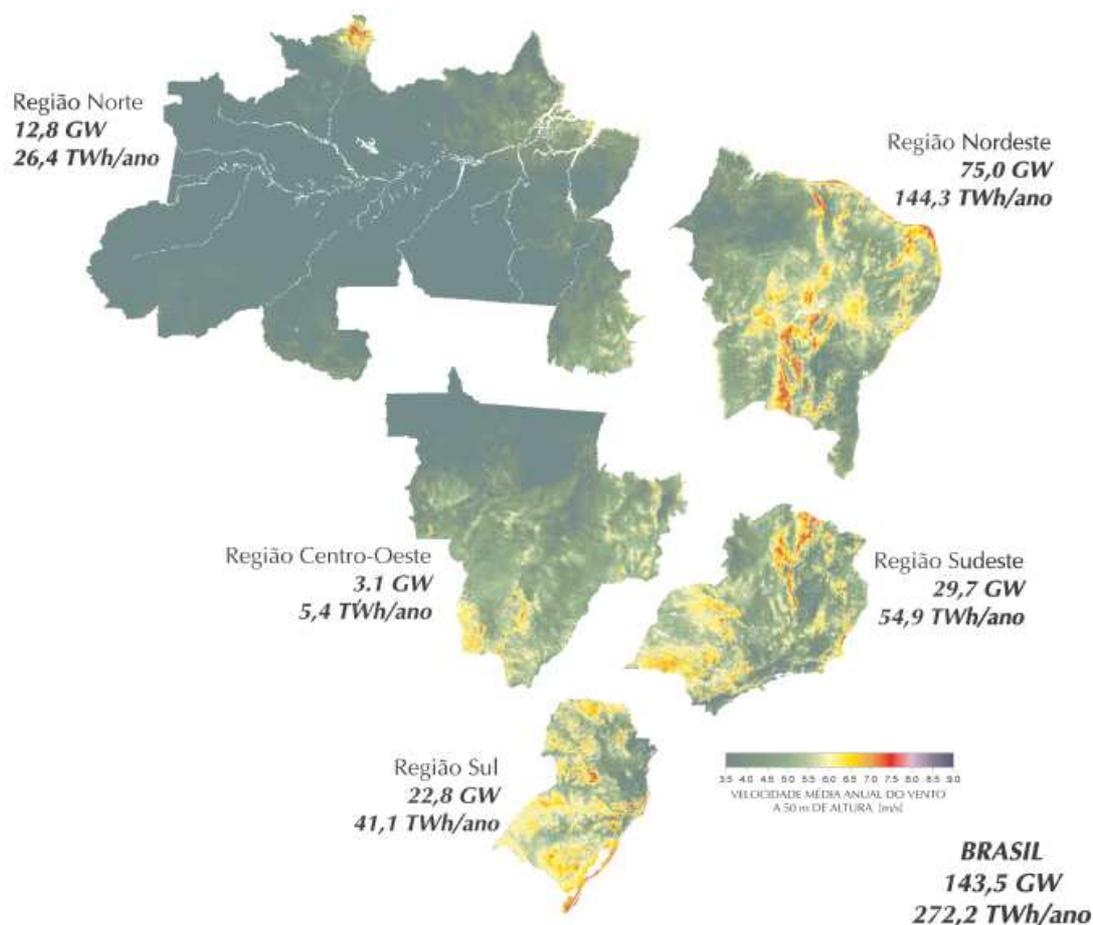


Figura 1.8 – Potencial Eólico Brasileiro

### 3.4. Conclusão

Segundo o estudo podemos ver a grande disponibilidade de recursos energéticos pelo aproveitamento eólico principalmente das regiões nordeste e sul com alguns locais específicos espalhados pelo resto do país.

Seguindo o contexto mundial, onde há uma crescente preocupação com relação a questões ambientais, o uso de fontes alternativas para geração de energia ganha cada vez mais força, onde o crescimento do setor eólico cresceu, entre 1997 a 2004, 600%.

Portanto, a complementação da matriz energética brasileira pelo uso de energia eólica é uma alternativa cada vez mais viável e real. Vários projetos de

fazendas eólicas no nordeste e sul do país estão saindo do papel que deverão, num futuro próximo, elevar a capacidade instalada de 200 MW para 6.200MW.

Com a perspectiva de crescimento da economia brasileira haverá um aumento demanda anual de energia na ordem de 5% o que potencializa novos projetos com soluções de baixo custo, rápida instalação e que alcancem de forma autônoma todas as regiões. Esse ponto favorece a busca pela energia do vento que com instalações simples podem suprir lugares isolados.

#### **4. ANÁLISE DE CUSTOS**

Será feita uma análise de custos considerando um modelo do mercado de aerogerador, um sistema autônomo de energia solar e o custo por quilômetro de uma linha de transmissão. Essas condições foram escolhidas para mostrar a diferença de valores entre sistemas autônomos e o ponto onde é melhor escolher entre levar uma linha de transmissão até uma comunidade ou instalar geradores diretamente nesses locais. Isso reside no fato de que no Brasil existem muitas pessoas sem energia por não estarem perto de redes de distribuição. Porém há esforços governamentais em universalizar a oferta de energia elétrica e nesse sentido que aparecem oportunidades para desenvolver fontes alternativas às convencionais.

O sistema eólico a ser avaliado será um com capacidade de 350W de potência composto por uma turbina Enersud Notus 138, duas baterias de 150A 12V, inversor 12DC-110AC e torre tubular.

O gerador solar de referência é àquele em estudo no IEE (Instituto de Eletrotécnica e Energia) que tem como objetivo suprir comunidades isoladas de energia. Esse equipamento tem também duas baterias de 150A e um inversor 12DC-110AC com capacidade de 200Wp. O valor desse conjunto é de R\$5.985,00. A principal razão do alto valor é que os painéis fotovoltaicos são importados o que eleva significativamente seu custo.

Os valores relacionados às linhas de transmissão serão tomados a partir das últimas licitações promovidas pela ANEEL, leilões número 005/2006 e 003/2006. Os resultados dos leilões foram retirados do site da ANEEL assim como os mapas com as distâncias dessas linhas. Nesse ponto vale ressaltar que os custos entre regiões oscilam, portanto, faremos a avaliação com os valores da região nordeste do Brasil, que se mostraram os mais baixos.

##### **4.1. Custo do Sistema Eólico e Fotovoltaico**

	Item	Produto	Preço
Sistema fotovoltaico SIGFI-13	Controlador de Carga	PHOCOS modelo CX20 20A	R\$ 5.985,00
	Gerador fotovoltaico 200Wp	Células Fotovoltaicas 200Wp	
	Acumulador	150 Ah (24Vcc)	
	Inversor	ISOVETER 250-127W	

Item	Produto	Preço	Quantidade	Total
Bateria	Tudor 12TE150	R\$ 580,37	2	R\$ 1.160,74
Kit Torre	Kit com base, junções, suportes e cabos.	R\$ 850,00	1	R\$ 850,00
Tubos	Tubo 1 1/2" Ferro Galvanizado DIN2440	R\$ 105,00	2	R\$ 210,00
Turbina	Enersud Notus 138	R\$ 2.700,00	1	R\$ 2.700,00
Inversor	Mean Well A301/302 - 600	R\$ 553,00	1	R\$ 553,00
<b>Total</b>				<b>R\$ 5.473,74</b>

Tabela 3.1 – Custos dos sistemas eólico e fotovoltaico

#### 4.2. Linhas de Transmissão

Leilões	Região	Lote	Voltagem (kV)	Valor	Km	R\$/km
005/2006	NE	Lote E	230	R\$ 3.751.428,00	198	R\$ 18.946,61
003/2006	NE	Lote D	230	R\$ 4.880.000,00	105	R\$ 46.476,19
003/2006	NE	Lote F	230	R\$ 6.654.996,00	315	R\$ 21.126,97
<b>Média</b>						<b>R\$ 28.849,92</b>

Tabela 3.2 – Custo de Linhas de transmissão

#### 4.3. Conclusão

Como pode ser visto o custo por quilômetro de linha de transmissão é bem elevado. Se fossemos considerar uma distância de 100km seria possível comprar mais de 520 aerogeradores como o proposto. Isso significa abastecer pelo menos 520 famílias de comunidades isoladas. Sem falar que os equipamentos para gerar energia pelo vento são simples de instalar e a manutenção não compromete visto que os componentes são facilmente encontrados no mercado.

Com relação ao sistema fotovoltaico, é fácil perceber a vantagem econômica da geração pelo vento. São R\$15,60 por Watt gerado enquanto que o solar o valor é de aproximadamente R\$30,00. Além disso, as células, como dito anteriormente são importadas encarecendo a reposição desse componente.

Portanto, pelas condições observadas, é interessante o desenvolvimento de uma alternativa eólica para a geração de energia.

## 5. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

### 5.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentados os elementos constituintes de um sistema autônomo para aerogeração e, posteriormente, serão definidas as características globais e especificações técnicas da turbina eólica a ser desenvolvida. Estes parâmetros servirão de orientação para dimensionamento do equipamento que será realizado em uma segunda etapa do trabalho em estudo.

### 5.2. O aerogerador

Os aerogeradores são dotados dos seguintes componentes, ilustrados na figura abaixo:

- **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.
- **Acessórios:** São os componentes periféricos.

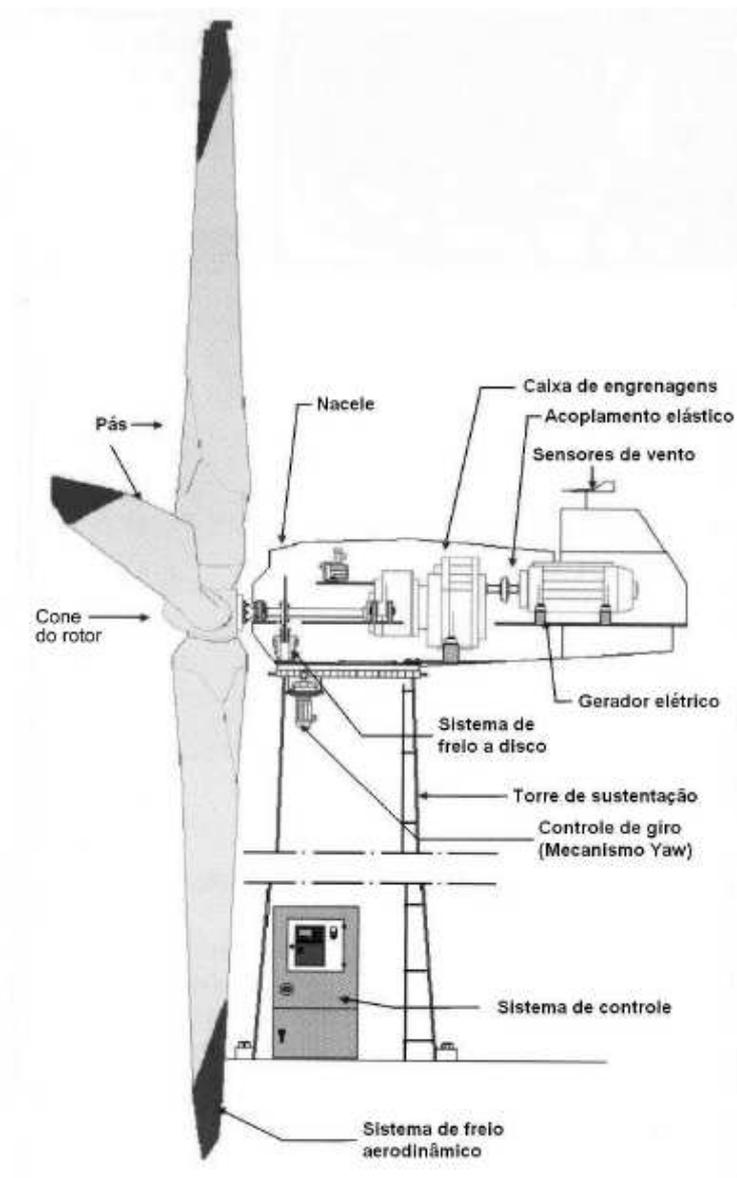


Figura 4.1 – Esquema de um gerador de energia eólico

### 5.2.1. 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. Os rotores mais utilizados para geração de energia elétrica são os de eixo horizontal do tipo hélice, normalmente compostos de 3 pás.

#### 5.2.1.1. Rotores de Eixo Horizontal



Figura 4.2 – Turbina eólica de eixo horizontal

São os mais comuns. 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.

Os rotores de eixo horizontal 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). Em geral, utilizam-se pás rígidas de madeira, alumínio ou fibra de vidro reforçada.

Posição do rotor em relação à torre: o disco varrido pelas pás pode estar a jusante do vento ou a montante do vento. 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 pode realizar-se automaticamente.

### 5.2.1.2. Rotores de Eixo Vertical



Figura 4.3 – Turbina eólica 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. 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.

### 5.2.2. 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.

A caixa de transmissão fica 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 necessária a instalação de um sistema de multiplicação entre os eixos. Mais recentemente, alguns fabricantes desenvolveram com sucesso aerogeradores sem a caixa multiplicadora. 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 multipolos de baixa velocidade e grandes dimensões.

### **5.2.3. Mecanismos de Controle**

Os modernos aerogeradores utilizam dois diferentes princípios de controle aerodinâmico para limitar a extração de potência a potência nominal do aerogerador. São chamados de controle estol (stall) simples, utilizados em sistemas mais antigos, e controle de passo (pitch), utilizados com o aumento do tamanho das máquinas.

Além desses, há um freio que entra em operação em duas situações: parar a turbina ou deixá-la estacionada quando não estiver operando.

Há, também, um mecanismo de orientação (yaw system) que tem a função de manter as pás alinhadas com a direção do vento. Pode ser ativo, com motores elétricos e engrenagens, ou passivo, por meio de um leme.

#### **5.2.3.1. 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 a um aumento da velocidade do vento, as pás do rotor

giram em torno do seu eixo longitudinal; isto é, 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.

### **5.2.3.2. 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.

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.

### **5.2.4. Gerador**

A transformação da energia mecânica de rotação em energia elétrica através de equipamentos de conversão eletro-mecânica é um problema tecnologicamente dominado e, portanto, encontram-se vários fabricantes de geradores disponíveis no mercado.

Entretanto, a integração de geradores a sistemas de conversão eólica constitui-se em um grande problema, que envolve principalmente:

- Variações na velocidade do vento (extensa faixa de rotações por minuto para a geração);
- Variações do torque de entrada (uma vez que variações na velocidade do vento induzem variações de potência disponível no eixo);
- 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 (isto é, necessitam ter alta confiabilidade).

Atualmente, existem várias alternativas de conjuntos moto-geradores, entre eles: geradores de corrente contínua, geradores síncronos, geradores assíncronos, geradores de comutador de corrente alternada. Cada uma delas apresenta vantagens e desvantagens que devem ser analisadas com cuidado na sua incorporação a sistemas de conversão de energia eólica.

#### **5.2.5. Torre**

As torres são necessárias para sustentar e posicionar o rotor a uma altura conveniente para o seu funcionamento. É um item estrutural de grande porte e de elevada contribuição no custo inicial do sistema. Em geral, as torres são fabricadas de metal (treliça ou tubular) ou de concreto e podem ser ou não sustentadas por cabos tensores.

#### **5.2.6. Sistema de 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 se faz necessária para adaptar o perfil aleatório de produção energética ao perfil de consumo, guardando 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. As formas mais conhecidas de armazenamento de energia eólica são através de baterias.

### **5.3. Especificações Funcionais**

#### **5.3.1. De desempenho**

- Produzir energia elétrica capaz de suprir uma demanda mensal de alguns elementos de uma residência. Um rádio pequeno, uma TV 14" e dez lâmpadas incandescentes.
- Possuir alto desempenho aerodinâmico (pás)
- Rendimento da parte eletromecânica na ordem de 90%
- Iniciar a geração a partir de ventos acima de 3,5m/s

#### **5.3.2. De conforto**

- Níveis de ruído inferiores a 50dB à 20m

#### **5.3.3. De segurança**

- Garantir a integridade do conjunto mesmo a condições severas de vento
- Adotar mecanismos de controle para manter as condições ideais de operação
- Possuir isolamento adequado contra fogo e raios

### **5.4. Especificações Operacionais**

#### **5.4.1. De durabilidade**

- Uso de materiais resistentes ao desgaste provocado por intempéries
- Deve ter vida útil de no mínimo 20 anos ou mais de 160.000 horas de operação
- Baterias devem durar no mínimo 4 anos

#### **5.4.2. De confiabilidade**

- Manutenção periódica
- Lubrificação das partes móveis, rolamentos e transmissão

#### **5.4.3. De operação**

- O sistema deve operar sem a necessidade de um operador
- A orientação da turbina deve ser de forma livre, sem controle eletrônico

### **5.5. Especificações Construtivas**

#### **5.5.1. Do rotor**

- Diâmetro deve ser em função da potência requerida
- O rotor deverá ser posicionado há montante do vento para utilizar de um sistema passivo de orientação
- O eixo poderá ser vertical ou horizontal

#### **5.5.2. Das pás**

- Materiais leves resistentes á tração e a fadiga
- A quantidade de pás dependerá de qual tipo eixo será adotado
- O perfil da pá deverá ser escolhido de acordo com o vento nominal e o vento máximo sempre com o melhor aproveitamento.

#### **5.5.3. Da transmissão**

- Material resistente
- Deve ser compacta

#### **5.5.4. Da torre**

- De aço ou alumínio
- Altura: de 10 a 20m

## 6. DEFINIÇÕES DO AEROGERADOR A SER DESENVOLVIDO

### 6.1. Matriz de Soluções

Depois de entender o funcionamento da máquina e suas possíveis configurações foi estabelecida uma matriz com alternativas a cada uma das especificações construtivas. Assim, foi possível estabelecer soluções como demonstrado na “Matriz de Soluções”.

Item	Alternativas		
	A	B	C
Eixo do Rotor	Vertical	Horizontal	-
Posição do Rotor	Montante	Jusante	-
Número de pás	2	3	Multipás
Material das pás	Compostos Metálicos	Compostos Não-Metálicos	-
Construção da torre	Treliçada	Tubos	-
Material da torre	Aço	Alumínio	-
Direcionamento	Estol	Passo	Estol Ativo
Material da transmissão	Aço	Alumínio	-

Tabela 5.1 – Matriz de Alternativas

Solução	Eixo do Rotor	Posição do Rotor	Número de pás	Material das pás	Construção da torre	Material da torre	Direcionamento	Material da transmissão
1	Horizontal	Montante	3	Compostos Não-Metálicos	Tubos	Aço	Estol	Aço
2	Horizontal	Jusante	3	Compostos Não-Metálicos	Tubos	Aço	Passo	Aço
3	Vertical	NA	2	Compostos Não-Metálicos	Tubos	Aço	Estol	Aço

Tabela 5.2 – Matriz de Soluções

## 6.2. Matriz de Decisão

O estabelecimento da melhor configuração será feito por uma matriz de decisão com os seguintes critérios:

- Facilidade de construção
- Custo/ benefício
- Manutenção
- Durabilidade
- Segurança
- Eficiência

		Soluções		
Critério	Peso	1	2	3
Facilidade de construção	3	4	3	2
Custo/ benefício	4	4	3	1
Manutenção	2	3	1	3
Durabilidade	3	4	4	4
Segurança	3	3	3	3
Eficiência	3	4	4	2
<b>Total</b>		<b>67</b>	<b>56</b>	<b>43</b>

Tabela 5.3 – Matriz de Decisão

## 6.3. Conclusão

Segundo a análise pela matriz de decisão a solução **1** foi escolhida. Isso condiz com o que há hoje no mercado, equipamentos com 3 pás, materiais leves, controle passivo de orientação e rotores verticais. Portanto, o projeto básico será feito de acordo com a configuração da solução número 1.

## 7. PROJETO BÁSICO

Nesta etapa será feito o dimensionamento e a seleção dos componentes que compõe a turbina escolhida na matriz de decisão. Serão focos do trabalho as partes principais do equipamento: caracterização do rotor, seu perfil e diâmetro; seleção da caixa multiplicadora; dimensionamento do eixo; seleção dos rolamentos; seleção de um gerador; e, por fim, especificado as dimensões do estabilizador.

### 7.1. Cálculo da Energia Consumida

O equipamento deverá fornecer energia suficiente para abastecer uma residência de uma comunidade isolada. Portanto, o equipamento deverá suprir a demanda de itens básicos de uma moradia sem infra-estrutura. A planilha abaixo especifica os itens que devem consumir a energia gerada pelo aerogerador (os dados sobre a potência média foram coletados do site do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica-PROCEL) :

	Potência média (Watts)	Média Utilização/ dia (h)	Unidades	Consumo médio diário (Wh)
LÂMPADA INCANDESCENTE	40	5	4	800
CHUVEIRO ELÉTRICO	3500	0,5	1	1750
BOMBA D'ÁGUA 1/4 CV	420	2	1	840
			<b>Total</b>	<b>3390</b>

Tabela 6.1 – Consumo diário em Wh

A tabela sugere que o local a ser instalada a turbina contenha os itens descritos. Porém esse cálculo considerou o que poderia vir a ter em uma residência isolada .

De acordo com a tabela, o consumo atinge 3.390 Wh que deve ser a energia gerada pela máquina.

## 7.2. Dimensionamento do rotor

### 7.2.1. Diâmetro do rotor

Apenas parte da potência contida no vento pode ser extraída por uma turbina eólica, quantificada pelo coeficiente  $C_p$  (quantidade extraída pela turbina sobre quantidade total). Esse fator, segundo estudos de Albert Betz, teoricamente é de 59% ou  $16/27$ . A figura 1 mostra o perfil do vento na passagem pela turbina.

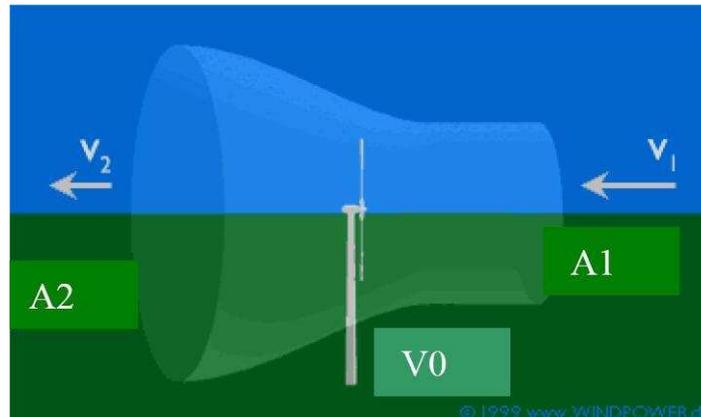


Figura 6.2 – Perfil do vento ao longo da trajetória pelas pás de uma turbina

Onde:

$V_1$  = velocidade do vento não perturbado

$V_0$  = velocidade do vento ao se chocar com as pás

$V_2$  = velocidade do vento após se chocar com as pás

Pela lei de continuidade de fluxo:

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 = \dot{m} \quad (1)$$

A potência extraída dos ventos nas pás do rotor é a diferença das potências do vento na entrada e na saída, dada pela expressão:

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

Onde:

$P$  = potência mecânica extraída pelo rotor

$V_1$  = velocidade do vento na entrada da turbina

$V_2$  = velocidade do vento na saída da turbina

$m$  = massa de ar por segundo

$$\text{Massa de ar / seg} = \rho \cdot A \cdot L/\text{seg} = \rho \cdot A \cdot \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (3)$$

Onde:

$A$  = área do rotor

Substituindo (3) em (2) e rearranjando:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A V_1^3 \cdot C_p \quad \text{sendo} \quad C_p = \frac{\left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right]}{2} \quad (4)$$

Com o  $C_p$  descrito anteriormente. Abaixo se encontra a curva  $C_p$  em função com a velocidade do Vento. Pode-se ver que a potência máxima teórica é quando  $V=2/3V_1$ .

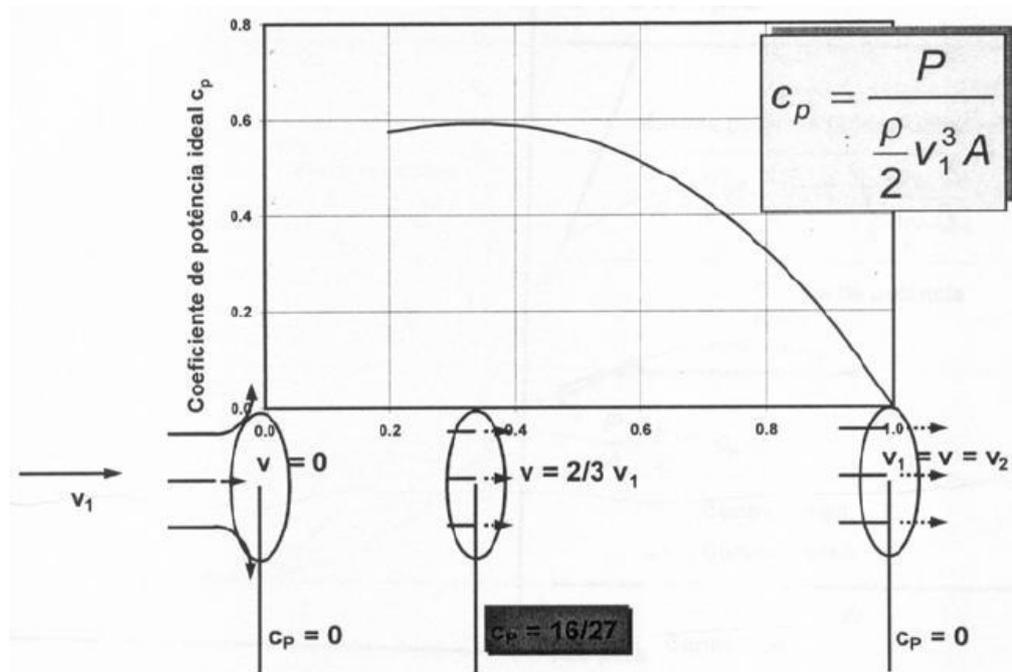


Figura 6.3 – Curva  $C_p$  em função com a velocidade do vento

Na prática, são conseguidas eficiências inferiores que dependem do perfil aerodinâmico das pás, rotação da esteira atrás do rotor e outros parâmetros como perdas mecânicas.

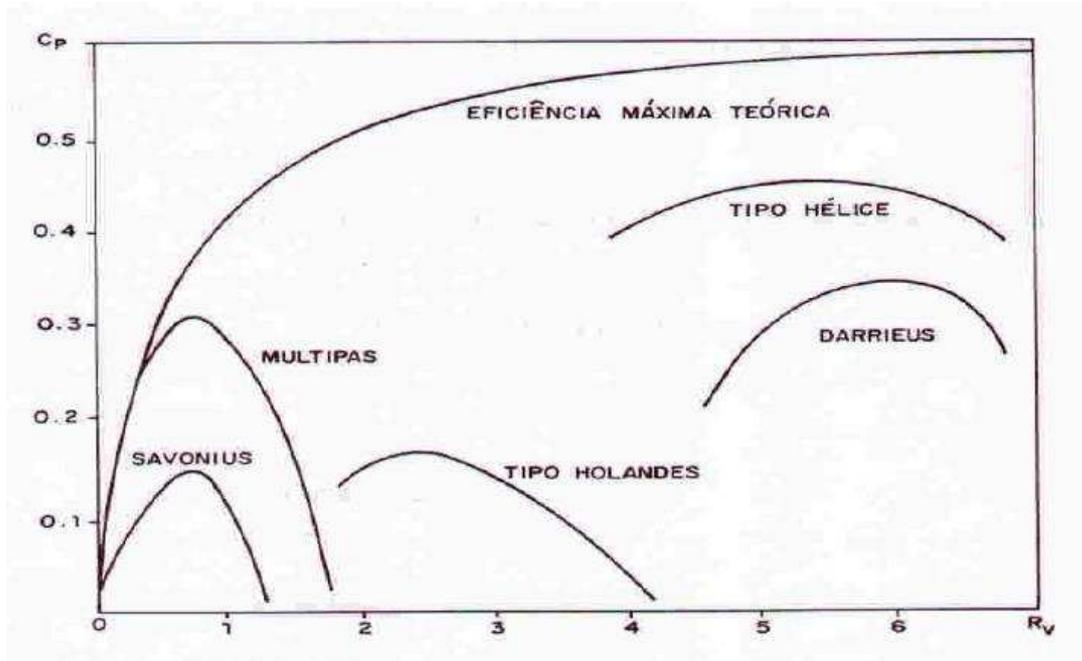


Figura 6.4 – Eficiência dos tipos de turbina disponíveis em função da velocidade específica  $R_V$  (razão entre a velocidade tangencial na ponta da pá e a velocidade do vento incidente)

A potência elétrica gerada é a potência mecânica descontando perdas devido ao multiplicador de velocidades, ao gerador e perdas aerodinâmicas.

$$P_{el} = P_m \cdot \eta \quad (5)$$

Onde:

$$\eta = \eta_m \cdot \eta_G \cdot \eta_a \quad (6)$$

$\eta_a$  = eficiência aerodinâmica

$\eta_g$  = eficiência do gerador

$\eta_m$  = eficiência do multiplicador de velocidades

Definido a potência a ser gerada é possível dimensionar o diâmetro do rotor

por (5) com  $A = \frac{\pi}{4} D^2$  (7)

Para efetuar os cálculos para determinar o diâmetro do rotor serão considerados os seguintes dados:

$$C_p = 0,35 \Rightarrow \text{turbina tipo hélice}$$

$$\rho_{ar, 15^{\circ}, 1am} = 1,2256 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$\eta = 0,85$$

$$V = 8 \text{ m} / \text{s}$$

Como o consumo diário é  $E = 3.390 \text{ Wh}$  e considerando um fator de capacidade da turbina em 40% (valor para locais com bom regime de ventos) fica:

$$E = \text{horas} \times \text{pot} \times FC \Rightarrow P = 350 \text{ W}$$

$$D = \sqrt{\frac{8 \cdot P}{\eta \cdot \pi \cdot \rho \cdot V^3 \cdot C_p}} = 2,19 \text{ m}$$

Portanto, o rotor terá **2,20m** de diâmetro.

### 7.2.2. Perfil da pá

As turbinas eólicas extraem a potência do vento através das forças de sustentação e arrasto como já mencionado.

A força de arrasto atua na direção do escoamento e provém da ação do fluido sobre um corpo, é composta por um diferencial de pressão entre as partes anterior e posterior do corpo e pelas tensões de cisalhamento do fluido devido a sua viscosidade.

A força de sustentação atua na direção perpendicular do escoamento e ocorre devido a diferença de pressão entre lado superior e o lado inferior do corpo.

Os aerogeradores podem funcionar tanto com o arrasto como com sustentação, porém esta última é mais utilizada pois alcança maiores eficiências.

O estudo prevê a utilização de uma turbina tipo HAWT que utiliza primordialmente as forças de sustentação. No caso, as pás do equipamento funcionam

como aerofólios. O fluxo de ar sobre esse aerofólio gera ambas as forças discutidas, mas é a de sustentação que faz o rotor girar, ou seja, gera torque no eixo.

A potencia desenvolvida pela é função da velocidade do vento, do tipo de aerofólio, da densidade do ar e do ângulo de ataque entre a pá e o vento incidente.

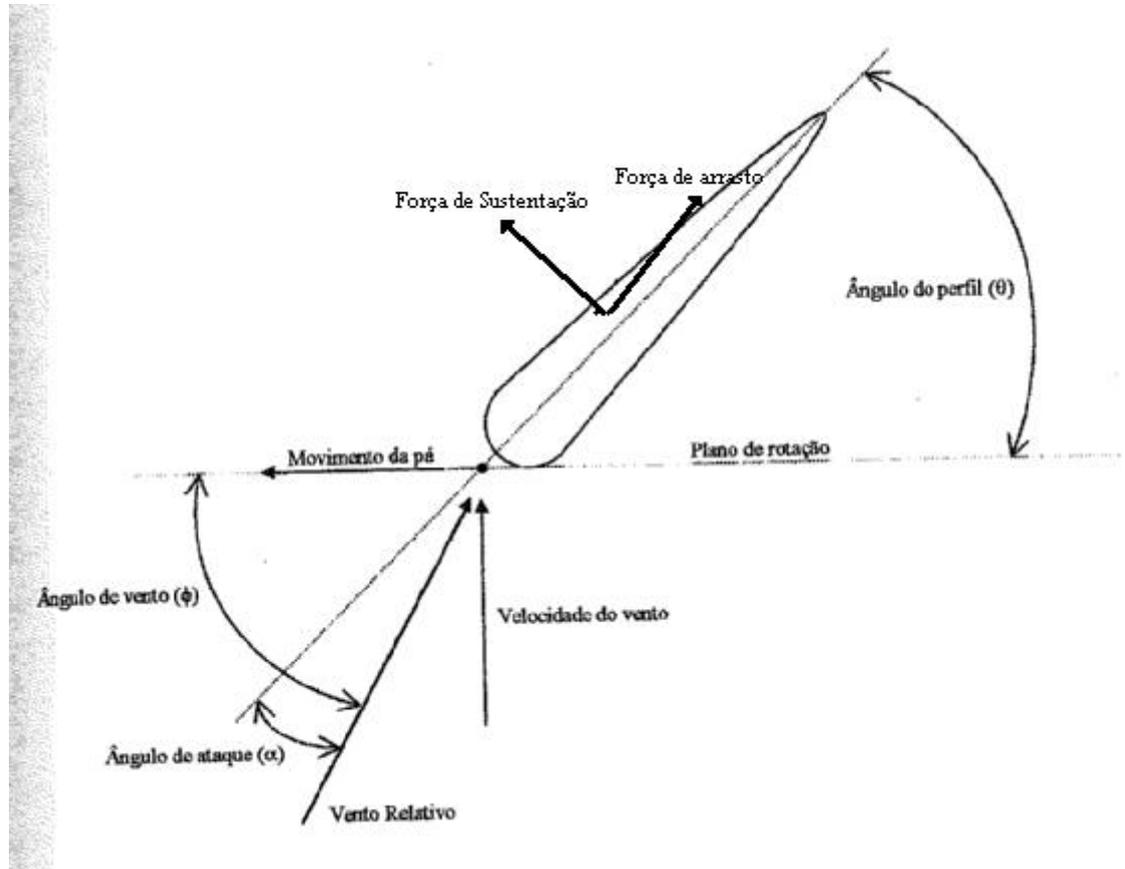


Figura 6.5 – Diagrama da pá

A força útil sobre a seção da pá será dada por:

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

L = força de sustentação

D = força de arrasto

$\theta$  = ângulo entre plano de rotação e o plano do perfil (ângulo do vento menos ângulo de ataque)

Mas L e D dependem do ângulo de ataque, que é dependente da rotação do rotor, portanto é necessário que varie o ângulo de ataque ao longo do comprimento da pá uma vez que a velocidade tangencial varia com ao longo da pá.

Então, conhecendo a curva do aerofólio utilizado, determina-se o ângulo de operação para obter a maior relação entre as forças de sustentação e arrasto.

Para definir o perfil da pá será utilizado o método apresentado por Jack Park no livro “The Wind Power Book”. Apesar de não ser tão rigoroso quanto a outros presentes na referência bibliográfica, é preciso e detalhado.

O primeiro passo é determinar a TSR ou Tip-Speed Ratio, que é a razão entre a velocidade linear na ponta da pá do rotor e a velocidade do vento livre incidente nas pás. Ou seja, quanto maior o TSR maior a rotação do rotor. Isso será importante pois define uma série de fatores ligados ao perfil. Aerogeradores de pequeno porte trabalham com essa relação baixa, portanto maiores velocidades de rotação.

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V}$$

$$\lambda = 7,8 \Rightarrow N_{eixo} = 540rpm = 56,5rad / s$$

Pelo TSR consegue-se a solidez da pá que é a percentagem de área ocupada pá na área do rotor e conseqüentemente o número de pás ideal para a turbina em questão.

$$\begin{aligned} \text{Solidez} &= 3\% \\ N^{\circ} \text{ pás} &= 2 \end{aligned} \Rightarrow \text{Gráfico TSRxSolidity e tabela TSR vs } N^{\circ} \text{ de pás no anexo 2}$$

O perfil aerodinâmico foi retirado da bibliografia por uma comparação de uma série de perfis NACA pela razão entre os coeficientes de sustentação e arrasto. Foi definida a série 4415 que apresenta as seguintes características obtidas nos gráficos no anexo 2:

Série	Graus	Cl	Cd	L/d
4415	6	1,05	0,0085	123,53

Tabela 6.1 – Angulo ótimo de ataque (maior relação L/D)

A largura da pá (corda) e o ângulo de ataque variam ao longo do seu comprimento para obter uma maior eficiência. Assim, será feita a divisão da pá em 4 partes e determinado o TSR para cada uma delas para definirmos a largura das seções

e o ângulo de ataque pra cada uma delas. A tabela abaixo demonstra essas divisões e a suas respectivas razões de velocidade (SR-speed ratio):

	Raio (m)	SR
1	0	-
2	0,27	1,80
3	0,55	3,59
4	0,82	5,39
5	1,10	7,18

Tabela 6.2 – Seções e SRs respectivos

De posse dos SRs de cada seção, é levantado de gráficos (anexo 2) o ângulo do vento e o parâmetro de forma para cada uma delas:

	Raio (m)	Ângulo de vento	Parâmetro de forma
1	0	-	-
2	0,27	20	1,40
3	0,55	10	0,45
4	0,82	7	0,20
5	1,10	5	0,08

Tabela 6.3 – Seções e ângulo de vento e parâmetro de forma respectivos

Foi calculado, então, o comprimento da corda pela seguinte equação, expresso na tabela 6.4:

$$c = \frac{R \cdot PF}{C_l \cdot N}$$

R = raio na seção da pá (m)

PF = parâmetro de forma

$C_l$  = coeficiente de sustentação

N = número de pás

	Raio (m)	Comprimento da corda (m)
1	0	-
2	0,27	0,177
3	0,55	0,118
4	0,82	0,078
5	1,10	0,042
Corda média		0,10

Tabela 6.4 – Seções e comprimento de corda respectivos

Para otimizar a relação L/D é necessário ajuste no ângulo de ataque . O ângulo corrigido fica:

$$a_c = a_0 + \frac{C_l}{0,11} \cdot \left(1 + \frac{3}{AR}\right)$$

Onde:

$a_c$  = ângulo corrigido

$a_0$  = ângulo onde  $C_l=0 \Rightarrow a_0 = -2,1^\circ$  – do gráfico do perfil

$C_l$  = coeficiente referente ao L/D máx do perfil 4415

$AR$  = aspect ratio, comprimento da pá dividido pela corda média

Dá-se que  $a_c = 10,2^\circ$ .

Assim, com o ângulo corrigido e os ângulos de vento de cada seção, calculam-se os ângulos dos perfis:

$$a_{\text{perfil}} = a_{\text{vento}} - a_c$$

	Raio (m)	Ângulo dos perfis (graus)
1	0	-
2	0,27	10
3	0,55	0
4	0,82	-3
5	1,10	-5

Tabela 6.5 – Seções e ângulos de perfil respectivos

### 7.3. Dimensionamento da transmissão multiplicadora de velocidades

Para alcançar a velocidade de rotação do gerador, é necessário elevar a rotação do eixo de entrada. Para isso será dimensionado um sistema de polias e correias dado a potência nominal ser baixa.

#### 7.3.1. Tipo de correia

Pelo catálogo da Bosch, é recomendado que se utilize correias trapezoidais do tipo 3V. É considerado também que a correia está sob serviço normal, caracterizado pelas seguintes características:

- Arranque inicial ou as sobrecargas momentâneas nunca excedem de 150% da carga normal;
- Serviço contínuo (6 a 16 horas por dia)

#### 7.3.2. Polias e distância entre centros

Primeiramente,, foi considerado um diâmetro da polia menor de 3,0", seguindo recomendação do catálogo da Bosch. Sendo a relação de transmissão igual a 3,24, a polia maior tem diâmetro de 9,7". Sabe-se então, que a mínima distância entre centros deve ser:  $\frac{3,0 + 9,7}{2} = 6,4''$ .

Considerando uma distância entre centros 8,0", é possível encontrar o comprimento da correia, através da relação:

$$L = 2 \cdot C + 1,57 \cdot (D + d) + \frac{(D - d)^2}{4 \cdot C} = 37,4''$$

Comparando este valor com o catálogo de correias, observa-se que o valor mais próximo do calculado é 37,5", do tipo 3V-375.

Então, é necessário recalcular a distância entre centros, conforme a relação:

$$C = \frac{b + \sqrt{(b^2 - 32 \cdot e)}}{16} = 8,08'' = 205mm \quad \text{onde,} \quad b = 4 \cdot L_{cor} - 6,28(D + d) \quad \text{e}$$

$$e = (D - d)^2$$

### 7.3.3. Número de correias

Para saber quantas correias são necessárias para o projeto, é necessário calcular a potência por correia. Para isto, primeiramente calcula-se a velocidade da correia, em pés por minuto:

$$V = d \cdot rpm \cdot 0,262 = 3,0 \cdot 540 \cdot 0,262 = 424,4 \text{ ppm}$$

Da tabela do catálogo da Goodyear, vê-se que a capacidade, por correia, é, interpolando para a velocidade encontrada, de 1,4 HP. Porém, este valor é para um ângulo de abraçamento de 180°, e por isso é necessário utilizar um fator de correção, que pode ser encontrado no mesmo catálogo.

O ângulo de abraçamento é:

$$\theta = 180 - \frac{60 \cdot (D - d)}{C} = 130^\circ$$

Para este ângulo, o fator a ser utilizado é de 0,79.

Então, a potência por correia, para o ângulo de abraçamento em questão é:  
 $1,4 \cdot 0,79 = 1,10 \text{ HP}$  .

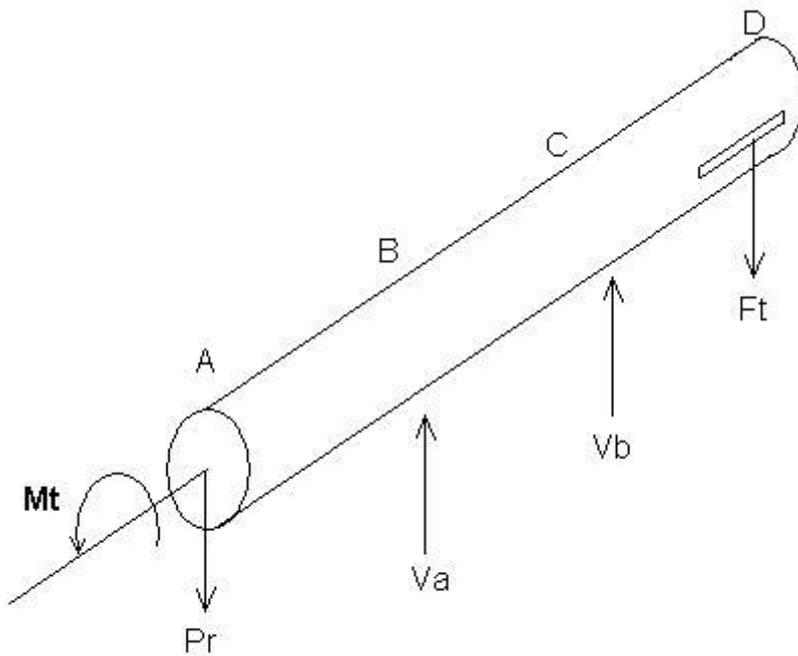
O número de correias necessárias é, então:

$$N = \frac{0,54}{1,10} = 0,5$$

Utilizam-se então 1 correia.

## 7.4. Dimensionamento do Eixo do rotor

### 7.4.1. Calculo dos esforços



Os esforços solicitantes serão maiores quando a chave se encontra na posição indicada na figura, pois contribuirá pros esforços nos mancais (B e C). Assim:

$$P_r + V_A + V_B + F_t = 0$$

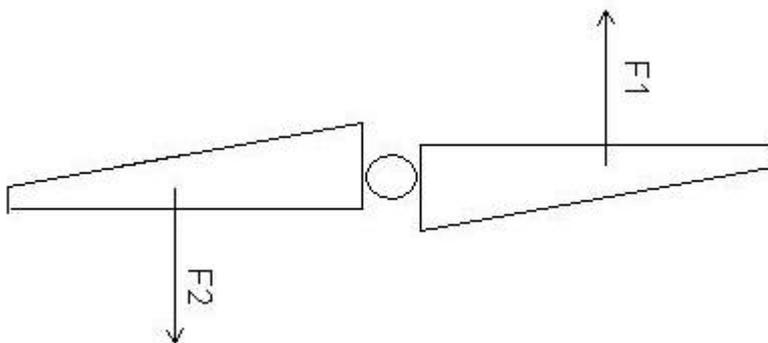
$$P_r \cdot \overline{AC} - V_A \cdot \overline{BC} - F_t \cdot \overline{DC} = 0$$

onde:

$P_r$  é o peso do rotor

$F_t$  é a força tangencial

As forças na pá estão na figura abaixo:



Onde:

$F_1 = F_2 \Rightarrow$  ou seja, as forças não aparecem no somatório de esforços

A força tangencial ( $F_t$ ) é a resultante do torque aplicado no eixo na chaveta,

portanto:

$$M_t = \frac{Pot}{\omega} = 5,3Nm$$

Onde :

$$Pot = 350W$$

$$\omega = 53,0rad / s$$

Ado tan do :

$$r_{polia} = 38,1mm$$

$$F_t = \frac{M_t}{r_{polia}} = 141N$$

Os esforços nos mancais serão:

Verticais	Va =	(94,43) N
	Vb =	255,50 N

Esforços Verticais

Momento Fletor

$$\overline{DC} \Rightarrow 0 \geq x \geq 0,05$$

$$M_f(x) = P_r \cdot x$$

$$\overline{CB} \Rightarrow 0 \geq x \geq 0,05$$

$$M_f(x) = P_r \cdot 0,2 + P_r \cdot x + V_a \cdot x$$

$$\overline{BA} \Rightarrow 0 \geq x \geq 0,07$$

$$M_f(x) = P_r \cdot 0,4 + P_r \cdot x + V_a \cdot 0,2 + V_b \cdot x$$

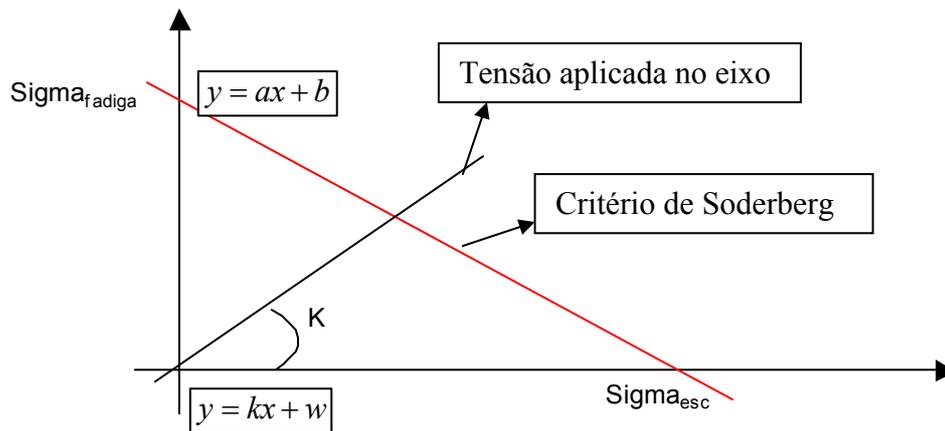
O momento fletor máximo será no ponto C com  $M_f = 7,0Nm$

Momento Torsor

$$\overline{ABCD} \Rightarrow 0 \geq x \geq 0,17$$

$$M_t = 5,3N$$

#### 7.4.2. Calculo para determinar o diâmetro do eixo (Soderberg)



O material do eixo a ser utilizado será o aço 1020 com as seguintes tensões:

- $s_e = 360\text{Mpa}$
- $s_u = 430\text{Mpa}$

O ponto crítico é onde a tensão alternada e máxima, ou seja, onde o momento fletor é máximo. Pelo gráfico acima, o ponto de intersecção é o ponto cujas tensões no eixo estarão adequadas para trabalhar em regime sem falhar por fadiga.

A reta  $y=kx+w$  representa as tensões no eixo dado diversos diâmetros. Já a reta  $y=ax+b$  é o limite considerado pelo critério de escolhido. Assim, o diâmetro será determinado no ponto de intersecção das retas.

Onde:

$$y = kx + w$$

$$(0,0) \Rightarrow w = 0$$

$$(\sigma_{eq_a}, \sigma_{eq_m}) \Rightarrow k = \frac{\sigma_{eq_a}}{\sigma_{eq_m}}$$

$$\sigma_{eq_a} = \sqrt{\sigma_a^2 + 3 \cdot \tau_a^2} \Rightarrow \tau_a = 0; \sigma_a = \frac{32 \cdot M_f}{\pi \cdot d_1^3}$$

$$\tau_{eq_m} = \sqrt{\sigma_m^2 + 3 \cdot \tau_m^2} \Rightarrow \sigma_m = 0; \tau_m = \frac{16 \cdot M_t}{\pi \cdot d_1^3}$$

$$k = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{M_f}{M_t}$$

$$k = 1,53$$

Para determinarmos a reta  $y=ax+b$  é necessário antes definirmos a tensão de fadiga e a tensão de escoamento.

Critério de Von Mises para material dúctil, estado plano de tensões:

$$\sigma_{esc} = \frac{S_{esc}}{\sqrt{3}} = 207,85MPa$$

$$\sigma_f = \frac{\sigma_{fad}}{\sqrt{3}}$$

Critério de fadiga

$$\sigma_{fadiga} = \frac{S_u}{2} \cdot \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{k}$$

$$\varepsilon_1 = 0,9 \Rightarrow a\sigma 1020$$

$$\varepsilon_2 = 0,95 \Rightarrow a\sigma 1020$$

$$k = 1 + (Kt - 1) \cdot q$$

$$q = 1$$

$$Kt = 1,4$$

$$\sigma_f = \frac{\sigma_{fad}}{\sqrt{3}} = 96,50MPa$$

A reta considerando o critério de Soderberg fica:

$$y = ax + b$$

$$(\sigma_{fad}, 0) \Rightarrow b = \sigma_{fad}$$

$$(0, \sigma_{esc}) \Rightarrow a = -\frac{\sigma_{fad}}{\sigma_{esc}}$$

$$a = -0,46$$

$$b = 96,80MPa$$

Fazendo a intersecção:

$$I : y = ax + b \Rightarrow \sigma_a^- = -\frac{\sigma_{fad}}{\sigma_{esc}} \cdot \tau_m^- + \sigma_{fad}$$

$$II : y = kx + w \Rightarrow \sigma_{eq_a} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{M_f}{M_t} \cdot \tau_{eq_m}$$

$$I \cap II \Rightarrow \sigma_a^- = \sigma_{eq_a}; \tau_m^- = \tau_{eq_m}$$

$$\tau_{eq_m} = \frac{\sigma_{fad}}{\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{M_f}{M_t} + \frac{\sigma_{fad}}{\sigma_{esc}}}$$

$$\tau_{eq_m} = 48,13MPa$$

$$\sigma_{eq_m} = 74,75MPa$$

Para determinar o diâmetro:

$$d_m = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M_t}{\sqrt{3} \cdot \pi \cdot \tau_{eq_m}}}$$

$$d_a = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_f}{\pi \cdot \sigma_{eq_a}}}$$

$$d_{\min} = 9,9mm$$

Portanto o diâmetro mínimo do eixo deverá ser 10mm.

## 7.5. Seleção dos rolamentos

Os rolamentos a serem adotados serão o de esferas, pré-selecionados a partir da tabela de seleção do tipo do rolamento no anexo 3 por terem excelente desempenho para aplicações de alta velocidade, baixo atrito e alta precisão de giro.

Para definir o modelo, será calculada a capacidade de carga que os rolamentos em questão terão que ter para suportar os esforços que serão submetidos. Assim, é necessário encontrar a carga dinâmica equivalente, dada por:

$$C = P \cdot \left( \frac{L_{10h} \cdot 60 \cdot N}{10^6} \right)^p, \text{ onde:}$$

$P$  é a carga dinâmica equivalente;

$L_{10h}$  é a vida nominal, em horas de trabalho;

$N$  é a rotação do mancal, em rpm;

$p$  é o expoente da fórmula de vida, sendo  $p = 1/3$ , para rolamentos de esferas e  $p = 3/10$  para rolamentos de rolos.

A partir disso, o rolamento pode ser escolhido em um catálogo de fabricante, neste caso o da NSK.

### **Vida do rolamento (em horas)**

O rolamento deve trabalhar sob o seguinte regime:

- 20 anos
- 360 dias por ano
- 10 horas/dia

$$\therefore L_{10h} = 72000 \text{ horas}$$

#### **- Carga dinâmica no mancal A**

A carga dinâmica equivalente é a resultante dos esforços calculados no diagrama de esforços presentes no dimensionamento do eixo.

$$P_a = 1.022N$$

$$C_a = 13.562N \Rightarrow \text{rolamento NSK NU1005} - 25\text{mm de diâmetro}$$

#### **- Carga dinâmica no mancal B**

A carga dinâmica equivalente é a resultante dos esforços calculados no diagrama de esforços presentes no dimensionamento do eixo.

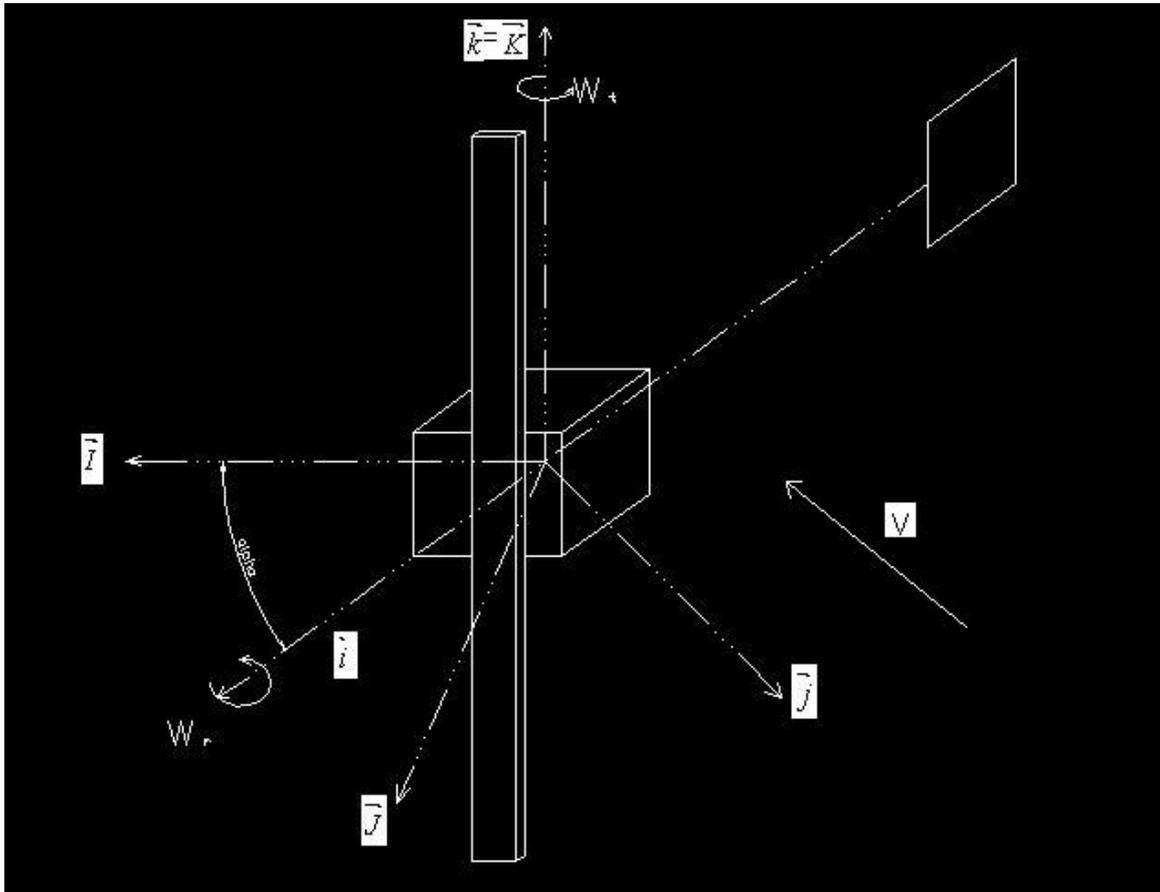
$$P_b = 2.291N$$

$$C_b = 30.386N \Rightarrow \text{rolamento NSK NU2304 EM} - 20\text{mm de diâmetro}$$

## **7.6. Seleção do gerador**

A seleção do gerador foi feita com base em alternadores de carro devido a potência ser baixa, inferior aos geradores de catálogo consultados. Assim, através da curva característica de um alternador Bosch K1 - 14V-23A (anexo 3) foi definido a gerador.

## 7.7. Comprimento do braço do estabilizador



O estabilizador deverá rotacionar a turbina na direção de modo a posicionar o rotor na direção do vento. Foi simplificada a estrutura do equipamento afim de facilitar os cálculos. Além disso, só serão consideradas as forças atuando na lateral da turbina, ou seja, o instante que o vento incide perpendicular a projeção lateral do aerogerador.

Será aplicado o teorema do momento angular (TMA), onde:

$$\dot{\vec{K}}_G = M^{ext}$$

Onde:

$$\dot{\vec{K}}_G = \frac{d}{dt} (\vec{K}_{G \text{ rotor}} + \vec{K}_{G \text{ corpo}} + \vec{K}_{G \text{ estabilizador}})$$

$$M^{ext} = M_{estabilizador} + M_{corpo} + M_{rotor}$$

Serão consideradas as forças de arrasto como forças externas atuantes devido ao escoamento do ar sobre a turbina e que geram um momento fazendo com que a turbina fique na direção do vento. Será admitido que o corpo esta com o seu centro no eixo de rotação e é simétrico. Disso ocorre momento igual a zero, pois as forças de arrasto se igualam. Assim:

$$D = 0,5 \cdot C_d \cdot A \cdot \rho \cdot V^2$$

$$\text{Com } Re = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

Onde:

$C_d \Rightarrow$  coeficiente de arrasto, varia com o Re

$A \Rightarrow$  área projetada na direção perpendicular do vento

$\rho \Rightarrow$  densidade do ar

$V \Rightarrow$  velocidade do vento

$\nu \Rightarrow$  viscosidade do ar

Assim, foram calculadas as forças que estão na tabela abaixo, lembrando que houve uma simplificação da atuação do vento no equipamento e dos componentes. A velocidade do vento foi admitida em 3m/s.

$$D_{pá} = 0,12N$$

$$C_d = 0,1$$

e

$$D_{estabilizador} = 0,22N \Rightarrow \text{admitindo uma placa com } 0,04m^2$$

$$C_d = 1$$

O momento externo fica:

$M^{ext} = 0,22 \cdot \text{braço} + 0,04 \Rightarrow$  Onde braço é distancia do estabilizador ao centro de rotação

As velocidades angulares serão:

$$\text{Rotor} \Rightarrow \vec{\omega}_r = \omega_r \dot{i} + \omega_T \vec{k} = \omega_r \cos \theta \vec{I} + \omega_r \sin \theta \vec{J} + \omega_T \vec{K}$$

$$\text{Estabilizador} \Rightarrow \vec{\omega}_{est} = \omega_T \vec{k} = \omega_T \vec{K}$$

$$\text{Corpo} \Rightarrow \vec{\omega}_c = \omega_T \vec{k} = \omega_T \vec{K}$$

Seus momentos angulares serão:

$$\vec{K}_r = J_{x_r} \omega_r \cos \theta \vec{I} + J_{y_r} \omega_r \sin \theta \vec{J} + J_{z_r} \omega_T \vec{K}$$

$$\vec{K}_{est} = J_z \omega_T \vec{K}$$

$$\vec{K}_c = J_z \omega_T \vec{K}$$

Derivando os momentos angulares para aplicar o TMA:

$$\dot{\vec{K}}_G = \frac{d}{dt} (\vec{K}_{G \text{ rotor}} + \vec{K}_{G \text{ corpo}} + \vec{K}_{G \text{ estabilizador}})$$

$$\dot{\vec{K}}_r = -J_{x_r} \omega_r \dot{\theta} \sin \theta \vec{I} - J_{x_r} \omega_r \omega_T \cos \theta \vec{J} + J_{y_r} \omega_r \dot{\theta} \cos \theta \vec{J} + J_{y_r} \omega_r \omega_T \sin \theta \vec{I} + J_{z_r} \dot{\omega}_T \vec{K}$$

$$\dot{\vec{K}}_{est} = J_{z_{est}} \dot{\omega}_T \vec{K}$$

$$\dot{\vec{K}}_c = J_{z_c} \dot{\omega}_T \vec{K}$$

$\dot{\vec{K}}_G = M^{ext} \vec{K} \Rightarrow$  segundo as condições estabelecidas, o momento externo só se dará no plano de rotação do sistema, coordenada  $\vec{K}$ . Portanto:

$$(0,22 \cdot \text{braço} + 0,04) \vec{K} = J_{z_r} \dot{\omega}_T \vec{K} + J_{z_{est}} \dot{\omega}_T \vec{K} + J_{z_c} \dot{\omega}_T \vec{K}$$

Para os momentos de inercia serão tomadas as formas mais simples como visto na figura 6.9.

$$J_{z_r} = 0,443 \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_{z_{est}} = 0,008 + 0,336 \cdot \text{braço}^2$$

$$J_{z_c} = 0,467 \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

Considerando uma aceleração angular de  $10^0/s$  ou  $\frac{\pi}{18}rad/s$  o braço deverá ter 0,483m.

## 8. CUSTOS

O objetivo deste trabalho é oferecer um equipamento de baixo custo para suprir as necessidades de famílias em regiões em que a rede elétrica não se encontra. Assim, para mostrar-se atrativo, foi estabelecido a incorporação de componentes dispostos no mercado, no caso o gerador e o multiplicador de velocidades. Isso é vantajoso sobre dois aspectos, focar na fabricação de componentes específicos, pá e eixo, e ter acesso fácil a peças para manutenção. Além disso, simplificar a construção é necessário uma vez que a utilização do aerogerador esta prevista para ocorrer em regiões isoladas. A tabela abaixo relaciona os componentes aos seus custos.

Item	Qtd	Preço	Valor
Rolamento	2	R\$ 60,00	R\$ 120,00
Multiplicador de velocidades	1	R\$ 200,00	R\$ 200,00
Sistema de freio	1	R\$ 200,00	R\$ 200,00
Eixo	1	R\$ 350,00	R\$ 350,00
Pás	2	R\$ 100,00	R\$ 200,00
Alternador	1	R\$ 600,00	R\$ 600,00
Estrutura*	1	R\$ 300,00	R\$ 300,00
Estabilizador	1	R\$ 100,00	R\$ 100,00
Outros**	-	R\$ 150,00	R\$ 150,00
Total			R\$ 2.220,00

Tabela 6.6 – Custo dos componentes

\*é a caixa onde o multiplicador e o alternador ficam alojados. Isso é uma estimativa dado que é necessário obter um bruto, usinar e retificar o assento dos mancais, do multiplicador e do alternador e nas saídas do eixo e do braço do estabilizador.

\*\*Outros diz respeito a porcas, parafuso, vedadores e afins para a montagem do eixo

É importante ressaltar que não esta incluso valores referentes a montagem do equipamento, comercialização e distribuição.

## 9. CONCLUSÃO

Primeiramente, o potencial eólico brasileiro contabilizado mostra abundância energética que é pouco explorado. Energia essa limpa e renovável. Além disso, permite obter sistemas autônomos que, dado a disposição do vento, têm “combustível” infinito. Ou seja, os deslocamentos das massas de ar no território nacional são fontes de energia que podem beneficiar comunidades isoladas nos pontos com bom regime de ventos. Assim, pode ser mais uma alternativa à universalização da oferta de energia. Hoje, porém, não esta presente no programa federal “Luz para Todos”. Isso dificulta a busca por incentivos. Ainda que haja interesse em promover a expansão dessa geração pelo PROINFA, os projetos de grande porte (fazendas eólicas com turbinas de grande porte) têm preferência no destino dos recursos, ou seja, seria necessária a revisão das políticas adotadas para tornar interessantes os projetos mais simples que visam atingir a população diretamente (sem intermediários de concessionárias, distribuidoras e comercializadoras de energia).

Outro ponto a ser discutido é o custo de turbinas que convertem a energia do vento em energia elétrica. Ainda que seja um custo alto por kilowatt gerado, o modelo de geração se torna interessante pelo ponto de vista socioambiental. Não há grandes impactos ambientais e, os aerogeradores, podem trabalhar de forma autônoma atingindo comunidades isoladas que não são comercialmente viáveis para estender a rede elétrica convencional.

A proposta em montar um gerador eólico de pequeno porte selecionando componentes presentes no mercado teve o intuito de reduzir os custos, pois os componentes são normais de produção e, portanto, seus custos diluiriam devido ao volume de produção. Os valores de cada componentes listados na tabela 6.6 indicam um total menor que o preço da turbina Enersud Notus 138 presente na análise de custos, sem incluir valores de montagem, distribuição e comercialização. É bom ressaltar que com ganho de escala e produzindo maiores volumes haveria diminuição dos custos de componentes do equipamento em estudo.

Quanto ao projeto da turbina, foram utilizados métodos de dimensionamento e seleção simplificados pois o objetivo é identificar a oportunidade presente no cenário brasileiro para a introdução do objeto de estudo, o aerogerador.

O estudo da aerodinâmica mostrou-se interessante pelo número de fatores que afetam a operação e como a otimização das pás altera toda estrutura do fluxo de transformação de energia. Ainda, não foram considerados alguns tópicos como vibração induzida na pá e acústica que poderiam ser realizados em um estudo mais aprofundado.

A parte estrutural da pá não foi detalhada. Foram detalhados somente o perfil e a dimensão dela. Assim, é mais um tópico para detalhamento em um trabalho futuro visto que tem que ter baixa inércia, resistência à fadiga e alta durabilidade.

Houve dificuldades em encontrar um gerador que gerasse a energia proposta. Não foram encontrados geradores comerciais disponíveis no mercado nacional que atendesse as especificações de projeto, então, foi admitido a substituição por um alternador de carro. Isso gerou outro problema, não estão disponíveis as curvas características desses para avaliar a geração pela rotação de entrada. Somente a partir de um manual da Bosch é que foi designado o alternador selecionado. O interessante é o baixo custo deste item em detrimento de geradores específicos para aerogeradores (importados).

Portanto, o projeto se mostra interessante demandando um aprofundamento para estabelecer o volume necessário para obter um custo que seja atrativo. Além disso, elaborar um custeio de manutenção e operação. Outro ponto que poderia ser discutido é a parceria com fornecedores no estabelecimento da cadeia produtiva com objetivo de reduzir o valor para a comercialização do equipamento.

## 10. BIBLIOGRAFIA

ELETROBRÁS – CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro** CEPEL, Brasília, 2001

GIACAGLIA, G. E. **Mecânica Geral** 10<sup>a</sup> Edição, Rio de Janeiro, Ed. Campus, 1982

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentals of Machine Component Design** John Wiley & Sons, 1991

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained** London, Wiley, 2006

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos Vol.2** 2<sup>a</sup> Edição, São Paulo, Ed. Edgar Blucher Ltda, 1997

PARK, J. **The Wind Power Book** Chesire, Palo Alto, California, 1981

ROBERTO BOSCH DO BRASIL **Alternadores e Reguladores de Tensão para Autoveículos**

SAMPY, M. U.; ROCHA, M. M. **Aplicações de Turbinas Eólicas como Fonte Alternativa de Geração de Energia Elétrica em Agroindústria** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998

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

TOLMASQUIM, M. T. (ORGANIZADOR) **Fontes Renováveis de Energia no Brasil** CENERGIA, Rio de Janeiro, 2003

TORRES, H. **Projeto de um Gerador Eólico para Uso Residencial** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004

ZILLES, R.; MORANTE, F.; MOCELIN, A. **Projeto Piloto de Implantação de Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares Atendendo a Resolução Normativa ANEEL Nº 83/2004** Instituto de Eletrotécnica e Energia - Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos - Universidade de São Paulo, 15p São Paulo, 2007

AEROSPACEWEB

<http://www.aerospaceweb.org/question/airfoils/q0041.shtml>

ANEEL

<http://www.aneel.gov.br/>

BOSCH

<http://www.bosch.com.br/content/language1/html/index.htm>

DOKCAR

<http://www.dokcar.com.br/>

ENERSUD

<http://www.enersud.com.br/produtos.asp>

EÓLICA RIO

<http://eolicario.com.br/precos.htm>

HARTRONIC

[http://www.hartronic.com.br/src/meanwell/inversor\\_mw.html?gclid=CPOP2dCU1IwCFQ8nSgodTXBIWw](http://www.hartronic.com.br/src/meanwell/inversor_mw.html?gclid=CPOP2dCU1IwCFQ8nSgodTXBIWw)

MACOPEMA

<http://www.macopema.com.br/>

PEA - USP

<http://www.pea.usp.br/enerq/raconamento/pagina6.htm>

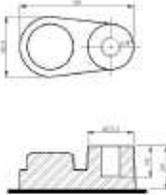
STEELPIPE

<http://www.steelpipe.com.br/>

TUDOR

<http://www.tbr.locaweb.com.br/tudor/produtos/estacionaria.htm>

# ANEXO 1

<b>Tudor</b>		INDUSTRIAS TUDOR DE BATERIAS																							
		SP : Rua Jose Pinelli, 2-130 - Dist. Industrial II - CEP 17039-741 - Baurac/SP - Fone 0800-135530 MG: Rua Dois, 240 - Distrito Industrial - CEP 35040-600 - Gov. Valadares/MG - Fone 0800-331480																							
FICHA TECNICA DO PRODUTO - 12TE150		TE-006 / 00																							
																									
<table border="1"> <tr> <td><b>Tensão nominal:</b></td> <td></td> <td>12 V</td> </tr> <tr> <td rowspan="3"><b>Capacidade (até 1,75V/cel@25 C)</b></td> <td>10h</td> <td>138 Ah</td> </tr> <tr> <td>20h</td> <td>150 Ah</td> </tr> <tr> <td>100h</td> <td>165 Ah</td> </tr> <tr> <td><b>Peso (Aproximado):</b></td> <td></td> <td>46 Kg</td> </tr> <tr> <td><b>Comprimento:</b></td> <td></td> <td>510 mm</td> </tr> <tr> <td><b>Largura:</b></td> <td></td> <td>215 mm</td> </tr> <tr> <td><b>Altura (inclui terminal):</b></td> <td></td> <td>248 mm</td> </tr> </table>		<b>Tensão nominal:</b>		12 V	<b>Capacidade (até 1,75V/cel@25 C)</b>	10h	138 Ah	20h	150 Ah	100h	165 Ah	<b>Peso (Aproximado):</b>		46 Kg	<b>Comprimento:</b>		510 mm	<b>Largura:</b>		215 mm	<b>Altura (inclui terminal):</b>		248 mm		
<b>Tensão nominal:</b>		12 V																							
<b>Capacidade (até 1,75V/cel@25 C)</b>	10h	138 Ah																							
	20h	150 Ah																							
	100h	165 Ah																							
<b>Peso (Aproximado):</b>		46 Kg																							
<b>Comprimento:</b>		510 mm																							
<b>Largura:</b>		215 mm																							
<b>Altura (inclui terminal):</b>		248 mm																							
Esquema de Montagem 12V																									
																									
Terminal																									
																									



CERTIFICADO ISO-9001

## INVERSOR DC-AC 600 Watt ONDA SENOIDAL MODIFICADA A301/302-600



DISTRIBUIDOR AUTORIZADO



600Watt

- Entrada 12Vdc ou 24Vdc
- Tolerância de entrada: -15% ~ +25%
- Saída 110Vac (regulação +/-10%)
- Onda de saída: ONDA SENOIDAL MODIFICADA
- Controle: microprocessador
- Proteção: alarme bateria baixa / desligar na bateria baixa / sobre temperatura / sobre tensão / sobre carga / curto circuito da saída / erro de polarização da entrada
- Certificações: CE e e13
- Garantia: 1 ano

MODELOS		A301-600-B2	A301-600-F3	A302-600-B2	A302-600-F3
ENTRADA	Tensão de entrada VDC	12Vdc		24Vdc	
	Tolerância de entrada	10 - 15Vdc		20 - 30Vdc	
	Consumo da entrada sem carga	0,5A	0,8A	0,36A	0,38A
	Consumo da entrada com carga	90A		30A	
	Eficiência (típica)	82%		86%	
	Conector da entrada	1 x Cabo bateria		1 x Cabo bateria	
SAÍDA	Fusível (lamina), interno	3 x 26A (branco)		2 x 20A (amarelo)	
	Tensão de saída VAC	110V	220V	110V	220V
	Potência contínua de saída	600W			
	Potência de pico	1200W			
	Forma onda de saída	Onda senoidal modificada			
	Frequência	60Hz +/- 1%			
PROTEÇÃO	Regulação de saída	+/- 10%			
	Tomadas VAC	2 x padrão NEMA	1 x padrão SCHUKO	2 x padrão NEMA	1 x padrão SCHUKO
	Indicador de saída (LED)	Verde (ligado) / Vermelho (falha)			
	Alarme bateria baixa	10 +/- 0,5V		20,5 +/- 1V	
	Desligar bateria baixa	9,5 +/- 0,5V		19,5 +/- 1V	
	Sobre tensão	16 - 17V		30 - 32V	
AMBIENTE	Sobre temperatura	60°C (+/-5°C)			
	Saída em curto	Desligar			
	Erro de polaridade da bateria	Protegido pelo fusível (no plug de algarro / no cabo)			
	Temperatura de operação	0-+30°C oi carga 100%, 40°C oi carga 60%			
	Umidade de operação	20% -80% Umidade relativa sem condensação			
	Coefficiente de temperatura	+/- 0,06% / °C (0-60°C)			
SEGURANÇA	Umidade de armazen	-30-+70°C, 10-95% Umidade relativa			
	Resistência de isolamento	IP-O/P: 100M Ohms min./500Vdc			
	Radiação Interf. Eletro Magnético	Conforme norma EN66022 classe B, 72/246/CEE, 96/64/CE			
	Imunidade de descarga El. Estática	Conforme norma EN61000-4-2,3 (norma sobre imunidade de descarga Eletro Estática)			
	LVD	Conforme norma EN60950 (norma sobre segurança de equipamentos de baixa tensão)			
	MTBF	200K hrs min. MIL-HDBK-217F (25°C)			
OUTROS	Dimensões / Peso	210 x 173 x 85mm (LxAxP) / 2,10Kg			
	Acessórios	fusíveis de reserva			
	Ventilação	Ventilador, ligado na >50% carga			
	Aplicação	Veja anexo abaixo			

### HARTRONIC AUTOMAÇÃO LTDA.

RUA CAMPEVAS, 191 - PERDIZES - CEP 05016-010 SÃO PAULO - SP  
TEL / FAX: (11) 3872 1669 E-mail: hartronic@hartronic.com.br

[www.hartronic.com.br](http://www.hartronic.com.br)

## LINHA NOTUS

250W- 350W



A Linha NOTUS da Enersud foi desenvolvida para suprir pequenas necessidades de energia, mas apesar das baixas potências (250w e 350w) também contam com o sofisticado sistema controle de velocidade por controle de passo, que garantem a máxima SEGURANÇA e BAIXO

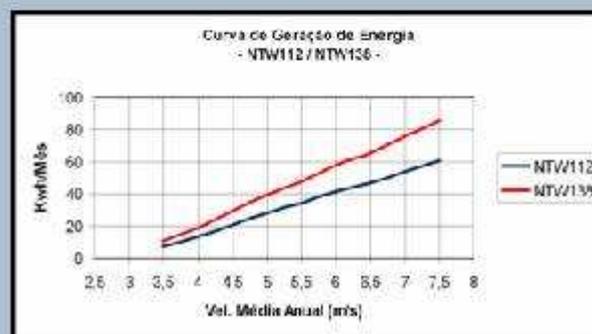
### NÍVEL DE RUÍDO.

A Linha NOTUS é de fácil instalação e utilizadas principalmente para aplicações como:

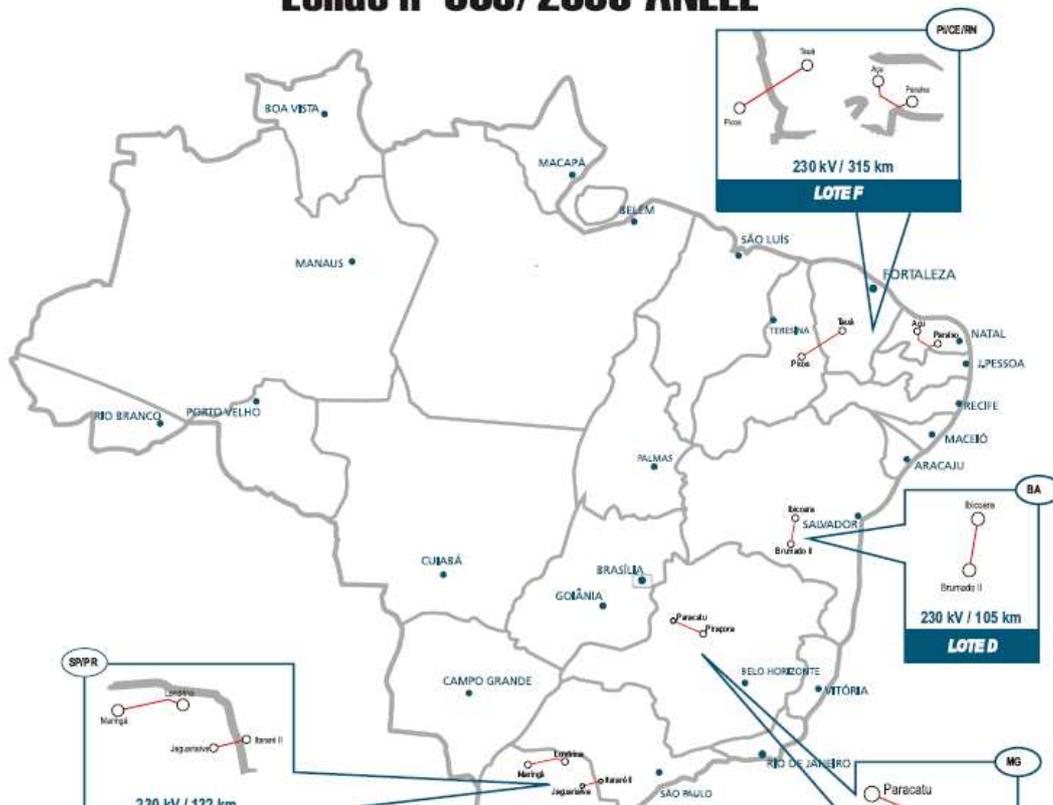
- Veleiros
- Telecomunicações
- Iluminação
- TV
- Pequenos eletrodomésticos.

### Dados técnicos:

	NOTUS112	NOTUS138
Diâmetro	1,12	1,38
Potência a 12,5m/s (Watt)	250w	350w
Início de Rotação	2,2 m/s	2,2 m/s
Início de Geração	3 m/s	3 m/s
Rpm a 12,5 m/s	1100	1000
Nº de Pás	3	3
Material das Pás	Fibra de Vidro	
Controle de Velocidade	Active Stall	
Proteção p/ altas Velocidade	Controle de Passo	
Sistema Magnético	Neodímio	
Sistema Elétrico	Retificação On Board	
Tensão de Saída	12 / 24 volts	
Topologia	Fluxo Axial	
Peso Total	9,5 Kg	10 Kg
Proteção Anti-Oxidante	Sim	Sim



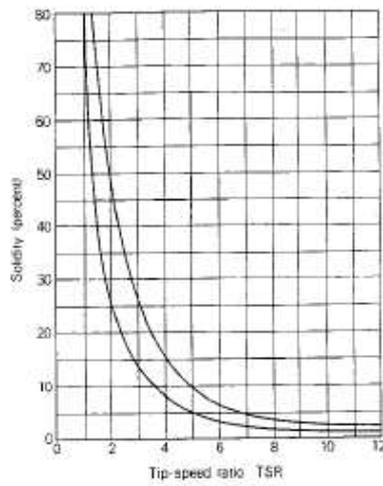
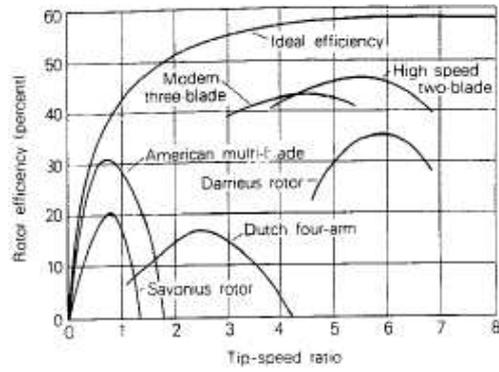
# Linhas de Transmissão Leilão nº 003/2006-ANEEL



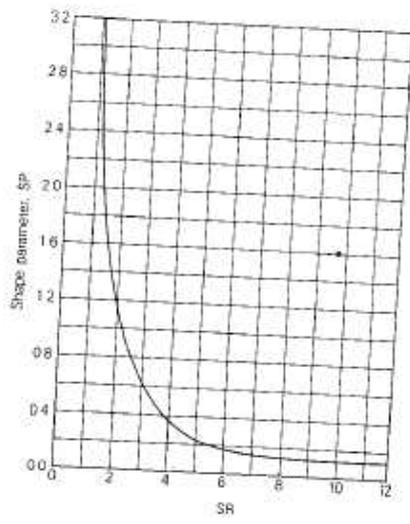
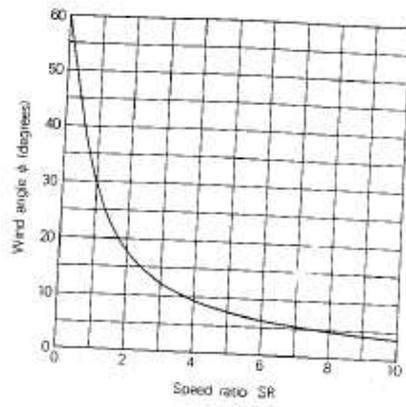
# Linhas de Transmissão Leilão nº 005/2006-ANEEL

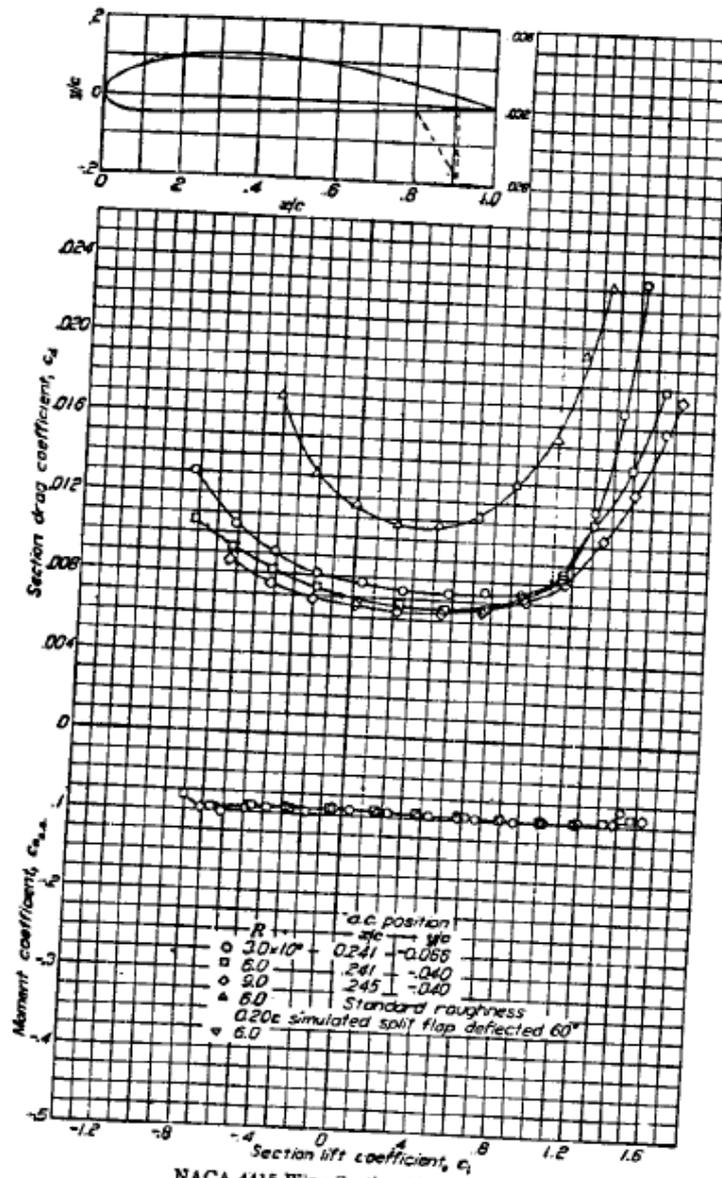


## ANEXO 2

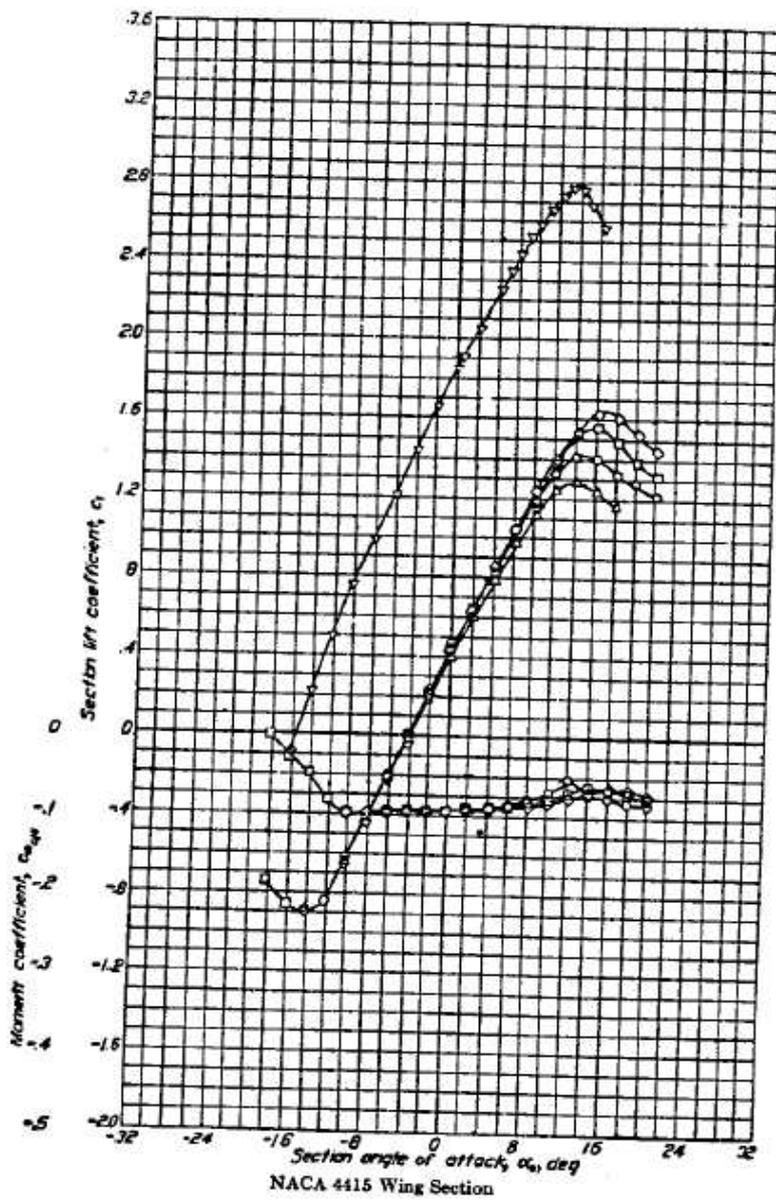


BLADE NUMBER VS. TSR	
Tip-Speed Ratio	Number of Blades
1	6-20
2	4-12
3	3-8
4	3-5
5-8	2-4
8-15	1-2





NACA 4415 Wing Section (Continued)



ANEXO 3

REDUTORES E MOTOREDUTORES A ENGRENAGENS HELICOIDAIS	SELEÇÃO DE REDUTORES CLASSIFICAÇÃO DE CARGAS		H MH
<b>TABELA 1</b>			
U = CARGA UNIFORME		M = CHOQUES MODERADOS      F = CHOQUES FORTES	
APLICAÇÃO	CLASSIFI- CAÇÃO	APLICAÇÃO	CLASSIFI- CAÇÃO
<b>MISTURADORES</b>		<b>DESTILARIAS</b>	
Líquidos puros	U	Cozinhadores - serviço contínuo	U
Líquidos e sólidos	M	Tachos de fermentação - serviço contínuo	U
Líquidos de densidade variável	M	Misturadores	U
<b>ALIMENTADORES</b>		<b>DRAGAS</b>	
Alimentadores de rosca	M	Guinchos, transportadores e bombas	M
Transportadores (esteira e correia)	M	Cabeçotes rotativos e peneiras	F
<b>MOINHADEIRAS</b>		<b>EIXOS DE TRANSMISSÃO</b>	
Metal	M	Carga uniforme	U
Papel	U	Carga pesada	M
Têxtil	M	<b>ELEVADORES</b>	
<b>BOMBAS</b>		Caçambas - cargas uniformes	U
Centrífugas	U	Caçambas - cargas pesadas	F
Dupla ação, multicilíndricas	M	Elevadores de carga	M
Recíprocas de descarga livre	M	Elevadores de canecas	M
Rotativas a engrenagem	U	<b>ENGARRAFADORAS E ENLATADORAS</b>	
<b>MOLHURAS DE BORRACHA E PLÁSTICOS</b>			
Calandras *	M	<b>FORNOS ROTATIVOS</b>	M
Equipamentos de laboratório	M	<b>GERADORES</b>	U
Extrusoras	M	<b>GUINCHOS</b>	
Moinhos cilíndricos *		Cargas uniformes	M
Dois em linha	M	Cargas pesadas	F
Três em linha	U	<b>INDÚSTRIAS AÇUCAREIRAS</b>	
Refinadores *	M	Moendas	F
Trituradores e misturadores *	F	Facas de cana *	M
<b>MÓDULOS</b>		<b>INDÚSTRIAS ALIMENTÍCIAS</b>	
Pedras e minérios	F	Cozinhadores de cereais	U
<b>REFRIGERAÇÃO</b>		Misturadores de massa, moedores de carne, picadores	M
Extrusoras e misturadores	M	<b>INDÚSTRIAS MADEIREIRAS</b>	
Prensas de tijolos e ladrilhos	F	Alimentadores de plaina	M
<b>TRITURAMENTO</b>		Serras, tambores despolpadores, transportadores de toras	F
Britadores de mandíbulas	F	<b>INDÚSTRIAS METALÚRGICAS</b>	
Moinhos rotativos *	M	Cortadores de chapa rotativos	M
Moinhos de bolas e rolos *	F	Cortadores de chapa de faca	F
<b>CLASSIFICADORES ROTATIVOS</b>	M	Viradeiras	F
<b>COMPRESSORES</b>		Trefilas	M
Centrífugos	U		
Multicilíndricos	M		
Unicilíndricos	F		

APLICAR FATOR DE SERVIÇO CORRESPONDENTE A TEMPO DE TRABALHO ACIMA DE 10 HORAS/DIA

<b>REDUTORES E MOTOREDUTORES A ENGENRAGENS HELICOIDAIS</b>	<b>SELEÇÃO DE REDUTORES CLASSIFICAÇÃO DE CARGAS FATORES DE SERVIÇO</b>	<b>H MH</b>
--	--	-----------------

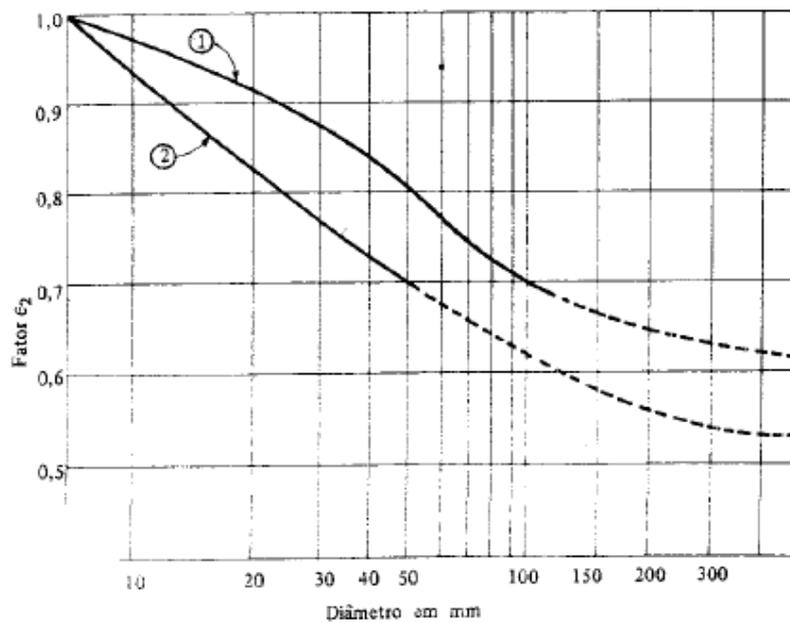
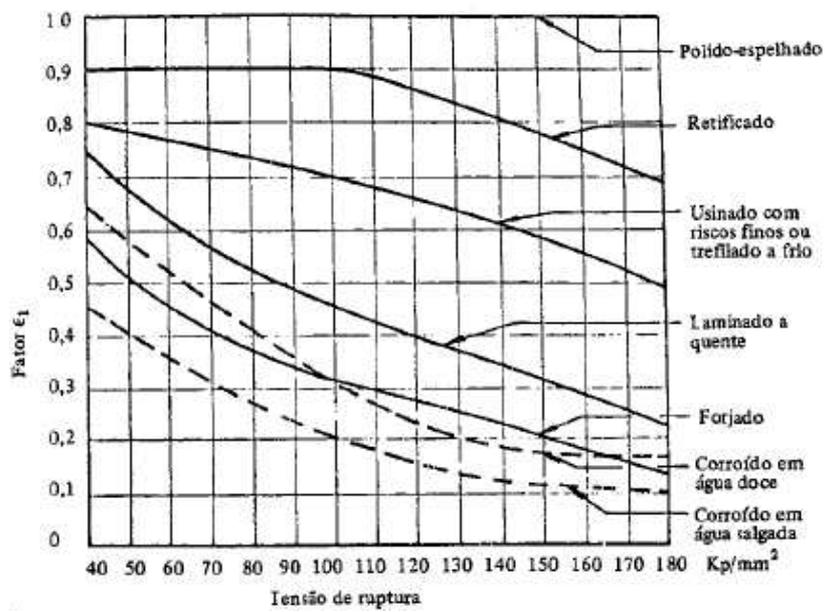
**TABELA 1** (continuação)

APLICAÇÃO	CLASSIFICAÇÃO	APLICAÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
<b>INDÚSTRIAS TEXTEIS</b> Calandras, cardas, filatórios, retorcedeiras, maçaroqueiras e máquinas de tinturaria	M	<b>PAPEL</b> Esticadores de feltro Prensas Secadores	M U M
<b>MAQUINAS OPERATRIZES</b> Acionamento principal cargas pesadas cargas uniformes Acionamento auxiliar Prensas Rosqueadoras	F M U F F	<b>PONTES ROLANTES</b> Acionamento do carro e da ponte Acionamento do guincho	F U
<b>MISTURADORES</b> Betoneiras Borracha * Polpa de papel	M F M	<b>SANEAMENTO</b> Aeradores Alimentadores, bombas, decantadores Filtros, mexedores e peneiras Clarificadores	F U M U
<b>MOINHOS ROTATIVOS</b> De bolas e rolos De martelos	F F	<b>SECADORES E RESFRIADORES ROTATIVOS</b>	M
<b>PAPEL</b> Agitadores (misturadores) Alvejadores Batedores e despulpadores Calandras Super calandras Cilindros Descascadores Hidráulicos e mecânicos Tambores descascadores	M U M M F U M F	<b>TORRES DE REFRIGERAÇÃO</b>	F
		<b>TRANSPORTADORES</b> Caçamba, correia, corrente, esteira, rosca: cargas uniformes cargas pesadas e intermitentes vibratórios	U M F
		<b>VENTILADORES</b> Centrifugos Outros	U M

\* APLICAR FATOR DE SERVIÇO CORRESPONDENTE A TEMPO DE TRABALHO ACIMA DE 10 HORAS/DIA

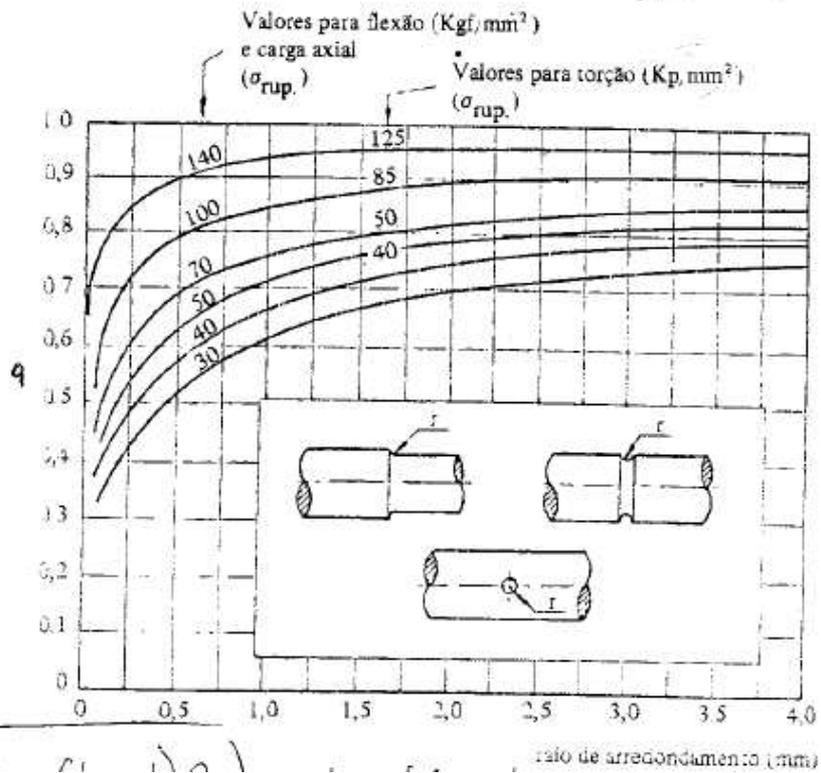
**TABELA 2 - FATORES DE SERVIÇO**

Acionamento por	Tempo de Trabalho	Classificação de cargas		
		Uniforme U	Choques moderados M	Choques fortes F
Motor Elétrico ou Turbina a Vapor	Intermitente, 3 h/dia	0,80	1,00	1,50
	Até e incluindo 10 h/dia	1,00	1,25	1,75
	Acima de 10 h/dia	1,25	1,50	2,00
Motor a Explosão Multicilíndrico ou Motor Hidráulico	Intermitente 3 h/dia	1,00	1,25	1,75
	Até e incluindo 10 h/dia	1,25	1,50	2,00
	Acima de 10 h/dia	1,50	1,75	2,25
Motor a Explosão Monocilíndrico	Intermitente, 3 h/dia	1,25	1,50	2,00
	Até e incluindo 10 h/dia	1,50	1,75	2,25
	Acima de 10 h/dia	1,75	2,00	2,50



- 1) Aço com tratamento térmico
- 2) Aço sem tratamento térmico

ÍNDICE DE SENSIBILIDADE DO MATERIAL

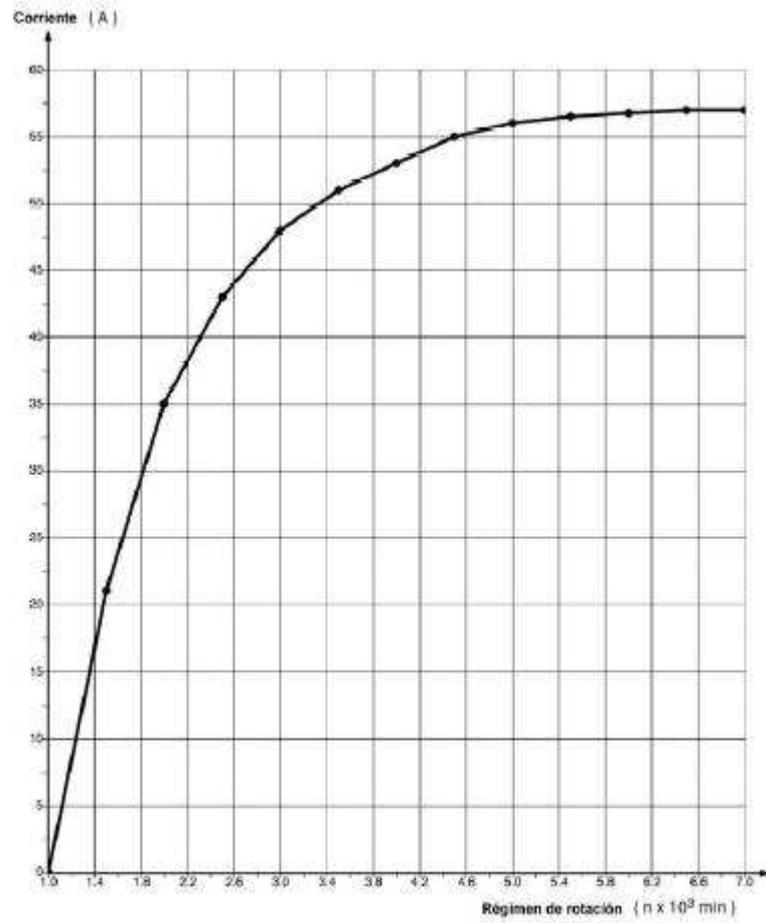


Seleção do tipo de rolamento

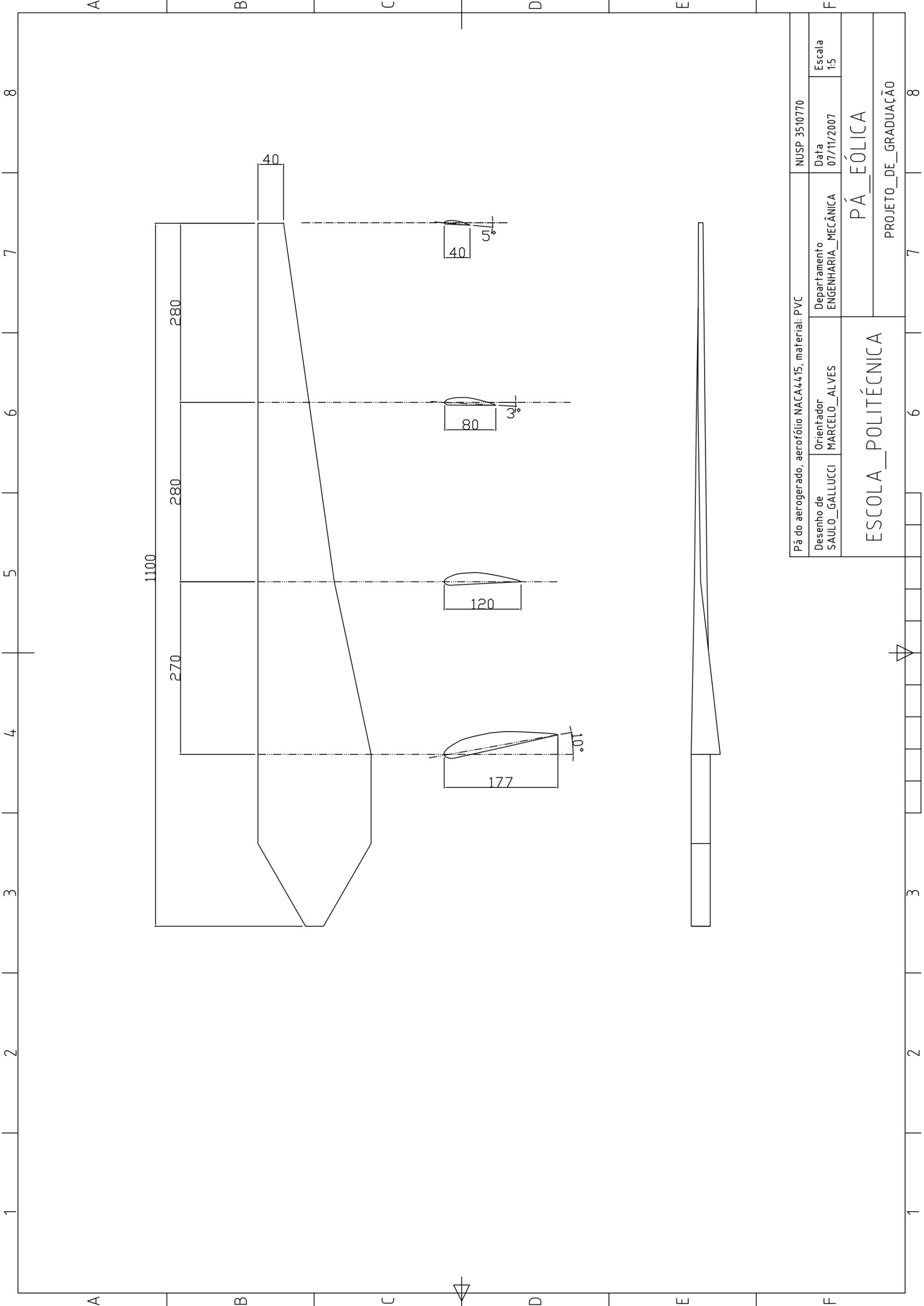
Esta matriz é apenas um guia orientativo, sendo que em cada caso individual deve-se fazer uma seleção mais criteriosa, levando em conta as informações e informações contidas nas páginas precedentes ou as informações que estejam existentes nos textos que antecedem, bem como as informações que se encontram no presente documento. Não se recomenda a utilização desta matriz para a seleção de rolamentos sem a leitura das informações relevantes lá indicadas pela mesma letra utilizada para identificar a construção.

Símbolos:   
 - - - inexistente   
 + um serviço   
 ++ ambos os sentidos   
 \* regular

Tipo de rolamento	Tipos de rolamentos - construções e características																		
	Construção				Características														
	luro cônico	placas de proteção ou de vedação	auto-alinhante	não separável	separável	carga puramente radial	carga puramente axial	carga combinada	carga excêntrica	alta velocidade	alta precisão de giro	alta rigidez	funcionamento silencioso	baixo atrito	compensação de desalinhamentos em operação	compensação de erros de alinhamento (trilca)	arranjos com rolamentos bloqueados	arranjos com rolamentos livres	deslocamento axial possível no rolamento
Rollamentos rígidos de esferas	BB					-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-
Rollamentos autoalinhantes de esferas	BB					-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-
Rollamentos de esferas de contato angular (dispostos em O)	BB					-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-
Rollamentos de esferas de contato angular de contato angular cilíndrico	BB					-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-
Rollamentos de rolos cilíndricos com o mesmo número de rolos	BB					-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-
Rollamentos de rolos cilíndricos com o mesmo número de rolos	BB					-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-
Rollamentos de esferas	BB					-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-
Rollamentos autoalinhantes de rolos cônicos (dispostos em X)	BB					-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-
Rollamentos axiais de esferas	BB					-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-
Rollamentos axiais de rolos cilíndricos	BB					-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-
Rollamentos axiais de rolos cônicos	BB					-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-
Rollamentos axiais de rolos cilíndricos	BB					-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-
Rollamentos axiais de rolos cônicos	BB					-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-
Rollamentos axiais auto-compensadores de rolos	BB					-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-

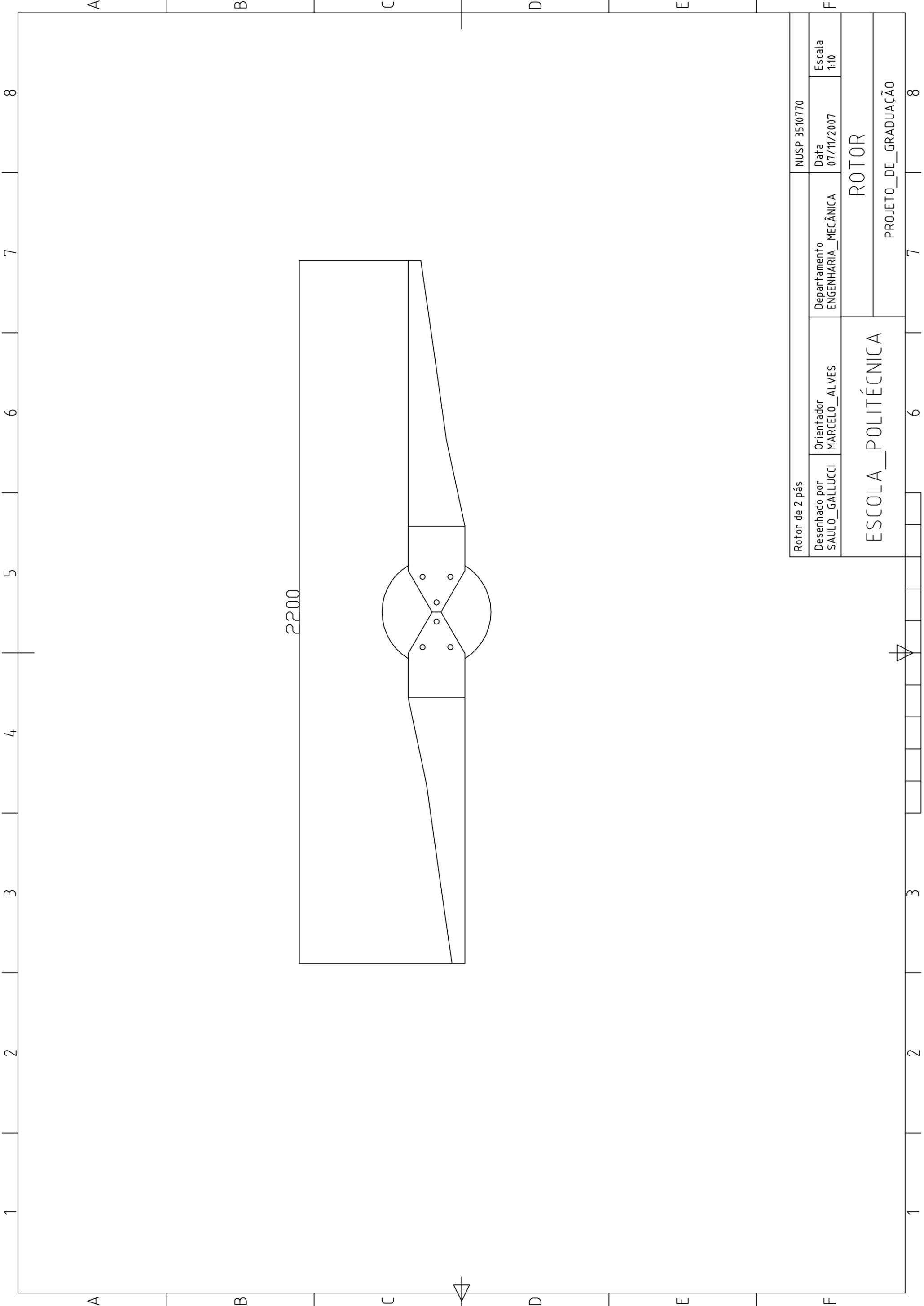


Curva característica de suministro para el alternador BOSCH K1-14V-23/55A



Pá do aerogerador, aerofólio NACA4415, material: PVC		NUSP 3510770	
Desenho de SAULO_GALLUCCI	Orientador MARCELO_ALVES	Departamento ENGENHARIA_MECÂNICA	Data 07/11/2007
ESCOLA_POLITÉCNICA		Escala 1:5	
PÁ_EÓLICA		PROJETO_DE_GRADUAÇÃO	

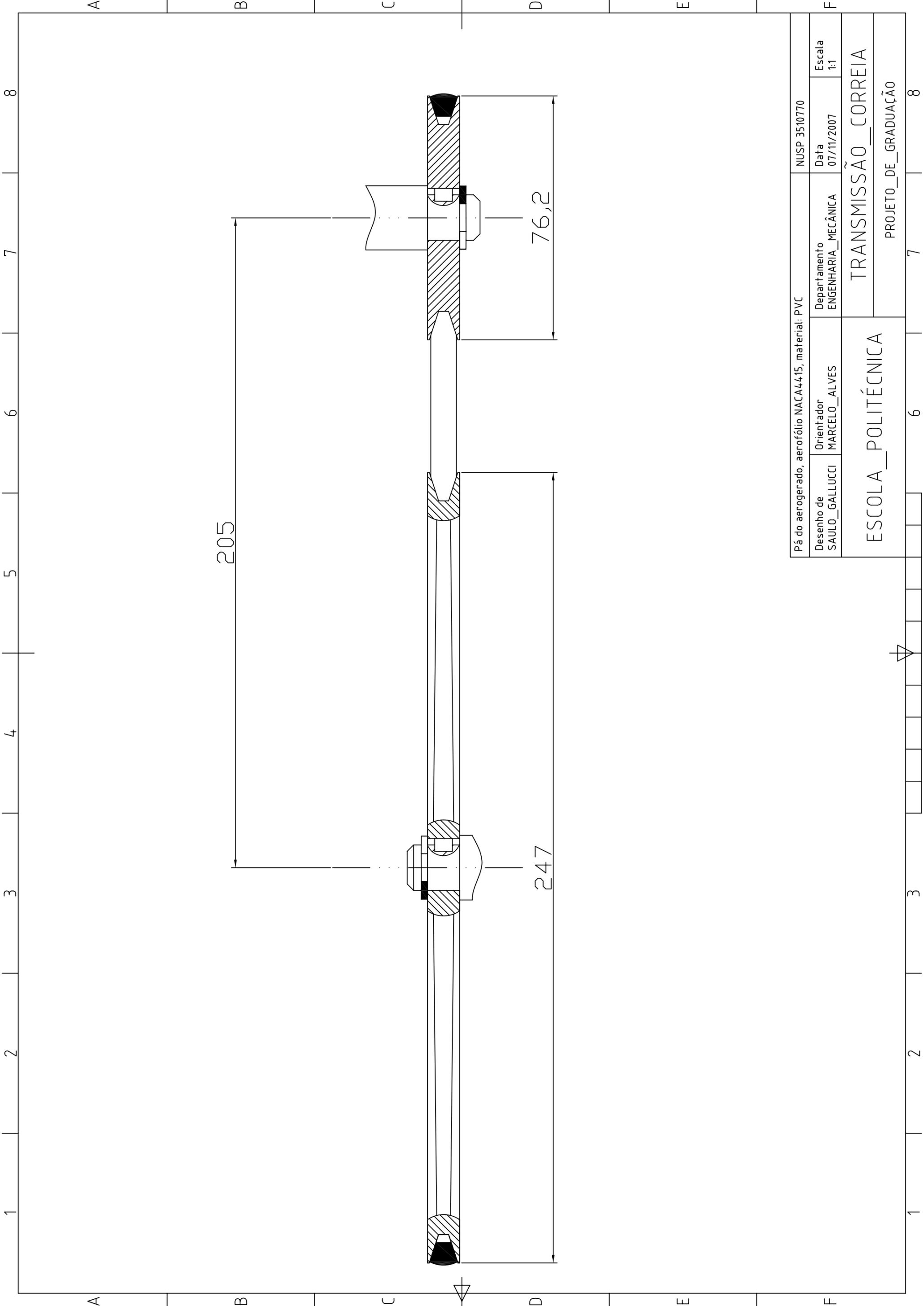




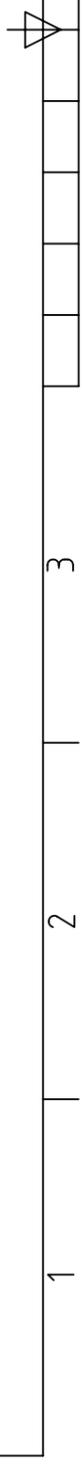
2200

Rotor de 2 pás		NUSP 3510770	
Desenhado por SAULO_GALLUCCI	Orientador MARCELO_ALVES	Departamento ENGENHARIA_MECÂNICA	Data 07/11/2007
ESCOLA_POLITÉCNICA		Escala 1:10	
PROJETO_DE_GRADUAÇÃO		ROTOR	

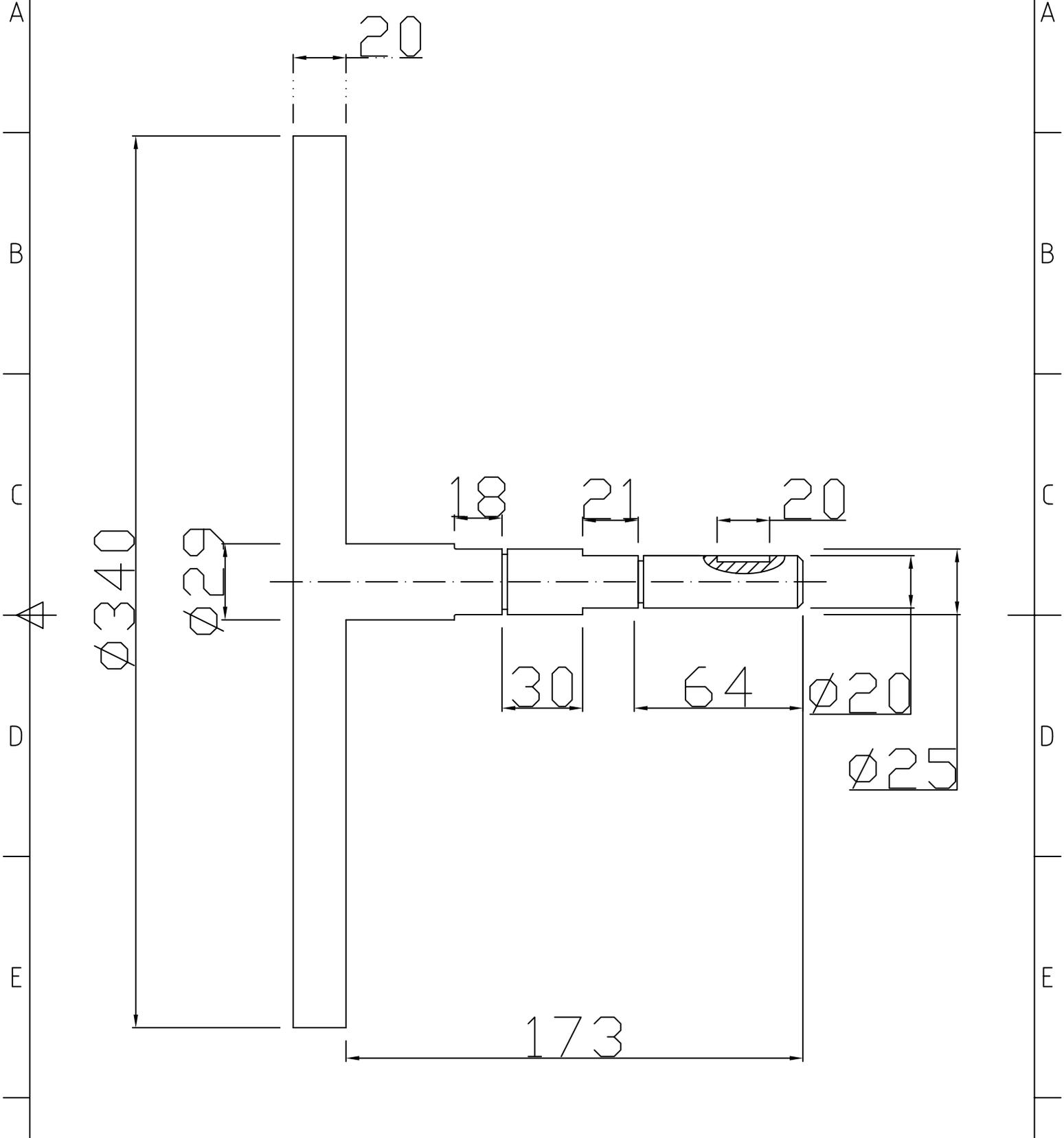




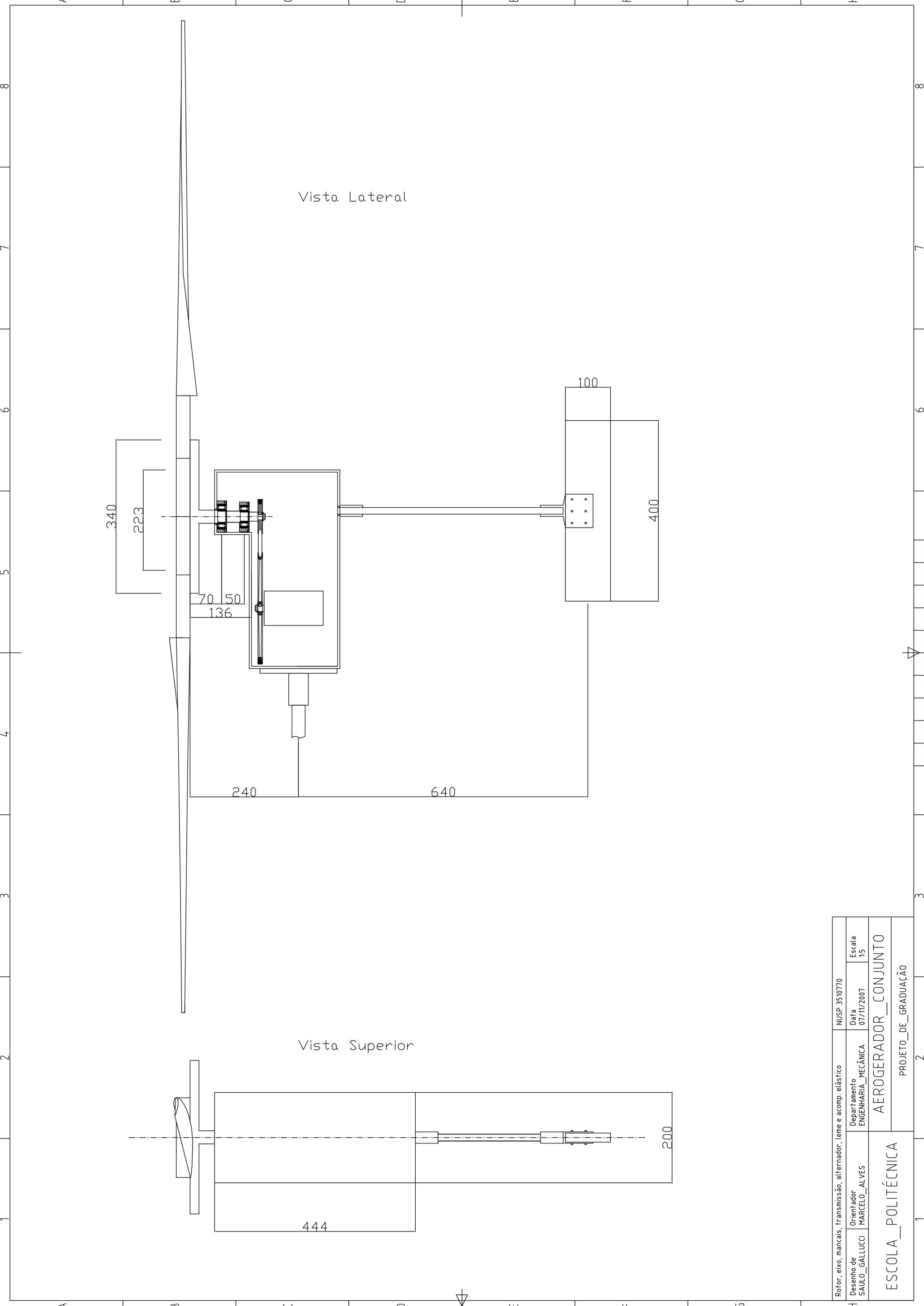
Pá do aerogerador, aerofólio NACA4415, material: PVC		NUSP 3510770	
Desenho de SAULO_GALLUCCI	Orientador MARCELO_ALVES	Departamento ENGENHARIA_MECÂNICA	Data 07/11/2007
ESCOLA_POLITÉCNICA		Escala 1:1	
TRANSMISSÃO_CORREIA		PROJETO_DE_GRADUAÇÃO	



1	2	3	4
RevNo	Revision note	Date	Signature
			Checked



Rotor, eixo, mancais, multiplicador de velocidades, alternador		NUSP 3510770	
Desenho de SAULO_GALLUCCI	Orientador MARCELO_ALVES	Departamento ENGENHARIA_MECÂNICA	Data 07/11/2007
ESCOLA_POLITÉCNICA		EIXO	
		PROJETO_DE_GRADUAÇÃO	



Rotor, eixo, mancais, transmissão, alternador, leme e acomp. elástico		NUSP 3510770	
Desenho de SAULO_GALLUCCI	Orientador MARCELO_ALVES	Departamento ENGENHARIA_MECÂNICA	Data 07/11/2007
ESCOLA_POLITÉCNICA		Escala 1:5	
AEROGERADOR_CONJUNTO		PROJETO_DE_GRADUAÇÃO	