

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA**  
**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**LAURO MAZZA DE LIMA**  
**LUCIANO PINHEIRO CIRILO**  
**MAURICIO FIALHO JACOB**

**PROJETO DE UM AEROGERADOR**

**VOLTA REDONDA**

**2018**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA**  
**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PROJETO DE UM AEROGERADOR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do UniFOA como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Alunos:

Lauro Mazza de Lima

Luciano Pinheiro Cirilo

Mauricio Fialho Jacob

Orientador:

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

**VOLTA REDONDA**

**2018**

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

Alunos:

Lauro Mazza de Lima

Luciano Pinheiro Cirilo

Mauricio Fialho Jacob

## **PROJETO DE UM AEROGERADOR**

Orientador:

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

Banca Examinadora

---

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

---

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

---

Prof. Esp. Antônio de Pádua Sobreira Leal

## DEDICATÓRIA

A Deus por ter me dado saúde e força para alcançar os meus objetivos.

Aos meus mestres que contribuíram de forma significativa para que eu conquistasse essa vitória.

Em especial aos meus pais, minha família, minha namorada e meus amigos pelos constantes incentivos ao longo dessa caminhada.

Lauro Mazza de Lima

Primeiramente a Deus, que sempre foi o autor da minha vida e do meu destino. O meu maior apoio nos momentos difíceis.

Aos meus pais, minha irmã e minha namorada por todo amor e carinho que recebi durante a elaboração desse trabalho, e por acreditarem no meu potencial.

Aos meus orientadores e professores que fizeram parte de toda minha jornada no curso de Engenharia Mecânica.

Aos meus amigos e colegas, que me incentivaram todos os dias e ofereceram apoio nos momentos críticos.

Luciano Pinheiro Cirilo

À minha mãe Maria de Fátima Fialho.

Maurício Fialho Jacob

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por nossa vida, família e amigos.

Aos nossos pais e irmãos, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Às nossas esposas e namoradas por sempre nos apoiar e entender a nossa ausência nessa odisseia do TCC.

À UniFOA, seu corpo docente, direção e administração pela oportunidade e confiança no nosso trabalho;

Ao professor Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira pela orientação, apoio, confiança, correções e incentivos no pouco tempo que lhe coube.

Ao professor Antônio de Pádua Sobreira Leal pela minuciosa revisão e pelas dicas valiosas.

A todos os professores que nos proporcionaram o conhecimento e preparo não só para o desenvolvimento deste trabalho, mas também por todo o auxílio nesse grande processo de formação profissional.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da nossa formação, o nosso muito obrigado.

## EPÍGRAFE

"De todas as forças da natureza, creio que o vento possui a maior quantidade de poder"

Abraham Lincoln

## RESUMO

Atualmente, a energia eólica é, sem dúvida, a energia renovável mais promissora e que possui a melhor relação custo-benefício para exploração. O presente trabalho tem como objetivo a utilização de uma metodologia simples para obtenção de um projeto de um aerogerador, passando por todas as fases deste processo: obtenção do potencial eólico do local, escolha da tecnologia, análise de viabilidade econômica e dimensionamento dos principais componentes mecânicos do equipamento, abrangendo desde de toda a complexidade aerodinâmica para o dimensionamento do rotor até a análise estrutural de sua torre de sustentação. O produto final deste trabalho é o projeto básico mecânico de um aerogerador de médio porte capaz de atender a demanda energética de uma fazenda no nordeste do Brasil no estado da arte.

**Palavras Chave:** Energia eólica. Fontes alternativas. Energia renovável. Aerogerador.

## **ABSTRACT**

Nowadays, wind energy is undoubtedly the most promising renewable energy and has the best cost-benefit ratio for exploration. This present paper has the objective of using a simple methodology to obtain a wind turbine project, going through all phases of this process: obtaining the local wind potential, choosing the technology, economic viability analysis and dimensioning of the main mechanical components of the equipment, encompassing from all aerodynamic complexity of the rotor dimensioning to the structural analysis of its lift tower. The final product of this work is the basic mechanical design of a medium-sized wind turbine capable of meeting the energetic demand of a farm in Northeast of Brazil in the state-of-the-art.

**Keywords:** Wind energy. Alternative sources. Renewable energy. Wind turbine.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 História e Utilizações da Energia Eólica .....	13
1.2 Energia Eólica no Brasil e no Mundo.....	15
1.3 Justificativa do Trabalho .....	17
1.4 Objetivo do Trabalho.....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
2.1 O Recurso Eólico.....	19
2.1.1 Mecanismo de geração dos ventos .....	19
2.1.2 Fatores que influenciam o regime dos ventos .....	21
2.1.3 Potência do vento.....	23
2.1.4 Obtenção de dados de velocidade dos ventos.....	24
2.2 A Turbina Eólica .....	27
2.2.1 Conversão de energia.....	27
2.2.2 Aplicações básicas .....	28
2.2.3 Classificação das turbinas eólicas.....	28
2.2.4 Componentes de um aerogerador de eixo horizontal .....	32
2.2.5 Manutenção dos aerogeradores .....	36
3 O PROJETO DO AEROGERADOR .....	39
3.1 Dados de Entrada do Projeto .....	42
3.2 Limite de Betz .....	43
3.3 Eficiência Real do Aerogerador .....	45
3.4 Análise de Viabilidade Econômica do Projeto .....	47
3.5 Dimensionamento das Pás .....	50
3.6 Dimensionamento do Cubo .....	61
3.7 Dimensionamento do Eixo de Baixa Rotação .....	64
3.8 Especificação dos Rolamentos, Mancais e Acoplamento .....	67
3.9 Especificação da Caixa Multiplicadora .....	69
3.10 Sistema de Frenagem.....	69
3.11 Especificação do Gerador.....	70
3.12 Dimensionamento do Suporte .....	71
3.13 Dimensionamento do Mecanismo de Direção.....	76
3.14 Dimensionamento da Torre .....	79

3.15 Carenagem de Proteção da Nacele.....	84
3.16 Acesso ao Aerogerador .....	86
4 CONCLUSÃO .....	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
APÊNDICE A - Desenho do aerogerador.....	93
APÊNDICE B - Vista isométrica, detalhes da pá, rolamento, freio, engrenagens e eixo.....	94
APÊNDICE C - Detalhes do cubo, suporte e da torre .....	95
APÊNDICE D - Acesso ao aerogerador .....	96

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Marcos do desenvolvimento da Energia Eólica entre os séculos XI e XIX [1].....	13
Figura 2: Aerogerador de Brunch [2] .....	14
Figura 3: Evolução dos aerogeradores de 1985 até 2010 [1] .....	15
Figura 4: Mapa do potencial eólico brasileiro [5] .....	16
Figura 5: Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar [5].....	19
Figura 6: Comportamento do vento sob a influência das características do terreno [5] .....	21
Figura 7: Cilindro de área transversal sob a ação do fluxo de ar [4].....	24
Figura 8: Princípio da conversão da energia cinética do vento em energia elétrica [4] .....	28
Figura 9: Modelos de turbinas de eixo vertical [4].....	29
Figura 10: Rotor de Savonius [4] .....	30
Figura 11: Incidência do vento em turbinas <i>upwind</i> e <i>downwind</i> [4].....	31
Figura 12: Componentes de um aerogerador de eixo horizontal [8] .....	32
Figura 13: Tipos de Cubos de rotor. (a) tri-cilíndrico; (b) esférico [9] .....	33
Figura 14: Esquema de um gerador multipolos para turbina eólica [10] .....	35
Figura 15: Arranjo típico de um servo motor para controle de posição da nacele [9] .....	35
Figura 16: Mapa de potencial eólico da região Nordeste do Brasil [5].....	39
Figura 17: Disposição básica dos componentes mecânicos de um aerogerador [12].....	40
Figura 18: Passos para um projeto de um sistema eólico. Adaptado de [12] .....	41
Figura 19: Esquema do fluxo de ar através da área de um disco [13].....	43
Figura 20: Configuração do aerogerador .....	46
Figura 21: Fluxo de caixa do projeto.....	48
Figura 22: Relação entre coeficiente de potência e TSR para diversos tipos de turbina [20] ..	51
Figura 23: Perfil NACA 4412 [24].....	52
Figura 24: Relação entre solidez e TSR [23].....	53
Figura 25: Direção do vento sobre a seção de uma pá [4].....	54
Figura 26: (a) $C_l$ em função de $\alpha$ ; (b) $C_d$ em função de $\alpha$ [24] .....	55
Figura 27: Processo de modelagem e simulação do rotor através do software QBlade .....	56
Figura 28: Perfil NACA 4418 [12].....	57
Figura 29: Diagramas dos esforços e momentos máximos nas pás [27] .....	59
Figura 30: Detalhamento da pá do aerogerador.....	61
Figura 31: Detalhamento do cubo .....	62
Figura 32: Cúpula frontal do cubo.....	63

Figura 33: Eixo de baixa rotação. Adaptado de [12] .....	64
Figura 34: Desenho básico do eixo de baixa rotação.....	67
Figura 35: Distribuição de cargas nos mancais e rolamentos .....	67
Figura 36: Caixa para rolamento SKN modelo SD 3036 [28].....	68
Figura 37: Acoplamento de engrenagens da Falk Lifelign [29] .....	68
Figura 38: Redutor/multiplicador Helimax monobloco do fabricante WEG Cestari [30].....	69
Figura 39: Freio magnético de segurança do fabricante Multmotores [31] .....	70
Figura 40: Linha de geradores assíncronos da linha Eólica Comunitária da ABB [32] .....	71
Figura 41: Distribuição dos componentes no suporte .....	71
Figura 42: Diagramas de esforços cortantes e momentos fletores no suporte .....	73
Figura 43: Quadro de perfis para suporte do aerogerador.....	74
Figura 44: Suporte do aerogerador finalizado.....	75
Figura 45: Dimensões básicas do suporte do aerogerador .....	75
Figura 46: Rolamento de giro com engrenagem externa do fabricante IMO [33].....	76
Figura 47: Esforços no rolamento de giro [33] .....	76
Figura 48: Controle de direção da nacelle através do motor de acionamento [34].....	77
Figura 49: Dados das engrenagens do rolamento de giro e do motor de posicionamento.....	79
Figura 50: Esforços atuantes na torre [12] .....	80
Figura 51: Esforços na torre.....	81
Figura 52: Desenho esquemático da carenagem .....	84
Figura 53: Detalhe básico do aerogerador contemplando os principais componentes .....	85
Figura 54: Desenho tridimensional do aerogerador .....	85
Figura 55: Detalhamento básico da escada tipo marinheiro, plataforma e guarda corpo .....	87

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Matriz elétrica brasileira em 2012 [4] .....	17
Tabela 2: Escala de Beaufort para estimativa da velocidade do vento [3] .....	25
Tabela 3: Valores médios da eficiência de conversão nos estágios do aerogerador [16].....	45
Tabela 4: Estimativa preliminar do custo do sistema eólico .....	47



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	American Society for Testing and Materials
BEM	Boundary Element Method
CFD	Computational Fluid Dynamics
CG	Centro de Gravidade
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
DMS	Direct Multi-bit Search
EOL	Central Geradora Eolielétrica
EWEA	European Wind Energy Association
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
IEC	International Electrotechnical Commission
ILL	Índice de Lucratividade Líquida
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NBR	Norma Brasileira
NH	Niederspannungs Hochleistungs
NR	Norma Regulamentadora
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
SAE	Society of Automotive Engineers
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TSR	Tip Speed Ratio
UFV	Usina Fotovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica de Energia
UTE	Usina Termelétrica de Energia
UTN	Usina Termonuclear
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
VPL	Valor Presente Líquido



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 História e Utilizações da Energia Eólica

Conforme avançava a agricultura, era cada vez mais necessário para o homem o uso de ferramentas que auxiliassem o trabalho. Tarefas como bombeamento d'água e moagem de grãos exigiam um árduo esforço braçal ou animal, que obrigou o homem a desenvolver uma forma rudimentar de moinho de vento para simplificar o beneficiamento dos produtos agrícolas. Consistia em um eixo vertical que, por sua vez, era acionado por uma haste e movida por animais ou mesmo homens caminhando em uma espécie de gaiola de formato circular. Depois este sistema foi aperfeiçoado através da utilização de cursos d'água como força motriz: as famosas rodas d'água. Historicamente, o uso destas rodas d'água precedem os moinhos de ventos por causa de sua concepção bem mais simplista. [1]

O primeiro registro histórico que mostra a aplicação da energia eólica na moagem de grãos e bombeamento d'água utilizando cata-ventos foi na Pérsia no ano 200 a.C. Acredita-se que ainda antes, China e Império Babilônico em 2000 a.C. e 1700 a.C., respectivamente, já haviam utilizado cata-ventos rudimentares para irrigação. A [Figura 1](#) mostra os marcos desse desenvolvimento entre os séculos XI e XIX. [1]

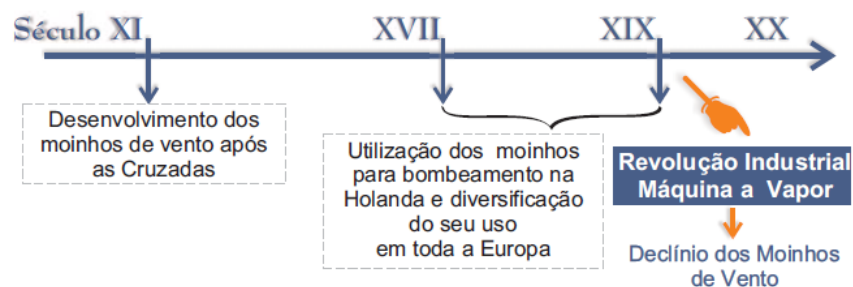


Figura 1: Marcos do desenvolvimento da Energia Eólica entre os séculos XI e XIX [1]

A introdução de cata-ventos na região da Europa ocorreu há 900 anos, no retorno das Cruzadas. As máquinas primitivas perduraram até o século XVII. Logo depois Holanda, França, Inglaterra começaram a usar moinhos de eixo horizontal. Esse modelo de moinho de eixo horizontal ficou conhecido como "moinho holandês" e foi rapidamente disseminado pela Europa. Um dos marcos mais importante para energia eólica dentro da Europa foi a Revolução Industrial, que ocorreu no final do Século XIX, assim como o advento da máquina a vapor contribui para o enfraquecimento do uso da energia proveniente dos ventos na Holanda. [1]

A utilização de turbinas eólicas de pequeno porte vinha sendo difundida pelos Estados Unidos no século XX, em áreas rurais enquanto a Rússia procurava investir em turbinas de portes médio ou grande conectados diretamente a rede. A adaptação de cata-ventos para a finalidade de gerar eletricidade iniciou-se no final do século XIX. Charles F. Brush, um empreendedor e inventor norte-americano, em 1888, ergueu o primeiro cata-vento que se destinava à geração de eletricidade, na cidade de Cleveland, Ohio. Tratava-se de um dispositivo cuja capacidade de fornecimento era de cerca de 12 kW em corrente contínua que carregavam baterias que eram destinadas ao armazenamento e fornecimento de eletricidade para 350 lâmpadas, o que seria um marco na geração de eletricidade utilizando como fonte a energia eólica. [1] Uma foto deste aerogerador pode ser vista na [Figura 2](#).

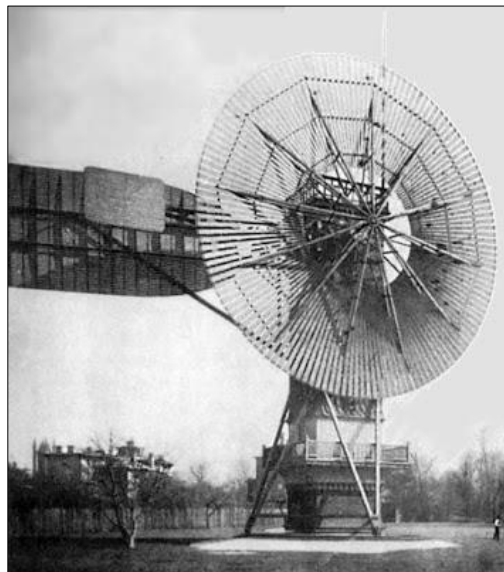


Figura 2: Aerogerador de Brush [2]

A Segunda Guerra Mundial foi um grande impulsionador para o desenvolvimento de turbinas ainda maiores, de médio e grande portes, por conta do empenho dos países em reduzir o uso de combustíveis fósseis. Desenvolvido pelos Estados Unidos, o Aerogerador Smith-Putnam era o maior aerogerador projetado até então, possuindo duas pás de aço, 53 m de diâmetro e 34 m de altura. Foi inaugurado em 1941 em Vermont, na colina de Grandpa's Knob. Após quatro anos de operação, uma de suas pás quebrou-se por fadiga. Após a Segunda Guerra Mundial, novamente tivemos uma abundância de combustíveis fósseis no cenário mundial o que acabaria com a viabilidade daquele aerogerador resultando assim no seu abandono. [1]

No cenário mundial, a tecnologia comercial de aerogeradores vem se desenvolvendo com muita força nos últimos anos. A Figura 3 mostra um gráfico que impressiona comparando tamanho e potência de aerogeradores de 1985 até os 2010. [1]

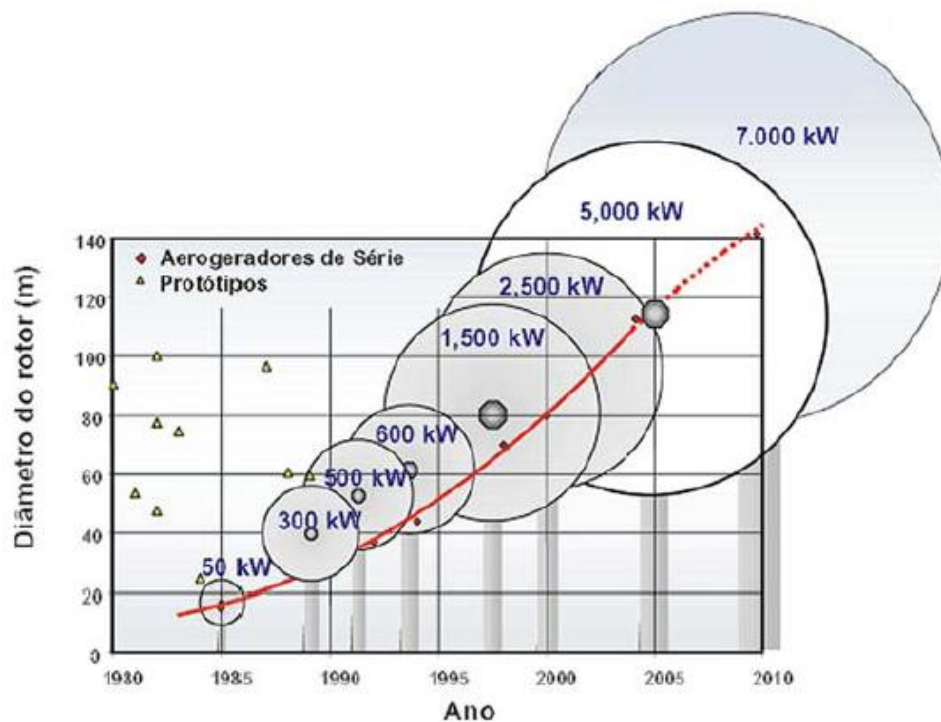


Figura 3: Evolução dos aerogeradores de 1985 até 2010 [1]

## 1.2 Energia Eólica no Brasil e no Mundo

O uso da energia no cenário mundial tem crescido muito nesses últimos anos por conta de uma série de fatores como a disseminação e o aperfeiçoamento da tecnologia, consequente diminuição nos custos e, principalmente, pela incessante busca por fontes de energia ambientalmente corretas. [3] De fato, entre as energias renováveis disponíveis, a eólica é a que mais cresce e já é uma realidade na matriz energética mundial. A Associação de Energia Eólica Europeia (EWEA) estima que a capacidade instalada possa alcançar cerca de 180 GW em 2020, que corresponde a 12% da demanda europeia. [4]

No Brasil, a utilização de energias renováveis tem sido impulsionada, além dos motivos supracitados, pela necessidade do aumento de produção de energia elétrica com o propósito de atender a demanda ocasionada pelo crescimento econômico. Em locais propícios e em posse de dados confiáveis a energia eólica, quando comparada às outras fontes renováveis, possui a grande vantagem de sua rápida implementação, podendo, inclusive, ser uma alternativa para atender às demandas de curto prazo. [3]

As medições atuais assinalam que o Brasil retém grande potencial eólico para melhorar ainda mais a nossa matriz energética. Tomamos como exemplo o Nordeste onde o comportamento dos ventos é altamente favorável, o que facilita a implementação da tecnologia como complemento à geração pelas hidrelétricas. Existem também os locais em que o transporte de combustível ou a implantação de linhas de transmissão mostram-se demasiadamente caros, onde a energia dos ventos pode ser utilizada como fonte principal de energia. [3]

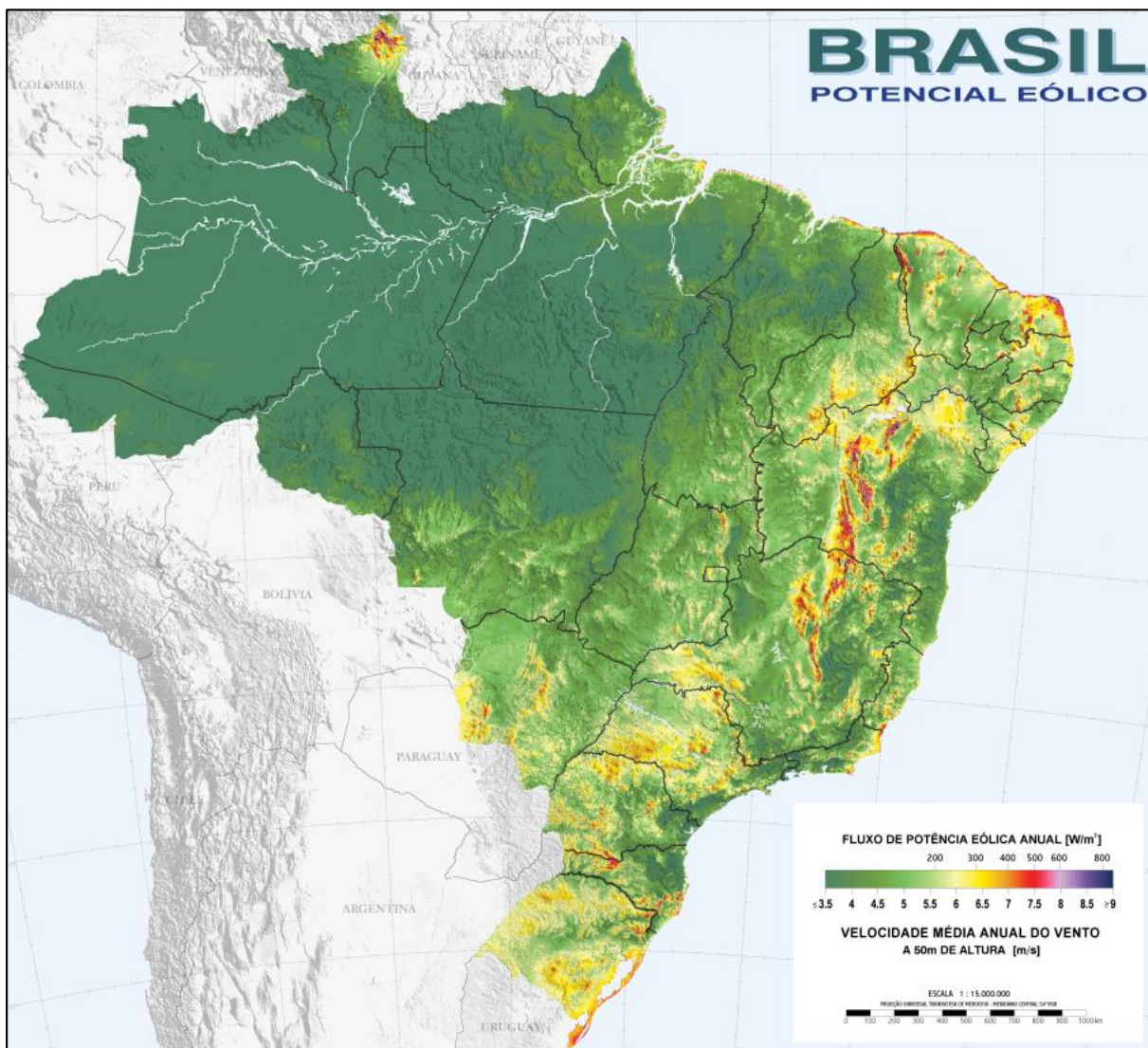


Figura 4: Mapa do potencial eólico brasileiro [5]

A Figura 4 mostra as velocidades médias no Brasil em metros por segundo a 50 m de altura onde conseguimos observar como a região nordeste do Brasil apresenta-se favorável a utilização de energia eólica.

O Brasil vem cada vez mais diversificando a sua matriz energética, que hoje é predominantemente de origem renovável. Dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) mostram que, em 2001 o Brasil possuía 82,2% de capacidade instalada proveniente de hidrelétricas e não mais que 0,03% vinha dos parques eólicos. Esse percentual subiu abruptamente chegando a 1,24% em 2012. A matriz elétrica do Brasil até o ano de 2012 pode ser vista na [Tabela 1](#). [4]

Tabela 1: Matriz elétrica brasileira em 2012 [4]

Empreendimentos em operação				
Tipo	Quantidade	Potência outorgada (kW)	Potência fiscalizada (kW)	%
CGH (Central Geradora Hidrelétrica)	368	214.716	211.895	0,18
EOL (Central Geradora Eolielétrica)	72	1.561.338	1.450.792	1,24
PCH (Pequena Central Hidrelétrica)	418	3.873.709	3.829.007	3,27
UFV (Usina Fotovoltaica)	6	5.087	1.087	0
UHE (Usina Hidrelétrica de Energia)	180	78.706.073	78.277.779	66,93
UTE (Usina Termelétrica de Energia)	1499	32.715.086	31.171.440	25,65
UTN (Usina Termonuclear)	2	2.007.000	2.007.000	1,72
<b>TOTAL</b>	<b>2545</b>	<b>119.083.009</b>	<b>116.949.000</b>	<b>100</b>

### 1.3 Justificativa do Trabalho

A primeira crise do petróleo ocorrida em 1973 fez com que o preço do petróleo subisse levando os consumidores a perceber que as reservas desse tipo de combustível eram esgotáveis. Além disso, há o aumento gradativo das emissões de gases que contribuem para o aumento do efeito estufa por conta da crescente utilização dos combustíveis fósseis. Essa falta de sustentabilidade destes combustíveis tem alavancado a procura de novas fontes energéticas renováveis como, por exemplo, a radiação solar, rios e ventos.

A energia eólica vem sendo um dos recursos naturais mais usados pela humanidade desde a Idade Média e, atualmente, tem se mostrado a mais promissora e tem a melhor relação custo benefício para exploração, desde que existam condições naturais favoráveis. Neste contexto, a utilização de aerogeradores de eixo horizontal para geração de eletricidade tem se mostrado eficiente, o que promove a aprimoramento cada vez maior das metodologias de análise e projetos desses tipos de aerogeradores.

Baseados neste contexto optamos por desenvolver uma metodologia simples e assertiva utilizando uma situação hipotética que condiz com a realidade do potencial eólico do

Brasil para a elaboração do projeto mecânico de um aerogerador de médio porte de eixo horizontal provido de três pás, modelo mais difundido no mercado mundial, visando viabilizar a fabricação de um aerogerador com um custo bem menos elevado que os modelos oferecidos no mercado internacional.

#### **1.4 Objetivo do Trabalho**

O objetivo deste trabalho é a elaboração de um projeto mecânico básico de um aerogerador de médio porte localizado na região nordeste do Brasil, onde existe grande potencial eólico aliado às características topográficas e de rugosidade do terreno favoráveis, capaz de gerar cerca de 40 kW de potência elétrica para atender à demanda energética para a agricultura de pequeno porte ou familiar nesta região. O projeto inclui a análise preliminar de viabilidade econômica, a análise aerodinâmica das pás do aerogerador através de *software*, seleção de materiais e o dimensionamento e especificação dos principais componentes mecânicos do equipamento.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O Recurso Eólico

O aquecimento não homogêneo da superfície terrestre é o mecanismo gerador dos ventos. Sendo assim, podemos dizer que a energia eólica é gerada pela radiação solar. Pode-se fazer uma estimativa de energia total dos ventos disponível do planeta supondo que, aproximadamente, 2% da energia proveniente do sol absorvida pelo nosso planeta é transformada em energia cinética dos ventos, valor este que representa centenas de vezes toda a potência instalada nas centrais elétricas ao redor da Terra. [1]

Os ventos são influenciados por diversos aspectos, destacando-se a altura, os obstáculos que eles se deparam, a rugosidade e o relevo da região. [1]

#### 2.1.1 Mecanismo de geração dos ventos

Podemos considerar que entre todas as maneiras que a energia solar se manifesta, a energia eólica é uma delas, tendo em vista que os ventos são formados através do aquecimento diferenciado da atmosfera. Esta falta de uniformidade no aquecimento deve-se a vários fatores, entre eles estão os movimentos da Terra e a disposição dos raios solares. [1]

As regiões tropicais sofrem mais aquecimento do que as regiões polares, pois as primeiras recebem os raios solares de forma quase que perpendicular. Com isso, o ar quente existente na altitude mais baixa das regiões tropicais tende a subir e é substituído pela massa de ar frio oriunda das regiões polares. Esse deslocamento das massas de ar é o fator determinante para a formação dos ventos. [1] A [Figura 5](#) ilustra tal mecanismo.

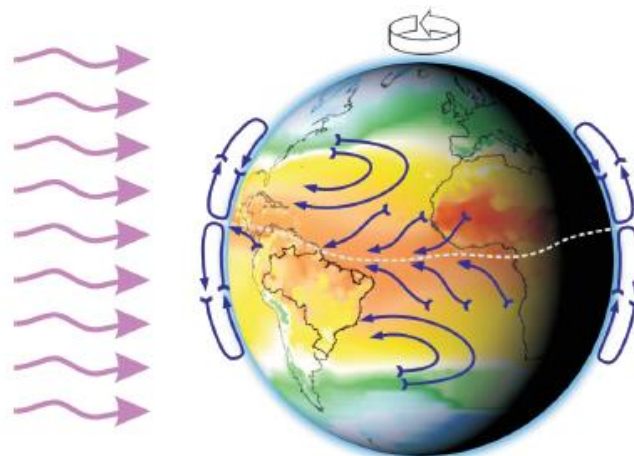


Figura 5: Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar [5]

Este mecanismo de produção dos ventos (resfriamento nos polos e aquecimento no equador) estão sempre presentes em determinados locais do nosso planeta, o que significa que o vento jamais para de "soprar". Estes ventos são denominados ventos constantes ou planetários e são classificados como:

- **alísios:** sopram dos trópicos em direção ao Equador geralmente em baixas altitudes;
- **contra-alísios:** sopram do Equador em direção aos polos geralmente em altas altitudes;
- **ventos do oeste:** sopram dos trópicos em direção aos polos;
- **polares:** são geralmente frios e sopram dos polos em direção às zonas temperadas. [1]

Partindo do princípio que o eixo terrestre tem uma inclinação de  $23,5^\circ$  utilizando como referência o plano de sua órbita ao redor do Sol, existem variações temporárias na distribuição da radiação na superfície terrestre ocasionando variações de intensidade e duração dos ventos na superfície da Terra. Temos como resultado deste fenômeno os ventos conhecidos como continentais ou periódicos que, por sua vez, compreendem as brisas e monções. [1]

Monções são ventos recorrentes que alteram a sua direção de, aproximadamente, seis em seis meses. Em geral sopram em uma certa direção em uma determinada estação do ano e muda de sentido na outra. [1]

Brisas são ventos recorrentes que sopram do mar em direção ao continente ou vice-versa. Elas surgem em função de cada tipo de superfície (continentes e mares) possuir diferentes capacidades de absorção, emissão e reflexão do calor proveniente do Sol. Devido à maior capacidade de a Terra refletir os raios do Sol durante o dia, a temperatura do ar aumenta resultando em uma corrente de ar soprando do mar em direção à terra (brisa marítima). Já no período noturno, a terra tende a perder temperatura mais rápido que a água, resultando na corrente de ar que sopra da terra em direção ao mar (brisa terrestre). Geralmente, a intensidade da brisa marítima é maior que a da brisa terrestre devido a maior diferença de temperaturas no período diurno. [1]

Existem também, além destes sistemas de geração de ventos supracitados, os ventos locais que têm como causa outros mecanismos mais específicos. Provenientes de condições locais, esses ventos tendem a ser bem individualizados e sopram em determinadas regiões, geralmente nas regiões das montanhas e dos vales. Durante o dia, a massa de ar quente situada nas encostas das montanhas tende a elevar-se, enquanto o ar frio desce sobre os vales

substituindo o ar que subiu. Ao anoitecer, a direção dos ventos se reverte e o ar frio proveniente das montanhas desce para os vales. [1]

### 2.1.2 Fatores que influenciam o regime dos ventos

No decorrer do dia o comportamento estatístico do vento é influenciado pela alternância da velocidade do vento em relação ao tempo. Sendo assim, as características de topografia local têm influência no comportamento dos ventos, uma vez que em um determinado local podemos ter diferenças de velocidades, resultando na aceleração ou na diminuição da velocidade dos ventos. Além da topografia e da rugosidade do solo, outro fator que tem forte influência na velocidade dos ventos é a altura. [1]

Mesmo em curtas distâncias, podem existir variações significativas na velocidade dos ventos. Sendo assim, para avaliação do local de instalação dos aerogeradores, devemos considerar todos os parâmetros regionais, pois eles podem influenciar de forma significativa nas condições do vento. Entre estes parâmetros podemos destacar:

- a variação da velocidade conforme a alteração da altura;
- a rugosidade do terreno (construções, vegetação, utilização da terra, etc.);
- a presença de obstáculos nas imediações;
- o relevo que pode estimular a aceleração e desaceleração dos ventos. [1]

As informações sobre as condições da região podem ser conseguidas através de mapas topográficos e visitas ao local de interesse. O uso de imagens de satélite também pode contribuir para uma análise mais precisa dos parâmetros. [1]

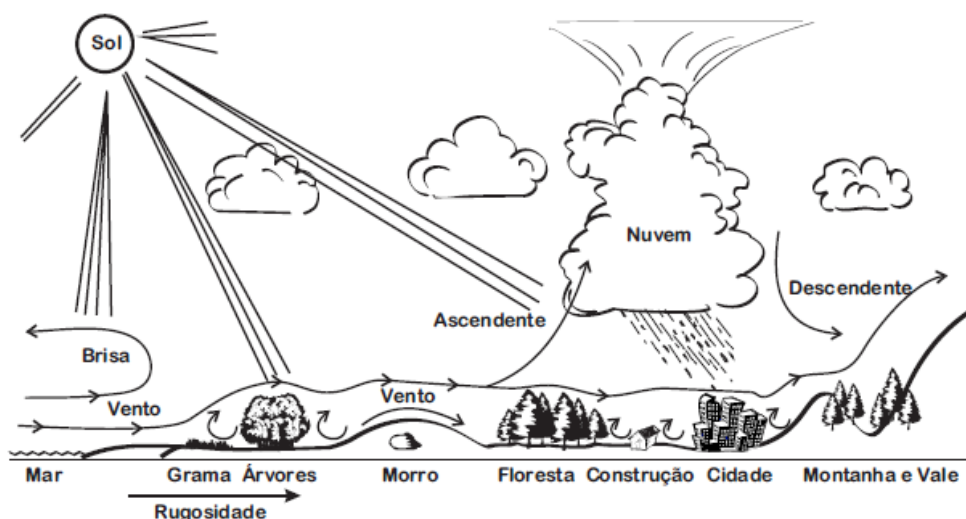


Figura 6: Comportamento do vento sob a influência das características do terreno [5]

A [Figura 6](#) mostra de forma genérica o comportamento dos ventos quando influenciados pelas características da superfície do solo.

À medida que o vento se afasta da superfície ele se torna mais uniforme e com maiores velocidades. Tecnicamente, podemos dizer que o escoamento do vento na superfície terrestre é turbulento e podemos estimar a variação da velocidade em função da altura através de modelos matemáticos com bastante precisão, ou seja, conhecendo a velocidade do vento a uma altura determinada em relação ao solo, conseguimos ter uma estimativa de qual seria a velocidade deste vento em uma nova altura. [3]

A seguir, uma fórmula simples, onde conseguimos estimar a velocidade dos ventos, conhecendo a velocidade em uma altura determinada:

$$v_{(z)} = v_{(z_0)} \left( \frac{h_{(z)}}{h_{(z_0)}} \right)^n$$

Onde:

$v_{(z)}$  – velocidade do vento estimada na altura desejada [m/s];

$v_{(z_0)}$  – velocidade do vento medida em uma altura conhecida [m/s];

$h_{(z)}$  – altura em que desejamos estimar a velocidade [m];

$h_{(z_0)}$  – altura na qual temos medida a velocidade do vento [m];

$n$  – parâmetro referente a rugosidade da superfície do local, geralmente igual 0,143.

A rugosidade do terreno ( $z_0$ ) refere-se a um conjunto de elementos (árvores, arbustos, vegetação rasteira e pequenas construções) que oferecem resistência à passagem do vento e desviam a sua trajetória. Sendo assim, o valor de rugosidade de uma determinada superfície depende da altura e da forma que esses elementos estão distribuídos em uma determinada área. [3]

Esse parâmetro de rugosidade define-se por uma escala de comprimento para a caracterização da rugosidade de um determinado terreno. Quanto mais liso o terreno, menor o valor de  $z_0$ , por exemplo em um local de superfície bem lisa (areia, neve, água) o valor de  $z_0$  será aproximadamente 0,001. Já em locais com presença de vegetação (árvores e arbustos), será aproximadamente 0,20 e em áreas residenciais 0,50. [3]

Podemos determinar a rugosidade de uma superfície utilizando a seguinte equação:

$$z_0 = 1/2 (HS/A_n)$$

Onde:

$z_0$  – rugosidade da superfície [m];

H – altura máxima dos elementos que compõem a rugosidade do local [m];

S – área perpendicular à passagem do vento, formada pela rugosidade [m<sup>2</sup>];

$A_n$  – área ocupada pelos elementos que formam a rugosidade [m<sup>2</sup>]

Os obstáculos à passagem dos ventos, que são elementos de dimensões conhecidas, são capazes de causar a redução na velocidade dos ventos. São eles as pedras de grandes dimensões, morros, torres, edificações, agrupamento de árvores grandes, etc. Eles, além de obstruir a passagem dos ventos, modificam também a distribuição e a sua velocidade. Para efeito de estudo, devemos considerar os obstáculos como caixas de seção transversal retangular, sendo a sua forma irrelevante, devendo-se preocupar principalmente com sua localização, dimensões e porosidade. [3]

O vento pode ter seu comportamento bastante alterado ao atingir um obstáculo, podendo chegar a níveis que correspondem a três vezes a altura de um obstáculo no sentido horizontal e 40 vezes a altura deste obstáculo. [3]

O relevo também pode influenciar notavelmente a velocidade dos ventos. A presença de uma colina em um determinado local, por exemplo, dependendo de sua forma geométrica, pode resultar em uma variação significativa da velocidade e direção dos ventos. A presença de outros acidentes topográficos como vales, depressões, gargantas, etc. também influencia de maneira expressiva o regime dos ventos. [3]

Sendo assim, recomenda-se a instalação de turbinas eólicas em locais mais elevados, onde a ventos ocorrem de forma mais concentrada, sem influência destes fatores supracitados.

### 2.1.3 Potência do vento

O vento produz energia cinética, que chamamos de energia eólica. Para que possamos encontrar um modelo matemático capaz de explicar este fenômeno, precisamos entender que existe uma variação constante em sua direção e velocidade. Imaginemos um cilindro, de área transversal A, onde se tem um fluxo de ar de velocidade v perpendicular a este cilindro, conforme mostrado na [Figura 7](#). [4]



Figura 7: Cilindro de área transversal sob a ação do fluxo de ar [4]

A massa de ar que está passando pelo cilindro é simbolizada por  $m$ . Logo, a energia cinética da massa de ar é dada pela expressão:

$$Ec = 1/2 * m v^2$$

Podemos observar que a energia cinética cresce com o quadrado da velocidade do vento. De uma forma prática, seria como se duplicássemos a velocidade do vento de um ventilador caseiro, estaríamos nos sujeitando a uma energia cinética do vento quatro vezes maior. Essa energia cinética varia com o tempo gerando então a potência. Logo, a potência disponível é a derivada da energia cinética pelo intervalo de tempo:

$$P = \frac{dEc}{dt} = \frac{mv^2}{2}$$

Para tornar praticável a equação, substituiremos  $m$  por  $\rho Av$ , sendo  $\rho$  a massa específica do ar e  $A$  a área da seção transversal do cilindro que o vento ultrapassada.

$$P = \frac{1}{2} * \rho Av^3$$

Agora podemos analisar o fluxo de potência eólica: temos uma potência disponível que é diretamente proporcional à velocidade do vento elevada ao cubo. [4]

#### 2.1.4 Obtenção de dados de velocidade dos ventos

A avaliação do potencial eólico em um determinado local deve ser embasada em observações diárias da velocidade dos ventos em um período de tempo relevante. Podem ser utilizados aparelhos simples como anemômetros, por exemplo. A medição deve ser feita diariamente durante um período de, no mínimo, um ano e devem ser realizadas, no mínimo, cinco medições de velocidade, nos horários de 9 horas, 12 horas, 15 horas, 18 horas e 21 horas. Os dados devem ser anotados de forma apropriada para uma posterior análise. É recomendado que se faça uma tabela para cada mês. [3] Atualmente existem aparelhos

modernos para a armazenagem de dados, chamados *dataloggers*. Esses dados também podem ser acessados de forma remota via telefone celular ou colhidos diretamente no local. [4]

Uma maneira mais grosseira de se estimar a velocidade dos ventos é utilizando a escala de Beaufort, mostrada na [Tabela 2](#), que pode ser utilizada para se instalar sistemas eólicos mais simples. [3]

Tabela 2: Escala de Beaufort para estimativa da velocidade do vento [3]

Grau	Designação	Velocidade [m/s]	Efeitos em terra
0	<i>Calmo</i>	< 0,3	Fumaça sobe na vertical;
1	<i>Aragem</i>	0,3 a 1,5	Fumaça indica direção do vento;
2	<i>Brisa leve</i>	1,6 a 3,3	As folhas das árvores movem; os moinhos começam a trabalhar;
3	<i>Brisa fraca</i>	3,4 a 5,4	As folhas agitam-se e as bandeiras desfraldam ao vento;
4	<i>Brisa moderada</i>	5,5 a 7,9	Poeira e pequenos papéis levantados; movem-se os galhos das árvores;
5	<i>Brisa forte</i>	8 a 10,7	Movimentação de grandes galhos e árvores pequenas;
6	<i>Vento fresco</i>	10,8 a 13,8	Movem-se os ramos das árvores; dificuldade em manter um guarda-chuva aberto; assobio em fios de postes;
7	<i>Vento forte</i>	13,9 a 17,1	Movem-se as árvores grandes; dificuldade em andar contra o vento;
8	<i>Ventania</i>	17,2 a 20,7	Quebram-se galhos de árvores; dificuldade em andar contra o vento; barcos permanecem nos portos;
9	<i>Ventania forte</i>	20,8 a 24,4	Danos em árvores e pequenas construções; impossível andar contra o vento;
10	<i>Tempestade</i>	24,5 a 28,4	Árvores arrancadas; danos estruturais em construções;
11	<i>Tempestade violenta</i>	28,5 a 32,6	Estragos generalizados em construções;
12	<i>Furacão</i>	> 32,7	Estragos graves e generalizados em construções.

## 2.1.5 Vantagens e desvantagens da energia eólica

### a) Vantagens

A energia eólica é uma tecnologia consolidada e constitui uma fonte de energia barata que tem condições de competir com as tradicionais fontes de energia, como por exemplo as térmicas de carvão que é considerado um dos combustíveis mais baratos e também as centrais nucleares, levando-se em conta os custos de manutenção e os custos ambientais. [6]

O processo de geração de energia elétrica sem qualquer processo de combustão ou processo de transformação térmica consiste em uma forma de geração de energia favorável ao meio ambiente, pois trata-se de um processo limpo e sem contaminação. A utilização em larga

escala minimiza os impactos originados pela geração de energia através de combustíveis fósseis desde a extração até o processo de combustão. [6]

A geração de energia elétrica utilizando como fonte a energia dos ventos não tem impacto nas características físico-químicas do solo uma vez que ela não produz nenhum tipo de contaminante para o meio e não necessita de grandes movimentos de terras. [6]

### **b) Desvantagens**

Um dos principais impactos ambientais quando se utiliza a energia eólica é o ruído, principalmente os gerados nas pás, que aumenta proporcionalmente com a velocidade dos ventos. Atualmente, a modernização das turbinas contribui para diminuir consideravelmente o nível de ruído produzido em relação às turbinas desenvolvidas no passado. Os próprios fabricantes têm grande preocupação com o tema e desenvolvem projetos com foco na diminuição do nível de ruído. [6]

Outro problema originado pelas turbinas eólicas é o impacto destas com a população local de pássaros, o que preocupa bastante os ecologistas. Pesquisas realizadas em diversos países apontam que o número de mortes de pássaros devido à colisão com as turbinas é menor que o número de mortes causadas pelas linhas de alta tensão. Estudos realizados na Europa apontam que a mortalidade de pássaro é pequena, exceto em alguns parques eólicos costeiros onde passam as aves migratórias. É interessante ressaltar que os pássaros de migração noturna raramente colidem com as turbinas. [6]

O terceiro problema e de menor gravidade é o impacto visual e a aceitação público dos sistemas eólicos. Existem áreas que há o conflito entre a preservação da paisagem natural e a instalação de sistemas eólicos, questão essa de difícil resolução, uma vez que para o seu equacionamento devem ser considerados tanto a exclusão de algumas áreas no desenvolvimento de projetos quanto o fato de que o sistema eólico é bem menos poluente que o sistema utilizando combustíveis fósseis. [6]

Já a aceitação pública depende da participação da população nas decisões locais, onde precisam receber informação suficiente sobre as fontes alternativas de energia para que possam ter influência decisiva neste processo. [6]

As turbinas eólicas também podem gerar interferência nas transmissões de ondas eletromagnéticas. Como a interferência é concentrada em pequenas áreas, as que se encontram em rotas de navegação ou de *links* de rádio podem ser evitadas escolhendo-se um

local que não prejudique os sinais de transmissão. No que diz respeito à recepção pública de TV e rádio, essa situação é diferente já que elas estão em praticamente todo lugar. Observações feitas com as turbinas experimentais da NASA já foram avaliadas e, em contraste com a recepção de sinais de rádio, a recepção dos sinais de TV, de fato, sofreu distúrbios. [4]

## 2.2 A Turbina Eólica

Turbinas eólicas são equipamentos capazes de absorver a energia dos ventos e converter esta energia cinética em energia mecânica, a qual, posteriormente, é convertida em eletricidade por meio de um gerador elétrico. As turbinas eólicas vêm melhorando bastante suas características de eficiência, *design* e capacidade instalada nos últimos anos. [4]

Atualmente, a maioria das turbinas comerciais são as de eixo horizontal providas de três pás espaçadas uniformemente com caixa de engrenagem e gerador conectadas dentro da nacela. [4] Os futuros desenvolvimentos tecnológicos buscam reduzir o custo por meio de simplificação dos conceitos, tais como: utilização de potências modulares, ausência de caixa multiplicadora, sistemas de orientação livre, etc. [6]

As turbinas eólicas podem operar em uma ampla faixa de velocidades do vento, que podem ir de 3 m/s até 25 m/s. Hoje em dia, a maior parte das turbinas utiliza um dispositivo capaz de modificar o ângulo das pás por meio do controle de passo (*pitch control*) fazendo assim o melhor uso do vento, conforme sua variação. Os sofisticados sistemas de controle tornam possível o ajuste preciso da performance da turbina. [4]

### 2.2.1 Conversão de energia

Como já dito na seção anterior, as turbinas eólicas são usadas com a finalidade de converter a energia proveniente dos ventos em eletricidade. Essa conversão consiste em duas etapas: a primeira é a remoção da porção de energia cinética para conversão em energia mecânica. Já a segunda é feita pelo gerador que recebe a energia mecânica e a converte em eletricidade que pode ser transmitida para rede concessionária ou armazenada em baterias. Um fluxograma esquemático de conversão de energia pode ser visto na [Figura 8](#). [4], [6]

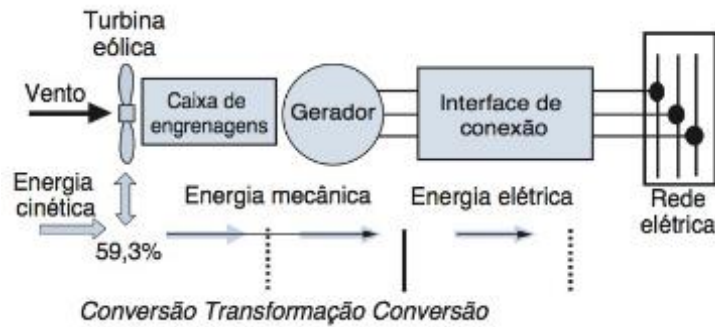


Figura 8: Princípio da conversão da energia cinética do vento em energia elétrica [4]

As condições de funcionamento e operação de uma turbina eólica dependem, principalmente, das condições do vento, com o qual nenhuma ação pode ser tomada. As medidas podem ser tomadas em determinadas condições operacionais para se ter o controle da energia convertida pela turbina e pelo gerador elétrico antes de transferi-la para a rede. [4]

### 2.2.2 Aplicações básicas

Dois casos distintos são compreendidos na produção de eletricidade através da energia eólica: pequenas instalações autônomas e grandes instalações conectadas à rede. As primeiras utilizam baterias para o armazenamento de energia, já as grandes instalações necessitam ser dotadas de um sistema de armazenamento para a eletricidade produzida. [6]

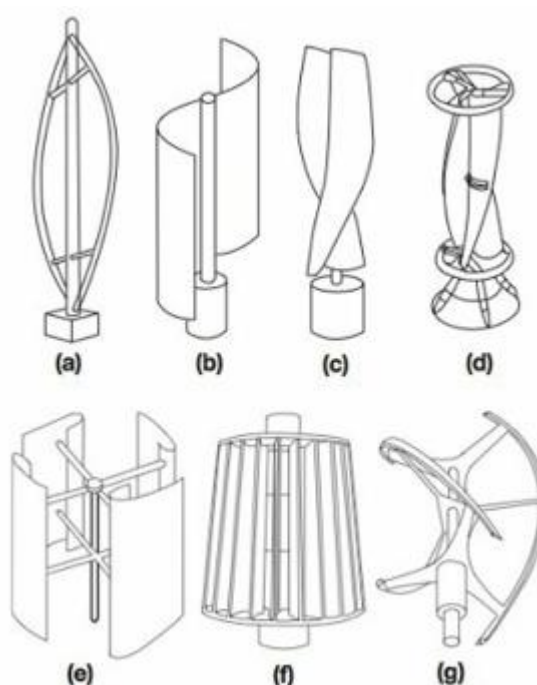
Em aplicações residenciais comuns, a residência é suprida pela turbina eólica e pela rede elétrica, simultaneamente. Normalmente, para velocidades abaixo de 3,5 m/s, a turbina deixa de operar e quando existe vento suficiente, a turbina pode fornecer toda energia necessária ou ajudar a suprir a demanda residencial. Hoje, em vários países, já é possível “vender” energia elétrica para a concessionária que, por sua vez, paga por essa energia através de descontos na tarifa. [6]

### 2.2.3 Classificação das turbinas eólicas

Quanto à capacidade de produção, podem ser classificadas em: pequeno (produzem até 20 kW), médio (produzem entre 20 e 250 kW) e grande porte (produzem mais que 250 kW). As primeiras são equipamentos compactos e com preços acessíveis ideais para uso residencial e aplicações remotas. Já as de médio porte são aplicáveis em telecomunicações, bombeamento de água, fornecimento elétrico residencial em vilas, etc. As de grande porte são mais caras,

tendo um período de retorno do investimento de 10 a 12 anos e são comumente usadas para geração distribuída e parques eólicos. [7]

Quanto a posição do eixo ao qual o rotor gira ao seu redor, podem ser de eixo horizontal (*horizontal axis wind turbine – HAWT*) ou vertical (*vertical axis wind turbine – VAWT*), sendo este segundo caso os projetos mais antigos. As vantagens das turbinas de eixo vertical é que elas não necessitam de controle para manter-se na direção do vento e todo o maquinário pesado contido no interior da nacela de turbinas de eixo horizontal pode ficar no solo. Em contrapartida as desvantagens são inúmeras: baixos valores de *tip speed ratio* (TSR), incapacidade de partida própria, incapacidade de controlar a saída por não possuir mecanismos de passo, ficam muito perto do solo onde a velocidade dos ventos é mais baixa, etc. A [Figura 9](#) mostra alguns tipos de turbinas eólicas de eixo vertical. [4]



(Legenda: (a) Darrieus; (b) Savonius; (c) Solarwind; (d) Helicoidal; (e) Noguchi; (f) Maglev e (g) Cochrane)

Figura 9: Modelos de turbinas de eixo vertical [4]

O Rotor de Darrieus foi a única máquina de eixo vertical que teve algum sucesso comercial. Assim como no caso dos rotores com eixo horizontal, o rotor de Darrieus é normalmente construído com duas ou três pás, apresentando curvatura em forma catenária com um perfil simétrico, normalmente da série NACA 0012 ou 0015, a caixa de engrenagem é montada no solo e precisam de um motor de partida para inicialização. Mesmo assim, este modelo não foi capaz de corresponder no mesmo patamar das turbinas de eixo horizontal. [4]

Uma variação do rotor de Darrieus é o Rotor H, também conhecido como Giromill e vulgarmente por “batedeira de ovos”. Ao invés das pás curvadas são usadas pás em linha reta conectadas ao eixo do rotor através de suportes. Neste caso, a área de interceptação do vento é um retângulo, o que teoricamente deveria varrer uma área maior e capturar mais energia, porém tentativas de desenvolvimento deste modelo no Reino Unido, Estados Unidos e Alemanha não tiveram êxito. [4]

O Rotor de Savonius, também chamado de Rotor S, trata-se de uma turbina de baixa rotação, alto torque e tem capacidade de trabalhar com ventos de baixa velocidade, com predomínio das forças de arrasto. Tem sua pá em forma de “S” e opera como um anemômetro de copo com o vento passando entre as pás dispostas como folhas dobradas. Os grandes problemas desse rotor são a sua ineficiência e difícil proteção deste contra ventos fortes. Uma ilustração deste tipo de rotor pode ser vista na [Figura 10](#). Um simples rotor deste tipo pode ser fabricado cortando um tambor ao meio, invertendo uma das metades e soldando as peças em forma de S. [4]



Figura 10: Rotor de Savonius [4]

Existem outros tipos de modelos, como um modelo híbrido Savonius-Darrieus criado por uma empresa italiana e trata-se de uma mistura das duas tecnologias, o modelo Helicoidal que se trata de uma variação do modelo de Darrieus, com pás em formato helicoidal e as

turbinas Turby, especialmente projetadas para uso em regiões urbanas e na parte superior de edifícios. [4]

Já as turbinas de eixo horizontal, princípio dominante na tecnologia eólica da atualidade, podem ser compreendidas quase que exclusivamente através dos conceitos das hélices. A sua superioridade é baseada nestes três pilares: possibilidade de controle do ângulo das pás (proteção contra o excesso de velocidade), aperfeiçoamento aerodinâmico das pás, além da liderança tecnológica no desenvolvimento de hélices. [4]

As principais vantagens deste tipo de turbina são que elas podem acessar maiores velocidades por conta da altura da torre de sustentação, o controle através do ajuste do ângulo de passo e a alta eficiência devido ao seu posicionamento perpendicular ao vento. [4]

As desvantagens são a complexidade de instalação de uma torre alta, dificuldade de transporte dos equipamentos, necessidade de um controle das pás e a uma construção complexa para apoiar o cubo e os demais equipamentos na nacela. [4]

As vantagens são determinantes para que a grande maioria das turbinas sejam as de rotores com eixo horizontal, porém ainda não existe um consenso entre qual tipo é melhor: *downwind* (vento incide na parte traseira da turbina) ou *upwind* (vento incide na parte dianteira da turbina). As máquinas *downwind* tem a vantagem de que o própria vento controla a direção da turbina, porém existe o grande problema da sombra do vento por causa da torre, fazendo com que o vento se reduza e a pá se flexione, gerando problemas de fadiga e aumentando o ruído da pá ocasionando perda de eficiência. Já as máquinas *upwind* têm a desvantagem de um sistema complexo de ajuste para manter as pás perpendiculares à direção do vento. Entretanto este segundo tipo é o da grande maioria dos aerogeradores atuais. A [Figura 11](#) ilustra as configurações das duas máquinas. [4]

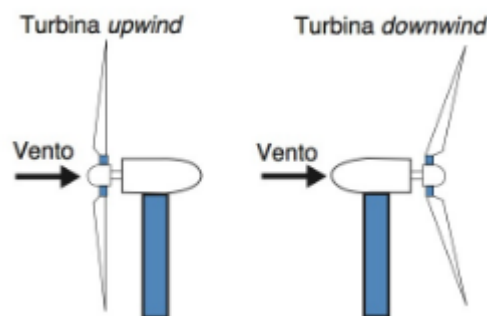
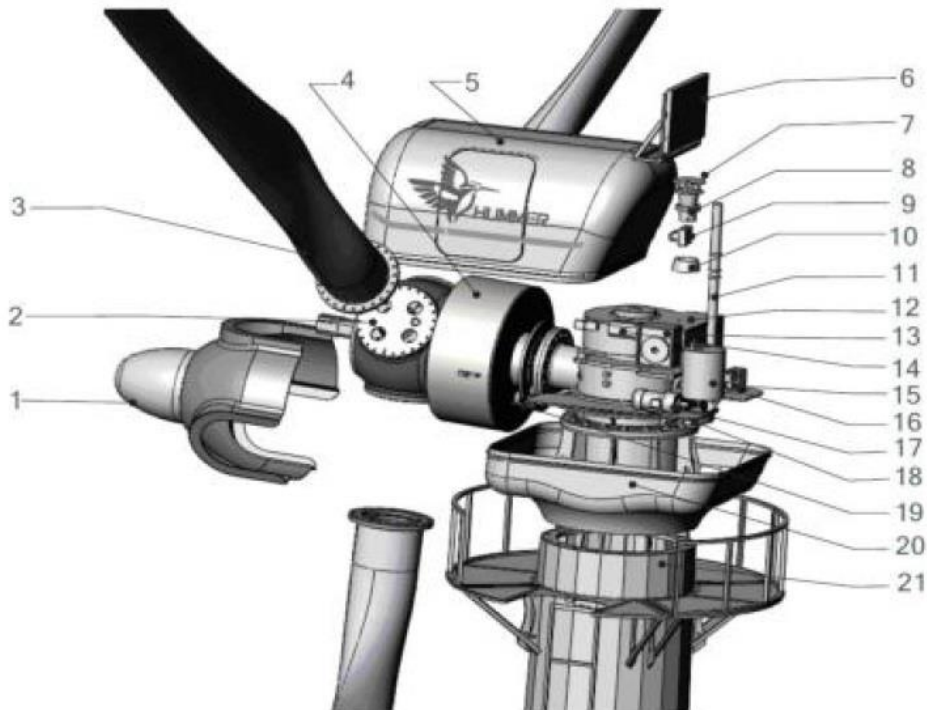


Figura 11: Incidência do vento em turbinas *upwind* e *downwind* [4]

### 2.2.4 Componentes de um aerogerador de eixo horizontal

A [Figura 12](#) apresenta os principais componentes de um moderno aerogerador de eixo horizontal, com várias tecnologias de monitoração e controle.



(Legenda: 1 - Cone do nariz, 2 - Cubo, 3 - Pá, 4 - Corpo do gerador, 5 - Proteção superior da nacela, 6 - Sistema radiador, 7 - Medidor de direção do vento/Anemômetro, 8 - Flange de fixação do medidor de direção do vento, 9 - Olhal, 10 - Anel de vedação, 11 - Barra de suporte do medidor de direção vento/anemômetro, 12 - Caixa de engrenagens do eixo (*yaw*), 13 - Redutor de Velocidade, 14 - Servo motor do eixo (*yaw*), 15 - Sistema de Freios, 16 - Tanque de água para resfriamento, 17 - Bomba para circulação da água para resfriamento, 18 - Calibrador do freio do eixo, 19 - Calibrador do freio das pás, 20 - Proteção inferior da nacela, 21 - Torre autoportante)

Figura 12: Componentes de um aerogerador de eixo horizontal [8]

A seguir são apresentados os componentes principais de um aerogerador:

**Nacela:** É a carcaça existente sobre a torre onde se encontram o gerador, o sistema de controle, a caixa de engrenagens (multiplicadora), o sistema de medição do vento o os motores para rotação do sistema que proporcionam o melhor posicionamento considerando a direção do vento. [1]

**Pás, cubo e eixo:** Constituídas por perfis aerodinâmicos, as pás interagem diretamente com o vento convertendo uma parte da energia cinética em trabalho. No início elas eram fabricadas em alumínio, porém são fabricadas em fibra de vidro reforçada com epóxi

atualmente. Nas turbinas que possuem controle de velocidade por passo, existem rolamentos na base das pás para que estas possam girar modificando seu ângulo de ataque [1].

As pás são fixadas por flanges na estrutura metálica que fica na frente do aerogerador que é denominada cubo. Geralmente o rotor é constituído por três pás, espaçadas a  $120^\circ$  de forma que o afastamento entre elas faça com que a turbulência produzida seja dissipada, obtendo o máximo desempenho aerodinâmico. Quanto mais pás tiver a turbina, menor será a rotação do rotor, sendo necessária a utilização de caixas multiplicadoras com uma taxa de multiplicação mais elevada e, portanto, maior perda mecânica. [3] A estrutura é feita em aço ou uma liga de alta resistência. Nos aerogeradores com controle de velocidade por passo existem rolamentos para fixação das pás no cubo e este acomoda os mecanismos e os motores de ajustagem do ângulo de ataque das pás. Este mecanismo é similar ao mecanismo de direção da nacele que será visto mais à frente. O cubo, por se tratar de uma peça de alta resistência mecânica, necessariamente, necessita ser uma peça compacta e única mesmo nos aerogeradores de grande porte. [1] A Figura 13 apresenta alguns dos tipos de cubos utilizados normalmente nos aerogeradores. [9]

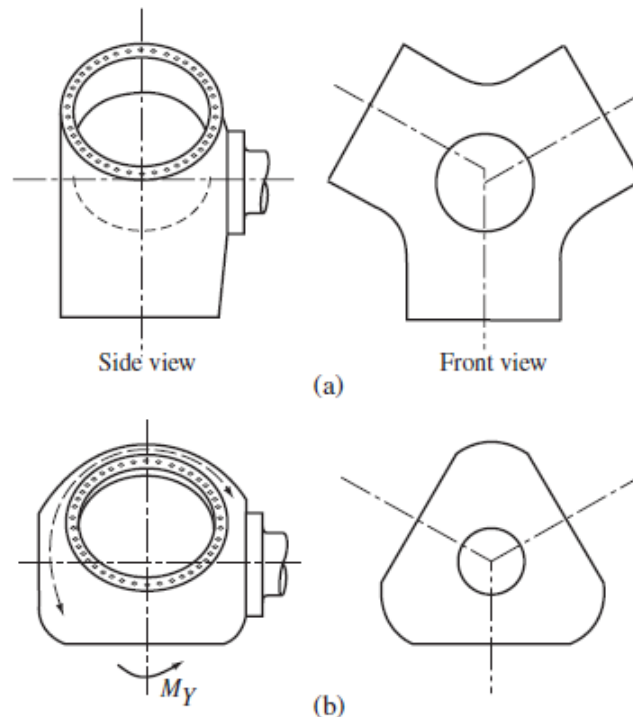


Figura 13: Tipos de Cubos de rotor. (a) tri-cilíndrico; (b) esférico [9]

O eixo é construído em aço ou uma liga metálica de alta resistência e tem a função de acoplar o cubo ao gerador fazendo com que a energia mecânica seja transferida. [1]

**Transmissão e caixa multiplicadora:** Composta por eixos, engrenagens de transmissão, mancais e acoplamentos, a caixa de transmissão é responsável pela transmissão da energia mecânica que é entregue pelo eixo do rotor ao gerador. [1]

O projeto do aerogerador consiste em posicionar a caixa de transmissão mecânica entre o rotor e o gerador para adaptar a baixa velocidade proveniente dos rotores às altas velocidades de rotação requeridas pelos geradores convencionais. [1]

A velocidade angular dos rotores pode variar de 20 a 150 rpm por causa das restrições de velocidade nas pontas das pás (*tip speed*). Porém, os geradores podem trabalhar com velocidades bem elevadas, na faixa de 1200 a 1800 rpm sendo necessário instalar um sistema multiplicador entre os eixos. [1]

Recentemente, alguns fabricantes tiveram sucesso no desenvolvimento de aerogeradores sem caixa multiplicadora. Neste caso, ao invés de utilizar a tradicional caixa de engrenagens com elevada relação de transmissão, eles utilizaram geradores multipolos que possuem baixas velocidades e grandes dimensões. [1]

Ambos os projetos possuem vantagens e desvantagens, não sendo o foco do trabalho a discussão sobre eles. A decisão de usar o multiplicador de velocidades ou fabricar um aerogerador sem a caixa de transmissão é apenas uma questão de filosofia do projetista. [1]

**Gerador:** A geração de eletricidade através da transformação da energia mecânica de rotação por intermédio de equipamentos de conversão já é um problema tecnologicamente dominado, existindo atualmente vários fabricantes no mercado que possuem expertise nesta tecnologia. [1]

Contudo, integrar os geradores nos sistemas de conversão eólica ainda é um grande problema que envolve muitas variáveis, sendo as principais:

- variação de velocidade dos ventos;
- variações do torque de entrada levando-se em conta as variações da velocidade do vento resultam em variações de potência no eixo;
- necessidade de tensão e frequência constantes na energia final;
- dificuldade de instalação, manutenção e operação, pois esses sistemas geralmente são instalados em locais afastados.

Hoje no mercado, existem variadas alternativas de conjunto moto-geradores, entre os quais destacam-se: geradores de corrente contínua, síncronos, assíncronos, de comutador de corrente alternada, etc. Cada um deles possui suas vantagens e desvantagens e sua escolha deve ser cautelosamente analisada para cada caso. [1] A Figura 14 mostra o desenho em corte de um gerador multipolos usado em turbinas eólicas. [10]

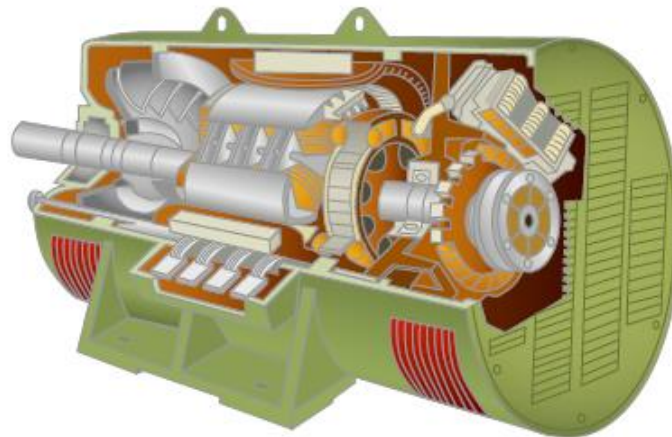


Figura 14: Esquema de um gerador multipolos para turbina eólica [10]

**Mecanismo de controle:** Destina-se à orientação do rotor de acordo com o sentido do vento, ao controle de velocidade e ao controle de carga. Podem ser eletrônicos, mecânicos ou aerodinâmicos. Eles agem forçando o rotor a estar sempre alinhado com vento, controlando o torque e a velocidade, protegendo assim a integridade do equipamento. [3] A Figura 15 mostra um arranjo típico de um servo motor para controle de giro da nacele. [9]

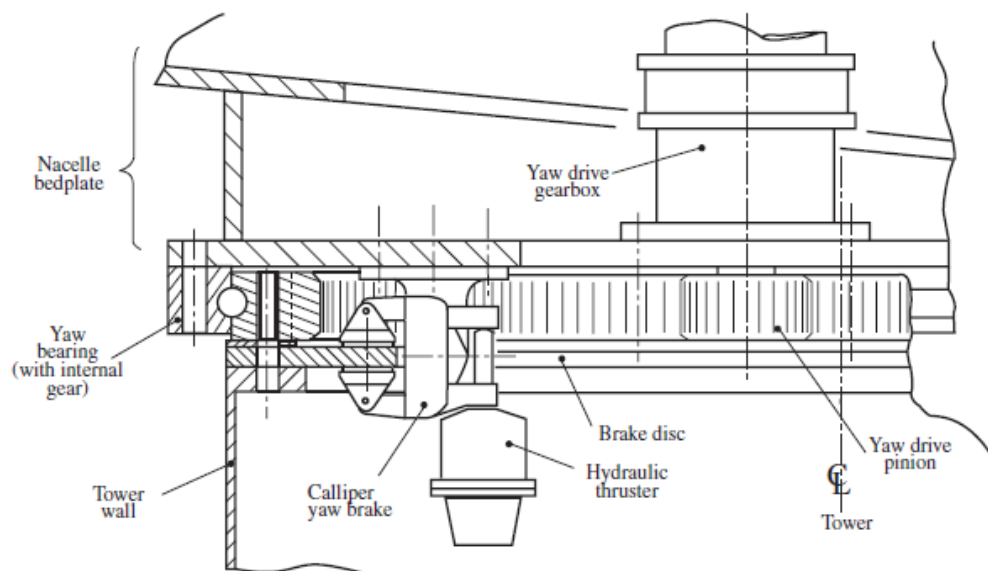


Figura 15: Arranjo típico de um servo motor para controle de posição da nacele [9]

**Torre:** A função das torres é posicionar e sustentar o rotor a uma altura adequada. É geralmente um item estrutural de elevado porte e tem uma elevada contribuição no custo total do sistema. No passado elas eram feitas de metal treliçado, porém, com a utilização de geradores cada vez mais potentes, passaram a sustentar muito mais peso. Sendo assim, para prover maior mobilidade e segurança na sustentação da nacelle em alturas que se elevam mais a cada projeto, hoje são utilizadas torres tubulares ou de concreto, em alguns casos, sustentadas por cabos tensores. [1]

**Demais acessórios:** Os condutores seguem o mesmo padrão dos sistemas de energia convencionais, de baixa tensão: consistem em fios ou cabos, de cobre com isolamento termoplástico. [3]

As baterias funcionam como acumuladores de carga permitindo a utilização dos equipamentos em períodos sem a presença de ventos, ou quando a potência disponibilizada pelo gerador for inferior a demandada. [3]

Os fusíveis são dispositivos de proteção contra correntes anormais, como curto-circuito e sobrecarga. Os tipos mais comuns são o cartucho, o NH e o Diazed, sendo o de cartucho mais utilizado na aplicação eólica residencial. [3]

O controlador de carga é o componente eletrônico responsável pelo controle do limite de consumo de energia das baterias, além da máxima carga que elas podem suportar. Tem como função evitar que a bateria se descarregue completamente. Quando a bateria atinge 70% da carga total, o controlador desconecta as cargas ligadas e permite apenas a carga da bateria. Quando a bateria está com 90% da sua carga, as cargas são automaticamente conectadas ao sistema de fornecimento de energia. [3]

O inversor é o dispositivo eletrônico que recebe na entrada corrente contínua e fornece, na saída, corrente alternada em 110 ou 220 V. Nesse processo, existe uma perda de, aproximadamente, 10%. [3]

### **2.2.5 Manutenção dos aerogeradores**

Os aerogeradores possuem um sistema altamente tecnológico e complexo em várias áreas como mecânica, elétrica, aerodinâmica e controle. Sendo assim, existe a necessidade de

diversos especialistas capacitados para a execução da manutenção. [11] Os custos de manutenção de uma turbina eólica estão entre 2 a 3% do custo do investimento por ano. [4]

O ciclo de vida dos aerogeradores gira em torno de vinte anos, existindo a necessidade de manutenções preventivas e trocas de algumas peças eventualmente. Alguns itens como travões, amortecedores, óleos da caixa multiplicadora, etc. são trocados a cada dois anos e outros devem ser substituídos a cada cinco anos, conforme recomendação do fabricante. [11]

Todas as rotinas preventivas, reparações e inspeções são realizadas todos os anos. A manutenção desses sistemas é feita através de um conjunto de ações visando o custo mínimo em todas as etapas do processo. A manutenção dos aerogeradores é feita em 4 etapas interligadas através de um conjunto de técnicas para descobrir os danos mecânicos ou elétricos do aerogerador. Manutenções preventivas, corretivas, sistemáticas e condicionadas são feitas conforme um planejamento eficiente, em todas as partes dos aerogeradores. [11]

A manutenção preventiva é feita realizando-se inspeções periódicas nos aerogeradores. Renovações de peças e componentes são feitas constantemente, todos os dados são analisados e acompanhados para prevenir possíveis danos futuros que seriam muito mais onerosos. [11]

Se por ventura surgirem danos aleatórios nos aerogeradores, a manutenção corretiva será executada. Este procedimento visa a economia na execução de reparos, além da possibilidade de convivência com pequenos problemas no equipamento. Este método corretivo tem atuação moderadora no orçamento de manutenção. [11]

A manutenção sistemática é executada fazendo-se verificações periódicas no equipamento, mantendo um intervalo fixo entre a troca de peças, equipamentos, fluidos, etc. A grande vantagem é a possibilidade de programação da paralização do equipamento. [11]

A manutenção condicionada, também conhecida como manutenção inteligente é executada através de sensores que emitem informações ao painel de controle, onde os técnicos podem acompanhar todo o processo, o que possibilita uma eficiente manutenção do equipamento, aumentando a produtividade e longevidade, consequentemente diminuindo os custos. A implantação de *softwares* para monitoração e supervisão de todo o funcionamento do aerogerador é muito importante, onde se pode detectar qualquer dano ou erro no equipamento. Atualmente, o uso de *softwares* abrangentes e tecnológicos nos aerogeradores é essencial. [11]



### 3 O PROJETO DO AEROGERADOR

Como já descrito anteriormente, o objetivo do trabalho é projetar um aerogerador de médio porte para atender a uma determinada demanda em uma região. Escolhemos uma propriedade rural na região nordeste do país onde se tem condições favoráveis de velocidade de vento, relevo, rugosidade do terreno, e ausência de obstáculos nas redondezas. O projeto pode ser replicado na íntegra em um outro local que possua características semelhantes. Caso tenha características diferentes, alguns ajustes deverão ser feitos. Podemos observar na [Figura 16](#) um mapa do potencial eólico presente no Nordeste brasileiro.

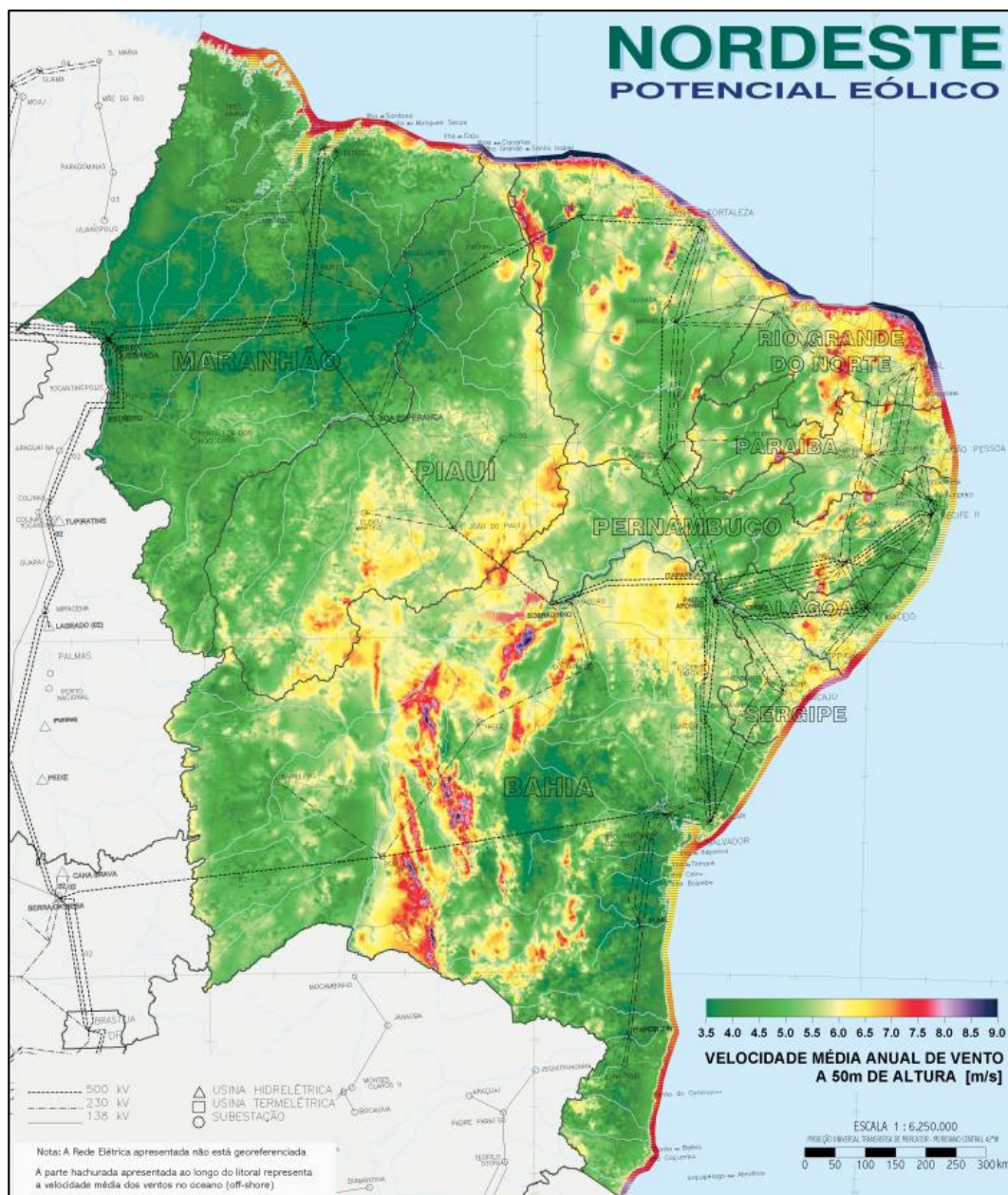


Figura 16: Mapa de potencial eólico da região Nordeste do Brasil [5]

Para o desenvolvimento do projeto é necessário, antes de mais nada, conhecer os elementos básicos para a instalação de um aerogerador, assim como as fases presentes na elaboração do projeto.

Os elementos básicos para instalação de um gerador eólico são: a turbina eólica, a torre de instalação, as baterias e o inversor. [6] Já os elementos mecânicos encontrados nos sistemas eólicos são: rotor, eixos de baixa e alta rotações, sistemas de apoio, sistema de multiplicação, sistemas de frenagem, gerador e torre de sustentação. Uma ilustração esquemática de um aerogerador pode ser vista na [Figura 17](#). [12]

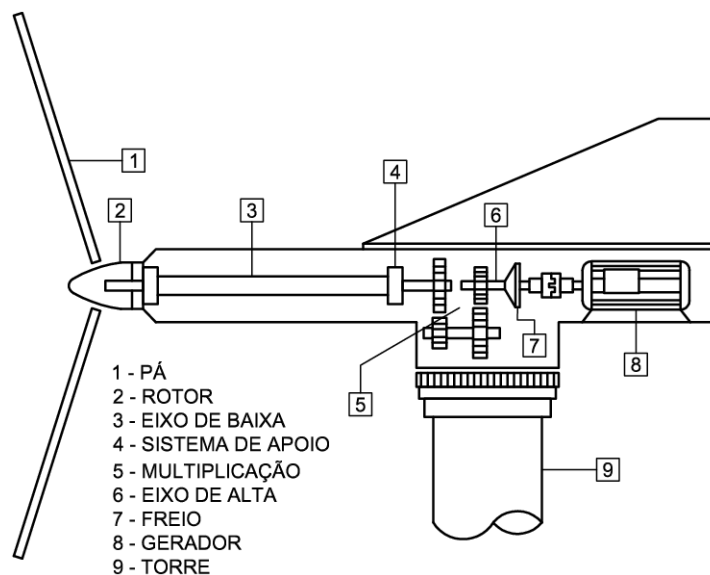


Figura 17: Disposição básica dos componentes mecânicos de um aerogerador [12]

O escopo do presente trabalho engloba o dimensionamento e especificação de toda parte mecânica do aerogerador, já o dimensionamento dos componentes elétricos (cabos, baterias, inversores, etc.), assim como a parte civil da torre e toda a instrumentação e automação não fazem parte do escopo.

Para o desenvolvimento do projeto de um aerogerador várias características operacionais, de controle e o desempenho dos equipamentos de conversão de energia mecânica em energia elétrica são adotados como dados de entrada do projeto do aerogerador. A metodologia abrange vários aspectos necessários ao projeto da turbina eólica e estão organizados conforme o fluxograma da [Figura 18](#). [12]

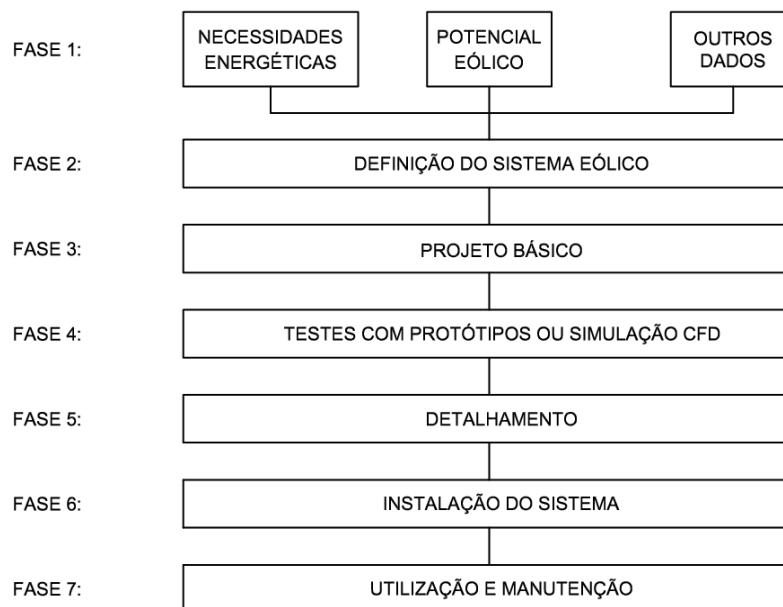


Figura 18: Passos para um projeto de um sistema eólico. Adaptado de [12]

A primeira fase consiste na determinação dos parâmetros necessários à definição do sistema eólico mais adequado. São levantadas as necessidades energéticas e o potencial eólico da região para verificar se são compatíveis. Também são levantadas as informações sobre o regime dos ventos, topografia do terreno, geografia e variações climáticas. É uma fase de longa duração, com visitas de campo, medições e tratamento estatístico de dados. [12] Antes de se passar para a segunda etapa, devemos fazer uma análise de viabilidade econômica do empreendimento. Nesta etapa ainda não temos muita informação, por isso devemos consultar fornecedores de equipamentos e/ou projetos similares para esta estimativa.

Na segunda fase é definida a configuração mais adequada do sistema e suas principais características de operação. Nesta fase são definidas as seguintes informações:

**Geometria:** diâmetro do rotor, número de pás do rotor, altura da torre, ângulo de passo, perfil aerodinâmico das pás e solidez e corda; [12]

**Condições de operação:** diagramas do sistema, razão de multiplicação e outras características necessárias ao gerador. [12]

A terceira fase consiste no projeto básico do sistema propriamente dito, quando deve-se dimensionar e especificar os principais componentes mecânicos. É uma fase de média duração onde são definidos geometria e materiais para fabricação dos elementos mecânicos e os equipamentos adequados, de preferência, já disponíveis no mercado nacional. [12] O limite

do nosso projeto é justamente a fase 3, sendo o objetivo deste trabalho a entrega da engenharia básica do aerogerador no estado da arte.

A fase quatro consiste em simulações em *softwares* específicos de Dinâmica dos Fluidos Computacional (em inglês: *Computational Fluid Dynamics* – CFD) que substituem os dispendiosos testes com protótipos em centros de pesquisa ou estações de testes. É nessa fase que se valida o projeto básico ou, se necessário, faz-se as revisões para a otimização do projeto.

Após validado o projeto através de simulações computacionais, seguimos para a próxima fase que é a elaboração do projeto executivo do aerogerador. Nele são desenvolvidos todos os desenhos de conjunto, detalhes construtivos e listas de materiais necessários para a fabricação do aerogerador.

Após todo o projeto definido no papel, a fase 6 destina-se exclusivamente à instalação do sistema no local de trabalho. É uma fase com duração definida, caso seja desenvolvido um cronograma eficiente. Dessa forma, não deve apresentar maiores problemas. [12]

A última fase é a de utilização do sistema para transformação da energia eólica em energia elétrica, realizando assim um trabalho útil à comunidade servida pelo sistema. Nele se deve prever um programa de manutenção preventiva e corretiva a fim de atingir a máxima durabilidade. A vida de um sistema é estimada em, no mínimo, 20 anos. [12]

### **3.1 Dados de Entrada do Projeto**

Em instalações sem acesso a rede elétrica convencional, deve se ter uma velocidade média anual de, no mínimo 4 m/s para a viabilidade de instalação de uma turbina eólica. [6] Analisando o mapa do potencial eólico da região Nordeste ([Figura 16](#)), onde é mostrada a média anual de vento a 50 m de altura, assumiremos que o aerogerador será instalado em um local com velocidade média de 9 m/s para tornar o projeto economicamente atrativo. A necessidade de potência da instalação gira em torno de 40 kW.

Atualmente, o modelo de turbinas com eixo horizontal e três pás tem evidente superioridade tecnológica em relação as demais. Elas dominam o mercado e possuem a vantagem de ter uma compreensão mais fácil do momento de inércia do rotor, além de ser

mais silenciosa e ter melhor estética. [4] Por esse motivo, este será o modelo adotado para o projeto.

Antes de começarmos os cálculos é necessário entender os conceitos de eficiência de uma turbina. As duas próximas seções descrevem, respectivamente, a eficiência máxima teórica e a eficiência real de uma turbina eólica.

### 3.2 Limite de Betz

Betz desenvolveu sua Teoria Global de Eficiência para Turbinas Eólicas no Instituto de Göttingen na Alemanha (Le Gourières Désiré, 1982), onde assumia que o rotor das turbinas era um conversor de energia ideal, ou seja:

- não possui cubo;
- possui número infinito de lâminas e não resultariam em nenhuma resistência ao vento que o atravessa;
- toda a carga de vento sobre a área varrida pelo rotor eólico é uniforme e perpendicular a ele. [13]

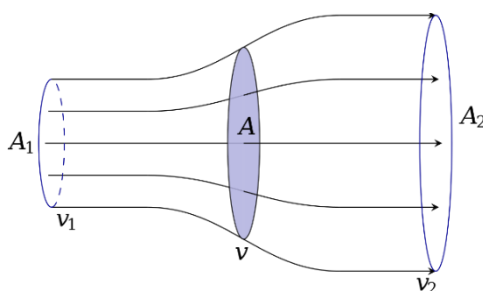


Figura 19: Esquema do fluxo de ar através da área de um disco [13]

Em um modelo ideal, consideramos um cilindro de ar, como ilustrado na [Figura 19](#), de área  $A_1$ , como vento de velocidade  $v_1$  entrando no cilindro e passando pela área  $A$  com velocidade  $v$  e deixando o cilindro com velocidade  $v_2$  em uma área  $A_2$ . Com esse modelo, Betz encontrou qual poderia ser o máximo de energia retirada dos ventos.

A massa do fluxo de ar, com densidade  $\rho$  através do rotor pode ser determinada por:

$$M = \rho Av$$

Pela conservação do momento, temos a força que age pela área do rotor que pode ser encontrada pela equação a seguir:

$$F = M(v_1 - v_2)$$

Da conservação da energia, temos a potência gerada pela passagem do vento pelas pás que pode ser encontrada pela equação a seguir:

$$P = M/2 (v_1^2 - v_2^2) = Fv = Mv(v_1 - v_2) = \rho Av^2(v_1 - v_2)$$

Tomando-se:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

Derivando-se a equação acima em relação a  $v^2$ , teremos:

$$dv/dv_2 = 1/2$$

Agora podemos encontrar a velocidade  $v_2$  onde teremos a potência máxima, mantendo-se a velocidade  $v_1$  constante:

$$dP/dv_2 = 0 = \rho A[v(v_1 - v_2) - v^2]$$

$$v_1 - v_2 - v = v_1/2 - 3v_2/2 = 0$$

$$v_2 = v_1/3$$

$$v = 2v_1/3$$

Logo, a potência máxima pode ser conseguida pela equação a seguir:

$$P = \rho Av^2(v_1 - v_2) = 2(2/3)^3 \frac{\rho Av_1^3}{2} = \frac{16}{27} \frac{\rho Av_1^3}{2}$$

Sendo assim, Betz determinou que a máxima eficiência aerodinâmica do rotor de uma turbina eólica estava limitada a 59,3% da energia disponível pelo vento. [14]

A partir do Limite de Betz podemos escrever a equação da potência máxima extraída do vento, onde teremos a velocidade a jusante igual a um terço da velocidade a montante do rotor: [15]

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2} \rho Av^3 * 0,59$$

### 3.3 Eficiência Real do Aeroogerador

O primeiro estágio de conversão acontece no rotor, responsável pela transformação da energia cinética proveniente dos ventos em energia mecânica. Os demais estágios são a transmissão, onde ocorre a adequação das velocidades de rotação e o gerador, responsável pela conversão de energia mecânica em eletricidade. [16] A Tabela 3 mostra a média de eficiência em todos os estágios de conversão de energia.

Tabela 3: Valores médios da eficiência de conversão nos estágios do aeroogerador [16]

Estágios de conversão	Eficiência
Rotor	40 %
Transmissão	95 %
Gerador	95 %
Rajadas de vento e orientação da turbina	95 %
Média geral	35 %

Atualmente, uma turbina de um aeroogerador bem desenhado e os demais dispositivos bem dimensionados consegue ter de 25% a 40% de eficiência [17], sendo 35% um valor médio atingido pelas atuais tecnologias. [16] Alguns fabricantes oferecem modalidades *turn-key* (empregada integral) onde prometem uma eficiência total do sistema de 42%. [8]

Para os cálculos seguintes, adotaremos um valor conservador de 35%. Logo podemos calcular a área do rotor através da fórmula:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 * \eta$$

$$A = \pi R^2$$

Onde:

P – potência [W];

$\rho$  - densidade do ar [kg/m<sup>3</sup>];

A – área varrida pelas pás [m<sup>2</sup>];

v – velocidade do vento [m/s];

$\eta$  – Eficiência do sistema como um todo;

R – raio do rotor [m]

Assumindo que a densidade do ar não sofre variações significativas, consideramos o valor de 1,225 kg/m<sup>3</sup>.

Através de cálculos preliminares, estimamos que precisaremos de uma turbina com um diâmetro de aproximadamente 20 m. Há uma recomendação global entre os fabricantes de rotores de que a altura da torre seja 1,5 a 2 vezes o diâmetro do rotor. [4] Sendo assim, consideramos a instalação do aerogerador no topo de uma torre que possui 30 m de altura. Como no local escolhido temos uma velocidade de 9 m/s a 50 m de altura, precisamos corrigir este valor para 30 m de altura. Utilizaremos a equação apresentada na [Seção 2.1.2](#):

$$v_{(z)} = v_{(z_0)} \left( \frac{h_{(z)}}{h_{(z_0)}} \right)^n = 9 * \left( \frac{30}{50} \right)^{0,143} = 8,4 \text{ m/s}$$

Agora podemos calcular a potência instalada do gerador:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 * \eta = 0,5 * 1,225 * \pi * 10^2 * 8,4^3 * 0,35 \cong 40 \text{ kW}$$

A seguir os dados de projeto que já foram definidos:

- Tipo de aerogerador: eixo horizontal com três pás
- Velocidade de projeto: 8,4 m/s;
- Diâmetro do Rotor: 20 m;
- Altura da Torre: 30 m;
- Potência instalada: 40 kW

A [Figura 20](#) mostra um desenho esquemático do aerogerador.

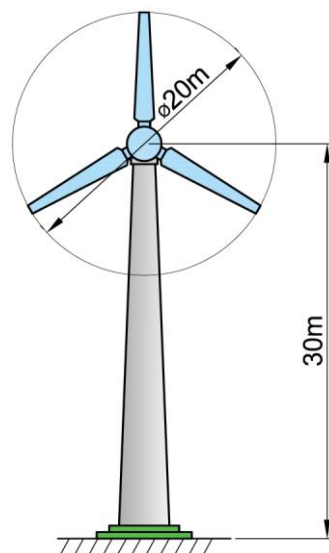


Figura 20: Configuração do aerogerador [autores]

### 3.4 Análise de Viabilidade Econômica do Projeto

Com essas informações levantadas, temos que fazer uma análise de viabilidade econômica preliminar do projeto. Nesta etapa teremos uma estimativa mais grosseira do valor do equipamento, pois ainda não temos nada detalhado, somente para analisar se o empreendimento é rentável ou não, a fim de que não gastemos esforço em um projeto que não tenha viabilidade econômica. Devemos nos basear em custos praticados em projetos similares e/ou informações de fornecedores. Precisamos tomar um certo cuidado nessa estimativa para não descartarmos um projeto viável antes mesmo de começarmos. Após o projeto básico precisamos revisitar esta análise para ratificarmos ou retificarmos os preços antes da continuidade do projeto.

Para a tomada de decisão de continuar ou não com o projeto, usaremos o instrumento de gestão financeira Fluxo de Caixa, que é uma ferramenta de fácil elaboração que projeta todas as entradas (receitas) e saídas (despesas) de recursos do projeto, onde podemos analisar a sensibilidade do projeto, calcular a lucratividade, a rentabilidade, o prazo de retorno e o ponto de equilíbrio do investimento. [18]

Para iniciarmos a análise necessitamos de um desembolso inicial que seria o valor do equipamento já instalado e operando. Para isto foi feita uma estimativa conforme [Tabela 4](#):

Tabela 4: Estimativa preliminar do custo do sistema eólico [autores]

<b>Elemento</b>	<b>Valor</b>
Engenharia	R\$ 30.000,00
Pás	R\$ 45.000,00
Hub	R\$ 10.000,00
Eixo	R\$ 7.000,00
Acoplamento	R\$ 2.000,00
Mancais	R\$ 5.000,00
Caixa Multiplicadora	R\$ 50.000,00
Freio	R\$ 3.000,00
Gerador	R\$ 13.000,00
Servo Motor	R\$ 5.000,00
Rolamento da Nacele	R\$ 10.000,00
Suporte	R\$ 40.000,00
Torre	R\$ 80.000,00
Carenagem	R\$ 8.000,00
Civil	R\$ 30.000,00
Elétrica	R\$ 40.000,00
Instrumentação + Automação	R\$ 20.000,00
Montagem + Supervisão	R\$ 100.000,00
<b>Total</b>	<b>R\$ 498.000,00</b>

A vida útil de um aerogerador gira em torno de 20 anos, [4] logo a estimativa será feita para os seguintes 20 anos após o investimento. As entradas serão os valores anuais economizados na conta de energia elétrica, baseada nos preços praticados pela concessionária [19] que pode ser calculado multiplicando-se a potência nominal da turbina, o fator de capacidade, o preço do kWh e o período de tempo (um ano). A fator de capacidade de uma turbina eólica varia na faixa de 40 a 50%. [4] Usaremos 40% como referência. Assim teremos uma entrada anual de:

$$Entrada = FC * P * t * V = 0,4 * 40 * 8760 * 0,65 = R\$ 91.104/ano$$

Sendo:

FC – fator de capacidade [%];

P – potência nominal do aerogerador [kW];

t – período de tempo [h]

V – preço de energia elétrica [R\$/kW]

As saídas serão os custos com manutenção que podem que não devem passar de 2 a 3% do custo de investimento. [4] Por se tratar de uma estimativa preliminar não existe a necessidade de um cálculo aprofundado neste momento, logo consideraremos 2% nos primeiros 10 anos e 3% nos anos seguintes.

$$Saídas_{1-10} = 0,02 * 91104 = R\$ 1.822$$

$$Saídas_{11-20} = 0,03 * 91104 = R\$ 2.733$$

Logo, o fluxo de caixa pode ser visto na [Figura 21](#):

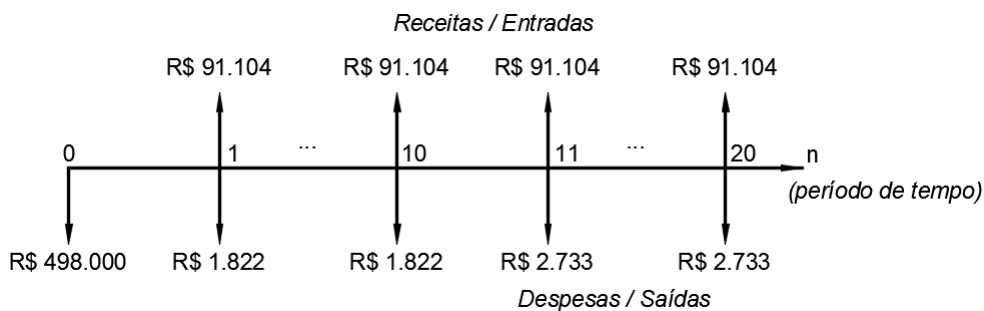


Figura 21: Fluxo de caixa do projeto [autores]

Para analisar a viabilidade econômica do projeto usaremos o Valor Presente Líquido (VPL), por ser a metodologia de análise de investimento mais usada, onde o projeto é medido em termo absolutos. [18]

Antes de mais nada precisamos definir a nossa Taxa Mínima de Atratividade (TMA) que nada mais é que o mínimo que um investidor deseja ganhar ou o máximo que um tomador de empréstimo deseja pagar. [18] Adotaremos este valor como 10% que é perfeitamente coerente para um empreendimento rural.

Agora precisamos trazer todas as entradas e saídas para o valor presente. Para o primeiro ano teremos:

$$PV = FV / (1 + i)^n = \frac{91.104 - 1.822}{(1 + 0,1)^1} = R\$ 81.165$$

Sendo:

PV – valor presente;

FV – valor futuro;

i – taxa;

n – período.

A taxa (*i*), neste caso, será a própria TMA. Este cálculo deverá ser feito para os próximos 19 anos. Logo o somatório dos valores presente dos 20 anos será:

$$\Sigma PV = R\$ 757.949$$

Agora podemos calcular a nossa VPL, que será de:

$$VPL = \Sigma PV - II = 757.949 - 498.000 = R\$ 249.949$$

Sendo:

VPL – valor presente líquido;

$\Sigma PV$  – somatório dos valores presentes;

II – investimento inicial.

Podemos agora calcular o Índice de Lucratividade Líquida (ILL) que é um índice que mede a relação do valor recebido pelo custo do investimento. [18]

$$ILL = \Sigma PV / II = 757.949 / 498.000 = 1,52$$

A Taxa interna de Retorno (TIR) é a taxa que faz com que o resultado da VPL seja zero. O projeto só será viável se a TIR for maior que a TMA. [18] Para evitarmos o uso de técnicas de interpolação cujos resultados não são muito precisos, usaremos a função homônima do *Microsoft Excel* que nos traz um resultado preciso. Logo o resultado da TIR será de:

$$TIR = 17\%$$

Baseado nesta análise preliminar o projeto mostrou-se economicamente atrativo. Sendo assim, daremos continuidade ao desenvolvimento do projeto.

### 3.5 Dimensionamento das Pás

Uma das partes mais importantes no projeto do aerogerador é o dimensionamento das pás. Sendo assim, iremos gastar um pouco mais de tempo nesta fase. Para começarmos o dimensionamento é importante conhecer o valor da razão da velocidade na ponta da pá (em inglês: *tip-speed ratio* – TSR), pois ele indica a magnitude ideal com que se devem girar as pás em relação ao vento incidente alcançando assim o melhor coeficiente de potência. Trata-se da velocidade na ponta da pá de uma turbina relacionada à velocidade do vento incidente. O valor do TSR depende do número de pás de uma turbina. O desempenho ótimo para um rotor de três pás ocorre na faixa em que o TSR estão entre 7 e 8. [4] A [Figura 22](#) mostra a relação entre o coeficiente de potência e a razão da velocidade na ponta da pá para diversos tipos de turbinas.

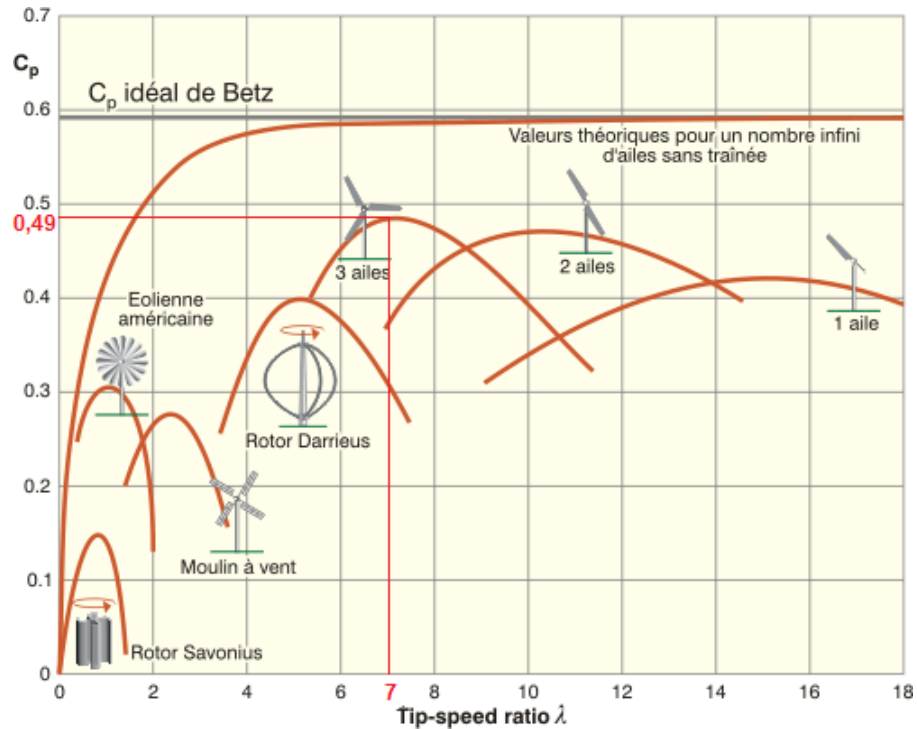


Figura 22: Relação entre coeficiente de potência e TSR para diversos tipos de turbina [20]

Agora podemos calcular a velocidade angular das pás do rotor através da fórmula:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} = 7 = \frac{\omega * 10}{8,4} \Rightarrow \omega = 5,9 \text{ rad/s} = 56 \text{ rpm}$$

Onde:

$\lambda$  – razão de velocidade de ponta de pá;

$\omega$  – velocidade angular das pás do rotor [rad/s];

R – raio do rotor [m];

v – velocidade do vento [m/s]

Precisamos, antes de mais nada, definir o perfil aerodinâmico das pás. Geralmente são os mesmos aerofólios desenvolvidos para aeronaves, como por exemplo os da série alemã Göttingen e os da série americana NACA. Os primeiros são raramente usados nos dias de hoje e foram substituídos pela série americana. Novos aerofólios vêm sendo desenvolvidos exclusivamente para turbinas eólicas nos Estados Unidos e na Suécia, das séries LS, SERI e FFA. [4] O objetivo do trabalho não é a comparação entre os aerofólios e nem a seleção do melhor modelo aerodinâmico para o projeto, o que seria muito dispendioso e levaria em consideração uma modelagem computacional complexa. Diversos estudos foram analisados [21], [22] e não há um consenso sobre qual o melhor perfil aerodinâmico para turbinas eólicas. Cada caso com suas particularidades deve ser estudado para a seleção do melhor

perfil. Além do mais, a influência do tipo de aerofólio no coeficiente de potência é relativamente pequena, considerando que ele seja aerodinamicamente de boa qualidade e tenha superfície suave. [4] Nos diversos estudos analisados, os perfis da série NACA, especialmente da série 44xx, mostraram-se bastante satisfatórios para sistemas eólicos. Optamos pelo perfil NACA 4412 por questões estruturais. Na [Figura 23](#) podemos ver a representação do perfil supracitado.

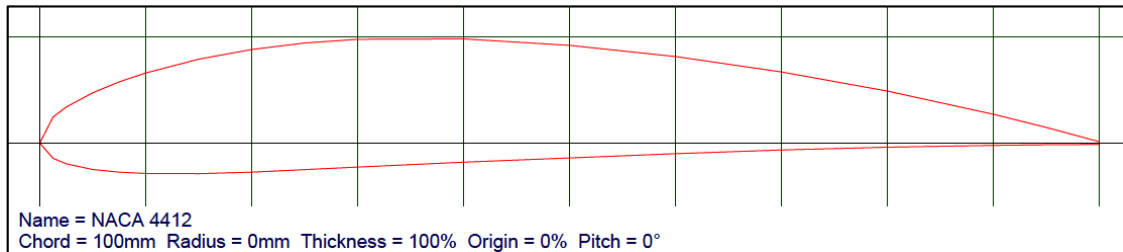


Figura 23: Perfil NACA 4412 [24]

A solidez também tem efeito na performance da turbina e precisa ser definida. Ela nada mais é que a razão entre a área total da pá e a área varrida pela pá. Sob uma faixa variável desse parâmetro, a eficiência da turbina segue inalterada. [4] Por esse motivo devemos levar em consideração, além do valor ótimo de solidez, questões estruturais e de facilidade de fabricação das pás. O gráfico da [Figura 24](#) sugere o valor de solidez para um determinado valor de TSR.

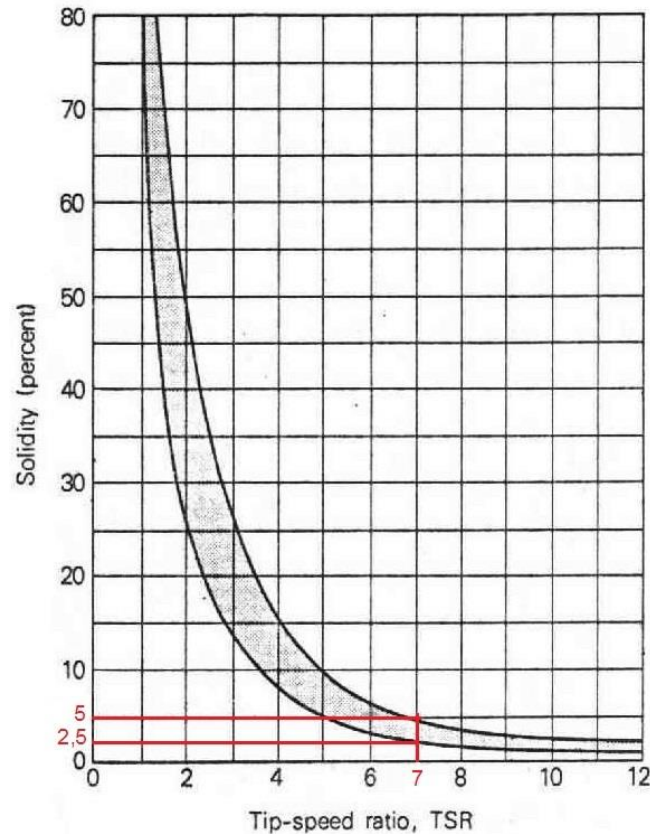


Figura 24: Relação entre solidez e TSR [23]

Analisando o gráfico da [Figura 24](#), para um TSR de 7 teríamos valores de solidez variando de 2,5% a 5%. Analisando diversos estudos e projetos de fornecedores, percebemos que, como regra prática, as pás dos aerogeradores desse porte têm uma solidez variando do seu valor mínimo na ponta até o seu valor máximo na parte mais próxima do cubo. [23] Este tipo de modelagem será vantajoso do ponto de vista estrutural, visto que a maior magnitude dos esforços está situada na raiz da pá. [12] Sendo assim, para os futuros cálculos consideraremos uma solidez média de 3,75%.

Podemos agora calcular a corda do perfil através da equação:

$$\sigma = \frac{n * l * c}{\pi * R^2} \Rightarrow c = \frac{\sigma * \pi * R^2}{3 * l} = \frac{0,0375 * \pi * 10^2}{3 * 9,25} = 0,42 \text{ m}$$

$$l = R - R_{cubo} = 10 - 0,75 = 9,25 \text{ m}$$

Onde:

$\sigma$  – solidez;

$c$  – corda do perfil [m];

$n$  – número de pás;

$l$  – tamanho das pás [m];

R – raio do rotor [m];

$R_{\text{cubo}}$  – raio do cubo [m]

O parâmetro adimensional mais importante para definir as características das condições de fluxo de um fluido é o número de Reynolds [21] que pode ser calculado pela fórmula a seguir:

$$Re = \frac{v * c}{\gamma} = \frac{8,4 * 0,42}{1,5 * 10^{-5}} = 235200$$

Onde  $\gamma$  é viscosidade cinemática em [m<sup>2</sup>/s].

Agora temos condições de definir os ângulos de passo  $\beta$  (inclinação do eixo de referência em relação ao plano de rotação), o ângulo de ataque  $\psi$  (ângulo que a velocidade resultante faz com o plano de rotação) e o ângulo de incidência  $\alpha$  (ângulo entre o eixo de referência da pá e a direção aparente do vento). [4] Esses ângulos podem ser observados na [Figura 25](#).

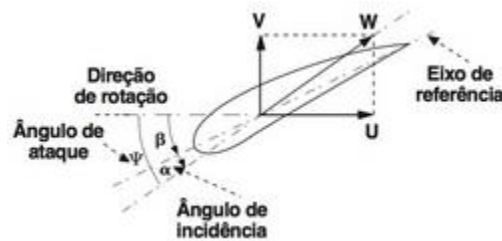


Figura 25: Direção do vento sobre a seção de uma pá [4]

Através da ferramenta online *airfoil tools* [24] conseguimos definir o ângulo ótimo de ataque onde se apresenta a melhor razão de sustentação por arrasto,  $\alpha = 6^\circ$  e gerar os gráficos para os coeficientes de sustentação (Cl) e de arrasto (Cd) em função deste ângulo.

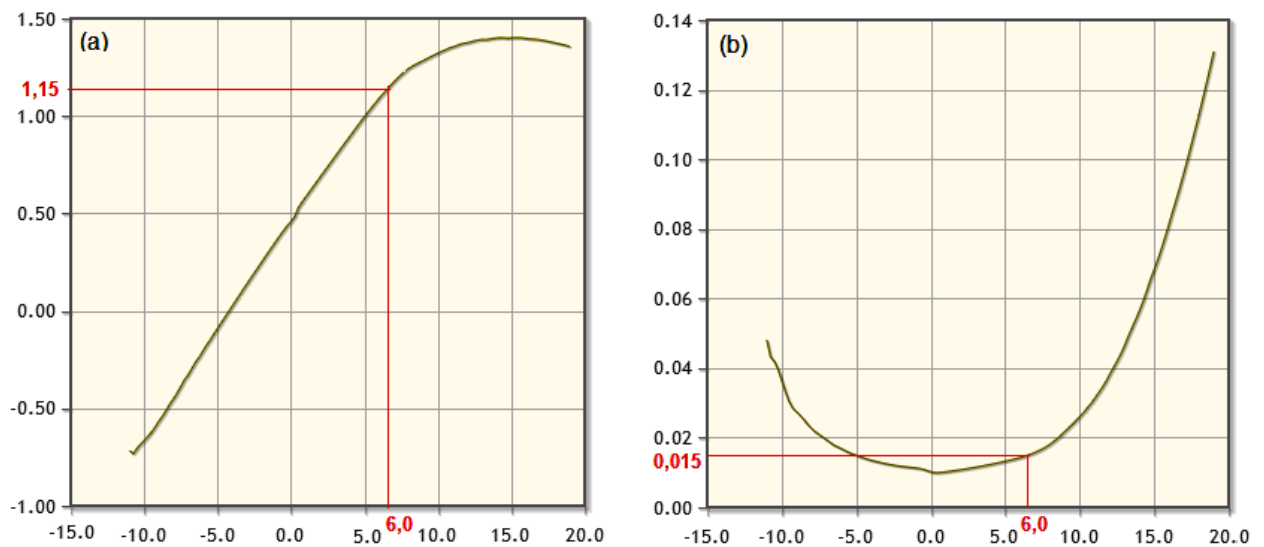


Figura 26: (a)  $C_l$  em função de  $\alpha$ ; (b)  $C_d$  em função de  $\alpha$  [24]

Baseado nos gráficos da Figura 26, determinamos os coeficientes de sustentação e arrasto como, respectivamente, 1,15 e 0,015.

Precisamos agora calcular a velocidade resultante do vento através da fórmula:

$$W = \sqrt{v^2 + (\omega R)^2} = \sqrt{8,4^2 + (5,9 * 10)^2} = 59,6 \text{ m/s}$$

Sendo:

$W$  – velocidade resultante na pá [m/s];

$v$  – velocidade do vento [m/s];

$\omega R$  – velocidade linear da pá [m/s]

Agora podemos calcular os ângulos de ataque e de passo:

$$\psi = \text{arc tang} \left( \frac{v}{\omega R} \right) = \text{arc tg} \left( \frac{8,4}{5,9 * 10} \right) = 8,1^\circ$$

$$\beta = \psi - \alpha = 8,1 - 6 = 2,1^\circ$$

Dentre os materiais mais comuns para a confecção das pás estão a madeira, a fibra de vidro, a resina epóxi, alumínio, duralumínio, aços, entre outros. [12] Optaremos pela fibra de vidro reforçado, pois este é um material leve ( $\mu = 2500 \text{ kg/m}^3$ ) e resistente e está presente na maioria dos aerogeradores modernos [8] podendo seu limite de escoamento ( $S_y$ ) chegar a 4750 MPa nos materiais mais nobres dessa família. [25]

Para otimização das pás utilizaremos o software *opensource* QBlade, que é capaz de desenhar e simular de forma confiável rotores de turbinas HAWT e VAWT utilizando algoritmos BEM e DMS, todos esses validados através de testes experimentais. [26] Para a otimização do rotor utilizamos o método de Schmitz que retornou um rotor mais simples e mais leve em relação ao método de Betz. A Figura 27 mostra a tela do programa durante o processo de otimização.

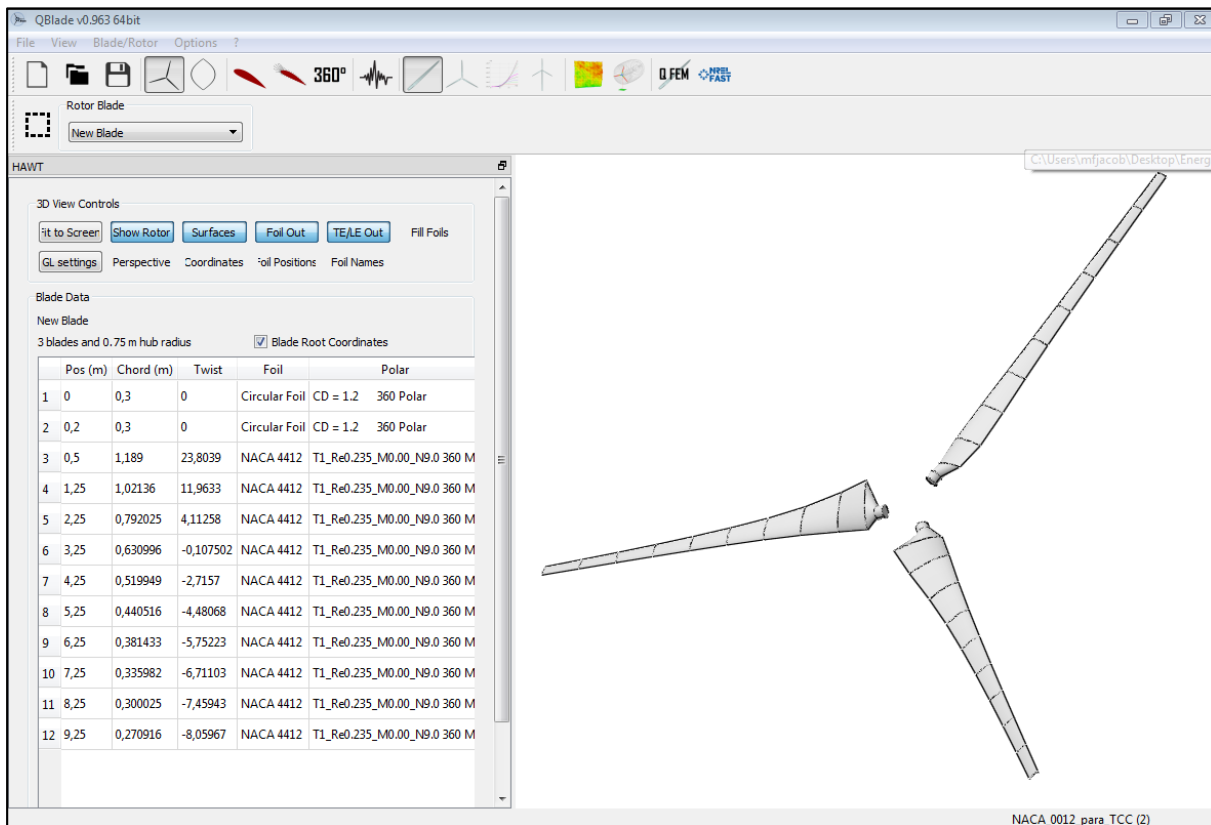
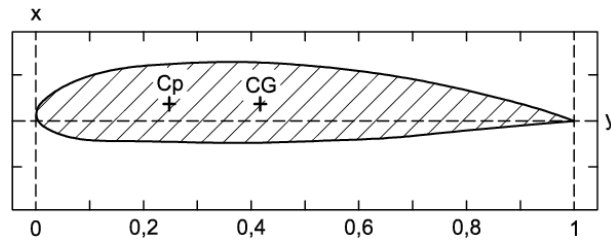


Figura 27: Processo de modelagem e simulação do rotor através do software QBlade [autores]

Após o processo de modelagem chegamos a uma geometria otimizada de pás para os parâmetros definidos, diferente daquela idealizada antes da utilização do programa. Para esta nova geometria, alguns parâmetros sofreram alterações, portanto foi preciso redefinir alguns cálculos para continuar o desenvolvimento. A corda média passou do valor de 0,42 m para 0,59 e conseqüentemente o número de Reynolds subiu de 235200 para 329700. Os demais parâmetros seguem inalterados.

Agora precisamos mensurar os esforços para verificar se modelo desenhado suportará tais grandezas. Os principais esforços atuantes sobre as pás são a tensão normal de tração devido à força centrífuga, a tensão normal de flexão, devido a à combinação das cargas aerodinâmicas e peso das pás e a tensão tangencial de cisalhamento, devido ao esforço

cortante. Tensões tangenciais provenientes do esforço de torção do eixo devem ser anuladas posicionando o eixo no centro de pressão do perfil, que está situado a aproximadamente 25% da corda, conforme ilustrado na [Figura 28](#). [12]



(Legenda: Cp – Centro de pressão; CG – Centro de gravidade)

Figura 28: Perfil NACA 4418 [12]

Agora podemos calcular a força axial ( $F_x$ ) e o Torque (T) atuantes nas pás através da teoria de Glaubert [4]:

$$F_x = 1/2 * \rho * W^2 * n * c (Cl * \cos \psi - Cd \sen \psi)(R - R_{cubo})$$

$$F_x = 1/2 * 1,225 * 59,6^2 * 3 * 0,59 (1,15 * \cos 8,1 - 0,015 * \sen 8,1)(10 - 0,75) \\ = 40 \text{ kN}$$

$$T = 1/4 * \rho * W^2 * n * c * (Cl * \sen \psi - Cd * \cos \psi)(R^2 - R_{cubo}^2)$$

$$T = 1/4 * 1,225 * 59,6^2 * 3 * 0,59 (1,15 * \sen 8,1 - 0,015 * \cos 8,1)(10^2 - 0,75^2) \\ = 28 \text{ kNm}$$

Sendo:

T – torque no rotor [Nm];

$F_x$  – força axial no rotor [N];

$\rho$  – massa específica do ar [kg/m<sup>3</sup>];

W – velocidade relativa [m/s];

n – número de pás;

c – corda da pá do rotor [m];

Cl – coeficiente de sustentação;

Cd – coeficiente de arrasto;

R – raio do rotor [m];

$R_{cubo}$  – raio do cubo [m]

Podemos calcular a peso das pás através do volume ( $V \cong 0,3 \text{ m}^3$ ) de cada pá obtido do modelo produzido pelo *software* QBlade.

$$P = \mu * V * g = 2500 * 0,3 * 10 = 7500 \text{ N}$$

$$P_{dist} = P/l = 7500/9,25 = 811 \text{ N/m}$$

Sendo:

P – peso de uma pá [N];

$P_{dist}$  – Peso da pá por unidade de área [N/m];

$\mu$  – densidade do material da pá [ $\text{kg/m}^3$ ];

g – aceleração da gravidade [ $\text{m/s}^2$ ];

l – comprimento da pá [m]

Para facilitarmos os cálculos simplificaremos a geometria das pás para uma barra retangular de mesmo volume com a dimensão da base igual a corda. Uma análise do perfil das pás conforme o modelado seria dispendioso e necessitaria de uma modelagem computacional complexa, ao invés disso, utilizaremos um método conservador além de um alto coeficiente de segurança. A área do perfil para uma corda de 0,59 m é de 0,03  $\text{m}^2$ . Ficaremos assim com um perfil retangular com 0,59 m de base e 0,051 m de altura. Podemos agora calcular os esforços cortantes e os momentos fletores nas pás devido ao peso. Para isso consideraremos cada pá como uma barra engastada. Os diagramas de esforços cortantes e momentos fletores para estes tipos de esforços conforme [27] estão ilustrados na [Figura 29](#).

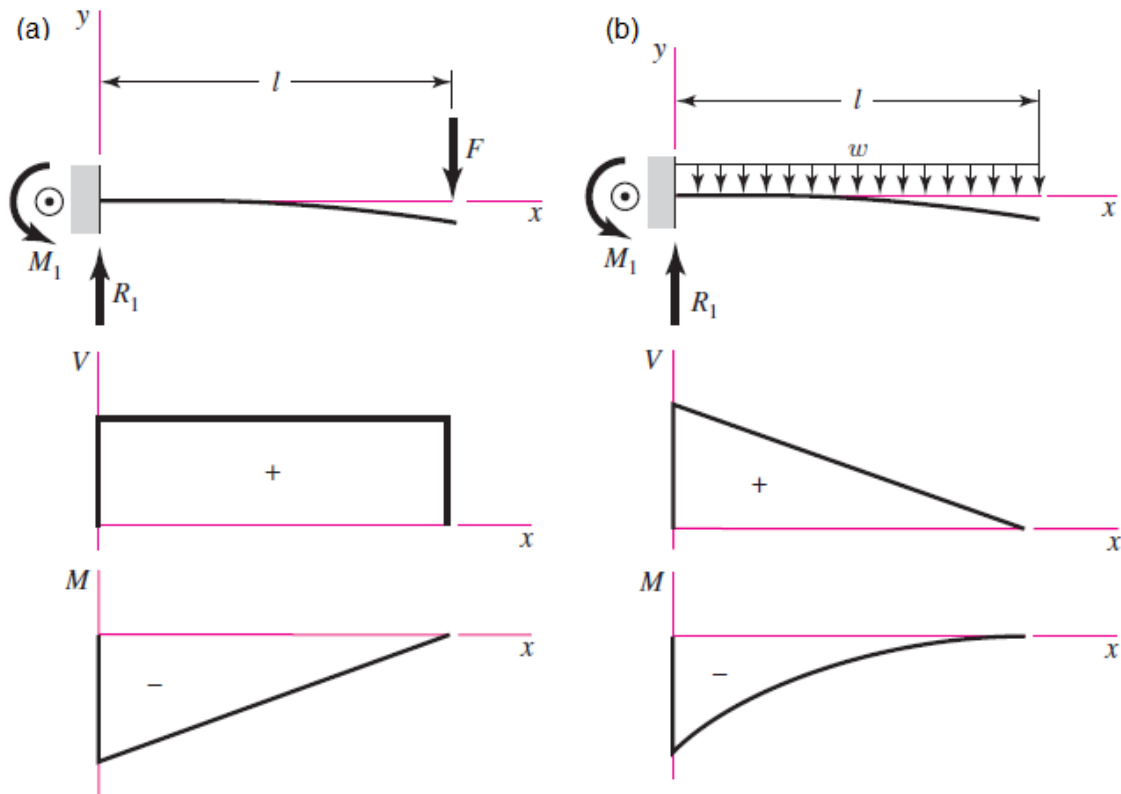


Figura 29: Diagramas dos esforços e momentos máximos nas pás devido a força axial (a) e ao peso (b) [27]

$$M_{axial} = \frac{F_x}{3} * l = 40000/3 * 9,25 = 123,3 \text{ kNm}$$

$$V_{axial} = \frac{F_x}{3} = 40000/3 = 13,3 \text{ kN}$$

$$M_{peso} = \frac{P_{dist} * l^2}{2} = 811 * 9,25^2 / 2 = 34,7 \text{ kNm}$$

$$V_{peso} = \frac{P_{dist} * l}{2} = 811 * 9,25 / 2 = 3,8 \text{ kN}$$

Sendo:

$M_{axial}$  – momento fletor máximo devido a força axial [Nm];

$V_{axial}$  – esforço cortante máximo devido a força axial [N];

$M_{peso}$  – momento fletor máximo devido ao peso [Nm];

$V_{peso}$  – esforço cortante máximo devido ao peso [N]

Precisamos agora calcular a tensões normal e cisalhante máximas:

$$y = \frac{h}{2} = \frac{0,051}{2} = 0,0255 \text{ m}$$

$$I = \frac{b * h^3}{12} = \frac{0,59 * 0,051^3}{12} = 6,5 * 10^{-6} \text{ m}^4$$

Sendo:

y – distância da linha neutra até a extremidade do perfil [m];

$I$  – momento de inércia do perfil [ $m^4$ ];

$b$  – base do perfil [ $m$ ];

$h$  – altura do perfil [ $m$ ]

$$\sigma_{peso} = \frac{M_{peso} * y}{I} = \frac{34700 * 0,0255}{6,5 * 10^{-6}} = 136,1 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{axial} = \frac{M_{axial} * y}{I} = \frac{123300 * 0,0255}{6,5 * 10^{-6}} = 483,7 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{total} = \sigma_{peso} + \sigma_{axial} = 136,1 + 483,7 = 619,8 \text{ MPa}$$

$$\tau_{peso} = 1,5 * \frac{V_{peso}}{A} = 1,5 * \frac{3800}{0,03} = 190 \text{ kPa}$$

$$\tau_{axial} = 1,5 * \frac{V_{axial}}{A} = 1,5 * \frac{13300}{0,03} = 665 \text{ kPa}$$

$$\tau_{total} = \tau_{peso} + \tau_{axial} = 190 + 665 = 885 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{mises} = \sqrt{\sigma_{total}^2 + 3 * \tau_{total}^2} = \sqrt{619800000^2 + 3 * 885000^2} = 619,8 \text{ MPa}$$

Sendo:

$\sigma_{peso}$  – tensão normal máxima devido ao peso [Pa];

$\sigma_{axial}$  – tensão normal máxima devido à força axial [Pa];

$\sigma_{total}$  – tensão normal máxima total [Pa];

$\tau_{peso}$  – tensão cisalhante máxima devido ao peso [Pa];

$\tau_{axial}$  – tensão cisalhante máxima devido à força axial [Pa];

$\tau_{total}$  – tensão cisalhante máxima total [Pa];

$\sigma_{mises}$  – tensão de Von Mises [Pa]

Agora podemos calcular o fator de segurança:

$$FS = \frac{Sy}{\sigma_{mises}} = \frac{3650}{619,8} \cong 6$$

As pás dos rotores estão sujeitas a rajadas ocasionais de ventos, aumentando a velocidade de rotação e, conseqüentemente, as cargas atuantes a valores elevados, sendo assim, é aconselhado um coeficiente de segurança com alto valor [12]. Por esse motivo

consideramos que as pás estão bem dimensionadas. O detalhamento da pá pode ser visto na [Figura 30](#).

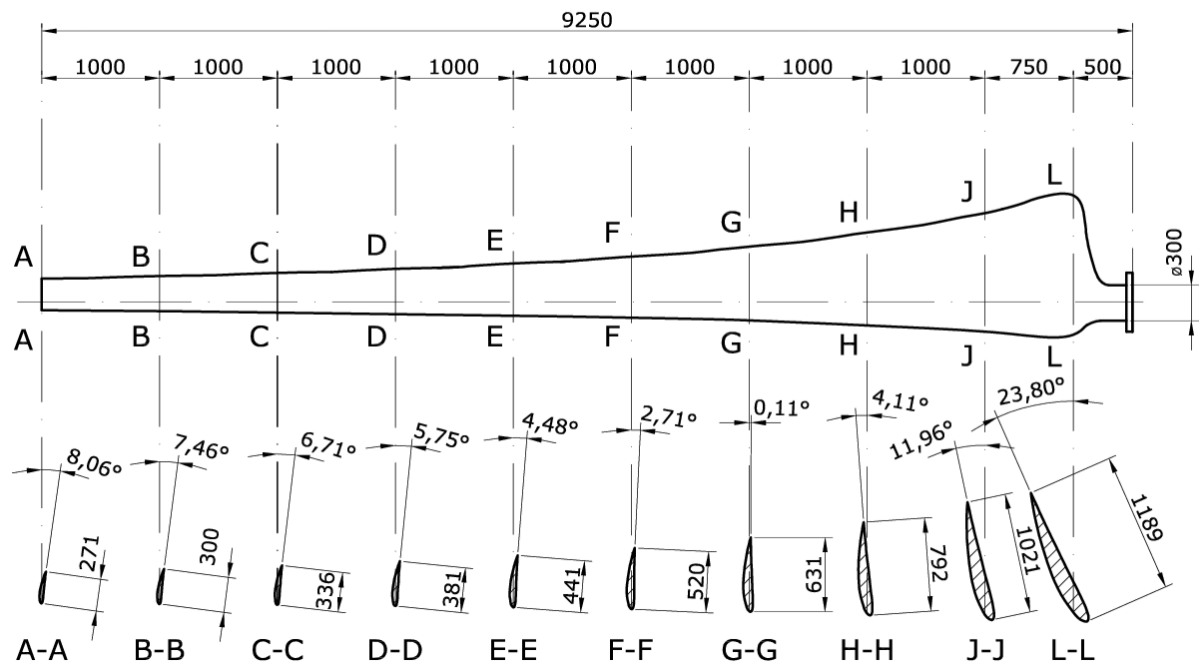


Figura 30: Detalhamento da pá do aerogerador [autores]

### 3.6 Dimensionamento do Cubo

O cubo, também conhecido como *hub*, tem a função de conectar as pás ao eixo de baixa rotação. Como já dito anteriormente, necessita de alta resistência mecânica e por isso sua estrutura deve ser uma peça única de aço ou uma liga de alta resistência. [1] Além disso precisa ser o mais leve possível para evitar o aumento exagerado da força centrífuga. [12] Após uma análise de custo-benefício, optamos pelo aço comercial SAE 1035 que possui um limite de escoamento ( $S_y$ ) de 460 MPa. [27] O detalhamento do cubo pode ser visto na [Figura 31](#).

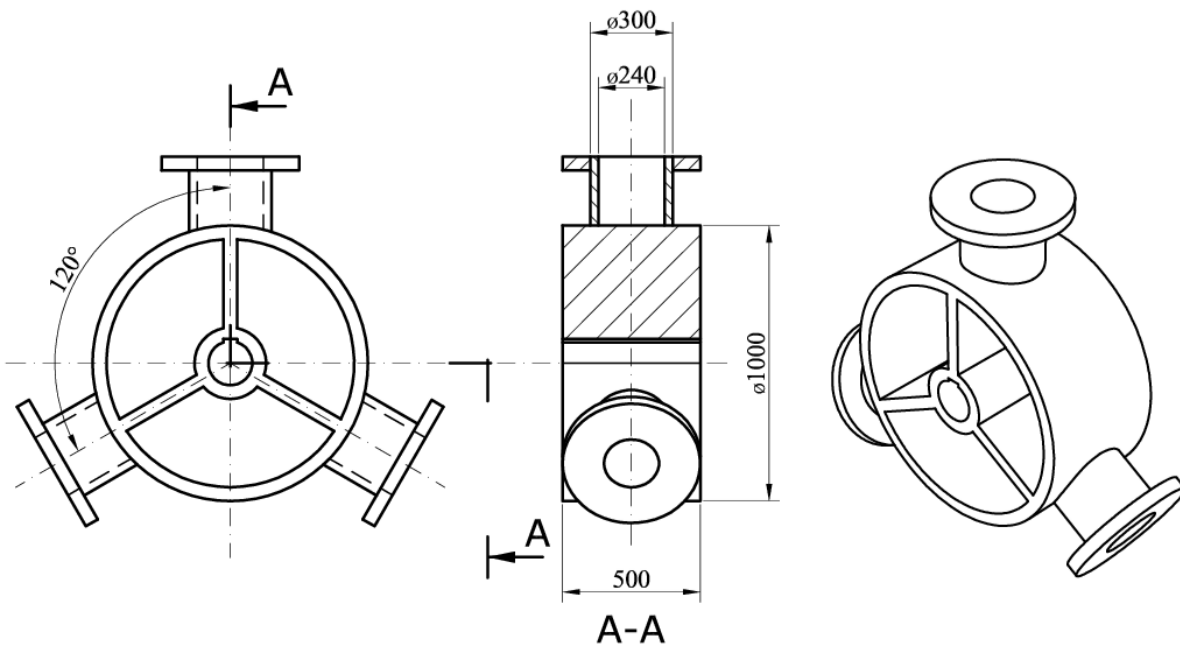


Figura 31: Detalhamento do cubo [autores]

A peça foi modelada em 3 dimensões no programa Autodesk AutoCAD e posteriormente detalhada com as suas dimensões básicas. O volume da peça apresentado pelo *software* é de aproximadamente 0,162 m<sup>3</sup>. Trata-se de um modelo básico, portanto eventuais reforços, furos para passagem dos parafusos e rasgos para chaveta deverão ser feitos na fase 5 (detalhamento).

Foram feitos os cálculos para verificar se a estrutura tubular que será ligada às pás através de flanges irá suportar a tensões provenientes destas pás.

$$y_{tubo} = \frac{D}{2} = \frac{0,3}{2} = 0,15 \text{ m}$$

$$I_{tubo} = \frac{\pi * (D^4 - d^4)}{64} = \frac{\pi * (0,3^4 - 0,24^4)}{64} = 0,00023 \text{ m}^4$$

Sendo:

$y_{tubo}$  – distância da linha neutra até a extremidade do tubo [m];

$I_{tubo}$  – momento de inércia do tubo [m<sup>4</sup>];

D – diâmetro externo do tubo [m];

d – diâmetro interno do tubo [m]

Agora repetimos todos os cálculos feitos para a estrutura da pá para os tubos de ligação do cubo às pás:

$$\sigma_{peso} = \frac{M_{peso} * y}{I} = 22,2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{axial} = \frac{M_{axial} * y}{I} = 79 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{total} = \sigma_{peso} + \sigma_{axial} = 101,2 \text{ Mpa}$$

$$\tau_{peso} = 1,5 * V_{peso} / A = 79,6 \text{ kPa}$$

$$\tau_{axial} = 1,5 * V_{axial} / A = 283,8 \text{ kPa}$$

$$\tau_{total} = \tau_{peso} + \tau_{axial} = 363,4 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{mises} = \sqrt{\sigma_{total}^2 + 3 * \tau_{total}^2} = 101,2 \text{ Mpa}$$

$$FS = \frac{Sy}{\sigma_{mises}} = \frac{460}{101,2} \cong 4,5$$

Logo, o cubo projetado resistirá aos esforços provenientes das condições de operação a que ele está sujeito.

Projetaremos uma cúpula frontal em fibra de vidro, para proteção do rotor, melhor desempenho aerodinâmico e melhor estética do aerogerador. O detalhe da cúpula pode ser visto na [Figura 32](#).

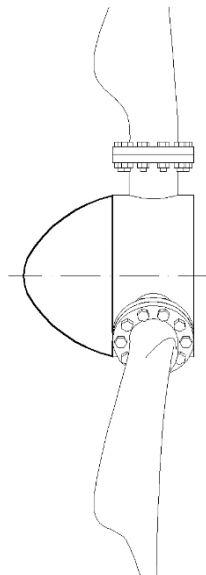


Figura 32: Cúpula frontal do cubo [autores]

### 3.7 Dimensionamento do Eixo de Baixa Rotação

O eixo de baixa rotação recebe toda a potência absorvida pelo rotor e é responsável por transmitir esta potência à caixa multiplicadora. O critério para escolha do material é simplesmente resistir aos esforços atuantes. [12] O seu dimensionamento deve ser feito baseado nos critérios de tensões de fadiga dos materiais para eixos rotativos submetidos a carregamento e torque uniformes. A Figura 33 ilustra um eixo de baixa rotação típico com suas principais dimensões e esforços. O aço escolhido para o eixo foi o SAE 1045 laminado a quente, que possui um limite de escoamento ( $S_y$ ) de 310 MPa e limite de resistência a tração ( $S_u$ ) de 570 MPa. [27]

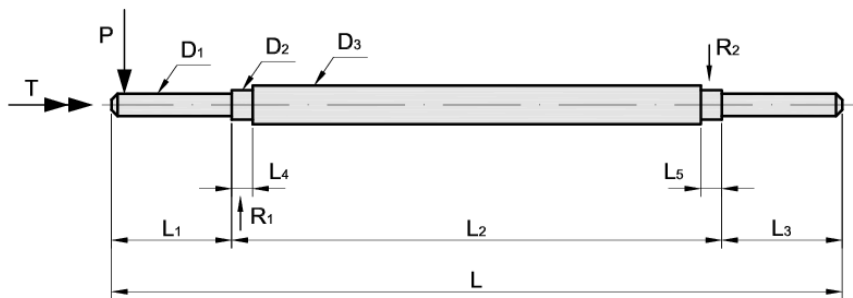


Figura 33: Eixo de baixa rotação. Adaptado de [12]

A menor seção ( $D_1$ ) é destinada a fixação do eixo ao cubo. Seu comprimento ( $L_1$ ) não deve ser maior que o cubo, sendo o seu valor cerca de 70% do comprimento do dele. [12]

$$L_1 = 0,7 * 0,5 = 0,35 \text{ m}$$

A seção intermediária ( $D_2$ ) destina-se ao apoio do eixo em rolamentos. Esta seção é a mais solicitada, portando o dimensionamento do eixo deve começar por ela. O seu comprimento ( $L_4$ ) será igual à largura do rolamento especificado. [12] Precisamos, antes de mais nada, saber o peso do rotor que será a soma dos pesos das pás e do cubo. Acrescentaremos 20% ao peso do cubo para futuros reforços, parafusos, chavetas e mudanças de geometria que poderão ocorrer na etapa de detalhamento.

$$P_{cubo} = \mu * V_{cubo} * g = 7800 * 0,162 * 10 = 12,6 \text{ kN}$$

$$P_{rotor} = 1,2 * P_{cubo} + 3 * P_{pá} = 1,2 * 12640 + 3 * 7500 = 37,7 \text{ kN}$$

O diâmetro da seção crítica do eixo de transmissão pode ser calculado pelo critério de Soderberg através da equação abaixo. [27] O fator de segurança (FS) não deve ser inferior a 2. [12]

$$D_2 = \sqrt[3]{\frac{32 * FS}{\pi} * \sqrt{\left(\frac{M}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{T}{S_y}\right)^2}}$$

Sendo:

FS – fator de segurança;

T – torque transmitido ao eixo [Nm];

M – momento fletor na seção [Nm];

S<sub>y</sub> – limite de escoamento do material [Pa];

S<sub>e</sub> – limite de resistência à fadiga para vida infinita [Pa]

Podemos calcular o Momento fletor na seção através da equação: [12]

$$M = P_{rotor} * L_1 = 37700 * 0,35 = 13,2 \text{ kNm}$$

O limite de resistência à fadiga para vida infinita pode ser calculado através das equações a seguir: [27]

$$S'_e = 0,5 * S_u = 0,5 * 570 = 285 \text{ Mpa}$$

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * k_g * S'_e = 0,8 * 0,98 * 0,987 * 1,0 * 0,63 * 1,0 * 315 \\ = 139 \text{ Mpa}$$

Sendo:

S'<sub>e</sub> – limite de resistência à fadiga para vida infinita do material [Pa]

S<sub>u</sub> – limite de resistência à tração [Pa]

k<sub>a</sub> – coeficientes de correção relativo ao acabamento superficial;

k<sub>b</sub> – fator de correção do tamanho da peça;

k<sub>c</sub> – fator de confiabilidade;

k<sub>d</sub> – fator de correção de temperatura;

k<sub>e</sub> – fator relativo a serviços pesados;

k<sub>f</sub> – correção de tensão devido a concentradores de tensão;

k<sub>g</sub> – correção da tensão devido às incertezas

Os coeficientes de correção modificam o limite de resistência à fadiga utilizados no projeto e foram obtidos através de alguns critérios: acabamento superficial usinado, confiabilidade de 90%, temperatura ambiente, tensões cíclicas não excedem o limite de resistência à fadiga teórico, perfil com chaveta normal e desprezadas as incertezas. [27]

Agora podemos calcular o diâmetro da seção crítica do eixo ( $D_2$ ):

$$D_2 = \sqrt[3]{\frac{32 * FS}{\pi} * \sqrt{\left(\frac{M}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{T}{S_y}\right)^2}}$$

$$= \sqrt[3]{\frac{32 * 2}{\pi} * \sqrt{\left(13200/139000000\right)^2 + \left(28000/310000000\right)^2}} = 0,138 \text{ m}$$

Adotaremos o diâmetro ( $D_2$ ) do eixo de 160 mm para compatibilizar com diâmetro interno do rolamento a ser utilizado.

Podemos agora continuar o dimensionamento do eixo. A maior seção ( $D_3$ ) deve ter seu comprimento ( $L_2$ ) longo o suficiente para diminuir a carga nos rolamentos e o mais curto possível para diminuir os custos. Inicialmente deve ser adotado um valor total do eixo ( $L$ ) quatro vezes maior que  $L_1$ . O comprimento definitivo dependerá da escolha de outros elementos. [12]

$$L = 4 * L_1 = 4 * 0,35 = 1,4 \text{ m}$$

Por questão de simetria e economia deve ser utilizada a mesma configuração na parte traseira do eixo, onde se acopla à caixa multiplicadora. [12]

O diâmetro maior ( $D_3$ ) será o valor máximo de apoio lateral, suportado pelo conjunto mancal/rolamento escolhido. Já o diâmetro menor ( $D_1$ ) deve ser calculado subtraindo-se dois milímetros do diâmetro da seção crítica ( $D_2$ ). [12]

Após alguns ajustes para adaptação do eixo ao cubo e aos mancais de rolamentos chegamos em uma configuração um pouco maior que pode ser observada na [Figura 33](#). O volume da peça foi retirado do software AutoCAD foi de aproximadamente  $0,0374\text{m}^3$ , com isso a massa do eixo será de aproximadamente 292 kg e peso de 2920 N. O desenho básico do eixo pode ser visto na [Figura 34](#).

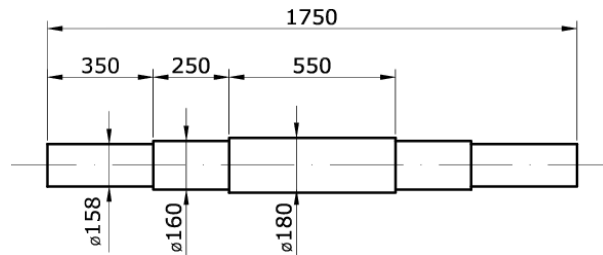


Figura 34: Desenho básico do eixo de baixa rotação [autores]

### 3.8 Especificação dos Rolamentos, Mancais e Acoplamento

Os rolamentos e mancais devem ser escolhidos de forma adequada para suportarem, com uma vida útil satisfatória, os esforços atuantes. Analisando os esforços, conforme ilustrado na Figura 35, podemos observar que estes esforços atuam na direção radial, devido às reações nos apoios e axial, devido ao empuxo do rotor. [12]

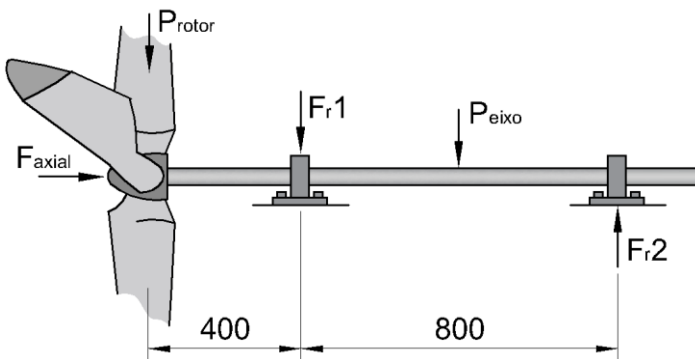


Figura 35: Distribuição de cargas nos mancais e rolamentos [autores]

As cargas axiais serão absorvidas por ambos os mancais, já as cargas radiais podem ser calculadas através das equações a seguir:

$$F_{r1} = 1200/800 * P_{rotor} + P_{eixo}/2 = 1,5 * 37700 + 2920/2 = 58 \text{ kN}$$

$$F_{r2} = 400/800 * P_{rotor} - P_{eixo}/2 = 0,5 * 37700 - 2920/2 = 17,4 \text{ kN}$$

Para os aerogeradores, são recomendados dois tipos de mancais: rolamentos de esferas de contato angular e rolamentos de rolos cônicos. Os primeiros geralmente são empregados em aerogeradores de menor porte, já os rolamentos de rolos cônicos são recomendados para equipamentos de maior porte, onde as cargas inerciais e gravitacionais atingem um maior valor [12] e, portanto, serão considerados no projeto.

Para o projeto consideramos dois rolamentos autocompensadores de rolos, modelo 23036 CDKE4 com caixa série pesada, modelo SD3036 SG, bucha de fixação, modelo H 3036 e retentor GS 36 do fabricante NSK. [28] que atendem com segurança as solicitações do projeto. Uma ilustração da caixa pode ser vista na [Figura 36](#).

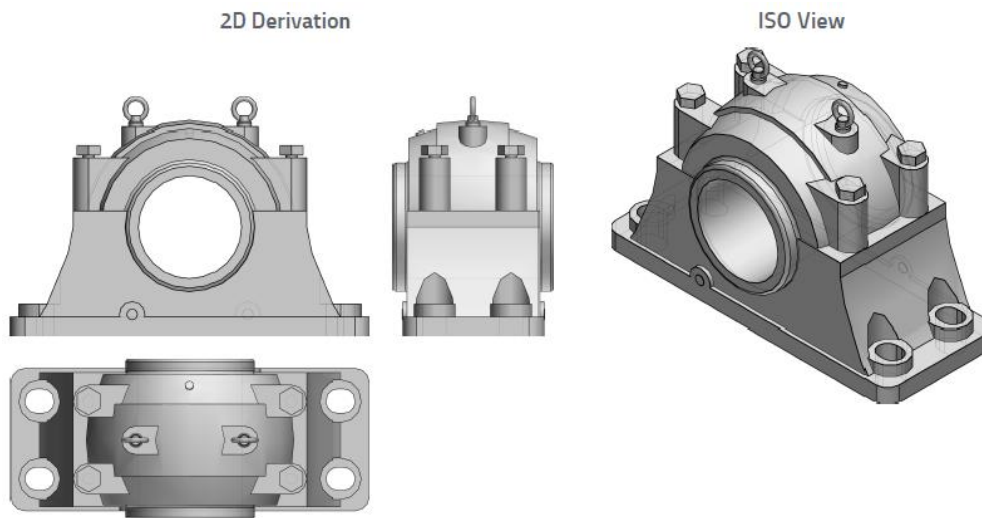


Figura 36: Caixa para rolamento NSK modelo SD 3036 [28]

Escolhemos para o projeto um acoplamento de engrenagens por ter como característica principal a alta transmissão de torque, dada pelo engrenamento do cubo na tampa, o que lhe confere elasticidade na transmissão além de rigidez torcional. Desta maneira, ele é capaz de compensar possíveis desalinhamentos axiais, radiais e angulares, além de sincronia torcional no acionamento. O modelo escolhido foi o de engrenamento simples com capa flangeada, tipo G52, tamanho 1050G, torque nominal de 56,6 kNm (coeficiente de segurança próximo de 2), torque de pico de 113,2 kNm e massa de 195 kg do fabricante *Falk Lifelign*. [29] Este acoplamento é fornecido sem furos e deve ser usinado de acordo com a especificação do eixo de baixa rotação e do eixo de entrada da caixa multiplicadora. Uma ilustração desse acoplamento pode ser vista na [Figura 37](#).



Figura 37: Acoplamento de engrenagens da Falk Lifelign [29]

### 3.9 Especificação da Caixa Multiplicadora

Devido às baixas rotações do rotor, é necessária a previsão de um mecanismo para obter-se uma rotação adequada às características do gerador. Estas características estão relacionadas ao torque, rotação e eficiência do gerador. Os tipos de mecanismos de multiplicação mais recomendados para sistemas eólicos são as engrenagens, para transmissão de maiores potências e, em equipamentos de menor porte, costuma-se empregar correias, devido à facilidade de manutenção ao baixo custo. [12]

No nosso projeto especificaremos uma caixa multiplicadora de engrenagens helicoidais e eixos paralelos, 3 estágios, 60 rpm de entrada, 1200 rpm de saída (1:20), engrenagens em aço-liga tratado por cementação e têmpera, mancais de rolamento autocompensadores de rolos, eixos em aço-liga tratado termicamente (eixo de entrada:  $\varnothing 160$  mm, eixo de saída:  $\varnothing 55$  mm), momento torçor no eixo de entrada de 52,2 kN (considerando um fator de segurança próximo de 2) e massa de aproximadamente 1200 kg do fabricante WEG Cestari. [30] Um equipamento do porte do que utilizaremos no projeto pode ser visto na Figura 38.

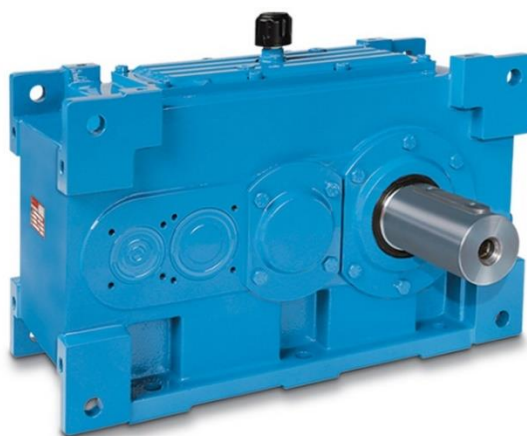


Figura 38: Redutor/multiplicador Helimax monobloco do fabricante WEG Cestari [30]

### 3.10 Sistema de Frenagem

Existem dois tipos de frenagem: a frenagem aerodinâmica e a frenagem mecânica. Os sistemas de frenagem são necessários para que se reduza a velocidade ou mesmo pare o rotor do aerogerador em situações críticas. A frenagem aerodinâmica ocorre quando o ângulo de passo da pá é alterado diminuindo a rotação ou até mesmo parando o rotor, colocando as pás perpendiculares ao vento (embandeiramento). [12]

Além da frenagem aerodinâmica, há a necessidade de se ter um segundo sistema de segurança: o freio mecânico. O dimensionamento do freio é feito levando em consideração um único parâmetro que é a capacidade de frenagem para a parada total do rotor. Deve ser, preferencialmente, acoplado ao eixo de alta rotação, onde se tem um torque bem menor. [12]

Para o projeto optaremos por um freio eletromagnético de segurança, para um torque de 5000 Nm (coeficiente de segurança maior que 3), 1200 rpm, 24 V, diâmetro de 55 mm (lado multiplicador) e 60 mm (lado motor) da marca nacional Multmotores. [31] Uma imagem deste tipo de freio pode ser vista na [Figura 39](#).



Figura 39: Freio magnético de segurança do fabricante Multmotores [31]

O freio será acionado por botoeira quando necessária a parada do equipamento ou automaticamente quando o vento atingir uma velocidade extrema de 15 m/s, onde fazendo-se uma sensibilidade nos cálculos, mesmo com todo o vento atingindo perpendicularmente o rotor (falha no sistema de giro da nacele) ainda teremos um coeficiente de segurança de 2 no componente mais crítico (flange do bosso). A automação do sistema de frenagem foge do escopo do trabalho.

$$v_{cut} = 15 \text{ m/s}$$

### 3.11 Especificação do Gerador

O gerador tem a função de transformar a energia mecânica proveniente da caixa multiplicadora em energia elétrica, para aproveitamento direto ou armazenamento. Para a escolha do gerador adequado, o principal parâmetro é a potência gerada ser compatível com a necessária. [12] Sendo assim, optamos pelo gerador assíncrono de indução específico para turbinas eólicas comunitárias do fabricante ABB, com potência de saída de 45 kW, tamanho da estrutura IEC 250, 220/380 V, velocidade nominal de 1200 rpm, 60 Hz e massa de aproximadamente 500 kg. [32] Os geradores desta linha podem ser vistos na [Figura 40](#).



Figura 40: Linha de geradores assíncronos da linha Eólica Comunitária da ABB [32]

### 3.12 Dimensionamento do Suporte

Para apoiar os componentes do aerogerador usaremos um quadro com quatro perfis comerciais dispostos de forma paralela e reforçados com perfis transversais nos pontos de apoio. É importante que se posicione o quadro sobre a torre no seu centro de gravidade para evitar cargas indesejáveis. Podemos ver na [Figura 41](#) uma ilustração esquemática dos componentes principais que serão considerados nos cálculos do suporte. Os demais componentes têm peso desprezível e/ou serão anulados considerando um alto coeficiente de segurança.

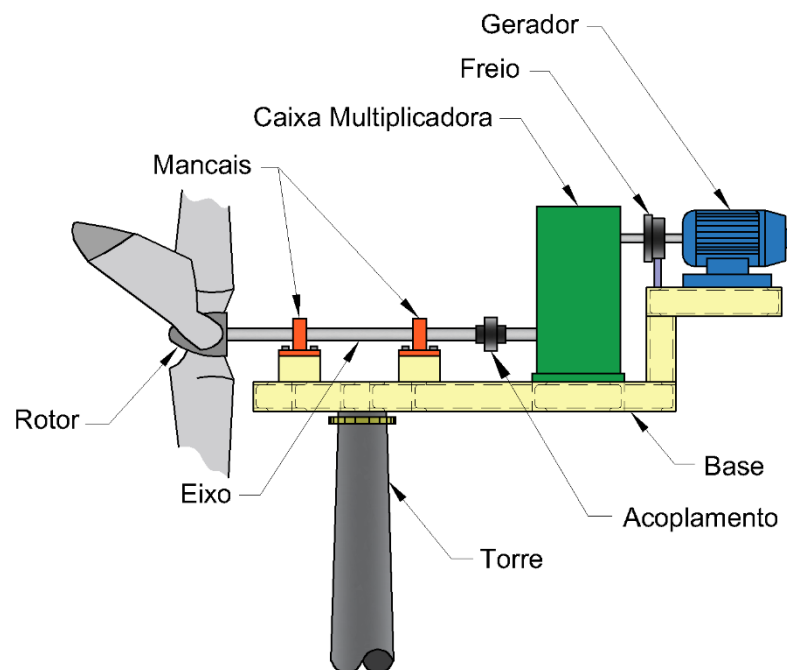


Figura 41: Distribuição dos componentes no suporte [autores]

Agora podemos calcular os esforços nos suportes e montar os diagramas de esforços cortantes e momentos fletores.

$$Va = Fe - Fb + Fc + Fd = 59000 - 16400 + 13900 + 5600 = 62,1 \text{ kN}$$

$$M_{m\acute{a}x} = Ma = 0,5 (-Fe) = 0,5 (-59000) = 29,5 \text{ kNm}$$

$$Mb = 1,1 (-Mc) + 1,7 (-Md) = 1,1 (-13900) + 1,7 (-7200) = 27,53 \text{ kNm}$$

$$Mc = 0,6 (-Md) = 0,6 (-7200) = 4,32 \text{ kNm}$$

$$Md = Me = 0$$

Sendo:

Va – força de reação da torre no suporte [N];

Fb e Fe – forças radiais nos mancais [N] (calculadas na [Seção 3.7](#));

Fc – força peso da caixa multiplicadora de velocidades [N];

Fd – força peso do conjunto gerador, freio e suporte [N];

Ma, Mb, Mc, Md, Me – momentos fletores nos pontos (a), (b), (c), (d) e (e) [Nm]

A [Figura 42](#) mostra os diagramas de esforços cortantes e momentos fletores no suporte do aerogerador:

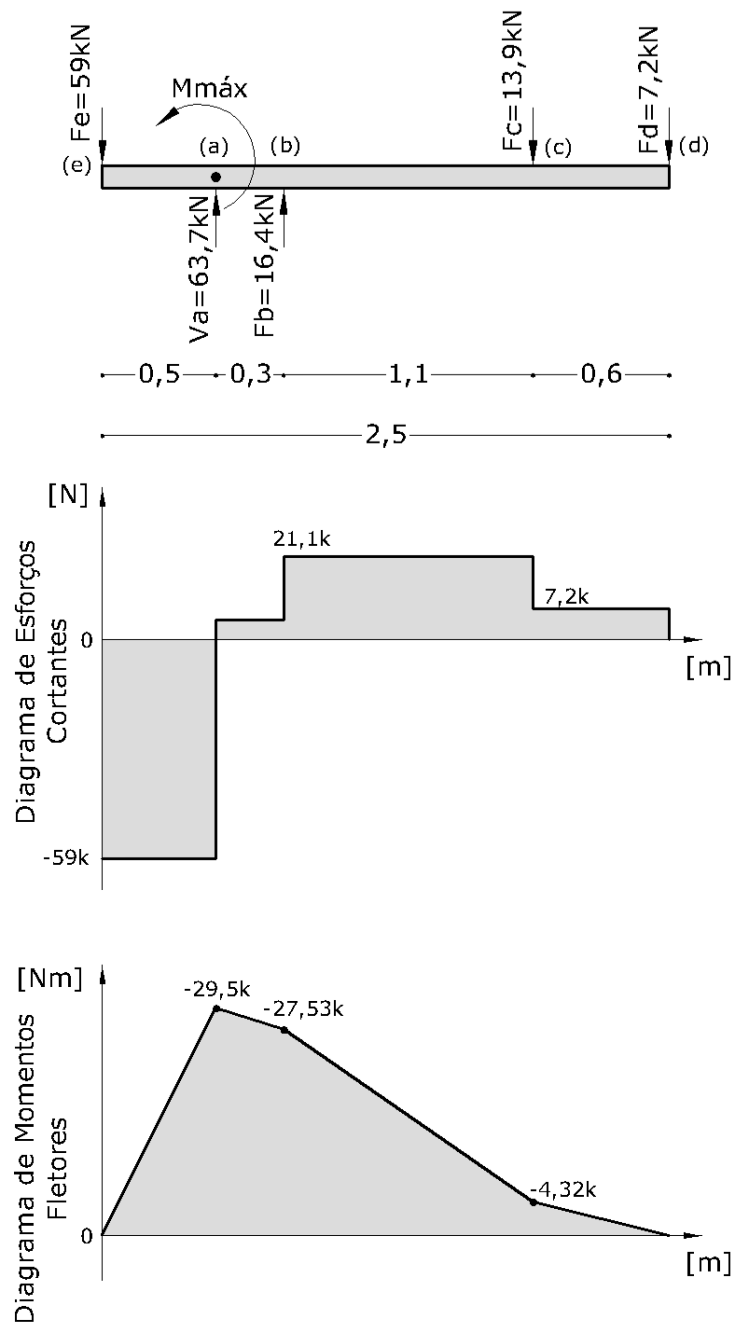


Figura 42: Diagramas de esforços cortantes e momentos fletores no suporte do aerogerador [autores]

Os esforços serão divididos em quatro perfis paralelos equidistantes, dispostos de forma a dividir os esforços igualmente. O material dos perfis é um aço comercial ASTM A-36 que possui limite de escoamento ( $S_y$ ) de 250 MPa. [27]

O momento máximo calculado é de 29,5 kNm e será dividido nos quatro perfis. Sendo assim o momento máximo em cada perfil é de 7,4 kNm. Consideramos um fator de segurança de, no mínimo, 2.

$$\sigma_{adm} = \frac{Sy}{FS} = \frac{250}{2} = 125 \text{ MPa}$$

$$W = \frac{M_{m\acute{a}x}}{\sigma_{adm}} = \frac{7400}{125000000} = 5,92 * 10^{-5} m^3 = 59 \text{ cm}^3$$

Sendo W o m3dulo de resist4ncia el3stica da se33o do perfil a ser utilizado.

Logo, optaremos por um perfil comercial para uso geral do tipo “U” de 152,4 mm (6”) x 12,2 kg/m que possui  $W = 71,7 \text{ cm}^3$  [27] resultando em um coeficiente de seguran3a de aproximadamente 2,4.

Montamos um chassi refor3ado com os perfis dispostos de forma estrat4gica para posicionar os equipamentos do aerogerador que pode ser visto na [Figura 43](#).

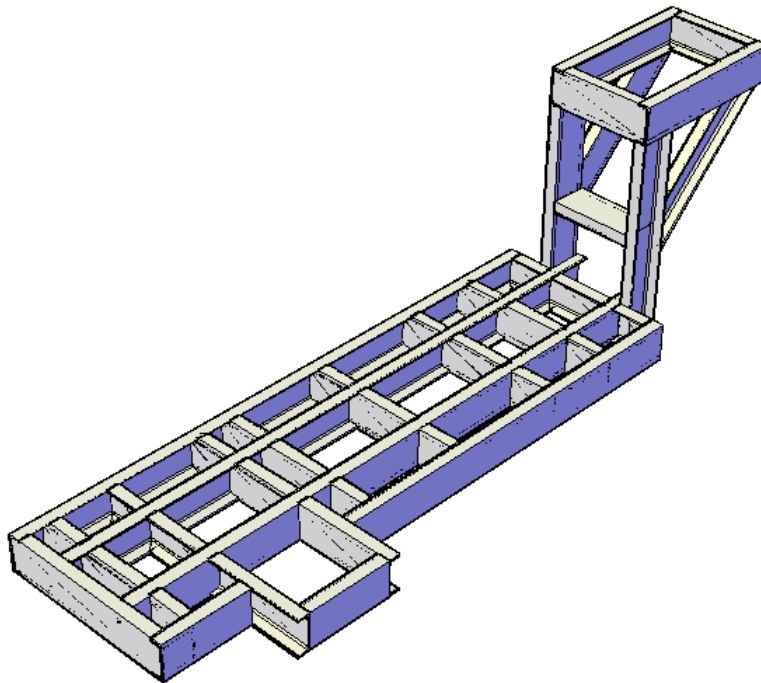


Figura 43: Quadro de perfis para suporte do aerogerador [autores]

Com a finalidade de melhorar ainda mais a integridade estrutural do suporte e facilitar o posicionamento dos equipamentos no chassi, recobrimos todo o quadro de perfis com uma chapa de a3o de 25,4 mm (1”), conforme podemos ver na [Figura 44](#). Deixaremos um furo na chapa para permitirmos a lubrificat3o do rolamento da nacele que ser3 feita, estrategicamente, na parte interna. ([Figura 46](#))

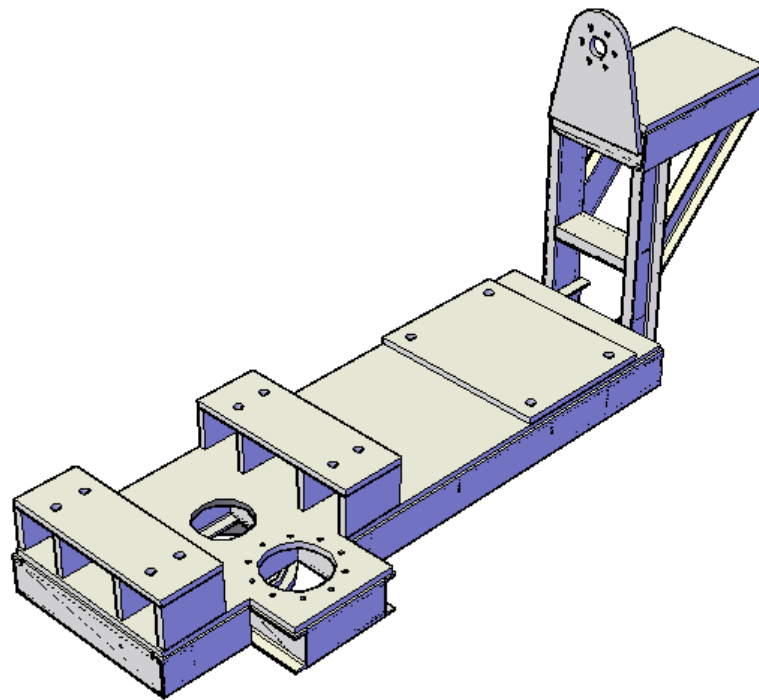


Figura 44: Suporte do aerogerador finalizado [autores]

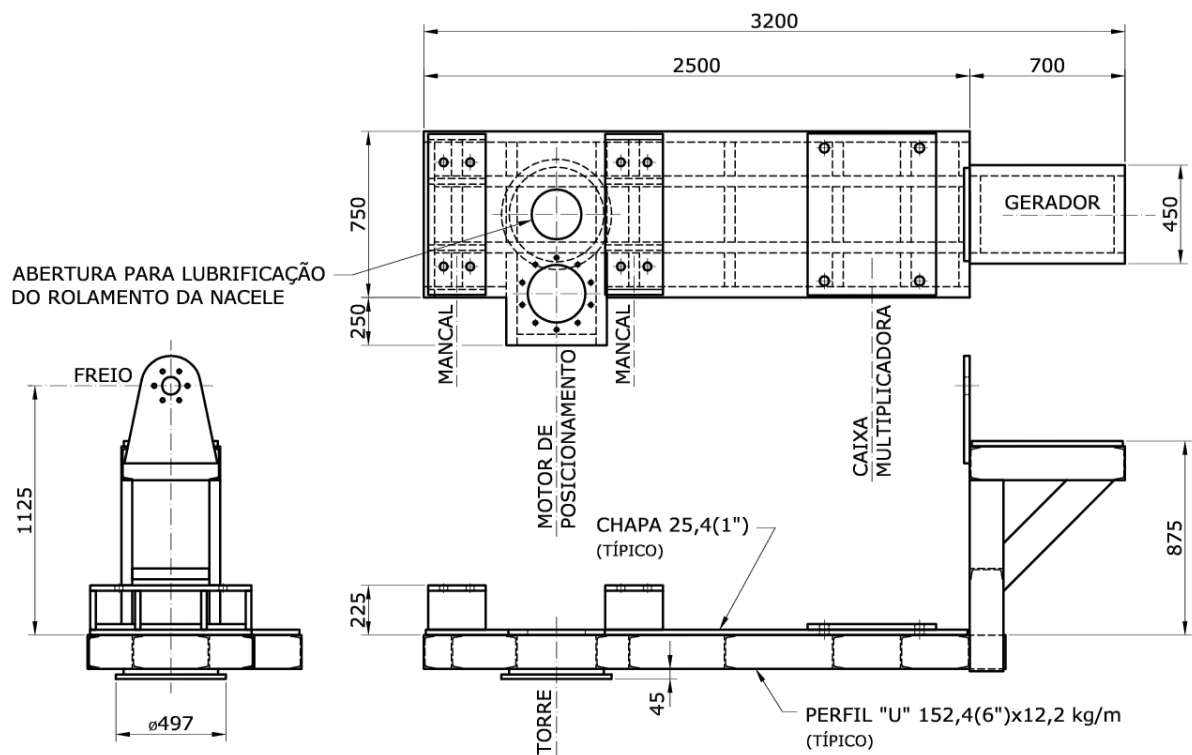


Figura 45: Dimensões básicas do suporte do aerogerador [autores]

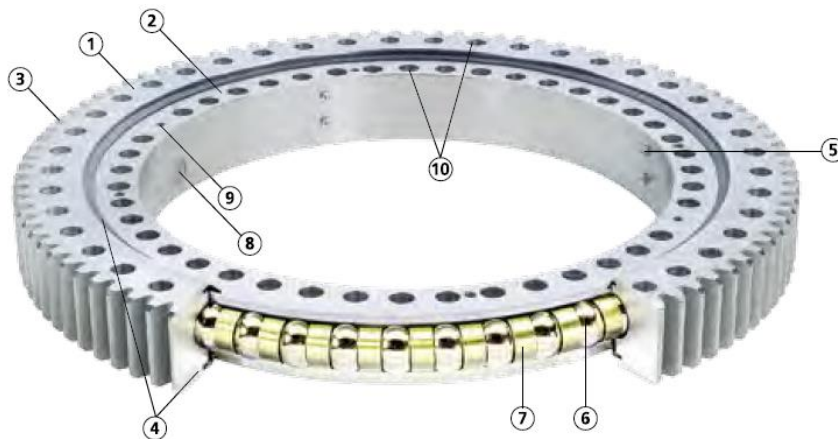
Os materiais a serem utilizados para fabricação do perfil, conforme podemos ver na [Figura 45](#), serão aproximadamente 25 m de perfil “U” de 152,4 mm (6”) x 12,2 kg/m, 4,2 m<sup>2</sup>

de chapa de aço de 25,4 mm (1") e o flange que será acoplado ao rolamento de giro da nacele, que resultarão em uma massa total de aproximadamente 1150 kg.

### 3.13 Dimensionamento do Mecanismo de Direção

O mecanismo de direção destina-se a controlar a orientação do rotor em conformidade com o sentido do vento. Age forçando o rotor a alinhar-se ou não com o vento controlando assim o torque e a velocidade, protegendo a integridade do equipamento em situações extremas. [3]

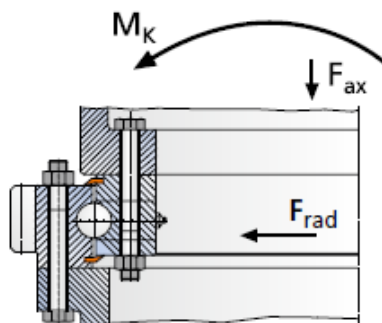
Para esse controle especificaremos um rolamento de giro com engrenagem externa série 116, número 5, modelo padrão 11-16 0500/1-08140 do fabricante IMO, que possui diâmetro externo de 580 mm. O rolamento está representado na [Figura 46](#). [33]



(Legenda: 1 - anel externo, 2 - anel interno, 3 - engrenagem, 4 - vedação, 5 - bocais de lubrificação, 6 - corpos rolantes, 7 - peças intermediárias, 8 - bujão de enchimento, 9 - pino de rolagem, 10 - orifícios de passagem)

Figura 46: Rolamento de giro com engrenagem externa do fabricante IMO [33]

Os esforços atuantes no rolamento podem ser vistos na [Figura 47](#).



(Legenda:  $F_{ax}$  - força axial,  $F_{rad}$  - força radial,  $M_k$  - momento de tombamento)

Figura 47: Esforços no rolamento de giro [33]

A força radial, já calculada na [Seção 3.5](#), é de aproximadamente 40 kN, a força axial é o somatório dos pesos de todos os componentes do aerogerador e seu suporte, o que daria um peso total de 73,8 kN e o momento de tombamento máximo, já calculado na [Seção 3.12](#), é de 29,5 kNm. Todos eles são atendidos plenamente pelo rolamento, com um coeficiente de segurança maior que 6.

Para o acionamento da engrenagem, importaremos um servo motor (*yaw drive*) específico para esta finalidade do fabricante *Bonfiglioli Wind Solutions*, tipo 706T, versão N, que possui torque nominal de 9,5 kNm e torque de pico de 16 kNm para um *ratio* de 1:600, [34] o que nos daria, para um motor de 60 Hz (3600 rpm) e 4 polos, uma frequência de 1,5 rpm. Como não desejamos uma alta velocidade de rotação da nacela, este motor nos atende plenamente neste quesito.

Segundo o fabricante do rolamento de giro, o motor de acionamento deve ser dimensionado generosamente, por causa da combinação de cargas, do montante das cargas, do modelo de alojamento, da folga do rolamento, entre outros fatores. [33] Mesmo assim, optaremos por apenas uma unidade, ao invés de duas ou três usadas em projetos de maior porte, já que o modelo escolhido atende aos requisitos do projeto com segurança. A [Figura 48](#) mostra o posicionamento do servo motor em um aerogerador. O modelo do rolamento de giro da [Figura 48](#) possui engrenagens internas, já o modelo adotado para este projeto foi o de engrenagens externas, tendo em vista a facilidade de manutenção e montagem.

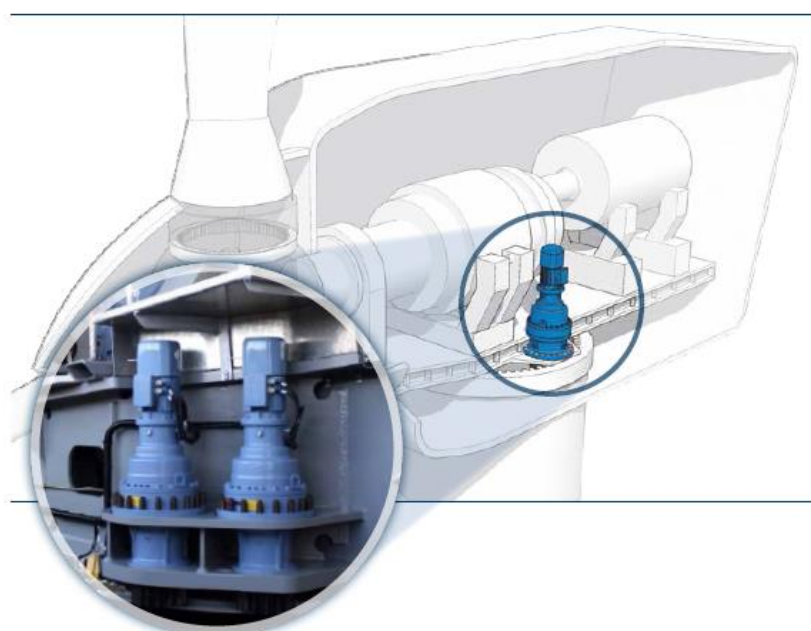


Figura 48: Controle de direção da nacela do aerogerador através do motor de acionamento [34]

Precisamos definir as engrenagens. A engrenagem do rolamento de giro da nacele (coroa) já é especificada pelo fabricante. [33] Agora precisamos definir a engrenagem do servo motor de posicionamento (pinhão). A razão de engrenamento é de aproximadamente 3,8, sendo assim a nacele girará uma frequência de aproximadamente 0,4 rpm, ou seja, dará uma volta a cada dois minutos e meio. A engrenagem do pinhão foi dimensionada conforme equacionamento a seguir e um resumo dos resultados pode ser visto na [Figura 49](#).

$$\alpha = 20^\circ$$

$$M = 4 \text{ mm}$$

$$Z = 36$$

$$De = M (Z + 2) = 4 (36 + 2) = 152 \text{ mm}$$

$$Dp = Z * M = 36 * 4 = 144 \text{ mm}$$

$$h = 2,166 * M = 2,166 * 4 = 8,668 \text{ mm}$$

$$Di = De - 2h = 152 - 2 * 8,668 = 134,664 \text{ mm}$$

$$P = M * \pi = 4 * \pi = 12,566 \text{ mm}$$

$$b = de 6 a 10 * M = 35 \text{ mm (adotado)}$$

Sendo:

$\alpha$  – ângulo de pressão [graus];

M – módulo padrão [mm];

Z – número de dentes;

De – diâmetro externo [mm];

Dp – diâmetro primitivo [mm];

Di – diâmetro interno [mm];

h – altura do dente [mm];

P – passo primitivo [mm];

b – espessura da engrenagem [mm]

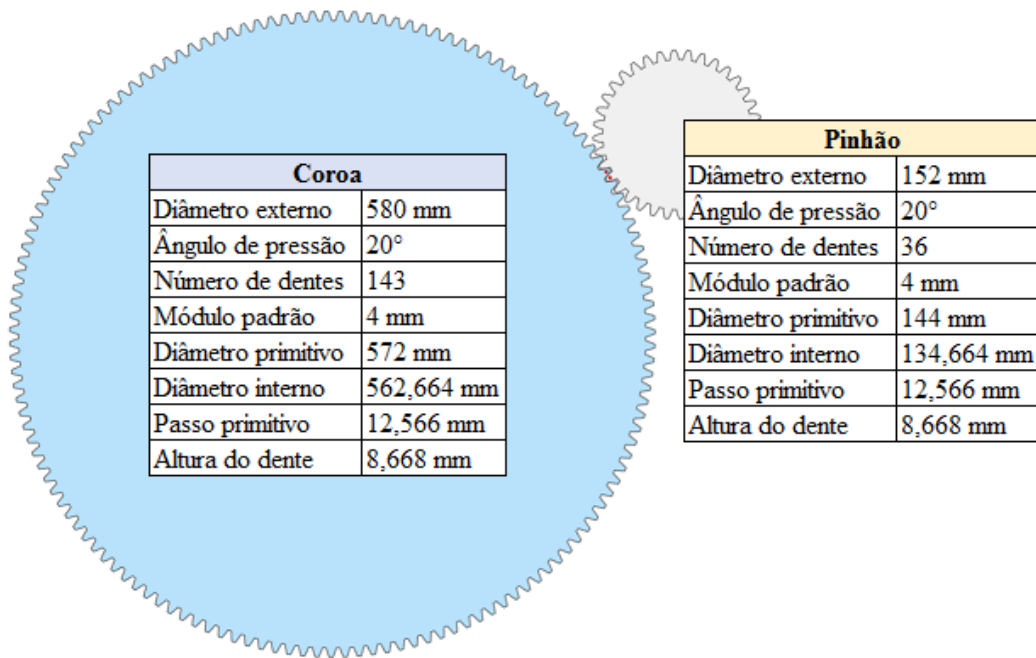


Figura 49: Dados das engrenagens do rolamento de giro (esq.) e do motor de posicionamento (dir.) [autores]

### 3.14 Dimensionamento da Torre

A função da torre é elevar o aerogerador a uma altura conveniente. Esta altura já foi determinada na fase 1 do projeto. Para o dimensionamento da torre é necessário saber as cargas atuantes, além de definir a geometria e os materiais de fabricação. [12] A maioria das cargas atuantes já foram calculadas nas seções anteriores.

Em geral, as torres estão sujeitas aos seguintes esforços:

- esforço lateral devido ao empuxo do rotor;
- cargas aerodinâmicas atuantes na própria torre;
- esforço torcional devido ao mecanismo giratório do aerogerador;
- esforço vertical devido ao peso do aerogerador. [12]

A [Figura 50](#) ilustra os principais esforços atuantes na torre.

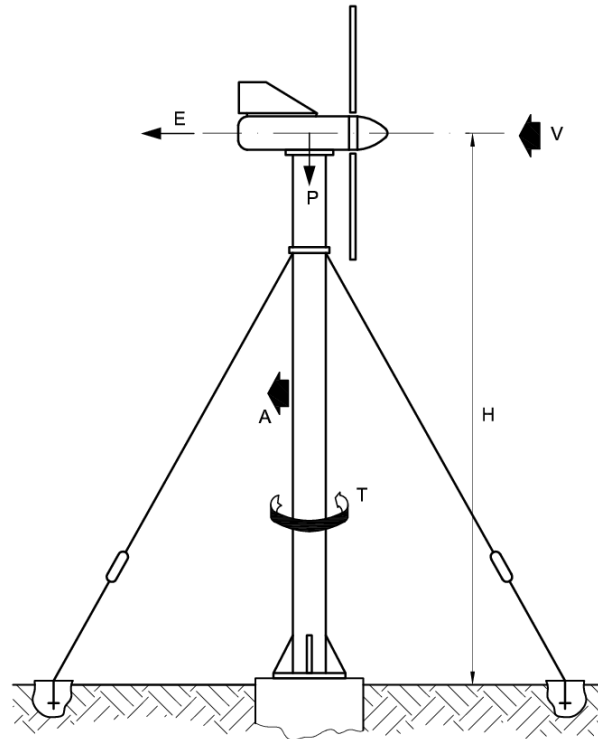


Figura 50: Esforços atuantes na torre [12]

O esforço torcional é pequeno e constante ao longo da torre, sendo anulado pelo coeficiente de segurança utilizado no projeto. [12]

O esforço vertical, proveniente do peso do aerogerador, é calculado pela soma dos pesos de todos os componentes e deve ser acrescido de 30% considerando os elementos secundários [12] e demais modificações no projeto de detalhamento.

$$\begin{aligned}
 P_{nacele} &= (P_{rotor} + P_{mancais} + P_{eixo} + P_{acoplamento} + P_{cx. \text{ multip.}} + P_{freio} + P_{gerador} \\
 &\quad + P_{estrut.} + P_{servo \text{ motor}} + P_{rolam.giro}) * 1,3 \\
 &= (37700 + 2000 + 3000 + 2000 + 12000 + 250 + 5000 + 11500 \\
 &\quad + 1200 + 5400) * 1,3 = 110 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

As torres podem ser fabricadas em diversas geometrias: seções tubulares com ou sem variação de seção (telescópicas), treliças, estruturas maciças, etc. Já os materiais empregados na fabricação podem ser o aço, concreto, madeira entre outros. [12]

A força aerodinâmica sobre a torre é uma força de arrasto empurrando a torre na direção do vento. [4] Precisamos calcular esta força e, para isso, consideraremos a torre composta de um perfil tubular, que tem em sua base um diâmetro de 800 mm e vai

diminuindo o seu diâmetro até a parte mais alta, finalizando com um diâmetro de 500 mm. Para o cálculo usaremos a velocidade de corte (definida na [Seção 3.10](#)) de 15 m/s e a velocidade na parte mais baixa pode ser calculada por:

$$v_{(z)} = v_{(z_0)} \left( \frac{h_{(z)}}{h_{(z_0)}} \right)^n = 16 * \left( \frac{0,25}{50} \right)^{0,143} \cong 8 \text{ m/s}$$

Agora podemos calcular o perfil de velocidades ao longo da torre:

$$F_{30m} = \frac{1}{2} * c * \rho * v^2 * A = \frac{1}{2} * 0,8 * 1,225 * 16^2 * \frac{0,5 * \pi}{2} * (1/m) \cong 100 \text{ N/m}$$

$$F_{0,25m} = \frac{1}{2} * c * \rho * v^2 * A = \frac{1}{2} * 0,8 * 1,225 * 8^2 * \frac{0,8 * \pi}{2} * (1/m) \cong 40 \text{ N/m}$$

Sendo:

$F_{30m}$  – distribuição da força aerodinâmica sobre a torre a 30 m de altura [N/m];

$F_{0,25m}$  – distribuição da força aerodinâmica sobre a torre a 0,25 m de altura [N/m];

$c$  – coeficiente de arrasto para superfícies cilíndricas;

$\rho$  – massa específica do ar [kg/m<sup>3</sup>];

$v$  – velocidade do ar [m/s];

$A$  – área perpendicular ao fluxo do vento [m<sup>2</sup>]

Agora, como podemos ver na [Figura 51](#), temos todos os esforços na torre:

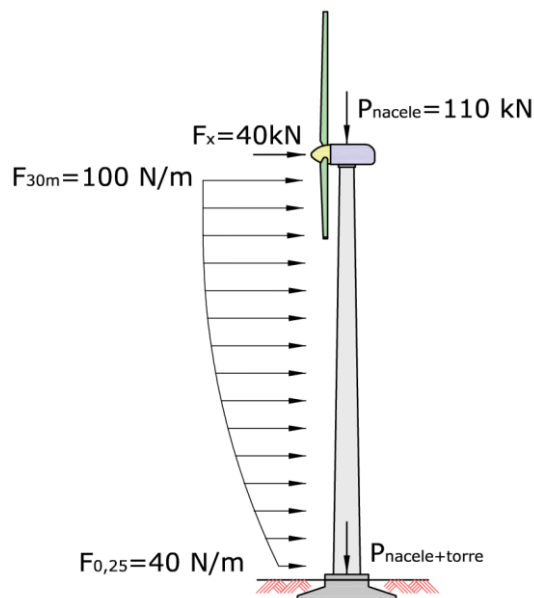


Figura 51: Esforços na torre [autores]

Podemos calcular o momento fletor máximo para definir a espessura da estrutura tubular. O momento máximo será o momento na base da torre. Para facilitarmos o cálculo, consideraremos que a força aerodinâmica dos ventos aumente de forma linear, o que será anulado por se utilizar um alto coeficiente de segurança, já que este esforço é quase desprezível comparado a força axial no rotor.

$$F_w = \frac{F_{0,25m} + F_{30m}}{2} (x_{30m} - x_{0,25m}) = \frac{40 + 100}{2} (30 - 0) = 2,1 \text{ kN}$$

Sendo:

$F_w$  – força total causada pela carga distribuída [N];

$x_{0,25m}$  e  $x_{30m}$  – posições de aplicação das cargas [m]

$$x = x_{0,25m} + (x_{30m} - x_{0,25m}) * \left( \frac{F_{0,25m}/3 + 2F_{30m}/3}{F_{0,25m} + F_{0,30m}} \right)$$

$$= 0 + (30 - 0) \left( \frac{40/3 + 2 * 100/3}{40 + 100} \right) = 17,1 \text{ m}$$

Sendo  $x$  a posição de aplicação equivalente da carga distribuída.

O momento máximo pode ser calculado pela equação:

$$M_{max} = 40000 * 30 + 2100 * 17,1 = 1236 \text{ kNm}$$

Para fabricação da torre tubular utilizaremos um aço estrutural ASTM A-501, grau A, normalmente utilizado para este tipo de aplicação, que possui um limite de escoamento ( $S_y$ ) de 250 MPa. [27] Por considerarmos a torre um item crítico, optaremos por um coeficiente de segurança mínimo de 3.

$$\sigma_{adm} = \frac{S_y}{FS} = \frac{250}{3} = 83 \text{ MPa}$$

$$W_{tubo} = \frac{M_{max}}{\sigma_{adm}} = \frac{1236000}{83000000} = 0,015 \text{ m}^3$$

$$W_{tubo} = \frac{\pi}{16} * \frac{(D^4 - d^4)}{D} = 0,015 = \frac{\pi}{16} * \frac{(0,8^4 - d^4)}{0,8} \Rightarrow d \cong 0,768 \text{ m}$$

Sendo:

D – diâmetro externo do tubo [m];

d – diâmetro interno do tubo [m];

$W_{\text{tubo}}$  - módulo de resistência do tubo [m<sup>3</sup>]

Para o fator de segurança adotado, a espessura do perfil tubular da torre seria de 16 mm. Consideraremos uma espessura de 17,5 mm (11/16") para aumentar o nível de confiabilidade e admitir algum nível de corrosão.

O volume da torre pode ser calculado por:

$$V_{\text{torre}} = \frac{\pi * 30}{3} [(0,4^2 + 0,4 * 0,25 + 0,25^2) - (0,382^2 + 0,382 * 0,232 + 0,232^2)] \\ \cong 1,1 \text{ m}^3$$

Para facilitar o transporte e a montagem a torre será dividida em três partes, ligadas por flanges sobrepostos. Estimaremos uma massa de 800 kg para os flanges de ligação. Logo o peso da torre será de:

$$P_{\text{torre}} = (m_{\text{tubos}} * \mu_{\text{aço}} * g) + (m_{\text{flanges}} * g) = (1,1 * 7800 * 10) + (800 * 10) \\ = 93,8 \text{ kN}$$

Agora podemos avaliar o fator de segurança para flambagem utilizando a equação de Euler para calcular carga crítica de flambagem. [27]

$$I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} = \frac{\pi(0,8^4 - 0,764^4)}{64} \cong 0,003 \text{ m}^4$$

$$P_{\text{crit}} = \frac{\pi^2 * E * I}{4L^2} = \frac{\pi^2 * 200000000000 * 0,003}{4 * 30^2} = 1645 \text{ kN}$$

$$P_{\text{total}} = P_{\text{nacele}} + P_{\text{torre}} = 110000 + 93800 = 203,8 \text{ kN}$$

$$FS = \frac{P_{\text{crit}}}{P_{\text{total}}} = \frac{1645000}{203800} = 8$$

Sendo:

I – momento de inércia do tubo [m<sup>4</sup>];

E – módulo de elasticidade do aço [Pa];

$P_{crit}$  – carga crítica da torre [N];

$P_{total}$  – peso total do aerogerador [N];

FS – fator de segurança

Os cálculos retornaram um alto fator de segurança atendendo com folga ao critério adotado.

### 3.15 Carenagem de Proteção da Nacele

Este item não tem qualquer função estrutural, sua função consiste apenas em proteger as peças internas do aerogerador de intempéries. Sendo assim o detalhamento desta peça ficará para a fase 5 do projeto (detalhamento). O material utilizado deve ser leve, fácil de moldar e apresentar boa resistência, como a fibra de vidro ou outro material similar. Ela deverá ser projetada com uma aerodinâmica otimizada que permita um melhor escoamento do ar e minimize a formação de vórtices, além de permitir a fácil desmontagem e acesso aos componentes internos de forma a facilitar as manutenções preventivas do equipamento. Um esboço da carenagem pode ser visto na [Figura 52](#).

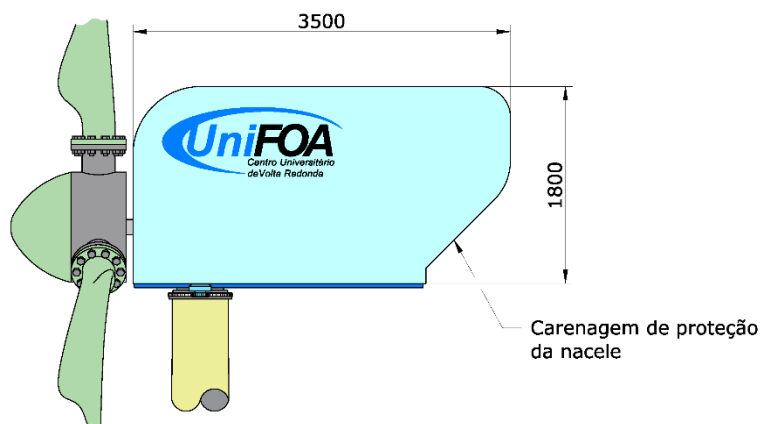


Figura 52: Desenho esquemático da carenagem [autores]

Neste momento já temos especificados todos os principais elementos mecânicos do nosso aerogerador. Um desenho preliminar em duas dimensões em pode ser visto na [Figura 53](#), já um estudo dimensional em 3 dimensões elaborado no AutoCAD pode ser visto na [Figura 54](#). Para facilitar a visualização dos componentes, a carenagem de proteção foi omitida no desenho 3D. Por se tratar de um projeto básico de engenharia, detalhes como parafusos, chavetas, detalhes de soldagem, acabamento, tolerâncias, pintura, etc. serão feitos na fase 5 (detalhamento) do projeto.

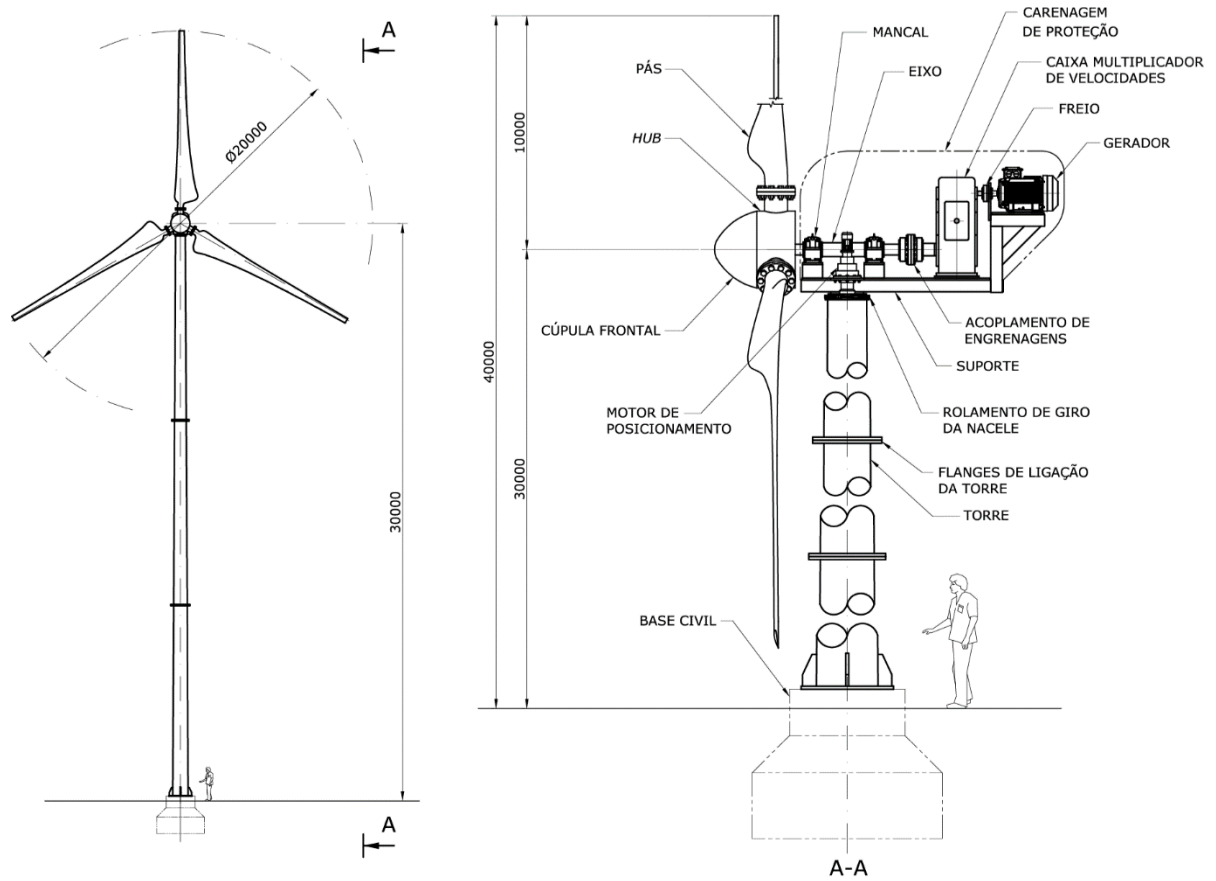


Figura 53: Detalhe básico do aerogerador contemplando os principais componentes mecânicos [autores]

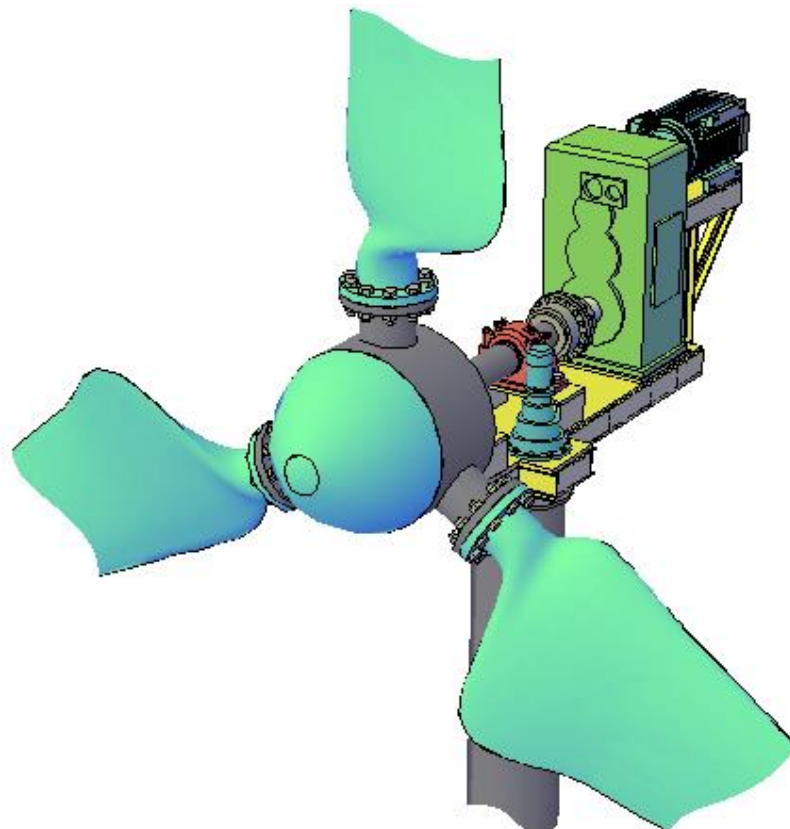


Figura 54: Desenho tridimensional do aerogerador [autores]

### 3.16 Acesso ao Aerogerador

Como item opcional sugerimos a utilização de uma escada do tipo marinheiro para dispensar o uso de plataforma elevatória, facilitando a execução de inspeção e manutenção dos equipamentos. Trata-se de uma concepção de escada bem mais simplista do que as escadas convencionais, porém alguns dispositivos de segurança são indispensáveis, conforme previsto na NR-12. [35]

Por se tratar de uma concepção básica, o detalhamento da escada ficará a cargo da fase 5 do projeto (detalhamento), sendo feito nesta fase apenas uma concepção básica com as principais recomendações. A concepção foi feita tomando-se como referência, além da norma NR-12, [35] a norma ABNT NBR-15708-06. [36] Estão listadas a seguir as principais recomendações para o projeto da escada de marinheiro:

- Os degraus da escada devem ser resistentes e suportar a aplicação de uma força concentrada de no mínimo 4kN. Os materiais ou revestimentos devem resistir a intempéries e corrosão;
- os lances acima de dois metros deverão, obrigatoriamente, serem providos de guarda-corpos e o guarda-corpo deve avançar no mínimo 1,10 m acima do último patamar;
- os lances da escada não podem ser superiores a nove metros;
- a largura da escada deve ser de, no mínimo, 0,40 m e o espaçamento dentre as barras de 0,25 a 0,3 m;
- o espaçamento entre o piso e a primeira barra deve ser de, no máximo, 0,55 m;
- a distância que a escada é fixada em relação à estrutura deve ser de, no mínimo, 0,15 m;
- as barras devem ser providas de superfície, formas ou ranhuras com a finalidade de prevenir possíveis deslizamentos. [35], [36]

Deverá também ser projetada uma pequena plataforma de 800 mm de largura para manutenção do aerogerador provida de corrimão e guarda-corpo, conforme NR-12. [35] Um desenho esquemático da escada tipo marinheiro, da plataforma e do guarda-corpo pode ser vista na [Figura 55](#). Maiores detalhes da concepção preliminar da escada podem ser vistos no [Apêndice D](#).

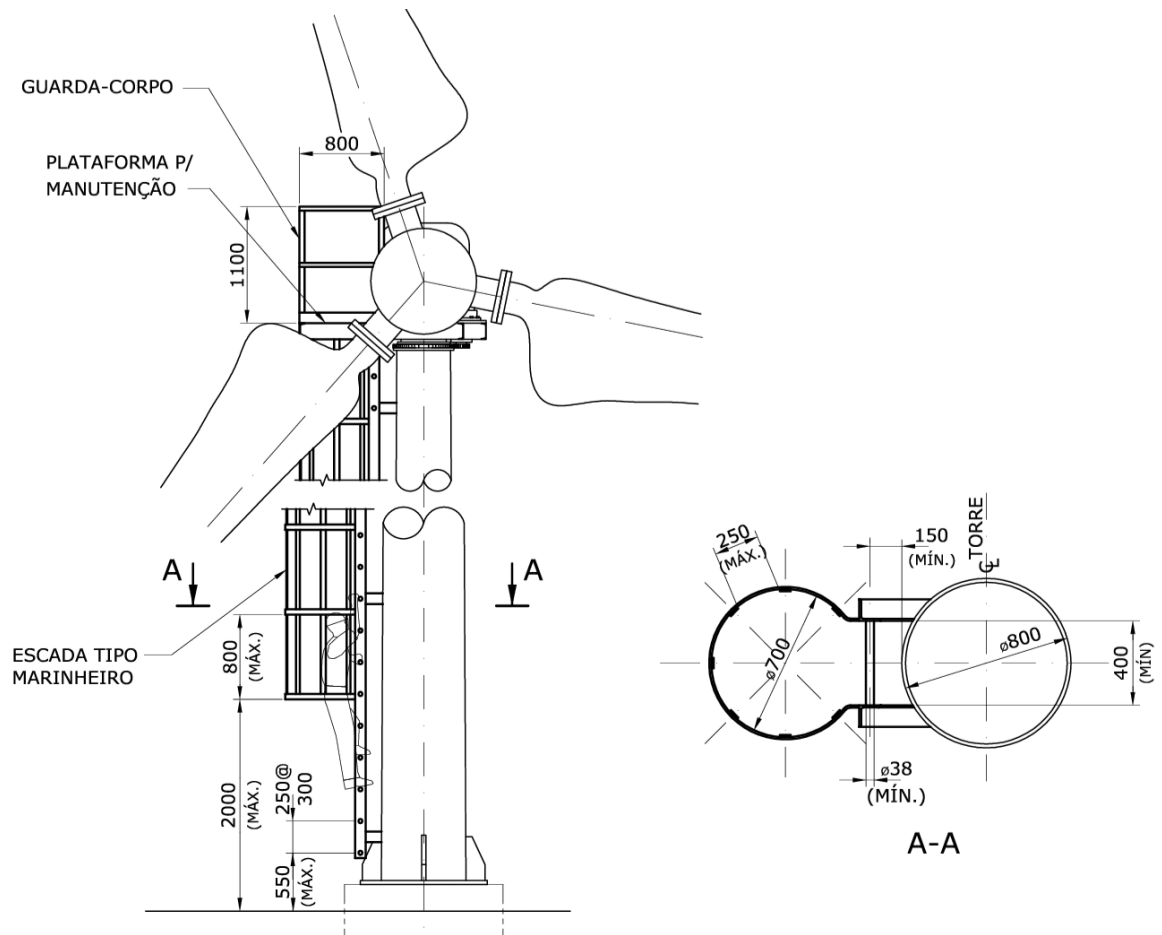


Figura 55: Detalhamento básico da escada tipo marinheiro, plataforma e guarda corpo do aerogerador [autores]



## 4 CONCLUSÃO

Por se tratar de um trabalho multidisciplinar, do ponto de vista acadêmico o trabalho de conclusão de curso mostrou-se bastante completo por abranger várias áreas da mecânica como: aerodinâmica, sistemas de energia alternativa, mecânica técnica, mecânica dos fluidos, desenho técnico, desenho de máquinas, elementos de máquinas, manutenção industrial, sistemas mecânicos, computação, instrumentação, engenharia ambiental, equipamentos industriais, avaliação econômica de projetos, entre outros. Porém o principal objetivo deste projeto foi o de aplicar todos esses conceitos acadêmicos adquiridos no decorrer da graduação para o desenvolvimento de um projeto simples e viável de um aerogerador de médio porte que pudesse atender a demanda energética de uma fazenda ou mesmo de um pequeno vilarejo, fugindo de tecnologias complexas e caras de fornecedores estrangeiros do ramo, objetivando um aproveitamento mais eficiente e menos dispendioso da energia eólica no país, energia esta que tem se mostrado como uma boa alternativa em regiões propícias onde há condições naturais favoráveis ou onde a transmissão de energia e o preço de fornecimento sejam inviáveis.

Isso foi conseguido procurando-se desenvolver uma metodologia onde todos os principais elementos mecânicos fossem dimensionados em uma ordenação pré-determinada onde um elemento dependesse de outro, analisando sempre a melhor alternativa e sugerindo alternativas padronizadas que viessem de empresas e fornecedores consolidados no mercado, preferindo sempre fornecedores nacionais ou que tivessem representação no país e que, quando não fosse possível utilizar-se elementos disponíveis no mercado, o dimensionamento do componente fosse feito de forma simples e objetiva, utilizando-se como referência toda a bibliografia disponível.

A sequência de desenvolvimento foi simples e bem detalhada de modo que, até mesmo os interessados que não tiverem profundo conhecimento acerca do assunto, poderão entender a metodologia desenvolvida. Metodologia esta que, a partir dos dados de entrada, abrange desde uma simples e preliminar análise de viabilidade econômica, passando pelo dimensionamento e especificação de todos os componentes mecânicos e chegando até o dimensionamento de sua torre de sustentação.

A utilização de softwares acessíveis economicamente ou gratuitos e de fácil manipulação como o Autodesk AutoCAD, o Microsoft Excel e o QBlade foi de suma

importância para se alcançar o resultado do trabalho, permitindo a manipulação dos dados obtidos e o desenvolvimento de estudos de modelagem tridimensional e a elaboração dos desenhos técnicos do projeto.

Esperamos que este trabalho possa ser amplamente acessado por instituições e/ou projetistas interessados para que possam utilizá-lo, modificá-lo e adaptá-lo de forma a tirar proveito de todo o conteúdo desenvolvido, o que o tornaria uma contribuição efetiva para que esta tecnologia, ainda incipiente no país, seja mais acessível e mais desenvolvida.

Como próximos passos sugerimos a elaboração de projetos das disciplinas de elétrica, instrumentação, automação e civil, seguindo a mesma premissa de se utilizar uma metodologia simples e didática, para que o projeto completo do aerogerador seja idealizado e possa seguir as próximas etapas de execução até o alcance do objetivo final que é a efetiva transformação da energia proveniente dos ventos em eletricidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DUTRA, Ricardo, **Energia Eólica - Princípios e Tecnologia**. Disponível em: <[www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial\\_eolica\\_2008\\_e-book.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf)>. Acesso em: 2 fev. 2018.
- [2] DIVONE, L.V., **Wind Turbine Technology – Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering**. New York: ASME Press, 1994.
- [3] SÁ, Antônio Leite, LOPES, José Dermeval Saraiva. **Energia Eólica para Geração de Eletricidade e Bombeamento de Água**. Viçosa: CPT, 2001.
- [4] PINTO, Milton de Oliveira. **Fundamentos de energia eólica**. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
- [5] AMARANTE, Odilon A. Camargo; ZACK, M. Brower, John; SÁ, Antônio Leite. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2001.
- [6] ALDABÓ, Ricardo. **Energia eólica**. São Paulo: ed. Artliber, 2005.
- [7] SILVA, Guilherme Botelho de Oliveira. **Desenvolvimento de uma Turbina Eólica de Eixo Vertical**. Dissertação (mestrado), Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa. 2011.
- [8] ELETROVENTO. **Energia eólica**. Disponível em: <<http://www.eletrovento.com.br/produto/categoria/energia-eolica/>>. Acesso em: 12 dez. 2017.
- [9] BURTON, Tony, SHARP, David, JENKINS, Nick, BOSSANYI, Ervin. **Wind Energy Handbook**, Chichester: John Wiley & Sons, LTD, 2001.
- [10] ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3ª ed. Brasília: Aneel, 2008.
- [11] PORTAL DA ENERGIA. **Energias Renováveis**. Tipos e processos de manutenção de aerogeradores. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/tipos-processos-manutencao-aerogeradores/>>. Acesso em: 15 fev. 2018.
- [12] FILHO, Flávio de Marco. **Projeto Preliminar de Aerogeradores**. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro: COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1989.
- [13] INTECH. **Fundamental and Advanced Topics in Wind Power**. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/fundamental-and-advancedtopics-in-wind-power>>. Acesso em: 20 fev. 2018.
- [14] DUTRA, R. M. **Viabilidade Técnico Econômica da Energia Eólica Face ao Novo Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro**. Dissertação (mestrado), Rio de Janeiro: COPPE / Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.
- [15] LIMA, Lucas Fernandes, JUNIOR, Sebastião C. Guimarães, PAULA, Aídson A. **Potência extraída de turbinas eólicas baseada na comparação de diferentes tipos de**

**velocidade dos ventos.** Disponível em:

<[http://www.ceel.eletrica.ufu.br/artigos2011/IX\\_CEEL\\_043.pdf](http://www.ceel.eletrica.ufu.br/artigos2011/IX_CEEL_043.pdf)>. Acesso em: 21 fev 2018.

[16] TERCIOTE, Ricardo. **Eficiência energética de um sistema eólico isolado.** Disponível em: <<https://www.feagri.unicamp.br/energia/agrener2002/jdownloads/pdf/0100.pdf>>. Acesso em: 21 jan. 2018.

[17] ELETRONICA PT, **Energia Eólica.** Disponível em: <[www.electronica-pt.com/energia-eolica](http://www.electronica-pt.com/energia-eolica)>. Acesso em: 05 dez. 2017.

[18] ASSEF, Robert. **Guia Prático de Administração Financeira:** pequenas e médias empresas. Rio de Janeiro: Ed. Qualitymark. 1999.

[19] COELBA. **Portal de Serviços da Coelba.** (site da concessionária de energia elétrica) Disponível em: <<http://servicos.coelba.com.br/residencial-rural/Pages/Baixa%20Tensao/tarifas-grupo-b.aspx>>. Acesso em: 25 jan. 2018.

[20] ENERGIE+, **Le rendement des éoliennes.** Disponível em: <<https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16657>>. Acesso em: 10 dez. 2017.

[21] PINTO, Jaime Sores; PASA, Michael Everton; MICHELS, Ademar. **Dimensionamento das pás de aerogerador de eixo horizontal para instalação em uma propriedade rural.** Semana Internacional das Engenharias. Horizontina: FAHOR. 2013.

[22] LIMA, Lucas Fernandes; JÚNIOR, Sebastião C. Guimarães, PAULA, Aídson A. **Potência extraída de turbinas eólicas baseada na comparação de diferentes tipos de velocidade dos ventos.** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

[23] WINDYNATION. **Tip Speed Ratio: How to Calculate and Apply TSR to Blade Selection.** Disponível em: <<https://www.windynation.com/jzv/inf/tip-speed-ratio-how-calculate-and-apply-tsr-blade-selection>>. Acesso em: 07 jan. 2018.

[24] AIRFOIL TOOLS. **Airfoil database.** Disponível em: <<http://airfoiltools.com/>>. Acesso em: 25 fev. 2018.

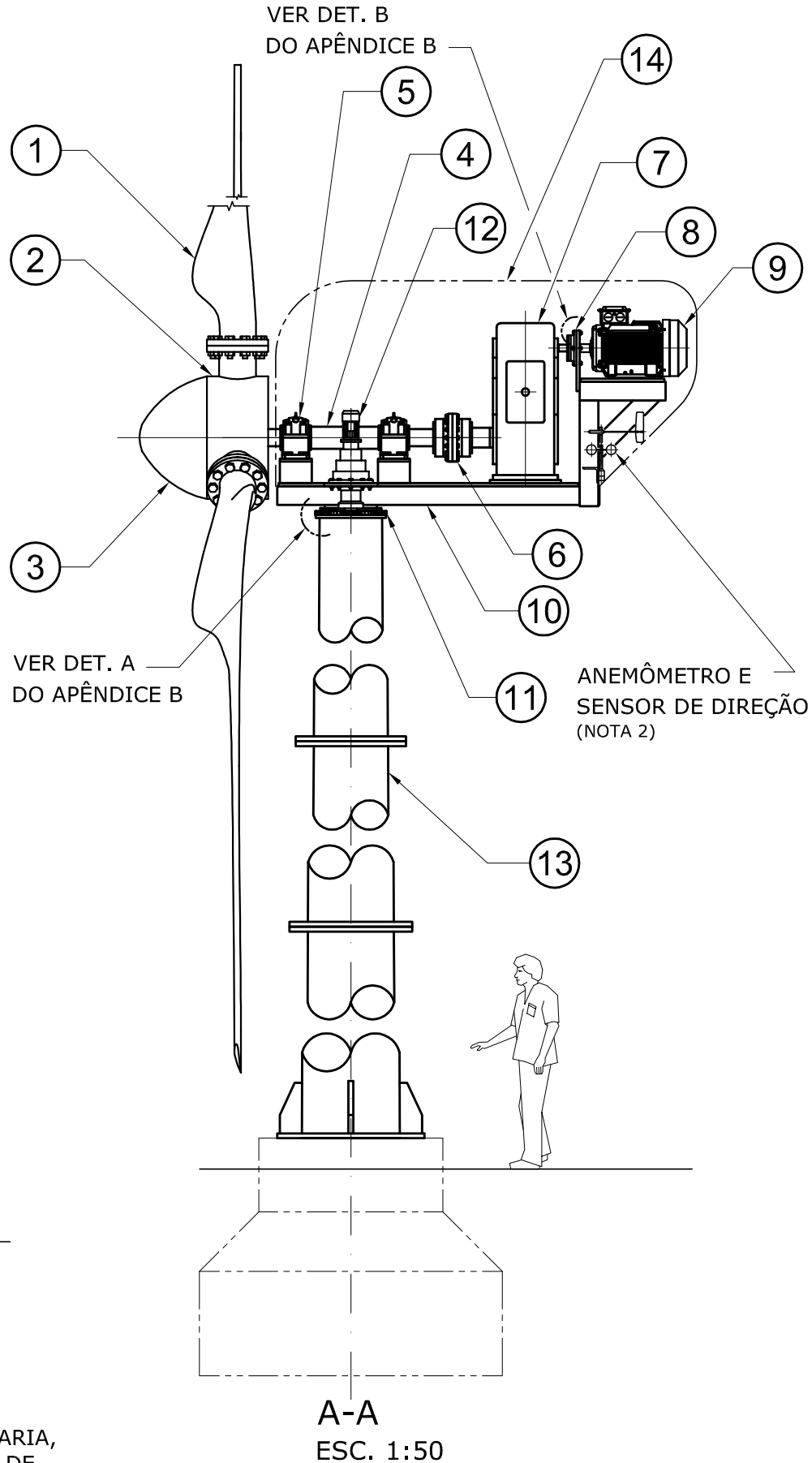
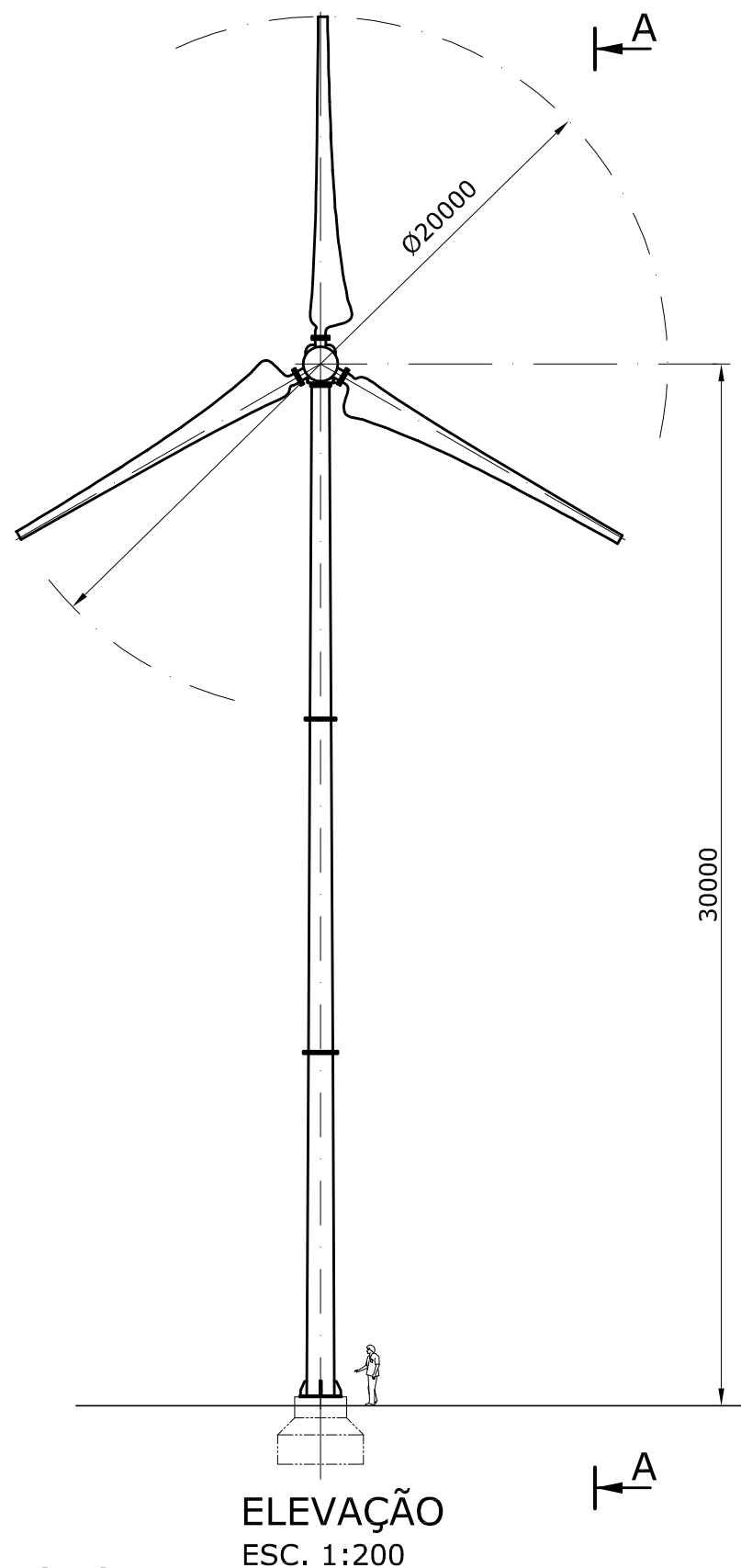
[25] MARINELLI, Alessandra L.; MONTEIRO, Marcos R.; AMBRÓSIO, José D. **Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos com Fibras Vegetais Naturais da Biodiversidade:** uma contribuição para a sustentabilidade amazônica. Polímeros: Ciência e Tecnologia. São Carlos: UFSCar, 2008.

[26] QBLADE. **Cross-platform simulation software for wind turbine blade design and aerodynamic simulation.** Disponível em: <<http://www.q-blade.org/>>. Acesso em: 15 dez. 2017.

[27] BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley:** projeto de engenharia mecânica. 8ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

[28] NSK MOTION & CONTROL: Catálogo de produtos. Disponível em: <<http://www.nsk.com.br/rolamentos-144.htm>>. Acesso em: 25 jan. 2018.

- [29] REXNORD. **Acoplamentos de engrenagem Falk Lifeligh**. Disponível em: <<http://www.rexnord.com.br/wp-content/uploads/2014/08/451-110-p-acoplamentos-de-engrenagem-falk-lifeligh.pdf>>. Acesso em: 1 mar. 2018.
- [30] WEG CESTARI: Catálogo de produtos. Disponível em: <<http://www.wegcestari.com.br/index.php/pt/downloads/catalogos-tecnicos>>. Acesso em: 29 dez. 2017.
- [31] MULTMOTORES, **Freios Magnéticos**. Disponível em: <[www.multmotores.com.br/freios-magneticos.php](http://www.multmotores.com.br/freios-magneticos.php)>. Acesso em: 10 fev. 2018.
- [32] ABB. **Eólico Comunitário**. Disponível em: <<http://new.abb.com/motors-generators/pt/geradores/geradores-para-turbinas-eolicas/eolico-comunitario>>. Acesso em: 23 mar. 2018.
- [33] IMO. Drehverbindungen für erneuerbare Energien. Rolamento de giro para turbinas eólicas: catálogo de produtos. Disponível em: <[http://www.imo.de/uploads/tx\\_ffimodiCenter/DV313\\_PT.pdf](http://www.imo.de/uploads/tx_ffimodiCenter/DV313_PT.pdf)>. Acesso em: 2 mar. 2018.
- [34] BONFIGLIOLI FOREVER FORWARD. **Soluções eólicas**: Redutor de posicionamento da nacela em turbinas eólicas. Disponível em: <<http://www.bonfigliolidocslibrary.com/index.php/industry-overviews/wind-energy/21-solutions-for-wind-energy>>. Acesso em: 20 fev. 2018.
- [35] MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Norma Regulamentadora 12**: Segurança do trabalho em Máquinas e Equipamentos. Brasília: MTE, 2016.
- [36] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15708-06** - Perfis pultrudados para uso industrial - Parte 6: Escada. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.



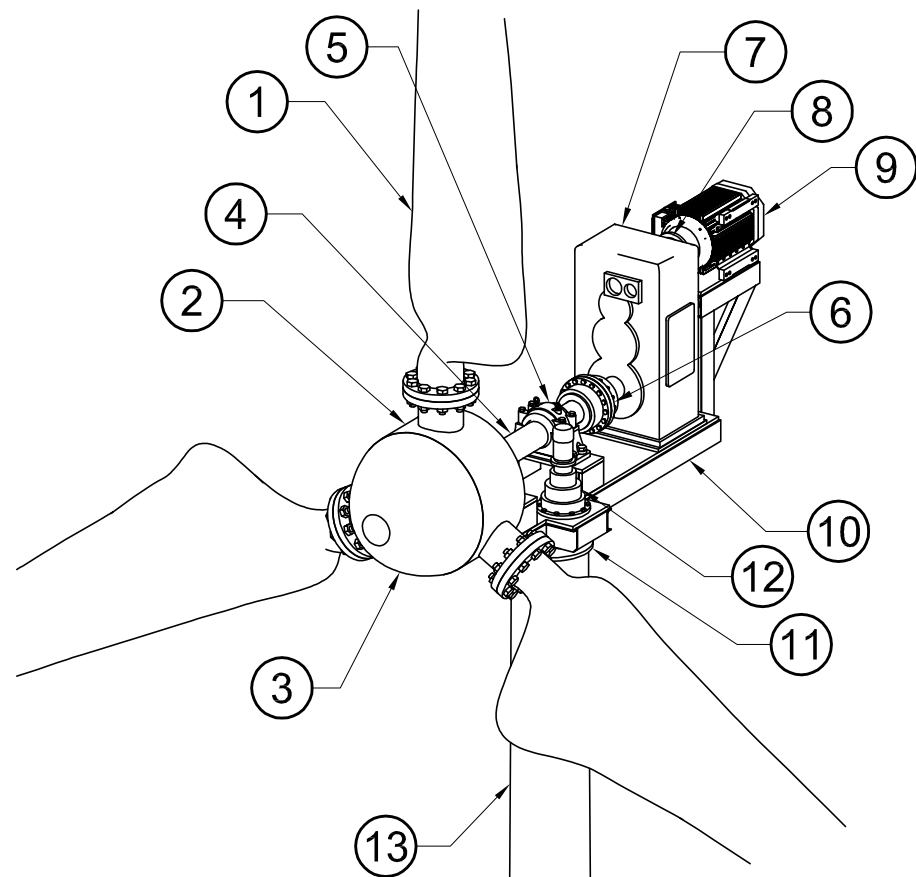
LISTA DE MATERIAL				
POS.	QUANT.	DESCRIÇÃO	MATERIAL	MASSA [KG]
1	3	PÁ (DETALHE C DO APÊNDICE B)	FIBRA DE VIDRO	2250
2	1	CUBO (DETALHE A DO APÊNDICE C)	SAE 1035	1264
3	1	CÚPULA (NOTA 4)	FIBRA DE VIDRO	-
4	1	EIXO DE BAIXA ROTAÇÃO (DETALHE E DO APÊNDICE B)	SAE 1045	292
5	2	ROLAMENTO AUTOCOMPENSADOR DE ROLOS 23036 CDKE4 + CAIXA SÉRIE PESADA SD3036 + BUCHA DE FIXAÇÃO, MODELO H + RETENTOR, MODELO GS 36 DA NSK.	-	200
6	1	ACOPLAMENTO DE ENGRENAGENS, TIPO G52, TAMANHO 1050G DA FALK LIFELIGN.	-	195
7	1	CAIXA MULTIPLICADORA DE ENGRENAGENS HELICOIDAIS E EIXOS PARALELOS, 3 ESTÁGIOS, RATIO 1:20 DA WEG CESTARI.	-	1200
8	1	FREIO ELETROMAGNÉTICO DE SEGURANÇA, TORQUE 5000 N DA MULTMOTORES.	-	25
9	1	GERADOR ASSÍNCRONO DE INDUÇÃO, POTÊNCIA 45 kW, IEC 250, 220/380 V, 1200 RPM, 60 Hz DA ABB.	-	500
10	1	SUPORTE (DETALHE B DO APÊNDICE C)	ASTM A36	1150
11	1	ROLAMENTO DE GIRO C/ ENGRENAGEM EXTERNA, SÉRIE 116, NÚMERO 5, MODELO 11-16 0500/1-08140 DA IMO. (NOTA 3)	-	540
12	1	SERVO MOTOR, RATIO 1:600, TIPO 706T, DA BONFIGLIOLI WIND SOLUTIONS. (NOTA 3)	-	120
13	1	TORRE DE SUSTENÇÃO (DETALHE C DO APÊNDICE C)	ASTM A501	9380
14	1	CARENAGEM DA NACELE (NOTA 4)	FIBRA DE VIDRO	-
<b>TOTAL:</b>				<b>17116</b>

**NOTAS:**

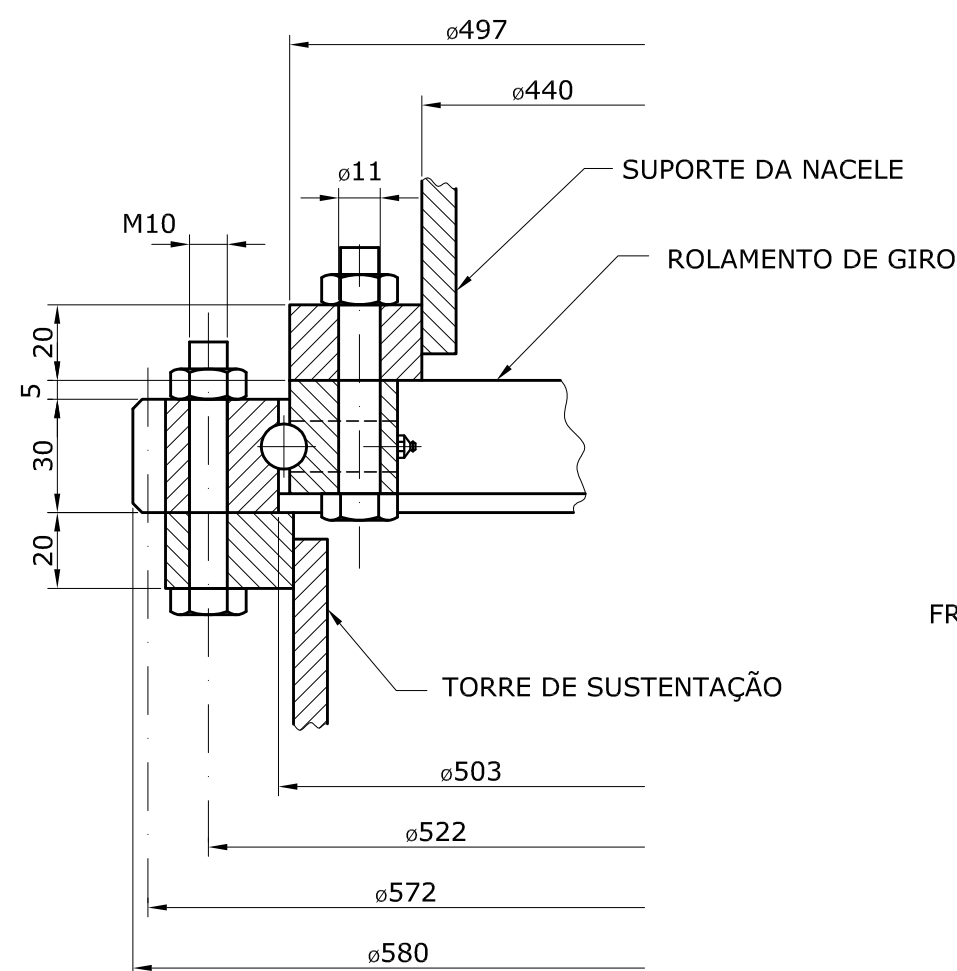
- 1) POR SE TRATAR DE UM PROJETO BÁSICO DE ENGENHARIA, DETALHES COMO PARAFUSOS, CHAVETAS, DETALHES DE SOLDAGEM, ACABAMENTO, TOLERÂNCIAS, PINTURA, ETC. SERÃO FEITOS NA ETAPA DE DETALHAMENTO;
- 2) PREVER SUPORTE PARA OS ACESSÓRIOS DE INSTRUMENTAÇÃO (ANEMÔMETRO E SENSOR DE DIREÇÃO);
- 3) PARA DETALHE DE ENGRENAMENTO ENTRE O ROLAMENTO DA NACELE (POS. 11) E O SERVO MOTOR (POS. 12) VER DETALHE D DO APÊNDICE B;
- 4) A CÚPULA FRONTAL E A CARENAGEM DA NACELE SERÃO DETALHADAS NA ETAPA DE DETALHAMENTO;
- 5) PARA MAIORES DETALHES E MEMÓRIA DE CÁLCULO VER SEÇÕES 3.5 @ 3.16 DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO;
- 6) PARA VISTA ISOMÉTRICA VER APÊNDICE B.

**PROJETO BÁSICO**

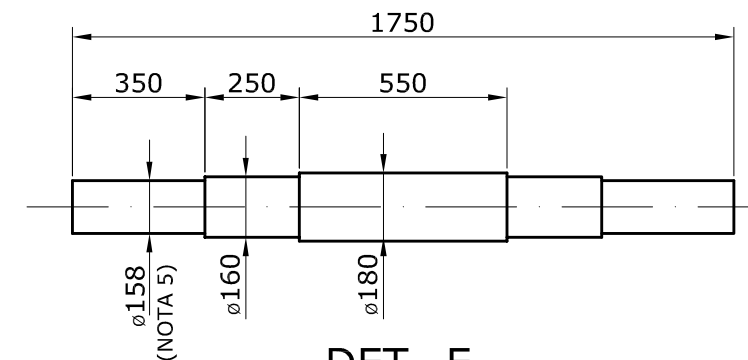
	<b>ENGENHARIA MECÂNICA / 10º PERÍODO</b>		TURMA:	-			
	DISCIPLINA:	ENGENHARIA DO PRODUTO	PROFESSOR:	PALMEIRA/HABIBE			
TÍTULO:	APÊNDICE A - DESENHO DO AEROGERADOR	ESCALA:	INDICADA	PROJEÇÃO:	1º DIEDRO	FORMATO:	A3
ALUNO:	LAURO/LUCIANO/MAURICIO	MATRÍCULA:		DATA:	10/04/2018		



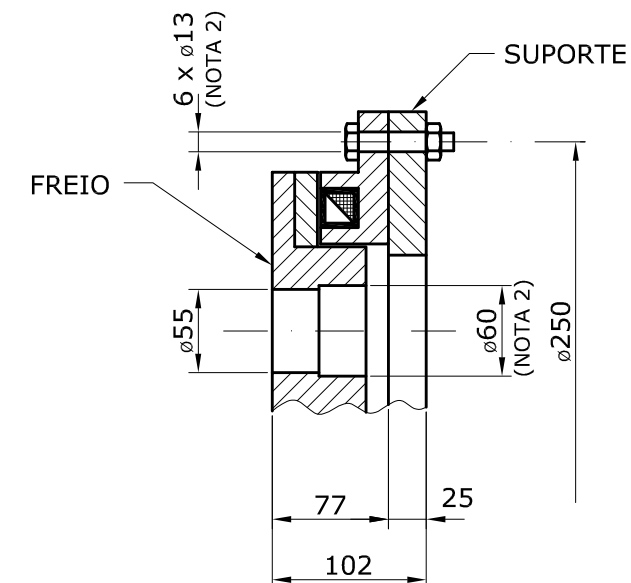
VISTA ISOMÉTRICA  
ESC. 1:50



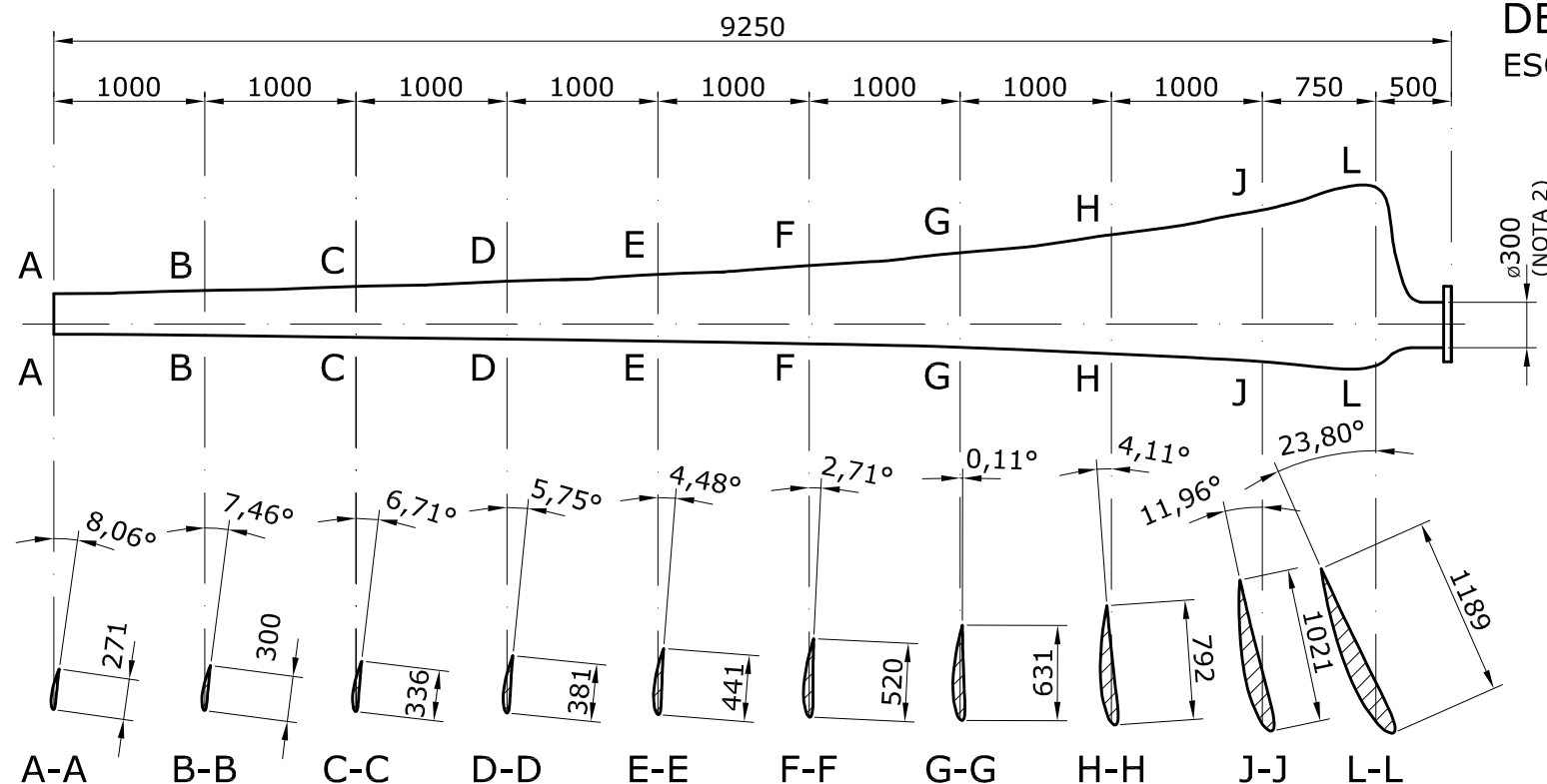
DET. A  
ESC. 1:2



DET. E  
ESC. 1:20

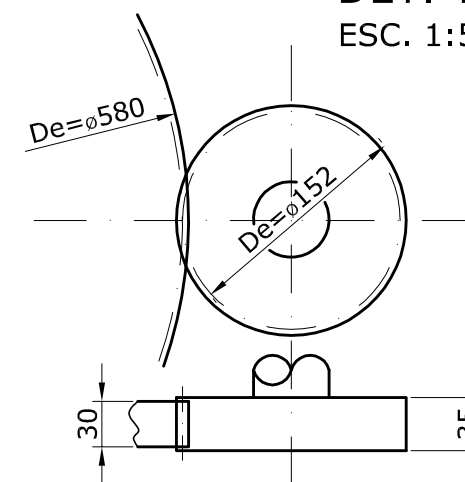


DET. B  
ESC. 1:5



DET. C  
ESC. 1:50

COROA (ROLAMENTO DE GIRO)	
DIÂMETRO EXTERNO	580
ÂNGULO DE PRESSÃO	20°
NÚMERO DE DENTES	143
MÓDULO PADRÃO	4
DIÂMETRO PRIMITIVO	572
DIÂMETRO INTERNO	562,664
PASSO PRIMITIVO	12,566
ALTURA DO DENTE	8,668



PINHÃO (SERVO MOTOR)	
DIÂMETRO EXTERNO	152
ÂNGULO DE PRESSÃO	20°
NÚMERO DE DENTES	36
MÓDULO PADRÃO	4
DIÂMETRO PRIMITIVO	144
DIÂMETRO INTERNO	1342,664
PASSO PRIMITIVO	12,566
ALTURA DO DENTE	8,668

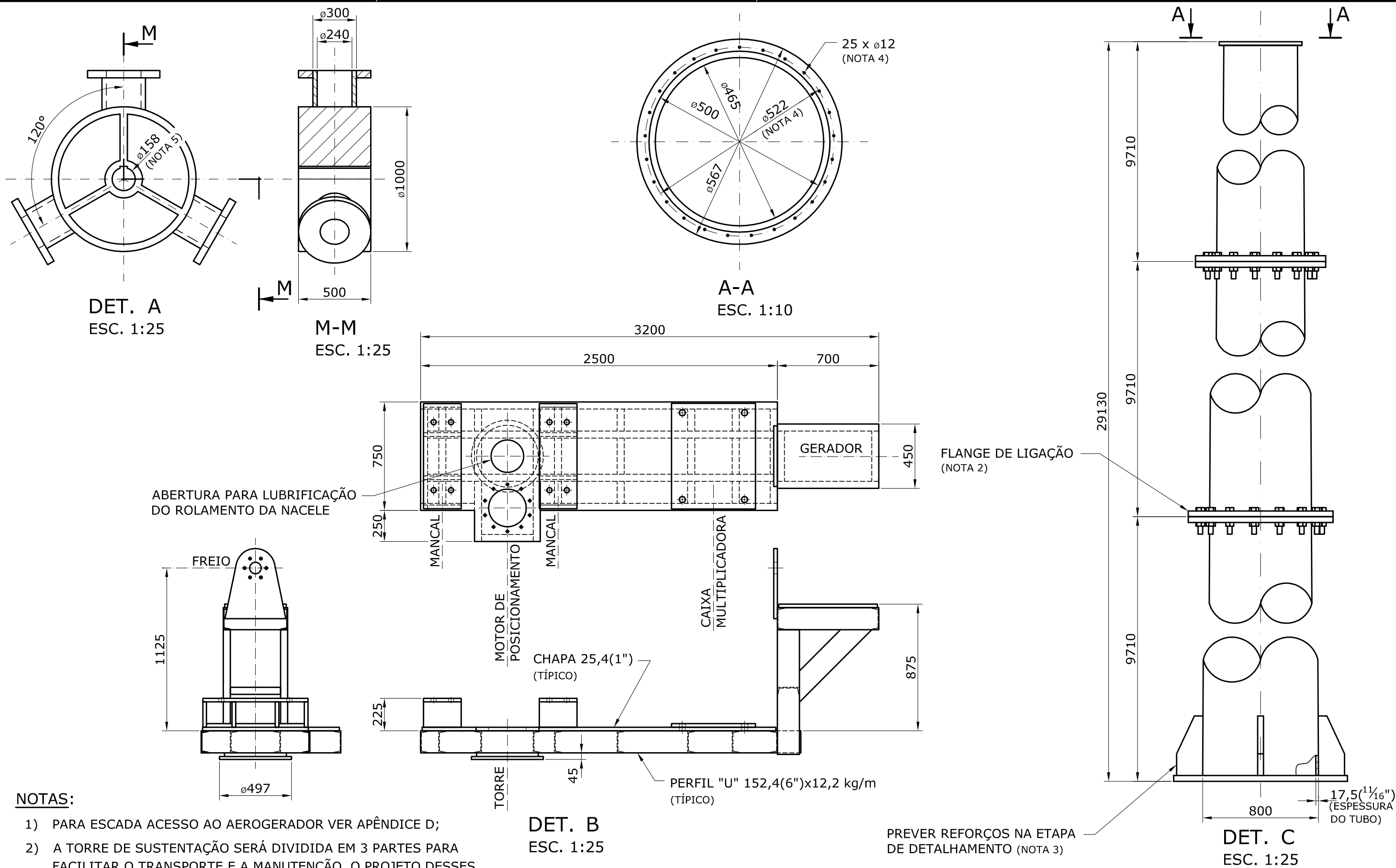
DET. D  
ESC. 1:5

PROJETO BÁSICO

NOTAS:

- 1) PARA NOTAS E RECOMENDAÇÕES GERAIS VER APÊNDICE A;
- 2) PARAFUSOS, RASGOS E CHAVETAS SERÃO DEFINIDOS NA ETAPA DE DETALHAMENTO;
- 3) PARA VISUALIZAÇÃO DOS COMPONENTES A CARENAGEM (POS. 14) FOI OMITIDA NA VISTA ISOMÉTRICA. P/ NUMERAÇÃO DOS ITENS VER APÊNDICE A.



	ENGENHARIA MECÂNICA / 10º PERÍODO		TURMA:
	DISCIPLINA: ENGENHARIA DO PRODUTO		PROFESSOR: PALMEIRA/HABIBE
TÍTULO: APÊNDICE B-VISTA ISOMÉTRICA, DETALHES DA PÁ, ROLAMENTO DA NACELE, FREIO, ENGENHAGENS E EIXO	ESCALA: INDICADA	PROJEÇÃO: 1º DIEDRO	FORMATO: A3
ALUNO: LAURO/LUCIANO/MAURICIO	MATRICULA:	DATA: 10/04/2018	

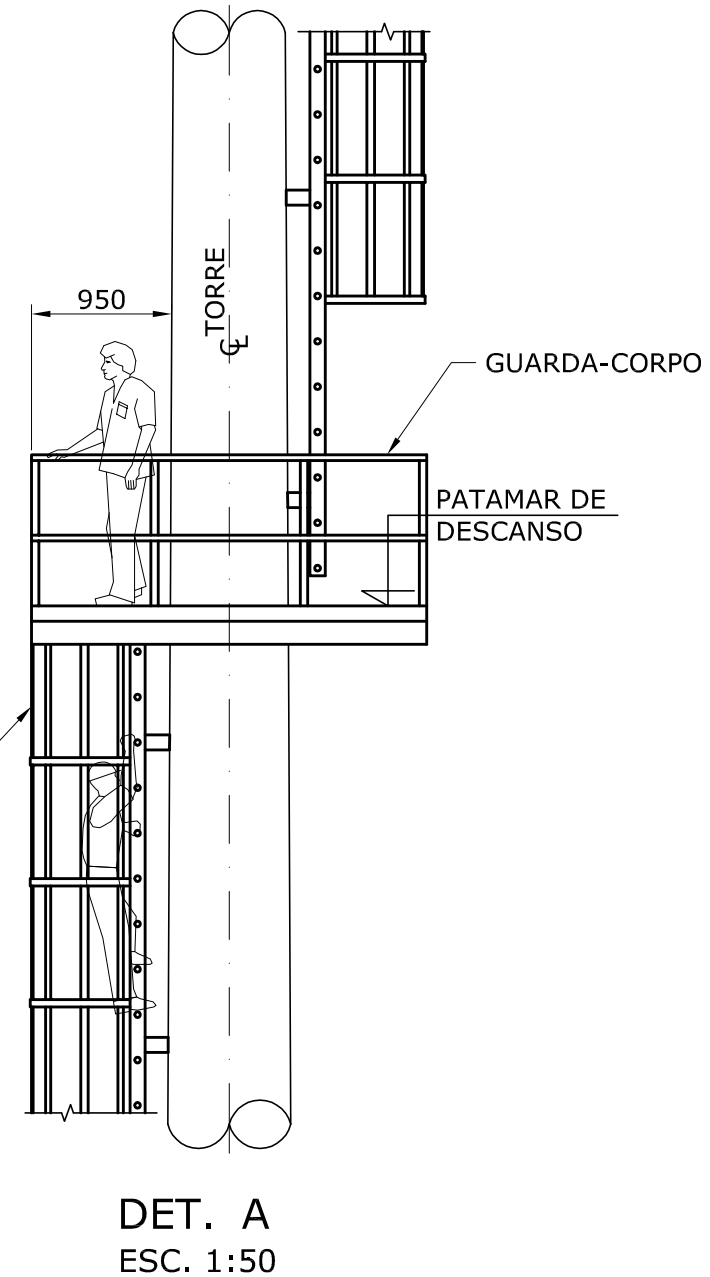
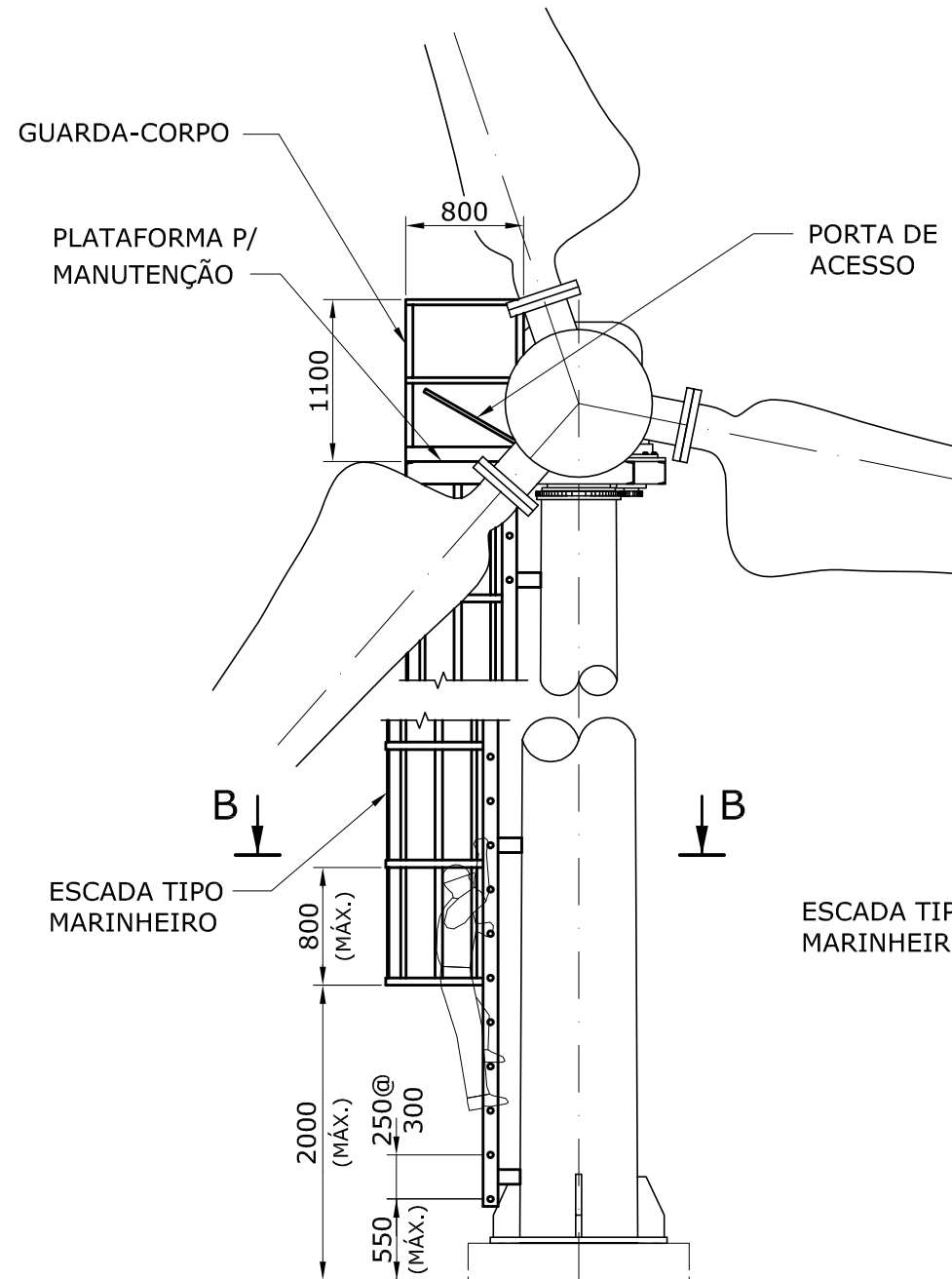
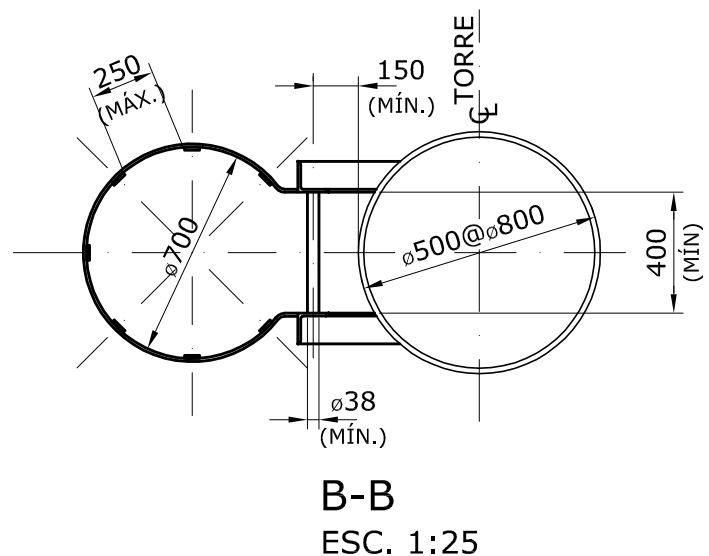
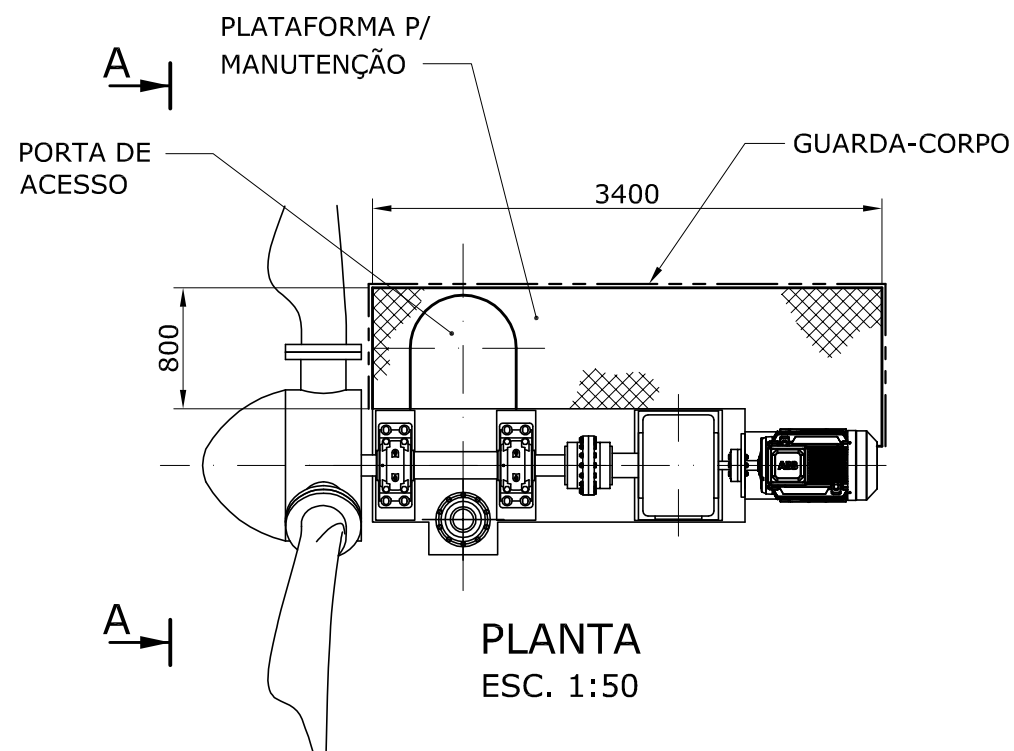


**NOTAS:**

- 1) PARA ESCADA ACESSO AO AEROGERADOR VER APÊNDICE D;
- 2) A TORRE DE SUSTENTAÇÃO SERÁ DIVIDIDA EM 3 PARTES PARA FACILITAR O TRANSPORTE E A MANUTENÇÃO. O PROJETO DESSES FLANGES SERÁ FEITO NA ETAPA DE DETALHAMENTO;
- 3) O DESENHO DA BASE DA TORRE SERÁ DEFINIDO APÓS PROJETO CIVIL COM OS CHUMBADORES JÁ DIMENSIONADOS;
- 4) A FURAÇÃO DO FLANGE DE LIGAÇÃO AO ROLAMENTO DA NACELE FOI BASEADA NO FABRICANTE IMO E DEVERÁ SER CONFIRMADA NA ETAPA DE DETALHAMENTO;
- 5) RASGOS E CHAVETAS SERÃO DEFINIDOS NA ETAPA DE DETALHAMENTO.

**PROJETO BÁSICO**



	<b>ENGENHARIA MECÂNICA / 10º PERÍODO</b>		TURMA:
	DISCIPLINA: <b>ENGENHARIA DO PRODUTO</b>	PROFESSOR: <b>PALMEIRA/HABIBE</b>	
TÍTULO: <b>APÊNDICE C-DETALHES DO CUBO, SUPORTE E DA TORRE</b>	ESCALA: <b>INDICADA</b>	PROJEÇÃO: <b>1º DIEDRO</b> 	FORMATO: <b>A3</b>
ALUNO: <b>LAURO/LUCIANO/MAURICIO</b>	MATRÍCULA:	DATA: <b>10/04/2018</b>	



**RECOMENDAÇÕES:**

- 1) OS DEGRAUS DA ESCADA DEVEM SER RESISTENTES E SUPORTAR A APLICAÇÃO DE UMA FORÇA CONCENTRADA DE NO MÍNIMO 4 kN. OS MATERIAIS OU REVESTIMENTOS DEVEM RESISTIR A INTEMPÉRIES E CORROSÃO;
- 2) OS LANCES ACIMA DE DOIS METROS DEVERÃO, OBRIGATORIAMENTE, SEREM PROVIDOS DE GUARDA-CORPOS E O GUARDA-CORPO DEVE AVANÇAR NO MÍNIMO 1,10 m ACIMA DO ÚLTIMO PATAMAR;
- 3) OS LANCES DA ESCADA NÃO PODEM SER SUPERIORES A NOVE METROS. A CADA, NO MÁXIMO 9 m, PREVER PATAMAR DE DESCANSO CONFORME DET. A;
- 4) A LARGURA DA ESCADA DEVE SER DE, NO MÍNIMO, 0,40 m E O ESPAÇAMENTO DENTRE AS BARRAS DE 0,25 @ 0,3 m;
- 5) O ESPAÇAMENTO ENTRE O PISO E A PRIMEIRA BARRA DEVE SER DE, NO MÁXIMO, 0,55 m;
- 6) A DISTÂNCIA QUE A ESCADA É FIXADA EM RELAÇÃO À ESTRUTURA DEVE SER DE, NO MÍNIMO, 0,15 m;
- 7) AS BARRAS DEVEM SER PROVIDAS DE SUPERFÍCIE, FORMAS OU RANHURAS COM A FINALIDADE DE PREVENIR POSSÍVEIS DESLIZAMENTOS.

**PROJETO BÁSICO**

 UniFOA Centro Universitário de Volta Redonda	ENGENHARIA MECÂNICA / 10º PERÍODO		TURMA: -
	DISCIPLINA: ENGENHARIA DO PRODUTO	PROFESSOR: PALMEIRA/HABIBE	
TÍTULO: APÊNDICE D - ACESSO AO AEROGERADOR	ESCALA: INDICADA	PROJEÇÃO: 1º DIEDRO 	FORMATO: A3
ALUNO: LAURO/LUCIANO/MAURICIO	MATRICULA:	DATA: 10/04/2018	