



Universidade Eduardo Mondlane

Faculdade de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

Licenciatura em Engenharia Mecânica

Trabalho de licenciatura

*Dimensionamento e Construção de um
Protótipo de uma Turbina Eólica*

Autor:

Nguluve, Ernesto Pedro

Supervisor:

Doutor Eng.º Paxis Roque

Maputo, Outubro de 2022



Universidade Eduardo Mondlane

Faculdade de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

Licenciatura em Engenharia Mecânica

Trabalho de licenciatura

***Dimensionamento e Construção de um
Protótipo de uma Turbina Eólica***

Autor:

Nguluve, Ernesto Pedro

Supervisor:

Doutor Eng.º Paxis Roque

Maputo, Outubro de 2022

TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DO TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que o estudante Ernesto Pedro Nguluve entregou no dia ___/___/2022 as 3 copias do relatório do seu trabalho de licenciatura com a referencia: _____, intitulado: Dimensionamento e Construção de um Protótipo de uma Turbina Eólica

Maputo, ___ de _____ de 2022

O Chefe da Secretaria

DECLARAÇÃO DE HONRA

Declaro, sob palavra de honra que, o presente trabalho de licenciatura foi realizado por mim, com base nos recursos que no mesmo se faz referência.

(Ernesto Pedro Nguluve)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e irmãos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus progenitores Pedro Saiela Nguluve e Luísa Ernesto Chale por me conservarem e por rigorosamente zelarem pelos meus estudos.

Agradeço a Deus por me amar e por me conservar, e por fazer de mim seu filho.

Agradeço aos meus irmãos Justino, Delto, Márcia, Marcelina, Joana e Flávia pela força e pelo apoio que muito me valeu, principalmente nos momentos de desanimo.

Agradeço ao meu supervisor Doutor Eng.º Paxis Roque por de forma incansável me acompanhar na longa caminhada que foi a elaboração deste trabalho.

Agradeço a Universidade Eduardo Mondlane, seu corpo docente, direcção e corpo técnico administrativo que me deram a oportunidade de hoje vislumbrar um horizonte superior.

Agradeço aos meus colegas Leonardo Zavala, Eduardo Mboana, David Nhangutava, António Miguel, Nilton Madade, Zeferino Mate, Daniel Senzacua, Carlos Chicuacua, Gerson Taisson, Romão Kulipossa, Calisto Manguel, Ricardo Andrade, Anacleto Ferrão, Emília Halar, Yara da Silva, Alberto Mafuiateia, Vanódio Manhique, Jaime Chivavel, Denilson Namburete, Dionísio Langa, Adelino Gaita, Rubet Perreira, Ricardo Chone, Braiton Madança, Leandro Cachamba, Fábio Ferrete pelo companheirismo e espírito de irmandade que demonstraram.

Agradeço à minha avó Celeste Tembe, pelo apoio, amor e carinho que sempre demonstrou por mim.

Agradeço ao meu Amigo e amigo da família, Dinis Chaincomo, pois das nossas conversas resultaram varias ilações úteis a este trabalho.

Agradeço ao meu amigo Flávio Cossa, pelo espírito de irmandade e companheirismo que sempre demonstrou por mim.

A todos, família e amigos que directa ou indirectamente contribuíram para a minha formação vai o meu muito obrigado!

RESUMO

Tendo em vista o melhoramento da qualidade da formação académica e o impulsionamento do uso de energias renováveis elaborou-se o presente trabalho, subordinado ao tema: Dimensionamento e construção de um protótipo de uma turbina eólica. A turbina eólica é usada para a geração de energia eléctrica através da energia eólica, que é uma fonte de energia renovável e limpa. O presente trabalho tem como objectivo principal dimensionar e construir um protótipo de uma turbina eólica que possa ser usado nas aulas para fins didáticos, e para alcançar esse objectivo fez-se consultas em sítios na internet, pesquisas bibliográficas baseadas em livros, manuais e artigos científicos e uso de *softwares* CAD e Excel. O protótipo da turbina apresentado no seguinte trabalho apresenta pás com secção transversal em forma de aerofólios o que demonstra a importância do estudo da aerodinâmica para a projecção de turbinas eólicas, o protótipo apresenta ainda dimensões menores (1.354 m de altura) o que o torna fácil manusear, e facilmente pode ser apresentado numa sala de aulas como objecto didático, e desenvolve uma potência de até 6 w sendo capaz de alimentar uma lâmpada led de alto brilho demonstrando de forma fácil o uso da turbina eólica para a geração da energia eléctrica.

Palavras Chaves: Turbina eólica. Energia eólica. Protótipo. Aerofólio

ABSTRACT

With a view to improving the quality of academic training and boosting the use of renewable energies, the present Work was elaborated and has as its theme: Dimensioning and construction of a prototype of a wind turbine. The wind turbine is used to generate electricity through wind energy which is a clean and renewable energy source. The main objective of the present work is to dimension and build a prototype of a wind turbine that can be used in classes for didactic purposes, and to achieve this objective consultation on websites, bibliographic researches based on books, manuals, scientific articles were carried out and use of CAD and Excel software. The turbine prototype presented in the following work has blades with a cross section in the form of aerofoil which shows the importance of studying aerodynamics for the design of wind turbines, the prototype also has smaller dimensions (1.354 m high) which makes it handle, and can easily be presented in a classroom as a didactic object, and develop a power up to 6 w being able to feed a high brightness LED lamp demonstrating in an easy way the use of the wind turbine for the generation of electric energy.

Keywords: Wind Turbine. Wind Energy. Prototype. Aerofoil

ÍNDICE

DECLARAÇÃO DE HONRA	i
DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	iv
ÍNDICE	vi
LISTA DE SÍMBOLOS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE GRÁFICOS	xv
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objectivo geral	3
1.2. Objectivos específicos.....	3
1.3. Metodologia	4
1.4. Justificativa.....	5
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1. O vento e a sua origem.....	6
2.1.1. Circulação global.....	6
2.1.2. Circulação secundária	7
2.1.3. Circulação terciária (ventos locais)	7
2.1.4. A velocidade do vento.....	7
2.1.5. Energia disponível no vento	8
2.2. Histórico das turbinas eólicas.....	9
2.3. Princípio de Funcionamento das turbinas eólicas	13
2.3.1. Geração da força de sustentação num aerofólio.....	13
2.3.2. Numero de Reynolds	15
2.3.3. Relação de velocidade na ponta da pá.....	15

2.3.4. Descrição qualitativa do funcionamento de uma turbina eólica	16
2.3.5. Teoria da quantidade de movimento	17
2.3.6. Teoria do elemento da pá	18
2.3.7. Coeficiente de potência	19
2.4. Principais componentes de uma turbina eólica	22
2.4.1. O rotor	23
2.4.2. A transmissão/multiplicação	24
2.4.3. Suporte estrutural	24
2.4.4. Nacela.....	26
2.4.5. Sistema de guinada.....	26
2.5. Tipos de turbinas eólicas	27
2.5.1. Turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEHs)	27
2.5.2. Turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV)	28
CAPÍTULO 3 – PROJECCÃO DO PROTÓTIPO	31
3.1. Escolha do tipo da turbina.....	31
3.2. Dimensionamento das pás da turbina.....	31
3.2.1. Velocidade do vento.....	31
3.2.2. Potência a ser desenvolvida pela turbina.....	31
3.2.3. Determinação dos parâmetros geométricos do rotor.....	32
3.2.4. Desenho da pá da turbina	35
3.2.5. Verificação da resistência mecânica das pás.....	37
3.3. Dimensionamento do leme.....	41
3.4. Projecção da parte eléctrica.....	41
3.5. Dimensionamento do gerador e mecanismo de transmissão.....	42
3.6. Apresentação do projecto	42
CAPÍTULO 4 – CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO	44
4.1. Suporte estrutural	44
4.2. Nacela.....	44

4.3. Mecanismo de Guinada.....	45
4.4. O rotor	45
4.5. O cubo	46
4.6. As pás	46
4.7. Circuito eléctrico	47
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	48
5.1. Conclusões	48
5.2. Recomendações.....	48
CAPÍTULO 6 – BIBLIOGRAFIA.....	49

LISTA DE SÍMBOLOS

Simbologia Romana

A	Área da varrida pelas pás	m^2
a	Factor de interferência axial	-
a'	Factor de interferência tangencial	-
A_l	Área do leme	m^2
A_p	Área projectada do aerofólio	m^2
B	Número de pás	-
c	Corda	m
C_d	Coefficiente de arrasto	-
C_d	Coefficiente de sustentação	-
C_m	Coefficiente do momento de guinada	-
CO_2	Dióxido de carbono	-
C_p	Coefficiente de potência	-
$C_{p,max}$	Coefficiente de potência máximo	-
C_Q	Coefficiente de torque	-
C_T	Coefficiente da força axial	-
D	Diâmetro do rotor	m
d	Diâmetro do cubo	m
E	Energia cinética	J
F_d	Força de arrasto	N
F_l	Força de sustentação	N
H	Altura	m
I	Momento de inercia	mm^2
K_S	Coefficiente de segurança	-
l	Comprimento do aerofólio	m
L	Comprimento da pá	m
L_l	Comprimento do leme	m
M	Momento de guinada	Nm
m	Massa do ar	Kg
M_β	Momento flector na direcção axial	Nm
M_ζ	Momento flector devido ao torque	Nm

P	Potencia pretendida	W
p	Pressão	Pa
P_{turb}	Potência desenvolvida pela turbina	W
P_{vento}	Potência disponível no vento	W
Q	Torque da turbina	Nm
r	Raio da curvatura do fluxo	m
R	Raio da turbina	m
Re	Número de Reynolds	-
T	Força axial	N
U	Velocidade do vento	m/s
U_{rel}	Velocidade relativa	m/s

Simbologia Grega

α	Ângulo de ataque	rad
δ	Coefficiente que toma em conta o tipo de terreno	-
η_{ger}	Rendimento do gerador	-
λ	Relação de velocidade na ponta da pá	-
μ	Viscosidade	Kg/ms
ν	Viscosidade cinemática	m ² /s
ρ	Densidade do ar	Kg/m ³
$[\sigma]$	Tensão admissível	MPa
σ_{max}	Tensão máxima	MPa
φ	Ângulo entre o plano do rotor e a velocidade relativa	rad
Ω	Velocidade angular da turbina	Rad/s

LISTA DE ABREVIATURAS

- CAD* Computer-Aided Design (desenho assistido por computador)
TEEV Turbina eólica de eixo vertical
TEEH Turbina eólica de eixo horizontal

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Circulação geral	6
Figura 2.2 – Brisa marítima e terrestre.....	7
Figura 2.3 – Brisa do vale e da montanha	7
Figura 2.4 – Perfil de velocidade para diferentes zonas.....	8
Figura 2.5 – Esquema que mostra o fluxo de ar com velocidade U que atravessa a área A	9
Figura 2.6 – turbina de eixo vertical usada na Pérsia.....	10
Figura 2.7 – Moinho de vento Europeu.....	10
Figura 2.8 – Catavento Americano	11
Figura 2.9 – Turbina eólica moderna	11
Figura 2.10 – Forças que actuam no aerofólio	13
Figura 2.11 – Mecanismo de sustentação do aerofólio	14
Figura 2.12 – Pressão sobre um aerofólio	15
Figura 2.13 – Rotor da turbina e as forças que actuam na pá	17
Figura 2.14 – Volume de controle do fluxo do ar na turbina	18
Figura 2.15 – Esquema para a análise do elemento da pá.....	19
Figura 2.16 – Perdas de eficiência causadas pela simplificação da pá em relação a ideal	20
Figura 2.17 – Efeito de rotação de esteira	21
Figura 2.18 – Perdas na ponta da pá.....	21
Figura 2.19 – Partes de uma turbina eólica	23
Figura 2.20 – transmissão por engrenagens a) caixa de engrenagens de dois estágios b) vista explodida de mecanismo planetário	24
Figura 2.21 – Diferentes tipos de torres: a) torre tubular em aço; b) torre em betão; c) torre treliçada; d) torre em tripe; e) torre atirantada	26
Figura 2.22 – Fundação de uma torre.....	26
Figura 2.23 – Sistema de guinada	27
Figura 2.24 – Sistema a jusante e a montante do vento	27
Figura 2.25 – Diferentes tipos de turbinas de eixo horizontal	28
Figura 2.26 – Turbina Savonius e suas variantes	29
Figura 2.27 – Turbina Darrieus e suas variantes	30
Figura 3.1 – Esboço do protótipo	31
Figura 3.2 – Aerofólio S1210.....	32
Figura 3.3 – a) Rotor óptimo b) Rotor modificado	36
Figura 3.4 – distribuição da força axial na pá	37

Figura 3.5 – Esquema de carregamento pelas forças aerodinâmicas	38
Figura 3.6 – Esquema de carregamento devido ao torque exercido.....	39
Figura 3.7 – Momento de inercia da secção das pás	40
Figura 3.8 – circuito da parte eléctrica	41
Figura 3.9 – Apresentação do protótipo	43
Figura 4.1 – Construção da base	44
Figura 4.2 – Rolamento fixado no topo da torre	44
Figura 4.3 – Construção da nacela	45
Figura 4.4 – Construção do leme	45
Figura 4.5 – Construção do rotor	45
Figura 4.6 – Construção das pás.....	46
Figura 4.7 – Construção das pás.....	46
Figura 4.8 – Construção de parte eléctrica	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Variação do coeficiente que toma em conta o tipo de terreno	8
Tabela 2.2 – Turbinas históricas e modernas	12
Tabela 2.3 – Forças que actuam no aerofólio.....	13
Tabela 2.4 – Considerações a tomar em conta acerca da relação de velocidade na ponta da pá ..	16
Tabela 3.1 – Relação de velocidade na ponta da pá em função do número de pás.....	33
Tabela 3.2 – Dados para o desenho do rotor	36

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 – Potência máxima alcançável num rotor óptimo em função do número de pás.....	22
Gráfico 2.2 – Potência máxima alcançável num rotor óptimo em função da razão c_l/c_d	22
Gráfico 3.1 – Coeficiente de sustentação C_l e a razão entre o coeficiente de sustentação e de arrasto C_l/C_D ambos em função do ângulo de ataque α	32
Gráfico 3.2 – C_p em função do d	33
Gráfico 3.3 – Coeficiente de potência C_p em função da relação na ponta da pá TSR	37
Gráfico 3.4 – CT em função do TRS.....	38

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

No presente trabalho será feito o dimensionamento e a construção de um protótipo de uma turbina eólica. Turbina eólica é uma máquina usada para converter a energia do vento em energia mecânica. E essa energia mecânica pode ser usada para realizar tarefas específicas tal como bombear a água, ou pode ser transformada em energia eléctrica através de um gerador eléctrico, para alimentar casas, industrias, escolas entre outros (Mohd 2012).

A energia eólica é uma fonte de energia renovável, não emite gases poluentes à atmosfera e ela é de suma importância para a sociedade pois é uma das formas de afastar-se da energia proveniente de combustíveis fósseis para formas mais sustentáveis de geração de energia. “É estimado que 1 MW provenientes duma turbina eólica compensam 2360 t de CO₂” (Letcher 2017, 8).

O custo inicial para investir em energia eólica é alto em relação ao custo inicial para investir em geradores de combustíveis fósseis, porém o preço da energia eólica é competitivo com o preço da energia obtida através de outras tecnologias, porque não há consumo de combustível e os custos de operação são mínimos (Mohd 2012).

Nas áreas remotas de difícil acesso à electricidade, a energia eólica pode ser usada para carregar baterias e para bombear água, nas duas formas mencionadas anteriormente a energia eólica pode ser usada de forma autónoma, ou combinadas com outras tecnologias energéticas tais como a energia fotovoltaica e a de pequenos motores à diesel (Probst, et al. 2011).

O uso da energia eólica requer um grande desenvolvimento na área de controlo automático, aerodinâmica e ciência de materiais. Um factor importante, quando se trata de turbinas eólicas, é saber o seu local de instalação, pois informações a respeito da velocidade e duração do vento são fundamentais para a projecção de uma turbina eólica (Al-Shemmeri 2010).

Moçambique apresenta grande potencial eólico, apresentando na sua capacidade total cerca de 4.5 GW. Moçambique apresenta um regime de ventos de intensidade média-baixa com velocidades predominantemente entre os 4 e os 6 metros por segundo à 80 metros acima do nível do solo (a.n.s.), com excepção na zona sul do país e nas zonas altas do centro e norte do país onde os ventos atingem valores mais elevados (FUNAE 2013).

O presente trabalho estrutura-se em cinco capítulos. Apresenta-se no primeiro capítulo a introdução, onde será feita de forma concisa a descrição geral do trabalho, no segundo a fundamentação teórica, onde far-se-á de forma resumida uma abordagem acerca dos conceitos

relacionados ao tema do presente trabalho, no terceiro o dimensionamento do protótipo, no quarto a descrição das etapas da construção do protótipo e no quinto as considerações finais.

1.1. Objectivo geral

- Dimensionar e construir um protótipo de uma turbina eólica para fins didácticos.

1.2. Objectivos específicos

- Seleccionar o tipo da turbina;
- Dimensionar as partes do protótipo;
- Seleccionar os materiais a serem usados na construção do protótipo;
- Construir o protótipo.

1.3. Metodologia

Para a elaboração do presente trabalho serão usados softwares CAD para a elaboração dos desenhos e o software Excel para realização dos cálculos de forma mais organizada e para a elaboração de gráficos. Serão feitas consultas em sítios na internet e pesquisas bibliográficas baseadas em livros, manuais e artigos científicos com maior ênfase para os da área da energia eólica com foco nos aspectos referentes a turbinas eólicas. Serão usados também livros e manuais da área de oficinas mecânica para auxiliaram na construção do protótipo.

1.4. Justificativa

A principal motivação para a elaboração deste trabalho é melhorar a qualidade da formação académica através da elaboração de um material didáctico que possa ser usado na sala de aulas de modo a ajudar o estudante a compreender com mais nitidez os conceitos teóricos abordados na sala de aulas. Neste caso concreto o protótipo da turbina eólica ajudará o estudante não só a compreender os conceitos relacionados às turbinas eólicas mas também na promoção das energias renováveis.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. O vento e a sua origem

O vento é a movimentação do ar atmosférico. Esta movimentação dá-se devido ao aquecimento desigual das camadas do ar, o que gera a variação da massa específica do ar e consequentemente os gradientes de pressão. Os gradientes de pressão fazem com que massas de ar se desloquem de zonas de alta pressão para zonas de baixa pressão. O aquecimento desigual das camadas do ar é devido a desigualdade da intensidade da radiação solar na superfície da terra e também devido a forma diferenciada da absorção da radiação solar através do solo, rochas, água e vegetação (Letcher 2017).

2.1.1. Circulação global

Estes tipos de ventos ocorrem de forma constante e podem ser observados ao nível do planeta (ver Figura 2.1), estes ventos são causados pela diferença de pressão causada pela desigualdade da intensidade da radiação solar no planeta, sendo a radiação mais forte nas zonas tropicais e fraca nas zonas de grande latitude (Manwell, McGowan and Rogers 2009). Este tipo de vento pode ser identificado como (Dutra 2009):

- Alísios: ventos que sopram dos trópicos para o equador, em baixas altitudes;
- Contra-Alísios: ventos que sopram do equador para os pólos, em altas altitudes;
- Ventos do Oeste: ventos que sopram dos trópicos para os pólos;
- Ventos do Leste: ventos frios que sopram dos pólos para as zonas temperadas.

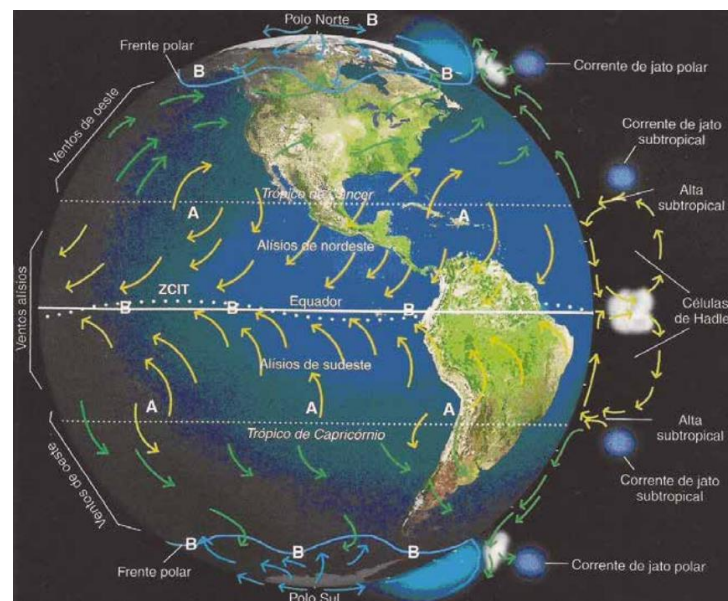


Figura 2.1 – Circulação geral
CHRISTOPHERSON, 2012 *apud* (Brito, Silva and Crispim 2019).

2.1.2. Circulação secundária

Segundo J. F. Manwell, (2009) este tipo de circulação ocorre se os centros de alta ou baixa pressão forem causados pelo aquecimento ou arrefecimento da baixa atmosfera e este pode ser furacões, monções ou ciclones. As monções mudam de direcção a cada seis meses aproximadamente.

2.1.3. Circulação terciária (ventos locais)

Estes ventos surgem em determinados locais devido aos mecanismos bem específicos (Dutra 2009). São exemplos deste tipo de vento: as brisas marítimas, as brisas terrestres, os ventos dos vales, os ventos das montanhas e as tempestades, como pode ser visto na Figura 2.2 e na Figura 2.3. (Manwell, McGowan and Rogers 2009).

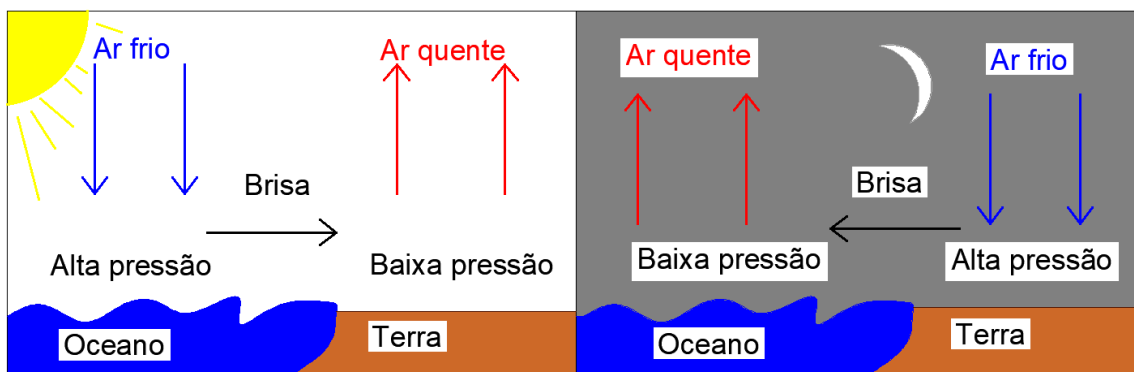


Figura 2.2 – Brisa marítima e terrestre
Adaptado de <https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Brisa>

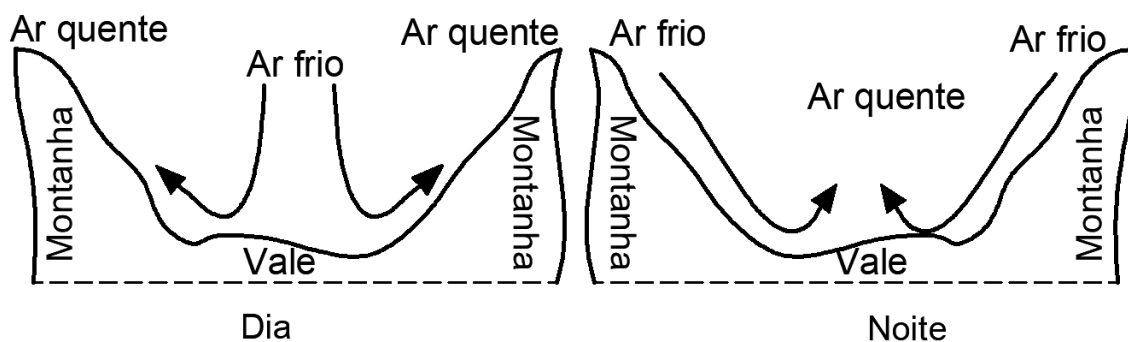


Figura 2.3 – Brisa do vale e da montanha
Adaptado de Rohatgi e Nelson, 1994 *apud* (Manwell, McGowan and Rogers 2009)

2.1.4. A velocidade do vento

A velocidade de vento varia de acordo com a localização geográfica e com a altura, constatando-se variações instantâneas, diárias, sazonais e anuais (Silva 2004). A variação da velocidade do vento de acordo com a altura pode ser expressa através da seguinte fórmula empírica (Letcher 2017):

$$U(h) = U_1 \left(\frac{h}{h_1} \right)^\delta \quad (2.1)$$

Onde:

- $U(h)$ é a velocidade de vento à uma altura h ;
- U_1 é a velocidade de referência à uma altura de referência h_1 (geralmente 10 m); e
- δ é o coeficiente que toma em conta o tipo de terreno, conforme ilustrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Variação do coeficiente que toma em conta o tipo de terreno

Bispo, 2000 *apud* (Silva 2004)

Tipo De Terreno	δ
Areia	0.10
Gramma Baixa	0.13
Gramma Alta	0.19
Subúrbios	0.32

Conforme a equação (2.2) a velocidade do vento aumenta drasticamente com a altura. A variação da velocidade com a altura forma um perfil da velocidade de vento como ilustra a Figura 2.4.

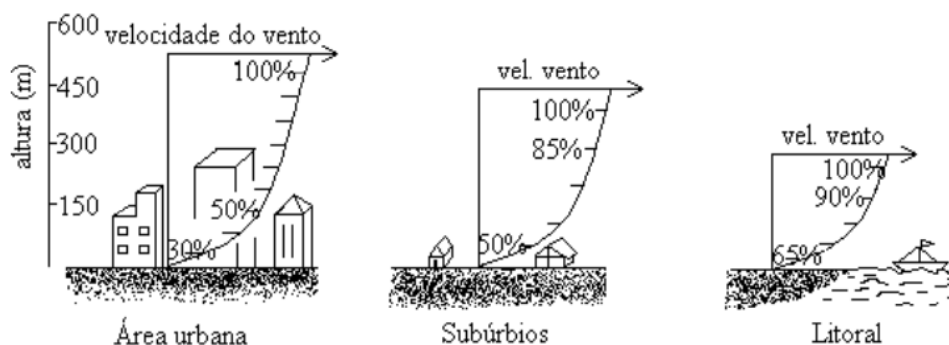


Figura 2.4 – Perfil de velocidade para diferentes zonas

<http://energiaeolicaufbc.blogspot.com/2011/12/importancia-do-potencial-eolico.html?m=1>

2.1.5. Energia disponível no vento

Sendo que o vento é definido como sendo massa de ar em movimento então ele apresenta uma determinada energia cinética dada pela seguinte expressão (Tong 2010):

$$E = \frac{1}{2} \times m \times U^2 \quad (2.3)$$

Onde:

- E é a energia cinética;
- m é a massa do ar; e

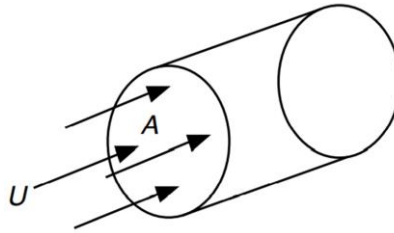


Figura 2.5 – Esquema que mostra o fluxo de ar com velocidade U que atravessa a área A
(Manwell, McGowan and Rogers 2009)

Considerando um fluxo de ar que atravessa a secção transversal de um cilindro imaginário (ver Figura 2.5) à uma velocidade perpendicular à face do cilindro, pode-se demonstrar que a potência disponível no vento que passa pela secção A é dada pela seguinte expressão (Manwell, McGowan and Rogers 2009):

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times U^3 \quad (2.4)$$

Onde:

- P é a potencia disponível no vento;
- ρ é a densidade do ar; e
- A é a área da secção transversal;

É de notar que a potência disponível no vento é proporcional à (ao):

- Densidade do ar;
- Área varrida pelo rotor (ou ao quadrado do diâmetro do rotor para as turbinas convencionais de eixo horizontal);
- Cubo da velocidade do vento.

2.2. Histórico das turbinas eólicas

A força do vento tem sido usada já há muito tempo pelos marinheiros para mover os barcos nos rios e lagos e mais tarde para mover os navios no mar (Letcher 2017).

O primeiro registro histórico da utilização da energia eólica para bombeamento de água e moagem de grãos através de cata-ventos de eixo vertical é proveniente da Pérsia, por volta de 200 A.C. (ver Figura 2.6) (Dutra 2009).

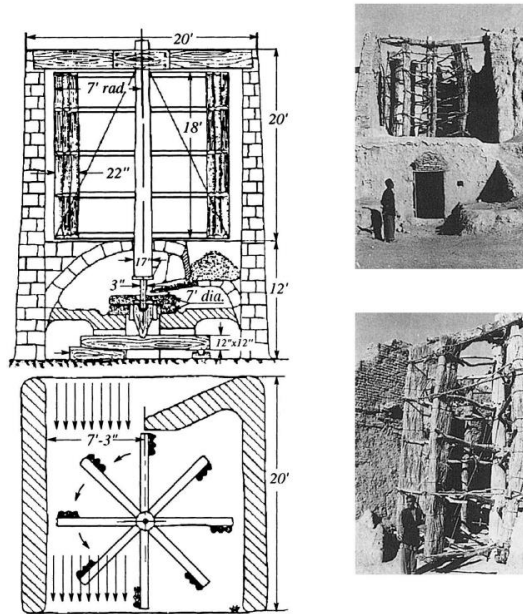


Figura 2.6 – turbina de eixo vertical usada na Pérsia
Wulff,(1966) *apud* (Spera 2009)

No século XII começaram a ser utilizados moinhos de vento de eixo horizontal designados por moinhos de vento europeus (ver Figura 2.7) e eram usados para moer grãos e bombear água, no nordeste da Europa particularmente na Inglaterra, França e Holanda, entre outros países (Spera 2009). Os moinhos de vento de eixo horizontal do tipo “holandês” foram rapidamente disseminados em vários países da Europa (Dutra 2009).



Figura 2.7 – Moinho de vento Europeu
<https://stringfixar.com/pt/Windmill>

Durante a revolução industrial Com o surgimento da máquina a vapor movida à carvão, iniciou-se o declínio do uso dos moinhos de vento europeus (Manwell, McGowan and Rogers 2009).No entanto surgiu um novo tipo de turbina eólica na segunda metade do século XIX designado catavento de múltiplas pás conhecido também como catavento Americano (ver Figura 2.8) e a sua

utilização era destinada ao bombeamento da água e desenvolveu-se de forma efectiva, em diversos países, principalmente nas suas áreas rurais (Spera 2009). Acredita-se que, desde a segunda metade do século XIX, mais de 6 milhões de cata-ventos já teriam sido fabricados e instalados somente nos Estados Unidos para o bombeamento de água em sedes de fazendas isoladas e para abastecimento de bebedouros para o gado em pastagens extensas (Dutra 2009). Até hoje esse sistema é largamente usado em várias partes do mundo para bombeamento de água.



Figura 2.8 – Catavento Americano
(Letcher 2017)

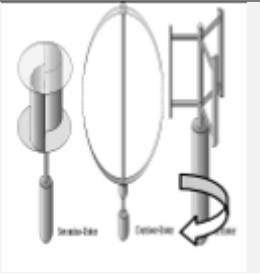



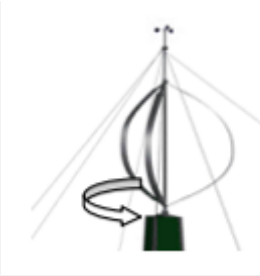

O uso das turbinas eólicas para a geração de energia eléctrica começou por volta do século XX, surgindo gradualmente turbinas eólicas cujos rotores estão conectados à geradores eléctricos (Hansen 2008).



Figura 2.9 – Turbina eólica moderna
(Sørensen, et al. 2016)

Tabela 2.2 – Turbinas históricas e modernas

Adaptado de (Probst, et al. 2011)

Nome da turbina	Orientação do eixo	Uso e época	Modo propulsão	Pico da eficiência	Representação								
Savonius	Vertical	Historicamente usado na Pérsia e é usado na actualidade para a ventilação	Arrasto	16%									
Cup	Vertical	Usado nos anemómetros modernos	Arrasto	8%									
Moinho De Vento Americano	Horizontal	Usado no século XVIII até hoje para bombear água, moer trigo e gerar energia nas fazendas	Sustentação	31%									
Moinho De Vento Holandês	Horizontal	Usado no século XVI para moer trigo	Sustentação	17%									
Darrieus	Vertical	Usado desde o século XX para a geração de energia	Sustentação	40%									
Turbina Moderna	Horizontal	Usado desde o século XX para a geração de energia	Sustentação	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nr De Pás</th> <th>Eficiência</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>43%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>47%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>50%</td> </tr> </tbody> </table>	Nr De Pás	Eficiência	1	43%	2	47%	3	50%	
Nr De Pás	Eficiência												
1	43%												
2	47%												
3	50%												

2.3. Princípio de Funcionamento das turbinas eólicas

As turbinas eólicas são máquinas que reduzem a velocidade do vento, com objectivo de extrair a energia contida no vento e convertê-la em energia mecânica, onde surgirá um torque que eventualmente fará girar um gerador (ou outra máquina que está sendo accionada pela turbina) (Letcher 2017). Turbinas eólicas são geralmente formadas por pás giratórias cuja secção transversal tem o formato de um aerofólio como pode ser visto na Figura 2.13.

O funcionamento das turbinas eólicas pode ser explicado através de duas teorias: a teoria da quantidade de movimento e a teoria do elemento da pá. Estas duas teorias quando combinadas podem ser usadas para fazer a projecção das pás do rotor, pois com esta teoria é possível relacionar o formato da pá com a eficiência do rotor.

2.3.1. Geração da força de sustentação num aerofólio

Quando um aerofólio é exposto à um fluxo de ar surgem forças aerodinâmicas que podem ser simplificadas em duas forças e um momento, como pode ser visto na Figura 2.10. (Manwell, McGowan and Rogers 2009)

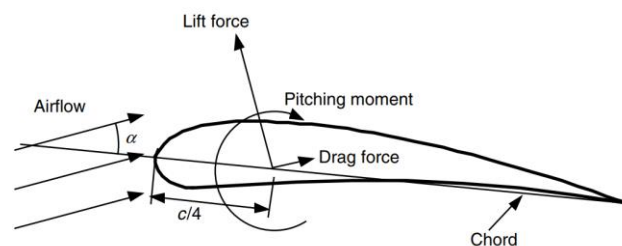


Figura 2.10 – Forças que actuam no aerofólio
(Manwell, McGowan and Rogers 2009)

Tabela 2.3 – Forças que actuam no aerofólio
(Manwell, McGowan and Rogers 2009)

Força / Momento	Definição	Expressão Matemática
Força De Sustentação	é definida como sendo aquela que actua perpendicularmente à direção do fluxo do ar	$F_l = C_{l\frac{1}{2}}\rho U_{rel}^2 cl$ (2.5)
Força De Arrasto	é definida como sendo aquela que actua paralelamente à direção do fluxo do ar	$F_d = C_{d\frac{1}{2}}\rho U_{rel}^2 cl$ (2.6)
Momento De Guinada	é definido como sendo aquele que actua em torno de um eixo perpendicular à secção transversal do aerofólio	$M = C_{m\frac{1}{2}}\rho U_{rel}^2 A_p c$ (2.7)

Onde na Tabela 2.3:

- F_l é a força de sustentação;
- C_l é o coeficiente de sustentação;
- F_d é a força de arrasto;
- C_d é o coeficiente de arrasto;
- M é o momento de guinada;
- C_m é o coeficiente do momento de ascensão;
- U_{rel} é a velocidade relativa;
- c é a corda;
- l é o comprimento do aerofólio; e
- A_p é a área projectada do aerofólio (*corda* × *comprimento*).

Os coeficientes C_l , C_d e C_m são funções do número de Reynolds, ângulo de ataque, e numero Mach sendo que para turbinas eólicas que se movem a baixas velocidades o número de Mach pode não ser considerado. (Hansen 2008).

Fisicamente a força de sustentação num aerofólio surge porque a geometria do aerofólio força o fluxo do ar a curvar-se para baixo como pode ser visto na Figura 2.11, e através da disciplina de mecânica dos fluidos é sabido que para curvar uma determinada linha de fluxo dum fluido é necessário que haja gradiente de pressão dado pela seguinte formula:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\rho U^2}{r} \quad (2.8)$$

Onde:

- p é a pressão;
- r é o raio da curvatura do fluxo; e
- U é a velocidade do escoamento.

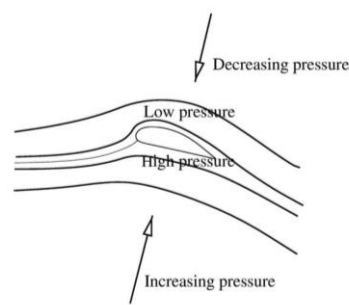


Figura 2.11 – Mecanismo de sustentação do aerofólio (Hansen 2008)

Este gradiente de pressão surge devido à força centrífuga conhecida do movimento circular de uma partícula. Sendo que longe do aerofólio a pressão é atmosférica, na parte superior do aerofólio a pressão deve ser menor que a pressão atmosférica e na parte inferior deve ser maior que a pressão atmosférica. Essa diferença de pressão é que cria a força de sustentação como pode ser visto na Figura 2.12 (Hansen 2008).

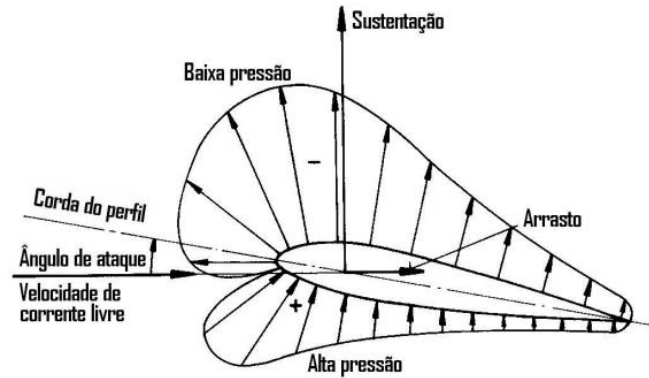


Figura 2.12 – Pressão sobre um aerofólio

<https://microeolica.weebly.com/coeficientes-e-forcedilas-atuantes.html>

2.3.2. Numero de Reynolds

É um parâmetro adimensional usado para caracterizar o fluxo de um determinado fluido indicando o quão turbulento ou laminar é o escoamento, e mede a razão entre as forças inerciais e as forças viscosas. É definido pela seguinte expressão (Manwell, McGowan and Rogers 2009):

$$R = \frac{UL}{\nu} = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (2.9)$$

Onde:

- R_e é o número de Reynolds;
- L é o comprimento do escoamento;
- μ é a viscosidade do fluido; e
- ν é a viscosidade cinemática;

2.3.3. Relação de velocidade na ponta da pá

A relação de velocidade na ponta da pá é definida como sendo a relação entre a velocidade na ponta da pá e a velocidade do vento. E é dada pela seguinte expressão (Letcher 2017):

$$\lambda = \frac{\Omega \times R}{v} \quad (2.10)$$

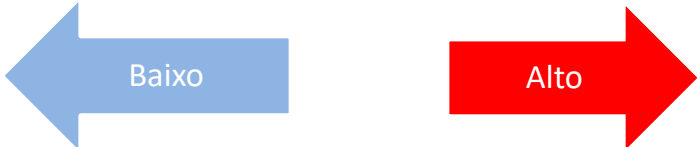
Onde:

- λ é a relação de velocidade na ponta da pá;
- Ω é a velocidade angular da turbina; e
- R é o raio da turbina;

Se o rotor girar muito lentamente, a maior parte do vento irá passar sem interagir com as pás do rotor, porém se o rotor girar muito rapidamente as pás do rotor irão se comportar como uma parede sólida bloqueando a passagem do vento. É por isso que as turbinas são projectadas com uma optima relação de velocidade na ponta da pá para extrair o máximo possível da energia contida no vento (Al-Shemmeri 2010).

Aspectos tais como a eficiência, esforços mecânicos, aerodinâmica e o ruído devem ser tomados em conta na escolha de uma relação de velocidade na ponta da pá (Schubel and Crosseley 2012).

Tabela 2.4 – Considerações a tomar em conta acerca da relação de velocidade na ponta da pá
Adaptado de (Probst, et al. 2011)

Relação De Velocidade Na Ponta Da Pá (λ)		
	Baixo	Alto
Valor	Valores de 1 à 2 são considerados baixos	Valores maiores que 10 são considerados altos
Aplicação	Cata ventos tradicionais e os usados para bombear água	Usado principalmente em protótipos com uma ou duas pás
Torque	Aumenta	Diminui
Eficiência	Diminui significativamente para valores abaixo de 5 devido ao efeito de rotação da esteira criado pelo alto torque	Aumenta significativamente para valores acima de 8
Tensões Devido À Força Centrífuga	Diminuem	Aumentam (aumentam com o quadrado da velocidade angular)
Tensões Aerodinâmicas	Diminuem	Aumentam proporcionalmente à velocidade angular
Perfil Da Pá Aerodinâmica	Largo Simples	Significativamente fino exigente
Ruído	Aumenta com a sexta potencia aproximadamente	

2.3.4. Descrição qualitativa do funcionamento de uma turbina eólica

Na Figura 2.13 pode ser visto que a velocidade do vento ao aproximar-se do rotor é reduzida de U para $U(1 - a)$ através do coeficiente a . Também surge uma velocidade perpendicular a velocidade do vento devido à rotação do rotor, e é definida como sendo ωr , esta velocidade sofre um

acrécimo e passa a ser $\omega r(1 + a')$ devido ao coeficiente a' . Os coeficientes a e a' , são chamados de factor de interferência axial e tangencial, respectivamente. Os coeficientes a e a' surgem devido a existência de vórtices no fluxo de ar que atravessa a turbina, e se eles são conhecidos pode-se determinar o valor da velocidade relativa U_{rel} através do triângulo de velocidade ilustrado na Figura 2.13 (Hansen 2008).

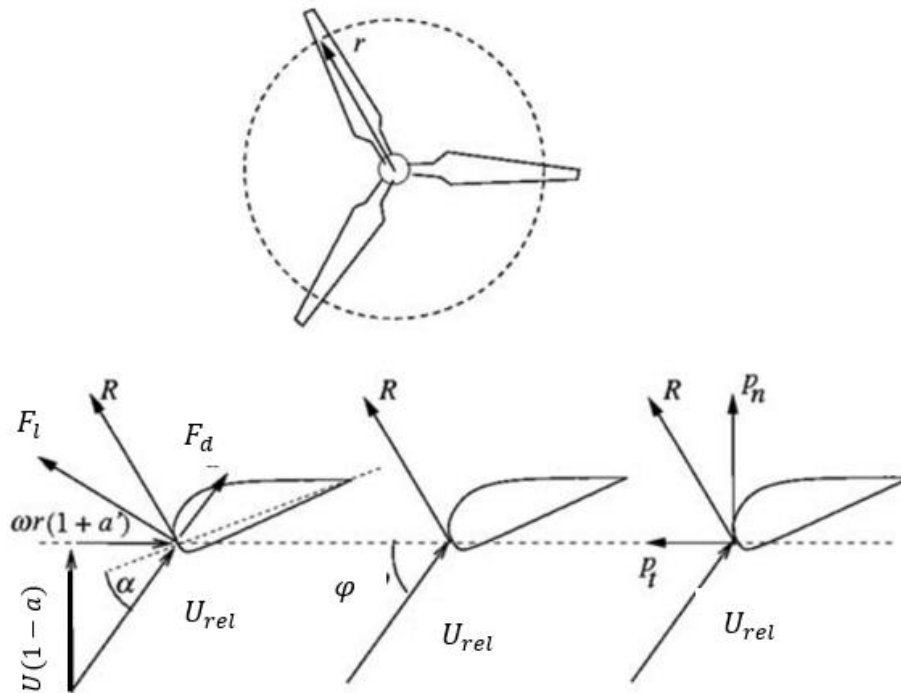


Figura 2.13 – Rotor da turbina e as forças que actuam na pá
(Letcher 2017)

A força aerodinâmica resultante R é a soma das forças de sustentação e de arrasto, por definição a força de sustentação é perpendicular à velocidade relativa U_{rel} e a de arrasto é paralela à mesma, como pode ser visto na Figura 2.13. Conforme pode ser visto na Figura 2.13, a força aerodinâmica resultante tem duas componentes, uma axial P_n e uma tangencial P_t . A componente tangencial é a responsável por transmitir o torque requerido no veio e a componente axial é a responsável pela redução da velocidade do vento a fim de se extrair a energia cinética contida nele (Letcher 2017).

2.3.5. Teoria da quantidade de movimento

Nesta teoria as forças e as condições de escoamento na pá da turbina são determinadas através da teoria de conservação da quantidade de movimento, visto que força é a variação da quantidade de movimento por unidade de tempo. As equações desta teoria foram desenvolvidas considerando o desempenho de um rotor ideal incluindo o efeito de esteira. Nesta teoria as análises são feitas de acordo com o volume de controlo apresentado na Figura 2.14 (Letcher 2017).

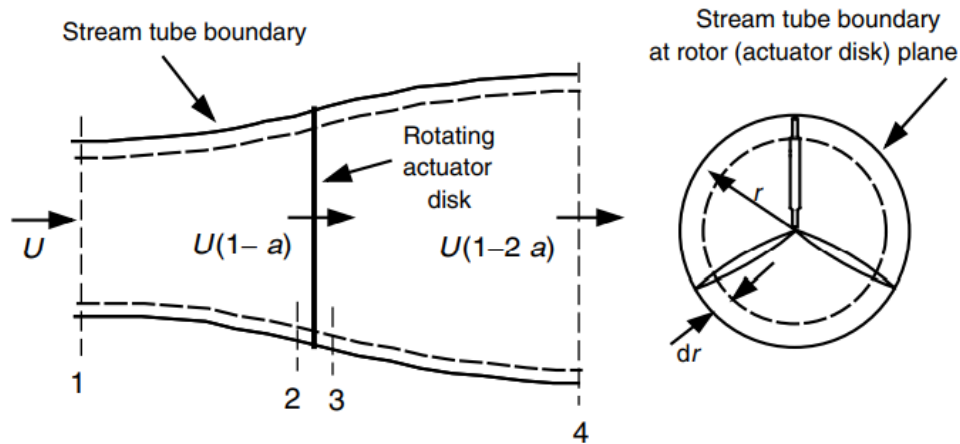


Figura 2.14 – Volume de controle do fluxo do ar na turbina
(Manwell, McGowan and Rogers 2009)

Aplicando a lei da conservação da quantidade do movimento no volume de controle ilustrado na Figura 2.14 é possível determinar as seguintes equações (Letcher 2017):

Força axial:

$$dT = \rho U^2 4a(1-a)\pi r dr \quad (2.11)$$

Onde:

- T é a força axial;
- r é o raio da turbina; e
- a é o factor de interferência axial.

Torque transmitido às pás:

$$dQ = 4a'(1-a)\rho U\pi r^3 \Omega dr \quad (2.12)$$

Onde:

- Q é o torque; e
- a' é o factor de interferência tangencial.

2.3.6. Teoria do elemento da pá

As forças na pá da turbina também podem ser expressas através dos coeficientes de sustentação, de arrasto e o ângulo de ataque. Nesta teoria a pá é dividida em N elementos como pode ser visto na Figura 2.15, e assume-se que (Chaudhary1 and Roy 2015):

- Não há interação aerodinâmica entre os elementos da pá (não há fluxo radial);
- As forças na pá são determinadas somente através das características de sustentação e de arrasto do aerofólio.

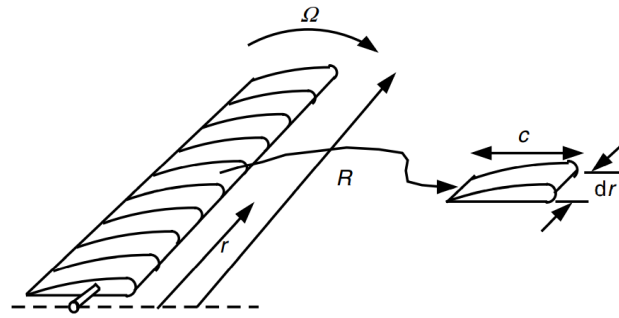


Figura 2.15 – Esquema para a análise do elemento da pá

De acordo com esta teoria a força total axial e tangencial exercida em cada elemento da pá, para um rotor com B pás é definida por (Letcher 2017):

Força axial:

$$dT = (dF_L \cos\varphi + dF_D \sin\varphi)B \quad (2.13)$$

Onde:

- B é o número de pás; e
- φ é o ângulo entre o plano do rotor e a velocidade relativa.

Força tangencial:

$$dF_T = (dF_L \sin\varphi - dF_D \cos\varphi)B \quad (2.14)$$

2.3.7. Coeficiente de potência

A eficiência de uma turbina eólica na extração da potência é quantificada através do coeficiente de potência C_p , que é a razão entre a potência extraída pela turbina P_{turb} e a potência total disponível no vento P_{vento} que atravessa a área varrida pelas pás da turbina, e é dada através da seguinte expressão:

$$C_p = P_{turb}/P_{vento} \quad (2.15)$$

Sendo assim a potência extraída pela turbina será dada pela seguinte expressão (Probst, et al. 2011):

$$P_{turb} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times U^3 \times C_p \quad (2.16)$$

O físico alemão Albert Betz conseguiu demonstrar fisicamente que o limite máximo teórico para o coeficiente de potência é $C_p = 16/27$ o correspondente a 59%. Valores maiores que este não podem ser atingidos pelo facto de que para se extrair a energia do vento tem que haver um fluxo contínuo de vento. Se hipoteticamente assumirmos que foi extraído 100% da energia cinética do vento, a velocidade do vento seria reduzida à zero e o fluxo do vento cessaria (Letcher 2017).

O limite de Betz é o máximo teoricamente possível porém na prática é impossível de ser alcançado pois existem três factores que afectam negativamente o limite de Betz que são os seguintes (Manwell, McGowan and Rogers 2009):

- Efeito de rotação da esteira atrás do rotor;
- Número finito de pás e as associadas perdas na ponta da pá;
- O efeito da força de arrasto.

Para além dos factores citados acima o coeficiente de potencia também é reduzido pela simplificação feita ao formato ideal da pá de modo a reduzir o peso da pá e facilitar o processo de fabricação da pá. As perdas de eficiência causadas pela simplificação do formato da pá podem ser vistas na figura abaixo (Probst, et al. 2011)

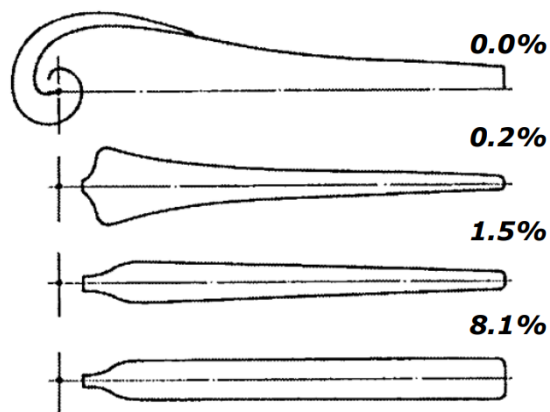


Figura 2.16 – Perdas de eficiência causadas pela simplificação da pá em relação a ideal
(Probst, et al. 2011)

Segundo (Manwell, McGowan and Rogers 2009) tomando em conta o efeito do arrasto, número de pás e o efeito de rotação da esteira o coeficiente de potência pode ser dado pela seguinte expressão:

$$C_{p,max} = \left(\frac{16}{27}\right) \lambda \left[\lambda + \frac{1.32 + \left(\frac{\lambda - 8}{20}\right)^2}{B^{\frac{2}{3}}} \right]^{-1} - \frac{(0.57)\lambda^2}{\frac{C_l}{C_D} \left(\lambda + \frac{1}{2B}\right)} \quad (2.17)$$

2.3.7.1. Efeito de rotação da esteira atrás do rotor

Para que o rotor da turbina gire, o fluxo de ar tem que aplicar um torque às pás da turbina e pela lei da ação reação as pás da turbina aplicam um torque no fluxo do ar, na mesma magnitude e no sentido oposto, fazendo com que o fluxo de ar atrás do rotor gire no sentido inverso ao do rotor como pode ser visto na Figura 2.17 (Manwell, McGowan and Rogers 2009).

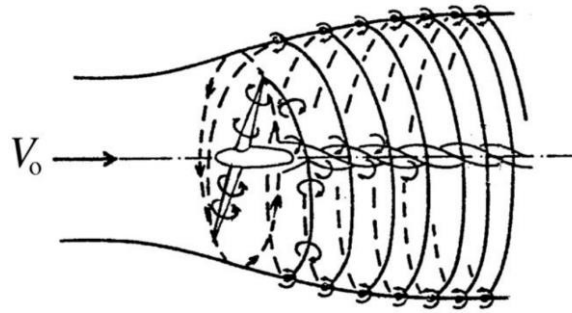


Figura 2.17 – Efeito de rotação de esteira
(Hansen 2008)

Este fenómeno cria o chamado efeito de rotação da esteira. A geração do efeito de rotação de esteira resulta em perdas de energia, reduzindo a energia extraída pelo rotor. Em geral as perdas devido o efeito de esteira são maiores quanto maior o torque gerado pela turbina. Sendo assim as turbinas com baixas frequências de rotação (alto torque) experienciam maiores perdas devido ao efeito de esteira do que as turbinas com altas frequências de rotação (baixo torque) (Manwell, McGowan and Rogers 2009).

2.3.7.2. Número finito de pás e as associadas perdas na ponta da pá

Para um rotor com número finito de pás a diferença de pressão entre a superfície superior e inferior é compensada por um fluxo radial em torno da ponta da pá como pode ser visto na Figura 2.18, produzindo-se o denominado efeito de perdas na ponta da pá (Hansen 2008).

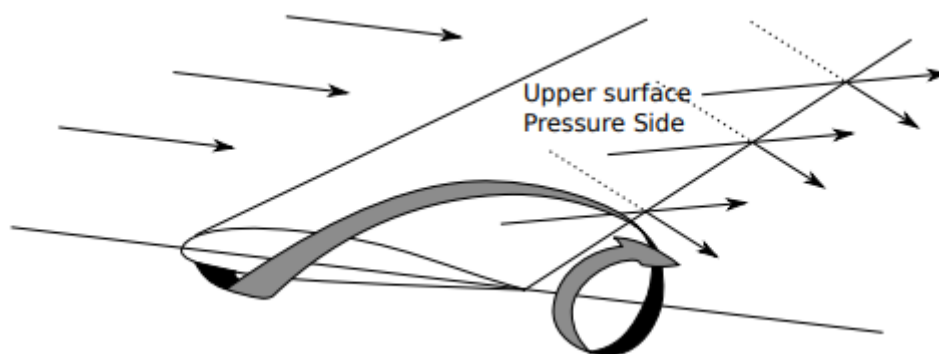


Figura 2.18 – Perdas na ponta da pá
(Branlard 2013)

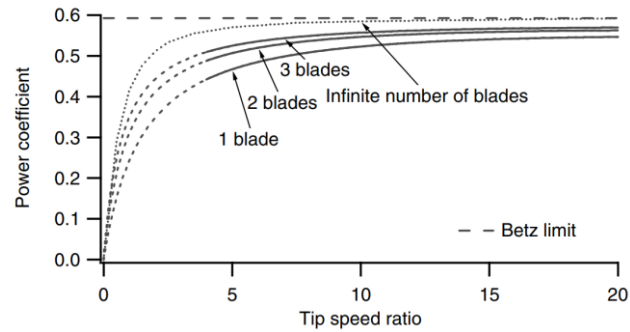


Gráfico 2.1 – Potência máxima alcançável num rotor ótimo em função do número de pás
(Manwell, McGowan and Rogers 2009)

2.3.7.3. O efeito da força de arrasto

As forças de arrasto afetam negativamente o coeficiente de potência, porque oferecem uma resistência à rotação do rotor, como pode ser visto na equação (2.14) quanto maior for a força de arrasto menor será a força tangencial (força que contribui para o torque) é por isso que devem ser escolhidos aerofólios que proporcionem menor relação C_d/C_l . (Probst, et al. 2011).

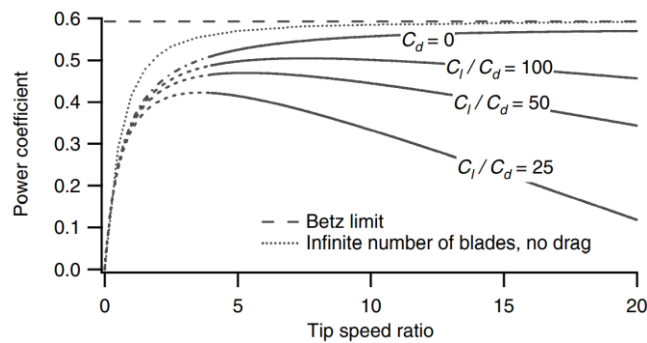


Gráfico 2.2 – Potência máxima alcançável num rotor ótimo em função da razão c_l/c_d
(Manwell, McGowan and Rogers 2009)

2.4. Principais componentes de uma turbina eólica

As turbinas eólicas são constituídas principalmente pelo rotor, a transmissão / multiplicação, o suporte estrutural, nacela e o sistema de guinada (Manwell, McGowan e Rogers 2009). É possível observar algumas partes da turbina na Figura 2.19.

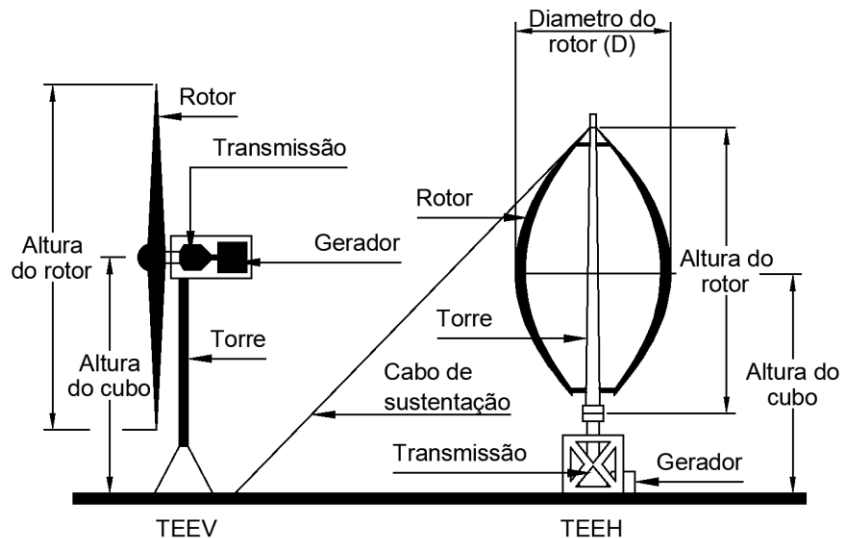


Figura 2.19 – Partes de uma turbina eólica
Adaptado de (Al-Shemmeri 2010)

2.4.1. O rotor

O rotor é projectado de modo a captar a energia cinética do vento e transformá-la em energia mecânica (energia rotacional do veio) (Letcher 2017). O rotor deve ser resistente para suportar as cargas causadas pela ação do vento sobre as suas pás (Garre 2015).

As pás são o principal componente do rotor, pois são as responsáveis pela extração da energia do vento, são as pás que colocam o rotor em rotação (Manwell, McGowan and Rogers 2009).

As pás podem ser movidas pela força de sustentação ou de arrasto, sendo que as movidas pelas forças de sustentação oferecem maior eficiência à turbina do que as movidas pela força de arrasto (Letcher 2017). As pás movidas pela força de sustentação são formadas por aerofólios semelhantes as asas de um avião (Letcher 2017).

As dimensões e a geometria das pás são concebidas de modo a atenderem aos requisitos do desempenho da turbina eólica (Garre 2015).

As pás do rotor podem ser feitas de diversos materiais tais como os compósitos (fibras de vidro e fibras de carbono), alumínio, aço e madeira (Silva 2004). Muito recentemente as fibras de carbono tem sido usados na construção das pás e algumas turbinas usam o alumínio, principalmente as turbinas de eixo vertical (Manwell, McGowan and Rogers 2009).

As pás do rotor estão sujeitas as seguintes cargas (Probst, et al. 2011):

- Aerodinâmicas;
- Gravitacionais;

- Centrifugas;
- Giroscópicas e;
- Operacionais.

2.4.2. A transmissão/multiplicação

A transmissão é o mecanismo que transmite a rotação do eixo do rotor ao eixo do gerador e tem como finalidade multiplicar a velocidade angular da turbina com intuito de aproveitar as características do gerador. A transmissão amplamente utilizada é a transmissão por engrenagens (ver Figura 2.20), por ser a mais eficiente (Silva 2004).

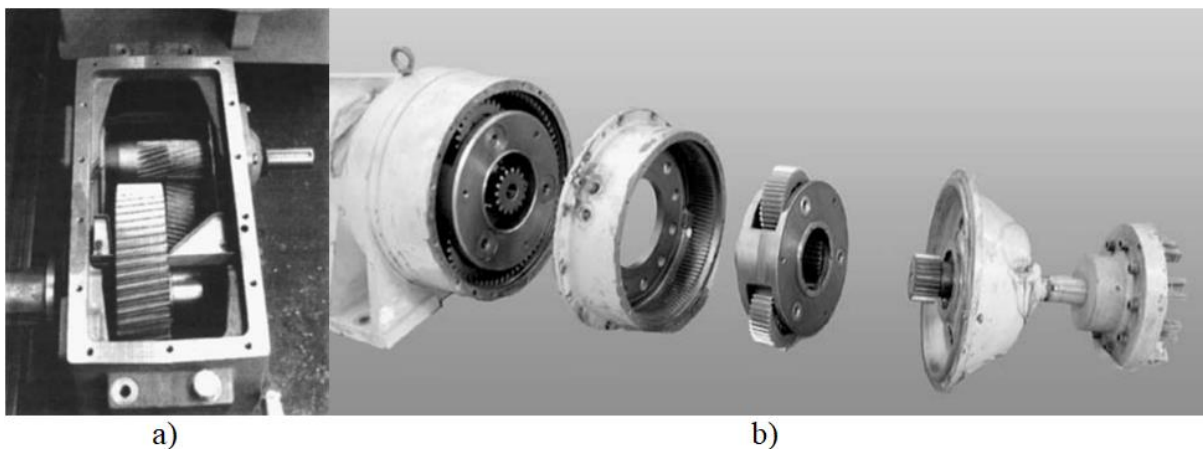


Figura 2.20 – transmissão por engrenagens a) caixa de engrenagens de dois estágios b) vista explodida de mecanismo planetário

(Manwell, McGowan and Rogers 2009)

A velocidade angular dos rotores habitualmente varia na faixa de 20 a 150rpm, devido às restrições de velocidade na ponta da pá (velocidade tangencial) (Dutra 2009). A velocidade na ponta da pá encontra-se na faixa dos 50 a 110m/s, e quase independem do tamanho do diâmetro (Silva 2004). Entretanto os geradores operam com frequência rotações muito mais elevadas (1.800 ou 1.500rpm), tornando necessária a instalação de um sistema de multiplicação entre o eixo do rotor e do gerador (Manwell, McGowan and Rogers 2009).

Com a mais recente tecnologia, as turbinas eólicas tem dispensado o uso de um sistema de multiplicação, através do uso de geradores multipolares com o objectivo de adequar a rotação do rotor com a do gerador, visto que os geradores multipolares são de baixa frequência de rotação (Letcher 2017).

2.4.3. Suporte estrutural

O sistema estrutural é formado pela torre e pela respectiva fundação (Silva 2004).

2.4.3.1. A torre

As torres elevam as principais partes da turbina a uma determinada altura, visto que o vento tem uma baixa velocidade e é turbulento perto do solo (Manwell, McGowan and Rogers 2009).

As torres estão sujeitas a cargas constantes e cíclicas. As cargas constantes surgem devido à (Manwell, McGowan and Rogers 2009):

- A resistência do rotor e da própria torre a passagem do vento;
- As forças torsionais causadas pelo mecanismo de orientação da gávea giratória;
- Pelo peso próprio da torre e doutros equipamentos.

As cargas cíclicas surgem principalmente pela rotação das pás do rotor. Tornando a frequência natural da torre, uma das questões importantes no projecto da torre (Silva 2004).

As torres podem ser feitas de diversos materiais. As torres mais frequentes são feitas de estruturas de aço, mas existem também estruturas feitas de betão armado (betão e aço) (Pestana 2016).

Existem três tipos principais de torres: tubulares, treliçadas e atirantadas (Manwell, McGowan and Rogers 2009), que podem ser vistas na Figura 2.21.

Torres tubulares

Este tipo de torre é a mais frequente e apresenta uma forma cónica, com o diâmetro aumentando de cima para baixo, de forma que a base seja mais resistente, pois na base as tensões são maiores (Pestana 2016). Este tipo de torre possui inúmeras vantagens. Ao contrário das torres treliçadas não apresentam ligações que precisam ser ajustadas e verificadas periodicamente e possuem uma área protegida para a subida (escadas ou no caso das torres mais recentes, elevador pessoal) (Manwell, McGowan and Rogers 2009).

Torres treliçadas

As torres treliçadas são construídas por meio do uso de perfis de aço soldados e uma das grandes vantagens deste tipo de torre é o seu peso reduzido que diminui os seus custos (Pestana 2016). Um dos grandes inconvenientes deste tipo de torre é a necessidade da verificação periódica devido ao número elevado de parafusos expostos ao ar livre (Manwell, McGowan and Rogers 2009).

Torres atirantadas

Este tipo de torre é suportada por cabos devido ao baixo diâmetro da sua torre e a sua maior vantagem é o seu preço reduzido (Pestana 2016). O uso deste tipo de torre nunca foi comum para

turbinas de médio e grande porte (Manwell, McGowan and Rogers 2009), mas é usada para turbinas de pequeno porte com altura mais reduzida.

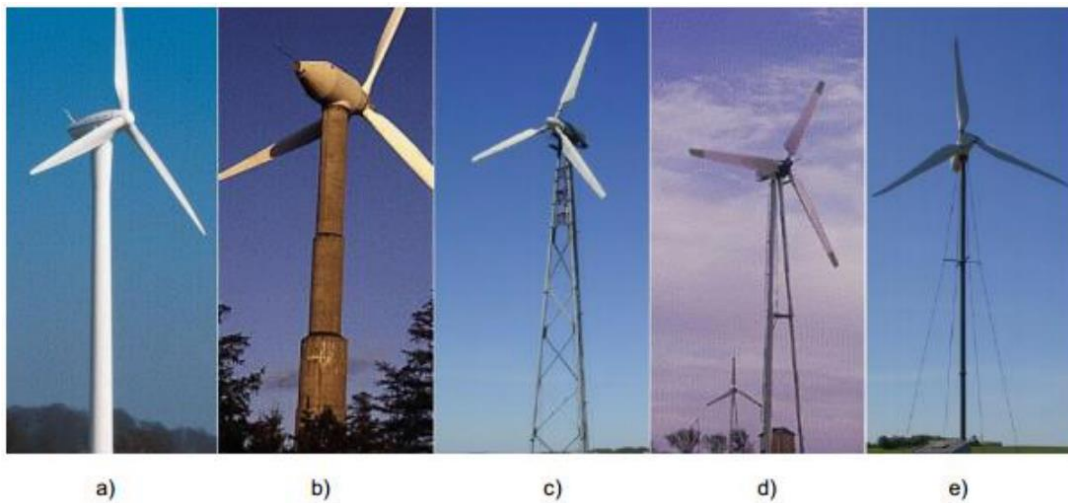


Figura 2.21 – Diferentes tipos de torres: a) torre tubular em aço; b) torre em betão; c) torre treliçada; d) torre em tripe; e) torre atirantada

D. N. Veritas, (2002) *apud* (Pestana 2016)

2.4.3.2. A fundação

A fundação de uma turbina eólica deve ser capaz de manter a turbina recta e estável sob as condições extremas previstas no projecto (Manwell, McGowan and Rogers 2009). Em geral, as fundações são construídas por um bloco circular, rectangular ou octogonal de betão que transfere as cargas para o subsolo (Pestana 2016). A fundação de uma torre está ilustrada na Figura 2.22.

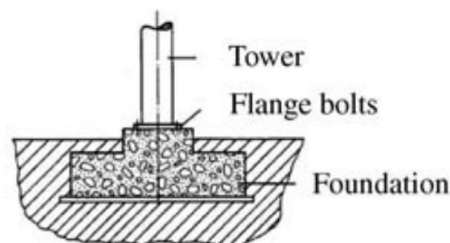


Figura 2.22 – Fundação de uma torre
(Manwell, McGowan and Rogers 2009)

2.4.4. Nacela

A nacela é a carcaça montada sobre a torre que alberga os principais componentes da turbina (com a excepção do rotor) (Dutra 2009). A nacela protege os elementos que nela se encontram contra a radiação solar, chuva e neve (Manwell, McGowan and Rogers 2009).

2.4.5. Sistema de guinada

Todas as turbinas de eixo horizontal (com excepção de poucas) usam um sistema de guinada para orientar a posição do rotor de acordo com a direcção do vento (Manwell, McGowan and Rogers 2009). As turbinas de pequeno porte usam um conjunto cauda e leme para orientar a posição do rotor enquanto as de grande porte usam um sistema de controlo activo no qual motorreductores

colocam o rotor na posição certa através da leitura de sensores de direcção de vento colocados na nacela (Garre 2015).

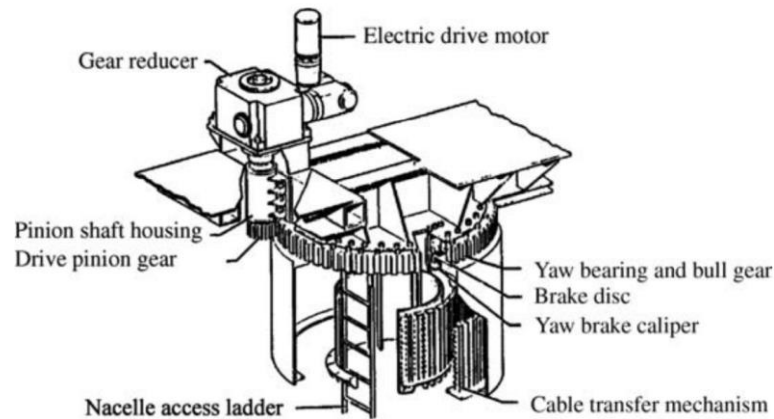


Figura 2.23 – Sistema de guinada
(Manwell, McGowan and Rogers 2009)

2.5. Tipos de turbinas eólicas

Segundo (Dutra 2009) as turbinas eólicas foram usadas pela primeira vez por volta de 200 A.C. e com o decorrer do tempo o uso destas não parou tendo se desenvolvido vários tipos de turbinas, com vista a obter turbinas com mais eficácia. As turbinas eólicas dividem-se em dois grandes grupos as turbinas de eixo horizontal e as de eixo vertical (Al-Shemmeri 2010).

2.5.1. Turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEHs)

As TEEHs são turbinas cujo eixo de rotação do rotor se encontra na posição horizontal, e são as mais comuns (Dutra 2009). O rotor deste tipo de turbina é movido por forças de sustentação e de arrasto, porém a principal é a de sustentação (Silva 2004).

Quanto à posição do rotor em relação à torre, o disco varrido pelas pás pode estar a jusante do vento (down wind) ou a montante do vento (up wind) (Dutra 2009), conforme ilustrado na Figura 2.24.

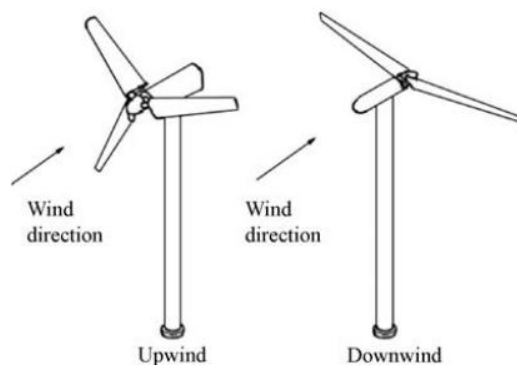


Figura 2.24 – Sistema a jusante e a montante do vento
(Manwell, McGowan and Rogers 2009)

Nos sistemas a jusante do vento, não há necessidade de se instalar um mecanismo para a orientação da posição do rotor, pois a orientação realiza-se automaticamente, porém quando a turbina apresenta um tamanho maior pode haver a necessidade de se instalar sim um mecanismo para a orientação da posição do rotor (Manwell, McGowan and Rogers 2009).

Quanto ao número de pás Turbinas eólicas de eixo horizontal: podem ser de uma, duas, três, quatro pás ou multipás (Silva 2004). Conforme pode ser visto na Figura 2.25.

Segundo (Dutra 2009) Os rotores utilizados para geração de energia eléctrica são geralmente os de eixo horizontal do tipo hélice, normalmente compostos de 3 pás ou em alguns casos de velocidades médias muito altas e possibilidade de geração de maior ruído acústico são compostas por 1 ou 2 pás.

A de uma pá requer um contrapeso para eliminar a vibração, as de duas pás são mais usadas por serem fortes, simples e mais baratas do que as de três pás, as de três pás, no entanto, são mais estáveis, pois distribuem as tensões melhor durante a rotação da máquina para acompanhar a direcção do vento (Silva 2004).

Rotores multipás são usados apenas quando se necessita de um grande torque de partida como o caso do bombeamento de água, porém implicam em menor eficiência (Garre 2015).

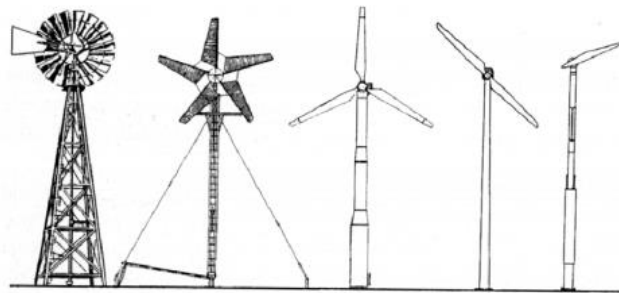


Figura 2.25 – Diferentes tipos de turbinas de eixo horizontal
Gasch, (2012) apud (Okita 2017)

2.5.2. Turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV)

As TEEVs são turbinas cujo eixo de rotação do rotor se encontra na posição vertical, ou seja o eixo de rotação encontra-se orientado na mesma direcção da torre que a sustenta (Al-Shemmeri 2010). Estes tipos de turbinas não dependem da direcção do vento, sendo assim dispensam o uso de um mecanismo de orientação para girar o rotor e mantê-lo de frente para o vento, usado nas TEEHs, e isto reduz a complexidade do projecto e os esforços devido a forças de *coriolis* (Dutra 2009).

Os rotores de eixo vertical também podem ser movidos por forças de sustentação e por forças de arrasto. Os rotores movidos por forças de sustentação são também conhecidos como rotores do tipo Darrius e os movidos por forças de arrasto como do tipo Savonius (Letcher 2017).

2.5.2.1. Tipo Savonius

Este aerogerador foi desenvolvido na Finlândia pelo engenheiro Sigurd Johannes Savonius, que a patenteou em 1925 (Letcher 2017). Este tipo de turbina é, relativamente de fácil construção, e é segundo (Garre 2015) constituído basicamente de dois semicilindros de diâmetros iguais, paralelos ao eixo de rotação. Este tipo de turbina é movido pelas forças de arrasto e sustentação, porem a predominante é a de arrasto (Silva 2004). Este tipo de turbina apresenta baixa eficiência e alto torque de partida (Manwell, McGowan and Rogers 2009). Este tipo apresenta variedades que podem ser vistas na Figura 2.26.



Figura 2.26 – Turbina Savonius e suas variantes

2.5.2.2. Tipo Darrius

Segundo (Silva 2004) o rotor tipo Darrius foi desenvolvido em 1927 pelo francês G.J.M Darrius e são os mais fortes concorrentes aos cata-ventos convencionais de hélices. É formado por duas ou três pás com perfil de um aerofólio, em forma de arco (C.Srinivasan, et al. 2017).

Este tipo de turbina ao contrário da turbina tipo Savonius é movido por forças de sustentação e apresenta alta eficiência quando comparado com a turbina tipo Savonius (Letcher 2017). Este tipo de turbina possui um torque de partida muito baixo, o que impossibilita a sua auto partida, sendo necessário uma fonte de alimentação externa, ou de um rotor Savonius para dar a partida (C.Srinivasan, et al. 2017). Esta também apresenta variantes que podem ser vistas na Figura 2.27.



Figura 2.27 – Turbina Darrieus e suas variantes

CAPÍTULO 3 – PROJECCÃO DO PROTÓTIPO

3.1. Escolha do tipo da turbina

Para o presente trabalho escolhe-se uma turbina convencional de eixo horizontal, por este apresentar um alto coeficiente de potência e alta frequência de rotação quando comparado com as turbinas de eixo vertical. Antes de se começar a fazer o dimensionamento da turbina fez-se um esboço do protótipo e uma indicação de possíveis materiais a serem usados como pode ser visto na Figura 3.1.

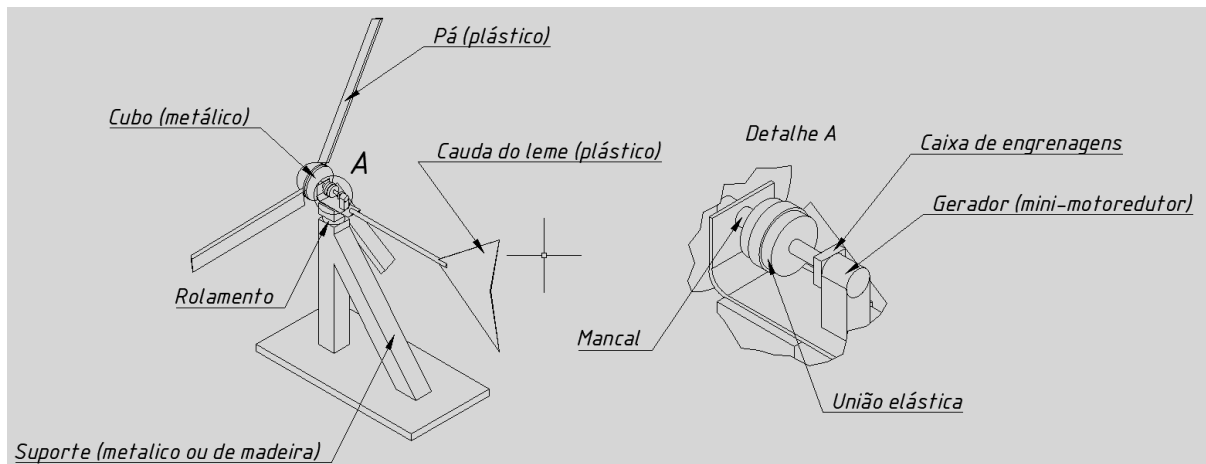


Figura 3.1 – Esboço do protótipo

3.2. Dimensionamento das pás da turbina

O dimensionamento das pás será feito de acordo com a potência a ser desenvolvida pela turbina e de acordo com a velocidade do vento.

3.2.1. Velocidade do vento

De modo que a turbina possa funcionar nos dias de vento forte a turbina será projetada para funcionar à uma velocidade de 5 m/s.

3.2.2. Potência a ser desenvolvida pela turbina

A turbina do presente trabalho será projectada para que no mínimo produza uma potência de 6 W à velocidade estipulada de 5 m/s. E calcula-se a potência que a turbina tem de desenvolver tendo em conta o rendimento do gerador η_{ger} (rendimento mecânico e rendimento do gerador eléctrico) e o coeficiente de segurança K_S . Através da seguinte expressão:

$$P_{turb} = \frac{P \times K_S}{\eta_{ger}} \quad (3.1)$$

Onde:

- P_{turb} – é potência desenvolvida pela turbina;

- K_S – é o coeficiente de segurança;
- P – é a potencia pretendida; e
- η_{ger} – é o rendimento do gerador.

$$P_{turb} = \frac{6 \times 1.1}{0.85} = 7.765 [W]$$

Assumindo $\eta_{ger} = 0.85$.

3.2.3. Determinação dos parâmetros geométricos do rotor

3.2.3.1. Escolha do aerofólio

Escolheu-se um aerofólio de fácil construção e que apresente uma boa relação entre os coeficientes de sustentação e de arrasto C_l/C_d . Escolheu-se o aerofólio S1210 e este pode ser visto na figura abaixo.

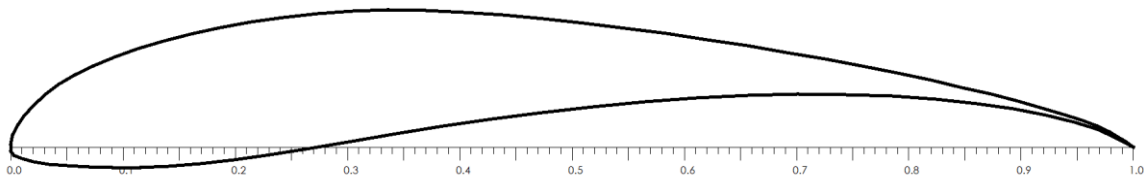


Figura 3.2 – Aerofólio S1210

Tomando como base o número de Reynolds igual a 40000 e o aerofólio escolhido (S1210) têm se os seguintes gráficos:

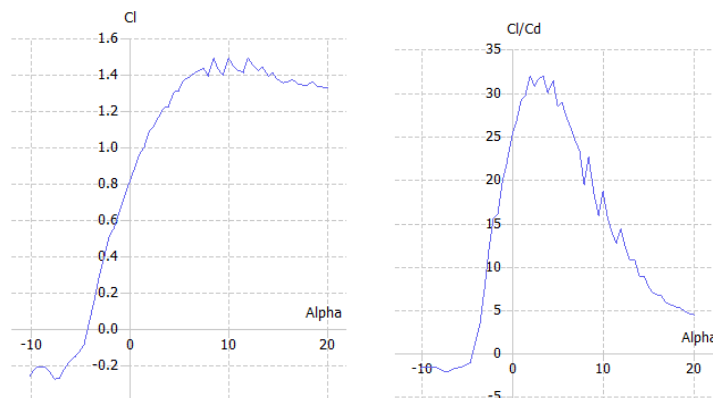


Gráfico 3.1 – Coeficiente de sustentação C_l e a razão entre o coeficiente de sustentação e de arrasto C_l/C_D ambos em função do ângulo de ataque α .

Buscando maximizar o coeficiente de potencia, a turbina será projectada para funcionar à um ângulo de ataque $\alpha = 4.5^\circ$, com vista em obter o valor máximo da relação C_l/C_D que é 31.37 e obtem-se um coeficiente de sustentação nessa posição que é $C_l = 1.3$.

3.2.3.2. Escolha do número de pás e da relação de velocidade na ponta da pá

O número de pás foi escolhido para que se obtenha uma turbina de fácil construção com um bom desempenho. Escolhe-se uma turbina com três pás pois elas possibilitam a obtenção de uma boa relação de velocidade na ponta da pá, e evita o aparecimento de cargas dinâmicas acentuadas na torre da turbina.

Com a equação (2.17) foi possível construir o gráfico abaixo.

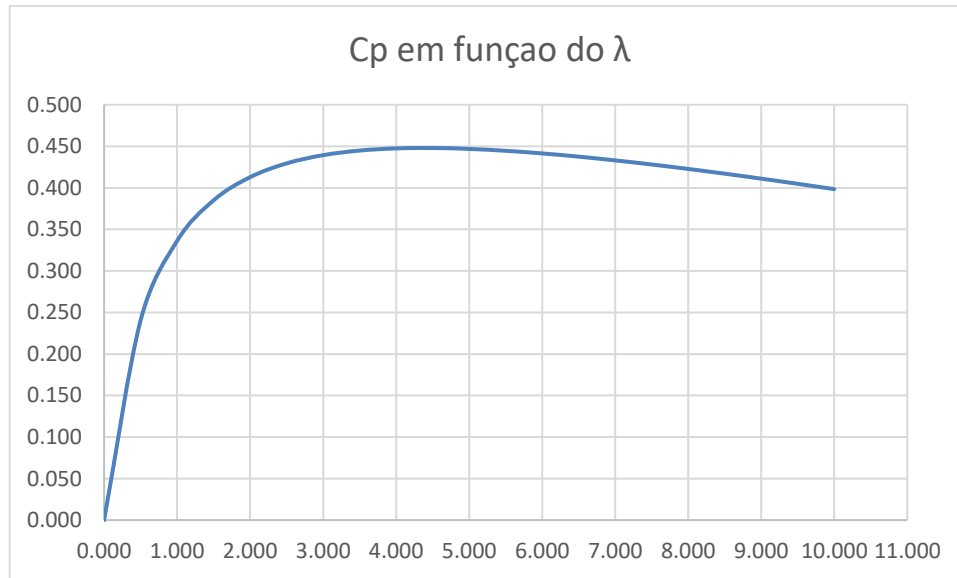


Gráfico 3.2 – C_p em função do λ

De acordo com este gráfico é possível notar que o coeficiente de potência atinge o seu valor máximo quando a relação de velocidade na ponta da pá é de 4. portanto para garantir maior eficiência no funcionamento da turbina escolhe-se uma relação de velocidade na ponta da pá de $\lambda = 4$.

A relação de velocidade na ponta da pá λ escolhida está dentro dos parâmetros na Tabela 3.1 que relaciona o número de pás com o valor da relação de velocidade na pá.

Tabela 3.1 – Relação de velocidade na ponta da pá em função do número de pás
(Manwell, McGowan and Rogers 2009)

B – número de pás	8 – 24	6 – 12	3 – 6	3 – 4	1 – 3
λ – Relação de velocidade na ponta da pá	1	2	3	4	>4

3.2.3.3. Determinação do coeficiente de potência

O coeficiente de potência máximo teórico que pode ser atingido numa turbina eólica é de 0.59. porem esse valor não será usado no presente trabalho pois na realidade existem vários factores que afectam negativamente este valor. E da equação (2.17) temos:

$$C_{p,max} = \left(\frac{16}{27}\right) \lambda \left[\lambda + \frac{1.32 + \left(\frac{\lambda - 8}{20}\right)^2}{B^{\frac{2}{3}}} \right]^{-1} - \frac{(0.57)\lambda^2}{\frac{C_L}{C_D} \left(\lambda + \frac{1}{2B}\right)}$$

$$C_{p,max} = \left(\frac{16}{27}\right) \times 4 \left[\lambda + \frac{1.32 + \left(\frac{4 - 8}{20}\right)^2}{3^{\frac{2}{3}}} \right]^{-1} - \frac{(0.57)\lambda^2}{31.37 \times \left(4 + \frac{1}{2 \times 3}\right)} = \mathbf{0.44}$$

Considerando que as pás do rotor serão simplificadas mantendo se a corda e o angulo de torção constante, o valor obtido acima será sofrera uma redução de 8 % (Figura 2.16) e o valor do coeficiente de potencia será dado por:

$$C_P = C_{p,max}(1 - 0,08) \quad (3.2)$$

$$C_P = 0.44(1 - 0,08) = \mathbf{0.404}$$

3.2.3.4. Cálculo da área varrida pelas pás

O cálculo da área varrida pelas pás é feito através da equação (2.15):

$$A = \frac{P_{turb}}{0.5 \times \rho \times U^3 \times C_p}$$

$$A = \frac{7.765}{0.5 \times 1.08 \times 5^3 \times 0.404} = \mathbf{0.28 [m^2]}$$

3.2.3.5. Diâmetro do rotor

O diâmetro do rotor será dado pela seguinte expressão:

$$D = 2 \times \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (3.3)$$

Onde:

D – é o diâmetro do rotor;

A_t – é a área varrida pelas pás do rotor.

$$D = 2 \times \sqrt{\frac{0.299}{3.14}} = \mathbf{0.602 [m]}$$

3.2.3.6. Comprimento da pá:

o comprimento da pá será dado pela seguinte expressão:

$$L = \frac{D - d}{2} \quad (3.4)$$

Onde:

L – é o comprimento da pá; e

d – é o diâmetro do cubo

$$L = \frac{0.617 - 0.05}{2} = \mathbf{0.276 [m]}$$

3.2.4. Desenho da pá da turbina

O rotor da turbina será projectado usando uma combinação entre a teoria do elemento da pá e a teoria da quantidade de movimento. Essa combinação dá-se através da teoria do rotor óptimo considerando o efeito de esteira, que resulta das duas teorias mencionadas inicialmente.

O desenho do rotor será feito de acordo com a teoria do rotor óptimo considerando o efeito de esteira, e posteriormente será desenhado um rotor aproximado ao rotor óptimo para facilitar a construção mas sem afectar de forma significativa a eficiência.

O formato do rotor óptimo considerando o efeito de esteira é determinado de através das seguintes equações (Manwell, McGowan and Rogers 2009):

Angulo do fluxo:

$$\varphi_i = \left(\frac{2}{3}\right) \times \tan^{-1}(1/\lambda_{r,i}) \quad (3.5)$$

Angulo de torção:

$$\beta_i = \varphi_i - \alpha \quad (3.6)$$

Corda:

$$C_i = \frac{8 \times \pi \times r_i}{B \times C_{l,design,i}} \quad (3.7)$$

Dividindo a pá em 5 elementos e aplicando as equações acima, foram obtidos os resultados apresentados na tabela abaixo

Tabela 3.2 – Dados para o desenho do rotor

i	Posição r [m]	Corda C [m]	Angulo do fluxo φ [°]	Angulo de torção β [°]	Número de Reynold
1	0.025	0.052	47.516	43.016	21177.743
2	0.080	0.062	28.448	23.948	34916.696
3	0.135	0.048	19.098	14.598	37796.370
4	0.190	0.037	14.143	9.643	38732.108
5	0.245	0.030	11.169	6.669	39137.368
6	0.300	0.025	9.208	4.708	39346.902
Média		0.042	21.597	17.097	35184.531

Com os dados da tabela acima e com o auxílio da ferramenta QBlade foi possível desenhar a pá do rotor óptimo na figura abaixo. A pá ilustrada na figura abaixo sofreu alterações de modo que seja de fácil construção.

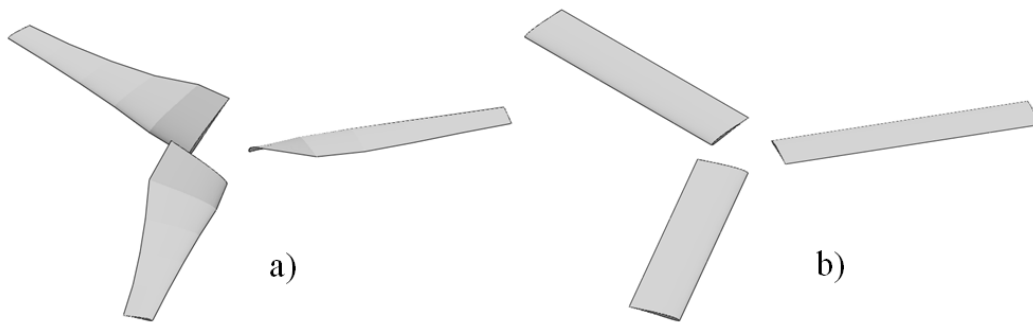


Figura 3.3 – a) Rotor óptimo b) Rotor modificado

A modificação da pá consistiu na introdução de uma corda constante com a dimensão correspondente ao valor médio apresentado na Tabela 3.2 e com o auxílio do *software* QBlade fixou-se o angulo de torção a um valor de 12° com o objectivo de a se obter uma turbina de maior eficiência. A eficiência do rotor modificado está ilustrada no Gráfico 3.3.

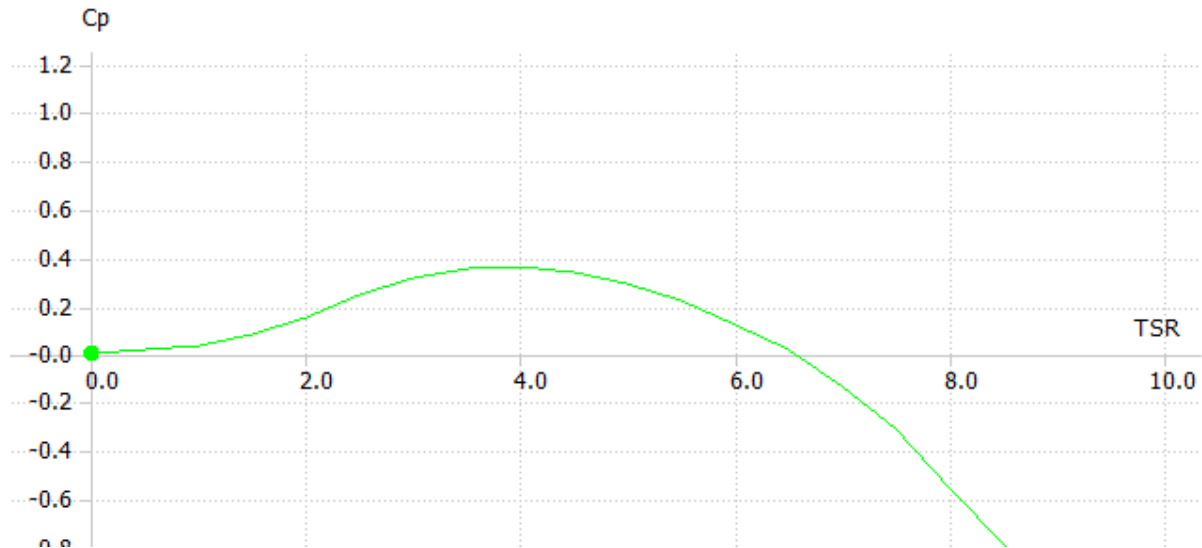


Gráfico 3.3 – Coeficiente de potência C_p em função da relação na ponta da pá TSR

O gráfico revela que a eficiência da turbina não foi afectada de forma significativa, não sendo necessário recalculer a área varrida pelas pás da turbina.

3.2.5. Verificação da resistência mecânica das pás

3.2.5.1. Momento devido as forças aerodinâmicas na direcção axial

O momento devido as forças aerodinâmicas para uma turbina ideal é dado pela seguinte expressão:

$$M_\beta = \frac{2}{3} \frac{T}{B} R \quad (3.8)$$

Porem neste caso em que a resultante da força tangencial que actua em cada pá fica à 66,4 % do raio como pode ser visto na Figura 3.4 a equação toma a seguinte formula:

$$M_\beta = 0.664 \frac{T}{B} R \quad (3.9)$$

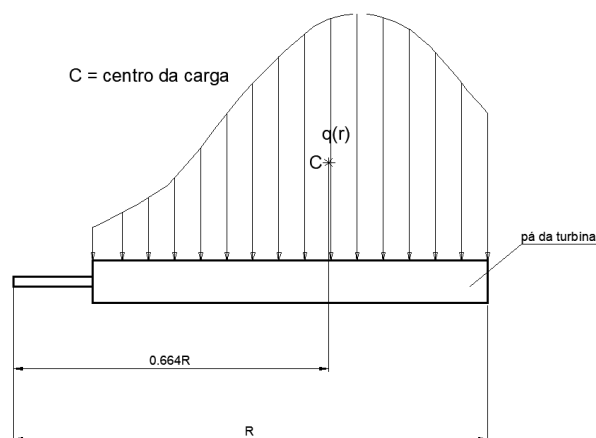


Figura 3.4 – distribuição da força axial na pá

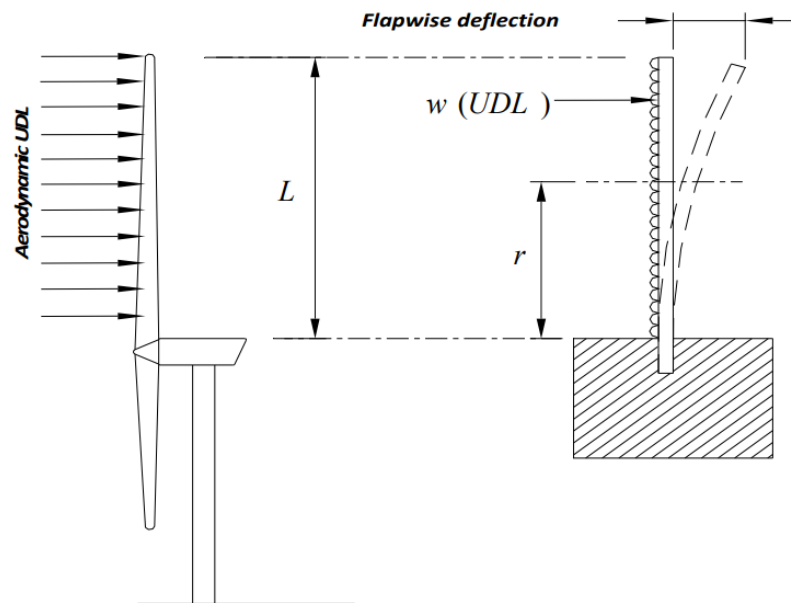


Figura 3.5 – Esquema de carregamento pelas forças aerodinâmicas
(Probst, et al. 2011)

De acordo com (Manwell, McGowan and Rogers 2009) a força axial é dada pela seguinte expressão:

$$T = \frac{1}{2} C_T \rho U^2 A \quad (3.10)$$

Sendo que pode se extrair o coeficiente da força axial C_T máximo de 0.8 no gráfico abaixo produzido no programa QBlade

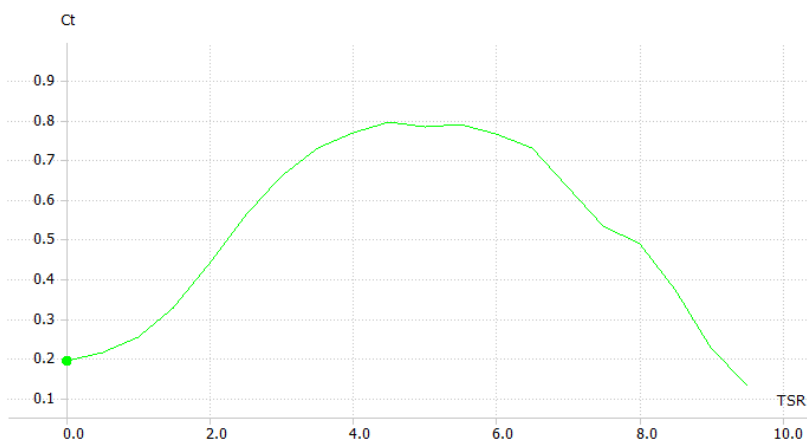


Gráfico 3.4 – C_T em função do TSR

Da equação (3.10) temos:

$$T = \frac{1}{2} \times 0.8 \times 1.08 \times 5^2 \times 0.28 = 3.024 \text{ [N]}$$

Da equação (3.9) o momento será:

$$M_{\beta} = 0.664 \times \frac{3.024}{3} \times 0.301 = \mathbf{0.202 [Nm]}$$

3.2.5.2. Momento devido ao torque produzido

O momento devido ao torque produzido pela seguinte expressão:

$$Q = C_Q \frac{1}{2} \rho \pi R^2 U^2 \quad (3.11)$$

Onde C_Q é o coeficiente do torque e é dado pela seguinte expressão:

$$C_Q = \frac{C_P}{\lambda} \quad (3.12)$$

$$C_Q = \frac{0.404}{4} = 0.101$$

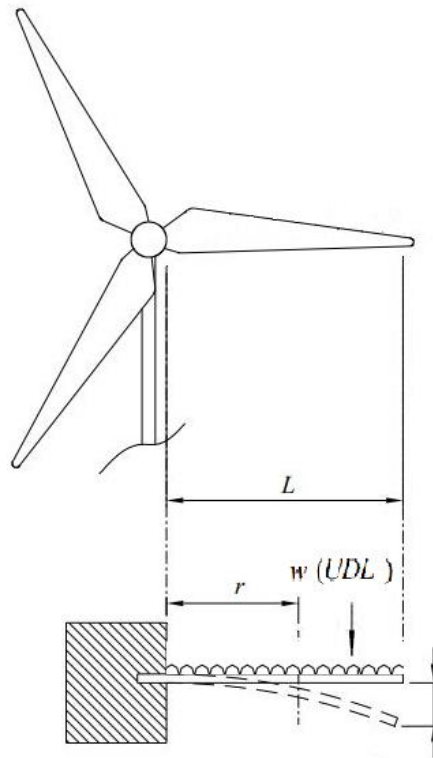


Figura 3.6 – Esquema de carregamento devido ao torque exercido
Adptado de (Probst, et al. 2011)

O torque será:

$$Q = 0.101 \times 0.5 \times 1.08 \times \pi \times 0.301^2 \times 5^2 = \mathbf{0.388 [Nm]}$$

O momento flector devido ao torque produzido será:

$$M_{\zeta} = \frac{Q}{B} \quad (3.13)$$

$$M_{\zeta} = \frac{0.388}{3} = \mathbf{0.129 [Nm]}$$

3.2.5.3. Momento resultante

O momento resultante será dado pela seguinte expressão:

$$M_R = \sqrt{M_{\beta}^2 + M_{\zeta}^2} \quad (3.14)$$

$$M_R = \sqrt{0.202^2 + 0.129^2} = \mathbf{0.239 [Nm]}$$

3.2.5.4. Tensão máxima e verificação da resistência

A formula da tensão máxima é:

$$\sigma_{max} = \frac{M_R Y}{I} \quad (3.15)$$

$$\sigma_{max} = \frac{0.239 \times 1000 \times 11.66}{5000.0737} = \mathbf{0.558 [MPa]}$$

Onde o momento de inercia I corresponde na direção x conforme a Figura 3.4. Os dados do momento de inercia patentes na Figura 3.4 foram obtidos através do programa *autocad*.

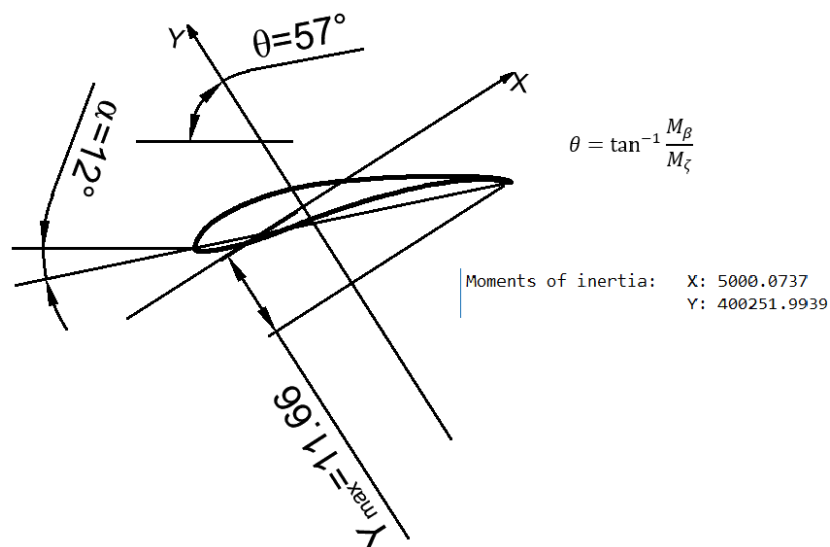


Figura 3.7 – Momento de inercia da secção das pás

Sendo que a tensão obtida é menor que atenção admissível para a madeira: $\sigma_{max} < [\sigma] = \mathbf{8.5318 [MPa]}$, pode se dizer que as pás resistem às solicitações mecânicas.

3.3. Dimensionamento do leme

Leme é o dispositivo responsável por manter o rotor na posição perpendicular em relação à direcção do vento nas turbinas de pequeno porte.

Segundo o fabricante windynation, a cauda do leme deve ter uma área compreendida entre 5 à 10% da área varrida pelas pás do rotor. Sendo que quanto maior a área da cauda do leme maior a eficiência, a área da cauda do leme será 10% da área varrida pelas pás do rotor. A distância que vai do centro dos rolamentos até ao centro da área da cauda do leme corresponde a 60% do diâmetro do rotor. De acordo com o descrito acima as principais dimensões do leme, são calculados da seguinte forma:

Área da cauda do leme

$$A_l = 0.1 \times A_t \quad (3.16)$$

Onde: A_l é a área.

$$A_l = 0.1 \times 0.299 = \mathbf{0.028} \text{ [m}^2\text{]}$$

Comprimento do braço do leme

$$L_l = 0.6 \times D \quad (3.17)$$

Onde: L é o comprimento do braço do leme

$$L_l = 0.6 \times 0.637 = \mathbf{0.361} \text{ [m]}$$

3.4. Projecção da parte eléctrica

O sistema eléctrico tem como função promover a transformação da energia mecânica em eléctrica para ser posteriormente usada em dispositivos eléctricos, complementando desta forma a turbina eólica. Com o objectivo de demonstrar o funcionamento de um sistema eólico foi proposto o circuito ilustrado na figura abaixo.

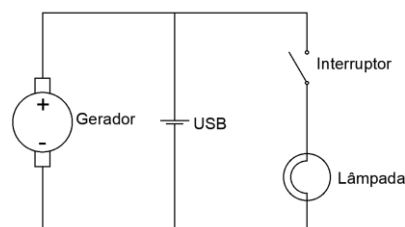


Figura 3.8 – circuito da parte eléctrica

Discrição dos componentes apresentados na figura acima:

- Gerador : serve para converter a energia mecânica contida no veio da turbina em energia eléctrica;

- Lâmpada : é uma lâmpada led de 3 W que funciona à uma tensão de 12 V
- USB: serve para carregar telemóveis e outros dispositivos electrónicos através de um cabo USB;
- Interruptor: serve para ligar e desligar a lâmpada.

3.5. Dimensionamento do gerador e mecanismo de transmissão

A escolha do gerador e mecanismo de transmissão será feito tendo em conta a frequência de rotação da turbina e a voltagem necessária.

O cálculo da frequência de rotação da turbina é feito pela equação (2.10):

$$\Omega = \frac{\lambda \times v}{R}$$

$$\Omega = \frac{4 \times 5}{0.301} = 66.449 \text{ [rad/s]}$$

Convertendo a o valor acima para rpm temos:

$$n = \frac{\Omega}{2 \times \pi} \times 60 \quad (3.18)$$

Onde: n é a velocidade angular em rpm

$$n = \frac{66.449}{2 \times \pi} \times 60 = 713.782 \text{ [rpm]}$$

No presente trabalho será usado um mini moto-redutor como gerador. Um moto redutor é constituído por duas partes um motor eléctrico e um redutor de velocidade que reduz a velocidade do motor e aumenta o seu torque, quando acoplado a uma turbina eólica o redutor funciona como um amplificador de velocidade e o motor eléctrico como um gerador.

Tendo em conta a frequência de rotação da turbina, escolheu-se um gerador de 500 RPM e 12V.

3.6. Apresentação do projecto

Com os dados obtidos ate aqui fez se o desenho do protótipo. O protótipo apresenta uma altura de 1.354 m e uma largura de 0.5m, podendo ser transportado sem dificuldades. Apresenta um leme que o ajuda a posicionar o rotor face ao vento. Uma união elástica ligando o rotor ao gerador de modo que as vibrações do rotor não sejam transmitidas ao rotor. As pás foram feitas de madeira de modo a reduzir o peso e facilitar o processo de fabricação e estão fixas por aperto através de um parafuso e porca de modo serem ajustados com facilidade ao ângulo de ataque desejado e são removíveis tornando a estrutura do protótipo útil para a realização de testes com outros tipo de

pás. a base foi projetada de modo que o rotor se encontre a uma altura ideal para a realização de testes no túnel de vento.

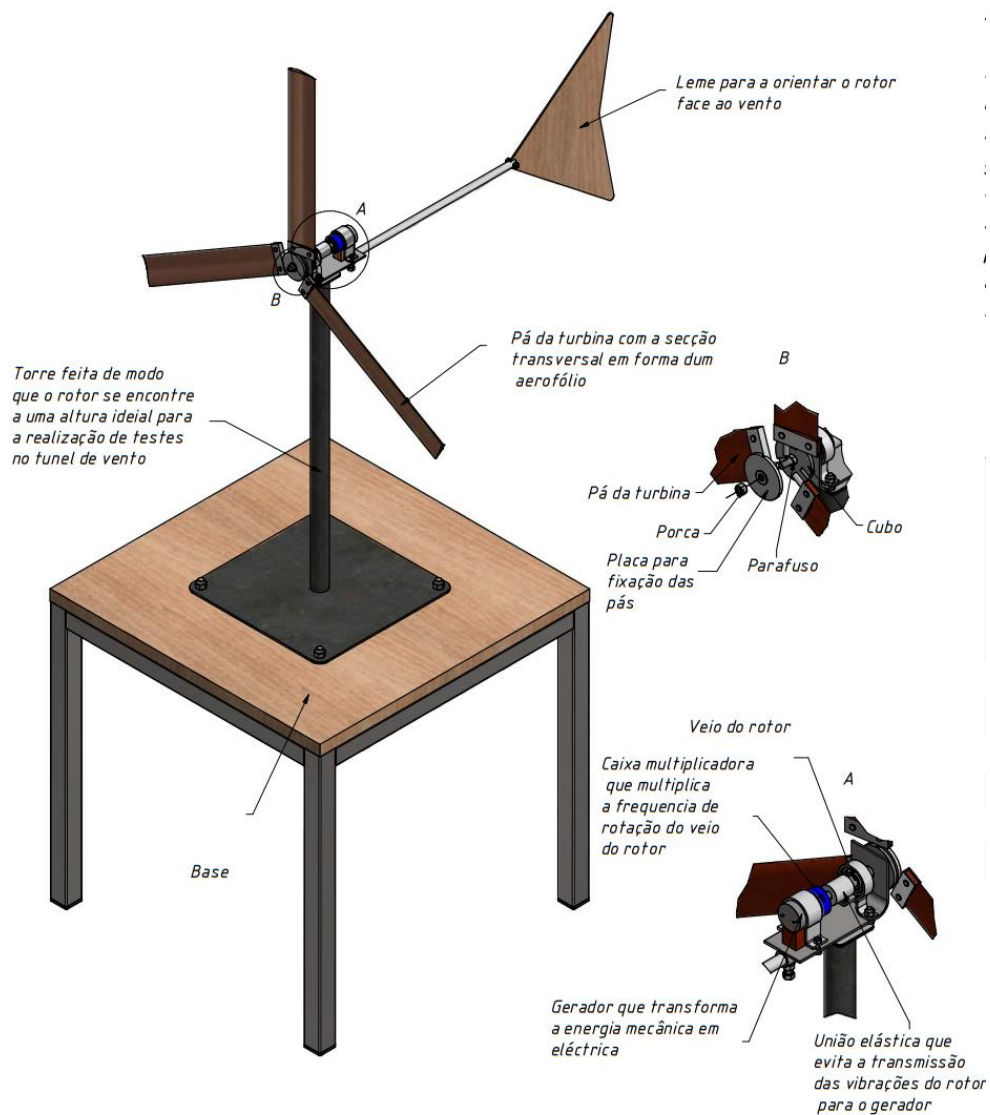


Figura 3.9 – Apresentação do protótipo

CAPÍTULO 4 – CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

A construção do protótipo foi feita de acordo com os desenhos de montagem e de fabrico produzido a partir dos dados obtidos da no capítulo 3 durante a projeção da turbina e os mesmos constam nos anexos do presente trabalho.

4.1. Suporte estrutural

A base da estrutura principal do protótipo foi fixada numa placa de madeira através de parafusos e porcas, por sua vez a base foi conectada à uma torre que sustentara a turbina. No topo da torre foi conectado um rolamento que permitira a rotação do sistema de guinada

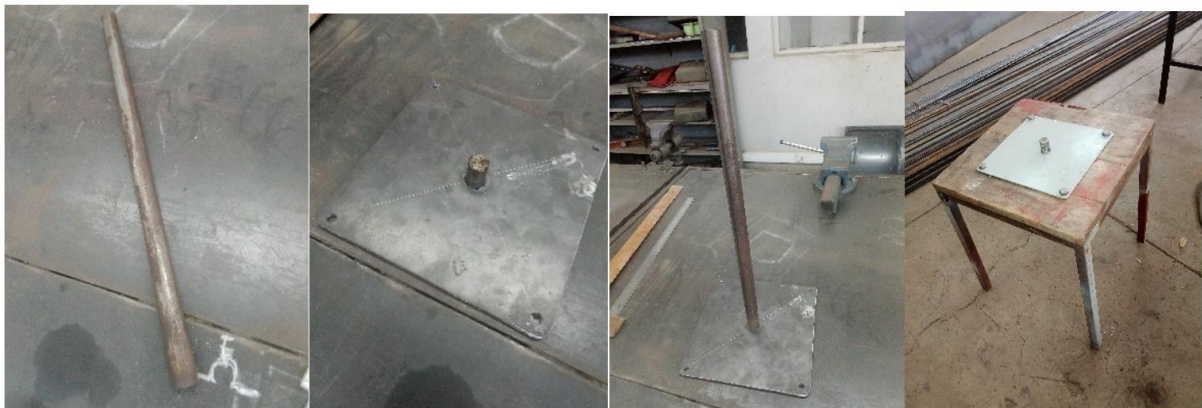


Figura 4.1 – Construção da base



Figura 4.2 – Rolamento fixado no topo da torre

4.2. Nacela

A nacela foi construída através da dobragem de uma chapa. Na parte inferior da chapa foi conectado à um rolamento para permitir o movimento de rotação do sistema de guinada como pode ser visto na Figura 4.2. Na parte superior foi fixada um apoio para o gerador, a parte da chapa disposta verticalmente foi feito um furo e fixado um rolamento para a passagem do veio do rotor e este veio foi conectado ao gerador através de uma união elástica, na parte traseira da nacela foi afixada a cauda do leme através dum parafuso



Figura 4.3 – Construção da nacela

4.3. Mecanismo de Guinada

O mecanismo de guinada foi constituído através do rolamento fixado no topo da torre como pode ser visto na Figura 4.2, conectando a torre à nacela e que permite o rotor girar em torno de um eixo vertical, e um leme foi fixado na extremidade da sua cauda através de rebites. E a cauda do leme foi fixada na nacela através dum parafuso.



Figura 4.4 – Construção do leme

4.4. O rotor

O rotor é constituído pelas pás fixadas ao cubo, como pode ser visto na figura abaixo



Figura 4.5 – Construção do rotor

4.5. O cubo

O cubo foi feito através de duas placas circulares uma de aço e outra de PVC e ao redor das placas foram feitas ranhuras espaçadas entre si em ângulo de 120° , e no centro da placa de aço foi soldado um parafuso e na de PVC foi feito um furo. De modo que as pás sejam fixas por aperto através da duma porca.



Figura 4.6 – Construção das pás

4.6. As pás

As pás foram feitas de madeira seca, onde foram cortados três peças de madeira com comprimento de 276 mm correspondente ao comprimento da pá, 42 mm de largura correspondente a largura da pá e 6 mm de espessura correspondente à espessura máxima da pá. Para deixar a secção transversal da pá com a forma do aerofólio foi colado numa das extremidades da peça de madeira um desenho recortado do aerofólio e a peça foi limada de modo a se atingir a forma do aerofólio na sua secção transversal.



Figura 4.7 – Construção das pás

Para a fixação das pás no cubo foram feitas placas de fixação que foram feita através de uma chapa com dois furos e uma pequena haste para a fixação das pás no cubo. As placas de fixação foram fixadas nas pás através de rebites.

4.7. Circuito eléctrico

O circuito eléctrico foi montado numa base de madeira como pode ser visto na figura abaixo.



Figura 4.8 – Construção de parte eléctrica

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. Conclusões

As turbinas eólicas apresentam um papel fundamental para a sociedade pois são responsáveis por captar a energia eólica para a geração da energia eléctrica. Sendo as turbinas de eixo horizontal as mais usadas. A energia eólica é uma energia renovável e pode ser considerada limpa pois não emite o dióxido de carbono para o meio ambiente e apresenta um preço competitivo em relação à outras formas de geração de energia.

Durante a projecção do protótipo verificou se que a escolha adequada do aerofólio é de suma importância na projecção de turbinas eólicas pois ela garante maior eficiência e consequentemente um rotor de dimensões menores. Durante a construção do protótipo verificou se que é muito importante garantir um bom acabamento superficial das pás do rotor de modo a minimizar as perdas por atrito entre o ar e a pá.

O protótipo da turbina apresentado no seguinte trabalho apresenta dimensões menores (1.354 metros de altura) o que o torna fácil manusear e facilmente pode ser apresentado na sala de aulas como objecto didático, e apresenta uma potencia de ate 6 w sendo capaz de alimentar uma lâmpada led de alto brilho mostrando de forma fácil o uso da turbina eólica para a geração de energia eléctrica, apresenta um mecanismo de guinada demonstrando a necessidade do rotor estar alinhado face a face com a direcção do vento. O projecto apresenta pás com secção transversal de um aerofólio mostrando a claramente a importância do perfil aerodinâmico do aerofólio para o funcionamento da turbina eólica

5.2. Recomendações

Recomenda se para trabalhos futuros o seguinte:

- Construção de pás com ângulo de torção e corda não constantes;
- Realização de experiencias de modo a analisar o desempenho dos diferentes tipos de perfis aerodinâmicos;
- Realização de experiencias de modo a analisar a fiabilidade dos diferentes modelos matemáticos usados na modelagem de turbinas eólicas.

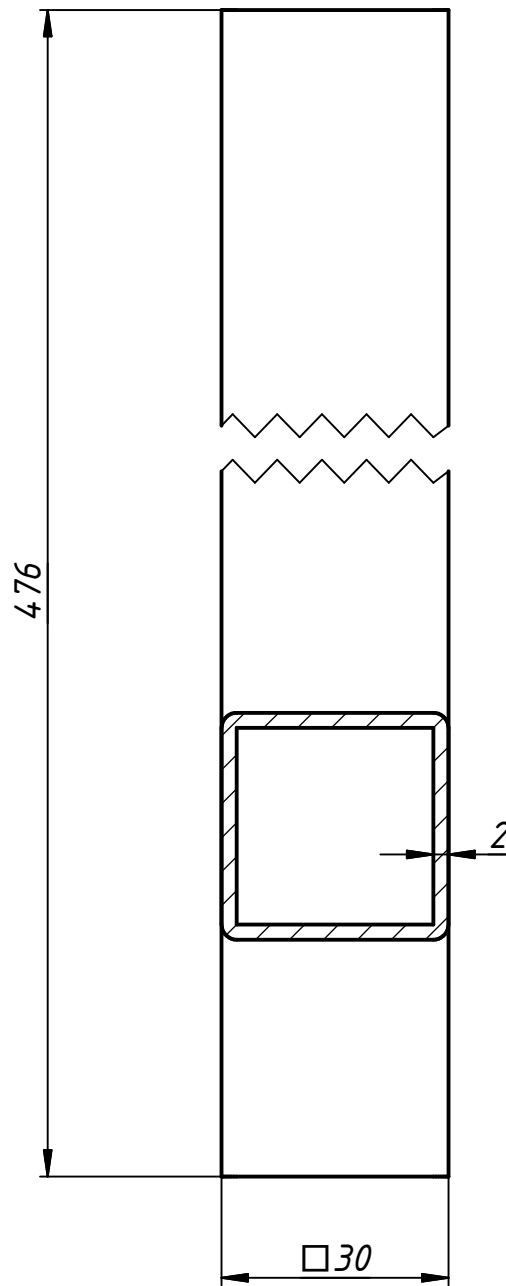
CAPÍTULO 6 – BIBLIOGRAFIA

- Al-Shemmeri, T. 2010. *Wind Turbines*. ventus Publishing ApS.
- Branlard, Emmanuel. 2013. *Wind turbine tip-loss corrections*. Tese de Mestrado, Technical University of Denmark.
- Brito, Érika Gomes, Marcus Vinicius Chagas da Silva, e Andrea Bezerra Crispim. 2019. *Geografia Climatologia*. Fortaleza - Ceará.
- C.Srinivasan, G.Ajithkumar, G.Arulprasath S.Arul, e T.M.Dharunbabu. 2017. “Design of Combined Savonius-Darrieus Wind Turbine.” *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* 60-70.
- Chaudhary¹, Manoj Kumar, e Anindita Roy. 2015. “Design & optimization of a small wind turbine blade for operation at low wind speed.” *World Journal of Engineering* 83-94.
- Dutra, Ricardo. 2009. *Energia Eólica Princípios e Tecnologias*. Brasil: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito.
- ELETROBRÁS, FUPAI/EFFICIENTIA. 2005. *Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial*. Rio de Janeiro: Eletrobrás.
- FUNAE. 2013. *ATLAS DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS DE MOÇAMBIQUE - RECURSOS E PROJECTOS PARA PRODUÇÃO DE ELECTRICIDADE*.
- Garre, Saulo de Oliveira. 2015. *Avaliação experimental do desempenho aerodinâmico de pequenas turbinas eólicas confeccionadas em prototipagem 3D*. Porto Alegre: universidade Federal do Rio Grande Sul.
- Hansen, Martin O. L. 2008. *Aerodynamics of Wind Turbines*. Vol. Second Edition. London: EARTHSCAN.
- Letcher, Trevor M. 2017. *Wind Energy Engineering*. London: Academic Press.
- Manwell, J. F., J. G. McGowan, e A. L. Rogers. 2009. *WIND ENERGY EXPLAINED*. Washington, USA: John Wiley & Sons Ltd.
- Mohd, Hasan All. 2012. *WIND ENERGY SYSTEMS solution for power quality and stabilization*. Nova Iorque: CRC Press.

- Okita, William Minoru. 2017. *Simulação Numérica do Desempenho Aerodinâmico de Aerogeradores de Eixo Horizontal*. Dissertação de Mestrado, Campinas: UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS.
- Ôlo, Carlos David Vaz. 2012. *Projecto de uma Turbina Savonius com Utilização de Componentes em Fim-de-Vida*. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa.
- Osman, Dygku. Asmanissa Awg., Norzanah Rosmin, Nor Shahida Hasan, Aede Hatib Mustaamal@Jamal, e Mariyati Marzuki. 2017. "Savonius Wind Turbine Performances on Wind Concentrator." *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)* 376-383.
- Pestana, Diogo Alexandre Correia. 2016. *Sistemas estruturais para torres eólicas*. Funchal, Madeira: Universidade da Madeira.
- Probst, Oliver, Jaime Martínez, Jorge Elizondro, e Oswaldo Monroy. 2011. "Small Wind Turbine Technology." *Instituto Tecnológico y de Estudios superiores de Monterrey e Diseño Eólico y Solar* 108-136.
- Schubel, Peter J., e Richards J. Crosseley. 2012. "Winde Turbine Blade Design." *Energies* 3425-3449.
- Silva, Jorge de Jesus Passinho e. 2004. *Estudo Preliminar da Viabilidade Técnica de um Sistema Eólico para Refrigeração*. Brasil: UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS.
- Sørensen, J.N., R. Mikkelsen, N. Troldborg, V.L. Okulov, e W.Z. Shen. 2016. *The Aerodynamics of Wind Turbines*. Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark (DTU).
- Spera, David A. 2009. *Wind Turbine Technology Fundamentals Concepts Of Wind Turbine Engeneering*. Vol. Segunda Edição. New York: ASME.
- Tong, Wei. 2010. *Wind Power Greneration and Wind Turbine Design*. USA: WIT Press.

ANEXOS

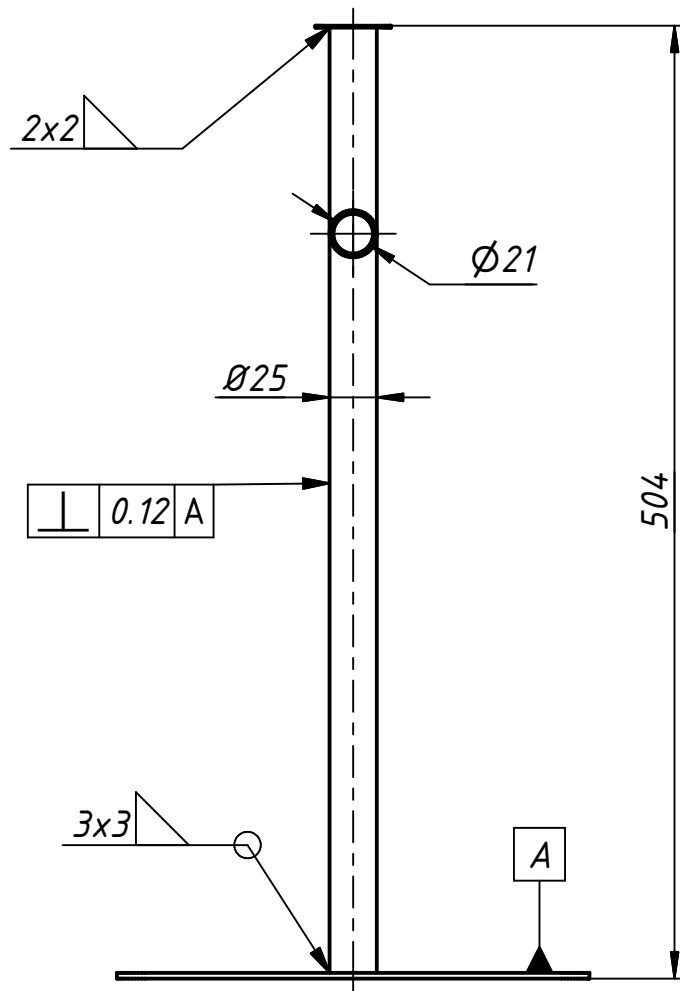
Rz100 (✓)



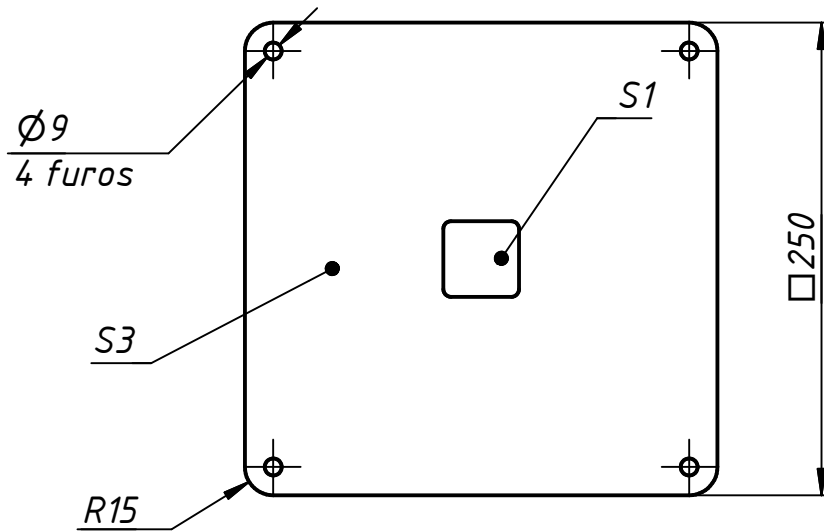
Nota:

Desvios não indicados : Furos - H14, Veios - h14, Outras - $\pm IT 14/2$

					<i>Trabalho de licenciatura</i>		
					<i>Barra transversal</i>		
					<i>Código</i>	<i>Massa</i>	<i>Escala</i>
<i>Alt</i>	<i>Folha</i>	<i>Documento Nº</i>	<i>Assin.</i>	<i>Data</i>			1:1
<i>Autor</i>	<i>E. P. Nguluve</i>			09/2022			
<i>Verificou</i>	<i>Dr Eng Paxis</i>						
					<i>Folha A4</i>		<i>Folhas 2 de 16</i>
<i>Aprovou</i>					<i>Aço</i>		<i>UEM-FE-DEMA</i>



Rz100

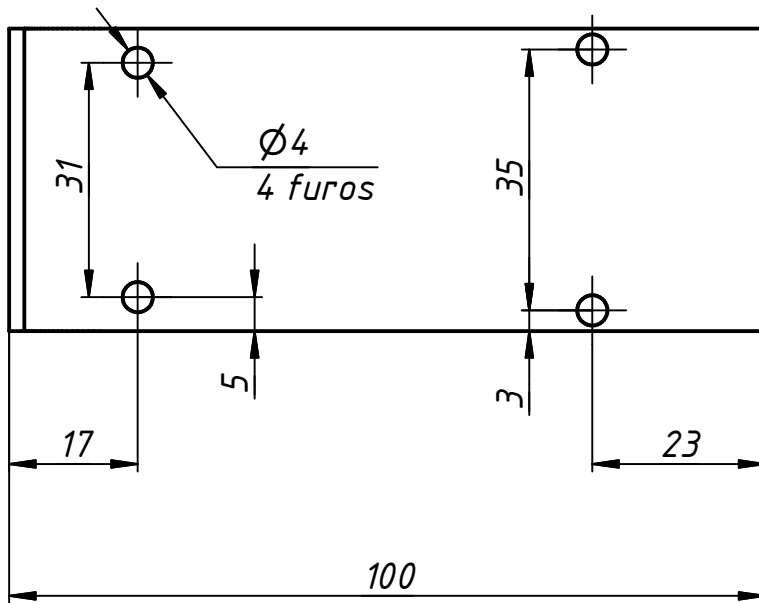
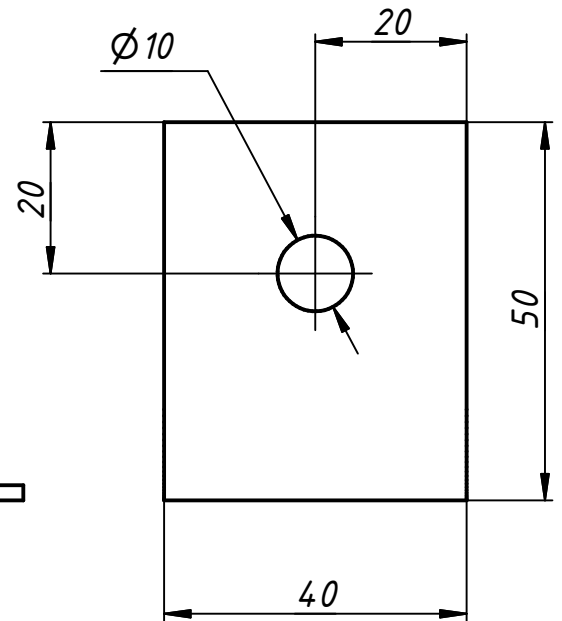
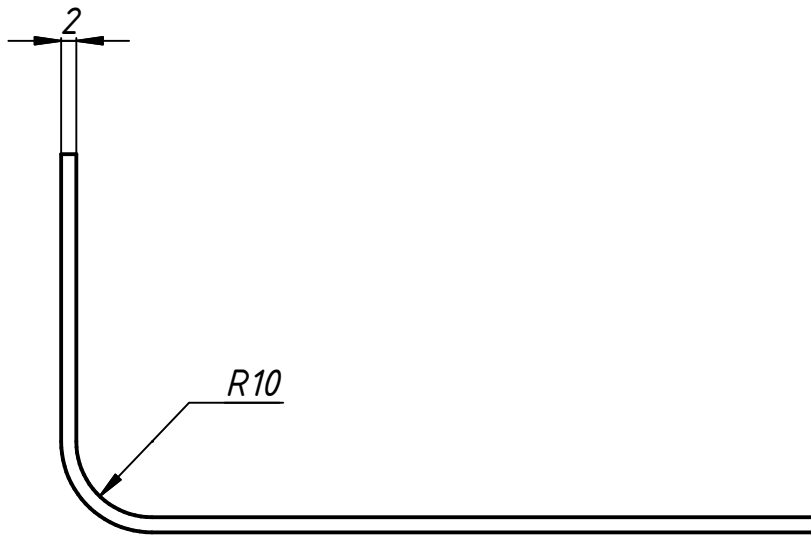


Nota:

Desvios não indicados : Furos - H14, Veios - h14, Outras - $\pm IT 14/2$

					<i>Trabalho de licenciatura</i>						
Alt	Folha	Documento Nº	Assin.	Data	<i>Torre</i>			Código	Massa	Escala	
Autor		E. P. Nguluve		09/2022							1:4
Verificou		Dr Eng Paxis									
								Folha A4	Folhas 5 de 16		
Aprovou					<i>Aço</i>			<i>UEM-FE-DEMA</i>			

Rz100 (✓)

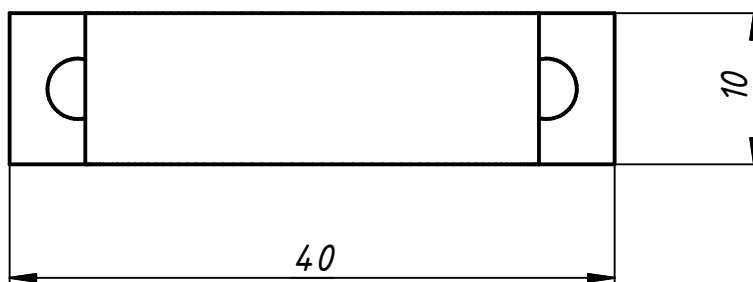
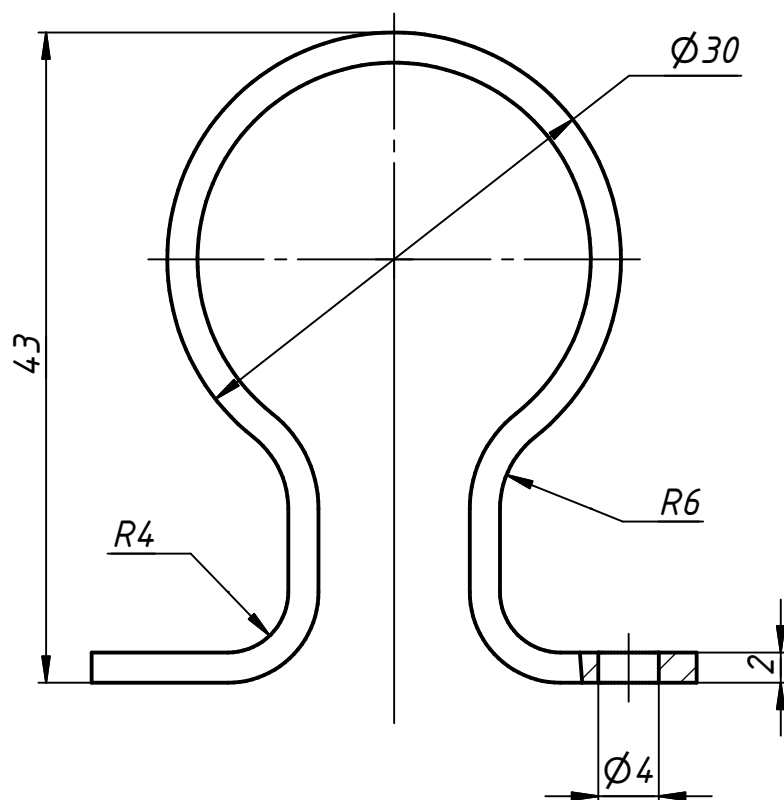


Nota:

Desvios não indicados : Furos - H14, Veios - h14, Outras - $\pm IT 14/2$

					<i>Trabalho de licenciatura</i>			
Alt	Folha	Documento Nº	Assin.	Data	<i>Nacela</i>	Código	Massa	Escala
Autor		E. P. Nguluve		04/2022				2:1
Verificou		Dr Eng Paxis						
						Folha A4	Folha 6 de 16	
					Aço	UEM-FE-DEMA		
Aprovou								

Rz100
 ✓ (✓)

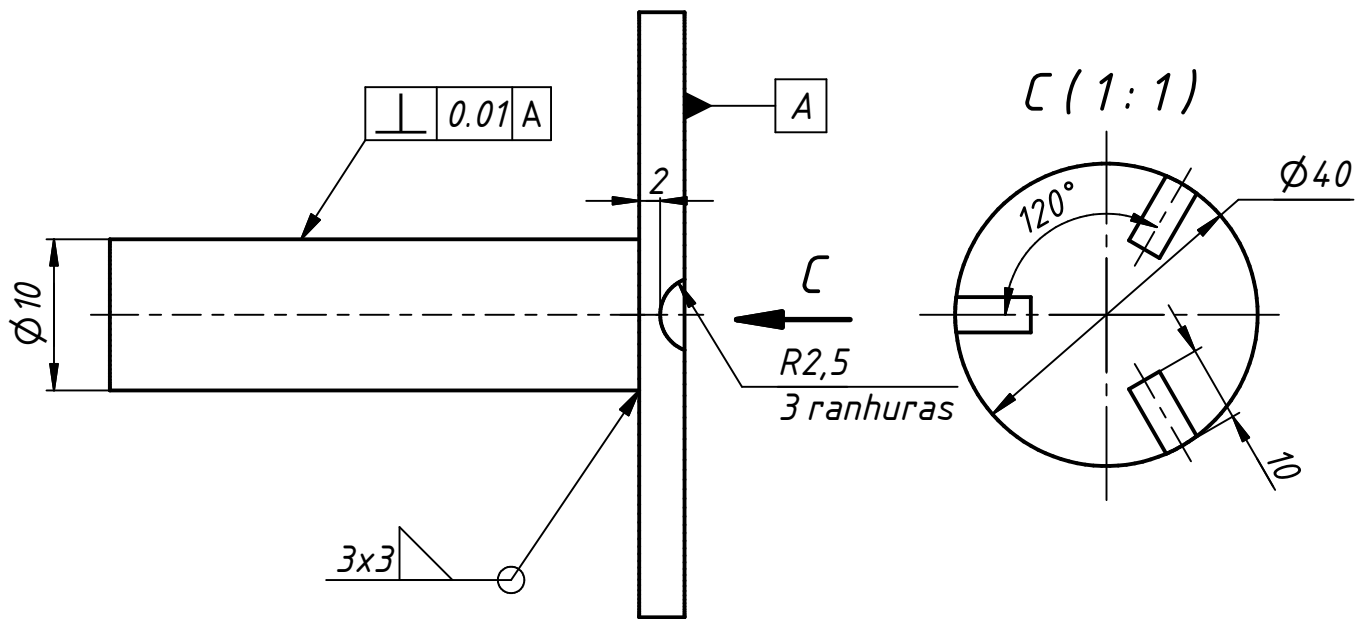


Nota:

Desvios não indicados : Furos - H14, Veios - h14, Outras - $\pm IT 14/2$

					<i>Trabalho de licenciatura</i>					
					<i>Braçadeira do rolamento radial</i>			Código	Massa	Escala
Alt	Folha	Documento Nº	Assin.	Data						
Autor		E. P. Nguluve		09/2022						
Verificou		Dr Eng Paxis								
							Folha A4	Folhas 7 de 16		
Aprovou					Alumínio			UEM-FE-DEMA		

Rz 100 (✓)

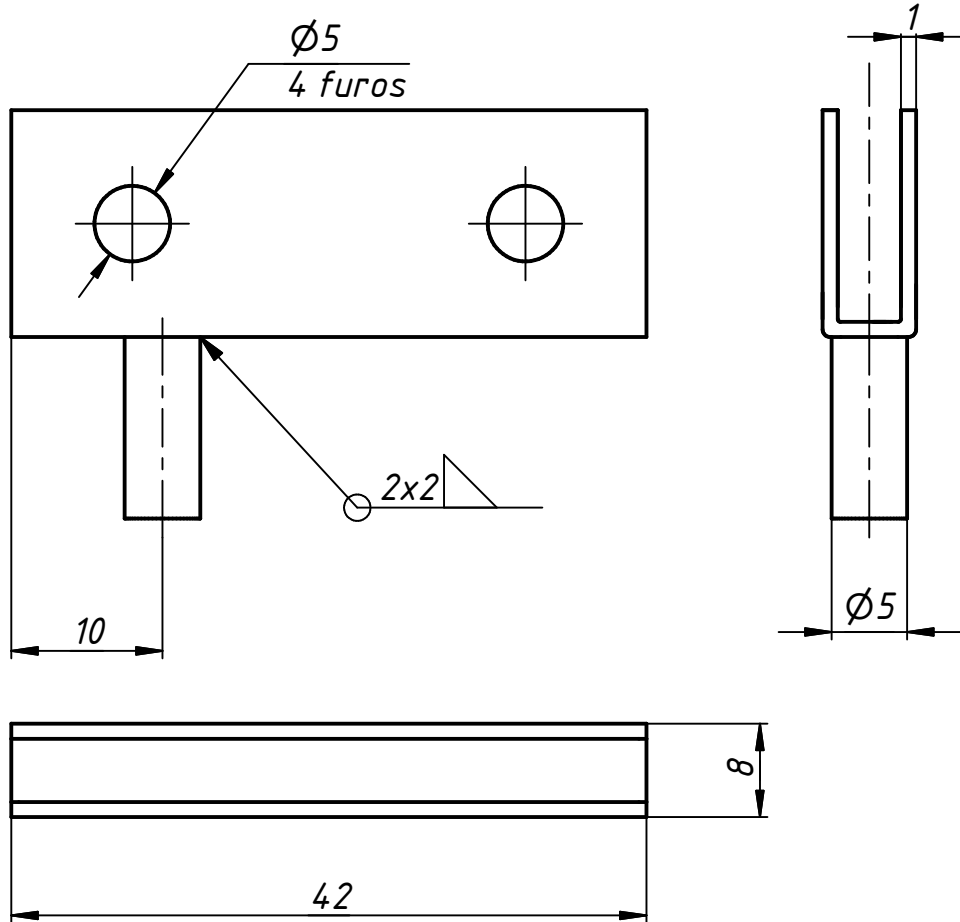


Nota:

Desvios não indicados : Furos - H14, Veios - h14, Outras - $\pm IT 14/2$

					<i>Trabalho de licenciatura</i>			
Alt	Folha	Documento Nº	Assin.	Data	<i>Cubo</i>	Código	Massa	Escala
Autor		E. P. Nguluve		09/2022				2:1
Verificou		Dr Eng Paxis						
						Folha A4	Folha 8 de 16	
					<i>Aço</i>	<i>UEM-FE-DEMA</i>		
Aprovou								

Rz40

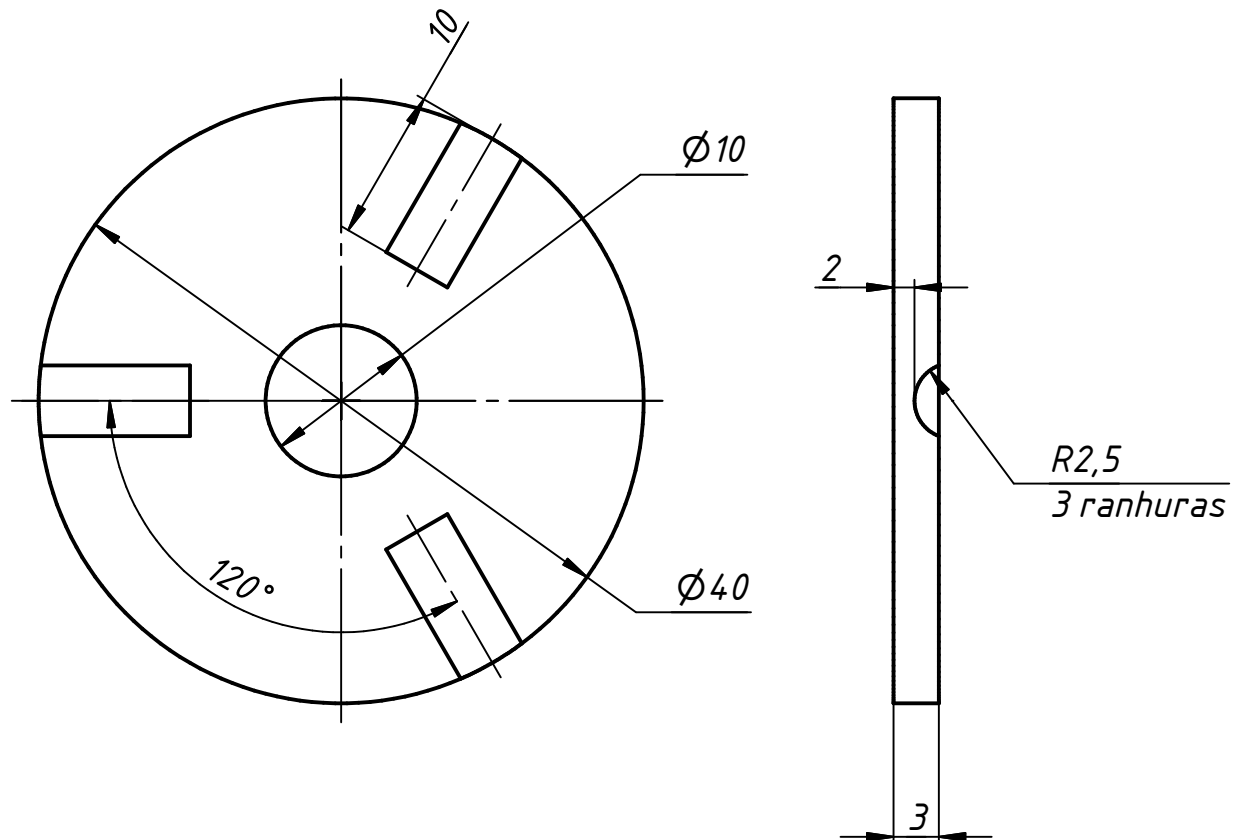


Nota:

Desvios não indicados : Furos - H14, Veios - h14, Outras - $\pm IT 14/2$

					<i>Trabalho de licenciatura</i>			
					<i>Placa de fixação da pá</i>	Código	Massa	Escala
Alt	Folha	Documento Nº	Assin.	Data				2:1
Autor	E. P. Nguluve			09/2022				
Verificou	Dr Eng Paxis							
						Folha A4	Folha 9 de 16	
Aprovou					Aço	UEM-FE-DEMA		

Rz100 (✓)

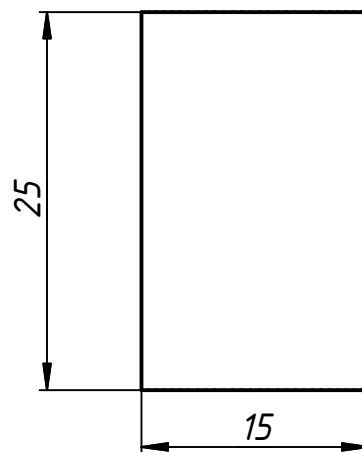
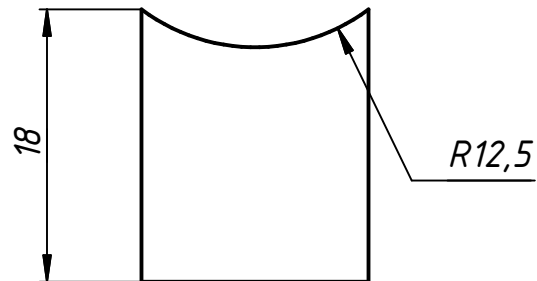


Nota:

Desvios não indicados : Furos - H14, Veios - h14, Outras - \pm IT 14/2

					<i>Trabalho de licenciatura</i>			
					<i>Placa circular de fixação da pá</i>	Código	Massa	Escala
Alt	Folha	Documento Nº	Assin.	Data				2:1
Autor		E. P. Nguluve		09/2022				
Verificou		Dr Eng Paxis				Folha A4	Folha 11 de 16	
Aprovou					PVC	UEM-FE-DEMA		

Rz100 (✓)

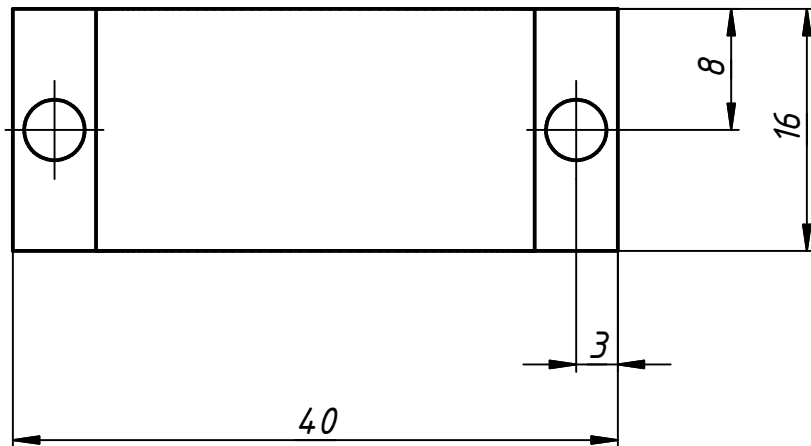
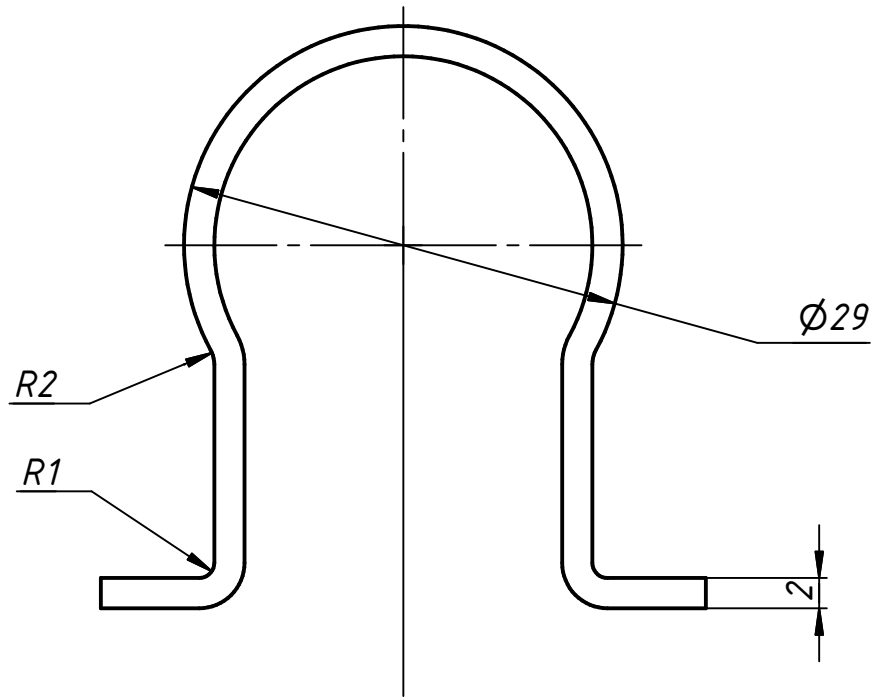


Nota:

Desvios não indicados : Furos - H14, Veios - h14, Outras - $\pm IT 14/2$

					<i>Trabalho de licenciatura</i>			
					<i>Apoio para o gerador</i>	Código	Massa	Escala
<i>Alt</i>	<i>Folha</i>	<i>Documento Nº</i>	<i>Assin.</i>	<i>Data</i>				2:1
<i>Autor</i>	<i>E. P. Nguluve</i>			<i>09/2022</i>				
<i>Verificou</i>	<i>Dr Eng Paxis</i>							
					<i>Folha A4</i>		<i>Folha 12 de 16</i>	
<i>Aprovou</i>					<i>Madeira</i>		<i>UEM-FE-DEMA</i>	

Rz100 (✓)



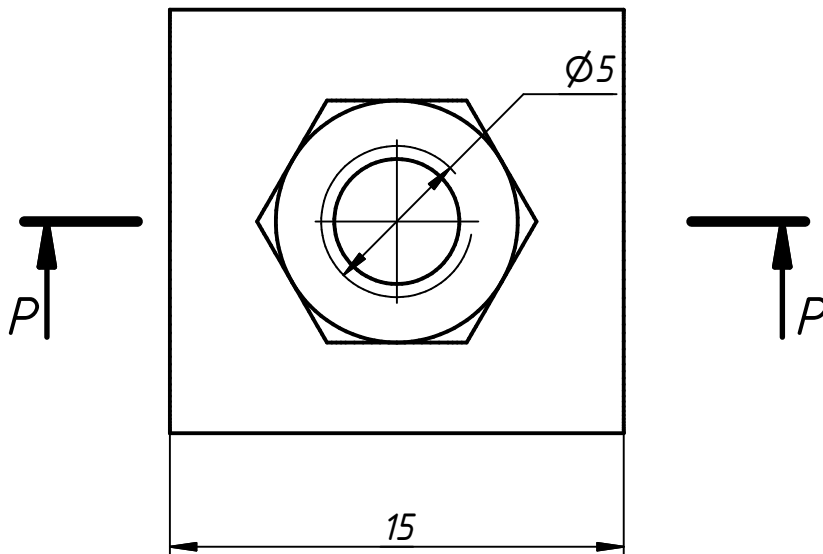
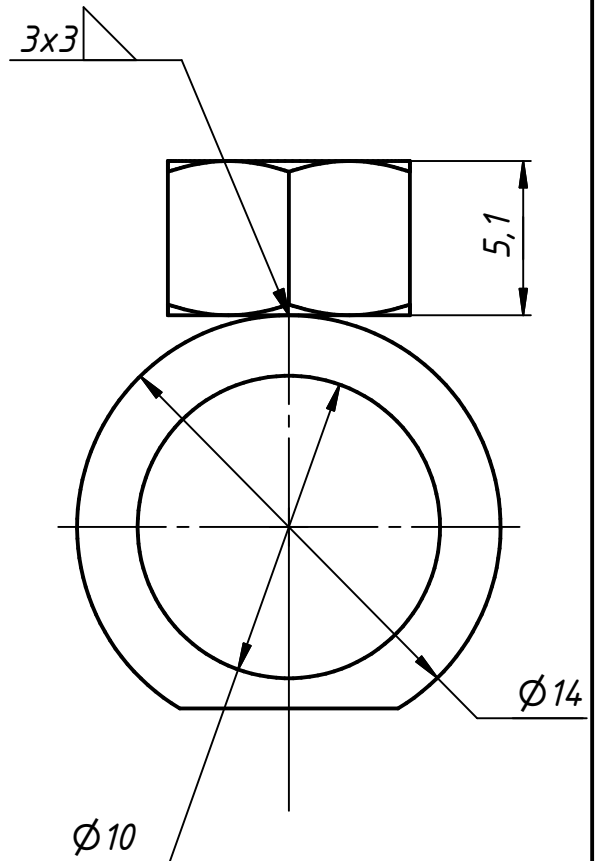
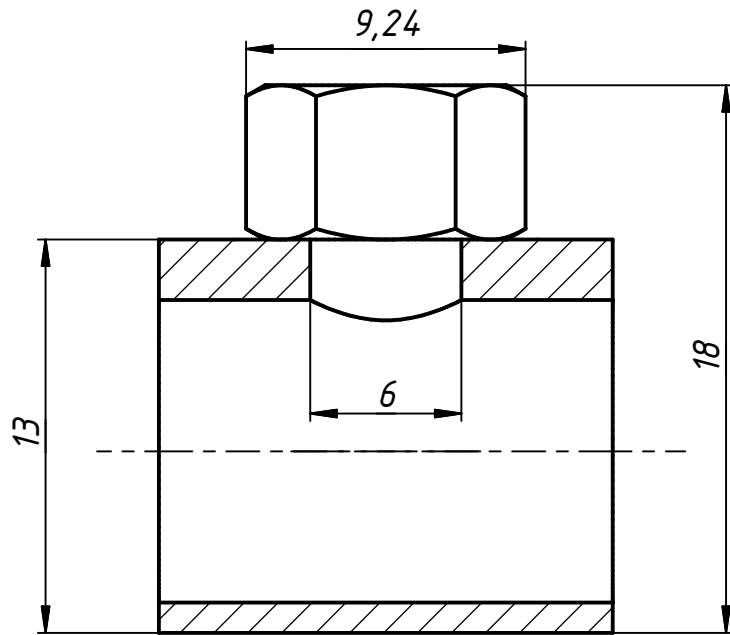
Nota:

Desvios não indicados : Furos - H14, Veios - h14, Outras - $\pm IT 14/2$

					<i>Trabalho de licenciatura</i>			
					<i>Braçadeira do gerador</i>	Código	Massa	Escala
Alt	Folha	Documento Nº	Assin.	Data				2:1
Autor		E. P. Nguluve		09/2022				
Verificou		Dr Eng Paxis				Folha A4	Folha 13 de 16	
Aprovou					Alumínio	UEM-FE-DEMA		

Rz100 (✓)

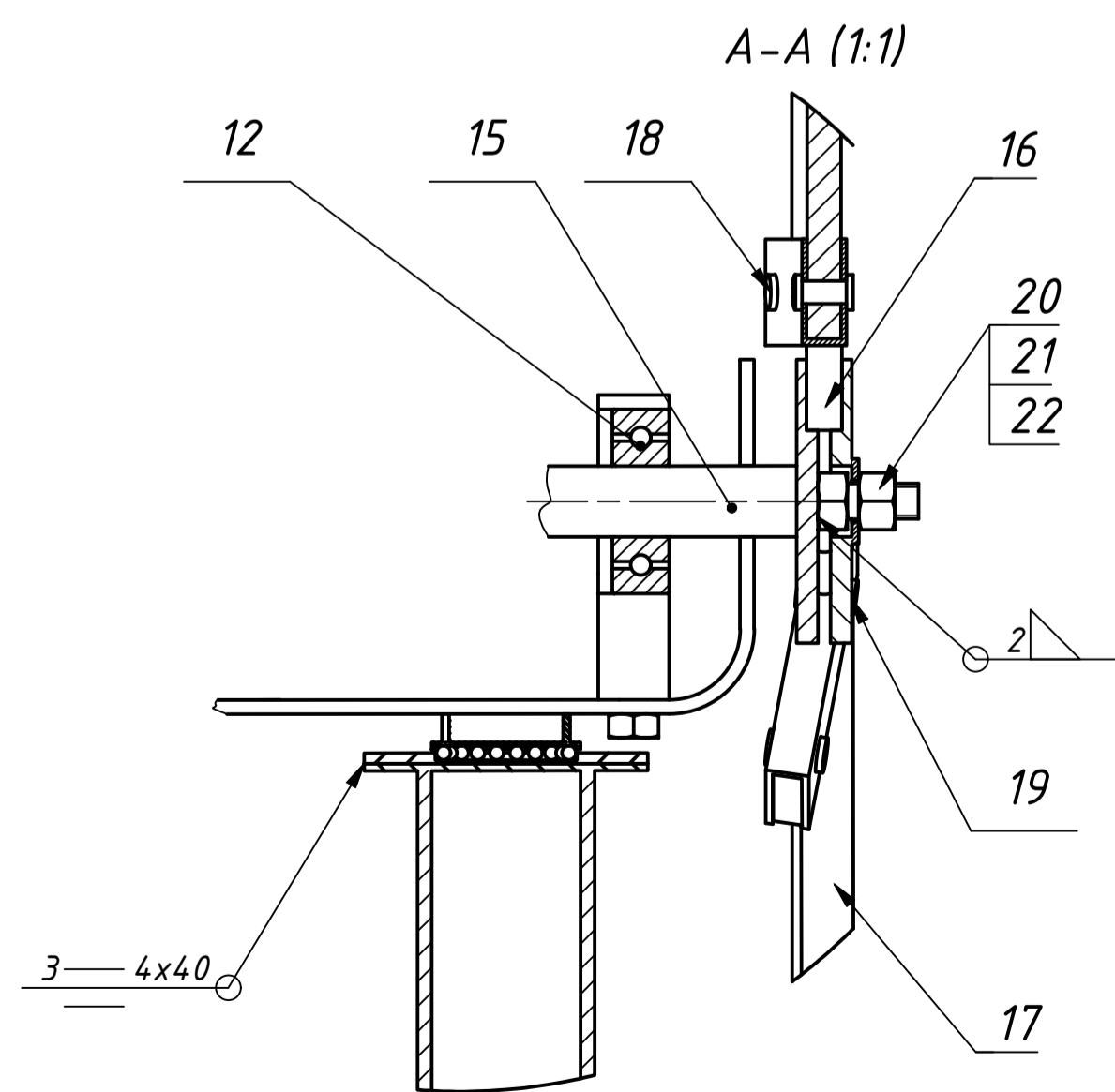
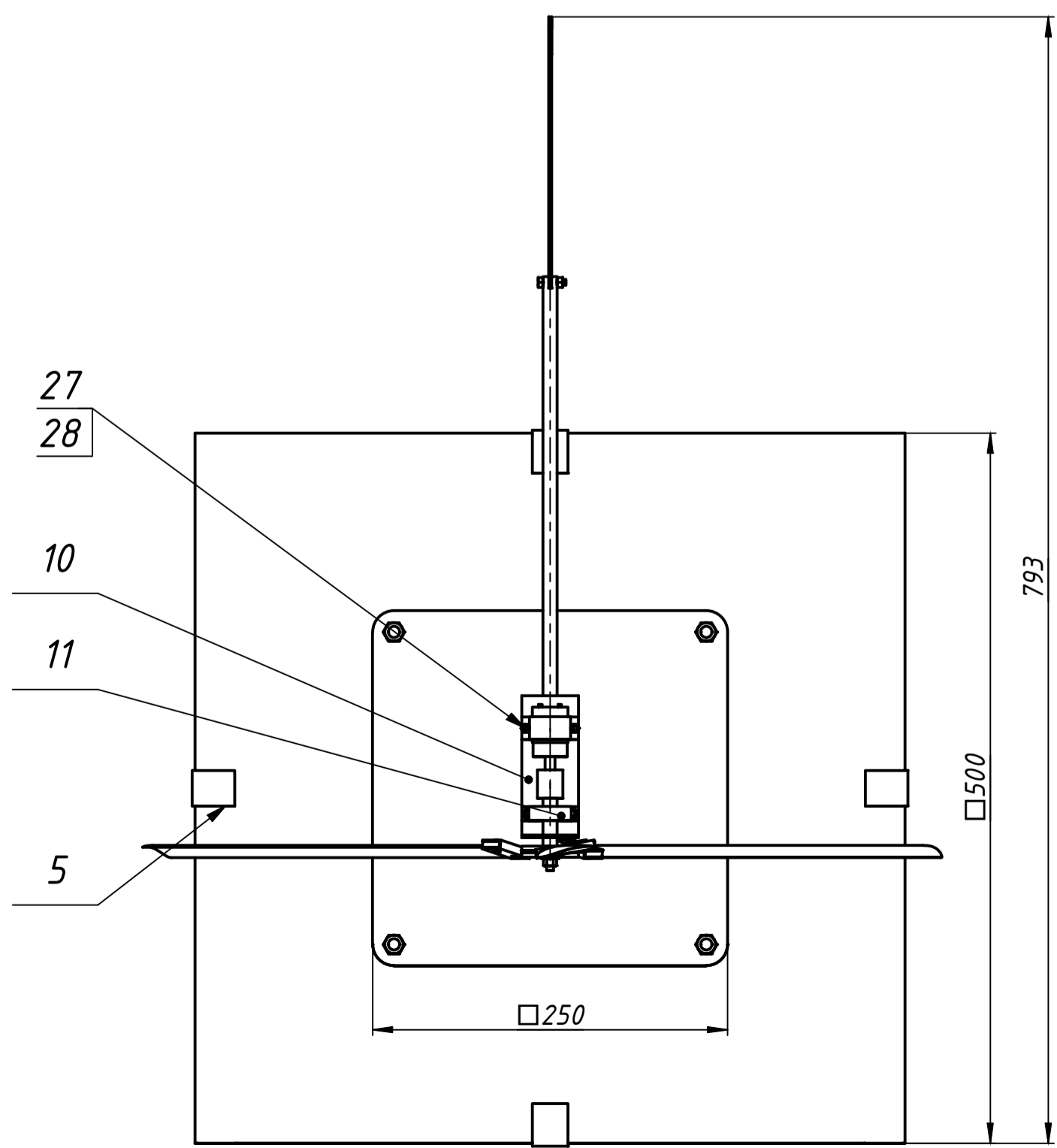
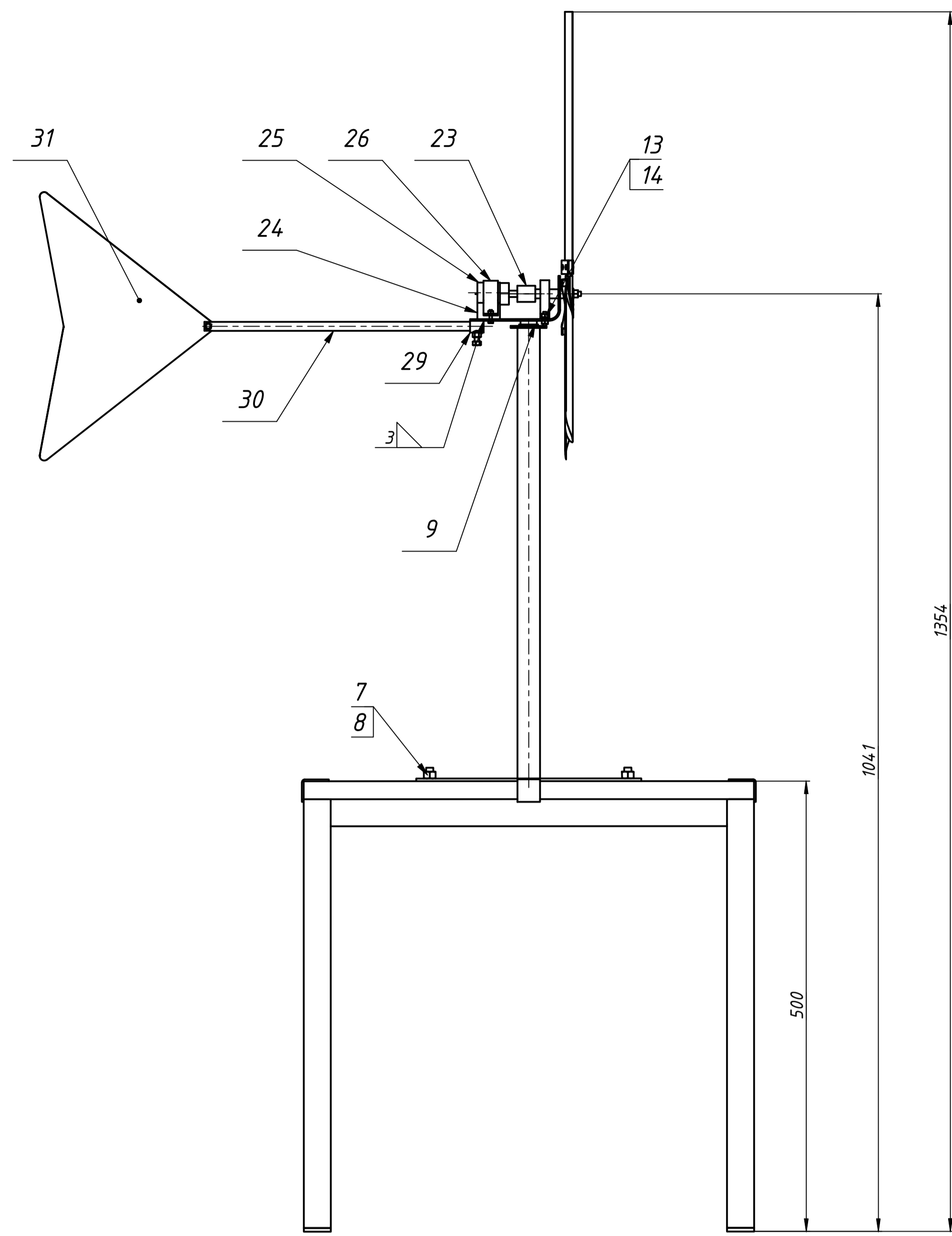
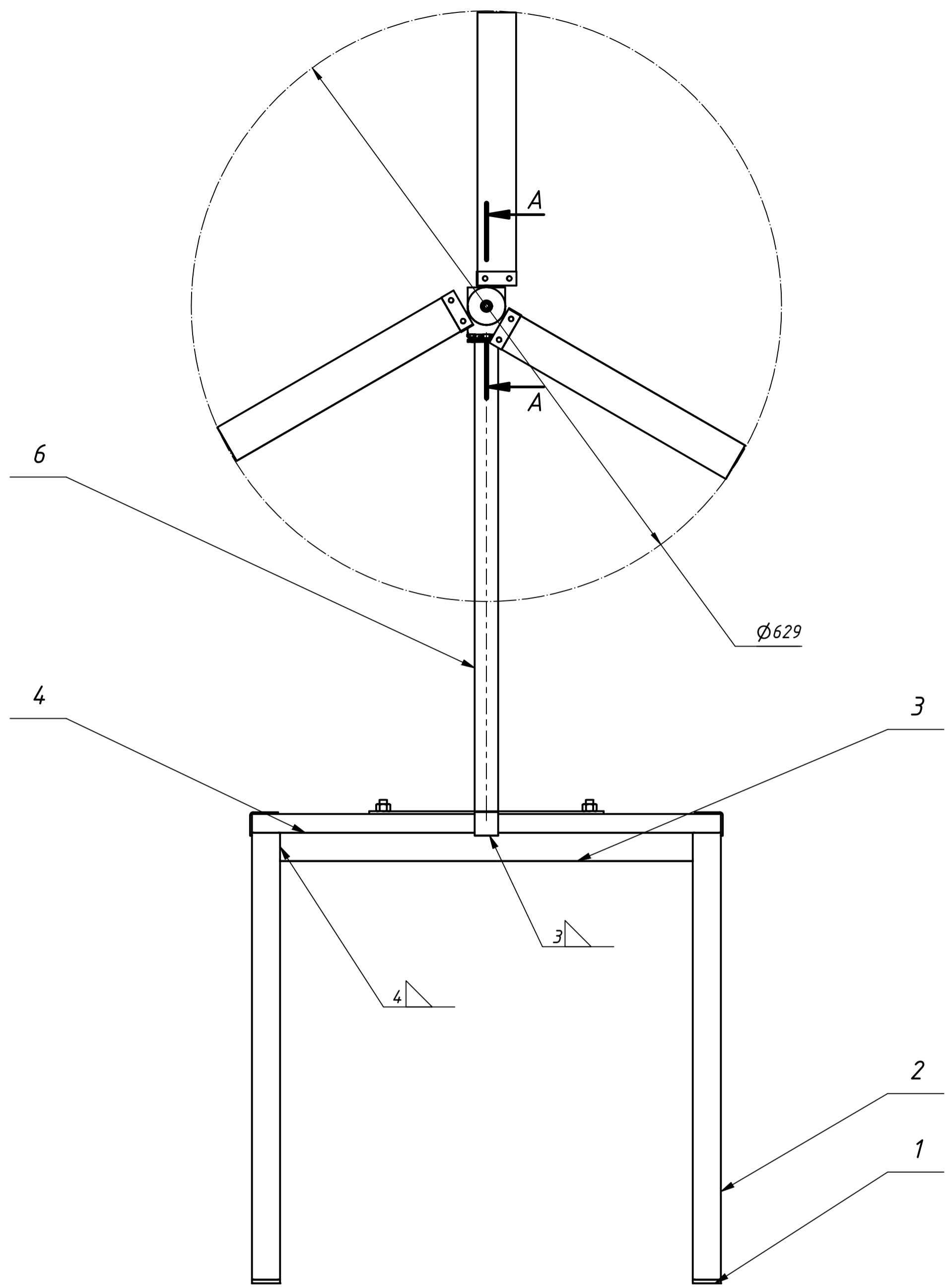
P-P (4 : 1)



Nota:

Desvios não indicados : Furos - H14, Veios - h14, Outras - $\pm IT 14/2$

					<i>Trabalho de licenciatura</i>		
					<i>Fixador do leme</i>		
					Código	Massa	Escala
Alt	Folha	Documento Nº	Assin.	Data			4:1
Autor		E. P. Nguluve		09/2022			
Verificou		Dr Eng Paxis					
					Folha A4		Folha 14 de 16
					Aço		UEM-FE-DEMA
Aprovou							



31	Leme	1
30	Braço do leme	1
29	Fixador do leme	1
28	Porca M3	2
27	Parafuso M3 x 14	2
26	Braçadeira do gerador	1
25	Gerador	1
24	Apoio do gerador	1
23	União elástica	1
22	porca M5	1
21	Anilha	1
20	Parafuso M5 x 14	2
19	Placa circular de fixação	1
18	Rebites Ø4	6
17	pá	3
16	Placa de fixação da pá	3
15	Cubo	1
14	Porca M4	3
13	Parafuso M4 x 14	3
12	Rolamento radial de esferas	1
11	Braçadeira do rolamento radial	1
10	Nacela	1
9	Rolamento axial de esferas	1
8	Porca M8	4
7	Parafuso M8 x 36	4
6	Torre	1
5	Placa de fixação da base	4
4	Base de madeira	1
3	Barra transversal	4
2	Apoio da base	4
1	Borracha	4

DESIGNAÇÃO					NOME	Q U A N	OBS	
Protótipo de uma turbina eólica								
Trabalho de licenciatura								
Alt	Folha	Documento Nº	Assin.	Data	Protótipo de uma turbina eólica	Código	Massa	Escala
								1:2
Verificou		Dr Eng Paxis		03/2022		Folha A1	Folha 1 de 1 2	
Aprovou								UEM-FE-DEMA