

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

BRUNO FRANCO LOPES
FABRÍCIO SOUSA LIMA PRADO

PROJETO, CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE UMA TURBINA EÓLICA

VOLTA REDONDA

2017

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

PROJETO, CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE UMA TURBINA EÓLICA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica do UniFOA como requisito a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Alunos:

Bruno Franco Lopes

Fabício Sousa Lima Prado

Orientador:

Prof. D. Sc. Hélio de Paiva
Amorim Jr.

VOLTA REDONDA

2017

FOLHA DE APROVAÇÃO

Alunos: Bruno Franco Lopes e Fabrício Sousa Lima Prado

Título de monografia: Projeto, construção e análise de uma turbina eólica

Orientador: Professor D. Sc. Hélio de Paiva Amorim Jr.

Banca Examinadora:

Prof. D. Sc. Hélio de Paiva Amorim Jr.

Prof. M.Sc. Edson de Paula Carvalho

Prof. Esp. Aloano Regio de Almeida Pereira

DEDICATÓRIA

À minha mãe, Mônica, por acreditar em mim desde o princípio.

Bruno Franco Lopes

Aos meus pais, Ida Suely e Luiz Paulo, que tanto apoiaram e incentivaram o meu crescimento profissional.

Fabício Sousa Lima Prado

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente à minha família, pelo apoio imensurável, e a todos que, de alguma forma, foram essenciais para que o caminho se tornasse menos árduo.

Bruno Franco Lopes

Agradeço, primeiramente a Deus, por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades, minha família por sempre estar ao meu lado e a todos que de alguma forma contribuíram positivamente para essa difícil caminhada.

Fabício Sousa Lima Prado

RESUMO

O aumento da pesquisa e desenvolvimento baseado em fontes de energias renováveis decorre do aumento mundial de demanda energética, e cobranças internacionais de conservação do meio ambiente. Portanto, em visto dos incentivos as fontes de energias alternativas, aumenta-se a pesquisa e desenvolvimento no setor de energia eólica. Este tipo de geração já encontrar-se muito utilizado em locais com constância de ventos, e o fundamento da mesma consiste no emprego dos ventos para gerar movimentos mecânicos em um aparelhamento responsável pela conversão eletromecânica de energia. Baseado nas necessidades e princípios mencionados, o atual trabalho visa apresentar a elaboração de projeto, construção e análise de uma turbina eólica tipo vertical de baixo custo. Para tal, serão desenvolvidos alguns conceitos em torno do tipo de tecnologia, seguido pelo projeto de uma turbina eólica, trabalhando o conceito de “Código Aberto” amparada por meio de um tutorial “Faça Você Mesmo”. Por fim, como parte da monografia, serão apresentadas as avaliações do produto desenvolvido realizando o estudo de viabilidade técnico-econômico para implantações populares.

Palavras chave: demanda de energia; geração eólica; energia renovável; conversão eletromecânica de energia.

ABSTRACT

The increasing of research and development based on renewable energy sources derive from global growth of energetic demand and international requirements of environment preservation. Therefore, in view of the incentives for alternative energy sources, research and development in the wind energy sector is increasing. This type of generation is already being applied in localities with winds constancy, and the ground on which is based, consists in the use of winds for generate mechanical movements in an equipment responsible for the electromechanic conversion of energy, awareness that today is dominated by man. Based in the needs and the principals mentioned, the present study seeks bringing forward the elaboration of project, construction and analysis of a low-cost vertical eolic turbine. For this, some concepts will be developed in terms of the kind of technology, followed by the project of an eolic turbine, working with the Open-Source concept along tutorials Do-It-Yourself (DIY). As part of the study, the evaluations of the developed project will be presented accomplishing the technical and economical evaluations for popular implementations.

Key words: energetic demand; eolic generation; renewable energy; electromechanic conversion of energy.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1.Motivação	20
1.2.Objetivo	21
1.3.Contribuição	21
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	22
2.1.Ventos	22
2.2.Energia	22
2.3.Princípio da Conservação da Energia	23
2.4.Energia Cinética	24
2.5.Energia Potencial Gravitacional.....	24
2.6.Energia Elétrica	24
2.7.Energias Renováveis.....	25
2.8.Energia Eólica	25
2.8.1.Capacidade Instalada Mundial de Energia Eólica	26
2.9.Matriz Energética.....	27
2.10.Potencial Eólico	28
2.10.1.Potencial Eólico no Brasil.....	28
3. AEROGERADOR	33
3.1.Classificação dos Aerogeradores	34
3.1.1.Turbinas Eólicas de Eixo Vertical	34
3.1.2.Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal.....	35
3.2.Aplicação dos sistemas eólicos	36
3.2.1.Sistemas independentes	36
3.2.2.Sistemas híbridos.....	37
3.2.3.Sistemas interligados à rede elétrica.....	37

4. GERADOR.....	38
4.1.Imãs Permanentes	39
4.2.Tipos de Geradores Síncronos de Imãs Permanentes.....	40
4.2.1.Gerador Síncrono de Fluxo Axial	41
4.2.2.Gerador Síncrono Modelo Toroidal	43
5. PROJETO DE UM AEROGERADOR	45
5.1.Escolha do modelo de turbina	45
5.1.1.Dimensionamento da Turbina	45
5.1.2.Coefficientes de Potência.....	48
5.1.3.Coefficientes de Velocidade de Ponta.....	49
5.1.4.Número de pás da turbina	51
5.1.5.Formato da pá.....	51
5.1.6.Turbina real x turbina ideal	53
5.2.Dimensionamento do alternador.....	54
5.2.1.Carregamento Elétrico	55
5.2.2.Fluxo Magnético Fornecido pelo Imã	57
5.2.3.Tensão Interna do Gerador	59
5.2.4.Número de Condutores e Bobinas	60
5.2.5.Dimensões dos Fios Condutores	61
5.2.6.Escolha e Dimensões dos Imãs	61
6. ESTUDO DE CASO.....	64
6.1.Aplicação matemática	64
6.2.Cálculo da Turbina	65
6.3.Cálculo do gerador	68
6.4.Análise de desempenho	77
6.4.1.Ensaio	78

6.5. Estudo de Viabilidade Técnico-Econômico.....	81
7. CONCLUSÃO	87
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
APÊNDICE A - MANUAL TÉCNICO CONSTRUTIVO DE UMA TURBINA DE BAIXA POTÊNCIA	92
1. APRESENTAÇÃO	92
2. DESENHOS TÉCNICOS	93
3. CRONOGRAMA	99
4. LISTA DE MATERIAIS.....	100
5. METODOLOGIA DE CONSTRUÇÃO.....	107
5.1. Turbina eólica.....	107
5.1.1. Hélices	107
5.1.2. Leme e rotor.....	111
5.1.3. Pré montagem da turbina.....	116
5.1.4. Nariz da turbina	117
5.2. Eixo, suportes e acessórios de fixação dos rotores do gerador	119
5.2.1. Flange de suporte do rotor da turbina	120
5.2.2. Flange Suporte dos Rotores do Gerador	121
5.2.3. Montagem do sistema de acoplamento dos rotores.....	122
5.3. Gerador	123
5.3.1. Estator e rotores.....	123
5.3.2. Bobinas do estator	129
5.3.3. Fixação dos ímãs	134
5.4. Montagem.....	138
5.4.1. Montagem final da turbina eólica.....	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tensão tangencial	56
Tabela 2 - Níveis de indução magnéticas permissíveis para máquinas.....	58
Tabela 3 - Especificações para Dimensionamento da Turbina.....	64
Tabela 4 - Especificações para Dimensionamento do Alternador.....	65
Tabela 5 – Dimensões calculadas para o projeto	73
Tabela 6 - Dimensões calculadas para os ímãs	76
Tabela 7 – Relação corrente, tensão e potência.....	79
Tabela 8 – Relação rotação X potência.....	80
Tabela 9 - Custo e características construtivas de aerogerador.	82
Tabela 10 - Características do local de aplicação e constantes de cálculos.....	83
Tabela 11 - Potência x Velocidade do Vento	83
Tabela 12 – Fluxo de Caixa	85
Tabela A 1 - Parâmetros técnicos do gerador eólico.....	92
Tabela A 2 - Cronograma para construção de um aerogerador de pequeno porte....	99
Tabela A 3 - Lista de materiais para fabricação	100
Tabela A 4 - Lista de ferramentas e EPIs para fabricação	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Capacidade instalada Mundial até 2016	26
Figura 2 - Matriz energética do Brasil - ano base: 2016.....	27
Figura 3 - Potencial Eólico por região do Brasil.....	29
Figura 4 - Potencial eólico Arraial do Cabo.	30
Figura 5 - Fator de forma Weibull Média Anual.	32
Figura 6 - Curva de Weibull.....	32
Figura 7 (a) e (b) - Turbinas eólicas de eixo vertical.	34
Figura 8 - (a) Aerogerador tipo Upwind; (b) Aerogerador tipo Downwind.....	35
Figura 9 - Configuração de máquinas formadas com mais de um rotor e estator.	39
Figura 10 - Máquinas de fluxo axial e radial.....	40
Figura 11 - Desenho representativo de uma máquina a ímãs permanentes.....	41
Figura 12 - Desenho esquemático de um gerador de fluxo axial a ímãs permanentes.	43
Figura 13 - Tipos de máquinas toroidal.	44
Figura 14 - Cilindro de vento imaginário incidindo em uma superfície de controle....	46
Figura 15 - Velocidade de ponta da pá.	50
Figura 16 – Ângulo de passo.....	51
Figura 17 - Característica $C_p \times \lambda$ traçadas em função de aproximações numéricas.	52
Figura 18 - Variação da Curva de $C_p \times \lambda$ traçada de forma experimental.....	52
Figura 19 - Potência da turbina eólica real X ideal.	53
Figura 20 - Dimensões do projeto magnético.....	63
Figura 21 - Simulação de parâmetros da pá para velocidade de operação.	67
Figura 22 - Simulação de parâmetros da pá para velocidade de projeto.	67

Figura 23 - Perfil aerodinâmico da pá.	68
Figura 24 - Bancada de teste	77
Figura 25 - Esquema de montagem do ensaio.....	78
Figura 26 - Gráfico de potência X velocidade do vento.....	84
Figura 27 – 8 anos: Fluxo de caixa gráfico nominal.	86
Figura A 1 - Perfil da hélice da turbina	93
Figura A 2 - Suporte de acoplamento das pás ao rotor da turbina	93
Figura A 3 - Rotor de suporte da hélice da turbina.....	94
Figura A 4 - Suporte da turbina	94
Figura A 5 - Estator do gerador	95
Figura A 6 - Suporte do estator	95
Figura A 7 - Rotores do gerador.....	96
Figura A 8 - Montagem do gerador com rotores e estator.....	96
Figura A 9 - Eixo de acoplamento entre a turbina e o gerador	97
Figura A 10 - Leme da turbina.....	97
Figura A 11 - Montagem do aerogerador	98
Figura A 12 - Tubo utilizado na fabricação - PVC, d.: 200 mm, esp.: 10 mm.....	109
Figura A 13 - Ferramentas utilizadas para fabricação.....	109
Figura A 14 - Recorte das pás no tubo utilizando a serra tico-tico e serra para madeira	110
Figura A 15 - Acabamento nas arestas utilizando uma lixadeira de 4” com disco de lixa para madeira.....	110
Figura A 16 - Pesagem das pás para ajustes de balanceamento.	111
Figura A 17 - Hélices cortadas e acabadas.....	111
Figura A 18 - Chapa de alumínio 850x500x6mm.	113
Figura A 19 - Colagem do molde construtivo do leme e rotor da turbina na chapa de alumínio.....	113

Figura A 20 - Leme e rotor da turbina.	114
Figura A 21 - Perfuração do rotor da turbina para fixação das hélices e eixo.	114
Figura A 22 - Presilhas de fixação das pás da turbina.	114
Figura A 23 - Remoção da tinta do rotor da turbina	115
Figura A 24 - Remoção da tinta do leme da turbina	115
Figura A 25 - Furadeira com escova rotativa.....	115
Figura A 26 - Leme e rotor da turbina após limpeza	115
Figura A 27 - Recorte para posicionamento do gerador.....	116
Figura A 28 - Recorte de posicionamento do gerador concluído.....	116
Figura A 29 - Pré-montagem da turbina do aerogerador.....	117
Figura A 30 - Molde do nariz da turbina	119
Figura A 31 - Aplicação da resina com fibra de vidro sobre o molde	119
Figura A 32 - Flange de fixação do rotor da turbina.	120
Figura A 33 - Flange de fixação do rotor da turbina.	120
Figura A 34 - Flange de Fixação dos rotores do gerador.	121
Figura A 35 – Embuchamento dos rotores do gerador.....	121
Figura A 36 - Montagem do Sistema de coplamento dos rotores do gerador e mancais no eixo de acoplamento.	122
Figura A 37 - Montagem do Sistema de coplamento entre os rotores do gerador e o rotor da turbina.	122
Figura A 38 - Chapa de aço 600x400x3mm.	124
Figura A 39 - Ferramentas utilizadas para fabricação do estator e rotores.	124
Figura A 40 - Colagem do molde construtivo do estator e rotores da máquina elétrica em chapa de aço.	125
Figura A 41 - Fabricação do estator e rotores com a esmerilhadeira de 4” e disco de corte rápido.	125
Figura A 42 - Recorte do estator e rotores em aço.	126

Figura A 43 - Estator e rotor com acabamento externo finalizado.....	126
Figura A 44 - Recorte e acabamento interno do estator.....	126
Figura A 45 - Recortes do estator e rotores finalizados.	126
Figura A 46 - Soldagem das partes do estator.	127
Figura A 47 - Acabamento nas bordas interna e externa do estator com a lixadeira e disco de desbaste.	127
Figura A 48 - Entreferro do estator finalizado.....	127
Figura A 49 - Fabricação dos suportes do estator.....	128
Figura A 50 - Estrutura dos rotores do gerador após limpeza.....	128
Figura A 51 – Molde das posições das bobinas.....	130
Figura A 52 - Marcação das posições das bobinas.....	130
Figura A 53 - Enrolamento das bobinas do estator	131
Figura A 54 - Enrolamento do estator finalizado	131
Figura A 55 - Fechamento das bobinas.	131
Figura A 56 - Conclusão do fechamento das bobinas.....	131
Figura A 57 - Confecção do molde em isopor para envelopamento do estator.....	132
Figura A 58 - Isolamento do molde com fita crepe.....	132
Figura A 59 - Posicionamento do estator no molde.....	133
Figura A 60 - Envelopamento do estator em resina.	133
Figura A 61 - Estator finalizado.	133
Figura A 62 - Fixação dos suportes do estator.....	133
Figura A 63 - Colagem molde de posicionamento dos ímãs.	135
Figura A 64 - Recorte das posições dos ímãs no molde.	135
Figura A 65 - Detalhe de fixação do molde de fixação dos ímãs.....	136
Figura A 66 - Identificação da polaridade do ímã.	136
Figura A 67 - Posicionamento dos ímãs no molde do rotor.....	137

Figura A 68 - Aplicação de cola no rotor.	137
Figura A 69 - Colagem dos imãs no rotor do gerador.	137
Figura A 70 - Remoção do molde de colagem dos imãs no rotor.....	137
Figura A 71 – Arranjo das peças da turbina em suas respectivas posições de montagem.	139
Figura A 72 – Arranjo das peças da turbina em suas respectivas posições de montagem.	139
Figura A 73 – Montagem da turbina eólica.....	139
Figura A 74 – Montagem final da turbina eólica.	140

LISTA DE SIGLAS

Risø - Instituto de Investigação Dinamarquês

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito

CE-EÓLICA - Centro de Energia Eólica

TEEV - Turbina Eólica de Eixo Vertical

TEEH - Turbina Eólica de Eixo Horizontal

PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

E - Energia cinética

m - Massa de ar

v - Velocidade de entrada do ar

ρ - Massa específica do ar

P - Potência fornecida pelo vento

A - Área de captação de ar da turbina eólica

C_p - Coeficiente de potência do aerogerador

v_2 - Velocidade na hélice

v_3 - Velocidade de saída do vento

λ - Razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente

ω_r - Velocidade angular do rotor

R - Raio do rotor

f_r - Frequência do rotor

V1 - Velocidade do vento a altura h1

h1 - Altura de mapeamento da velocidade do vento

V - Velocidade do vento corrigida para altura

h - Altura de instalação

α - Valor tabelado de acordo com o coeficiente de rugosidade do local

A_m - Carregamento elétrico

T_{nom} - Torque nominal

K_E - Constante de força eletromotriz

I_{nom} - Corrente nominal

σ_{Ftan} - Tensão tangencial

V_r - Volume do rotor

TRV - Relação torque/volume

l_{stk} - Comprimento axial do estator

B_δ - Indução magnética

τ_p - Passo polar

θ_r - Extensão de cada ímã em radianos

Φ_1 - Fluxo magnético

$V_{m\acute{a}x}$ - Tensão máxima

V_{rms} - Tensão eficaz

Z - Numero de condutores

N_{cf} - Número de condutores por fase

N_f - Número de espiras por fase

N_{bob} - Número de bobinas

N_{sb} - Número de espiras por bobina

S_c - Sessão do condutor

D_c - Diâmetro do condutor

δ - Comprimento do entreferro

D_{im} - Diâmetro interno do estator

h_m - Altura dos imãs

X - Relação comprimento axial/diâmetro do rotor

D_{rai} - Diâmetro do rotor abaixo dos imãs

T_{pim} - Passo polar abaixo dos imãs

b_{mi} - Largura inferior dos imãs

\emptyset_{mi} - Largura inferior dos imãs em graus mecânicos

\emptyset_{ei} - Ângulo entre imãs

1. INTRODUÇÃO

O uso de energia renovável encontra-se em uma condição de constante expansão, sendo classificada como tal por apresentar baixo impacto ambiental. A crescente necessidade decorre tanto da possível escassez dos recursos normalmente utilizados, como dos danos ambientais extremos, ambos devido ao atual caráter predominante de geração de energia. Os mesmos correspondem a sistemas centralizados baseados em recursos finitos, como os fósseis, e de alto impacto social e ambiental, como os hídricos.

A partir do fato mencionado, torna-se necessária a ampliação dos estudos de novas fontes de energia que possibilitem uma relação mais proveitosa entre o ser humano e o meio ambiente. Constituído de tais preceitos ambientais, surge o conceito de tecnologia hoje aplicada aos geradores eólicos, baseados em fazer uso da força contida nos ventos para produção de energia elétrica. Tal tecnologia proporciona bom rendimento e possibilidade de produção próxima ao consumidor, agregando valor devido à redução de custos com infraestruturas e manutenções, redução de perdas elétricas e de itens de alta oneração.

Portanto, a geração proveniente de fontes de energias limpas traz consigo o conceito de tecnologia de geração distribuída, causando a descentralização do sistema energético.

A pesquisa, o desenvolvimento e a aplicação de turbinas eólicas constituem-se como um sistema importantíssimo, pois estabelece um novo caminho para geração de potência elétrica limpa, juntamente, por exemplo, à energia solar. Porém, é sabido que a diminuição do custo de instalação da tecnologia ainda é necessária para que a mesma seja popularizada.

1.1. Motivação

É importante ressaltar preceitos já constatados por órgãos ambientais, centros de pesquisas, empresas e universidades em âmbito nacional e internacional. De modo que, nota-se unanimidade dentre tais unidades que, por motivos ambientais e de eficiência energética, as formas de produção consideradas renováveis compõem o futuro da matriz energética mundial.

Segundo o IBGE (2010), no Brasil, grande parte da população está localizada no litoral, onde existe grande potencial eólico, devido à constância de ventos, e aliando-se ao fato de que tal sistema de geração é pouco explorado no âmbito de equipamentos de pequeno porte, torna-se justificável o estudo da utilização de turbinas eólicas para produção de potência elétrica.

Tendo em vista o elevado custo de implantação dos aerogeradores hoje comercializadas, o presente trabalho visa disponibilizar uma opção de projeto de construção de uma turbina de baixo custo, tornando-se objeto de estudo da viabilidade técnico-econômica deste tipo de construção.

1.2. Objetivo

Este projeto possui como objetivo o estudo e análise de uma turbina eólica, verificando sua viabilidade funcional e econômica para que quando implementada, ela atue de forma efetiva em um sistema residencial ou predial.

1.3. Contribuição

Fazem parte do escopo deste trabalho disponibilizar um material didático de fácil entendimento:

- Iniciando pela apresentação das ferramentas de análise de potencial energético eólico de uma região e verificação da viabilidade de implementação de um aparelho de geração de energia por meio do vento, além de analisar o potencial eólico do Brasil e assim estabelecer as principais regiões para a implementação do projeto;
- Demonstrar e compreender os tipos e funcionamentos de uma turbina eólica;
- Desenvolver o Projeto construtivo de uma turbina eólica de baixo custo do tipo vertical para implantação residencial trabalhando os conceitos de tecnologia de “Código Aberto” amparada por um tutorial “Faça Você Mesmo”;
- Construir a turbina projetada e fazer as avaliações do produto desenvolvido realizando o estudo de viabilidade técnico-econômico para implantações populares, comparando-a com um modelo comercial de mesmo porte.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Ventos

Segundo o Portal das energias renováveis (2009), define-se vento como deslocamento de ar atmosférico de modo natural ou artificial por meios mecânicos. O mesmo provém da associação entre os movimentos de rotação e translação do planeta com a absorção de energia em forma de calor emitida pelo sol.

O planeta Terra é exposto a elevações de temperatura de forma irregular causado pelo modo como os raios solares incidem sob sua superfície. A diferença de aquecimento dá início a um sistema de convecção atmosférica global, devido ao fato do ar quente ser mais leve que o ar frio. O ar quente se desloca do eixo equatorial em direção aos polos, enquanto a rotação do planeta impede seu movimento direto, promovendo o aparecimento de espirais. Além disso, o contato das correntes de ar com a superfície terrestre origina diferentes pressões atmosféricas. Sendo assim, os ventos são os movimentos dos ares entre os sistemas de pressão à medida que os mesmos se equilibram.

O vento pode ser considerado fonte de energia renovável devido à sua origem dependente de recursos naturais e ao fato de ser espontaneamente e continuamente reabastecido.

2.2. Energia

De acordo com Burattini (2008), a energia é algo invisível, mas os processos de transformação da energia são visíveis, o que se torna detectável é o trabalho

realizado. Para a Física, pode-se dizer que energia é a capacidade que um sistema tem de realizar trabalho, ou seja, o trabalho realizado terá como causa, a energia contida ali, que se transformou. A unidade de medida no sistema internacional de unidades é o joule (J).

Para melhor compreensão, pode-se exemplificar da seguinte forma: quando suspendemos um peso qualquer e o colocamos sobre uma determinada superfície, a força de nosso braço realizou trabalho. Esse trabalho se torna equivalente a energia gasta pelos músculos de nosso braço para realizar esse movimento. Não será possível ver a energia sendo gasta pelos músculos de nosso braço, mas vemos o peso sair do chão e chegar à superfície.

2.3. Princípio da Conservação da Energia

Para melhor entendimento, primeiramente deve-se enumerar as principais classificações das formas de energia. São elas: energia cinética, energia potencial, energia química, energia nuclear, energia térmica, energia gravitacional, energia elétrica e energia eletromagnética. Na presente monografia, serão abordados os conceitos de energia cinética, energia potencial gravitacional e energia elétrica, por serem as formas de energias mais presentes na construção, montagem e funcionamento de uma turbina eólica.

Todos os processos citados podem ser apontados como transformações de uma forma de energia em outra em que, de maneira não visível, a energia presente se modifica, permanecendo constante em quantidade. Com todas as informações apresentadas no presente tópico, define-se como o princípio de conservação da energia: “A energia não pode ser criada ou destruída, mas unicamente transformada. O aparecimento de certa forma de energia é sempre acompanhado do desaparecimento de outra forma de energia em quantidade igual.” (BURATTINI, 2008).

2.4. Energia Cinética

Pode ser considerada como a energia relacionada ao movimento dos corpos. Quanto maior a massa e a velocidade em que o corpo se movimenta, maior será sua energia cinética. De acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI), a energia cinética é medida em Joules (J).

2.5. Energia Potencial Gravitacional

Burattini (2008) afirma que esta forma de energia é aquela associada a interação gravitacional dos corpos com a massa. Ela pode ser medida de acordo com o trabalho realizado pelo peso do corpo ao ir de uma posição inicial à final. Sua unidade, de acordo com o SI, é Joules (J).

2.6. Energia Elétrica

Consiste em uma energia associada ao movimento das cargas elétricas, sua geração é fundamentada na diferença de potencial elétrico entre dois pontos, permitindo a formação de uma corrente elétrica entre eles (Halliday, Resnick e Krane, 2002). Sem dúvida nos dias de hoje é umas das formas de energia mais empregadas pela humanidade, graças a sua facilidade de transporte e baixo índice de perda energética durante as conversões. A energia elétrica é adquirida principalmente através de termoelétricas, usinas hidrelétricas, usinas eólicas, usinas nucleares etc. Essas companhias adotam o sistema de medição watt-hora (Wh), sendo $1 \text{ Wh} = 3.600 \text{ J}$.

2.7. Energias Renováveis

As energias renováveis são aquelas provenientes de ciclos naturais de conversão da radiação solar, fonte primária de quase toda energia disponível na Terra e, por isso, são praticamente inesgotáveis e não alteram o balanço térmico do planeta (PACHECO, 2006). São considerados como fontes renováveis a energia solar, hidrelétrica, das marés, eólica e geotérmica. Já as energias não renováveis são aquelas que uma vez esgotada sua matéria-prima, não podem ser regeneradas, podemos usar como exemplos dessas fontes o petróleo, o carvão e o gás.

2.8. Energia Eólica

A energia eólica é um método indireto de aquisição da energia do sol, devido à relação entre o aquecimento do ar atmosférico e o deslocamento de suas correntes. Assim, a energia eólica se dá pela alteração da energia do vento em energia útil, podendo ser na forma de energia elétrica, como no caso dos aerogeradores, ou também podendo ser na forma de energia mecânica no caso dos moinhos de vento.

De acordo com Veiga (2011), a utilização do vento como meio de produção de energia é uma das metodologias mais antigas utilizadas pela humanidade. Antes do surgimento da eletricidade, moinhos de vento eram empregados para bombear água e moer granulados alimentícios. No final do século XIX, sua concepção instigou a criação dos primeiros exemplares de turbinas eólicas fundamentadas nos moinhos. Até ser aceita como processo de produção de energia economicamente viável, a energia eólica passou por muitas adequações condizentes com a tecnologia disponível.

2.8.1. Capacidade Instalada Mundial de Energia Eólica

As modernas instalações de energia eólica produzem uma parcela cada vez maior da energia mundial. Segundo dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEOLICA) no ano de 2016, a capacidade instalada mundial de energia elétrica a partir da energia eólica foi de aproximadamente 487 MW. Dentre os países pioneiros encontram-se a China com cerca de 169 MW, os Estados Unidos com uma produção em torno de 82 MW e alguns países europeus, com destaque para a Alemanha, que com dimensões muito menores que as dos EUA atingiu uma produção de energia elétrica de 50 MW. Apresenta-se na Figura 1 a capacidade instalada mundial de eletricidade a partir da energia dos ventos no ano de 2016 e seu percentual.

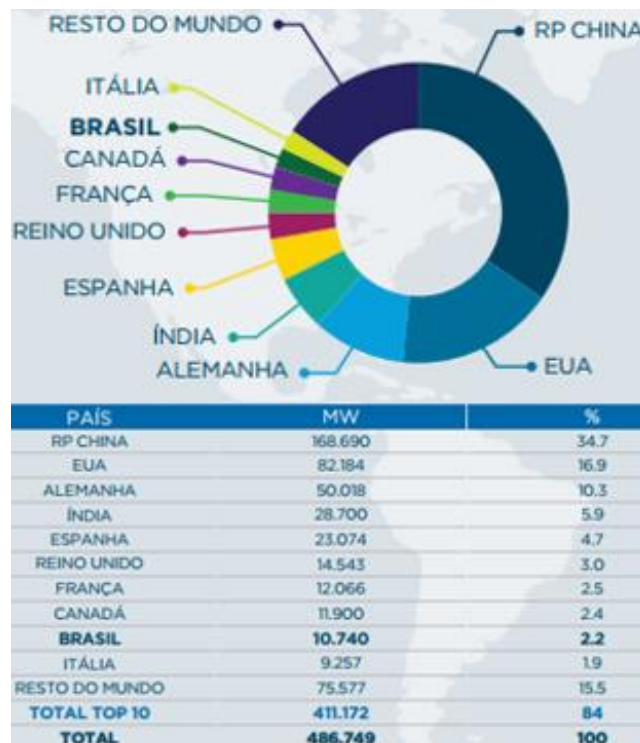


Figura 1 - Capacidade instalada Mundial até 2016.

Fonte: ABEEOLICA (2016)

2.9. Matriz Energética

Pode-se usar como definição para matriz energética o conjunto de todos os tipos de energia presentes em um determinado país ou território para ser transformada, disseminada e consumida em esferas industriais, comerciais e residenciais.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia, o Brasil possui cerca de 80% de sua matriz energética baseada em fontes renováveis, dividindo espaço com as demais fontes de energia, como visto na Figura 2, em que consta a Matriz Energética Brasileira do ano de 2016.

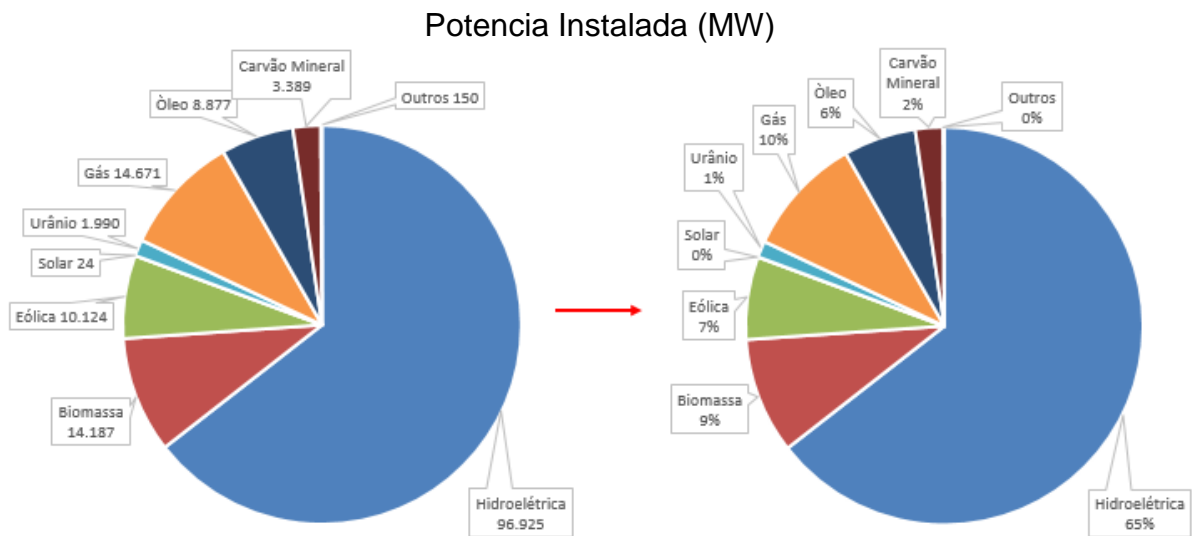


Figura 2 - Matriz energética do Brasil - ano base: 2016.

FONTE: Ministério de Minas e Energia - MME (2016), adaptado por autores (2017)

2.10. Potencial Eólico

Define-se potencial eólico como a quantidade de energia, medida em watts (W), produzida por meio de energia eólica. Tal potencial é medido levando em consideração fatores como: a geografia do local estudado, seu sistema de distribuição de energia, condições climáticas, bem como sua constância de ventos.

Estudos de potencial são de extrema importância para definição dos locais de implementação de fazendas eólicas e locais onde existe carência de recursos elétricos ou alto custo de transmissão.

2.10.1. Potencial Eólico no Brasil

De acordo com o Ministério de Minas e Energia - MME (2017) o Brasil chega ao sétimo lugar no ranking de geração de energia eólica mundial sendo o quinto colocado em expansão dessa energia no ano. O MME também aponta como projeção uma capacidade instalada de 25,8 GW para 2026.

Um estudo feito pelo Centro de Pesquisas da Eletrobrás (CEPEL) foi utilizado para a concepção do “Atlas do Potencial Eólico Brasileiro”, publicado em 2001. O mesmo apresenta uma análise completa de todas as regiões do Brasil, a uma altura de 50 m de altura. A seguir é feita uma estimativa de potencial eólico trimestral do país de forma gráfica, apresentada na Figura 3.

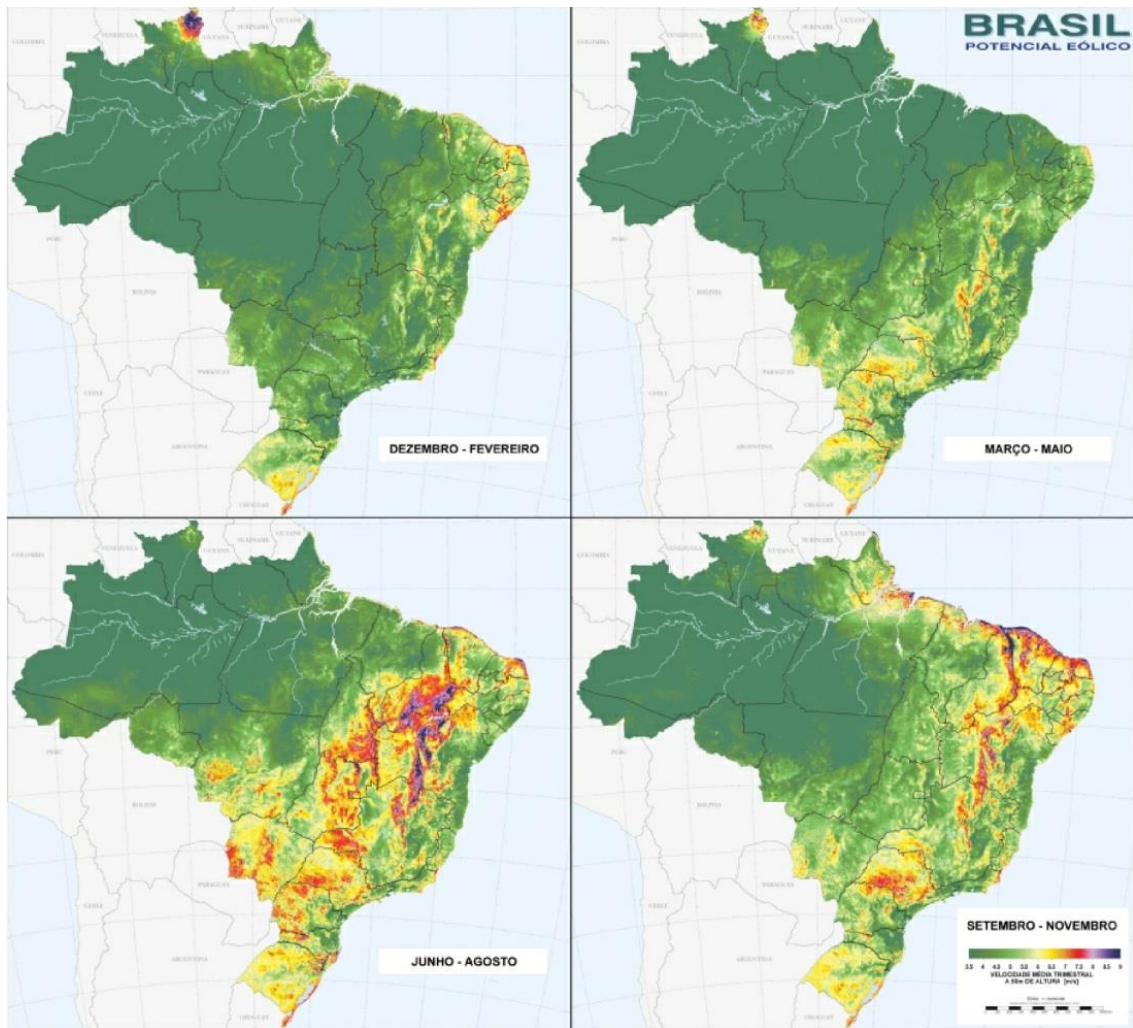


Figura 3 - Potencial Eólico por região do Brasil.

FONTE: CEPEL (2001)

Considerando-se o aproveitamento de apenas uma pequena parcela de seu potencial eólico, e a grande demanda por novos recursos energéticos em detrimento do alto custo de manutenção de usinas termo e hidrelétricas (amplamente utilizadas no Brasil), fica nítida a oportunidade de implementação e estudos acerca de tal sistema para geração de energia.

Para execução do dimensionamento de uma turbina eólica é necessário, inicialmente, realizar a definição do local para o qual se pretende projetar o equipamento, então deve-se realizar o levantamento das informações necessárias para o desenvolvimento, como, tipo de vento predominante, velocidade média, quantidade e frequência do vento.

Para estudos de sistemas de pequeno porte, os dados meteorológicos do sítio eólico são obtidos a partir do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, disponível no site do CRESEB. No caso de sistemas de médio e grande porte, é feito um estudo minucioso através de amostras de dados coletados no respectivo local.

Como exemplo, foi utilizado o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro para estudo de uma área com um bom potencial eólico. Foi escolhida a área litorânea de Arraial do Cabo, na Região dos Lagos no estado do Rio de Janeiro (Latitude: 22°57'58" Sul; Longitude 42°1'44" Oeste), conforme ilustrado na Figura 4.

Dados de vento						
Latitude : 22,966111° S						
Longitude : 42,028889° O						
Atlas do Potencial Eólico Brasileiro		Dados de vento a 50 m de Altura				
Grandeza	Unidade	Dez - Fev	Mar - Mai	Jun - Ago	Set - Nov	Anual
Velocidade média do vento	m/s	7,01	6,13	6,84	6,82	6,7
Fator c		7,91	6,92	7,72	7,7	7,56
Fator K		2,06	2,24	2,39	2,26	2,23
Densidade de Pontência	W/m ²	391	243	320	332	322

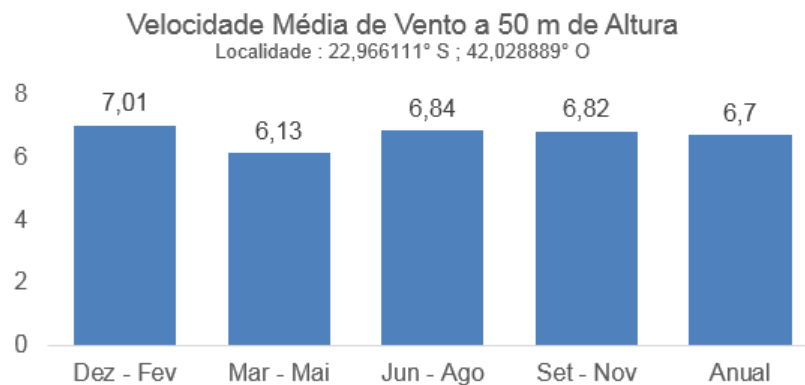


Figura 4 - Potencial eólico Arraial do Cabo.

FONTE: CRESEB – CEPEL (2001), adaptada por autores (2017)

O CRESESB (CEPEL) possui um banco de dados com um mapeamento do potencial energético eólico do Brasil a uma altura de 50 m do nível do mar, porém turbinas de pequeno porte normalmente são fixas em alturas mais baixas, fazendo-se necessário realizar a correção da velocidade do vento para a altura de fixação da turbina. Tal correção pode ser aplicada utilizando-se a seguinte Equação:

$$V(h) = V1 \times \left(\frac{h}{h1}\right)^\alpha \left[\frac{m}{s}\right] \quad (0)$$

Sendo:

V1 - Velocidade do vento a altura h1 (m/s);

h1 - Altura de mapeamento da velocidade do vento (m);

V - Velocidade do vento corrigida para altura (m/s);

h - Altura de instalação (m);

α - Valor tabelado de acordo com o coeficiente de rugosidade do local (empírico), entre 0,1 e 0,4.

Além da quantidade de vento, deve-se também ser identificada a variabilidade do vento, modelado pela curva de Weibull e Rayleigh. Este modelo demonstra qual a constância dos ventos em um determinado local. Tal curva é utilizada para execução dos cálculos de viabilidade técnico-econômica da implantação de um sistema. Nas Figuras 5 e 6 são mostrados exemplos da distribuição do fator Weibull no território brasileiro e a curva modelada de Weibull, respectivamente.

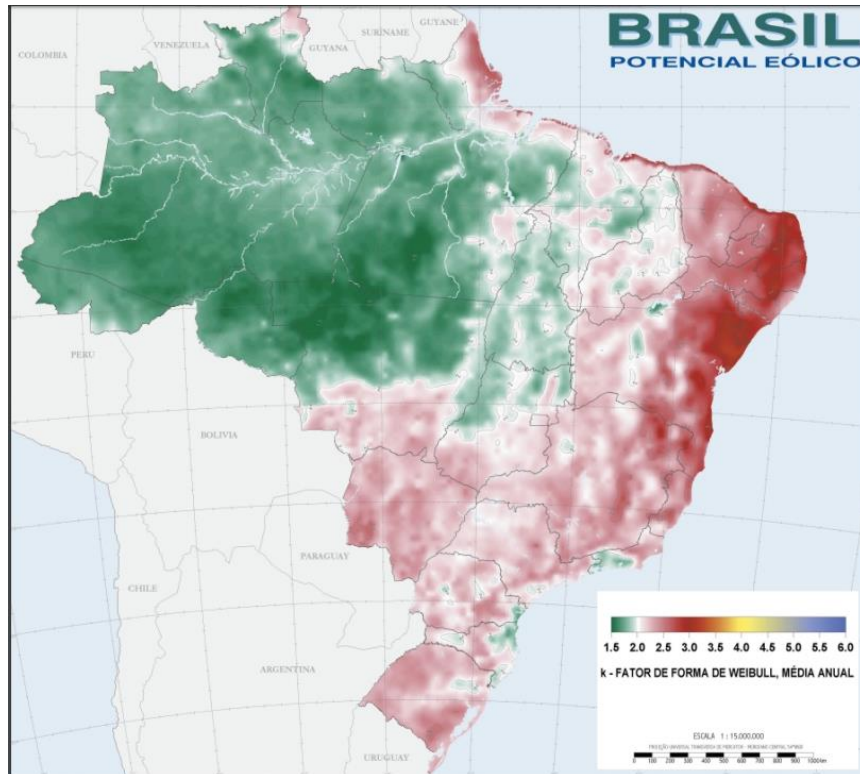


Figura 5 - Fator de forma Weibull Média Anual.

FONTE: CRECESB - CEPEL (2001)

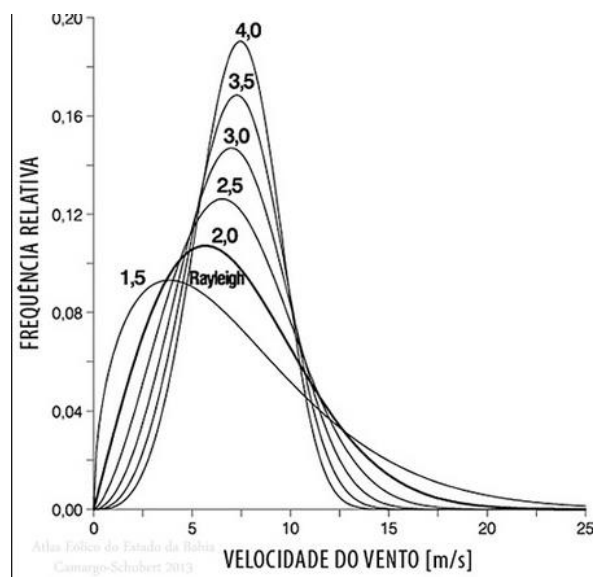


Figura 6 - Curva de Weibull.

FONTE: CRECESB - CEPEL (2001)

3. AEROGERADOR

Segundo o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB), aerogeradores ou turbinas eólicas são máquinas capazes de transformar a energia cinética dos ventos em energia elétrica. Pode-se classificar os sistemas que compõem uma turbina, basicamente, em dois grandes grupos:

- Captação e transmissão de energia

Este sistema é responsável por realizar a conversão da energia cinética dos ventos em torque, e entregá-la a um sistema de conversão de energia.

Tal conversão ocorre através de uma composição de hélices, ou pás, que são fixadas a um rotor, constituindo uma turbina. As pás são atingidas por rajadas de ventos que transportam uma massa de ar a uma determinada velocidade. No momento em que a massa passa pelas pás e, sequencialmente, perde velocidade, a energia do vento é captada e transformada em torque devido à configuração aerodinâmica das pás.

A potência mecânica originada a partir da energia cinética é recebida por um sistema de transmissão e entregue ao sistema de transformação de energia. A transmissão pode ser por acoplamento direto através de um eixo simples, para turbinas de pequeno porte, ou por meio de uma caixa de engrenagens com fim de realizar transformações na relação velocidade x torque, para turbinas de médio e grande porte.

- Transformação de energia

Comumente conhecido como gerador, é o equipamento responsável por realizar a transformação de energia mecânica em energia elétrica, este recebe o torque mecânico vindo do sistema de transmissão.

3.1. Classificação dos Aerogeradores

De acordo com o Centro de Energia Eólica (CE-EÓLICA), em parceria com a ELETROBRÁS, existem vários tipos de turbinas eólicas que podem ser classificadas de diversas formas. Toma-se como principal a orientação do eixo do rotor em relação ao solo, que podem ser axiais de eixo vertical (TEEV) ou axiais de eixo horizontal (TEEH).

Normalmente, turbinas de potências menores que 50 kW são utilizadas próximas ao consumidor, como sustentação de circuitos individuais, alimentação de casas, antenas de telecomunicações e bombas de água. Turbinas de potências maiores normalmente são localizadas em parques eólicos e são conectados ao Sistema Interligado Nacional (SIN).

3.1.1. Turbinas Eólicas de Eixo Vertical

Existem dois principais tipos de TEEV's: modelo Savonius e Darrieus, apresentados, respectivamente, pelas Figuras 9 (a) e (b).



(a)



(b)

Figura 7 (a) e (b) - Turbinas eólicas de eixo vertical.

3.1.2. Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal

O aerogerador de eixo horizontal, como afirma o Portal das Energias Renováveis, é o modelo de turbina mais comum em utilização. São movidos por forças chamadas de forças de sustentação (*lift*) e forças de arrasto (*drag*). Estas máquinas são empregadas na maior parte dos parques eólicos. O modelo de três pás é o mais utilizado, mas é possível encontrar-se modelos de duas pás e uma pá, utilizados de maneira menos comum devido à menor estabilidade e à ocorrência de ruídos.

As TEEH's ainda são divididas em duas categorias. São elas: *Upwind*, modelo no qual o vento atinge diretamente a parte frontal do rotor, e *Downwind*, no qual o vento atinge a parte traseira das pás, representadas, respectivamente, nas Figuras 8 (a) e (b).

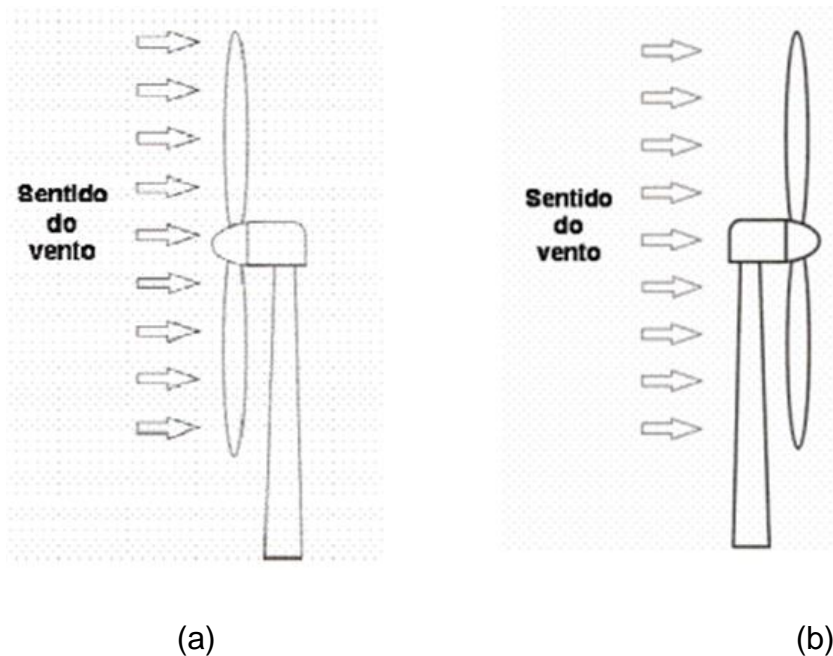


Figura 8 - (a) Aerogerador tipo Upwind; (b) Aerogerador tipo Downwind.

FONTE: Evolução da Energia Eólica (2012)

3.2. Aplicação dos sistemas eólicos

A aplicação de sistemas eólicos pode ser classificada quanto ao seu porte e às consequentes necessidades de tratamento de sinal. Os sistemas podem ser divididos em:

- Pequeno porte: residências, fazendas, aplicações remotas – produção menor ou igual a 10 kW;
- Porte Intermediário: geração distribuída, sistemas híbridos – produção entre 10 e 250 kW;
- Grande porte: fazendas eólicas – produção acima de 250 kW.

Com relação ao tratamento de sinal, os sistemas eólicos podem ser divididos em: sistemas independentes (*off grid*), sistemas híbridos e sistemas integrados à rede (*on grid*).

3.2.1. Sistemas independentes

Sistemas independentes são aqueles que, em geral, aplicam alguma forma de armazenamento de energia elétrica - como em baterias, ou gravitacional - como no armazenamento de água bombeada. Não estão ligados à nenhuma rede de distribuição além do uso local da carga.

Os sistemas que utilizam bateria como meio de armazenamento necessitam de um mediador entre o consumo e a produção, a fim de controlar a carga e a descarga da célula e evitar danos por sobrecarga ou descarga.

3.2.2. Sistemas híbridos

Os sistemas híbridos são aqueles que realizam a combinação de mais de uma fonte de energia para a produção de eletricidade. A utilização de múltiplas fontes aumenta a complexidade do tratamento de sinal, sendo necessária a otimização dos geradores e aplicação de inversores a fim de realizar um controle eficiente da carga. São exemplos de sistemas híbridos: turbinas eólicas em conjunto com geração a diesel, sistemas fotovoltaicos, etc.

3.2.3. Sistemas interligados à rede elétrica

Sistemas interligados entregam toda carga produzida através de múltiplos aerogeradores diretamente à rede elétrica e, por isso, não necessitam de armazenamento. A potência instalada no mundo de sistemas eólicos interligados à rede soma aproximadamente 490 GW (WWEA, 2017).

4. GERADOR

O gerador elétrico, também conhecido como alternador ou motor, é uma máquina elétrica móvel e se apresenta primordialmente como um conversor eletromecânico de energia que utiliza de princípios eletromagnéticos para executar seu trabalho. Máquinas móveis são compostas basicamente por duas partes principais: o estator, parte fixa da máquina, e o rotor, parte móvel da máquina.

Os conversores de energia eletromecânicos podem ser projetados com ou sem núcleo de ferro para melhorar o caminho do fluxo magnético, ocasionando alterações no desempenho da máquina. A determinação da presença ou não do núcleo de ferro no projeto depende da aplicação e das características desejadas.

O equipamento também deve ser classificado como síncrono ou assíncrono, o que significa, respectivamente, que o rotor gira com a mesma velocidade que o campo magnético girante da máquina ou que existe uma pequena diferença entre as duas velocidades. O presente estudo tratará de uma máquina síncrona de polos permanentes.

As máquinas elétricas síncronas com excitação por ímãs permanentes são construtivamente parecidas com as máquinas convencionais, com rotor bobinado. O estator de ambas é idêntico, sendo as diferenças encontradas no rotor. A máquina síncrona convencional dispõe de bobinas por meio das quais são injetadas correntes contínuas de excitação, com propósito de induzir um campo eletromagnético no rotor; a máquina síncrona de polos fixos substitui as bobinas enroladas no rotor por ímãs permanentes que produzem um fluxo magnético natural, não necessitando de uma excitação externa, como na máquina convencional.

O rotor quando movimentado por um torque mecânico frente a uma bobina, induz um determinado fluxo elétrico na mesma, gerando um campo com sentido oposto ao movimento, ou seja, um torque contrário denominado como força contra eletromotriz. Portanto, a força contra eletromotriz é decorrente do fluxo elétrico que

flui pela máquina proveniente da conversão de energia rotacional mecânica em potência elétrica. Esta última, diretamente proporcional à potência consumida.

Este tipo de máquina admite ainda trabalhar com conjuntos integrados, formados por um ou mais rotores e estatores, conforme ilustrado na Figura 9.

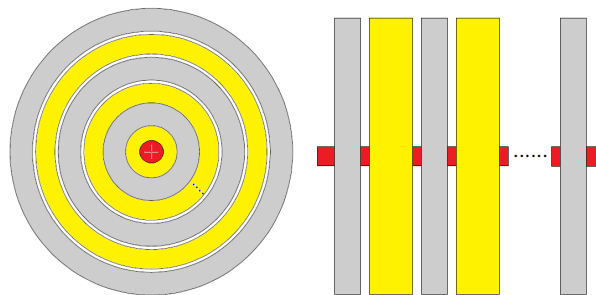


Figura 9 - Configuração de máquinas formadas com mais de um rotor e estator.

FONTE: Automóveis Elétricos (2013)

4.1. Ímãs Permanentes

Com a descoberta de novos materiais e compostos, em específico dos ímãs de alta densidade de fluxo, conhecidos como ímãs de terras raras ou ímãs de Neodímio, composto pelos metais Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB), dispôs-se de maior viabilidade técnica para aplicação em máquinas elétricas. No entanto, devido ao custo ainda bastante elevado, tal descoberta não se caracterizou como uma vantagem em relação as máquinas convencionais.

Em resumo, o interesse nos ímãs provém do fato de que estes podem induzir fluxo magnético em um material ferromagnético sem a necessidade de excitação por meio de fluxo elétrico externo (corrente). Por conseguinte, a ausência de perdas por efeito Joule reduz o consumo de energia e melhora o rendimento dos equipamentos.

É importante ressaltar que as propriedades de substâncias ferromagnéticas variam consideravelmente com a temperatura, possuindo um valor máximo de utilização que um respectivo material pode atingir antes de ser desmagnetizado por completo de forma irreversível. Esta temperatura é chamada de temperatura ou ponto Curie. Tal temperatura dos ímãs de Neodímio ocorre, normalmente, acima de 120° C.

4.2. Tipos de Geradores Síncronos de Ímãs Permanentes

Existem diversas topologias de máquinas síncronas de ímãs permanentes, em que, cada tipo apresenta uma característica diferenciada de desempenho, rendimento e custo. Basicamente, destaca-se dois tipos de topologias: as máquinas de fluxo radial e as de fluxo axial, conforme ilustradas na Figura 10. Retrata-se neste estudo a topologia axial por ser a utilizada no projeto.

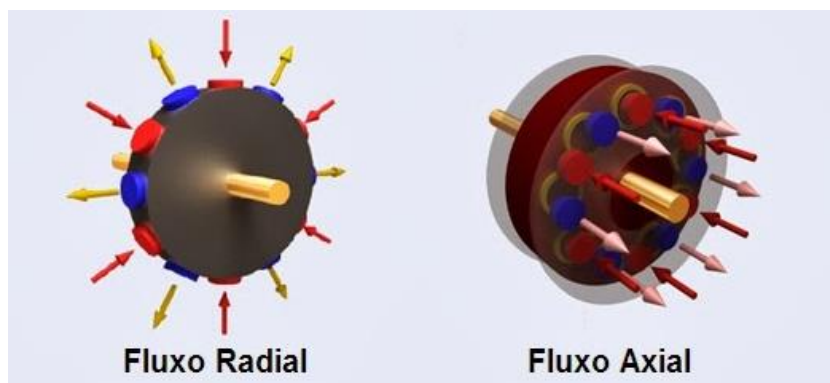


Figura 10 - Máquinas de fluxo axial e radial.

FONTE: Automóveis Elétricos (2013)

4.2.1. Gerador Síncrono de Fluxo Axial

A máquina de fluxo axial também conhecida como máquina “tipo disco”, por justamente possuir um formato semelhante a um disco, foram inventadas por M. Faraday, em 1831 (Maia, 2011, p. 8). A mesma possui pequeno comprimento axial e maior comprimento radial. Nestas máquinas o fluxo magnético percorre paralelo ao sentido de rotação do rotor, sentido axial.

Máquinas tipo disco normalmente não são muito difundidas no meio comercial apesar de, nos últimos anos, seu uso ter aumentado devido a aplicação do equipamento como gerador em turbinas eólicas de pequeno porte e motor em automóveis elétricos. Por exemplo, a empresa brasileira ENERSUD possui uma patente de uma máquina com este princípio de funcionamento.

A modelagem da respectiva orientação de fluxo é mostrada na Figura 11. Este tipo máquina demonstra superioridade no quesito de densidade de potência, pois apresenta um volume efetivo reduzido e alta capacidade de produção de potência elétrica com baixas perdas no núcleo ferromagnético. Um dos maiores desafios para construção desta máquina é a alta força axial exercida pelos rotores, ponto que deve ser levado em consideração durante o projeto para que seja possível posicionar os rotores sem causar acidentes.

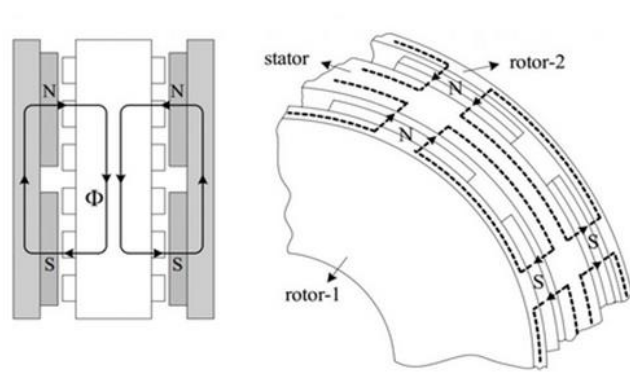


Figura 11 - Desenho representativo de uma máquina a ímãs permanentes.

Conforme a capacidade de geração da máquina aumenta, torna-se necessário aumentar também a superfície de contato entre o rotor e o estator, diminuindo a distância entre o rotor e o eixo de forma proporcional. Desta forma, torna-se complexo o projeto estrutural da máquina. Porém, a solução surge ao realizar uma alteração na topologia das máquinas construindo-as com múltiplos discos de estator e rotor dispostos em série, como se fossem várias máquinas de mesma potência acopladas a um eixo solidário. Conforme pôde-se observar anteriormente na Figura 9.

As máquinas são inicialmente classificadas através de sua forma construtiva e seus rotores, denominadas basicamente por três modelos principais: Máquina de Indução de Fluxo Axial – em que o rotor está posicionado internamente ao estator da máquina (semelhante à estrutura do rotor é um motor tipo gaiola de esquilo); Máquina de ímãs Permanentes de Fluxo Axial Interior – em que o rotor com ímãs permanentes é posicionado internamente ao estator da máquina; Máquina de Fluxo Axial de ímãs Permanentes Montados em Superfície – em que o rotor com ímãs permanentes é posicionado externamente ao estator da máquina. O presente estudo utilizará uma máquina com a última disposição apresentada.

Os estatores podem ser apresentados em três formas: Gerador sem núcleo ferromagnético (*Coreless*) – cujas bobinas são enroladas sem nenhum material ferromagnético, normalmente fixadas através de um compósito, como resina, não apresenta perdas magnéticas com alta eficiência, porém necessita de um alto número de ímãs (Wang et al., 2008); Gerador com núcleo de material composto (*Soft Magnetic Composite* - SMC) – em que as bobinas são envoltas em materiais adequados para construção de núcleos devido a suas baixas perdas magnéticas, oferecendo uma ótima resposta quando submetidos a campos magnéticos que possuem variação, apesar do difícil acesso; Gerador com enrolamento toroidal (*Torus*) – que possuem as bobinas enroladas, em materiais ferromagnéticos convencionais, como o conhecido ferro doce, tipo de aço de alta pureza e baixo teor de carbono.

4.2.2. Gerador Síncrono Modelo Toroidal

De acordo com Maia (2011), a configuração tipo toroidal dispõe os ímãs de maneira circular, alternando a polaridade dos mesmos em dois rotores e, então, ao realizar o fechamento dos rotores externos no eixo, os ímãs podem ser dispostos na posição Norte-Norte ou Norte-Sul. O estator pode conter ou não ranhuras em formato toroidal, semelhante a um anel, por onde devem ser enroladas as bobinas com um determinado número de espiras. As bobinas devem ser dispostas lado a lado, preenchendo por completo sua circunferência. As de mesma fase são conectadas em série e, as três fases, fechadas em estrela, conforme observado na Figura 12.

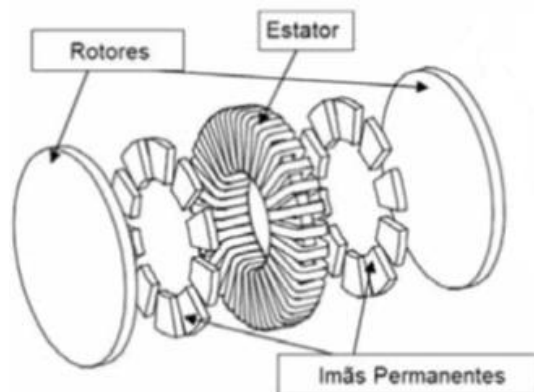


Figura 12 - Desenho esquemático de um gerador de fluxo axial a ímãs permanentes.

FONTE: Maia (2011), adaptada por autores (2017).

Este tipo de máquina possui como pontos positivos: boa ventilação dos enrolamentos, devido à exposição ao ar, além da respectiva ausência de ranhuras. Possui também grande entreferro, aumentando o torque proveniente da interação entre os ímãs e as ranhuras do estator - chamado de *cogging torque*. Além disso, apresenta baixa reação de armadura e perda por magnetização desprezível.

Sendo uma topologia compacta de pequeno comprimento axial e fácil adaptação, a máquina tipo Toroidal apresenta parâmetros favoráveis para aplicação em um sistema integrado com o rotor da turbina, acoplamento direto, tal que o momento de inércia deste tipo de máquina pode ser considerado o mesmo das pás do rotor eólico.

O estator se apresenta de forma simples, sem dificuldades construtivas, apesar da necessidade de ser feito manualmente devido à sua forma geométrica. O mesmo é produzido a partir de lâminas de material ferro magnético e as bobinas feitas a partir de fio de cobre esmaltado enrolado no sentido transversal. Este, por sua vez, é revestido por uma camada epóxi a fim de melhorar a robustez do sistema e facilitar a troca de calor.

Na Figura 13 estão demonstrados os modelos de topologias de estator adotados para as máquinas tipo *Torus*, assim como o tipo de topologia magnética indicada para cada modelo de estator. O presente documento desenvolverá uma máquina do tipo toroidal sem ranhuras (NS) com topologia magnética Norte-Norte (NN) entre rotores.

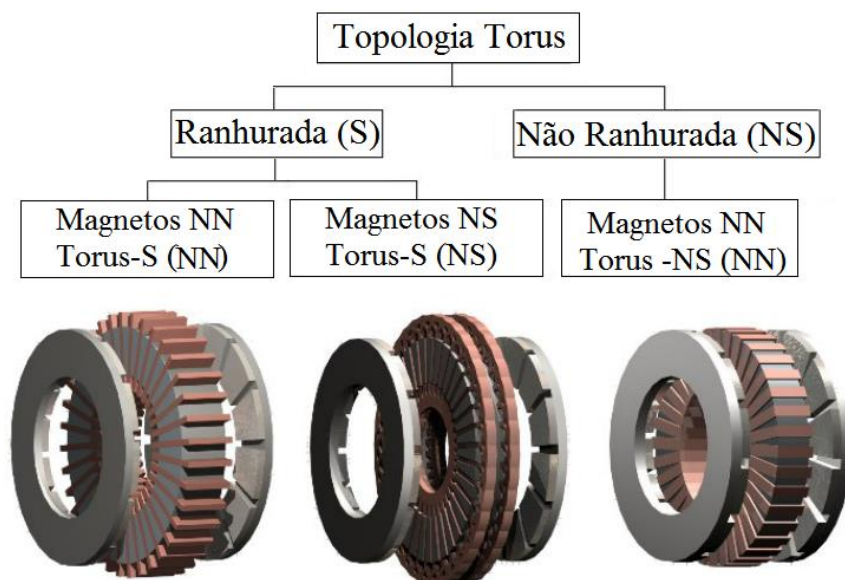


Figura 13 - Tipos de máquinas toroidal.

FONTE: Automóveis Elétricos (2013).

5. PROJETO DE UM AEROGERADOR

5.1. Escolha do modelo de turbina

Foi escolhido o modelo de eixo horizontal devido à possibilidade de melhor rendimento de potência apesar da limitação causada pela necessidade de constância de ventos em sentido predominante.

5.1.1. Dimensionamento da Turbina

A turbina é responsável por extrair a energia cinética do vento através das pás do rotor, transmitindo-a através de um eixo em forma de potência mecânica rotacional para o gerador, que por sua vez a converterá em potência elétrica. Ambos os tipos de energias podem ser medidas em watts.

A seguir, serão apresentados os cálculos necessários para determinar-se a quantidade de potência passível de extração do vento.

A energia cinética do vento pode ser calculada baseada no volume de ar, contido em um cilindro imaginário, que vai de encontro, de forma perpendicular, à turbina do gerador. Considerando uma superfície de área "A" e uma velocidade "V" constante, conforme ilustrado na Figura 14.

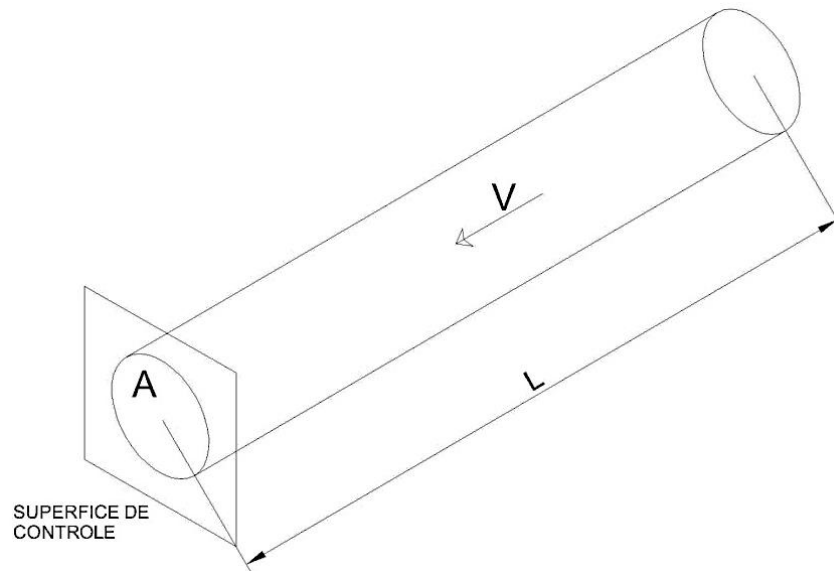


Figura 14 - Cilindro de vento imaginário incidindo em uma superfície de controle.

FONTE: ENERSUD (2016).

O vento se desloca com uma energia cinética, que pode ser calculada considerando que o mesmo é um corpo, com uma determinada massa de ar, em movimento. Para tal utiliza-se o seguinte modelo matemático:

$$E = \frac{1}{2} m \times V^2 \text{ [J]} \quad (1)$$

Sendo:

m – Massa do ar em quilograma (kg);

V – Velocidade do ar em metros por segundo $\left(\frac{m}{s}\right)$.

Pode-se determinar a massa do ar através da determinação da área que o mesmo está contido e seu respectivo peso específico.

$$m = d \times L \times A \text{ [kg]} \quad (2)$$

Onde,

d – Densidade do ar $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$;

L – Comprimento do cilindro imaginário equivalente ao ar contido em uma rajada (m);

A – Área da turbina (m²).

Substituindo (2) em (1):

$$E = \frac{1}{2} \times d \times A \times L \times V^2 \text{ [J]} \quad (3)$$

Sabe-se que Potência, equivalente a trabalho, é igual à energia por tempo:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{1}{2} \times d \times A \times \left(\frac{L}{t}\right) \times V^3 \text{ [W]} \quad (4)$$

Como comprimento por tempo é igual à velocidade:

$$V = \frac{L \text{ [m]}}{t \text{ [s]}} \quad (5)$$

Substituindo (5) em (4):

$$P = \frac{1}{2} \times d \times A \times V^3 \text{ [W]} \quad (6)$$

Pode-se considerar a massa específica do ar igual a 1,225 kg/m³ ao nível do mar. Ajustes numéricos na massa específica só serão necessários para locais muito elevados, acima de 1000 metros.

Através da Equação 6, verifica-se que a potência de um aerogerador varia com o cubo da velocidade do ar. Isso significa que, se a velocidade do vento dobrar, a potência do mesmo será multiplicada por 8 (oito). Porém, da mesma forma, se a velocidade se reduz pela metade o gerador perde muita potência, tornando-se insignificante.

Nota-se ainda que, quanto maior a área de varredura, maior é a capacidade de captação de potência. Ou seja, quanto maiores as pás, mais o gerador produzirá de potência elétrica. Uma baixa velocidade inicial não é considerada ideal pois o gerador teria dificuldade de acelerar. O fluxo de potência em um vento de 2 m/s é de apenas 4,8 W/m².

5.1.2. Coeficientes de Potência

Para que o fenômeno de extração de energia cinética ocorra, a velocidade do vento deve ser reduzida. Porém, tal redução deve se dar de forma que não seja igual a zero, evitando a parada completa da turbina. É necessário, então, que o vento empurre a massa de ar localizada atrás das pás da turbina, criando um fluxo. Para que tal fenômeno ocorra, o vento deve perder parte da sua energia cinética, o que implica em um fator máximo de conversão de energia. Assim, acrescenta-se um fator de conversão de energia C_p à Equação 6, como pode-se observar na Equação 7.

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^3 \times C_p \quad [W] \quad (7)$$

O físico Albert Betz publicou em 1929, um estudo que comprova e demonstra o coeficiente de potência, também conhecido como Lei de Betz. Neste estudo, Betz identificou o C_p máximo de conversão de energia possível a se extrair do vento e, juntamente, demonstrou que a velocidade de saída do vento é igual a um terço (1/3) da velocidade que entra na superfície de controle - para a aplicação estudada, a turbina.

$$C_{p_{max}} = \frac{16}{27} = 0,59$$

O $C_{p_{max}}$, no entanto, é um valor teórico. Na prática, este aproveitamento é estabelecido em cerca de 40% para turbinas modernas de pequeno porte (MENEZES, 2012). Equipamentos que apresentam rendimento de 35% são considerados eficientes pelo INMETRO, recebendo a classificação A.

5.1.3. Coeficientes de Velocidade de Ponta

O coeficiente de velocidade, também conhecido como fator λ ou *Tip Speed Ratio* (TSR), é a razão entre a velocidade linear na extremidade do rotor - ponta da pá - e a velocidade do vento, em metros por segundo. Trata-se de um importante fator, apresentado normalmente na folha de dados dos aerogeradores comerciais. A Figura 15 e a Equação 8 esquematizam essa relação.

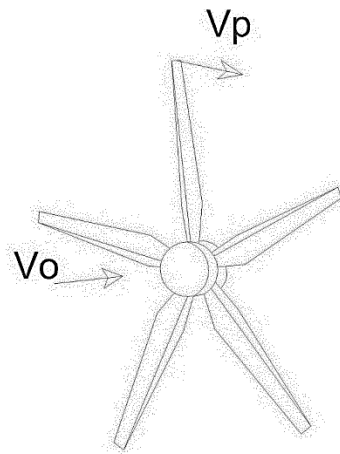


Figura 15 - Velocidade de ponta da pá.

FONTE: Autores (2017)

$$\lambda = \frac{V_p}{V_o} = \frac{R \times \omega_r}{V_o} = \frac{2\pi \times 60 \times f_r \times R}{V_o} \quad (8)$$

Sendo:

V_p – Velocidade linear de ponta da pá $\left(\frac{m}{s}\right)$;

V_o – Velocidade do vento $\left(\frac{m}{s}\right)$;

ω_r – Velocidade angular $\left(\frac{rad}{s}\right)$;

f_r – Frequência do rotor (Hz).

Na prática, é usual adotar-se valores entre 6 e 8 para o λ , pois quando se aumenta o λ para valores acima de 10, com uma velocidade do vento acima de 12 m/s, a ponta da pá pode atingir 300 km/h. Velocidades dessa magnitude implicam em ocorrência de ruídos, diminuição da segurança e rendimento, requerendo atenção às características e configurações do projeto.

5.1.4. Número de pás da turbina

Quanto maior o número de pás, mais torque será produzido. Porém, a velocidade é reduzida, não elevando a potência mecânica, numericamente igual à multiplicação do torque mecânico pela velocidade. Para a produção de potência elétrica são necessários: maior velocidade e menor torque. Dessa forma, elevando o número de pás, ocorre uma redução da velocidade e uma conseqüente perda na quantidade de energia produzida. Costuma-se adotar geradores de pequeno porte com três ou cinco pás. Por motivos de balanceamento é comum a utilização de um número ímpar de pás.

5.1.5. Formato da pá

A relação entre o $C_p \times \lambda$ é muito importante para os cálculos do aerogerador, já que seu ponto ideal de operação é obtido com base nessa relação. Tais parâmetros estão ligados ao ângulo de passo da pá da turbina, conforme demonstrado na Figura 16.

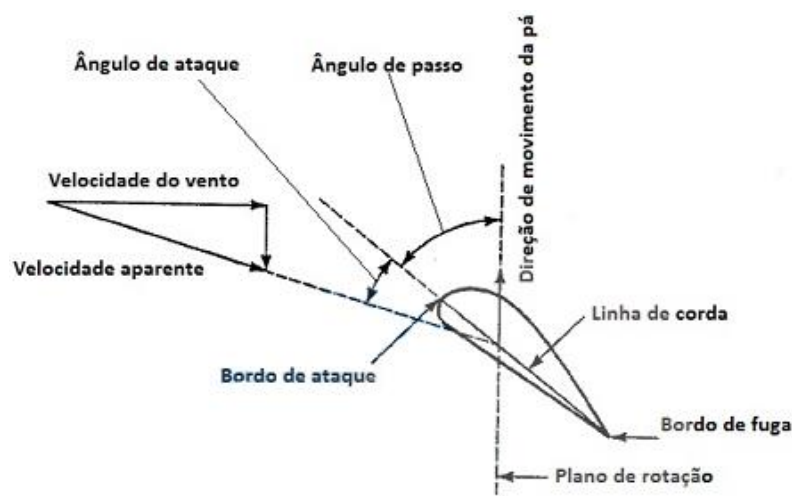


Figura 16 – Ângulo de passo.

Para o aumento do $\lambda_{m\acute{a}x}$ é necessário diminuir as inclinaes das aletas do rotor. Fixando o $\lambda_{m\acute{a}x}$, quanto maior a quantidade de ps, mais suave será o perfil de velocidade, ou seja, menores serão as turbulências. Através de aproximaes numéricas e ensaios, observados nas Figuras 22 e 23, respectivamente,  possível realizar um mapeamento da relação $C_p \times \lambda$, variando o passo das ps.

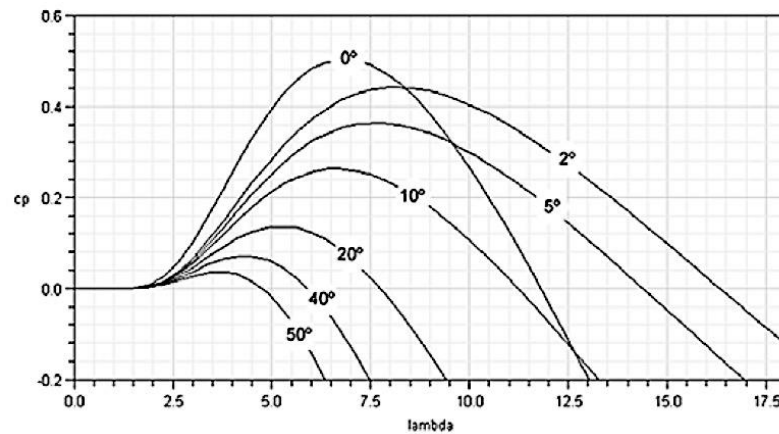


Figura 17 - Característica $C_p \times \lambda$ traçadas em função de aproximaes numéricas.

FONTE: MONTEZANO, 2008

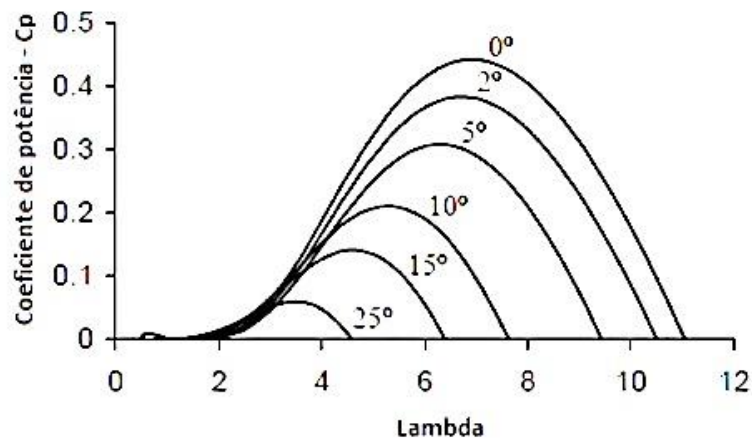


Figura 18 - Variação da Curva de $C_p \times \lambda$ traçada de forma experimental.

FONTE: ENERSUD (2016)

Nos aerogeradores de pequeno porte, que não possuem variação do ângulo de passo e operam com pás fixas, o ângulo da ponta das pás é sempre muito pequeno e maior que zero – cerca de 2° , para facilitar a partida e aceleração da turbina. Neste tipo de turbina, existe também o ângulo de passo referente à parte da pá distante ao rotor em aproximadamente 25% de seu comprimento. Tal ângulo normalmente é especificado acima de zero, em torno de 16° , sendo este o responsável por realizar a partida automática da turbina.

Na prática, um gerador com pequeno λ , muito travado, ou com grande λ , muito solto, estará fora do seu ponto de máximo C_p . Isso explica a necessidade de configuração da curva tensão x potência de um inversor *on grid*.

5.1.6. Turbina real x turbina ideal

A seguir, é feita uma comparação entre uma turbina ideal x real. Nota-se, a partir da Figura 19, que, em uma turbina real, o C_p varia com a velocidade do vento. Já em um aerogerador ideal, o C_p é constante.

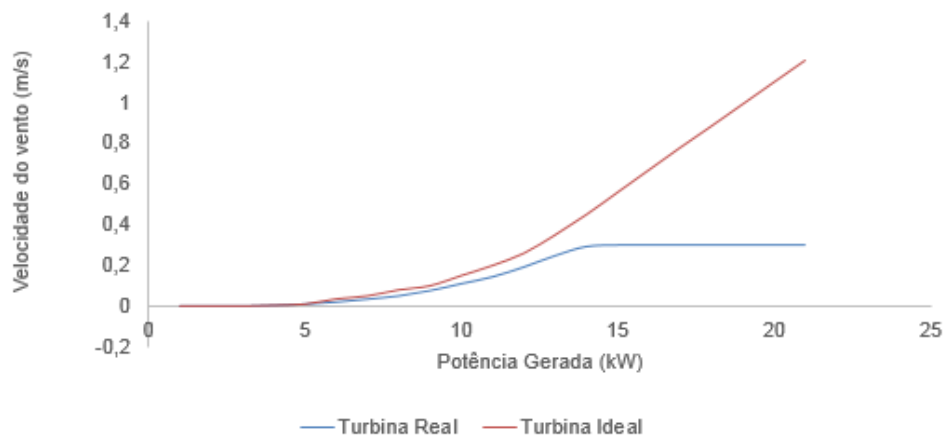


Figura 19 - Potência da turbina eólica real X ideal.

FONTE: Autores (2017)

A variação do C_p em função da velocidade do vento é natural. O mesmo pode, porém, ser atenuado com o controle de passo das pás, mas não eliminado. O presente trabalho tratará o problema com a fixação das pás.

5.2. Dimensionamento do alternador

Para o projeto, foi adotado o tipo de gerador toroidal (*Torus*), sem ranhuras, com ímãs permanentes externos à máquina. A adoção desta topologia foi baseada na fácil construção e inexistência de ranhuras, que impede a geração fluxos variados e perdas magnéticas desprezíveis no rotor e ímã.

A metodologia dos cálculos baseia-se em exemplos simplificados. Tais exemplos foram considerados satisfatórios para se estabelecer uma avaliação inicial das principais dimensões e características do gerador. Eventuais alterações podem ser aplicadas para obtenções de resultados diferentes aos determinados para a presente proposta, cabíveis a outras que se apresentarem.

Pode-se dizer que o dimensionamento de um alternador consiste basicamente em determinar seus dados de bobinagem, dimensões, polaridade e tipos de materiais, com o intuito de que a mesma funcione segundo especificações em valores nominais de operação. As especificações a serem definidas são: diâmetro externo do rotor (D_{re}), potência ativa de saída do gerador (P_{nom}), velocidade de giro do rotor (ω_{mec}), tensão nominal de saída (V_{nom}), número de pares de polos (p) e número de fases do gerador (m).

5.2.1. Carregamento Elétrico

O primeiro parâmetro a ser definido deve ser o carregamento elétrico esperado para o gerador, de sigla A_m . Existem tabelas com intervalos de valores que são expressos dependendo da aplicação. O carregamento elétrico pode ser definido como a densidade de corrente linear ao redor da circunferência do entreferro e é quantificado através da Equação 9.

$$A_m = \frac{2\sqrt{2} \times m \times N_f \times I_{nom.}}{\pi \times \left(\frac{D_{re} + D_{rai}}{2} \right)} \left[\frac{kA}{m} \right] \quad (9)$$

Sendo:

m – Número de fases;

N_f – Número de espiras por fase;

I_{nom} - Corrente nominal do gerador (A);

D_{re} – Diâmetro externo do rotor (m);

D_{rai} – Diâmetro externo do rotor (m).

Através das especificações realizadas, poderemos calcular o torque nominal (T_{nom}), a constante de força eletromotriz (K_E) e a corrente nominal do gerador (I_{nom}), através das Equações 10, 11 e 12, respectivamente.

$$T_{nom} = \frac{P_{nom}}{\omega_{mec}} [N.m] \quad (10)$$

$$K_E = \frac{V_{nom}}{\omega_{mec}} \left[\frac{V \cdot s}{rad} \right] \quad (11)$$

$$I_{nom} = \frac{P_{nom}}{\sqrt{3} \times V_{nom} \times \cos(\phi)} [A] \quad (12)$$

Para prosseguir com a demonstração dos cálculos, se faz necessária a escolha do padrão de resolução. O método adotado foi o da escolha do valor de tensão tangencial, determinado através da Tabela 1. A tensão tangencial (σ_{Ftan}) é responsável pelo torque no entreferro.

Tabela 1 - Tensão tangencial

Parâmetros	Sigla	Valor
Tensão Mínima		17 kPa
Tensão Média	σ_{Ftan}	36 kPa
Tensão Máxima		59,5 kPa

FONTE: Pyrhönen, Jokinen e Hrabovcová (2014)

O volume do rotor de um gerador (V_r) suficiente para produzir certa quantidade de torque nominal eletromagnético pode ser determinado através da Equação 13.

$$V_r = \frac{T_{nom}}{2\sigma_{Ftan}} [mm^3] \quad (13)$$

A relação existente entre $\frac{T_{nom}}{V_r}$ é conhecida como TRV, que significa torque por rotor volume. Retornando à Equação 13, obtém-se a Equação 14.

$$TRV = 2\sigma_{Ftan} [kPa] \quad (14)$$

O volume do rotor também pode ser calculado através de seu diâmetro externo e do comprimento axial do gerador (I_{stk}), através das Equações 15 e 16.

$$V_r = \pi \frac{D_{re}^2}{4} I_{stk} [mm^3] \quad (15)$$

$$I_{stk} = \frac{4V_r}{\pi D_{re}^2} [mm] \quad (16)$$

5.2.2. Fluxo Magnético Fornecido pelo Imã

O fluxo magnético (ϕ_1) em uma máquina síncrona de polos permanentes pode ser calculado a partir da Equação 17.

$$\phi_1 = B_\delta \theta_r \times \frac{D_{re}}{2} \times I_{stk} [Wb] \quad (17)$$

Sendo:

B_δ – Fator de indução magnética (T);

θ_r – Extensão de cada imã (rad).

Os fatores de indução magnética (B_δ) em alguns locais da máquina possuem comportamento empírico e são considerados parâmetros importantes para o projeto de um gerador. As faixas de valores estão determinadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Níveis de indução magnéticas permissíveis para máquinas

Indução Magnética					
Parâmetro	Sigla	Máquinas assíncronas	Máquinas síncronas de polos salientes	Máquinas síncronas de polos não salientes	Máquinas DC
Entreferro	B_δ	0,7 - 0,9	0,85 - 1,05	0,8 - 1,05	0,6 - 1,1
Coroa do estator	-	1,4 - 2,0	1,0 - 1,6	1,1 - 1,6	1,1 - 1,5

FONTE: Pyrhönen, Jokinen e Hrabovcová (2014)

Para determinar a extensão máxima que cada imã pode ter, deve-se, primeiramente, equacionar o passo polar (t_g) através da Equação 18. A mesma representa a divisão dos 360 graus da circunferência do rotor pelo número de polos.

$$t_g = \frac{360}{2p} \text{ [}^\circ\text{]} \quad (18)$$

Com o objetivo de reduzir o fluxo de dispersão magnética entre polos e o torque de relutância (*cogging torque*), cada imã acompanha até dois terços (2/3) do passo polar. Com isso, a extensão máxima de cada imã em radianos é dada por:

$$\theta_r = \frac{\pi}{180} \times \frac{2}{3} t_g \text{ [rad]} \quad (19)$$

5.2.3. Tensão Interna do Gerador

Calcula-se a tensão interna a partir da Equação 20, demonstrada a seguir.

$$V_{\text{máx}} = 2\pi f \times N_f \times \phi_1 \text{ [V]} \quad (20)$$

Sendo:

f – Frequência de giro do rotor (Hz);

N_f – Número de espiras por fase;

ϕ_1 – Fluxo magnético (Wb).

Como se trata de uma tensão senoidal, o valor eficaz da tensão (V_{rms}) será a divisão de $V_{\text{máx}}$ por $\sqrt{2}$.

$$V_{\text{rms}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times V_{\text{máx}} \text{ [V]} \quad (21)$$

Calculando o valor de tensão entre fases, multiplica-se o valor eficaz (V_{rms}) por $\sqrt{3}$.

$$V_{3\phi\text{rms}} = \sqrt{3} \times V_{\text{rms}} \text{ [V]} \quad (22)$$

5.2.4. Número de Condutores e Bobinas

O total numérico de condutores (Z) é relacionado com a tensão induzida (K_E), o fluxo magnético (ϕ_1) e o número de polos através da Equação 23.

$$Z = \frac{3}{2} K_e \frac{\pi \frac{2}{3}}{0,7 \phi_1 p} \quad (23)$$

Dividindo o total de condutores pelo número de fases (m) e dividindo o total de condutores por duas vezes o número de fases, determinamos quantos condutores por fase (N_{cf}) e quantas espiras por fase (N_f) vão existir no gerador respectivamente. Essas constantes são matematicamente representadas, respectivamente, nas Equações 24 e 25.

$$N_{cf} = \frac{Z}{m} \quad (24)$$

$$N_f = \frac{Z}{2 \times m} \quad (25)$$

Posteriormente, pode-se determinar o número total de bobinas (N_{bob}) e o número de espiras por bobina (N_{eb}) a partir das Equações 26 e 27, respectivamente.

$$N_{bob} = 2 \times p \times m \quad (26)$$

$$N_{eb} = \frac{Z}{2 \times N_{bob}} \quad (27)$$

5.2.5. Dimensões dos Fios Condutores

São essenciais para o projeto de um gerador as dimensões da seção do condutor (S_c) e o diâmetro do condutor (D_c). Pode-se determinar valores através das Equações 28 e 29.

$$S_c = \frac{I_{nom}}{J_{fio}} [mm^2] \quad (28)$$

$$D_c = \sqrt{\frac{4}{\pi} S_c} [mm] \quad (29)$$

5.2.6. Escolha e Dimensões dos Imãs

Através de pesquisas em bibliografias acadêmicas e publicações de projetos, foi constatado que o imã tipo NdFeB é o mais indicado para uso em máquinas síncronas de polos permanentes devido à sua alta remanência (Br) e alto campo coercitivo (Hc) nas temperaturas nominais de trabalho.

O comprimento do entreferro (δ) é uma importante característica para o dimensionamento de um gerador síncrono pois, através dele, é determinada a altura dos imãs. Apesar de sua importância, não existe uma forma analítica para esse cálculo, porém, ao longo dos anos, algumas equações empíricas foram definidas para esse fim. A Equação 30 atende para nosso método de cálculo.

$$\delta = 1,6 \frac{0,18 + 0,006 \times P_{nom}^{0,4}}{1000} [mm] \quad (30)$$

Altura do imã pode ser calculada como dez vezes o valor do entreferro, conforme mostra a Equação 31. A escolha da constante de multiplicação “10” pode ser justificada pela obtenção de boa rigidez mecânica que permita comportar o movimento do rotor e apresentar um entreferro de tamanho suficiente para permitir a passagem do fluxo magnético com menor dispersão.

$$h_m = 10\delta \text{ [mm]} \quad (31)$$

O cálculo da relação comprimento axial/diâmetro do rotor para máquinas síncronas é dado por:

$$X = \frac{\pi}{4p} \times \sqrt{p} \quad (32)$$

Sendo:

p - número de par de polos.

O diâmetro do rotor abaixo dos imãs pode ser calculado conforme Equação 33.

$$D_{rai} = D_{re} - 2C_m \text{ [mm]} \quad (33)$$

Sendo:

C_m - comprimento dos imãs [mm].

O cálculo do passo polar abaixo dos imãs (T_{pim}) é dado em função do diâmetro do rotor abaixo dos imãs, como mostra a Equação 34.

$$T_{pim} = \frac{\pi \times D_{rai}}{2p} \quad [mm] \quad (34)$$

A largura inferior dos ímãs (b_{mi}) é determinada em função do comprimento axial/diâmetro do rotor multiplicado pelo passo polar abaixo dos ímãs. A Equação 35 mostra essa relação.

$$b_{mi} = X \times T_{pim} \quad [mm] \quad (35)$$

Determinação da largura inferior dos ímãs em graus mecânicos.

$$\phi_{mi} = \frac{b_{mi}}{\frac{D_{re}}{2} - C_m} \times \left(\frac{180}{\pi}\right) \quad [^\circ] \quad (36)$$

Com uma simples relação de subtração entre passo polar (t_g) e a largura dos ímãs (ϕ_{mi}) pode-se determinar o ângulo entre cada ímã (ϕ_{ei}).

$$\phi_{ei} = t_g - \phi_{mi} \quad [^\circ] \quad (37)$$

A Figura 20 exemplifica a posição das principais dimensões mencionadas anteriormente.

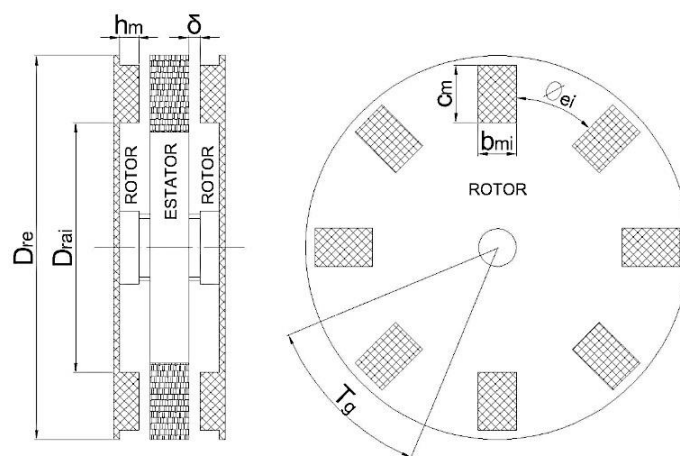


Figura 20 - Dimensões do projeto magnético.

6. ESTUDO DE CASO

6.1. Aplicação matemática

O presente estudo possui como foco o projeto, construção e análise de um gerador eólico de pequeno porte. Nesta seção apresenta-se os dimensionamentos dos componentes do equipamento proposto. A turbina será do tipo eixo horizontal e o gerador síncrono de fluxo axial com polos permanentes. A seguir, serão apresentados os parâmetros-base do projeto, usados nos dimensionamentos que servirão de base para o desenvolvimento do modelo construtivo.

Os valores atribuídos aos parâmetros foram levantados a partir de estudos já existentes e da observação dos padrões adotados nos geradores eólicos de pequeno porte hoje comercializados. A Tabela 3 demonstrará os valores para as turbinas e, a Tabela 4, para o alternador.

Tabela 3 - Especificações para Dimensionamento da Turbina

Parâmetro	Sigla	Variável
Coeficiente de potência	C_p	0,35
Comprimento da pá	-	0,8 m
Velocidade nominal de trabalho	V_o	6,5 m/s
Velocidade de projeto	V_o	10,5 m/s
Coeficiente de velocidade de ponta	λ	8
Número de pás	-	3

FONTE: Autores (2017)

Tabela 4 - Especificações para Dimensionamento do Alternador

Parâmetro	Sigla	Variável
Potência Nominal	P_{nom}	0,5 kW
Número Polos	P	6
Número de Fases	M	3
Tensão eficaz fase-neutro	V_{nom}	24 V
Diâmetro externo máximo do estator	D_{er}	190 mm

FONTE: Autores (2017)

6.2. Cálculo da Turbina

A seguir, serão definidos os parâmetros para o dimensionamento matemático da turbina. Para que o estudo seja dinâmico, os parâmetros escolhidos serão precedidos por explicações obtidas através de uma consulta técnica realizada com o fabricante nacional de turbinas ENERSUD.

Para início da aplicação matemática, devemos calcular a potência da turbina de duas formas. A primeira, utilizando a velocidade nominal de trabalho e, a segunda, utilizando velocidade de projeto. Inserindo os valores-base da Tabela 3 na Equação 7, torna-se possível determinar a potência gerada para os dois casos, sendo de aproximadamente 120 W e 500 W, conforme demonstrado a seguir.

$$P = \frac{1}{2} \times 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,8^2 \text{m} \times \pi \times 6,5^3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,35 = 118,4 \text{ W} \quad (7)$$

$$P = \frac{1}{2} \times 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,8^2 \text{m} \times \pi \times 10,5^3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,35 = 500 \text{ W} \quad (7)$$

Utilizando novamente valores definidos pela Tabela 3, pode-se aplicar a Equação 8 para calcular a velocidade de rotação da turbina, conforme demonstrado a seguir.

$$8 = \frac{0,8 \text{ m} \times \omega r}{10,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \quad (8)$$

Isolando ωr :

$$\omega r = \frac{8 \times 10,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,8 \text{ m}} = 105 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 1002 \text{ rpm}$$

Em seguida, são determinados os parâmetros construtivos da pá. Tendo em vista um bom rendimento, foram definidos:

- Ângulo da ponta da pá de aproximadamente 2°;
- Ângulo de ataque do *self-start* de aproximadamente 16°, cerca de 25% do comprimento da pá.

Dessa forma, o perfil aerodinâmico pode ser obtido. Esse procedimento foi realizado através da ferramenta de simulação Warlock. Tal ferramenta, além de nos fornecer dados aerodinâmicos, também pode ser usada como validação para os resultados matemáticos encontrados anteriormente. Elas fornecem valores como: potência, revoluções por minuto (RPM) e λ (TSR). As Figuras 21, 22 e 23 demonstram as simulações para os valores estabelecidos neste projeto.

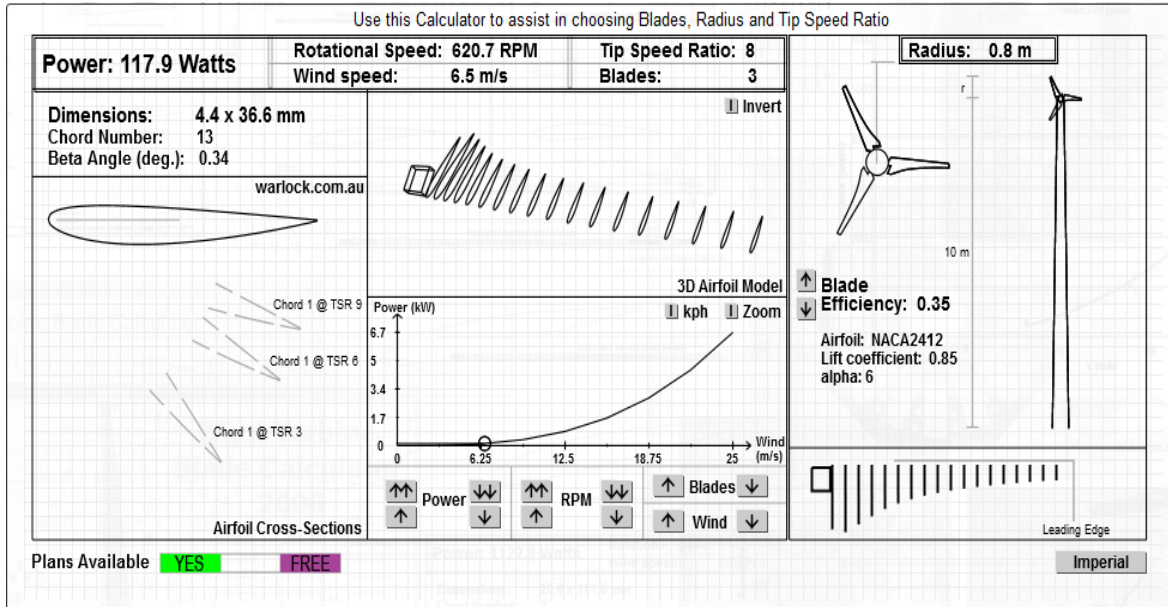


Figura 21 - Simulação de parâmetros da pá para velocidade de operação.

FONTE: Warlock (2013)

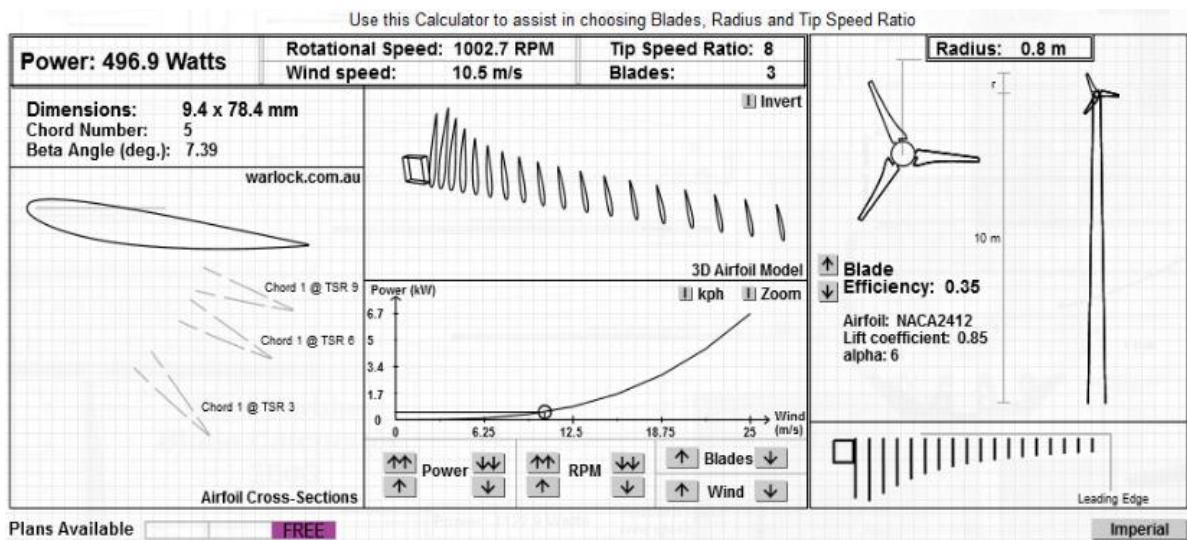


Figura 22 - Simulação de parâmetros da pá para velocidade de projeto.

FONTE: Warlock (2013)

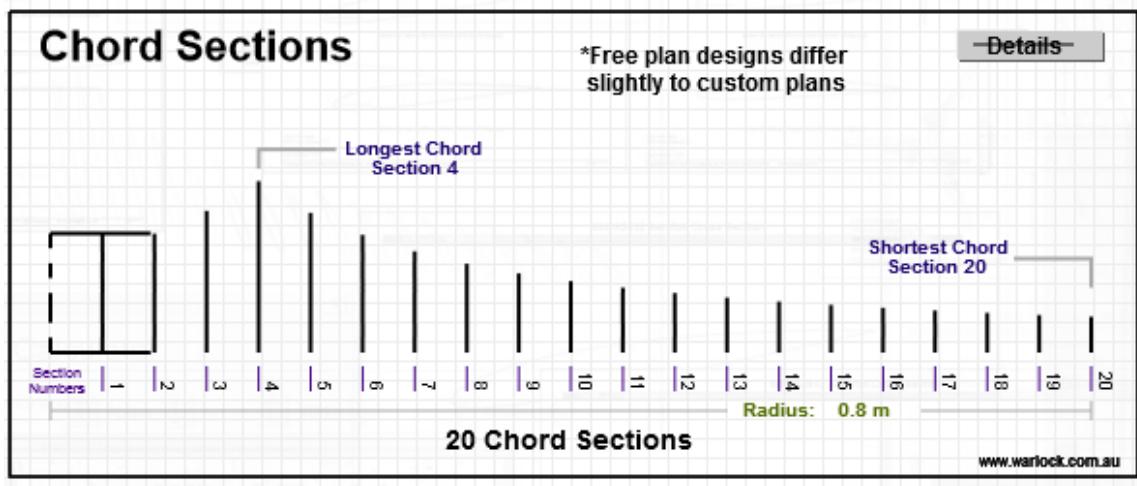


Figura 23 - Perfil aerodinâmico da pá.

FONTE: Warlock (2013).

6.3. Cálculo do gerador

Como determinado anteriormente, o gerador de fluxo axial com polos permanentes será do tipo toroidal sem ranhuras e com rotor externo. Tomando como base os valores de partida já mencionados na Tabela 3, podem-se iniciar os procedimentos de cálculo para dimensionamento do gerador e determinar os valores de torque nominal, constante força eletromotriz e corrente nominal, através, respectivamente, das Equações 10, 11 e 12.

$$T_{\text{nom}} = \frac{500\text{W}}{105 \frac{\text{rad}}{\text{s}}} = 4,76 \text{ N.m} \quad (10)$$

$$K_E = \frac{24\text{V}}{105 \frac{\text{rad}}{\text{s}}} = 0,23 \frac{\text{V.s}}{\text{rad}} \quad (11)$$

$$I_{\text{nom}} = \frac{500\text{W}}{\sqrt{3} \times 24\text{V} \times 1} = 12,03 \text{ A} \quad (12)$$

Escolhendo o valor de 17 KPa para tensão tangencial, conforme dados da Tabela 3, pode-se calcular o volume do rotor e a relação torque/volume do estator, conforme as Equações 13 e 14, respectivamente.

$$V_r = \frac{4,76\text{N.m}}{2 \times 17 \cdot 10^3\text{Pa}} = 1,4 \cdot 10^5 \text{mm}^3 \quad (13)$$

$$\text{TRV} = 2 \times 17 \text{ kPa} = 34 \text{ kPa} \quad (14)$$

Com o volume obtido anteriormente pode-se determinar a largura do estator, através da Equação 16.

$$I_{\text{stk}} = \frac{4 \times 1,4 \cdot 10^5 \text{mm}^3}{\pi \times 190^2 \text{mm}} = 4,94 \text{ mm} \quad (16)$$

Por motivos de recursos construtivos disponíveis, foi adotada a medida de 6 mm para espessura do estator.

Calcula-se agora, pela Equação 18, o passo polar e, em seguida, pela Equação 19, a extensão de cada imã.

$$t_g = \frac{360}{2 \times 3} = 60^\circ \quad (18)$$

$$\theta_r = \frac{\pi}{180} \times \frac{2}{3} \times 60^\circ = 0,70 \text{ rad} \quad (19)$$

Com todas as variáveis calculadas até o momento e, adotando a indução magnética no entreferro (B_δ) como 1 T, conforme a Tabela 4, pode-se determinar o valor do fluxo magnético do gerador por polo, conforme valores inseridos na Equação 17.

$$\phi_1 = 1 \text{ T} \times 0,7 \times \frac{190 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{2 \times 3} \times 6 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 0,13 \text{ m Wb} \quad (17)$$

Após o cálculo do fluxo magnético, pode-se determinar o valor da tensão máxima ($V_{\text{máx}}$), tensão eficaz (V_{rms}), tensão trifásica ($V_{3\phi\text{rms}}$) e a quantidade de condutores presente no gerador (Z).

$$V_{\text{máx}} = 2\pi \times 50 \text{ Hz} \times 432 \frac{\text{espiras}}{\text{fase}} \times 0,13 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} = 17,64 \text{ V} \quad (20)$$

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times 17,64 = 12,48 \text{ V} \quad (21)$$

$$V_{3\phi rms} = \sqrt{3} \times 12,48 \text{ V} = 21,62 \text{ V} \quad (22)$$

$$Z = \frac{3}{2} \times 0,23 \frac{Vs}{rad} \times \frac{\pi \frac{2}{3}}{0,7 \times 0,133 \cdot 10^{-3} \text{Wb} \times 3} = 2587 \text{ condutores} \quad (23)$$

Através do valor determinado pela Equação 23, pode-se calcular a quantidade de condutores por fase e a quantidade de espiras por fase, através das Equações 24 e 25, respectivamente.

$$N_{cf} = \frac{2587}{3} \cong 864 \frac{\text{condutores}}{\text{fase}} \quad (24)$$

$$N_f = \frac{2587}{2 \times 3} = 432 \frac{\text{espiras}}{\text{fase}} \quad (25)$$

A quantidade de bobinas presente no gerador e a quantidade de espiras por bobinas podem então serem determinadas, através das Equações 26 e 27.

$$N_{\text{bob}} = 2 \times 3 \times 3 = 18 \text{ bobinas} \quad (26)$$

$$N_{\text{eb}} = \frac{2587}{2 \times 18} = 72 \frac{\text{espiras}}{\text{bobina}} \quad (27)$$

Através das variáveis determinadas até o momento, pode-se estabelecer o valor numérico do carregamento elétrico, pela Equação 9.

$$Am = \frac{2\sqrt{2} \times 3 \times 432 \times 12,03 \text{ A}}{\pi \times \left(\frac{190 \text{ mm} + 130 \text{ mm}}{2} \right)} = 87,73 \frac{\text{kA}}{\text{m}} \quad (9)$$

Para o cálculo da sessão dos condutores deste gerador, adotaremos o valor de 6 A/mm² de densidade de corrente (J_{fio}). Com a determinação deste valor pode-se aplicar as Equações 28 e 29 para obtenção da sessão transversal do fio e seu diâmetro, respectivamente:

$$S_c = \frac{12,03 \text{ A}}{6 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}} = 2 \text{ mm}^2 \quad (28)$$

$$D_c = \sqrt{\frac{4}{\pi} 2 \text{ mm}^2} = 1,60 \text{ mm} \quad (29)$$

A Tabela 5 demonstra uma síntese das dimensões calculadas até este momento para construção do projeto.

Tabela 5 – Dimensões calculadas para o projeto

Variável	Valor
Torque nominal (T_{nom})	4,76 N.m
Constante K_E	$0,23 \frac{V.s}{rad}$
Corrente nominal (I_{nom})	12,03 A
Tensão tangencial (σ_{Ftan})	17 kPa
Volume do Rotor (V_r)	$1,4 \cdot 10^5 mm^3$
TRV	34 kPa
Comprimento axial considerado (I_{stk})	6 mm
Passo polar (t_g)	60°
Indução magnética (B_δ)	1 T
Fluxo magnético (ϕ_1)	0,13 mWb
Tensão máxima ($V_{m\acute{a}x}$)	17,64 V
Tensão eficaz (V_{rms})	12,48 V
Tensão eficaz trifásica ($V_{3\phi rms}$)	21,59 V
Número de condutores do gerador (Z)	2587
Número de condutores por fase (N_{cf})	863
Número de espiras por fase (N_f)	432
Número de bobinas (N_{bob})	18
Número de espiras por bobina (N_{eb})	72
Densidade de corrente (J_{fio})	$6 \frac{A}{mm^2}$
Sessão transversal do fio (S_c)	2 mm ²
Diâmetro do fio (D_c)	1,6 mm

FONTE: Autores (2017)

O ímã escolhido para o projeto foi o N-50, opção que dispõe de valor densidade de fluxo próximo ao utilizado nos cálculos de dimensionamento do gerador. Cada ímã componente do rotor possui uma densidade de fluxo magnético de 0,48 T, totalizando 0,96 T para grupos de 2 ímãs formados por dois rotores dispostos frente a frente, conforme indicado na Figura 20.

Aplicando a Equação 30, pode-se obter o comprimento do entreferro.

$$\delta = 1,6 \frac{0,18 + 0,006 \times 500^{0,4} W}{1000} = 0,40 \text{ mm} \quad (30)$$

Com o resultado obtido, pela Equação 31 é calculada a altura do ímã.

$$h_m = 10 \times 0,40 \text{ mm} = 4 \text{ mm} \quad (31)$$

Por razões de recursos disponíveis para construção da máquina serão adotados ímãs com altura de 10 mm.

Para calcular o valor da largura inferior dos ímãs (b_{mi}), determina-se, primeiramente, os valores de X , D_{rai} e T_{pim} , conforme as Equações 32, 33 e 34.

$$X = \frac{\pi}{4 \times 3} \times \sqrt{3} = 0,45 \quad (32)$$

$$D_{\text{rai}} = 190 \text{ mm} - 2 \times 30 \text{ mm} = 130 \text{ mm} \quad (33)$$

$$T_{\text{pim}} = \frac{\pi \times 130 \text{ mm}}{2 \times 3} = 68 \text{ mm} \quad (34)$$

Enfim, calcula-se a largura inferior dos imãs, seu equivalente em graus mecânicos (ϕ_{mi}) e o espaçamento angular entre os mesmos (ϕ_{ei}).

$$b_{\text{mi}} = 0,45 \times 68 \text{ mm} = 30 \text{ mm} \quad (35)$$

$$\phi_{\text{mi}} = \frac{30 \text{ mm}}{\frac{190 \text{ mm}}{2} - 30 \text{ mm}} \times \left(\frac{180}{\pi} \right) = 26,5^\circ \quad (36)$$

$$\phi_{\text{ei}} = 60^\circ - 26,5^\circ = 33,5^\circ \quad (37)$$

Após a definição das dimensões do imã, verifica-se que o volume do mesmo é de 3600mm³. A Tabela 6 demonstra uma síntese das dimensões calculadas para dimensionamento dos imãs.

Tabela 6 - Dimensões calculadas para os imãs

Variável	Valor
Comprimento do entreferro (δ)	0,40 mm
Diâmetro interno do estator (D_{im})	191 mm
Altura dos imãs (h_m)	4 mm
Comprimento axial/diâmetro do rotor (X)	0,45
Diâmetro do rotor abaixo dos imãs (D_{rai})	130 mm
Passo polar abaixo dos imãs (T_{pim})	68 mm
Largura inferior dos imãs (b_{mi})	30 mm
Largura angular inferior dos imãs (ϕ_{mi})	26,5°
Arco entre os imãs (ϕ_{ei})	33,5°

FONTE: Autores (2017)

Para escolha do imã, devem ser levados em conta, primeiramente, a densidade de fluxo gerada e, em seguida, as dimensões. Após a escolha do imã de neodímio N50, para atender ao fluxo, foram verificados as dimensões disponíveis. Como não foi possível adquirir um imã com as mesmas características físicas calculadas, optou-se por manter um volume próximo ao calculado. Dessa forma, o imã indicado para o projeto possui forma de pastilha, com diâmetro de 22 mm e altura de 10 mm, totalizando um volume de 3799,4 mm³.

6.4. Análise de desempenho

Para que os ensaios pudessem ser iniciados, foram necessárias adaptações no protótipo para adequá-lo às condições de operação disponíveis nos laboratórios UNIFOA.

O primeiro desafio foi definir como seria realizada a simulação de vento. A solução encontrada foi o acoplamento de um motor elétrico, comandado por um inversor de frequência. Para isso, foi montada uma bancada de testes, na qual instalou-se o motor ao protótipo por meio de acoplamento físico entre os eixos, como demonstrado na Figura 24.

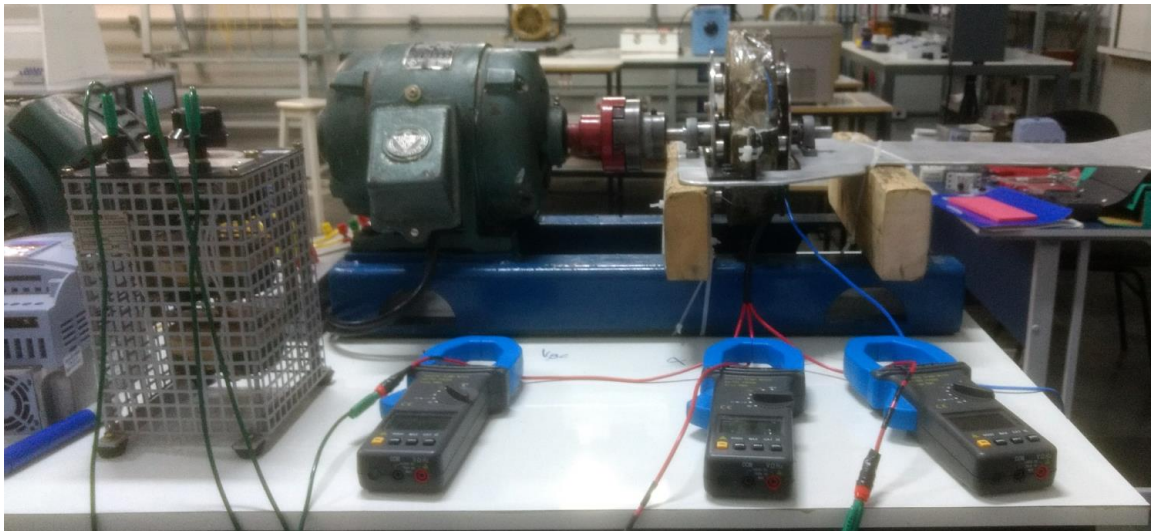


Figura 24 - Bancada de teste.

FONTE – Autores (2017)

6.4.1. Ensaio

Antes da realização do ensaio deve-se efetuar a verificação da integridade do isolamento das bobinas do gerador, com fim de identificar uma possível fuga de corrente entre as bobinas e o núcleo ferromagnético. Ao efetuar a medição de isolamento entre as fases e o núcleo, foram obtidos resultados que demonstraram uma fuga de corrente, fato que ocasiona grande perda de eficiência e possível inviabilização da máquina.

Para avaliar o funcionamento do gerador, e identificar o nível da falha, foi realizado o ensaio esquematizado pela Figura 25, utilizando os equipamentos listados a seguir:

- Gerador toroidal 3 ϕ (Ac);
- Amperímetro digital True RMS (A_{ac});
- Voltímetro digital True RMS (V_{ac});
- Reostato 3 ϕ de 0-25 Ω/ϕ (R);
- Tacômetro.

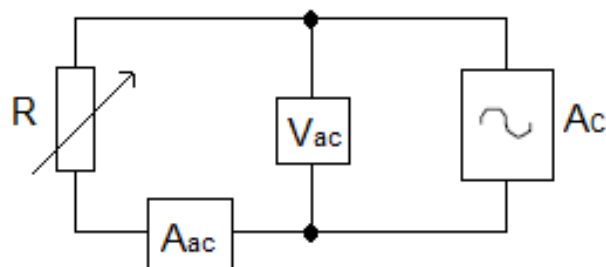


Figura 25 - Esquema de montagem do ensaio.

FONTE: Autores (2017)

A partir do ensaio determina-se a curva velocidade de rotação X potência gerada, no entanto, para levantamento da curva, torna-se necessário primeiramente a identificação do melhor ponto de carga do gerador. Para encontrar a carga ideal deve-se fixar o valor de rotação em 1002 rpm, velocidade nominal de projeto do gerador, em seguida varia-se o valor da carga através do reostato e realiza-se a medição da corrente e tensão das fases da máquina. A Tabela 7 demonstra os valores de tensão e corrente obtidos e a potência trifásica calculada.

Tabela 7 – Relação corrente, tensão e potência.

Reostato (Ω /fase)	Tensão linha (V)	Tensão fase (V)	Corrente (A)	Potência trifásica (W)
1	Vab 0,800	Van 1,320	Aa 0,32	0,443
	Vcb 0,550	Vbn 1,660	Ab 0,1	0,095
	Vac 1,280	Vcn 1,840	Ac 0,28	0,621
5	Vab 1,100	Van 1,400	Aa 0,2	0,381
	Vcb 0,640	Vbn 2,150	Ab 0,08	0,089
	Vac 1,560	Vcn 2,040	Ac 0,15	0,405
10	Vab 1,380	Van 1,400	Aa 0,13	0,311
	Vcb 0,660	Vbn 1,880	Ab 0,06	0,069
	Vac 1,880	Vcn 2,100	Ac 0,11	0,358
14	Vab 1,500	Van 1,440	Aa 0,11	0,286
	Vcb 0,660	Vbn 1,980	Ab 0,06	0,069
	Vac 2,000	Vcn 2,200	Ac 0,09	0,312
18	Vab 1,600	Van 1,450	Aa 0,09	0,249
	Vcb 0,660	Vbn 2,030	Ab 0,06	0,069
	Vac 2,120	Vcn 2,290	Ac 0,09	0,330
21	Vab 1,660	Van 1,450	Aa 0,09	0,259
	Vcb 0,660	Vbn 2,060	Ab 0,06	0,069
	Vac 2,190	Vcn 2,320	Ac 0,09	0,341
25	Vab 1,700	Van 1,500	Aa 0,08	0,236
	Vcb 0,700	Vbn 2,000	Ab 0,06	0,073
	Vac 2,200	Vcn 2,300	Ac 0,06	0,229

FONTE: Autores (2017)

A partir da tabela anterior, identifica-se o melhor ponto de operação, com o reostato ajustado para 1 Ω /fase. Deve-se, então, fixar a carga no ponto ótimo de operação do gerador, para em seguida variar a velocidade de giro do conjunto e determinar a curva velocidade de rotação X potência gerada, conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Relação rotação X potência.

Rotação (rpm)	Corrente (Aa)	Tensão (Vac)	Potência (W)
600	0,13	0,40	0,09
650	0,15	0,40	0,10
700	0,17	0,60	0,18
800	0,21	0,70	0,25
850	0,22	0,90	0,34
900	0,24	1,10	0,46
950	0,26	1,10	0,50
1002	0,32	1,28	0,71

Rotação (rpm)	Corrente (Ab)	Tensão (Vab)	Potência (W)
600	0,09	0,40	0,06
650	0,09	0,42	0,07
700	0,10	0,44	0,08
800	0,12	0,48	0,10
850	0,12	0,51	0,11
900	0,12	0,53	0,11
950	0,13	0,56	0,13
1002	0,15	0,80	0,21

(continua)

Tabela 9 – Relação rotação X potência. (continua)

Rotação (rpm)	Corrente (Ac)	Tensão (Vbc)	Potência (W)
600	0,12	0,34	0,07
650	0,14	0,36	0,09
700	0,15	0,38	0,10
800	0,18	0,45	0,14
850	0,19	0,48	0,16
950	0,22	0,54	0,21
1002	0,28	0,55	0,27

FONTE: Autores (2017)

Os resultados obtidos demonstram que a falha nas bobinas do estator inviabiliza o gerador em questão, tornando-se necessário realizar a confecção de um novo enrolamento.

6.5. Estudo de Viabilidade Técnico-Econômico

Em visto do defeito encontrado torna-se impossível realizar o estudo de viabilidade com os dados de ensaio, sendo necessária a utilização dos valores calculados para o estudo.

A primeira questão a ser considerada quando se analisa o retorno financeiro é o valor do kWh. No entanto, é importante saber que para um consumidor que possui acesso direto e facilitado à rede de energia elétrica, o valor do kWh é visto como um custo presente na conta de luz, ou seja, uma despesa fixa (mensal). Já para um consumidor com difícil acesso à rede elétrica, o valor do kWh é irrelevante, pois a instalação de um sistema de geração autônomo pode significar ter ou não o acesso à energia elétrica.

Considera-se que o sistema de aerogeração desenvolvido será para aplicação *off grid*, e possui um custo de instalação de aproximadamente R\$ 2.000,00. Sendo esse valor composto pelo custo em materiais para fabricação da turbina, somado aos valores dos dispositivos de controle de carga e armazenamento de energia, não está sendo considerado o custo com mão de obra. A Tabela 9 demonstra alguns dados da turbina usados para desenvolvimento do estudo de viabilidade.

Tabela 10 - Custo e características construtivas de aerogerador.

Características do aerogerador	
Potencia nominal (kW)	0,5
Altura da turbina (m)	10
Taxa de disponibilidade (%)	95,00
Custo do sistema	
Custo da instalação (R\$)	2.000,00
Inflação (%)	3,00

Fonte: Autores (2017)

Idealizando a aplicação desta turbina em uma localização costeira do estado do Rio de Janeiro, onde a média anual da velocidade dos ventos é de, aproximadamente, 6,7 m/s a 50 m e, considerando as constantes de cálculos conforme a Tabela 10 pode-se construir a Tabela 11, que fornece as seguintes relações de potência x velocidade do vento:

Tabela 11 - Características do local de aplicação e constantes de cálculos

Características do local de instalação	
Velocidade média do vento corrigida (m/s)	5,26
Altura de referência (m)	10
Coefficiente de rugosidade do vento	0,15
Coefficiente Weibull k	2,23

FONTE: Autores (2017)

Tabela 12 - Potência x Velocidade do Vento

Velocidade do vento (m/s)	Potência gerada (W)
1	0,00
2	0,00
3	0,01
4	0,03
5	0,05
6	0,09
7	0,15
8	0,22
9	0,31
10	0,43
11	0,50
12	0,57

FONTE: Autores (2017)

A Tabela 11 fornece uma importante informação sobre o aerogerador, que é a curva de potência X velocidade do vento, descrita na Figura 26 a seguir:

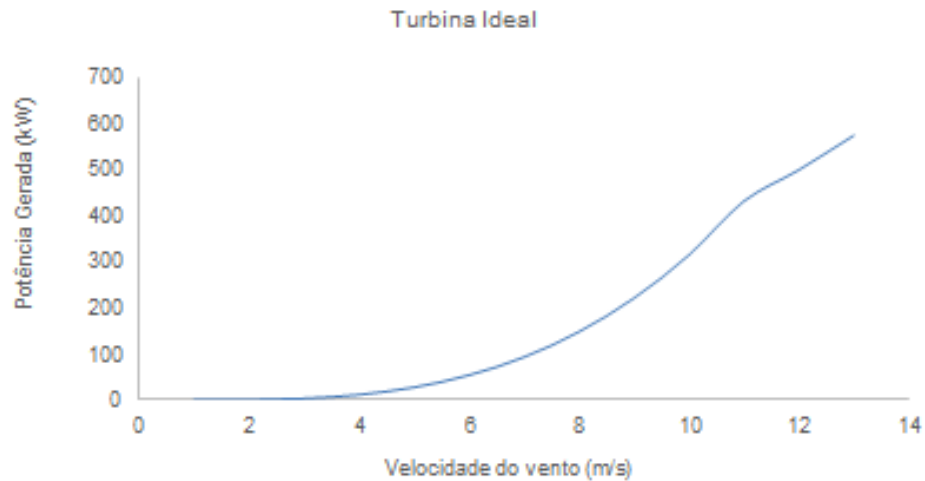


Figura 26 - Gráfico de potência X velocidade do vento.

Fonte: Autores (2017)

De acordo com a resolução da ANEEL N° 2.214/17 de 28/03/17, com vigência a partir de 1° de maio de 2017, em baixa tensão e um consumo residencial de 350 kW por mês, pode-se considerar o custo inicial do kWh de R\$ 0,79053 com inflação de 3,0% ao ano (LIGHT, 2017). Supondo que o consumidor tenha realizado o pagamento do aerogerador à vista, pode-se determinar a Tabela 12, referente ao fluxo de caixa, e a Figura 27 que descreve graficamente o mesmo.

Tabela 13 – Fluxo de Caixa

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Receitas (R\$)									
Potencia gerada (kWh/ano)	-	670	670	670	670	670	670	670	670
Economia de energia (R\$/kWh)	0,79	0,81	0,84	0,86	0,89	0,92	0,94	0,97	1,00
Total (R\$)	-	546	562	579	596	614	632	651	671
Despesas (R\$)									
Valor da turbina 2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Custos variáveis	-	32	33	34	35	36	37	39	40
Total (R\$)	-	32	33	34	35	36	37	39	40
Fluxo de caixa liquido	-2000	514	529	545	561	578	595	612	631
Fluxo de caixa acumulado	-2000	-1486	-958	-413	148	726	1322	1934	2565

FONTE: Autores (2017)

Com o auxílio da Figura 27, pode-se calcular um período de 4 anos para retorno financeiro. Isso significa que o capital inicial investido será integralmente recuperado em um período de 4 anos a partir da compra. No entanto, o método utilizado para esta análise deve ser considerado apenas como uma ferramenta preliminar, tendo em vista outras variáveis podem afetar as premissas aqui consideradas.

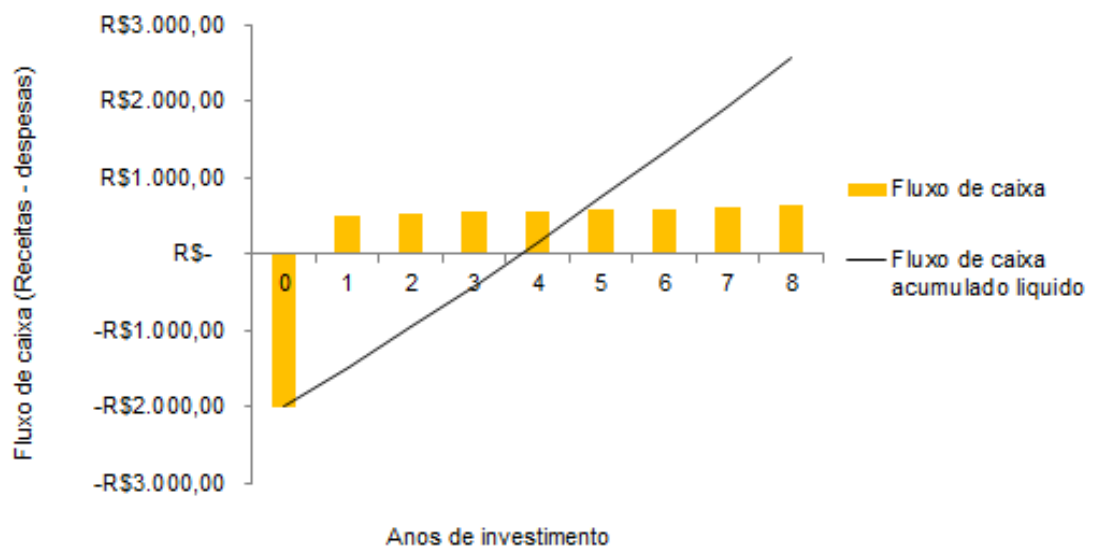


Figura 27 – 8 anos: Fluxo de caixa gráfico nominal.

Fonte: Autores (2017)

7. CONCLUSÃO

O modelo de aerogerador apresentado no presente trabalho demonstra-se como uma das configurações de turbina com melhor eficiência energética e menor suscetibilidade a manutenções. Fatos que, aliados ao bom potencial energético eólico do país, geram incentivos para implementação do sistema em locais de baixo consumo, como residências e estabelecimentos comerciais. No entanto, a tecnologia comercializada ainda apresenta um custo elevado e baixa divulgação, fato que dificulta o acesso da população à implantação de sistemas de pequeno e micro geração.

Tendo em vista as dificuldades encontradas, tornam-se necessários maiores investimentos em projetos, produtos e campanhas de divulgação para que haja barateamento dos custos do sistema de aerogeração, além da conscientização da população a cerca desta modalidade de geração de energia. Portanto, o desenvolvimento deste trabalho realiza um incentivo para a ampliação do setor de pequeno e micro geração de energia eólica, sendo relevantes os aprimoramentos objetivando a viabilização comercial. São exemplos: definições mais precisas de parâmetros que circundam a área aerodinâmica, mecânica e elétrica, como por exemplo, as definições de perdas do sistema.

Com relação aos aspectos construtivos, a fabricação da turbina se apresenta como um grande desafio. Deve-se ser atencioso para que as peças girantes fiquem balanceadas, assim como com o bobinamento do estator toroidal que compõe o gerador da máquina, devido à sua natureza crítica ao projeto. O mesmo inviabilizou o modelo construído devido a uma falha entre uma bobina e o núcleo do estator.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ABEEOLICA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Boletim anual de geração eólica 2016.** Disponível em: <<http://www.abeeolica.org.br/dados-abeeolica/>> Acesso em: 17 de abril de 2017.

[2] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Instalações elétricas de baixa tensão: NBR 5410.** Rio de Janeiro, 2008.

[3] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica - Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>> Acesso em: 20 de abril de 2017.

[4] ARAGONA, M.; CAMACHO, R. F. **Estudo sobre Turbinas Eólicas.** São Paulo, EPUSP. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica - EPUSP. São Paulo, 1994.

[5] AUTOMOVEIS ELETRICOS – **Máquinas Elétricas de Imãs Permanentes.** Disponível em: <<http://automoveiseletricos.blogspot.com.br/>> Acesso em: 15 de maio de 2017.

[6] BURATTINI, Maria Paula T. de Castro. **Energia: uma Abordagem Multidisciplinar.** São Paulo: Livraria da Física, 2008.

[7] CARES, Cristhian Marcelo Becker. **Projeto Eletromagnético Ótimo de Gerador Síncrono de Imãs Permanentes para Aplicação com Dispositivos com Ondas de Mar.** 2016. 119 f. Dissertação (mestrado). – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2016.

[8] CBEE - Centro Brasileiro de Energia Eólica. Disponível em: <<http://www.eolica.com.br/>> Acesso em 20 de março de 2017.

[9] CENTO DE ENERGIA EÓLICA. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL (PUCRS). **Perguntas frequentes sobre Energia Eólica.** Disponível em: <<http://www.pucrs.br/ce-eolica/faq.php?q=10#10/>> Acesso em: 12 de junho de 2017.

[10] CRESESB – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>> Acesso em: 20 de março de 2017.

[11] CEB – COMPANHIA ENERGÉTICA DE BRASÍLIA. Disponível em: <<http://www.ceb.com.br/>>. Acesso em: 05 de maio de 2017.

[12] DW – NOTÍCIAS E ANÁLISE DO BRASIL E DO MUNDO. Disponível em: <<http://www.dw.com/pt-br/energia-eolica-deve-superar-a-gerada-por-usinas-nucleares-no-mundo-até-2020/a-15918962>>. Acesso em: 10 de agosto de 2017.

[13] ENERSUD – Energia Limpa. Disponível em: < <http://enersud.com.br/>>. Acesso em: 11 de outubro de 2017.

[14] EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>>. Acesso em: 08 de maio de 2017.

[15] EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION (EWEA). Disponível em: <<http://www.ewea.org/>> Acesso em: 20 de abril de 2017.

[16] EVOLUÇÃO DA ENERGIA EÓLICA. Disponível em: <<https://evolucaoenergiaeolica.wordpress.com/>>

[17] FOX, W. F.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 5. ed., Rio de Janeiro, Ed. LTC, 2001.

[18] HALLIDAY; RESNICK; KRANE. **Física 3**. 5 ed. São Paulo: LTC, 2002.

[19] HAU E., **Windkraftanlagen - Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit**. Springer-Verlag, Berlin 1988.

[20] IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Senso demográfico 2010**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/habitacao/9662-censo-demografico-2010.html>>. Acesso em 16 de outubro de 2017.

[21] J F Gieras, Rj Wang, and Maarten J Kamper. **Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines**. Springer, 2008.

[22] LIGHT. **Sua conta.** Disponível em: < <http://www.light.com.br>> Acesso em 11 de outubro de 2017.

[23] MAIA, Thales Alexandre Carvalho **Projeto e Construção de um Gerador a Ímãs Permanentes de Fluxo Axial para Turbina Eólica de Pequena Potência.** 2011. 165 f. Dissertação (mestrado). – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Minas Gerais, 2011.

[24] MENEZES, Ana Elisa da Silva. **Aproveitamento eólico para uma vila de pescadores.** 2012. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

[25] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balço Energético Nacional** Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>> Acesso em 27 de março de 2017.

[26] PACHECO, Fabiana. **Energias Renováveis: Breves Conceitos.** Salvador: Conjuntura Econômica n. 149, 2006

[27] PORTAL DAS ENERGIAS RENOVAVEIS – **Conceitos de Energia Eólica.** 2009. Disponível em: <http://energiasrenovaveis.com/Area.asp?ID_area=3> Acesso em 20 de agosto de 2017.

[28] PYRHÖNEN, J.; JOKINEN, T.; HRABOVCOVÁ, V. Design of rotating electrical machines. Second. ed. UK: Wiley, 2014.

[29] RESHETOV, D.N. **Atlas de construção de máquinas.** Volumes I, II e III, 1979.

[30] SAHEKI, L. S. **Otimização de sistemas alternativos de geração de energia para aplicação em conjunto residencial - Condomínio de casas.** São Paulo, EPUSP. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica - EPUSP. São Paulo, 2005.

[31] SIMÕES, B. D. **Dimensionamento de uma Máquina Síncrona de Ímãs Permanentes com Validação Através de um Software do Tipo Elementos Finitos.** 2010. 91 f. Dissertação (bacharel). – Programa de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Viçosa (UFV). Viçosa, 2010.

[32] TORRES, H. J. R.; Portugal, M. P. P. **Projeto de um Gerador Eólico para uso residencial**. São Paulo, EPUSP. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica - EPUSP. São Paulo, 2004.

[33] UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ. **Fontes Alternativas Renováveis e Energia Eólica**. Disponível em: <http://www.cerpch.unifei.edu.br/fontes_renovaveis/eolica.html> Acesso em 20 de março de 2017.

[34] VEIGA, Tiago Natan Ardaia **Projeto de geradores síncronos a ímãs permanentes para aplicações em sistemas eólicos**. 2011. 125 f. Dissertação (mestrado). - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2011.

[35] WARLOCK. **Blade Calculator**. Disponível em: <<https://www.warlock.com.au/tools/bladecalc.htm>> Acesso em 12 de agosto de 2017.

[36] WEG Motores e Geradores elétricos. Disponível em: <www.weg.com.br> Acesso em 21 de maio de 2017.

[37] WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION (WWEA). Disponível em: <<http://www.wwindea.org/home/index.php>> Acesso em: 20 de abril de 2017.

APÊNDICE A - MANUAL TÉCNICO CONSTRUTIVO DE UMA TURBINA DE BAIXA POTÊNCIA

1. APRESENTAÇÃO

O presente anexo demonstrará de forma teórica e prática como construir uma turbina eólica de pequeno porte, capaz de produzir até 500 W de potência elétrica com ventos de 10,5 m/s. Para este desenvolvimento serão fornecidas informações detalhadas dos métodos para fabricação, materiais e ferramentas a utilizar. O projeto tem natureza de baixo custo, tornando-o acessível para que possíveis interessados possam desenvolver seu próprio equipamento. Para cumprir o propósito, serão utilizados materiais alternativos, reaproveitados e reciclados, muitas vezes comprados em ferros-velhos ou de posse própria. Na Tabela A1 podem ser vistos os dados básicos de projeto do gerador eólico proposto neste documento. Para maiores informações acerca de dimensionamentos, deve ser consultada a Monografia Principal deste estudo.

Tabela A 1 - Parâmetros técnicos do gerador eólico

Capacidade de geração	500 W
Tensão de operação	24 V _{ac}
Velocidade do vento	10,5 m/s
Tipo de turbina	Eixo-horizontal
Comprimento de raio da turbina	800 mm
Número de pás da turbina	3
Coeficiente de velocidade de ponta	8
Diâmetro do rotor da turbina	200 mm
Comprimento do leme	825 mm
Largura máxima do leme	450 mm
Diâmetro do rotor do gerador	200 mm
Comprimento axial do gerador	60 mm

FONTE: Autores (2017)

2. DESENHOS TÉCNICOS

As Figuras a seguir compõem o exemplar construtivo da turbina. As Figuras A1 a A10 demonstram as peças que compõem a turbina de forma separadamente e a Figura A11 indica a montagem final do equipamento. Para informações detalhadas, como dimensões do projeto, deve-se consultar o Apêndice B, em que estarão disponíveis os desenhos em mídia.

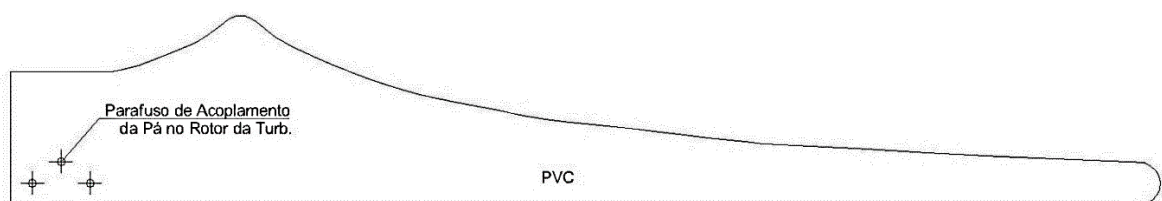


Figura A 1 - Perfil da hélice da turbina.

FONTE: Autores (2017)

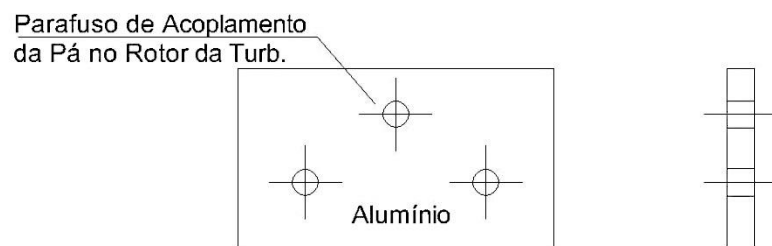


Figura A 2 - Suporte de acoplamento das pás ao rotor da turbina.

FONTE: Autores (2017)

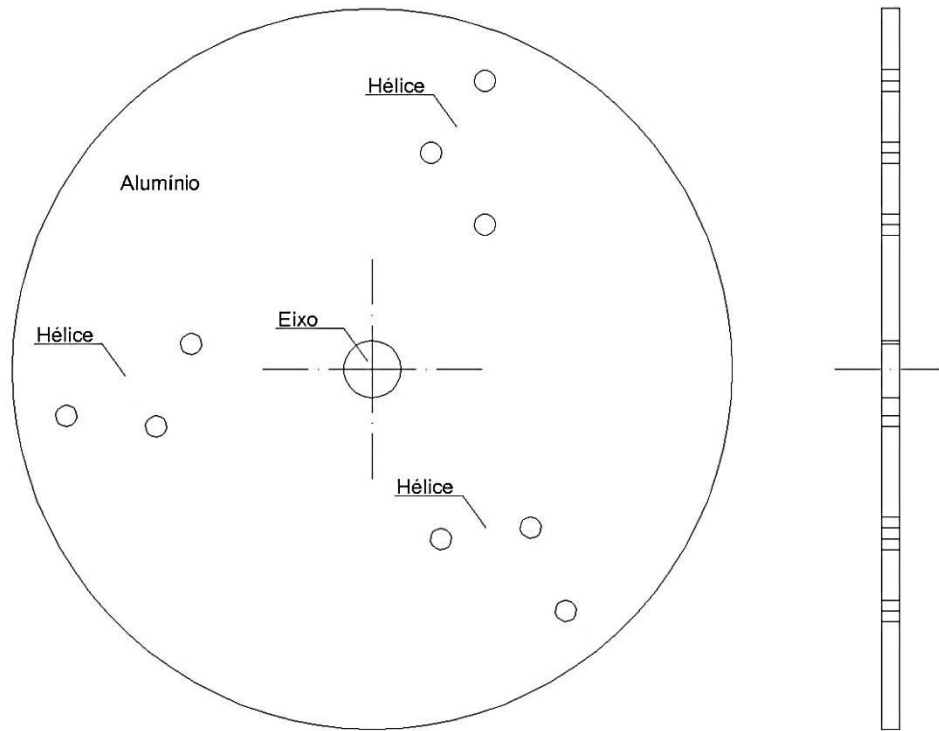


Figura A 3 - Rotor de suporte da hélice da turbina.

FONTE: Autores (2017)

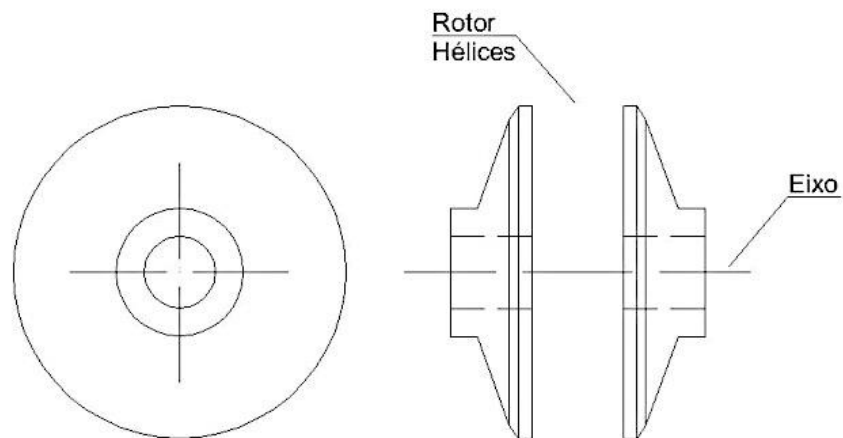


Figura A 4 - Suporte da turbina.

FONTE: Autores (2017)

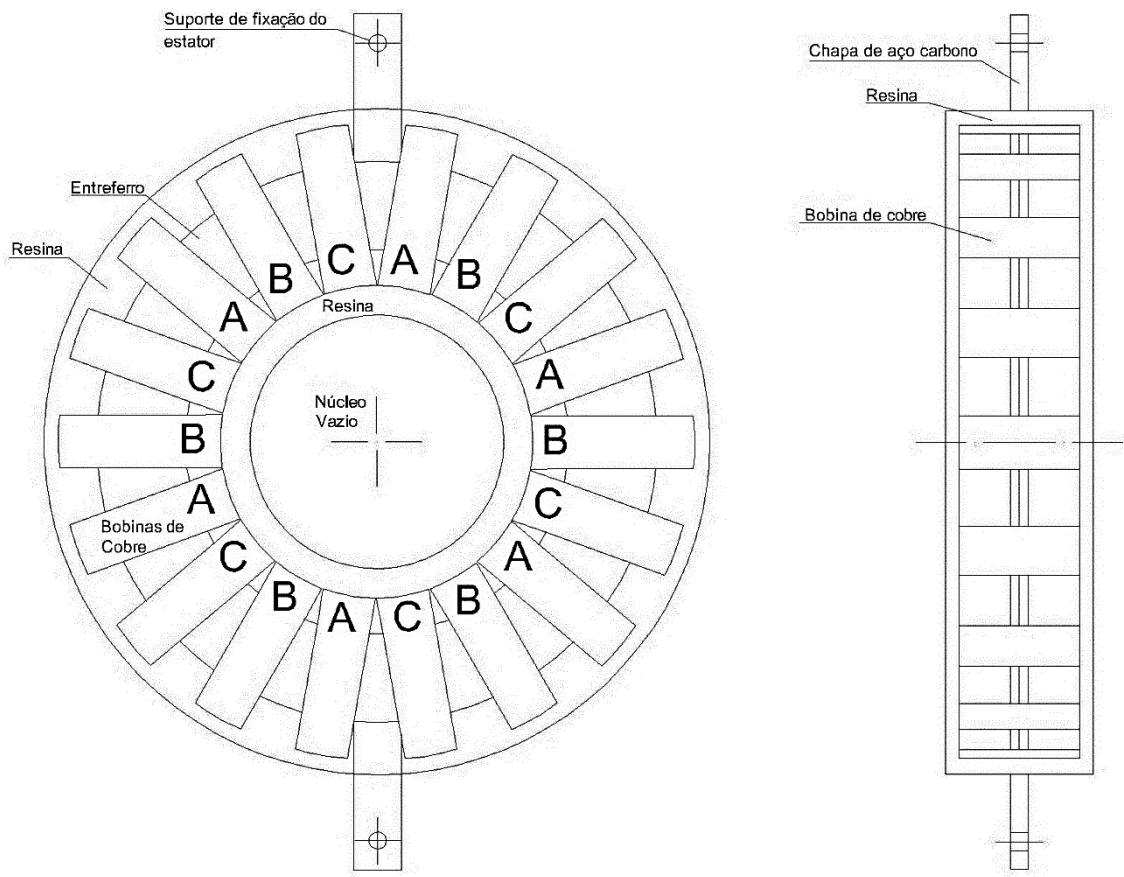


Figura A 5 - Estator do gerador.

FONTE: Autores (2017)

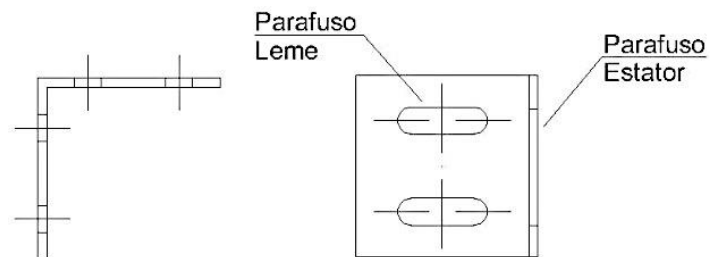


Figura A 6 - Suporte do estator.

FONTE: Autores (2017)

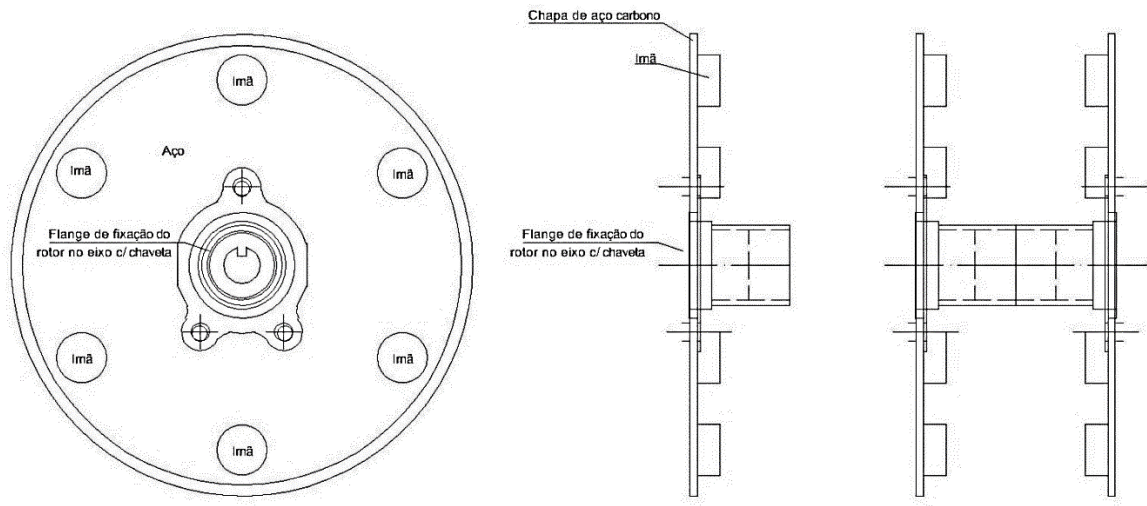


Figura A 7 - Rotores do gerador.

FONTE: Autores (2017)

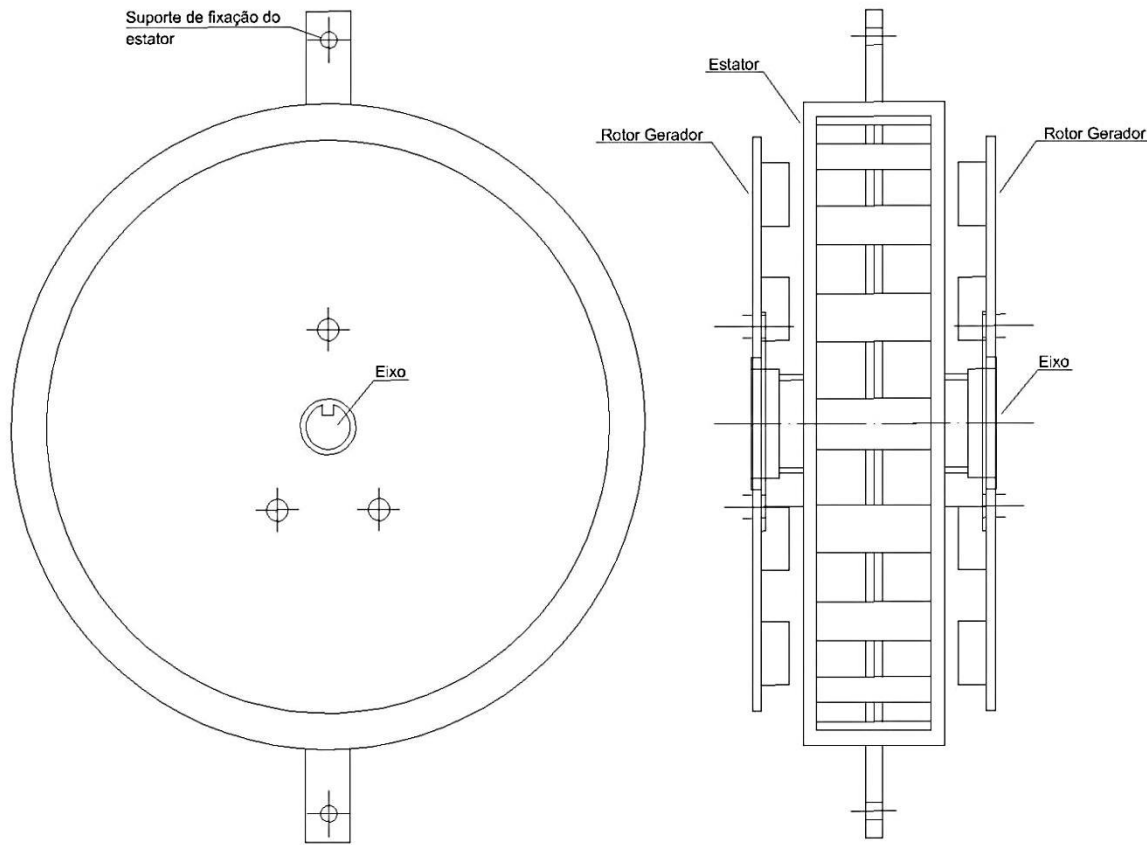


Figura A 8 - Montagem do gerador com rotores e estator.

FONTE: Autores (2017)

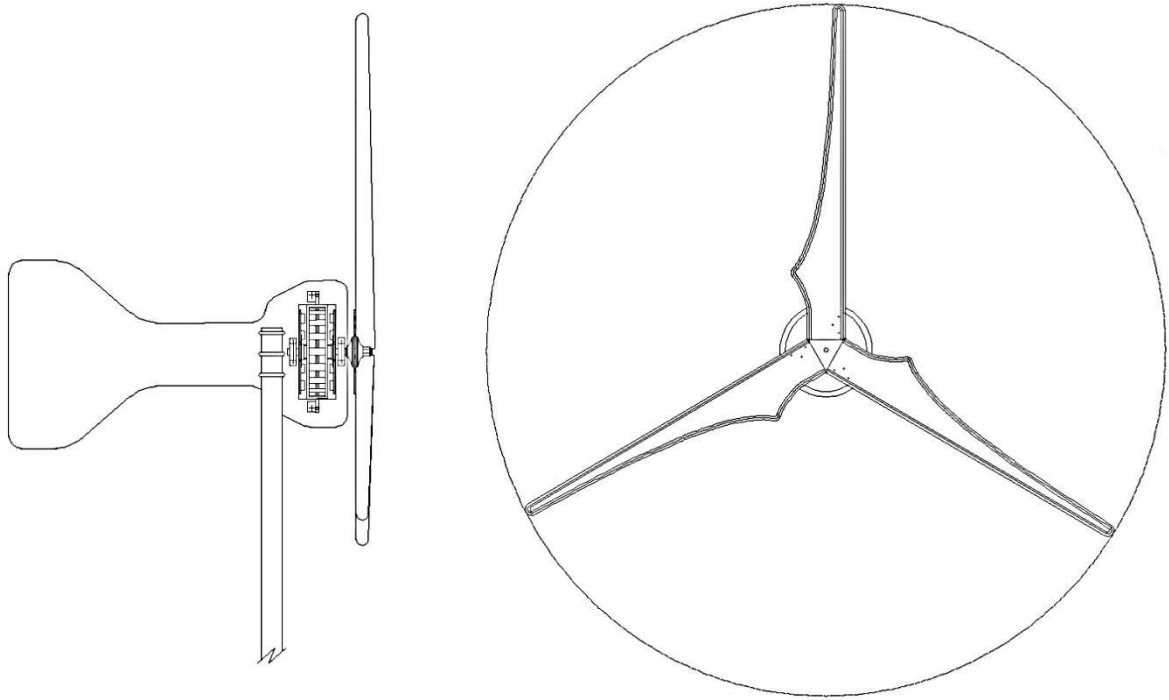


Figura A 11 - Montagem do aerogerador.

FONTE: Autores (2017)

3. CRONOGRAMA

Tabela A 2 - Cronograma para construção de um aerogerador de pequeno porte

Cronograma		
Nome da tarefa	Duração	Predecessoras
Fabricação da turbina eólica	25,5 dias	
Estudo do projeto	2 dias	
Compra de materiais	4 dias	
Turbina eólica	2 dias	5
Gerador	2 dias	7
Fabricação	17,5 dias	
Turbina eólica	8 dias	
Fabricação das hélices	1 dia	8
Fabricação do leme e rotor da turbina	3 dias	11
Fabricação do eixo e acessórios de fixação do gerador na turbina	3 dias	12
Fabricação do nariz da turbina	1 dia	13
Gerador	8 dias	
Fabricação da estrutura do estator e dos rotores do gerador	3 dias	14
Bobinas do estator e envelopamento	4 dias	16
Fixação dos ímãs do rotor	1 dia	17
Montagem	1,5 dia	
Montagem das hélices da turbina no rotor e fixação do nariz	0,5 dias	18
Montagem dos mancais e suporte do estator	0,5 dias	20
Montagem do eixo, gerador e turbina no leme	0,5 dias	21
Teste	2 dias	
Teste de bancada	1 dia	22
Teste de vento	1 dia	24

FONTE: Autores (2017)

4. LISTA DE MATERIAIS

A seguir, serão apresentadas as listas de materiais e ferramentas necessárias para a construção do projeto, respectivamente, nas Tabelas A3 e A4. As mesmas explanarão o custo dos itens que as compõem, assim como a lista de fornecedores, inserida com o propósito de indicação de possíveis localidades para compra. A lista, no entanto, não é de natureza obrigatória, podendo o construtor fazer bom uso da criatividade para realizar alterações nos materiais utilizados, como a aplicação de recicláveis e adaptações para melhoria ou barateamento do custo do projeto.

ATENÇÃO: Ao substituir materiais, o projetista deve ser tecnicamente criterioso para reduzir riscos de acidentes.

Tabela A 3 - Lista de materiais para fabricação

Lista de Materiais							
#	Descrição	Unid.	Qtd.	Fornec.	Custo [R\$]	Aplicação/Substituição	Parte
1	Tubo de PVC, diâmetro nominal (DN) de 200 mm e espessura de parede 10 mm (Classe de Pressão: 1 Mpa)	m	1	Ferro velho local	0-15	Utilizado para confecção das pás da turbina. Substituição: Madeira ou Fibra de Vidro.	Hélices e nariz
2	Desenho de molde construtivo em papel tamanho A1 estendido, esc. 1:1, impresso em plotter	pç	1	Gráfica local	6	Utilizado para fazer o molde das pás para o corte.	
3	Resina epóxi c/ catalizador	litro	0,5	Loja materiais de fibra de vidro	15	Utilizado para envelopamento do estator do alternador.	

4	Fibra de vidro	g	100	Loja materiais de fibra de vidro	10	Utilizado para construção do nariz da turbina.
5	Cantoneira de alumínio c/ abas iguais de 20 mm	m	0,1	Sucata de vidraçaria	-	Utilizado para fixação do nariz da turbina.
6	Parafuso sextavado M6, C=30 mm, c/ 1 porca e 2 arruelas	pç	9	Loja de ferramentas	5	Utilizado para fixação das pás da turbina ao rotor.
7	Parafuso sextavado M3, C=10 mm, c/ 1 porca e 2 arruelas	pç	3	Loja de ferramentas	2	Utilizado para fixação do nariz da turbina
8	Chapa de alumínio, (LxHxE) 800x500x6 mm	pç	1	Ferro velho local	0-25	Utilizado para confecção do leme/nacele e rotor de suporte às pás da turbina. Substituição: Chapa de aço, (LxHxE) 800x500x3 mm.
9	Desenho de molde construtivo em papel tamanho A1 estendido, esc. 1:1, impresso em plotter	pç	1	Gráfica local	7	Utilizado para fazer o molde das peças antes para corte.
10	Mancal com rolamento blindado para eixo 15mm	pç	2	Loja online	100	Utilizado para suporte do eixo com rotores.
11	Eixo de aço, (DxC) 15x200mm	pç	1	Torneiro mecânico local	150	Usinagem do eixo para o acoplamento do rotor da turbina ao gerador.
12	Flange de mancal para furadeira/esmeril de 5/8"	pç	1	Ferro velho local	0-10	Adaptado para prender o rotor das pás da turbina.

Leme, rotor das pás e eixo de acoplamento

13	Parafuso sextavado M6, C=20 mm, c/ 1 porca e 2 arruelas	pç	6	Loja de ferramentas	4	Fixação dos mancais e suporte do estator.
14	Porca p/ eixo de d=15mm	pç	1	Torneiro mecânico local	20	Usinagem da porca p/ travamento do flange que acopla o rotor das pás ao eixo da turbina.
15	Grampo U de 1.1/2" c/ porcas	pç	3	Loja de ferramentas	6	Fixação da turbina no pedestal de suporte.
16	Chapa de aço, (LxHxE) 500x700x3mm	pç	1	Ferro velho local	0-15	Utilizado para confecção do rotor e estator do gerador, onde serão presos os ímãs. Substituição: Disco de freio de carro.
17	Desenho de molde construtivo em papel tamanho A1 estendido, esc. 1:1, impresso em plotter	pç	1	Gráfica local	7	Utilizado para fazer o molde do rotor e estator para o corte.
18	Guia do colar de embreagem do gol	pç	2	Sucata de oficina de automóveis	0-10	Adaptado para servir de flange para suportar os rotores do gerador e acoplamento ao eixo.
19	Parafuso sextavado M6, C=15 mm, c/ 1 porca	pç	6	Loja de ferramentas	3	Fixação dos flanges que suportam o rotor.
20	Bucha de acoplamento do flange de suporte do rotor	pç	2	Torneiro mecânico local	15	Utilizado para acoplamento do rotor ao eixo de transmissão.
21	Acoplamento entre os flanges	pç	2	Torneiro mecânico local	10	Utilizado para acoplamento dos flanges que suportam os rotores.
22	Ímãs de neodímio N50, (DxH) 22x10mm	pç	12	Loja online	160	Serão aplicados no rotor do gerador.

23	Recorte chapa de eucatex, (LxCxH) 20x20x2mm	pç	1	Sucata de marcenaria	-	Confecção de molde para auxílio na fixação dos imãs de neodímio.
24	Cola epóxi	pç	1	Loja de ferramentas	20	Utilizado para colagem dos imãs.
25	Fio de cobre esmaltado com seção transversal de 2 mm ²	kg	4	Loja de recond. de motores local	160	Utilizado para confecção dos enrolamentos do estator do gerador.
26	Resina epóxi c/ catalizador	litro	2	Loja materiais de fibra de vidro	30	Utilizado para envelopamento do estator do gerador.
27	Cantoneira de abas iguais c/ 2"	m	0,3	Ferro velho local	-	Utilizado para fabricação do suporte do estator no leme da turbina.
28	Parafuso sextavado M6, C=20 mm, c/ 1 porca e 2 arruelas	pç	6	Loja de ferramentas	4	Fixação dos suportes do estator.
29	Disco de corte rápido de 4.1/2" para aço	pç	6	Loja de ferramentas	4	Para corte das peças de aço do gerador.
30	Disco de desbaste de 4.1/2" para aço	pç	1	Loja de ferramentas	7	Para desbaste das peças de aço do gerador.
31	Disco de borracha de 4.1/2" com lixa para madeira ou metal nº 80	pç	1	Loja de ferramentas	-	Para realizar o acabamento das bordas das pás.
32	Eletrodo de solda tipo 6013	kg	0,3	Loja de ferramentas	4	Para soldagem das peças que compõe estator.
33	Tinta spray, cor preta c/ 200ml	pç	1	Loja de ferramentas	10	Para pintura de peças e suportes.
34	Lâmina de serra p/ alumínio (serra tico-tico)	pç	1	Loja de ferramentas	-	Para recorte das peças em alumínio e PVC.

Consumíveis

35	Cabo flexível, isol. PVC, clas. 750V, 2,5mm ²	m	5	Loja de eletrônica	4	Interligação nas bobinas do estator.
36	Estanho 60/40%	pç	QN	Loja de eletrônica	-	Para fazer a solda das bobinas
37	Termo retrátil 6 e 12mm	m	QN	Loja de eletrônica	-	Isolamento das soldas das bobinas.
38	Fita isolante	pç	QN	Loja de eletrônica	-	Isolamento das soldas dos cabos.
39	Pincel 2"	pç	1	Loja material de construção	4	Para aplicação de cola para colagem dos moldes e resina para fabricação do nariz.
40	Cola branca tipo PVA	litro	0,3	Papelaria	2	Colagem dos moldes nas pasças para corte.
41	Placa de isopor (LxCxH) – 1x1,5x30 mm	pç	3	Papelaria	15	Fabricação dos moldes para o estator e nariz da turbina
42	Cola p/ isopor	ml	50	Papelaria	2	Fabricação dos moldes para o estator e nariz da turbina
43	Fita crepe, rolo c/ 50mm x 50 m	pç	2	Papelaria	16	Para enrolamento do estator e confecção dos moldes para resina
44	Lixa de aço número 100	pç	Q.N.	Loja de ferramentas	-	Para limpeza das peças.
45	Pano de limpeza	pç	Q.N.	-	-	Para limpeza das peças.
TOTAL APROXIMADO (R\$)					860	

FONTE: Autores (2017)

Tabela A 4 - Lista de ferramentas e EPIs para fabricação

Lista de Ferramentas e EPIs							Parte
#	Descrição	Unid.	Qtd.	Fornecedor	Custo [R\$]	Aplicação/Substituição	
1	Esmerilhadeira de 4.1/2"	pç	1	Loja de ferramentas	-	-	Ferramentas
2	Furadeira c/ kit de brocas em mm	pç	1	Loja de ferramentas	-	-	
3	Máquina inversora ou transformadora de solda	pç	1	Loja de ferramentas	-	-	
4	Serra tipo tico-tico	pç	1	Loja de ferramentas	-	-	
5	Arco de serra c/ serra	pç	1	Loja de ferramentas	-	-	
6	Martelo de ferro	pç	1	Loja de ferramentas	-	Útil para bater o punção.	
7	Punção de ponta fina	pç	Op.	Loja de ferramentas	-	Útil para começar a fazer os furos em metal galvanizado.	
8	Lima para metal	pç	1	Loja de ferramentas	-	Use quando for cortar, pintar, etc.	
9	Alicate de corte	pç	1	Loja de ferramentas	-	-	
10	Alicate universal	pç	1	Loja de ferramentas	-	-	
11	Jogo de Chave combinada mm	pç	1	Loja de ferramentas	-	-	
12	Chave de fenda nº 1/4" e 5/8"	pç	1	Loja de ferramentas	-	-	
13	Trena métrica	pç	1	Loja de ferramentas	-	-	
14	Paquímetro	pç	1	Loja de ferramentas	-	-	
15	Ferro de solda	pç	1	Loja de ferramentas	-	-	
16	Multímetro	pç	1	Loja de ferramentas	-	-	

17	Tesoura	pç	1	Papelaria		
18	Toco de madeira	pç	1	Fabricação própria	-	Útil para enrolar as bobinas do estator.
19	Óculos de proteção	pç	QN.	Loja de ferramentas	-	Tapa olhos são para piratas. Você não é um pirata, olhos não são substituíveis.
20	Máscara	pç	QN.	Loja de ferramentas	-	-
21	Luvas de raspa (par)	pç	1	Loja de ferramentas	-	-
22	Blusão de solda	pç	1	Loja de ferramentas	-	-
23	Viseira	pç	QN.	Loja de ferramentas	-	-
24	Jaleco c/ manga longa	pç	1	Loja de ferramentas	-	-
25	Luvas de borracha (par)	pç	QN.	Loja de ferramentas	-	-

EPI's

Legenda	
Op.	Opcional
QN.	Quanto for necessário

FONTE: Autores (2017)

5. METODOLOGIA DE CONSTRUÇÃO

O presente tópico apresentará a sequência construtiva adotada para desenvolvimento do aerogerador proposto. Os seguintes itens serão desenvolvidos em forma de sub-tópicos detalhados e, para a construção, serão utilizados os materiais e ferramentas previamente mencionados nas Tabelas A3 e A4.

ATENÇÃO:

- Durante a fabricação, devem ser utilizados os EPIs adequados ao tipo de atividade;
- Não deixe de executar uma inspeção nas ferramentas, verificando suas respectivas condições de uso;
- É importante que o construtor esteja familiarizado com o uso de ferramentas elétricas e manuais, assim como seus respectivos modos de funcionamento seguros.

5.1. Turbina eólica

5.1.1. Hélices

A construção das hélices do rotor iniciou-se com a escolha do material utilizado para construção. Dentre as opções verificadas resumiram-se:

- 1) Esculpir as pás em tora de madeira, tipo de construção bastante utilizada em aerogeradores desenvolvidos pela organização social *Scoraigwind*. Tal opção gera um ótimo resultado construtivo devido aos bons parâmetros aerodinâmicos alcançáveis, no entanto, demonstra-se bastante trabalhosa;
- 2) Confeção de moldes de isopor para aplicação de resina e fibra, forma utilizada em turbinas comerciais de pequeno porte como, por exemplo, os fabricados pela empresa ENERSUD, cujas pás apresentam ótima qualidade, porém, custo elevado;
- 3) Reaproveitamento de um tubo PVC do tipo hidro sanitário, realizando o corte das pás. Apesar do desempenho menor, a opção se apresentaria satisfatória e atenderia o projeto.

Foi escolhida a terceira opção para fabricação do modelo devido às facilidades construtivas, baixo custo e confiabilidade nas características mecânicas do material.

- **Material**

- Tubo de PVC com diâmetro nominal (DN) de 200 mm e espessura de parede 10 mm (Classe de Pressão: 1 Mpa);
- Desenho molde construtivo em papel, em escala 1:1 (impresso em *plotter*);
- Cola tipo PVA;
- Lixa de aço número 100;
- Pano de limpeza;
- Disco de borracha de 4" com lixa para madeira ou metal nº 80.

- **Ferramentas**

- Serra tico-tico com lâmina de serra para madeira ou alumínio;
- Esmerilhadeira de 4";
- Trena métrica;
- Balança 5 kg;
- Pincel 2".

Inicialmente, realiza-se uma limpeza do tubo, utilizando uma lixa e um pano. Uma vez limpo, verifica-se a ausência de trincas, buracos e demais imperfeições que poderão causar defeitos nas pás. As Figuras A12 e A13 apresentam o tubo utilizado e as suas respectivas especificações e as ferramentas utilizadas para o processo de fabricação, respectivamente.



Figura A 12 - Tubo utilizado na fabricação - PVC, d.: 200 mm, esp.: 10 mm.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 13 - Ferramentas utilizadas para fabricação.

FONTE: Autores (2017)

Antes de se iniciar os cortes no tubo para fabricação das hélices, deve ser impresso, em escala 1:1, o molde construtivo da hélice, correspondente à Figura A1, disponível em mídia no Apêndice B.

O molde de papel deve ser colado na circunferência do tubo com cola tipo PVA. Para fazer a colagem são diluídos, aproximadamente, 20 ml de água em 50 ml de cola. Uma vez homogênea, a mistura deve ser aplicada com o auxílio de um pincel sobre o tubo de forma uniforme e sem excessos. Após a aplicação da cola, alinha-se o papel com a borda do tubo e cola-se como um adesivo. É importante ser bastante cuidadoso durante esta etapa, afim de não danificar o molde ou gerar irregularidades nas peças produzidas.

Após a secagem do papel, são realizados os cortes com o auxílio de uma serra tico-tico, como apresentado na Figura A14. Findos os recortes, a hélice deve ser presa com o auxílio de uma morsa e ter suas arestas acabadas utilizando-se uma lixadeira, como demonstrado na Figura A15.



Figura A 14 - Recorte das pás no tubo utilizando a serra tico-tico e serra para madeira.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 15 - Acabamento nas arestas utilizando uma lixadeira de 4" com disco de lixa para madeira.

FONTE: Autores (2017)

Finalizado o corte e acerto das bordas, realiza-se uma inspeção nas medidas e peso das pás, como demonstrado nas Figuras A16 e A17. Identifica-se se as 3 (três) peças são semelhantes e, caso haja alguma discrepância entre os quesitos comparados, as peças devem ser corrigidas afim de se evitar qualquer desbalanceamento.



Figura A 16 - Pesagem das pás para ajustes de balanceamento.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 17 - Hélices cortadas e acabadas.

FONTE: Autores (2017)

Ao realizarem-se as medições e igualar o peso das pás deve ser feito, então, um novo ensaio para identificar se seus balanceamentos estão corretos. Para tal deve-se apoiar a extremidade inferior da pá em um ponto fixo e, a extremidade superior, sobre a balança. As pontas das pás devem possuir os mesmos pesos, caso seja identificada uma diferença será necessário realizar correções.

5.1.2. Leme e rotor

Para determinação do material a ser utilizado na turbina foram verificadas algumas opções, dentre elas:

- 1) Utilização de cubo de automóvel, tubos e cantoneiras de aço para soldagem de uma estrutura com função de leme e rotor da turbina o rotor. Tal tipo de construção é bastante utilizada em aerogeradores desenvolvidos pela organização social Scoraigwind. O método demonstra confiabilidade construtiva e possui parâmetros de segurança, como o furling;
- 2) Utilização de uma chapa de aço ou alumínio para recorte do leme e rotor. Utilizado em desenvolvimentos de pesquisas e trabalhos na área de aerogeradores, tal opção é mais facilmente adquirida apesar de ser menos confiável por não possuir dispositivos de segurança.

Foi escolhida a utilização de uma chapa de alumínio com espessura de 6 mm, devido às facilidades construtivas e características mecânicas do material.

- **Material**

- Chapa de alumínio de 800x500x6 mm;
- Desenho molde construtivo em papel (impresso em *plotter*);
- Pincel 2”;
- Cola tipo PVA;
- Lixa de aço número 100;
- Saco de pano.

- **Ferramentas**

- Serra tico-tico com serra de alumínio;
- Lima com face reta e meia cana;
- Trena métrica;
- Maçarico c/ botija de GLP;
- Furadeira;
- Escova rotativa para furadeira;
- Brocas de 3 e 6mm para furadeira;
- Serra tico tico c/ lâmina para alumínio.

Inicialmente, realiza-se uma limpeza do chapa de alumínio, utilizando uma lixa e um pano. Uma vez limpa, verifica-se a ausência de trincas, buracos e demais imperfeições que poderão causar defeitos nas pás. A Figura A18 apresenta a chapa utilizada.

A fabricação do leme e do rotor procede de maneira igual às pás, com o molde construtivo do leme, correspondente à Figura A10, impresso em escala 1:1, também disponível em mídia no Apêndice B. Para realizar a colagem, deve-se utilizar o mesmo percentual de mistura de cola aplicada anteriormente. A Figura A 19 demonstra o molde impresso colado na chapa de alumínio.



Figura A 18 - Chapa de alumínio
850x500x6mm.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 19 - Colagem do molde
construtivo do leme e rotor da turbina
na chapa de alumínio.

FONTE: Autores (2017)

O próximo passo, após a secagem do papel, é a realização dos recortes utilizando a serra tico-tico com lâmina para alumínio, como demonstrado na Figura A20. Após perfurações pertinentes, Figura A21, e finalizados os recortes, utiliza-se uma lima para dar acabamento às arestas do leme e do rotor da turbina.



Figura A 20 - Leme e rotor da turbina.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 21 - Perfuração do rotor da turbina para fixação das hélices e eixo.

FONTE: Autores (2017)

Juntamente com o leme e os rotores, também foram fabricadas as presilhas, indicadas na Figura A22, que servirão como fixação das pás da turbina ao rotor por meio de parafusos tipo M8 com cabeça sextavada e porca.



Figura A 22 - Presilhas de fixação das pás da turbina.

FONTE: Autores (2017)

Devido à natureza de reaproveitamento do material utilizado, ao realizar a confecção do rotor e leme, torna-se necessário efetuar a limpeza das peças, removendo resquícios de tinta. Para tal, aplicou-se um removedor de tintas sintéticas, no entanto, não foi obtido sucesso. Optou-se, então, por realizar a queima da tinta velha e raspagem com uma espátula, conforme visto nas Figuras A23 e A24.



Figura A 23 - Remoção da tinta do rotor da turbina.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 24 - Remoção da tinta do leme da turbina.

FONTE: Autores (2017)

Após a remoção da tinta, deve ser realizada a limpeza da chapa de alumínio utilizando uma escova rotativa acoplada a furadeira, conforme Figuras A25 e A26.



Figura A 25 - Furadeira com escova rotativa.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 26 - Leme e rotor da turbina após limpeza.

FONTE: Autores (2017)

Após a confecção ou aquisição das peças que compõe a turbina: o gerador; o eixo de acoplamento; e os mancais. Deve-se realizar o recorte do leme para que seja possível integrar o conjunto de peças em um único equipamento, o recorte é feito utilizando a serra tico tico. No entanto para iniciar o corte deve-se, previamente, realizar a marcação da largura e comprimento necessários para acomodar o gerador. Após a marcação deve-se realizar a furação das arestas utilizando a furadeira, estas servirão para acesso da lâmina da serra tico tico, e na sequencia execução do recorte da chapa de alumínio, Figura A27 e A28.



Figura A 27 - Recorte para posicionamento do gerador.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 28 - Recorte de posicionamento do gerador concluído.

FONTE: Autores (2017)

5.1.3. Pré montagem da turbina

Com as peças em mãos, é feita uma pré-montagem da turbina acoplado as pás ao rotor, como visto na Figura A29. O ensaio possui o objetivo de possibilitar a averiguação dos detalhes construtivos do conjunto. Foram inspecionadas as fixações, verificado o balanceamento estático, cumprimento ao projeto inicial e identificação de melhorias necessárias.

- **Material**
 - Parafusos M6x30 mm com porca e arruela.

- **Ferramentas**
 - Chave combinada 10 mm.



Figura A 29 - Pré-montagem da turbina do aerogerador.

FONTE: Autores (2017)

5.1.4. Nariz da turbina

O nariz da turbina eólica será o responsável por receber o vento de frente, distribuindo para as hélices a massa de ar que atinge o centro da turbina. A peça deve ser fabricada utilizando um composto de fibra de vidro e resina epóxi

- **Material**

- Placa de isopor;
- Cola para isopor;
- Fita crepe;
- Fibra de vidro;
- Resina epóxi c/ catalizador;
- Lixa de aço número 100;
- Saco de pano;
- Tinta spray.

- **Ferramentas**

- Pincel 2”;
- Estilete;
- Trena métrica;
- Furadeira;
- Brocas de 3mm para furadeira.

Primeiramente deve ser confeccionado o molde de isopor em formato de cone revestido com fita crepe. A base do cone deve possuir diâmetro semelhante ao do rotor da turbina, para que sua fixação seja facilitada. A confecção do molde deve ser feita utilizando-se recortes de isopor sobrepostos e colados, formando um bloco. Neste bloco devem ser feitas as marcações do cone e o recorte, utilizando-se um estilete. Após o molde ser recortado, o mesmo deve ser recoberto de 3 a 4 camadas de fita crepe, sendo esta medida tomada para que não ocorra contato direto entre a resina e o isopor. A Figura A30 apresenta o molde do nariz finalizado, pronto para aplicação da resina com fibra de vidro.

A etapa de aplicação da resina epóxi e fibra de vidro é feita da seguinte forma: inicialmente, realiza-se o recorte de tiras de 100x200 mm em uma manta de fibra de vidro; em seguida, deve-se preparar uma porção de mistura do catalizador com a resina, em proporção de 15 gotas de catalizador para 100 ml de resina; após

a preparação da resina, deve-se realizar a aplicação de uma camada da mesma sobre a superfície do molde, utilizando um pincel; em seguida, insere-se uma camada de fibra. O processo deve cobrir toda a superfície do molde e ser repetido três vezes. O resultado final está demonstrado na Figura A31.

ATENÇÃO:

- A mistura de resina com catalizador seca rapidamente, portanto, aconselha-se rapidez durante sua aplicação;
- O trabalho deve ser realizado por duas pessoas, uma posiciona a fibra e outra aplica a resina.



Figura A 30 - Molde do nariz da turbina.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 31 - Aplicação da resina com fibra de vidro sobre o molde.

FONTE: Autores (2017)

5.2. Eixo, suportes e acessórios de fixação dos rotores do gerador

Esta seção descreve a fabricação do eixo responsável pelo acoplamento direto do rotor da turbina com o rotor do gerador, assim como a fabricação dos suportes de fixação necessários para as peças fabricadas.

5.2.1. Flange de suporte do rotor da turbina

Esta peça foi adaptada para realizar a fixação do rotor da turbina ao eixo de acoplamento com o gerador. Originalmente, pertence a um mancal para uso como furadeira e esmeril, sendo este o dispositivo que segura a pedra do esmeril. O conjunto é composto por dois pratos e uma porca de rosca inversa, trantam-se de peças fabricadas em aço, são dimensionadas para eixos de diâmetro 5/8". Conforme apresentado na Figura A32.

Para atender as necessidades do projeto, devem ser realizados os seguintes serviços de usinagem: embuchado dos pratos para um diâmetro nominal de 15 mm; confecção de um nova porca para diâmetro 15 mm. Os serviços de tornam necessários pois os rolamentos dos mancais utilizados possuem abertura para um eixo de diâmetro 15 mm. Após os serviços de usinagem, uma das peças deve ser cortada em formato triangular, para que possa se encaixar no rotor entre as pás na parte frontal da turbina, conforme Figura A33.



Figura A 32 - Flange de fixação do rotor da turbina.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 33 - Flange de fixação do rotor da turbina.

FONTE: Autores (2017)

5.2.2. Flange Suporte dos Rotores do Gerador

Esta peça foi adaptada para realizar a fixação dos rotores do gerador ao eixo de acoplamento com a turbina. Originalmente, exerce a função de guia do colar de embreagem do VW - Gol Special. A peça é composta por uma estrutura única, fabricada em aço, conforme observado na Figura A34.

Com fim de atender às necessidades do projeto, serão necessários os seguintes serviços de usinagem: realizar o embuchamento dos flanges para um diâmetro interno de 15 mm, para que que seja possível fazer um acoplamento flange x eixo de forma centralizada; adicionar um parafuso freno nas peças em que se acomodará uma chaveta presente no eixo. Este recurso fará com que as peças possuam movimentos solidários sem escorregamentos. De acordo com a Figura A35.



Figura A 34 - Flange de Fixação dos rotores do gerador.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 35 – Embuchamento dos rotores do gerador.

FONTE: Autores (2017)

5.2.3. Montagem do sistema de acoplamento dos rotores

Após a aquisição dos mancais, eixo e acoplamentos, deve-se realizar uma pré-montagem do conjunto, conforme Figuras A36 e A37. A montagem serve para verificar as distâncias entre os rotores e mancais. Realiza-se a medição da distância entre os dois rotores do gerador, medida que será utilizada para realizar os recortes do leme para alojamento do alternador, processo detalhado no item 5.1.2.



Figura A 36 - Montagem do Sistema de coplamente dos rotores do gerador e mancais no eixo de acoplamento.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 37 - Montagem do Sistema de coplamente entre os rotores do gerador e o rotor da turbina.

FONTE: Autores (2017)

5.3. Gerador

5.3.1. Estator e rotores

O projeto contempla uma máquina síncrona de polos fixos e fluxo axial. O estator será do tipo toroidal sem ranhuras e os dois rotores, externos com imãs salientes. Tanto o estator quanto os rotores serão fabricados em chapa de aço carbono com 3 mm de espessura, material que apresenta boa permeabilidade magnética.

O sistema que compõe o gerador, não pode possuir erros construtivos de desalinhamentos, folgas ou irregularidades nas superfícies dos discos de rotor ou do estator. Tal cuidado deve ser mantido para redução dos riscos de danos físicos às bobinas e geração de vibrações, ruídos, oscilações de conjugado, fadiga em materiais e redução no rendimento da máquina.

- **Material**
 - Chapa de aço de 500x400x3 mm;
 - Desenho molde construtivo;
 - Pincel 2”;
 - Cola tipo PVA;
 - Lixa de aço número 100;
 - Saco de pano;
 - Disco de corte rápido de 4” para aço;
 - Disco de desbaste de 4” para aço.

- **Ferramentas**

- Esmerilhadeira de 4”;
- Ponteiro;
- Martelo;
- Espátula 2”;
- Lima;
- Trena métrica.

Inicialmente, realiza-se uma limpeza do chapa de aço, utilizando uma lixa e um pano. Devido à natureza de reutilização da chapa, foi necessária a retirada de algumas barras de esforço que estavam soldadas à chapa, como visto na Figura A38. Uma vez limpa, verifica-se a ausência de trincas, buracos e demais imperfeições que poderão causar defeitos nas peças. A Figura A39 apresenta as ferramentas utilizadas para esses processos.



Figura A 38 - Chapa de aço
600x400x3mm.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 39 - Ferramentas utilizadas para
fabricação do estator e rotores.

FONTE: Autores (2017)

A construção do estator e rotores da máquina elétrica foram feitos adotando a mesma metodologia aplicada para fabricação das pás, leme e rotor da turbina. Antecedendo o corte, foi colado um molde construtivo (Figura A40) impresso em escala 1:1, correspondente à Figura A5, disponibilizado em mídia no Apêndice B. Para a colagem, deve-se utilizar o mesmo percentual de mistura de cola aplicada anteriormente.

O próximo passo, após a secagem do papel, é realizar os recortes utilizando a esmerilhadeira, conforme as Figuras A41, A42 e A43.



Figura A 40 - Colagem do molde construtivo do estator e rotores da máquina elétrica em chapa de aço.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 41 - Fabricação do estator e rotores com a esmerilhadeira de 4" e disco de corte rápido.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 42 - Recorte do estator e rotores em aço.

FONTE: Autores (2017)

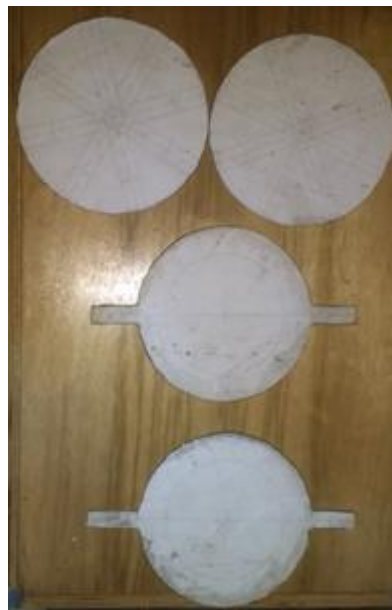


Figura A 43 - Estator e rotor com acabamento externo finalizado.

FONTE: Autores (2017)

Os acabamentos externos e internos devem ser realizados utilizando a esmerilhadeira com o disco de desbaste, conforme as Figuras A44 e A45.



Figura A 44 - Recorte e acabamento interno do estator.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 45 - Recortes do estator e rotores finalizados.

FONTE: Autores (2017)

Depois de finalizados os recortes dos rotores e estator, as duas metades que compõem o estator devem ser soldadas para aumentar a espessura do entreferro. O processo pode ser observado nas Figuras A46, A47 e A48.



Figura A 46 - Soldagem das partes do estator.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 47 - Acabamento nas bordas interna e externa do estator com a lixadeira e disco de desbaste.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 48 - Entreferro do estator finalizado.

FONTE: Autores (2017)

Juntamente com a fabricação dos rotores e estator do gerador, devem ser fabricados os suportes para fixação do estator ao leme da turbina. O suporte consiste em uma cantoneira de 2", fabricada em aço. Como observado na Figura A49, o conjunto será fixado por parafusos tipo M6 com cabeça sextavada e porca.



Figura A 49 - Fabricação dos suportes do estator.

FONTE: Autores (2017)

Finalizada a construção da estrutura dos rotores deve-se realizar o mesmo processo aplicado ao rotor e leme da turbina para realizar a remoção da tinta velha, tendo seu resultado observado na Figura A50.



Figura A 50 - Estrutura dos rotores do gerador após limpeza.

FONTE: Autores (2017)

5.3.2. Bobinas do estator

O estator da máquina será responsável por receber a indução gerada pelos ímãs em movimento e converter o torque em potência elétrica.

Material

- Fita Crepe;
 - Fio de cobre 2mm²;
 - Estanho 60/40;
 - Termo retrátil 6, 10 e 12 mm;
 - Cabo Flexível 2,5 mm²;
 - Alicates de corte;
 - Alicates universal;
 - Parafuso M6, cabeça sextavada 11 mm.
-
- **Ferramentas**
 - Ferro de solda;
 - Trena métrica;
 - Furadeira com kit de brocas;
 - Jogo de chave combinada.

O estator deve conter 18 bobinas com 72 espiras. Cada uma deve ser fabricada utilizando-se fio de cobre esmaltado com 2 mm² (AWG 14), conforme dimensionado no trabalho apresentado.

Primeiramente, realiza-se o enrolamento do estator com fita crepe, sobrepondo 4 (quatro) camadas de fita para garantir que as arestas do núcleo não irão ferir esmalte do fio de cobre e causar uma falha no equipamento que pode deixá-lo inválido. Na sequência, são feitas as marcações das posições das bobinas, conforme demonstrado nas Figuras A51 e A52.

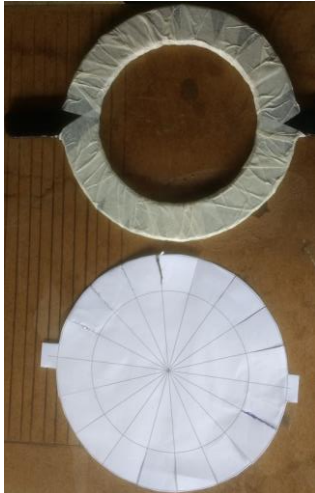


Figura A 51 – Molde das posições das bobinas.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 52 - Marcação das posições das bobinas.

FONTE: Autores (2017)

Após a marcação das posições, realiza-se o bobinamento do estator. O quantitativo de espiras por bobina deve ser feito de acordo com o dimensionado no projeto para que a máquina atenda aos parâmetros necessários. O enrolamento das bobinas deve ser feito de forma que as mesmas apresentem 9 espiras na base e 8 espiras sobrepostas. Ao finalizar cada camada de espira deve-se inserir uma camada de fita crepe. Cada bobina gasta o equivalente a 200 g de fio. O processo de fabricação pode ser observado nas Figuras A53 e A54.



Figura A 53 - Enrolamento das bobinas do estator.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 54 - Enrolamento do estator finalizado.

FONTE: Autores (2017)

Ao término da confecção das bobinas, deve-se efetuar o teste de isolamento de cada bobina com o núcleo, para então realizar a interligação das mesmas em 3 (três) grupos com 6 (seis) bobinas ligadas em série, sendo os 3 (três) grupos ligados em estrela, conforme esquema mostrado nas Figuras A55 e A56.



Figura A 55 - Fechamento das bobinas.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 56 - Conclusão do fechamento das bobinas.

FONTE: Autores (2017)

ATENÇÃO:

- É necessário ser muito cuidadoso para que nada agrida ao isolamento do fio de sobre. Devem ser observados o estado das arestas núcleo e o processo de bobinamento;
- Este é um dos processos mais críticos da fabricação, realize calmamente e com atenção;
- Construa uma “bobina teste” antes do bobinamento das demais, a fim de criar uma maior facilidade.

Uma vez pronto, o estator deve ser protegido por um invólucro de resina para que, em caso de qualquer choque mecânico, o mesmo não seja danificado. Para tal, deve-se primeiramente fabricar um molde em isopor no formato desejado, conforme Figura A57, para confecção do molde é ideal que seja utilizado um estilete no recorte do isopor. O molde então deverá ser revestido de fita crepe em todos os pontos onde a resina entrará em contato, conforme Figura A58. Devem ser aplicadas, no mínimo, 4 camadas de fita sobrepostas, afim de evitar vazamentos da resina.



Figura A 57 - Confecção do molde em isopor para envelopamento do estator.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 58 - Isolamento do molde com fita crepe.

FONTE: Autores (2017)

Ao posicionar o estator realiza-se a aplicação da resina gradativamente, certificando-se que a mesma não perfurou a forma, conforme Figuras A59 e A60. A mistura de resina deve seguir a proporção de 30 gotas de catalizador para cada 100 ml de resina. Aguarda-se o processo de cura por 48 horas e o estator pode ser desenformado, conforme Figura A61. Depois de desenformado, realiza-se a fixação dos suportes do estator, conforme Figura A62.

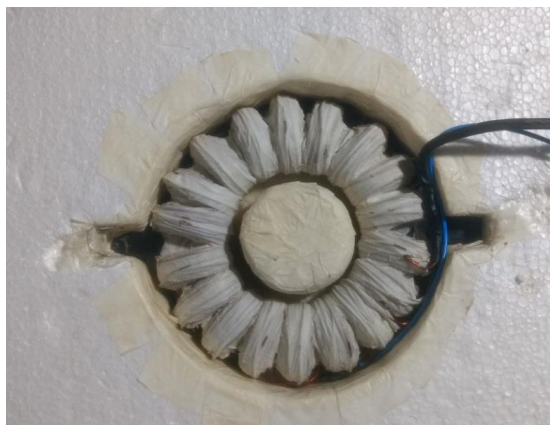


Figura A 59 - Posicionamento do estator no molde.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 60 - Envolvimento do estator em resina.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 61 - Estator finalizado.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 62 - Fixação dos suportes do estator.

FONTE: Autores (2017)

ATENÇÃO:

- Durante o processo de inserção da resina, foi identificada a necessidade de adicionar algumas tiras de fibra de vidro sobre as bobinas. Este processo deve ser feito para que, quando a resina seque, não ocorram trincas no revestimento do estator causadas pelas expansões térmicas.

5.3.3. Fixação dos imãs

Os imãs são fundamentais para gerar o fluxo magnético de excitação da máquina. A fixação dos imãs foi feita utilizando, basicamente, cola epóxi e um molde modelo, para que os mesmos não fiquem desalinhados.

Material

- Recorte de Eucatex de 200x200mm;
 - Desenho molde construtivo em papel, em escala 1:1 (impresso em impressora convencional A4);
 - Cola tipo PVA;
 - Pano de limpeza;
 - Cola epóxi.
- **Ferramentas**
 - Serra tico-tico com lâmina de serra para madeira;
 - Trena métrica;
 - Furadeira;
 - Brocas de 3 e 6mm para furadeira.
 - Duas chaves combinadas 10mm.

Primeiramente, o molde é impresso e colado no recorte de Eucatex, realizando-se a colagem de acordo com o mesmo processo aplicado no Item 5.1.1 do projeto. Após a secagem, deve-se realizar recortes para os ímãs na madeira utilizando o desenho como guia, conforme as Figuras A63 e A64.

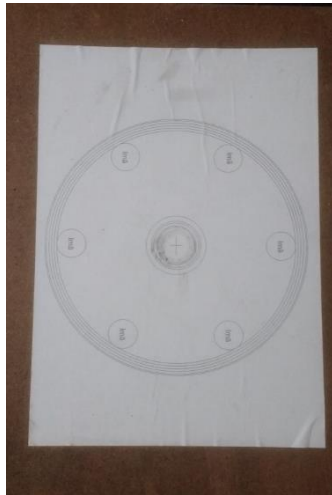


Figura A 63 - Colagem do molde de posicionamento dos ímãs.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 64 - Recorte das posições dos ímãs no molde.

FONTE: Autores (2017)

Após a confecção do molde, deve-se garantir a fixação do mesmo no rotor de forma alinhada, para que não haja risco das peças se descentalizarem durante a colagem. Para tal, realizou-se uma furação no molde de acordo com os furos de fixação já existentes nos rotores, originalmente utilizados para fixação do mancal, conforme mostrado na Figura A65.



Figura A 65 - Detalhe de fixação do molde de fixação dos imãs.

FONTE: Autores (2017)

Para proceder-se com a identificação da polaridade dos imãs, antes da colagem, verifica-se o sentido do polo magnético N no local onde o projeto está sendo desenvolvido. Uma vez identificado, posiciona-se um recorte de isopor com a marcação N em um recipiente com água. Ao colocar-se o imã sobre o isopor, torna-se possível identificar sua respectiva polaridade e anotá-la usando uma caneta permanente. Vide Figura A66.



Figura A 66 - Identificação da polaridade do imã.

FONTE: Autores (2017)

Realiza-se a montagem do molde no rotor e o posicionamento dos ímãs sobre a placa de Eucatex, de maneira próxima à posição em que serão fixados, conforme Figura A67. Após os preparativos, realiza-se a colagem dos ímãs. Para tal, prepara-se uma pequena porção de cola epóxi, conforme indicado no manual de uso do produto. Aplicando-se uma pequena quantidade de cola na posição do ímã, vide Figura A68, e então, arrastando-se o ímã para o local, vide Figura A69. Deve-se aguardar a cura da cola por pelo menos 30 minutos. Passado este tempo pode-se realizar a remoção do molde de colagem, conforme mostrado na Figura A70.



Figura A 67 - Posicionamento dos ímãs no molde do rotor.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 68 - Aplicação de cola no rotor.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 69 - Colagem dos ímãs no rotor do gerador.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 70 - Remoção do molde de colagem dos ímãs no rotor.

FONTE: Autores (2017)

5.4. Montagem

Ao obter todas as peças da turbina e gerador prontas, deve-se realizar a montagem da turbina eólica. Para tal será necessária a utilização dos seguintes materiais e ferramentas.

- **Material**
 - Parafuso M6, cabeça sextavada 11 mm.

- **Ferramentas**
 - Alicate universal;
 - Furadeira com kit de brocas;
 - Chave combinada 11mm.

Realiza-se primeiramente a montagem das hélices no rotor e, em seguida, a pré-montagem dos suportes do estator no mesmo. Prosseguindo, efetua-se o posicionamento do estator e rotores do gerador no leme. Uma vez posicionadas, realiza-se a fixação das peças utilizando os parafusos, conforme demonstrado nas Figuras A71, A72 e A73.



Figura A 71 – Arranjo das peças da turbina em suas respectivas posições de montagem.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 72 – Arranjo das peças da turbina em suas respectivas posições de montagem.

FONTE: Autores (2017)



Figura A 73 – Montagem da turbina eólica.

FONTE: Autores (2017)

5.4.1. Montagem final da turbina eólica

Após todos os componentes serem instalados (Figura A73), deve-se fixar o nariz da turbina eólica. Com a integração do nariz ao sistema consegue-se chegar à montagem final do aerogerador, conforme Figura A74.

Deve-se salientar que o projeto e fabricação do suporte de sustentação e escovas ficam a cargo do projetista.



Figura A 74 – Montagem final da turbina eólica.

FONTE: Autores (2017)