



UNISUL

UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

AMANDA MENDES FERREIRA GOMES

MATHEUS TRIERVEILER

**DESENVOLVIMENTO DE UM MINI GERADOR EÓLICO DE BAIXO CUSTO
UTILIZANDO A TÉCNICA *DO IT YOURSELF***

Palhoça

2018

AMANDA MENDES FERREIRA GOMES

MATHEUS TRIERVEILER

**DESENVOLVIMENTO DE UM MINI GERADOR EÓLICO DE BAIXO CUSTO
UTILIZANDO A TÉCNICA *DO IT YOURSELF***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro(a) Eletricista.

Orientador: Prof. Anderson Soares André, Dr. Eng.

Coorientador: Prof. Cláudio Coelho, Dr. Eng.

Palhoça

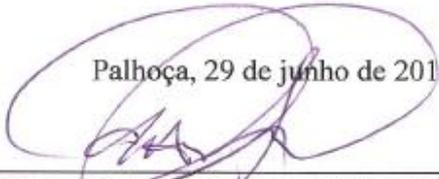
2018

AMANDA MENDES FERREIRA GOMES
MATHEUS TRIERVEILER

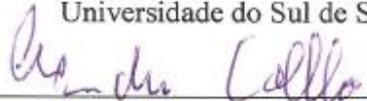
**DESENVOLVIMENTO DE UM MINI GERADOR EÓLICO DE BAIXO CUSTO
UTILIZANDO A TÉCNICA *DO IT YOURSELF***

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro(a) Eletricista e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina.

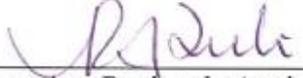
Palhoça, 29 de junho de 2018



Professor e orientador Anderson Soares André, Dr. Eng.
Universidade do Sul de Santa Catarina



Professor e coorientador Cláudio Coelho, Dr. Eng.
Universidade do Sul de Santa Catarina



Professora Ana Regina de Aguiar Dutra, Dra.
Universidade do Sul de Santa Catarina



Professor Fábio Ignácio da Rosa, Esp.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Dedicamos este Trabalho de Conclusão de Curso a todos aqueles que acreditam que mais importante do que sonhar, é realizar.

AGRADECIMENTOS

Amanda Mendes Ferreira Gomes

Agradeço primeiramente a Deus por sempre me abençoar, dando-me força e saúde para alcançar esse sonho.

Gostaria de agradecer em especial aos meus avós, Efigênia Ferreira e José Miguel Ferreira (*in memoriam*), por todos os ensinamentos e incomparável amor que me foi dado, sem vocês não seria metade do que sou agora. Aos meus pais, Davi Gomes e Wilma Mendes, por me darem o dom da vida e ao meu padrasto Philippe Petropulos por todo apoio durante esses anos que estou em Santa Catarina. Aos meus irmãos, Gustavo e Patrícia, por aguentarem meu mal humor e a pregação moral de irmã mais velha.

Gostaria de agradecer também aos meus familiares e amigos por suportarem tanto tempo sem minha presença. Aos meus amigos Matheus Trierveiler e Willian Gomes pelas horas de estudo e discussões. À minha amiga Estefane Joice que sempre me mostrou que eu era capaz. Ao meu namorado Eduardo Clasen pelo amor e suporte nos momentos em que parecia impossível chegar ao fim dessa caminhada.

À UNISUL, seus professores, aos nossos orientadores e a todas as pessoas que contribuíram para que esse trabalho fosse concluído.

Matheus Trierveiler

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado saúde e força para esta conquista.

A minha mãe, Lucia Trierveiler, irmã, Camila Trierveiler e sobrinho, Leonardo Trierveiler Rosset, por todo o apoio durante esses anos, por compreenderem as incontáveis horas de ausência e afastamento, por me incentivarem sempre pela busca dos meus sonhos e por me ajudarem a chegar até o final dessa etapa.

Aos meus amigos Eduardo Clasen e Willian Moreira Gomes por fazerem parte desta caminhada. Aos amigos que de alguma forma me afastei ao longo deste curso, mas que sei que estavam sempre me apoiando.

Em especial agradeço a Amanda Mendes Ferreira Gomes sem a qual este trabalho não seria possível.

Também agradeço a todos os meus amigos do Operador Nacional do Sistema Elétrico por todo o incentivo e apoio durante esses anos de curso e por todo o conhecimento compartilhado.

Aos professores da UNISUL que ao longo do curso transmitiram seus conhecimentos.

Por fim agradeço aos nossos orientadores e a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para que este trabalho pudesse ser concluído.

“Veni, vidi, vici.”
(Júlio César, 47 a.C.)

RESUMO

As fontes de energias renováveis tem sido alvo de grandes investimentos nos últimos anos, impulsionados pela preocupação com o meio ambiente acrescidos da necessidade de novas fontes de energia para diversificação da matriz energética e universalização da energia. Porém, apesar de todo investimento que vem sendo realizado, estima-se que 16% da população mundial ainda não tem acesso à energia elétrica. Apesar do Brasil ter uma matriz energética predominantemente limpa, ainda deixa a desejar na exploração das fontes não-convencionais, tais como solar, eólica e biomassa. Os recursos eólicos disponíveis podem chegar a 143,5 GW, sendo que atualmente são explorados apenas 9% deste potencial. Os aerogeradores, equipamentos utilizados para conversão eletromecânica da energia dos ventos, podem variar sua forma construtiva de acordo com a aplicação e geografia local, de forma a obter o melhor aproveitamento energético. O presente trabalho busca desenvolver os fundamentos necessários para construção de um mini gerador eólico capaz de gerar energia para alimentar uma pequena carga de forma isolada (*off-grid*). Para aplicar os conhecimentos consolidados ao longo deste Trabalho de Conclusão de Curso, foi implementado um protótipo, em tamanho real, de um mini gerador eólico do tipo Savonius, utilizando materiais acessíveis e de fácil manuseio. Para a construção do mini gerador eólico foi feito uso da técnica DIY (do inglês *Do It Yourself*), que simplifica a construção e possível réplica deste protótipo.

Palavras-chave: Energia Eólica. Mini Gerador Eólico. Energia Renovável. DIY.

ABSTRACT

Renewable energy sources have been target of huge investments in recent years, driven by the concern for environment plus the need for new sources of energy to diversify the energy matrix and universalize energy. However, despite all investment that has been made, it is estimated that 16% of world's population still doesn't have access to electrical energy. Although Brazil has a predominantly clean energy matrix, it still fails to use unconventional sources, such as solar, wind and biomass. The available wind resources can reach 143,5 GW, and currently only 9% of this potential is exploited. Wind turbines, equipment used for the electromechanical conversion of wind energy, can diversify their constructive form according to the application and local geography, to obtain the best efficiency. The present project will seeks to develop the necessary knowledge for the construction of a mini-generator of energy capable of generating energy to feed a load in an isolated way. To apply the concepts developed in this dissertation a prototype of a Savonius type wind turbine has been developed, using accessible and easy-to-handle materials. For the construction of the mini wind generator has been made use of the DIY (Do It Yourself) technique, which simplifies the construction and possible replication of this prototype.

Keywords: Wind Energy. Small Wind Generator. Renewable Energy. DIY.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Primeiro Cata-vento Inventado por Charles Brush.....	22
Figura 2 - Cata-vento Multipás para Bombeamento de Água.....	22
Figura 3 - Parque Eólico <i>Onshore</i> e <i>Offshore</i>	25
Figura 4 - Potencial Eólico Estimado para Vento Médio Anual Igual ou Superior a 7,0m/s ..	27
Figura 5 - Fluxo de ar Através de uma Área Transversal A.....	32
Figura 6 - Movimentos Atmosféricos em Escala Planetária	35
Figura 7 - Efeito Coriolis.....	36
Figura 8 - Tipos de Rotores de Aeroeradores.....	37
Figura 9 - Comparação Estrutural entre Aeroeradores de Eixo Vertical e Eixo Horizontal ..	38
Figura 10 - Posicionamento do Aeroerador com Relação a Posição do Vento.....	41
Figura 11 - Principais Partes de um Aeroerador de Eixo Horizontal	43
Figura 12 - Diferentes Tipos de Aeroeradores de Eixo Vertical	44
Figura 13 - Vistas de um Aeroerador do Tipo Savonius	45
Figura 14 - Sentido do Vento em uma Turbina Eólica Savonius	46
Figura 15 - Turbina Eólica do Tipo Darrieus	46
Figura 16 - A Conversão Eletromecânica da Energia nos Geradores e Motores Elétricos.	47
Figura 17 - Rotor de Polos Salientes e Rotor de Polos Lisos	50
Figura 18 - Máquinas Síncronas Trifásicas	51
Figura 19 - Circuito Equivalente de uma Máquina Síncrona	52
Figura 20 - Fluxo de Potência de uma Máquina Síncrona	52
Figura 21 - Diagrama Fasorial Simplificado com R_a Ignorada	54
Figura 22 - Diagrama em Corte de Motores de Indução	56
Figura 23 - Circuito Equivalente por Fase de um Motor de Indução	58
Figura 24 - Fluxo de Potência de uma Máquina de Indução	59
Figura 25 - Máquina Rotativa CC	63
Figura 26 - Tensão de Saída da Espira	63
Figura 27 - Produção de uma Tensão de Saída CC	64
Figura 28 - Comparação de Tensões Com Diferentes Quantidades de Espiras	65
Figura 29 - Circuito Equivalente de um Gerador CC	66

Figura 30 - Circuito dos Diferentes Tipos de Excitação	67
Figura 31 - Diagrama Simplificado de uma Máquina CC.....	68
Figura 32 - Vista superior da UNISUL - Campus Grande Florianópolis.....	70
Figura 33 - Vistas do Rotor Savonius.....	72
Figura 34 - Comportamento do Vento Após Transpor um Aerogerador do Tipo Savonius	73
Figura 35 - Cocho Utilizado no Protótipo	76
Figura 36 - Dínamo Utilizado na Construção do Protótipo.....	78
Figura 37 - Relação de Polias: Motoras e Movidas.....	79
Figura 38 - Sistema de Polias com Dois Estágios	80
Figura 39 - Sistema de Polias em Estágios.....	80
Figura 40 - Sistema de Polias Construído	82
Figura 41 - Estruturas de Sustentação para Turbinas do Tipo Savonius	83
Figura 42 - Dínamo com Indicações dos Terminais D+, D- e DF	85
Figura 43 - Conexões para Teste do Dínamo	86
Figura 44 - Dínamo em Teste	87
Figura 45 - Sequência Cronológica de Construção	91
Figura 46 - Indicação das Barras de Madeira para Estrutura	92
Figura 47 - Barras Após o Processo de Pintura com Fundo para Madeira.....	92
Figura 48 - Disposição da Furação das Barras de Madeira	93
Figura 49 - Turbina Fixa ao Eixo e Estrutura.....	94
Figura 50 - Conjunto do Sistema de Transmissão.....	95
Figura 51 - Sistema de Transmissão com Indicação de Alturas.....	96
Figura 52 - Sistema de Polias Fixo na Estrutura	96
Figura 53 - Protótipo Final com Vista Frontal	98
Figura 54 - Protótipo Final com Vista Lateral.....	99
Figura 55 - Grandeza Obtida no Teste do Protótipo.....	100
Figura 56 - Tambor X.....	101
Figura 57 - Béqueres com Solução Proveniente do Processo de Limpeza do Tambor X.....	102

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Potência Total Instalada – Energias Renováveis	19
Gráfico 2 - Potência Total Instalada Brasil – Energias Renováveis	20
Gráfico 3 - Capacidade Instalada Acumulada 2001 - 2016.....	24
Gráfico 4 - Investimentos em Energias Renováveis no Mundo, em Bilhões (US\$)	26
Gráfico 5 - Capacidade Instalada Acumulada Brasil 2005 - 2016	28
Gráfico 6 - Matriz Elétrica Brasileira (GW).....	29
Gráfico 7 - Curvas de Potência – Eólica, Máxima Teórica e Reais	33
Gráfico 8 - Curva Característica de Velocidade <i>versus</i> Conjugado	60
Gráfico 9 - Desempenho dos Principais Geradores Eólicos.....	71
Gráfico 10 - Comparativo Grandezas entre as Estruturas de Turbinas Propostas.....	75
Gráfico 11 - Rotação <i>versus</i> Tensão de Saída	89

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Organização das Fontes de Energias Renováveis	18
Quadro 2 - Usinas por Estado.....	30
Quadro 3 - Tipos de Rotor e Suas Características	40
Quadro 4 - Dimensões das Matérias Primas da Turbina	74
Quadro 5 - Custo para Aquisição e Mão de Obra da Turbina	74
Quadro 6 - Pesquisa de Preços Dínamo.....	77
Quadro 7 - Relações Teóricas do Sistema de Transmissão	80
Quadro 8 - Comparativo Custo.....	81
Quadro 9 - Quantidade e Tamanho das Polias Utilizadas	81
Quadro 10 - Tipos de Material <i>versus</i> Valor	84
Quadro 11 - Relação de Tensão <i>versus</i> Rotações por Minuto.....	88
Quadro 12 - Relação de Material.....	90
Quadro 13 - Ferramentas Utilizadas	90

LISTA DE SIGLAS

ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
ABDI	Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BNEF	Bloomberg New Energy Finance
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEFET	Centro Federal de Educação Tecnológica
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
DIY	Do It Yourself
DRE	Distributed Renewable Energy
EUA	Estados Unidos da América
EWEA	European Wind Energy Association
FEM	Força Eletromotriz
GWEC	Global Wind Energy Council
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
IRENA	International Renewable Energy Agency
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinada
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SI	Sistema Internacional
TSR	Tip-Speed-Ratio
UNEP	United Nations Environment Programme
UNISUL	Universidade do Sul de Santa Catarina
US\$	United States Dollar
U.S DoE	United States Department of Energy
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
WWEA	World Wind Energy Association

LISTA DE UNIDADES

A	Ampère
Cm	Centímetro
F	Farad
GW	Gigawatt (10^9)
H	Henry
Hz	Hertz
J	Joule
J/s	Joule por Segundo
kg	Quilograma
kg/m ³	Quilograma por Metro Cúbico
kg/s	Quilograma por Segundo
kW	Kilowatt (10^3)
m	metro
m ²	Metro Quadrado
mm	Milímetro
mm ²	Milímetro Quadrado
m/s	Metros por Segundo
MW	Megawatt (10^6)
RPM	Rotações por Minuto
s	Segundo
T	Tesla
TW	Terawatt (10^{12})
TWh	Terawatt Hora
V	Volts
W	Watt
Wb	Weber

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	TEMA	13
1.2	JUSTIFICATIVA	13
1.3	OBJETIVOS	13
1.3.1	Objetivo Geral	14
1.3.2	Objetivos Específicos.....	14
1.4	MOTIVAÇÃO	14
1.5	METODOLOGIA DE PESQUISA.....	15
1.6	ESTRUTURA DO PROJETO	16
1.7	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	16
2	DO IT YOURSELF	17
3	ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	18
3.1	ENERGIA EÓLICA: CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA.....	20
3.1.1	Energia Eólica: Panorama Mundial.....	23
3.1.2	Energia Eólica: Panorama Nacional	26
4	ESTADO DA ARTE DA TECNOLOGIA EÓLICA.....	31
4.1	CONVERSÃO DE ENERGIA	31
4.2	REGIME DOS VENTOS	34
4.3	ESTRUTURA BÁSICA DE AEROGERADORES CONVENCIONAIS	37
4.3.1	Forças sobre um objeto.....	39
4.3.2	Rotores de Eixo Horizontal	40
4.3.3	Rotores de Eixo Vertical	44
4.4	GERADOR ELÉTRICO	47
4.4.1	Máquinas CA.....	49
4.4.1.1	Máquinas Síncronas.....	49
4.4.1.2	Máquinas de indução.....	55
4.4.2	Máquina CC.....	62
5	MINI GERADOR EÓLICO	69
5.1	ESTUDO DO PROTÓTIPO	69

5.1.1 Rotor	69
5.1.1.1 Eixo do rotor.....	69
5.1.1.2 Tipo de turbina	70
5.1.2 Gerador	76
5.1.3 Sistema de Transmissão	78
5.1.4 Estrutura	82
5.2 TESTES DE DESEMPENHO DO DÍNAMO	84
5.2.1 Ensaio com Carga	84
5.2.2 Rotação versus Tensão de Saída	87
5.3 PROTÓTIPO	89
5.3.1 Materiais e Ferramentas	89
5.3.2 Processo Construtivo	91
5.3.2.1 Construção da Estrutura	91
5.3.2.2 Construção da Turbina	93
5.3.2.3 Construção do Sistema de Transmissão	94
5.3.3 Protótipo e Considerações Finais	97
5.4 DIFICULDADES ENCONTRADAS	100
5.4.1 Tambor Metálico	101
5.4.2 Sistema de Transmissão	102
6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	104
REFERÊNCIAS	106
ANEXO A – PROJETO ESTRUTURAL MINI GERADOR EÓLICO	111
ANEXO B – CORTES TÁBUAS DE SUSTENTAÇÃO	114

1 INTRODUÇÃO

Perante a crescente preocupação com efeitos relacionados ao meio ambiente e ao aquecimento global, os governos através de acordos de âmbito internacional, tal como o Acordo de Paris¹, estão envidando esforços na busca por alternativas para reduzir os impactos causados pelas atividades humanas. Dentre as atividades mais influentes está a produção de energia elétrica baseada em combustíveis fósseis, como carvão mineral, gás natural e o petróleo. Essas fontes são amplamente utilizadas por países industrialmente desenvolvidos contribuindo de forma significativa para o aumento dos níveis de poluição.

Além da preocupação com o meio ambiente, os governos também estão buscando a universalização da energia elétrica. Estima-se que 16% da população mundial ainda não tem acesso a este recurso (WORLD ENERGY OUTLOOK, 2016). Um dos grandes motivos está no fato de que uma parcela significativa desta população vive em áreas rurais, onde o acesso à energia é dificultado pelas longas distâncias das unidades geradoras e os elevados custos de transmissão.

Este cenário impulsionou o estudo e o desenvolvimento do mercado para novas formas de produção de energia sem a dependência de sistemas centralizados de geração, baseados em fontes renováveis. Neste cenário, destacam-se a energia solar, eólica e biomassa. Porém, os custos de implementação dessas soluções ainda são relativamente elevados para pequenos consumidores, o que acaba desestimulando os investimentos. Com isso, cresceu a tendência pela busca dos produtos DIY (do inglês *Do It Yourself*), onde os próprios consumidores constroem suas soluções com matérias primas de fácil acesso afim de atender às suas necessidades.

Neste sentido, o trabalho que se segue busca desenvolver uma solução alternativa para a geração de energia de forma isolada, de baixo custo e de fácil manuseio, capaz de gerar energia elétrica para pequenas cargas.

¹ Na 21ª Conferência das Partes (COP21) da UNFCCC, em Paris, foi adotado um novo acordo com o objetivo central de fortalecer a resposta global à ameaça da mudança do clima e de reforçar a capacidade dos países para lidar com os impactos decorrentes dessas mudanças. (MMA, 2017)

1.1 TEMA

Estudo e desenvolvimento de um mini gerador eólico de baixo custo e de fácil montagem.

1.2 JUSTIFICATIVA

As fontes de energias renováveis vêm sendo tratadas como solução para diversos problemas, dentre eles destacam-se a crescente preocupação com o meio ambiente e o atendimento da população em locais isolados.

A mecânica e o processamento de energia de um aerogerador industrializado tendem a ser complexas, além de possuir um elevado custo, dificultando que indivíduos de baixa renda tenham acesso a tal tecnologia. Um aerogerador de pequeno porte de 1 kW pode custar entre R\$ 2.000,00 e R\$ 4.000,00 e um de 2 kW pode custar entre R\$ 9.000,00 e R\$ 12.000,00, para uma aplicação residencial². Além disso, não possuem customização para se aplicar às necessidades do usuário e tem um processo produtivo que, geralmente, não utilizam materiais reaproveitados. Diante disto, da busca por fontes alternativas de geração de energia elétrica e fazendo uso do potencial eólico brasileiro disponível, estimado em 143,5 GW (AMARANTE, 2001), além de consolidar os conhecimentos adquiridos pelos autores ao longo da graduação, justifica-se esse trabalho como guia para a construção de um mini gerador eólico, permitindo assim um maior acesso a essa tecnologia.

1.3 OBJETIVOS

Este tópico apresentará o objetivo geral e específicos propostos para o presente trabalho.

² Preços baseados em setembro de 2017, dólar comercial R\$ 3,10.

1.3.1 Objetivo Geral

Este Trabalho de Conclusão de Curso tem por objetivo desenvolver um mini gerador eólico de baixo custo e de fácil montagem. Objetiva-se utilizar materiais de fácil acesso, preferencialmente reutilizáveis, afim de extrair o melhor custo benefício para o modelo proposto.

1.3.2 Objetivos Específicos

Apresentam-se a seguir os objetivos específicos propostos para o presente trabalho:

- a) analisar e definir o tipo de turbina a ser utilizada na construção do mini gerador eólico;
- b) analisar e definir o tipo de gerador a ser utilizado;
- c) analisar e definir quais os materiais a serem utilizados para montagem do mini gerador eólico;
- d) estabelecer limitações mecânicas e elétricas do mini gerador eólico;
- e) projetar a mecânica do mini gerador eólico;
- f) montar protótipo de mini gerador eólico.

1.4 MOTIVAÇÃO

A energia fornecida pelos ventos é utilizada a muito tempo pela civilização, seja para impulsionar uma bomba hidráulica, alimentar uma pequena carga ou mover uma grande usina eólica. Por isso, é possível encontrar diversos tipos de aerogeradores, desde os produzidos em grande escala para uma aplicação com um grande fator energético até os montados manualmente para um aproveitamento individual e específico (AMARANTE, 2001).

Uma das grandes preocupações do século XXI gira em torno do cuidado com o meio ambiente, de todas as formas possíveis. Para tal, o desenvolvimento de um mini gerador eólico capaz de atender as necessidades do indivíduo vinculado ao uso de materiais reutilizáveis e que possa ser montado pelo próprio usuário é uma solução completa do ponto de vista sociocultural e socioeconômico.

1.5 METODOLOGIA DE PESQUISA

Este Trabalho de Conclusão de Curso está relacionado ao estudo da energia eólica e seu principal equipamento, o aerogerador, além da construção de um protótipo de um mini gerador eólico. Para construção de um conhecimento sobre a tecnologia, a pesquisa é o processo escolhido para ser utilizado. Segundo Fonseca (2002, p. 20):

A pesquisa é a atividade nuclear da ciência. Ela possibilita uma aproximação e entendimento da realidade a investigar. A pesquisa é um processo permanentemente inacabado. Processa-se através de aproximações sucessivas da realidade, fornecendo subsídios para uma intervenção no real.

Para a elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso será utilizado a pesquisa bibliográfica e a experimental.

De acordo com Fonseca (2002, p. 32):

A pesquisa bibliográfica é feita a partir do levantamento de referências teóricas já analisadas, e publicadas por meios escritos e eletrônicos, como livros, artigos científicos, páginas de web sites. Qualquer trabalho científico inicia-se com uma pesquisa bibliográfica, que permite ao pesquisador conhecer o que já se estudou sobre o assunto. Existem, porém, pesquisas científicas que se baseiam unicamente na pesquisa bibliográfica, procurando referências teóricas publicadas com o objetivo de recolher informações ou conhecimentos prévios sobre o problema a respeito do qual se procura a resposta.

A pesquisa bibliográfica será essencial para o conhecimento da origem da tecnologia, suas atuais aplicações e desempenho, e suas prospecções. Com ela é possível conhecer os principais projetos desenvolvidos para a área.

A pesquisa experimental dará suporte para o protótipo e indicará o modelo de metodologia para conduzir a construção do protótipo.

O estudo experimental segue um planejamento rigoroso. As etapas de pesquisa iniciam pela formulação exata do problema e das hipóteses, que delimitam as variáveis precisas e controladas que atuam no fenômeno estudado (TRIVIÑOS, 1987).

Gil (2007 apud GERHARDT e SILVEIRA 2009, p. 36) “a pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto”.

1.6 ESTRUTURA DO PROJETO

Este Trabalho de Conclusão de Curso está dividido em sete capítulos. O capítulo 1 apresenta o objetivo geral, objetivos específicos, motivação, metodologia utilizada e as delimitações propostas pelos autores.

O capítulo 2 traz uma contextualização do que é e como se difundiu a técnica DIY.

No capítulo 3 é exposto uma breve contextualização histórica da energia eólica, além de delinear seu panorama mundial e nacional, e conceituar as energias renováveis.

Os recursos e conhecimentos básicos necessários para compreender a produção de energia eólica serão apresentados no capítulo 4.

O capítulo 5 demonstra o estado da arte da tecnologia eólica, discorrendo sobre os tipos de aerogeradores, que se dividem entre rotores de eixo horizontal e eixo vertical, exemplificando suas aplicações. Além disso, disserta também sobre os tipos geradores elétricos, os quais estão separados em duas categorias: máquinas CC e CA.

O protótipo será apresentado no capítulo 6, onde também serão expostos os motivos que levaram as tomadas de decisões realizadas. Indicará ainda as etapas de construção, materiais e ferramentas utilizados, além de explanar sobre as dificuldades encontradas durante o desenvolvimento e construção.

Por fim, no capítulo 7, estão dispostas as considerações finais dos autores, juntamente com as sugestões para trabalhos futuros.

1.7 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho limita-se ao estudo e desenvolvimento do protótipo de um mini gerador eólico de baixo custo, desde a análise do modelo a ser utilizado até sua implementação física, além de apresentar a análise técnica, restringindo-se a aplicações de baixo consumo preferencialmente residenciais, agrícolas ou sistemas isolados.

Não serão abordados assuntos referentes a injeção da energia gerada na rede de distribuição local, ao condicionamento da energia gerada nem serão levadas em consideração as características geográficas locais.

2 DO IT YOURSELF

A técnica *Do It Yourself*³ - DIY, é um método de construção, modificação ou reparação das coisas sem a ajuda direta de especialistas ou profissionais. Pesquisas descrevem o DIY como comportamento onde os indivíduos utilizam matérias primas cruas para produzir, transformar ou reconstruir bens materiais (WOLF e MCQUITTY, 2011).

O termo DIY vem sendo associado aos consumidores desde pelo menos 1912, tendo sido inicialmente aplicado em atividades de melhoria e manutenção (GELBER, 1997).

Conforme Prado (2017):

O DIY fazia referência a projetos de reparos caseiros que as pessoas faziam sozinhas, usando os materiais que tinham à sua disposição. Nas décadas seguintes ao seu surgimento, o movimento começou a ser mais associado à cultura punk e alternativa e à produção musical e midiática independente [...]. Mas a sua força nos anos 2000 está mesmo é nos aspectos do dia a dia [...].

O DIY é bem amplo, e pode ser aplicado de diversas formas, o mais importante é que não é necessário ser um *expert* no que está se propondo fazer, basta procurar por conhecimentos e métodos alternativos (CAMERÂ, 2018).

Chris Anderson, referência quando o assunto é tecnologia, define o movimento DIY como “a próxima revolução industrial” (DESCOLA, 2015).

O movimento está tão difundido, que hoje já é comum encontrar pessoas colocando a mão na massa e economizando gastos com mão de obra (CAMERÂ, 2018). O conceito também é importante para a preservação meio ambiente, pois muitos dos materiais que antes teriam como destino o lixo, passam a ser utilizados.

A internet contribui de forma a potencializar esta técnica, hoje existem milhares de sites focados totalmente no uso desta técnica, neles é possível encontrar uma infinidade de tutoriais para as mais diversas aplicações e soluções.

³ “Faça você mesmo”, em tradução livre.

3 ENERGIAS RENOVÁVEIS

As energias renováveis ou alternativas são aquelas cuja matéria prima é imediatamente reposta pela natureza. Diferentemente das energias não-renováveis como a fósil e a nuclear, as energias renováveis são geradas com os recursos naturais disponíveis em determinada localização, tais como a força dos ventos, quedas d'água ou radiação solar e traz diversos benefícios ao meio ambiente, como a redução da emissão de gases tóxicos, contaminação do solo e escassez das fontes (GOLDEMBERG e LUCON, 2007)

Para Goldemberg e Lucon (2007) a cadeia das energias renováveis pode ser dividida em até dois níveis horizontais: energia primária e energia secundária, além de possuir três níveis verticais: tradicionais, convencionais e novas, conforme é possível observar na Quadro 1.

Quadro 1 - Organização das Fontes de Energias Renováveis

FONTES		ENERGIA PRIMÁRIA		ENERGIA SECUNDÁRIA	
Renováveis	“Tradicionais”	biomassa primitiva: lenha de desmatamento		calor	
	“Convencionais”	potenciais hidráulicos de médio e grande porte		hidreletricidade	
		potenciais hidráulicos de pequeno porte			
	“Novas”	biomassa “moderna”: lenha replantada, culturas energéticas (cana-de-açúcar, óleos vegetais)		biocombustíveis (etanol, biodiesel), termoeletricidade, calor	
		outros	energia solar		calor, eletricidade fotovoltaica
			geotermal		calor e eletricidade
			eólica		eletricidade
maremotriz e das ondas					

Fonte: Adaptado de GOLDEMBERG e LUCON, 2007.

Goldemberg e Lucon (2007, p. 10) definem a separação dos termos “convencionais” e “novas” como:

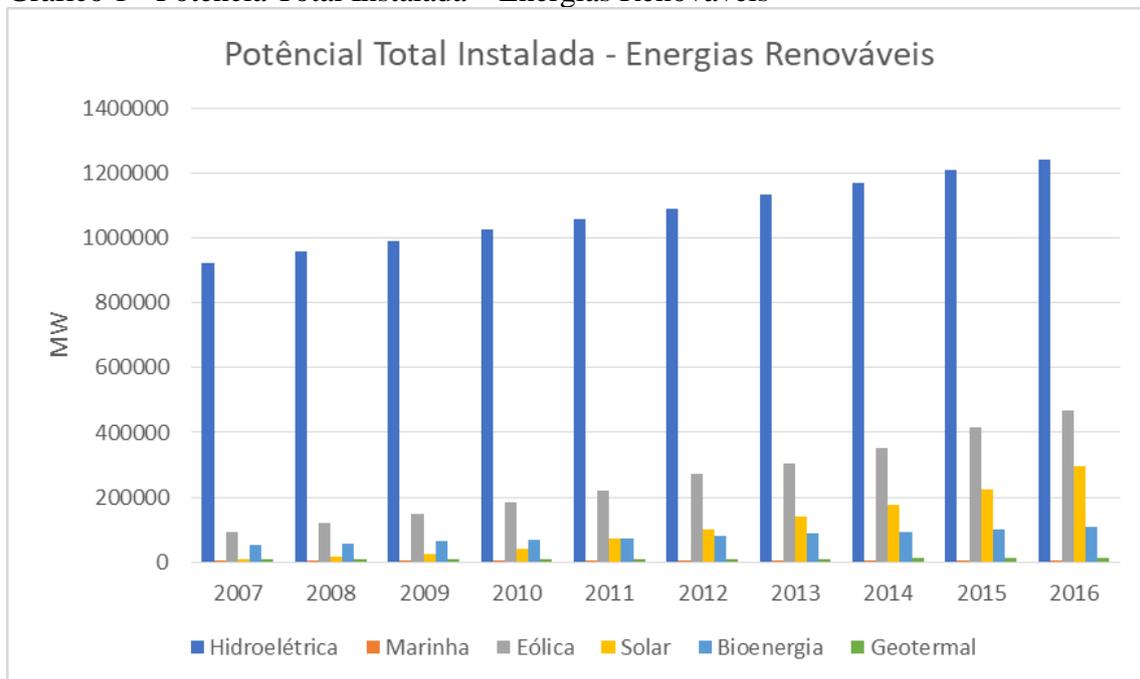
As “convencionais” são tecnologias dominadas e comercialmente disseminadas há muitas décadas, como é o caso das usinas hidrelétricas de grande e médio porte. As “novas” são aquelas que começam a competir comercialmente com as fontes tradicionais, renováveis ou não. É o caso dos painéis solares fotovoltaicos, dos aquecedores solares, das pequenas centrais hidrelétricas (que, apesar de conhecidas, ainda não têm equipamentos a preços amplamente acessíveis), das usinas de geração de eletricidade a partir das ondas e marés, das turbinas eólicas, das usinas geotermiais, da biomassa “moderna”.

Segundo o REN21 (2017) os países têm adicionado mais usinas de fontes renováveis do que usinas de combustíveis fósseis combinados. Isto demonstra um grande esforço coletivo das nações para modificar suas matrizes energéticas de modo a controlar todos os efeitos nocivos oriundos da produção de energia por fontes não renováveis. O avanço da tecnologia, expansão para novos mercados e melhores condições de financiamento contribuíram para a redução dos custos de implementação de projetos utilizando fontes renováveis, principalmente eólica e solar.

O REN21 (2017) ainda traz que no ano de 2014, 19,2% do consumo mundial de energia foi provido através de fontes renováveis, sendo 8,9% oriundo da biomassa tradicional e 10,3% de novas fontes. Ao final de 2016, China, Estados Unidos, Brasil, Alemanha e Canadá eram os países com a maior capacidade instalada em energias renováveis.

IRENA (2017) estima que atualmente a potência total instalada oriunda de fontes renováveis de energia é de aproximadamente 2 TW distribuídos em 6 fontes geradoras. No decorrer de uma década foi adicionado aproximadamente 1 TW, conforme pode ser observado no Gráfico 1.

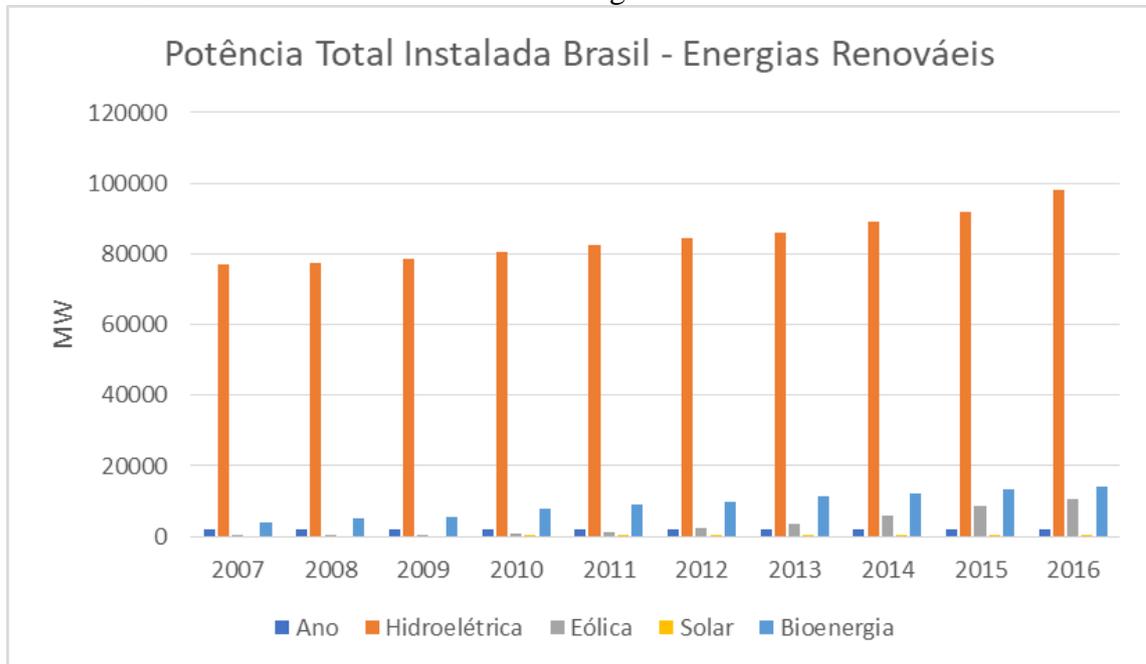
Gráfico 1 - Potência Total Instalada – Energias Renováveis



Fonte: Elaboração dos Autores, com base em IRENA, 2017.

O Brasil também aumentou a participação das energias renováveis em sua matriz como podemos visualizar no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Potência Total Instalada Brasil – Energias Renováveis



Fonte: Elaboração dos Autores, com base em IRENA, 2017.

O setor de energias renováveis empregou 9,8 milhões de pessoas direta e indiretamente em 2016, apresentando um crescimento de 1,1% em relação a 2015. As novas instalações eólicas nos Estados Unidos, Alemanha, Índia e Brasil contribuíram para um crescimento de 7%, atingindo 1,2 milhões de empregos apenas no setor eólico. O setor solar fotovoltaico é o maior empregador, com 3,1 milhões de empregos, com um crescimento de 12% em relação a 2015 (IRENA, 2017).

3.1 ENERGIA EÓLICA: CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA

Segundo Amarante et al. (2001, p. 13):

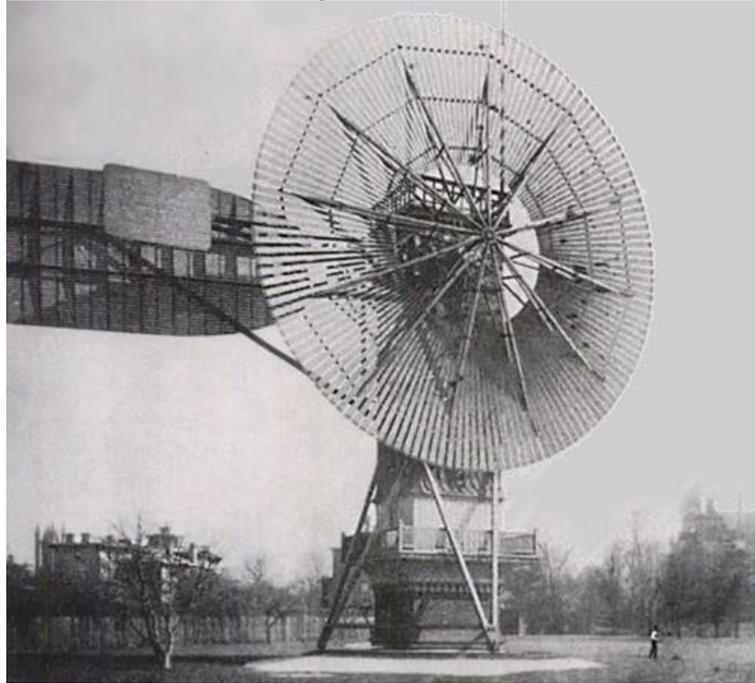
Os primeiros aproveitamentos da força dos ventos pelo homem têm data bastante imprecisa, mas, certamente, ocorreram há milhares de anos, no Oriente. Eram provavelmente máquinas que utilizavam a força aerodinâmica de arrasto, sobre placas ou velas, para produzir trabalho.

Os moinhos de vento existiam já na mais remota antiguidade. Pérsia, Iraque, Egito e China dispunham de máquinas muitos séculos antes de Cristo. Hamurabi, rei da Babilônia (1792-1750 ou 1730-1685 a.c.), criador do império babilônico utilizou moinhos acionados pelo vento para regar as planícies da Mesopotâmia e para a moenda de grãos. Tratavam-se de máquinas eólicas primitivas de rotor vertical com várias pás de madeira ou cana, cuja rotação era transmitida diretamente pelo eixo a pedra do moinho. Na China existem referências da existência de moinhos de rotor vertical e pás a base de telas colocadas sobre uma armação de madeira, que eram utilizados para o bombeamento de água e foram precursoras dos moinhos Persas. O egípcio Heron (também escrito como Hero e Herão) de Alexandria (10 d.C. - 70 d.C.) foi um sábio do começo da era cristã. Geômetra e engenheiro grego, Heron esteve ativo em torno do ano 62 e desenhou em um estudo um moinho vertical de quatro pás (NUNES JUNIOR, 2008).

Ainda segundo Amarante et al. (2001) os cata-ventos multipás chegaram a ser produzidos industrialmente em escalas de centenas de milhares de unidades/ano, por diversos fabricantes, o que possibilitou preços acessíveis a grande parte da população. O uso do cata-vento multipás norte-americano expandiu-se pelos diversos países, inclusive no Brasil. Na década de 1880 encontrava-se quase uma dezena de fabricantes, em todo o território americano.

O modelo de multipás foi largamente utilizado em aplicações que tinham a necessidade de transformar trabalho em energia cinética, principalmente para bombeamento de água (AMARANTE et al., 2001). É possível observar um exemplar do primeiro cata-vento na Figura 1.

Figura 1 - Primeiro Cata-vento Inventado por Charles Brush



Fonte: EDF. Disponível em: goo.gl/uc2gTu. Acesso em: 17 set. 2017.

A Figura 2 apresenta um cata vento ainda em funcionamento nos Estados Unidos da América.

Figura 2 - Cata-vento Multipás para Bombeamento de Água



Fonte: Straatkaart. Disponível em: goo.gl/y93THa. Acesso em: 17 set. 2017.

“O uso do vento para fins elétricos é relativamente recente, data de finais do século XIX na Dinamarca e nos EUA, com a utilização de máquinas que geravam eletricidade a partir do vento, ou aerogeradores” (TESTER et al., 2005 apud TOLMASQUIM et al., 2016, p. 237). “Vale lembrar que a eletricidade com fins comerciais, nos moldes similares ao que conhecemos hoje, data também dos finais do século XIX” (TOLMASQUIM et al., 2016, p. 237).

“Pode-se dizer que o precursor das atuais turbinas eólicas surgiu na Alemanha” (HÜTTER, 1955 apud AMARANTE et al., 2001, p. 13), “já com pás fabricadas em materiais compostos, controle de passo e torre tubular esbelta” (AMARANTE et al., 2001, p. 13).

De acordo com Amarante et al. (2001) a utilização de máquinas eólicas para produção de energia elétrica teve força até 1960, entrando em declínio entre este período e a década de 70, voltando a ascensão em 1980 devido a primeira crise do petróleo. Desde então, diversos países vêm investindo em pesquisas em energia eólica afim de diversificar a matriz energética e aproveitar o recurso renovável.

Segundo Tolmasquim et al. (2016, p. 238):

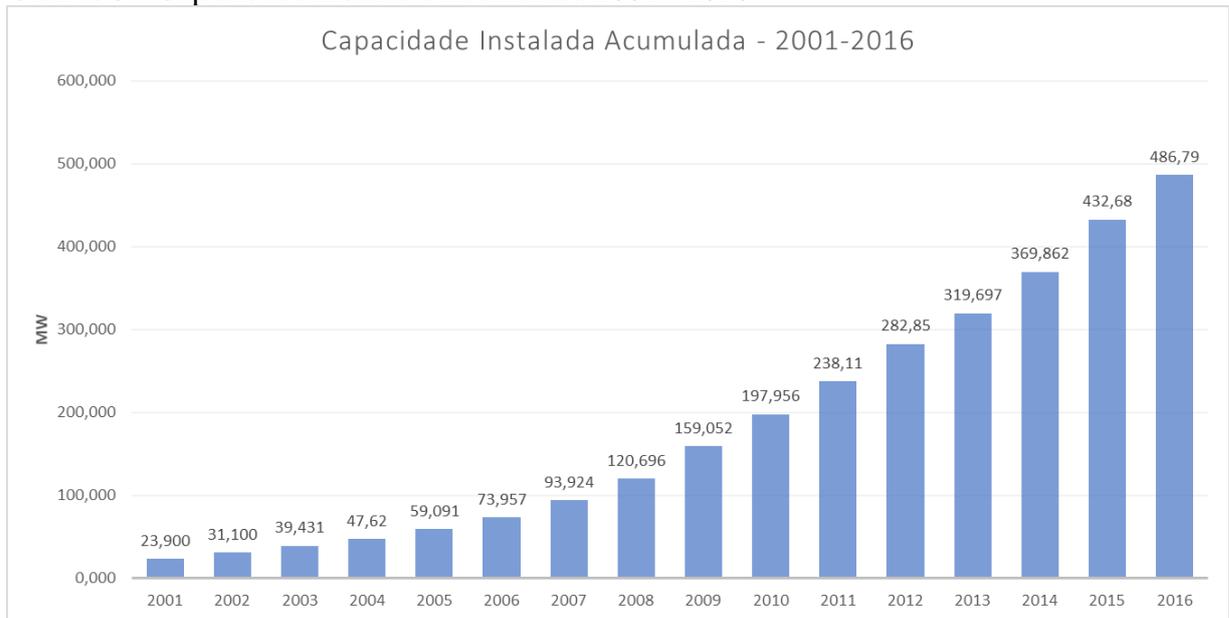
Depois de 1990 o mercado se concentrou na Europa, tanto em termos de instalações, quanto em fabricantes, fruto de incentivos provenientes de preocupações antigas, como a dependência energética, e de novos problemas como as preocupações ambientais com foco nas emissões de gases de efeito estufa. No final dos anos 1990 e inícios dos anos 2000 o mercado se diversificou mais pelo mundo, saindo do binômio EUA-Europa, surgindo instalações e fabricantes na Ásia (principalmente Índia e China) e de forma embrionária na América Latina e África.

Hoje, na segunda década do século XXI, a energia eólica já possui uma grande contribuição para os sistemas energéticos existentes, além de deter uma tecnologia bem desenvolvida e contornar com eficiência os problemas ambientais pertinentes a sua utilização (AMARANTE, 2001).

3.1.1 Energia Eólica: Panorama Mundial

Ao final de 2016 a energia eólica ultrapassou a marca de 486,8 GW de capacidade instalada (GWEC, 2016), o aproveitamento da energia eólica para a geração elétrica tem crescido de forma exponencial nos últimos anos, como ilustrado no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Capacidade Instalada Acumulada 2001 - 2016

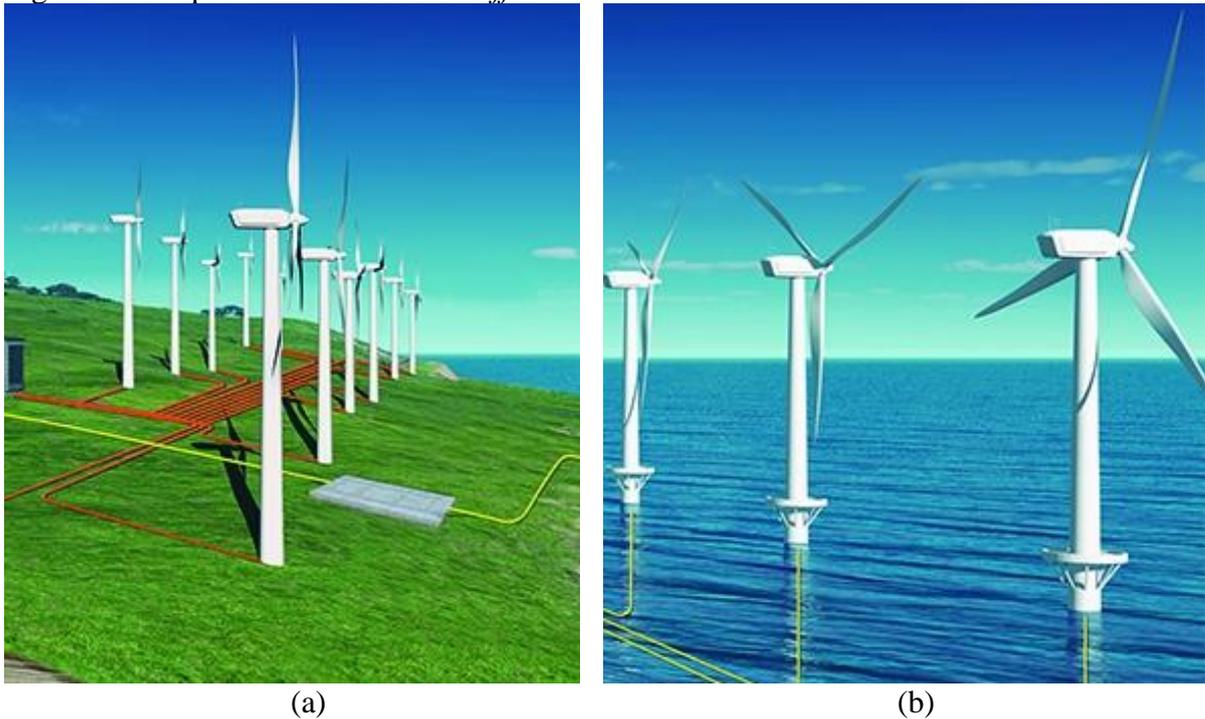


Fonte: Elaboração dos Autores, com base em GWEC, 2016.

A China é o maior mercado de energia eólica desde 2009, somente em 2016 foram instalados 23 GW (GWEC, 2016), as instalações na Ásia lideram o mercado global seguido da Europa e América do Norte, respectivamente.

Segundo Tolmasquim et al. (2016, p. 238) “a maior parte dos parques eólicos está instalado na terra (*onshore*), porém vários parques têm sido instalados no mar (*offshore*), devido à diminuição de locais apropriados em terra para novos empreendimentos [...]”. A Figura 3a indica um parque *onshore*, enquanto a Figura 3b ilustra um parque *offshore*.

Figura 3 - Parque Eólico *Onshore* e *Offshore*



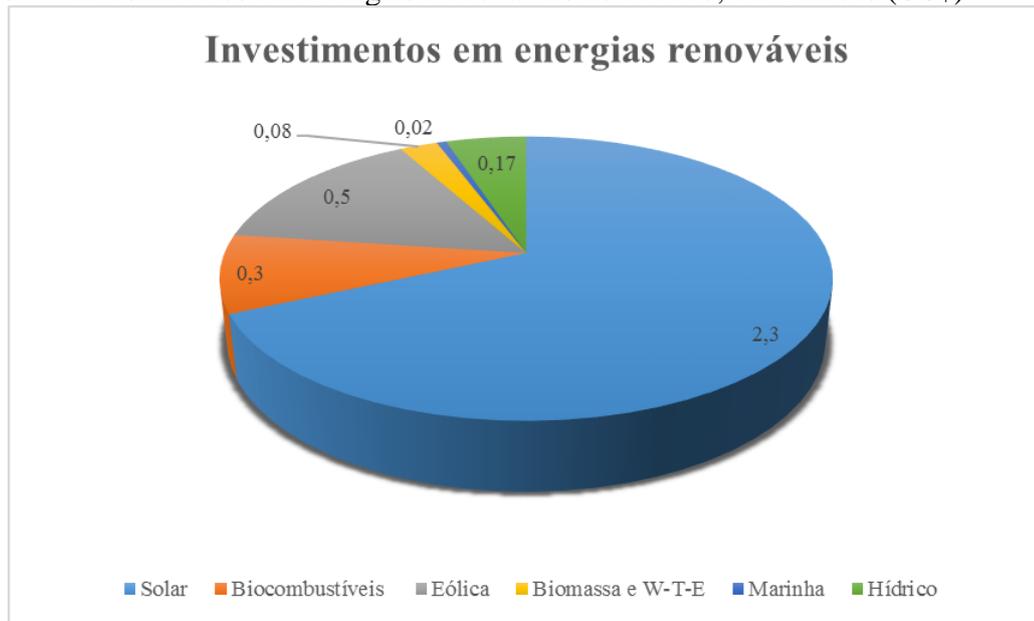
Fonte: General Cable. Disponível em: <https://goo.gl/m1QH5D>. Acesso em: 20 de mai. 2018.

Atualmente, a capacidade total instalada *offshore* é de 14.384 MW dos quais 2.219 MW foram instalados em 2016 (GWEC, 2016), onde aproximadamente 88% das instalações *offshore* estão localizada na Europa.

A Dinamarca foi um dos primeiros países a instalarem turbinas eólicas, atualmente 37,6% de toda energia elétrica consumida no país é gerada por parques eólicos *onshore* e *offshore* (GWEC, 2016), o maior nível de integração de energia eólica no mundo.

Segundo o Bloomberg New Energy Finance, os investimentos em energias renováveis no mundo vêm crescendo cada vez mais. O montante referente ao último balanço divulgado pela UNEP em 2016 pode ser visualizado no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Investimentos em Energias Renováveis no Mundo, em Bilhões (US\$)



Fonte: Elaboração dos Autores, com base em UNEP, Bloomberg New Energy Finance.

Os custos globais de instalação dos parques eólicos vêm caindo a cada ano de US\$ 4.766/kW em 1983 para US\$ 1.623/kW em 2014 (IRENA, 2016), queda esta que representa cerca de dois terços ao longo de 30 anos, contribuindo de forma significativa para o aumento de projetos eólicos ao redor do mundo.

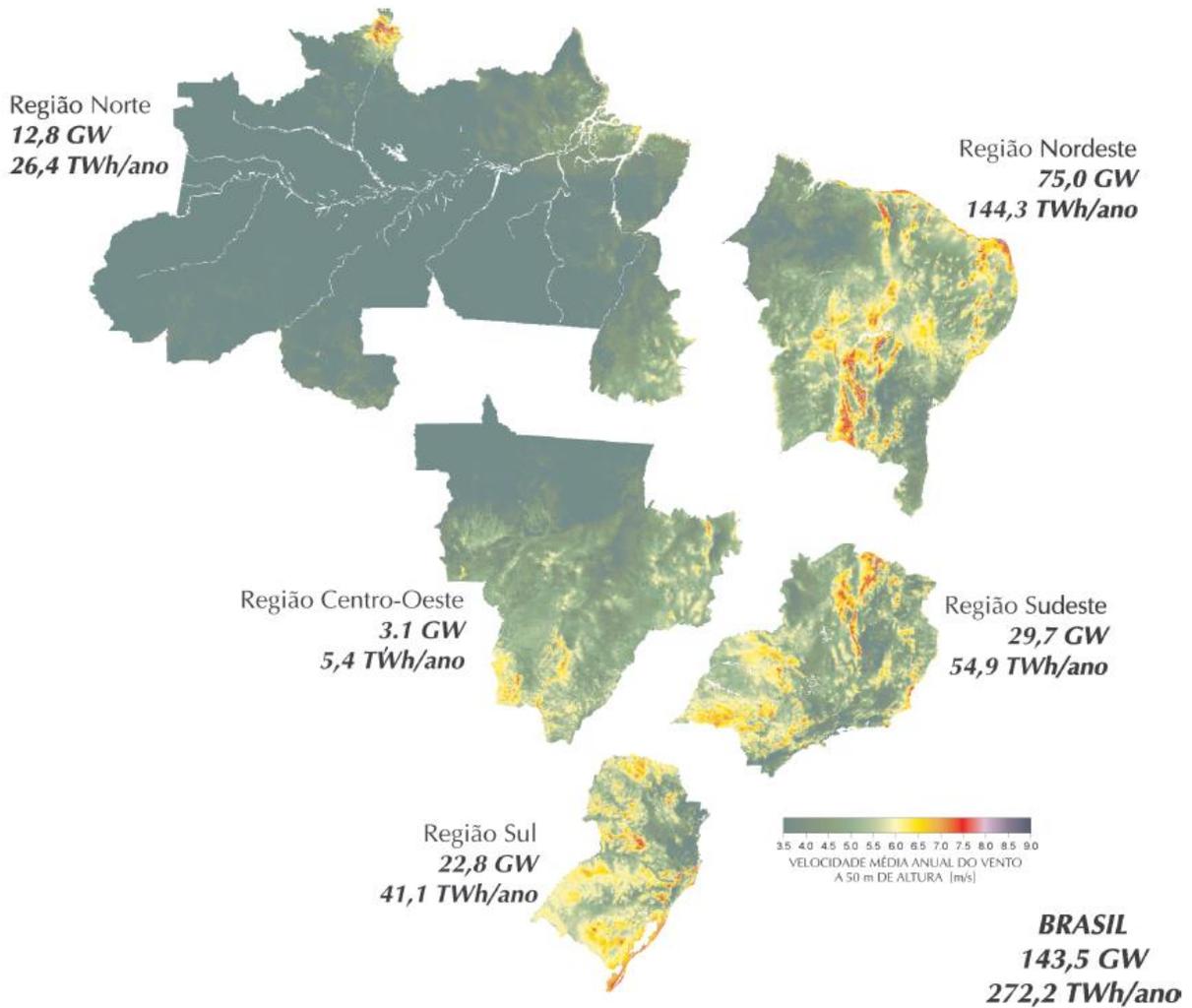
3.1.2 Energia Eólica: Panorama Nacional

O Brasil é um país em que grande parte de sua energia elétrica provém de usinas hidráulicas, constituindo uma matriz energética predominantemente limpa. Em face dos avanços tecnológicos e a crescente preocupação com o meio ambiente a busca por outras fontes primárias de energia tem-se destacado no país, como por exemplo a solar, eólica e nuclear (AMARANTE et al., 2001).

A geografia do país é propícia à geração de energia eólica e em 2001, visando fornecer dados adequados e confiáveis relativos aos ventos, foi elaborado o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro pelo CEPEL em parceria com diversas empresas do setor elétrico no período. O atlas cobre todo o território nacional fornecendo informações relevantes e confiáveis para os tomadores de decisão quanto aos melhores locais para instalação de empreendimentos eólicos no país, preenchendo uma lacuna, até então existente, sobre as áreas de maior potencial. De

acordo com o documento, o potencial eólico brasileiro é estimado em 143,5 GW e o maior potencial concentra-se na região nordeste com 75 GW. A Figura 4 apresenta o potencial eólico do país subdividido em suas cinco regiões.

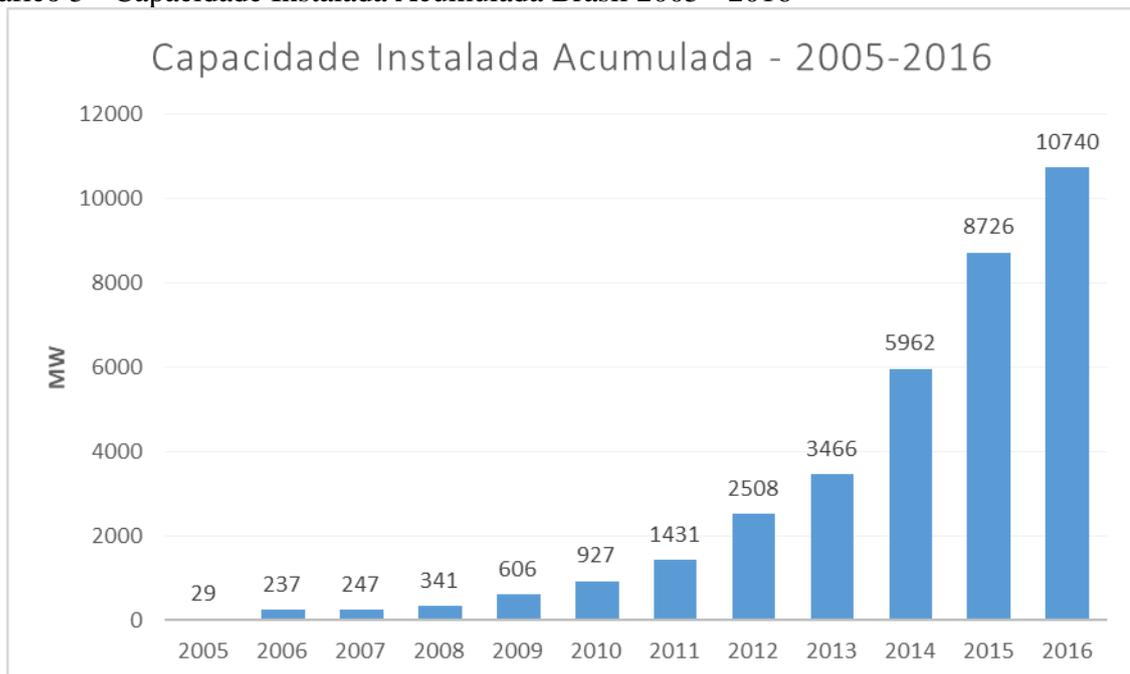
Figura 4 - Potencial Eólico Estimado para Vento Médio Anual Igual ou Superior a 7,0m/s



Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001.

Desde 2005 a capacidade eólica instalada no país vem crescendo de forma exponencial, conforme pode ser observado no Gráfico 5.

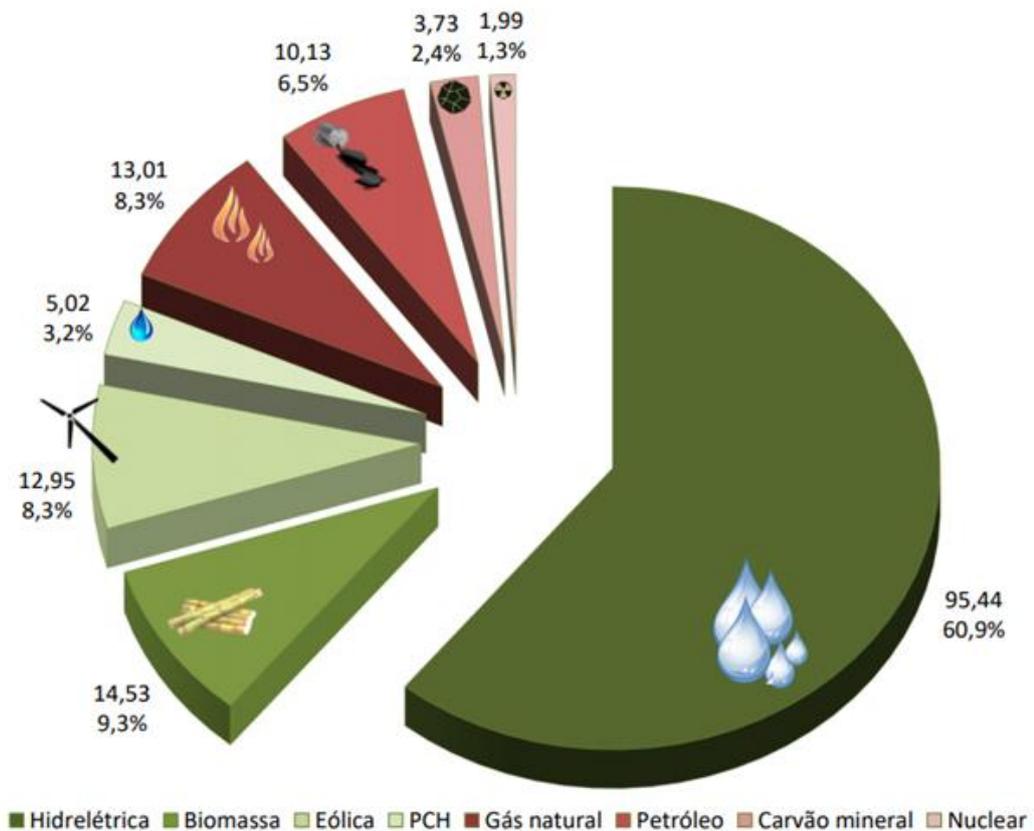
Gráfico 5 - Capacidade Instalada Acumulada Brasil 2005 - 2016



Fonte: Elaboração dos Autores, com base em GWEC, 2016.

O Brasil terminou 2016 ocupando a décima posição mundial em capacidade eólica instalada com 10.740 MW, o que representa 7% da capacidade total de geração no país, sendo adicionados 2.014 MW neste período (GWEC, 2016). Os investimentos no ano de 2016 foram de US\$ 5,4 bilhões em energia eólica, utilizados para a instalação de 947 turbinas eólicas em 81 parques eólicos e na criação de 30.000 novos postos de trabalho, representando 78% de todo o investimento realizado em energias limpas (BNEF, 2016). Os dados da diversificação da matriz energética nacional atualizados podem ser visualizados no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Matriz Elétrica Brasileira (GW)



Fonte: ABEEólica. Disponível em: goo.gl/6QUAQh. Acesso em: 19 de mai. 2018.

Na região Nordeste, a energia eólica está se tornando uma das principais fontes de energia, fornecendo em alguns momentos mais de 50% de toda a energia necessária para a região. Atualmente, o estado do Rio Grande do Norte concentra cerca de 31,8% de toda a capacidade instalada no país, seguido dos estados da Bahia e Ceará. O crescimento da eólica na região Nordeste também trouxe maior segurança para o sistema da região no que se refere ao suprimento de energia, visto que este subsistema sempre foi afetado por problemas nas interligações com as demais regiões do país.

O setor elétrico é sensível às mudanças econômicas e políticas e segundo o GWEC (2016) atualmente as maiores barreiras para o desenvolvimento de energia eólica no Brasil são a falta de demanda e investidores interessados, ambos ligados diretamente a crise econômica que o país está enfrentando, e a falta de linhas de transmissão para interligar os empreendimentos aos centros consumidores. Segundo o site oficial do Ministério do Meio Ambiente (2015):

O país se compromete a aumentar a participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética para aproximadamente 18% até 2030, restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas, bem como alcançar uma participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030.

Este compromisso foi assumido no âmbito do Acordo de Paris. Espera-se um aumento significativo no investimento em energia eólica por parte do governo, além da atração de novos investidores para o setor para que o compromisso seja cumprido (MMA, 2015).

Segundo o GWEC (2016) são esperados novos leilões para a construção de linhas de transmissão capazes de interligar as usinas geradoras mais distantes aos grandes centros consumidores, novas regras de financiamento para o setor foram anunciadas pelo BNDES e diversas discussões estão em andamento buscando um maior envolvimento dos bancos privados no financiamento do setor.

Os reflexos dos investimentos no Brasil em energia eólica podem ser visualizados no Quadro 2, onde os números de usinas em construção e com construção não iniciada, mas já planejada, são elevados.

Quadro 2 - Usinas por Estado

Estado	Usinas em Operação		Usinas em Construção		Usinas com construção não iniciada	
	Potência (kW)	Nº Parques Eol.	Potência (kW)	Nº Parques Eol.	Potência (kW)	Nº Parques Eol.
Bahia	1.750.140	71	1.536.300	72	2.187.450	97
Ceará	1.651.960	61	444.400	18	483.400	22
Maranhão	138.023	6	82.800	3	-	-
Paraíba	62.700	12	94.500	3	-	-
Pernambuco	703.485	32	80.500	3	82.000	3
Piauí	1.157.900	42	493.100	16	195.000	8
Rio Grande do Norte	3.446.856	127	572.800	19	618.400	26
Rio Grande do Sul	1.783.867	79	100.500	5	20.400	2
Santa Catarina	242.500	15	-	-	3.000	1
Minas Gerais	156	1	-	-	-	-
Paraná	2.500	1	-	-	-	-
Rio de Janeiro	28.050	1	-	-	-	-
São Paulo	2	1	-	-	-	-
Sergipe	34.500	1	-	-	-	-
Total	11.002.639	450	3.404.900	139	3.589.650	159

Fonte: Elaboração dos Autores, com base em ANEEL, agosto 2017.

É possível prever um crescimento de aproximadamente 66% em quantidade de usinas até que todas as obras sejam finalizadas, o que implica em um acréscimo de aproximadamente 6.994 MW no sistema elétrico brasileiro (ANEEL, 2017).

4 ESTADO DA ARTE DA TECNOLOGIA EÓLICA

A seguir serão apresentados os recursos e conhecimentos básicos necessários para compreender a produção de energia eólica, como a conversão da energia mecânica para a elétrica e os regimes de ventos que atuam em escala planetária. Além disso, serão apresentados também os tipos de aerogeradores e geradores mais utilizados para a produção de energia elétrica.

4.1 CONVERSÃO DE ENERGIA

A energia eólica é a energia cinética do ar em movimento, ou seja, o vento. Este varia constantemente, tanto na velocidade de escoamento, quanto na direção do seu deslocamento (CUSTÓDIO, 2009).

A energia cinética de uma massa de ar m em movimento a uma velocidade v é dada pela Equação (1).

$$E = \frac{1}{2} m V^2 \quad (1)$$

Onde:

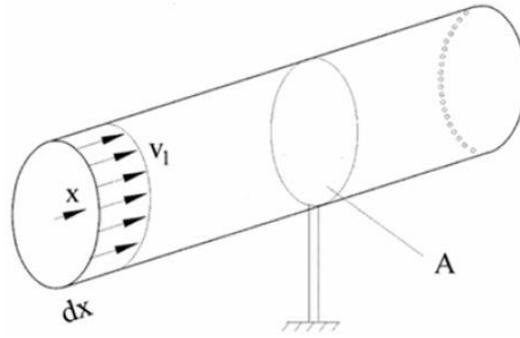
E = Energia cinética [J];

m = Massa de ar [kg];

V = Velocidade da massa de ar em movimento (vento) [m/s].

Considerando a mesma massa de ar m em movimento a uma velocidade v , perpendicular a uma seção transversal de um cilindro, conforme apresentado na Figura 5, pode-se definir o cálculo da potência disponível pelo vento como a derivada da energia no tempo, conforme Equação (2).

Figura 5 - Fluxo de ar Através de uma Área Transversal A



Fonte: Dutra, 2008.

$$P = \dot{E} = \frac{dE}{dt} = \frac{\dot{m}V^2}{2} \quad (2)$$

Onde:

- P = Potência disponível do vento [W];
- E = Energia cinética do vento [J];
- \dot{E} = Fluxo de energia [J/s];
- t = Tempo [s];
- \dot{m} = Fluxo de massa de ar [kg/s];
- V = Velocidade do vento [m/s].

O fluxo de massa é obtido através da Equação (3).

$$\dot{m} = \rho VA \quad (3)$$

Onde:

- \dot{m} = Fluxo de massa de ar [kg/s];
- ρ = Massa específica do ar [kg/m³];
- V = Velocidade do vento [m/s];
- A = Área da seção transversal [m²].

Substituindo as equações acima, temos que a potência disponível no vento que passa pela seção A, transversal ao fluxo de ar, é dada pela Equação (4).

$$P_v = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (4)$$

A Equação (4) também pode ser escrita por unidade de área, definindo, desta forma, a densidade de potência, ou fluxo de potência, conforme Equação (5).

$$DP = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (5)$$

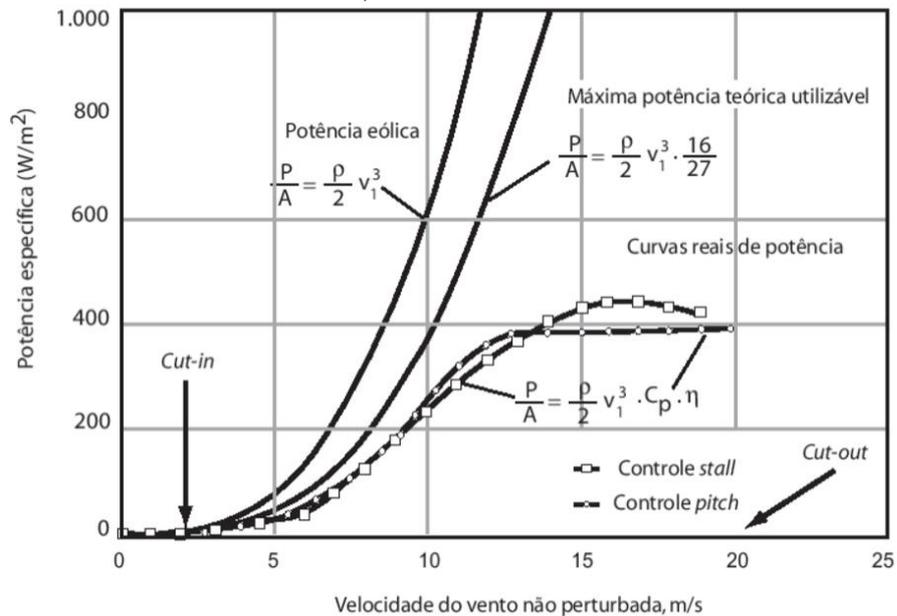
A potência disponível no vento não pode ser totalmente aproveitada na conversão de energia elétrica pelo aerogerador, para levar em conta essa característica física, é introduzido um índice denominado coeficiente de potência C_p , o qual é definido como a fração da energia eólica disponível que é extraída pelas pás do rotor (CUSTÓDIO, 2009).

Segundo Custódio (2009) o valor máximo desta parcela de energia foi determinado pelo físico alemão Albert Betz, que concluiu que nenhuma turbina eólica pode converter mais do que 59,3% da energia cinética do vento em energia mecânica no rotor, valor esse conhecido como limite de Betz ou a lei de Betz. Realizando a inclusão do coeficiente de Betz na Equação (4) temos que a potência disponível no vento pode ser obtida através da Equação (6).

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad (6)$$

Na prática, nenhuma turbina eólica projetada até o momento conseguiu atingir o valor máximo do limite de Betz, as mais modernas conseguem converter no máximo 47% da energia, sendo que normalmente esse valor tende a ser mais baixo, 30% a 40% do valor máximo (CUSTÓDIO, 2009). O Gráfico 7 apresenta as curvas de potência eólica, máxima potência teórica e curvas reais de potência.

Gráfico 7 - Curvas de Potência – Eólica, Máxima Teórica e Reais



Fonte: Dewi, 2001.

A curva de potência real de uma turbina eólica conforme Fadigas (2011, p. 108) ilustra três características da velocidade do vento:

- Velocidade *cut-in*: velocidade do vento em que o aerogerador começa a gerar eletricidade.
- Velocidade nominal: velocidade do vento a partir da qual a turbina gera energia na sua potência nominal. Frequentemente, mas nem sempre, a máxima potência.
- Velocidade *cut-out*: velocidade do vento em que o aerogerador é desligado para manter as cargas, a potência do gerador elétrico e a integridade física da máquina dentro dos limites de segurança ou fora dos limites de danos aos diversos componentes do aerogerador.

Ainda segundo Fadigas (2011) as curvas de potência de um aerogerador podem alcançar uma melhor eficiência quando combinadas com estudos de ventos do sítio onde o equipamento será implementado, além de técnicas estatísticas de densidade de probabilidades.

4.2 REGIME DOS VENTOS

Brito (2008, p. 14) diz que:

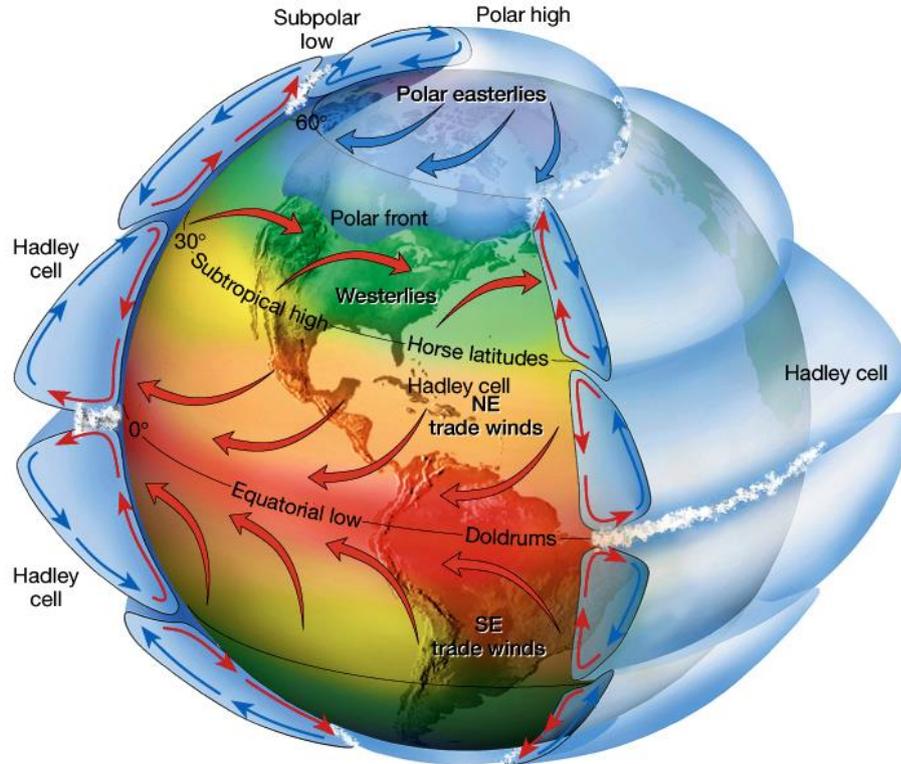
Uma estimativa da energia total disponível dos ventos ao redor do planeta pode ser feita a partir da hipótese de que, aproximadamente, 2% da energia solar absorvida pela Terra é convertida em energia cinética dos ventos. Este percentual, embora pareça pequeno, representa centena de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo.

Os ventos são causados por diferenças de pressão ao longo da superfície terrestre, devidas ao fato de, em primeiro lugar, a radiação solar recebida na Terra ser maior nas zonas equatoriais do que nas zonas polares e, em segundo lugar, ao movimento de rotação da Terra e variações sazonais de distribuição de energia solar incidente (JERVELL, 2008).

A Terra funciona como uma grande máquina térmica que transforma parte do calor solar em energia cinética do vento. No equador a incidência de radiação solar aquece massas de ar e faz com que se direcionem para os polos, locais onde as massas são mais frias. Enquanto nos polos, as massas de ar se deslocam para as regiões mais quentes, pois possuem uma maior

densidade. Esse fenômeno provoca um movimento de ar (vento) em escala planetária (NUNES JUNIOR, 2008), como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 - Movimentos Atmosféricos em Escala Planetária

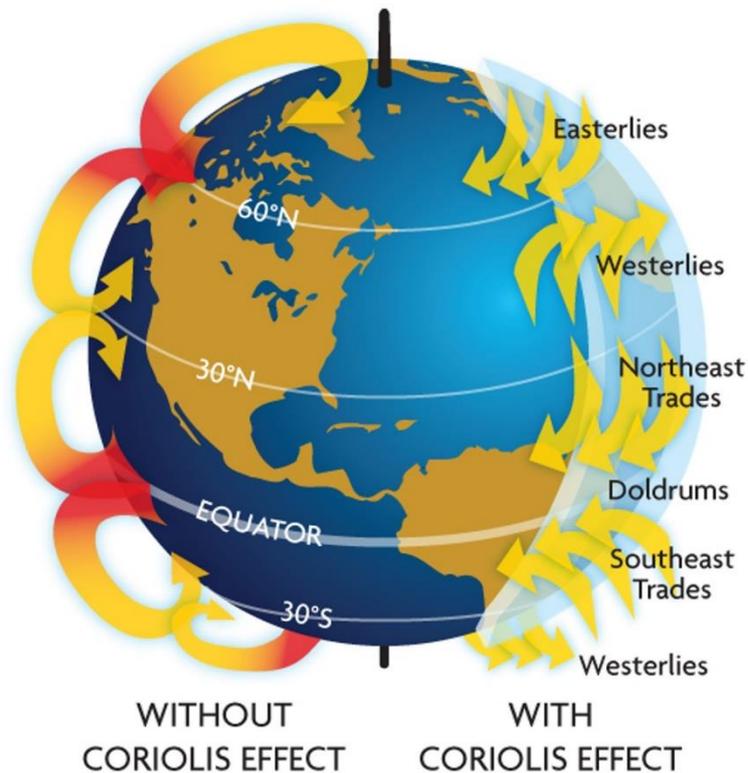


Fonte: Sentelhas; Angelocci. Disponível em: goo.gl/c1o78E. Acesso em: 25 ago. 2017.

A energia eólica tem a vantagem de ser inesgotável, gratuita e pouco prejudicial ao meio ambiente, mas possui também grandes inconvenientes, pois é dispersa e aleatória. O gradiente de velocidade é maior quanto maior a diferença de pressão e seu movimento é influenciado pela rotação da terra (NUNES JUNIOR, 2008).

Segundo Nunes Junior (2008) através do movimento de rotação da Terra há a formação do efeito Coriolis ou força de Coriolis, a qual consiste na aceleração aparente provocada pela rotação da Terra e que tende a desviar todo o objeto movendo-se livremente. A força de Coriolis possui um sentido no hemisfério sul e sentido oposto no hemisfério norte, enquanto no Equador sua intensidade é nula. É através da ação da força de Coriolis que há a formação dos ciclones, esses giram no sentido anti-horário no hemisfério norte e no sentido horário no hemisfério sul. Na Figura 7 é apresentada de forma simplificada o efeito de Coriolis.

Figura 7 - Efeito Coriolis



Fonte: North Coast Journal. Disponível em: goo.gl/eZBMjh. Acesso em: 02 nov. 2017.

Sobreposto ao sistema global de formação dos ventos encontram-se os ventos locais, que são originados por fatores mais específicos. A manifestação local mais conhecida dos ventos acontece nas regiões costeiras onde são observadas as brisas marinhas e terrestres. Durante o dia, devido a reflexão dos raios solares, a temperatura do ar aumenta e como consequência ocorre a formação de uma corrente de ar que sopra do mar para a terra, corrente essa chamada de brisa marinha. Já durante a noite, a temperatura da terra cai mais rapidamente quando comparada com a temperatura da água, isso resulta numa brisa terrestre que sopra da terra para o mar. A intensidade da brisa marinha normalmente é maior que a da brisa terrestre, pois no período noturno a diferença de temperatura é menor (SILVA, 1999 apud MENDONÇA, 2013).

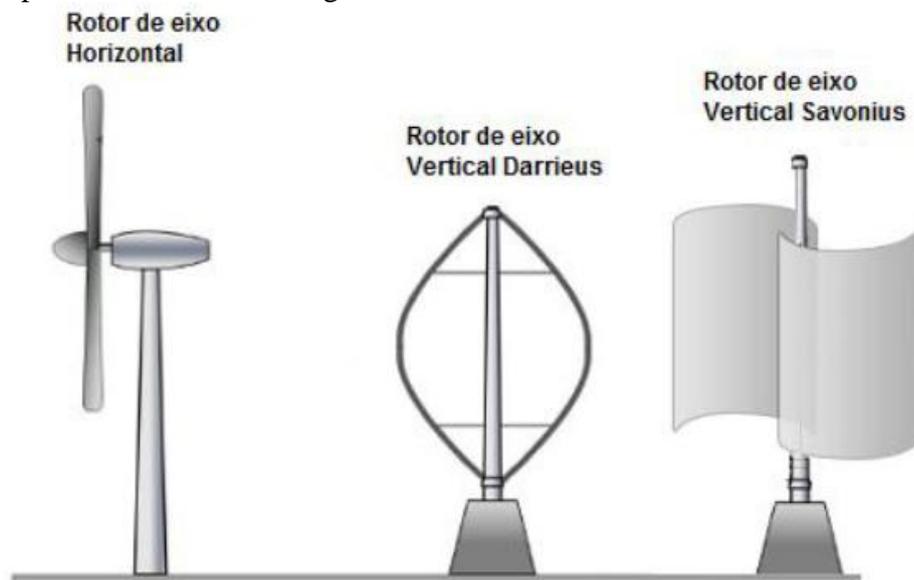
Outro fator que influencia na formação dos ventos se dá devido a topografia do local, os “elementos topográficos como morros, dunas, colinas e penhascos afetam o gradiente vertical do vento” (SILVA, 1999 apud MENDONÇA, 2013, p. 25).

4.3 ESTRUTURA BÁSICA DE AEROGERADORES CONVENCIONAIS

Os equipamentos utilizados para transferência de energia mecânica de um ponto a outro com recursos eólicos são chamados de cata-ventos. Para que um cata-vento possa gerar energia elétrica é necessário que seja acoplado a ele um sistema de geração eólica, mais conhecido como aerogerador (TOLMASQUIM et al., 2016).

Atualmente, existem dois tipos básicos de aerogeradores, os chamados de eixo horizontal e os de eixo vertical. Os de rotores de eixo vertical operam com ventos em qualquer direção tendo seu eixo de rotação perpendicular à direção do vento, o que acaba por reduzir a complexidade do projeto e os esforços devido às forças de Coriolis, enquanto os rotores de eixo horizontal devem estar alinhados com a direção do vento (TOLMASQUIM et al., 2016). A Figura 8 ilustra o rotor de eixo horizontal e os dois principais tipos de rotor vertical, Darrieus e Savonius.

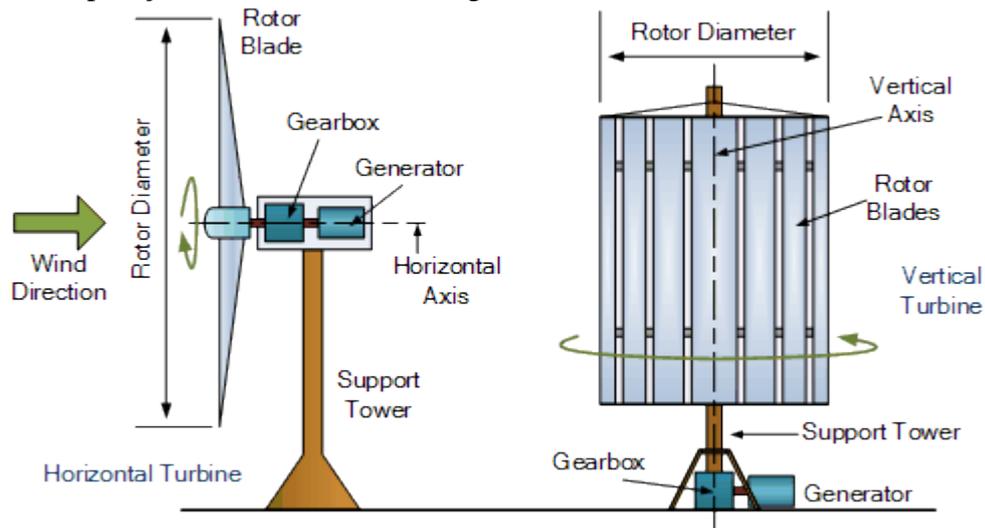
Figura 8 - Tipos de Rotores de Aerogeradores



Fonte: EPE, 2016.

“Os aerogeradores possuem três elementos principais, que são rotor, o eixo e o gerador, e vários elementos secundários que variam de acordo com o tipo e projeto do aerogerador” (TOLMASQUIM et al., 2016, p. 261). Na Figura 9 é possível observar uma sucinta comparação entre as principais partes entre aerogeradores de eixos verticais e de eixo horizontal.

Figura 9 - Comparação Estrutural entre Aerogeradores de Eixo Vertical e Eixo Horizontal



Fonte: Alternative Energy Tutorials. Disponível em: goo.gl/JsgoMY. Acesso em: 02 nov. 2017.

De forma simplificada “[...] responsável por capturar energia no vento, o eixo é o elo que transfere a energia captada no rotor para o gerador, e o gerador é responsável pela conversão de energia mecânica em elétrica” (TOLMASQUIM et al., 2016, p. 261).

O rotor é considerado o componente mais crítico de um aerogerador, sendo responsável pelo desempenho geral da máquina, incluindo a captura de energia eólica e o controle da turbina (ROBINSON et al., 2011 apud TOLMASQUIM et al., 2016, p. 270).

Analisando os equipamentos utilizados em grandes usinas eólicas ao redor do mundo, U.S. DoE (2008 apud TOLMASQUIM et al., 2016, p. 271) nos diz que:

Os aerogeradores são construídos em diversos tamanhos e configurações, utilizando uma ampla gama de materiais. Os materiais mais relevantes em um aerogerador são o aço, as fibras de vidro e de carbono, as resinas (para compósitos e adesivos), os materiais para o núcleo das pás (geralmente madeira), ímãs permanentes, cobre e alumínio.

Ainda considerando os aerogeradores usuais, “o aço é o componente com maior presença nos aerogeradores, podendo corresponder a praticamente 90% de seu peso” (U.S. DoE, 2008 apud TOLMASQUIM et al., 2016, p. 271). Segundo ABDI (2014 apud TOLMASQUIM et al., 2016, p. 271) “o aço está presente na torre, no rotor, na estrutura da nacelle, nas coroas dos rolamentos do rotor (sistema de passo), no sistema de alinhamento com a direção do vento, no eixo principal, entre outras partes”.

Tolmasquim et al. (2016, p. 271) define que:

Já as fibras de vidro e carbono, as resinas e a madeira balsa formam as pás dos aerogeradores, que podem alcançar 8% do peso do aerogerador. Os ímãs permanentes são utilizados dependendo do sistema de conversão elétrica do aerogerador, como os PMSG. Uma das vantagens é eliminar o cobre do rotor do gerador e construir geradores menores e mais leves. O cobre é utilizado no gerador, no transformador, nos maquinários da nacelle, na caixa de engrenagem e nos cabos, e pode atingir até quase 2% do peso do aerogerador. O alumínio é usado no cubo do rotor, na caixa de engrenagem, no transformador, nas carcaças, nos cabos, etc. Existem oportunidades para o aumento do uso do alumínio visando redução de peso dos crescentes aerogeradores, contudo, se devem verificar restrições de custo e requisitos de fadiga e força.

4.3.1 Forças sobre um objeto

Os aerogeradores são objetos que operam dentro de uma corrente de ar e estão expostos a forças externas. Nunes Júnior (2008) mostra que ao estudar os efeitos da resistência do ar sobre uma placa plana, observa-se que a resultante \vec{R} das forças aplicadas a placa é um vetor cujo ponto de aplicação é o centro aerodinâmico, sendo sua direção perpendicular a placa, seu sentido é o do vento, e a sua intensidade é proporcional a superfície S exposta e ao quadrado da velocidade do vento v na forma:

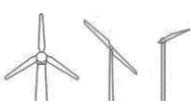
$$\vec{R} = kSv^2 \quad (7)$$

Onde:

k = Coeficiente que depende do ângulo de incidência, das unidades escolhidas e da turbulência do movimento.

Tanto os aerogeradores de eixo horizontal quanto os de eixo vertical são movidos por forças de sustentação F_L e forças de arrasto F_D . Tais coeficientes influenciam diretamente no rendimento do objeto (NUNES JUNIOR, 2008).

Quadro 3 - Tipos de Rotor e Suas Características

TIPO DE ROTOR	EXO	FORÇA PREDOMINANTE	VELOCIDADE DE ROTAÇÃO	TORQUE	CARGA TÍPICA
	Horizontal	Sustentação	Alta	Baixo	Gerador Elétrico
	Horizontal	Arrasto	Baixa	Alto	Bomba Hidráulica
	Horizontal	Sustentação	Moderada	Moderado	Gerador Elétrico / Bomba Hidráulica
	Vertical	Sustentação	Alta	Baixo	Gerador Elétrico
	Vertical	Arrasto	Baixa	Alto	Bomba Hidráulica

Fonte: Adaptado de Vieira, 2017.

No Quadro 3 é possível observar algumas características dos principais aerogeradores quanto a força, velocidade, torque e carga típica.

4.3.2 Rotores de Eixo Horizontal

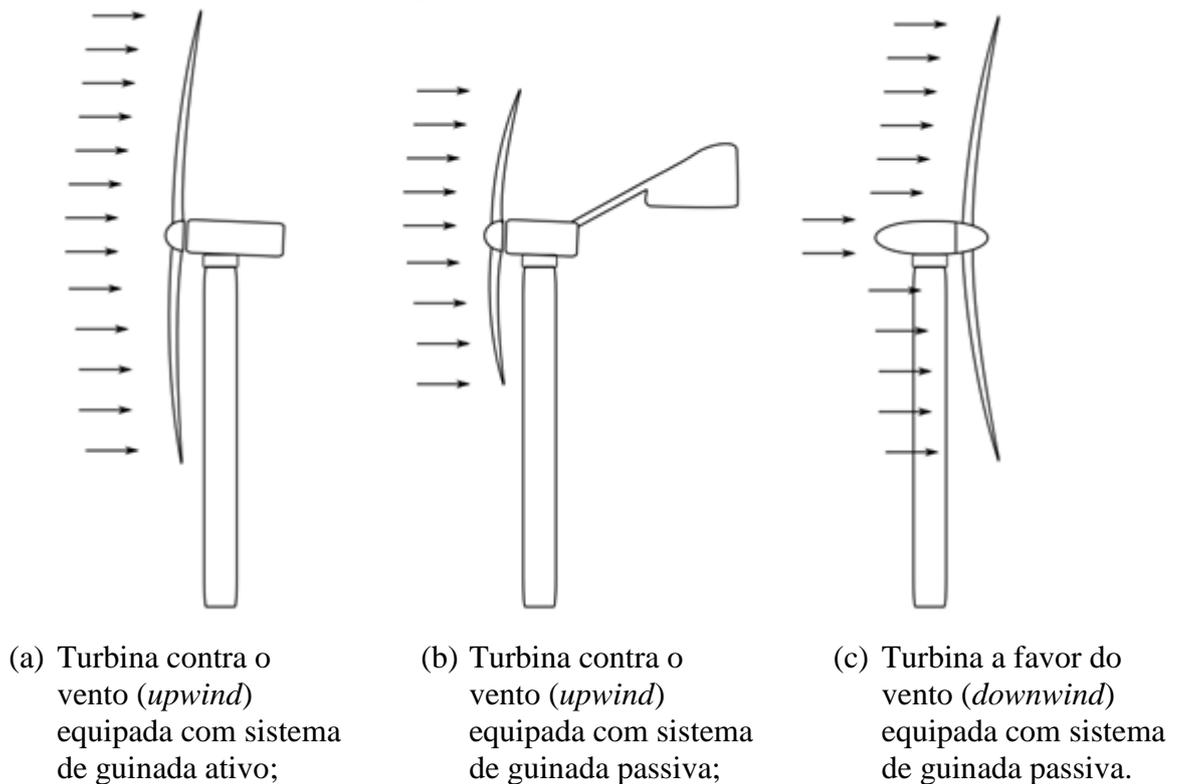
Os aerogeradores de eixo horizontal dominam o mercado eólico mundial e tem como característica principal a necessidade de um sistema de controle para posicionar o rotor na direção predominante do vento (TOLMASQUIM et al., 2016).

Tolmasquim et al (2016, p. 261) ainda afirma que:

Nos rotores projetados para ficar contra o vento (*upwind*), o vento atinge as pás antes da torre evitando a influência dela no vento, contudo há necessidade de algum mecanismo ativo que direcione o rotor para a direção do vento (*yaw control system*). Nos rotores projetados para ficar a favor do vento (*downwind*), o vento atinge a torre antes das pás. Eles possuem um design tal que a nacelle, carcaça que contém os componentes do aerogerador, siga o vento passivamente [...].

Na Figura 10 pode-se observar os possíveis posicionamentos do aerogerador.

Figura 10 - Posicionamento do Aerogerador com Relação a Posição do Vento



Fonte: Wikimedia. Disponível em: goo.gl/Pp9gEX. Acesso em: 01 out. 2017.

Nunes Júnior (2008) afirma que as aeroturbinas de eixo horizontal podem ser classificadas segundo a sua velocidade de rotação ou segundo o número de pás do rotor, aspectos que estão intimamente relacionados nas máquinas rápidas e nas lentas. Essas turbinas podem ter até 24 pás no rotor e esta quantidade tem influência direta em sua velocidade de rotação. Máquinas eólicas com no máximo 4 pás, tendem ser mais rápidas do que máquinas com mais pás.

Segundo Nunes Júnior (2008, p. 86):

As aeroturbinas lentas tem um TSR⁴ pequeno e um grande número de pás, suas aplicações são destinadas, em geral, ao bombeamento de água. As aeroturbinas rápidas tem um TSR alto e o número de pás tende a ser menor. Podem ser tripás com TSR=4 ou bipás com TSR=8, tendo-se desenhado e construído aeroturbinas de uma

⁴ TSR (*Tip-Speed-Ratio*) é um conceito que substitui ao número de rotações específico e se definem como o coeficiente entre a velocidade periférica da pá e do vento, sem a intervenção de velocidades induzidas (NUNES JÚNIOR, 2008).

única pá. O processo de funcionamento dessas máquinas é diferente, porque respeita o tipo de ação devida ao vento que as faz funcionar.

Nas máquinas lentas a força de arrasto é muito mais importante que a de sustentação, ao mesmo tempo em que nas máquinas rápidas a componente de sustentação é muito maior que a de arrasto. O número de pás também influi no torque de arranque da máquina, de forma que uma máquina com grande número de pás no rotor, requer um torque de arranque muito maior (NUNES JUNIOR, 2008), é possível observar esse panorama no Quadro 3.

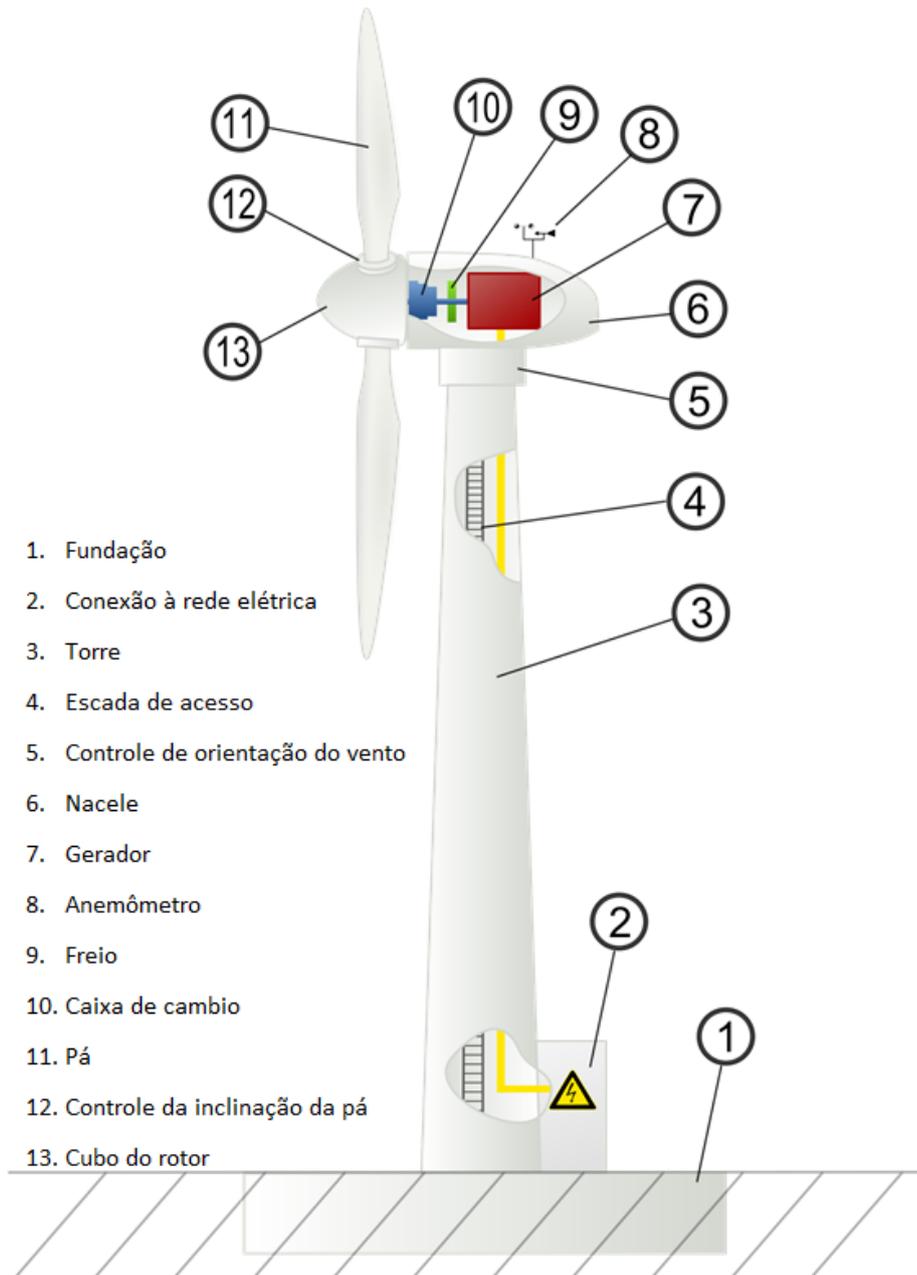
Atualmente existem quatro principais tipos de máquinas eólicas de eixo horizontal: máquinas de movimento alternativo, utilizadas para bombeamento; máquinas multipás; hélices com pás pivotantes; e hélices com pás torcidas (NUNES JUNIOR, 2008).

Os aerogeradores de eixo horizontal tipo hélice, são compostos, em geral, por um gerador elétrico, um dínamo ou alternador, do sistema de acoplamento que pode ser por sua vez um multiplicador das rotações da hélice e o sistema de controle e orientação (NUNES JUNIOR, 2008).

Os aerogeradores também necessitam de uma torre, a qual será responsável pelo posicionamento do rotor a altura desejada para a captação do recurso eólico. A escolha da torre e do material depende essencialmente do custo e da altura do aerogerador. No Brasil são mais comuns as torres tubulares de aço e as híbridas, porém as feitas totalmente de concreto vêm ganhando espaço no mercado nacional (ABDI, 2014).

Na Figura 11 é possível observar as principais partes que compõem um aerogerador horizontal.

Figura 11 - Principais Partes de um Aerogerador de Eixo Horizontal



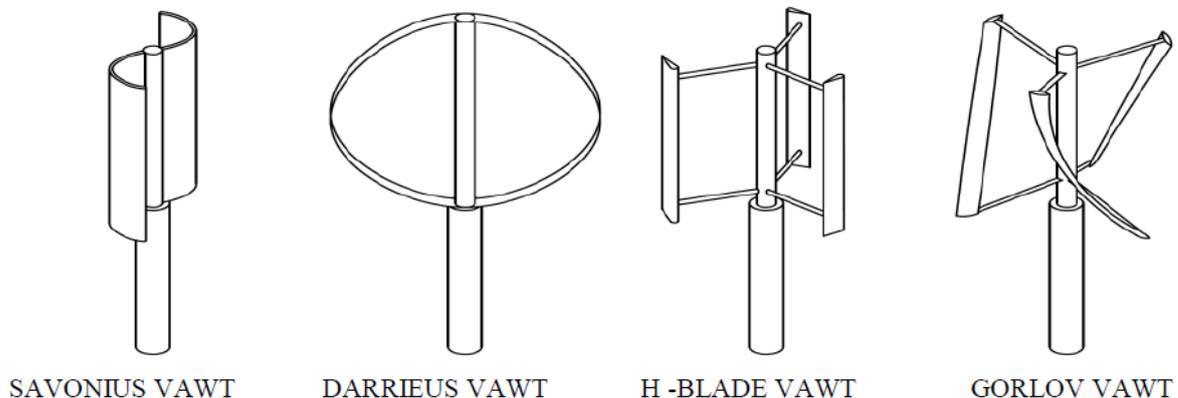
Fonte: Adaptado de Wikimedia. Disponível em: goo.gl/jb5YyX. Acesso em: 01 out. 2017.

O design de três pás possui maior eficiência e estabilidade, além de uma menor velocidade rotacional para uma mesma produção de energia, custo, velocidade de rotação, peso, estabilidade e ruído que influenciam de maneira significativa para que esse modelo seja o mais usado na atualidade (TOLMASQUIM et al., 2016).

4.3.3 Rotores de Eixo Vertical

Os aerogeradores de eixo vertical não possuem um padrão ou formato definido, o que todos os modelos têm em comum são as pás girando no mesmo plano que o chão (NUNES JUNIOR, 2008). A Figura 12 ilustra alguns tipos de aerogeradores de eixo vertical. Segundo o WWEA (2016) no mundo as turbinas eólicas do tipo horizontal são mais usadas do que as do tipo vertical, sendo que a cada cinco fabricantes apenas um fabrica turbinas do tipo vertical, os principais motivos encontram-se no rendimento e custo *versus* benefício.

Figura 12 - Diferentes Tipos de Aerogeradores de Eixo Vertical



Fonte: Adaptado de Marco Casini. Disponível em: goo.gl/NN4FJT. Acesso: 01 out. 2017.

Aerogeradores de eixo vertical tendem a ser mais fáceis de montar e permitem que todo o dispositivo de conversão de energia seja colocado na base da torre, o que acaba facilitando a manutenção. Além disso, não necessitam de mecanismos para acompanhamento da variação dos ventos eliminando assim a necessidade de um sistema de orientação o que aumenta a confiabilidade da turbina e diminui os seus custos, inclusive de manutenção (DUTRA, 2008).

Conforme Tolmasquim et al. (2016, p. 261):

Os aerogeradores de eixo vertical têm problemas inerentes que têm limitado a sua utilização em parques eólicos terrestres sendo a eficiência o maior problema do tipo Savonius e a preocupação sobre o custo da pá no caso do Darrieus. A pá do aerogerador Darrieus é aproximadamente duas vezes mais longa que a de um aerogerador de eixo horizontal com uma área varrida equivalente. Assim as pás para um aerogerador de eixo vertical podem custar significativamente mais do que as pás equivalentes de um de eixo horizontal.

São mais apropriados para uso em regiões urbana, pois possuem um melhor comportamento em ventos turbulentos, além de que quando comparadas com as aerogeradores de eixo horizontal emitem níveis de ruídos mais baixos (TOLMASQUIM et al., 2016).

Segundo Batista (2013, p. 23) os aerogeradores de eixo vertical em relação aos aerogeradores de eixo horizontal têm uma imagem tridimensional harmoniosa que facilita a integração visual em contexto urbano, sendo de antever em consequência que haja maior aceitação por parte das populações locais, embora pelo fato de operarem mais perto do solo ou das estruturas arquitetônicas, onde possam vir a ser instalados é possível que ocorram objeções à sua utilização, particularmente, no que respeita à segurança das pessoas e animais.

Batista (2013, p. 22) diz que os aerogeradores de eixo vertical podem ser divididos em dois grupos:

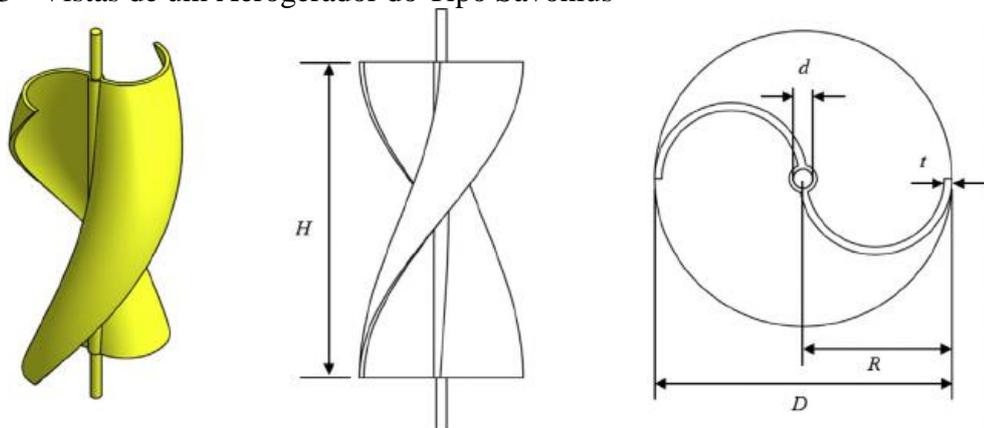
Os aerogeradores que funcionam aproveitando as forças de sustentação exercidas pelo vento sobre as pás, geralmente designados por aerogeradores Darrieus por terem sido patenteados por G.J.M Darrieus;

Os aerogeradores que funcionam aproveitando as forças de arrasto exercidas pelo vento sobre as pás, geralmente designados por aerogeradores do tipo Savonius por terem sido patenteados por S.J. Savonius.

O rotor do tipo Savonius é uma turbina movimentada com força de arrasto, devido a isso são menos eficientes que os outros tipos de rotores, porém, são excelentes para áreas com ventos turbulentos e podem iniciar sua operação com ventos de baixa velocidade. Eles são constituídos por duas ou mais pás côncavas (TOLMASQUIM et al., 2016).

Na Figura 13 é possível observar três representações do aerogerador Savonius.

Figura 13 - Vistas de um Aerogerador do Tipo Savonius



(a) Representação em 3D

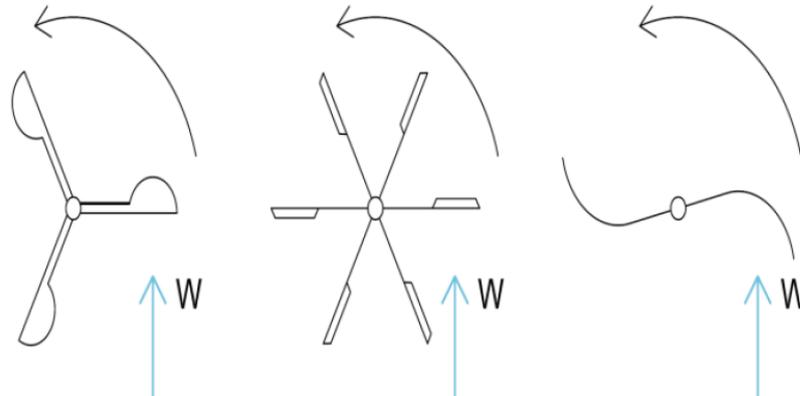
(b) Vista Lateral

(c) Vista Superior

Fonte: Jeon et. Al.. Disponível em: goo.gl/xDnoz7 2014. Acesso em: 01 out. 2017.

A Figura 14 apresenta a visão superior de uma turbina eólica do tipo Savonius.

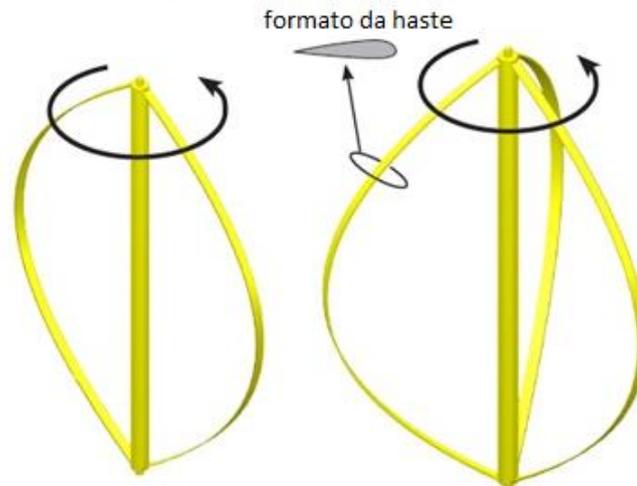
Figura 14 - Sentido do Vento em uma Turbina Eólica Savonius



Fonte: Marco Casini. Disponível em: goo.gl/NN4FJT. Acesso: 01 out. 2017.

As turbinas do tipo Darrieus, que pode ser visualizada na Figura 15, são movimentadas por forças de sustentação e geralmente constituídas por duas ou mais pás de forma côncava. As forças centrífugas geradas por uma turbina Darrieus são grandes e atuam diretamente nas pás da turbina fazendo com que as mesmas tenham que ser muito resistentes. Podem atingir altas velocidades, porém o torque de partida é praticamente nulo fazendo com que seja necessário o uso de um motor externo para que seja iniciada a rotação da turbina (BATISTA, 2013).

Figura 15 - Turbina Eólica do Tipo Darrieus



Fonte: W. Wacker. Disponível em: goo.gl/xT8WP3. Acesso em: 01 out. 2017.

Devido as suas características as turbinas eólicas de eixo vertical são uma opção para o aproveitamento do recurso *offshore*, sendo que as principais características são que todo

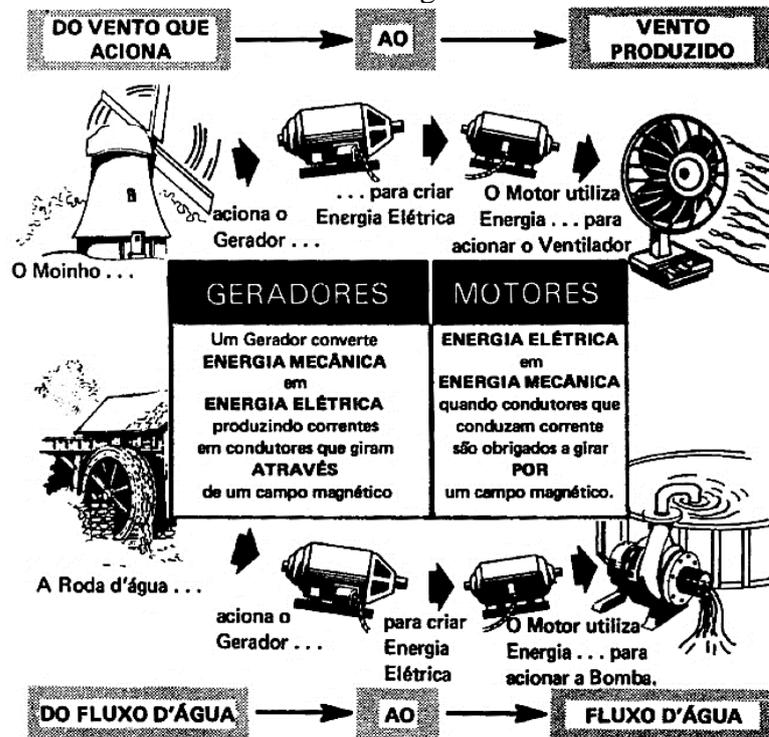
o equipamento pesado associado com a geração de energia, são tipicamente montados por baixo do rotor, permitindo assim que os projetos localizados no mar possam colocar esses equipamentos abaixo ou ao nível da água, o que acaba por proporcionar uma maior estabilidade à plataforma (TOLMASQUIM et al., 2016), além de serem uma boa opção para sistemas de geração distribuída, pois conforme já mencionado anteriormente, toleram bem a turbulência dos ventos e operam com ventos de qualquer direção.

4.4 GERADOR ELÉTRICO

O gerador elétrico é o componente que tem a função de converter a energia mecânica obtida de uma fonte externa em energia elétrica, enquanto a conversão de energia elétrica em energia mecânica, é realizada através de um motor elétrico. Diversas formas de energia podem ser convertidas em energia elétrica, porém, na indústria, o termo gerador elétrico se reserva para máquinas que convertem energia mecânica em energia elétrica (COPEL, 2016).

A Figura 16 apresenta de forma simplificada a conversão eletromecânica da energia nos geradores e motores elétricos.

Figura 16 - A Conversão Eletromecânica da Energia nos Geradores e Motores Elétricos.



Fonte: CEFET - RN, 2006.

O princípio do motor elétrico nos mostra que se colocarmos uma bobina condutora fechada num campo magnético externo e enviarmos uma corrente através dela, um torque atuará sobre a bobina, fazendo-a girar. Já o princípio do gerador elétrico nos mostra que se colocarmos uma bobina condutora fechada num campo magnético externo e que se gire a bobina exercendo, por meio de uma fonte externa, um torque sobre ela, aparecerá na bobina uma corrente elétrica. De forma simplificada $corrente \Rightarrow torque$ e $torque \Rightarrow corrente$ (HALLIDAY et al., 2012).

O surgimento da corrente elétrica na bobina é governado pela Lei da Indução de Faraday, considerada uma das descobertas mais importantes do eletromagnetismo, feita pelo inglês Michael Faraday em 1831. A forma matemática da Lei de Faraday foi dada pelo físico alemão Franz Ernst Neumann e é apresentada na Equação (8).

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (8)$$

Onde:

ε = força eletromotriz (*fem*) [V]

Φ_B = fluxo magnético [Wb]

O sinal negativo da equação é oriundo da Lei de Lenz, que diz que a corrente induzida possui sentido oposto ao do crescimento da variação do campo magnético que lhe deu origem. Se o fluxo magnético for variado através de uma bobina com N espiras, uma *fem* induzida aparecerá em cada espira e estas devem ser somadas (HALLIDAY et al., 2012). Se o fluxo através de cada espira for o mesmo, a *fem* induzida na bobina será

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (9)$$

O fluxo magnético é dado pela Equação (10).

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (10)$$

Onde:

\vec{B} = campo magnético [T]

\vec{A} = área [m²]

Fitzgerald et al. (2006, p. 239) define que:

A conversão eletromagnética de energia ocorre quando surgem alterações no fluxo concatenado decorrentes do movimento mecânico. Nas máquinas rotativas, as tensões

são geradas nos enrolamentos ou grupos de bobinas quando esses giram mecanicamente dentro de um campo magnético, ou quando o circuito magnético gira mecanicamente próximo aos enrolamentos, ou ainda quando o circuito magnético é projetado de modo que a relutância varie com a rotação do rotor. Por meio desses métodos, o fluxo concatenado em uma bobina específica é alterado ciclicamente e uma tensão variável no tempo é gerada.

Geradores eletromagnéticos se enquadram em duas grandes categorias, máquinas CA e máquina CC, os quais serão apresentados de forma mais detalhada na sequência.

4.4.1 Máquinas CA

O gerador elétrico de corrente alternada, também conhecido como alternador, pertence à família das máquinas elétricas rotativas, tem seu funcionamento baseado no princípio da indução eletromagnética. O gerador CA converte energia mecânica em energia elétrica na forma de corrente alternada.

Nos automóveis, ele está ligado ao motor através de uma correia para que assim seja gerada corrente alternada que posteriormente será transformada em corrente contínua. A energia gerada pelo alternador é utilizada para carregar a bateria do carro e alimentar o sistema elétrico do carro, enquanto o motor estiver em funcionamento (INSTITUTO NEWTON C BRAGA, 2017).

Os geradores síncronos podem ser divididos de acordo com a maneira com que sua corrente de campo magnético se comporta, ou seja, por meio de máquinas síncronas ou máquinas de indução (CHAPMAN, 2013). Tais comportamentos serão apresentados nos próximos tópicos.

4.4.1.1 Máquinas Síncronas

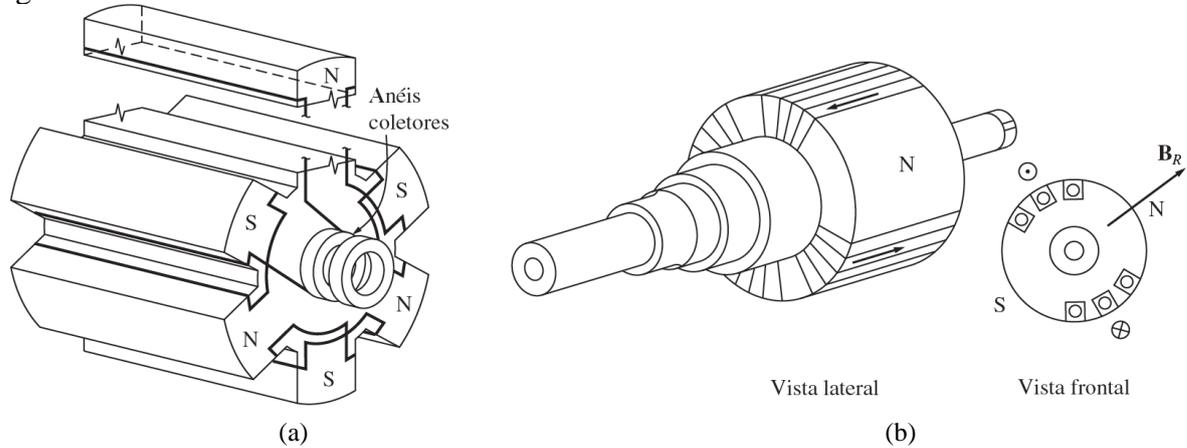
Segundo Fitzgerald et al. (2006, p. 239) “uma máquina síncrona é aquela na qual uma corrente alternada flui no enrolamento de armadura e uma excitação CC é fornecida ao enrolamento de campo”.

Os circuitos de campo das máquinas síncronas geralmente estão localizados em seus rotores, que podem ser formados por um ímã permanente ou um eletroímã. É mais fácil

refrigerar a armadura se esta encontra-se no estator. O campo magnético dessa máquina é produzido diante da aplicação de uma corrente CC em um enrolamento do rotor, que logo induz um conjunto de tensões alternadas nos enrolamentos do estator (CHAPMAN, 2013).

Chapman (2013) define que o rotor de um gerador síncrono possui polos magnéticos que podem ser montados de duas maneiras distintas: salientes ou não salientes (também conhecido como rotor de polos lisos). Geralmente, rotores de polos lisos possuem de dois a quatro polos, enquanto rotores de polos salientes são aplicados a rotores com quatro ou mais polos. É possível observar na Figura 17 que (a) mostra um rotor de seis polos salientes e (b) um com dois polos lisos, com visão frontal e lateral.

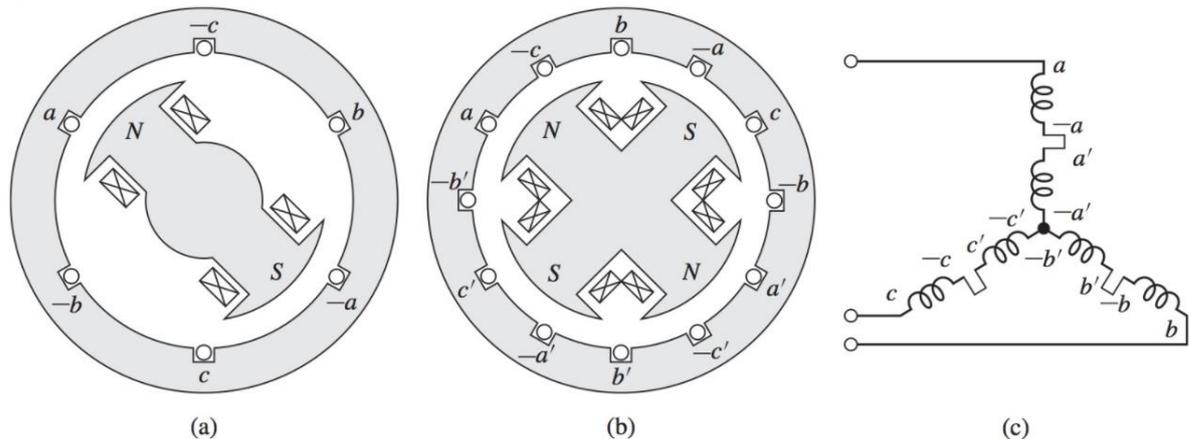
Figura 17 - Rotor de Polos Salientes e Rotor de Polos Lisos



Fonte: Adaptado pelos Autores, com base em Chapman (2013).

Na Figura 18 é possível ver dois exemplos de máquinas síncronas com (a) dois polos, (b) quatro polos e (c) ligação em Y dos enrolamentos.

Figura 18 - Máquinas Síncronas Trifásicas



Fonte: Umans, 2014.

Chapman (2013) diz ainda que é possível utilizar uma máquina totalmente independente de quaisquer fontes de potência externa. Para tal, é preciso introduzir no eixo do rotor uma pequena excitatriz piloto, ou seja, um pequeno gerador CA com ímãs permanentes. Ela produz a potência para o circuito de campo da excitatriz, a qual por sua vez controla o circuito de campo da máquina principal, isolando a máquina. Controlando a baixa corrente de campo CC do gerador da excitatriz (localizado no estator), é possível ajustar a corrente de campo na máquina principal sem usar escovas nem anéis coletores. Como nunca ocorrem contatos mecânicos entre o rotor e o estator, uma excitatriz sem escovas requer muito menos manutenção do que escovas e anéis coletores.

A frequência de saída do alternador está relacionada com o número de polos e a velocidade de rotação do seu eixo e pode ser obtida através da Equação (11):

$$f = \frac{P \cdot N}{120} \quad (11)$$

Onde:

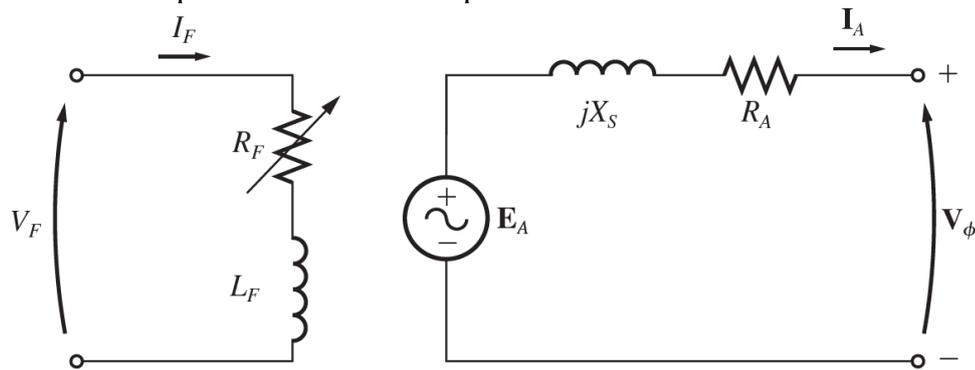
P = número de polos (2, 4, 6...)

N = velocidade de rotação [RPM]

A velocidade correspondente para uma dada frequência (50 ou 60Hz, por exemplo) é chamada de velocidade síncrona (FITZGERALD et al., 2006).

Conhecer o circuito equivalente de uma máquina é importante para ajustes finos, como mudança da resistência R_f para controlar o fluxo de corrente de campo e/ou simulações (CHAPMAN, 2013). Tal circuito pode ser visto na Figura 19.

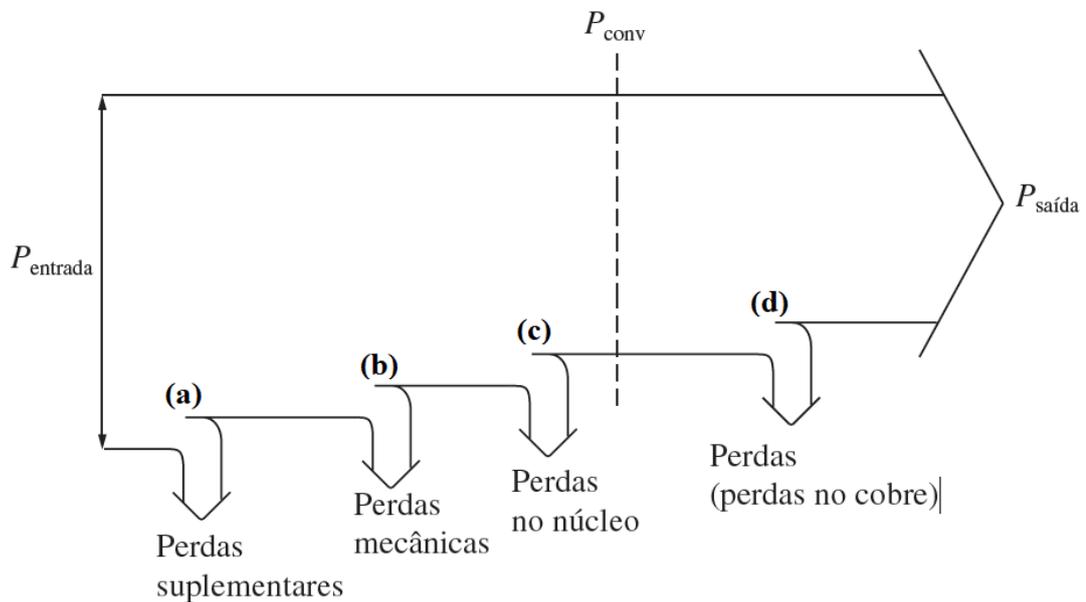
Figura 19 - Circuito Equivalente de uma Máquina Síncrona



Fonte: Chapman (2013).

Como qualquer outra máquina, as máquinas síncronas não possuem cem por cento de aproveitamento, ou seja, nem toda potência mecânica é convertida em potência elétrica. Porém, qualquer que seja a fonte, ela deve ter a propriedade básica de que sua velocidade seja quase constante independentemente da potência demandada (CHAPMAN, 2013). A Figura 20 apresentam as perdas comuns em uma máquina síncrona.

Figura 20 - Fluxo de Potência de uma Máquina Síncrona



Fonte: Adaptado pelos Autores, com base em Chapman (2013).

Conforme Chapman (2013) e analisando a Figura 20, as perdas em um gerador podem ser:

- (a) Perdas suplementares: todas as perdas que não são incluídas em nenhum dos itens abaixo. Para a maioria das máquinas, as perdas suplementares são consideradas por convenção como representando 1% da carga total.
- (b) Perdas mecânicas: Estão associadas as perdas por atrito e ventilação. Variam com o cubo da velocidade de rotação, ou seja, quanto mais rápido a máquina opera, maiores serão suas perdas mecânicas.
- (c) Perdas no núcleo: São as perdas por histerese e por corrente parasita, que ocorrem no metal do gerador. Elas variam com o quadrado da densidade de fluxo (B^2) e, para o rotor com a potência 1,5 da velocidade de rotação ($n^{1,5}$).
- (d) Perdas no cobre: As perdas que ocorrem nos enrolamentos da armadura e no campo da máquina são ditas perdas suplementares. Tais perdas são calculadas utilizando a corrente e a resistência de armadura e de campo.

Analisando a Figura 20, as perdas totais de uma máquina síncrona se resumem à:

$$P_{perdas} = P_{suplementares} + P_{mecanicas} + P_{nucleo} + P_{cobre} \quad (12)$$

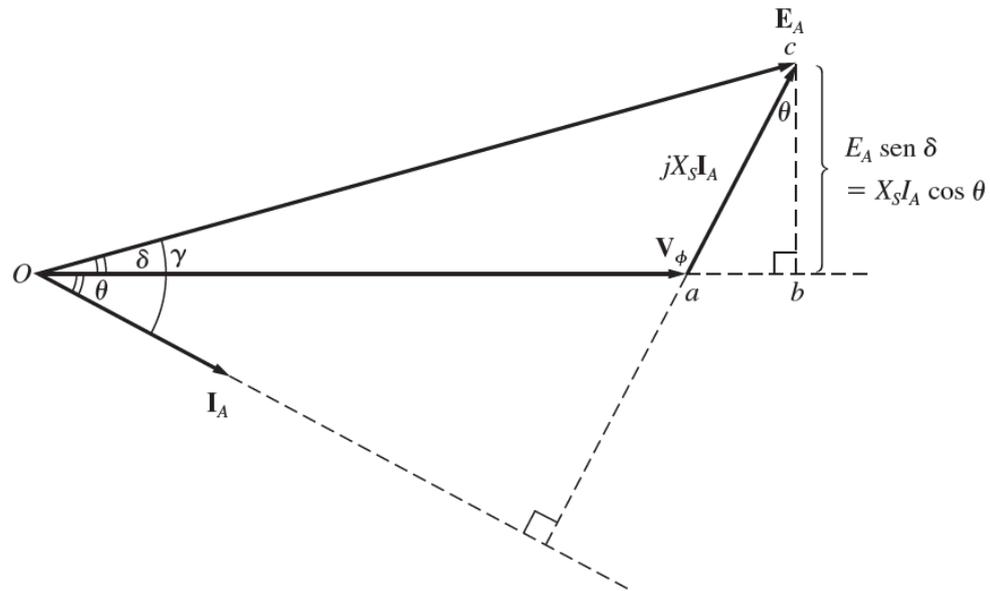
A potência na saída por fase da máquina síncrona trifásica é dada pelas Equações (13) e (14).

$$P_{saída} = 3I_{entrada} \cdot V_{entrada} \cdot \cos\theta \quad (13)$$

$$Q_{saída} = 3I_{entrada} \cdot V_{entrada} \cdot \sen\theta \quad (14)$$

Para cálculo da potência máxima de uma máquina síncrona possível ignorar a presença da resistência de armadura R_a , em virtude de seu baixo valor, quando comparada à reatância síncrona da máquina. Para tal, é possível observar o diagrama fasorial na Figura 21. Observa-se também o ângulo δ , que é conhecido como ângulo interno ou ângulo de conjugado (torque) da máquina (CHAPMAN, 2013).

Figura 21 - Diagrama Fasorial Simplificado com R_a Ignorada



Fonte: Chapman (2013).

Fitzgerald et al. (2006, p. 285) afirma que:

Em muitos casos, as máquinas síncronas são operadas em conjunto com um sistema externo. Esse sistema pode ser representado por uma fonte de frequência e tensão constantes, sendo conhecida como barramento infinito. Sob essas condições, a velocidade síncrona é determinada pela frequência do barramento infinito, e a potência de saída da máquina é proporcional ao produto da tensão de barramento pela tensão interna da máquina (proporcional, por sua vez, à excitação de campo) e pelo seno do ângulo de fase entre eles (o ângulo de potência). Essa potência é inversamente proporcional à reatância líquida entre eles.

A potência de conversão de uma máquina síncrona se dá por:

$$P_{conv} = \frac{3V_{entrada} \cdot E_A}{X_s} \text{sen} \delta \quad (15)$$

Consequentemente, será máxima por fase quando $\delta = 90^\circ$, já que $\text{sen} \delta = 1$, então:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{3V_{entrada} \cdot E_A}{X_s} \quad (16)$$

Para Chapman (2013, p. 207) “a potência máxima indicada por essa equação é denominada limite de estabilidade estática do gerador. Normalmente, os geradores reais nunca

chegam nem próximos desse limite. As máquinas reais apresentam ângulos típicos de conjugado (ou torque) a plena carga de 20 a 30 graus”.

4.4.1.2 Máquinas de indução

Chapman (2013, p. 307) diz que:

Uma máquina com apenas um conjunto contínuo de enrolamentos amortecedores é denominada máquina de indução. Essas máquinas são denominadas máquinas de indução porque a tensão do rotor (que produz a corrente do rotor e o campo magnético do rotor) é induzida nos enrolamentos do rotor em vez de ser fornecida por meio de uma conexão física de fios.

Os enrolamentos do estator de uma máquina de indução são basicamente os mesmos de uma máquina síncrona, porém eles não são excitados por uma fonte externa. Em vez disso, correntes são induzidas nos enrolamentos curto-circuitados do rotor quando este atravessa a onda de fluxo da armadura sincronicamente. As correntes são induzidas por ação de transformador a partir dos enrolamentos do estator. Assim, as máquinas de indução são máquinas assíncronas e produzem conjugado apenas quando a velocidade do rotor é diferente da velocidade síncrona (UMANS, 2014).

Segundo Umans (2014, p. 199):

Como as correntes do rotor são produzidas por indução, uma máquina de indução pode ser vista como um transformador genérico no qual a potência elétrica é transformada entre rotor e estator juntamente com uma mudança de frequência e um fluxo de potência mecânica.

Existem dois tipos de rotores aplicados às máquinas de indução, o rotor tipo gaiola de esquilo e o rotor bobinado. Chapman (2013, p. 309) define o rotor gaiola de esquilo como:

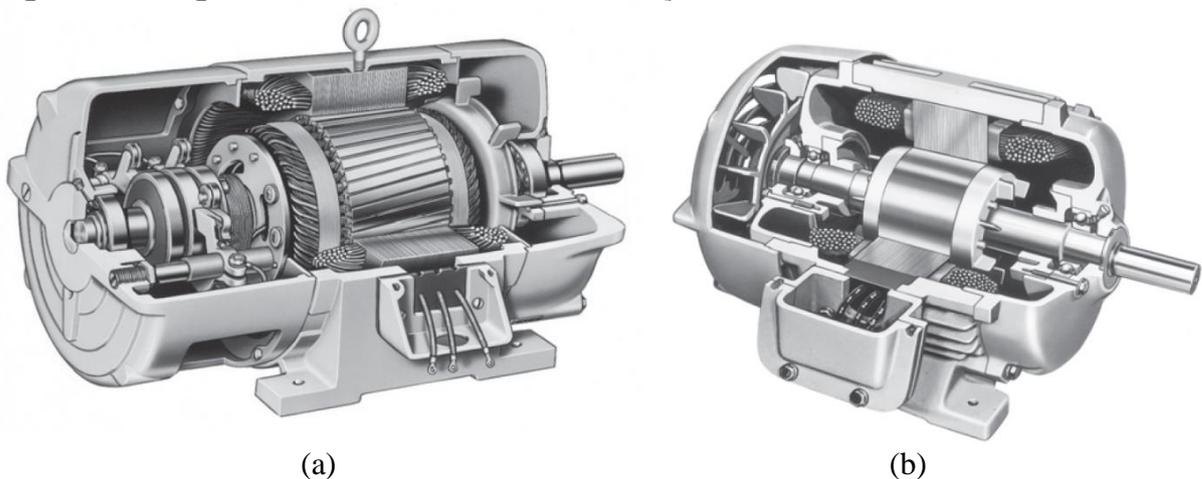
Esse rotor consiste em uma série de barras condutoras que estão encaixadas dentro de ranhuras na superfície do rotor e postas em curto-circuito em ambas as extremidades por grandes anéis de curto-circuito. Essa forma construtiva é conhecida como rotor de gaiola de esquilo porque, se os condutores fossem examinados isoladamente, seriam semelhantes às rodas nas quais os esquilos ou os hamsters correm fazendo exercício.

Chapman (2013, p. 309) também define o rotor bobinado como:

Um rotor bobinado tem um conjunto completo de enrolamentos trifásicos que são similares aos enrolamentos do estator. As três fases dos enrolamentos do rotor são usualmente ligadas em Y e suas três terminações são conectadas aos anéis deslizantes no eixo do rotor. Os enrolamentos do rotor são colocados em curto-circuito por meio de escovas que se apoiam nos anéis deslizantes. Portanto, nos motores de indução de rotor bobinado, as correntes no rotor podem ser acessadas por meio de escovas, nas quais as correntes podem ser examinadas e resistências extras podem ser inseridas no circuito do rotor.

Na Figura 29a se observa um motor de indução com rotor bobinado e na Figura 29b um com rotor tipo gaiola de esquilo. Além das diferenças construtivas dos rotores, suas formas físicas são visualmente diferentes.

Figura 22 - Diagrama em Corte de Motores de Indução



Fonte: Adaptado pelos Autores, com base em Chapman (2013).

Fitzgerald et al. (2006, p. 295) diz que:

A extrema simplicidade e a robustez da construção em gaiola de esquilo representam vantagens notáveis para esse tipo de motor de indução e, de longe, fazem dele o tipo de motor mais comumente usado, indo desde motores fracionários até os de grande porte.

Chapman (2013) nos apresenta que é o movimento relativo do rotor em relação ao campo magnético do estator que produz uma tensão induzida em uma barra do rotor. Entretanto,

há um limite superior finito para a velocidade do motor. Se o rotor do motor de indução estivesse girando na velocidade síncrona, as barras do rotor estariam estacionárias em relação ao campo magnético e não haveria tensão induzida. Se a tensão induzida fosse igual a zero, então não haveria corrente nem campo magnético no rotor. Sem campo magnético no rotor, o conjugado induzido seria zero e o rotor perderia velocidade como resultado das perdas por atrito. Portanto, um motor de indução pode ganhar velocidade até próximo da velocidade síncrona, sem nunca a alcançar exatamente. Para tal, a velocidade de rotação do campo magnético é apresentada na Equação (17):

$$n_{\text{sin } c} = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (17)$$

Onde:

f = frequência [Hz]

P = número de polos

A tensão induzida nas barras do rotor de um motor de indução depende da velocidade do rotor em relação aos campos magnéticos. A velocidade de escorregamento é definida como a diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor; e pode ser calculada conforme abaixo (CHAPMAN, 2013):

$$n_{\text{esc}} = n_{\text{sin } c} - n_m \quad (18)$$

Onde:

n_{esc} = velocidade de escorregamento da máquina;

$n_{\text{sin } c}$ = velocidade dos campos magnéticos;

n_m = velocidade mecânica do eixo do motor.

Essa diferença de velocidades também pode ser calculada de forma percentual. Este resultado ganha o nome de escorregamento (s) e pode ser alcançado da seguinte forma:

$$s = \frac{n_{\text{sin } c} - n_m}{n_{\text{sin } c}} (\times 100\%) \quad (19)$$

Ou ainda por meio da velocidade angular:

$$s = \frac{\omega_{\text{sin } c} - \omega_m}{\omega_{\text{sin } c}} (\times 100\%) \quad (20)$$

A partir de velocidade dos campos magnéticos é possível calcular a velocidade mecânica da máquina:

$$n_m = (1-s)n_{\text{sin } c} \quad (21)$$

E também pela frequência angular:

$$\omega_m = (1-s)\omega_{\text{sin } c} \quad (22)$$

Segundo Chapman (2013) a partir do escorregamento é possível definir a frequência do rotor (f_{re}) por meio da expressão:

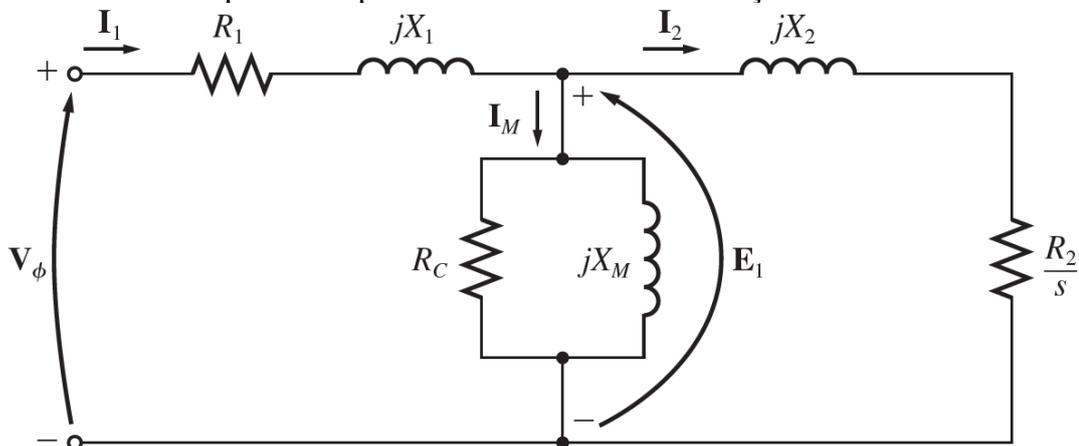
$$f_{re} = sf \quad (23)$$

A frequência do rotor também pode ser encontrada utilizando:

$$f_{re} = \frac{P}{120}(n_{\text{sin } c} - n_m) \quad (24)$$

Uma das grandes vantagens das máquinas de indução são a sua capacidade de operação com diferentes resistências. Para entender esta máquina e conseguir retirar o melhor aproveitamento para determinada aplicação é preciso conhecer seu circuito equivalente, que está representado na Figura 23. É importante perceber que conforme Fitzgerald et al. (2006, p. 303) “o circuito equivalente que representa o estator é exatamente igual ao usado para representar o primário de um transformador. Para completar, os efeitos do rotor devem ser incluídos”.

Figura 23 - Circuito Equivalente por Fase de um Motor de Indução

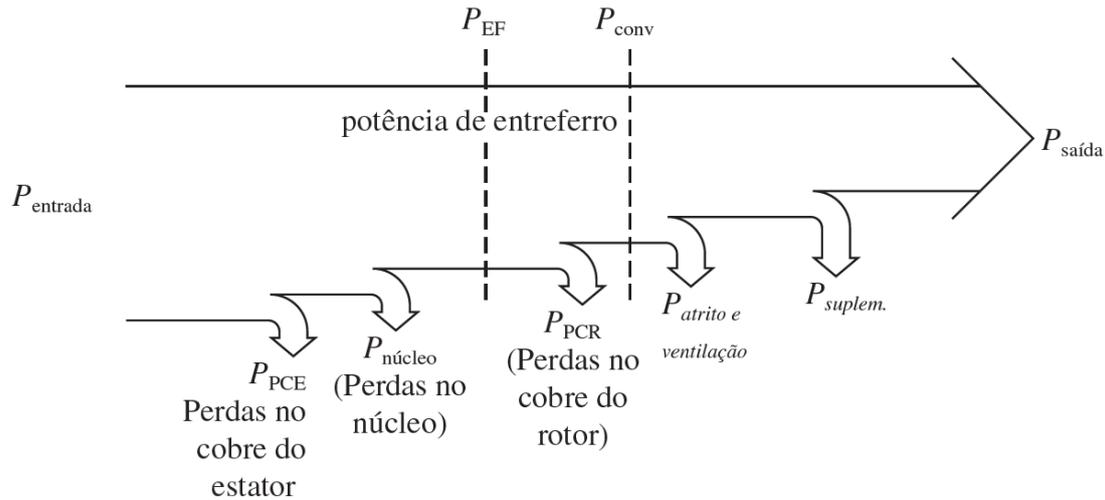


Fonte: Chapman, 2014.

Chapman (2013, p. 316) nos indica que “um motor de indução é denominado máquina de excitação simples (em oposição a uma máquina síncrona que é de excitação dupla), porque a potência é fornecida somente ao circuito de estator do motor”.

Assim como as máquinas síncronas, as máquinas de indução também possuem perdas suplementares, mecânicas ($P_{\text{atrito e ventilação}}$) e perdas no núcleo. A diferença se dá pela P_{PCE} , que se trata das perdas nos enrolamentos do estator, e P_{PCR} , que são as perdas no cobre do rotor. Além disso, a potência de conversão (P_{conv}) é obtida antes das perdas mecânicas e suplementares (CHAPMAN, 2013). Todo fluxo de potência pode ser observado na Figura 24.

Figura 24 - Fluxo de Potência de uma Máquina de Indução



Fonte: Adaptado pelos Autores, com base em Chapman (2013).

Existem perdas na máquina de indução que variam de acordo com sua velocidade e sua estrutura física, Chapman (2013, p. 322) nos define que:

Devido à natureza das perdas no núcleo, é um tanto arbitrário definir o lugar onde elas ocorrem na máquina. As perdas no núcleo de um motor de indução vêm parcialmente do circuito do estator e parcialmente do circuito do rotor. [...] Quanto maior a velocidade de um motor de indução, maiores serão as perdas por atrito, ventilação e suplementares. Por outro lado, quanto maior for a velocidade do motor (até $n_{\text{sin.c}}$), menores serão suas perdas no núcleo. Portanto, essas três categorias de perdas são algumas vezes combinadas e denominadas perdas rotacionais. As perdas rotacionais totais de um motor são frequentemente consideradas constantes com a velocidade variável, porque as diversas perdas variam em sentidos opostos com mudança de velocidade.

Assim a potência no entreferro pode ser calculada conforme:

$$P_{EF} = P_{entrada} - P_{PCE} - P_{núcleo} \quad (25)$$

E a potência de conversão é:

$$P_{conv} = (1 - s)P_{EF} \quad (26)$$

Por fim a potência de saída da máquina de indução se porta da seguinte maneira:

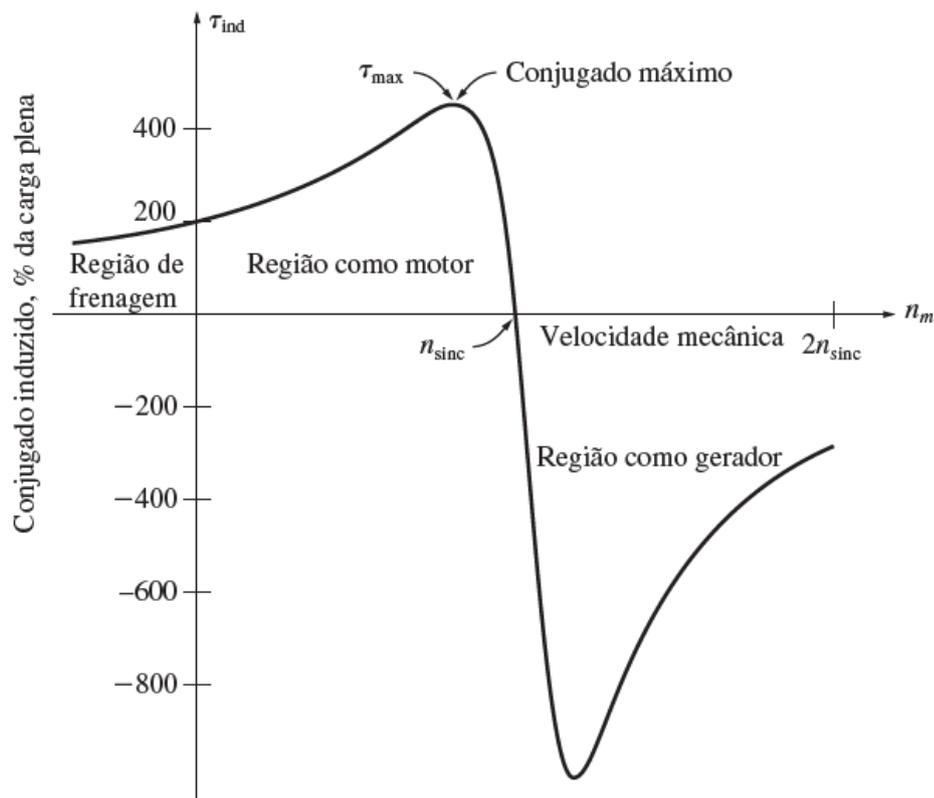
$$P_{saida} = P_{conv} - P_{mecanicas} - P_{suplmentares} \quad (27)$$

O conjugado induzido da máquina de indução pode ser expresso em termos da potência de entreferro e velocidade síncrona:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{EF}}{\omega_{sinc}} \quad (28)$$

O Gráfico 8 indica a curva característica de velocidade *versus* conjugado de um motor de indução típico, independentemente do tipo de rotor aplicado a ele.

Gráfico 8 - Curva Característica de Velocidade *versus* Conjugado



Fonte: Umans, 2014.

Chapman (2013) nos indica que se um motor de indução for acionado por uma máquina motriz externa com uma velocidade superior a n_{sinc} , o sentido do seu conjugado

induzido será invertido e ele funcionará como gerador. À medida que o conjugado aplicado ao seu eixo pela máquina motriz cresce, a quantidade de potência produzida pelo gerador de indução também aumenta. Há um conjugado induzido máximo possível no modo de funcionamento como gerador.

Fitzgerald et al. (2006, p. 334) diz que:

Um dos fatos notáveis que afetam as aplicações do motor de indução é que o escorregamento, para o qual ocorre o conjugado máximo, pode ser controlado pela variação da resistência do rotor. Uma elevada resistência de rotor proporciona ótimas condições de partida, mas um pobre desempenho de funcionamento. Entretanto, uma baixa resistência do rotor pode resultar em condições de partida não satisfatórias.

Chapman (2013, p. 388) ainda define que:

Como gerador, uma máquina de indução tem diversas limitações. Como lhe falta um circuito de campo separado, um gerador de indução não pode produzir potência reativa. De fato, ela consome potência reativa e, portanto, uma fonte externa de potência reativa deve ser ligada permanentemente a ela para manter o campo magnético em seu estator. Essa fonte externa de potência reativa também deve controlar a tensão de terminal do gerador – sem corrente de campo, um gerador de indução não pode controlar sua própria tensão de saída. Normalmente, a tensão do gerador é mantida pelo sistema de potência externo ao qual ela está ligada.

Devido à sua simplicidade e ao pequeno tamanho por potência de saída, os geradores de indução são também muito indicados para geradores eólicos de pequeno porte. Muitos geradores eólicos à venda no comércio são projetados para operar em paralelo com os grandes sistemas de potência, fornecendo uma fração das necessidades totais de potência dos consumidores. É interessante observar que as máquinas de indução de rotor bobinado vêm ressurgindo na forma de geradores de indução eólicos. As máquinas de rotor bobinado são mais caras do que as máquinas com rotor de gaiola de esquilo e requerem mais manutenção devido aos anéis deslizantes e às escovas incluídas na sua construção. Entretanto, as máquinas de rotor bobinado permitem controlar a resistência do rotor. A inserção ou remoção da resistência do rotor altera a forma da característica de conjugado *versus* velocidade e, portanto, a velocidade de funcionamento da máquina (CHAPMAN, 2013).

4.4.2 Máquina CC

Conforme Chapman (2013, p. 404):

As máquinas CC são geradores que convertem a energia mecânica em energia elétrica CC e motores que convertem a energia elétrica CC em energia mecânica. A maioria das máquinas CC é como as máquinas CA no sentido de que elas contêm tensões e correntes CA em seu interior – as máquinas CC têm uma saída CC somente porque existe um mecanismo que converte as tensões CA internas em tensões CC em seus terminais. Como esse mecanismo é denominado comutador, as máquinas CC são também conhecidas como máquinas de comutação.

Umans (2014, p. 447) afirma que:

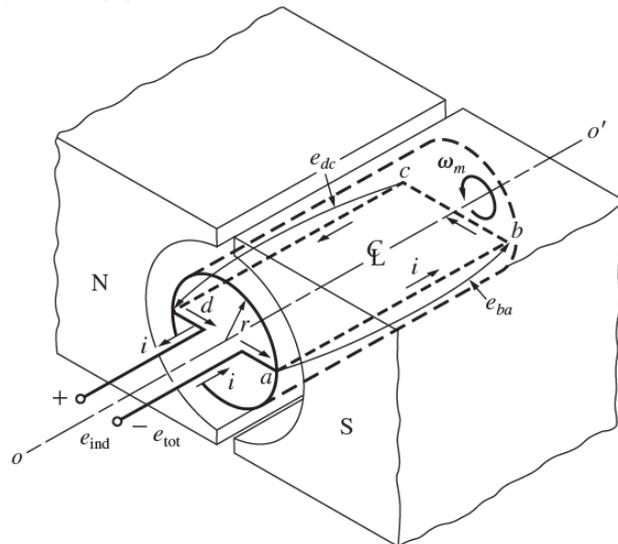
Antes que os acionamentos de motores CA fossem disponibilizados de forma ampla, as máquinas CC eram basicamente a única opção disponível para muitas aplicações que requeriam um elevado grau de controle [...]. Eles ainda mantêm uma forte posição competitiva tanto nos tamanhos de grande porte, usados em aplicações industriais, como nos tamanhos menores, usados em uma ampla variedade de aplicações.

Os geradores CC, também vulgarmente denominados dínamos, perderam espaço para os geradores CA, pois conforme Umans (2014, p. 403) “[...] a tecnologia de estado sólido que é utilizada nos sistemas de acionamento CA desenvolveu-se o suficiente para que esses sistemas estejam substituindo as máquinas CC em aplicações antes associadas quase exclusivamente às máquinas CC”, porém isso não elimina, nem limita o uso dos geradores CC os quais ainda são utilizados em diversas aplicações encontradas em nosso cotidiano, conforme afirma Jr. Nascimento (2014, p. 87):

Geradores CC são utilizados quando necessitamos de corrente contínua a partir de força mecânica. Este é o caso de dínamos e geradores CC embarcados. Encontramos geradores CC em navios, barcos, bicicletas e até em submarinos para recarregar as baterias dos motores CC de propulsão.

A Figura 25 apresenta um exemplo simples de uma máquina rotativa CC, a qual consiste em uma única espira de fio girando em torno de um eixo fixo, a parte rotativa é denominada rotor e a parte estacionária é denominada estator. O campo magnético da máquina é alimentado pelos polos norte e sul (CHAPMAN, 2013).

Figura 25 - Máquina Rotativa CC

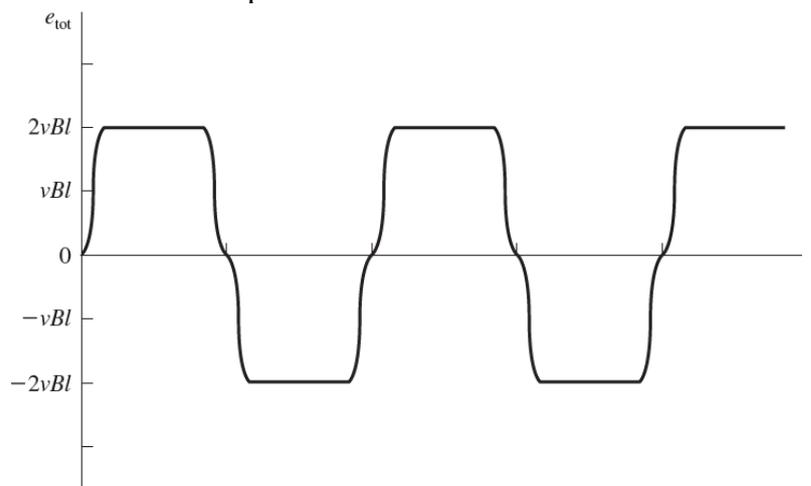


Fonte: Chapman, 2013.

Com a rotação do rotor uma tensão será induzida na espira. Segundo Chapman (2013, p. 409) “a tensão gerada na máquina é igual ao produto do fluxo presente no interior da máquina vezes a velocidade de rotação da máquina, multiplicado por uma constante que representa os aspectos construtivos da máquina”.

De forma simplificada podemos dizer que a tensão em qualquer máquina depende do fluxo na máquina; da velocidade de rotação; e de uma constante que represente a construção da máquina (CHAPMAN, 2013). Porém conforme pode ser observado na Figura 26 a máquina produz uma tensão CA ao invés da tensão CC desejada.

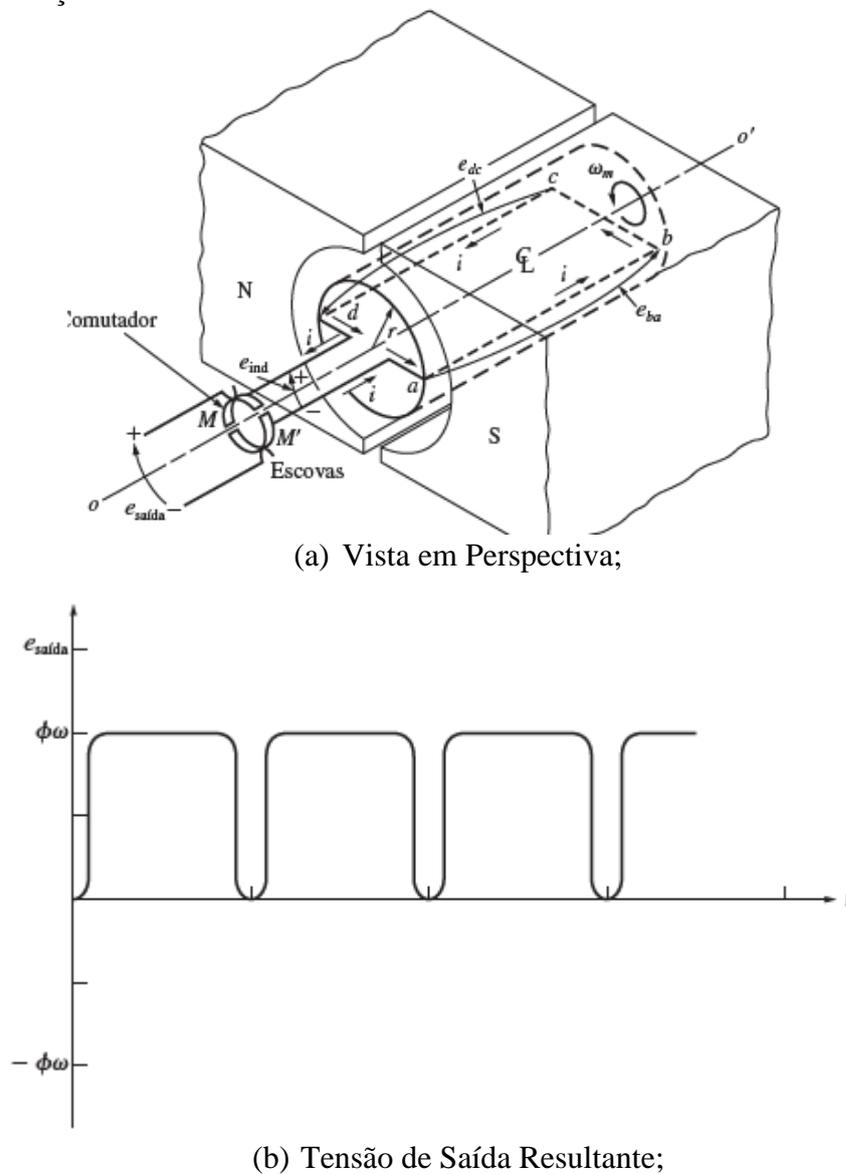
Figura 26 - Tensão de Saída da Espira



Fonte: Chapman, 2013

Uma maneira de converter a tensão CA em tensão CC é acrescentar dois condutores semicirculares, denominados segmentos comutadores, à extremidade da espira e dois contatos fixos, denominados escovas, instalados em ângulo tal que, no instante em que a tensão na espira é zero, os contatos põem em curto-circuito os dois segmentos. De modo que “sempre que a tensão na espira muda de sentido, os contatos também mudam de segmento e a saída de tensão dos contatos sempre é do mesmo tipo” (Chapman, 2013, p. 410). A este processo é dado o nome de comutação. A Figura 27a ilustra a inserção do comutador e das escovas, enquanto a Figura 27b apresenta a tensão de saída resultante do respectivo circuito.

Figura 27 - Produção de uma Tensão de Saída CC

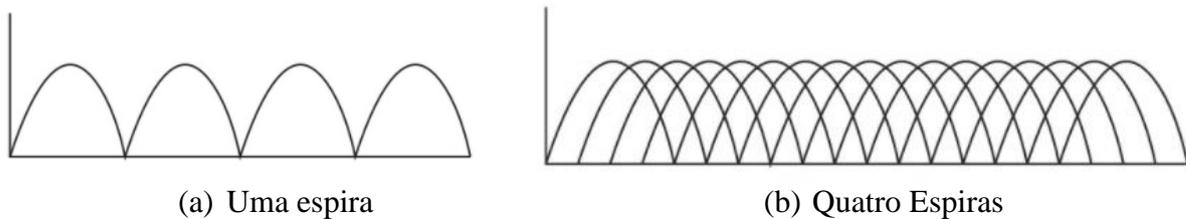


Fonte: Chapman, 2013.

Em suma a comutação é o processo de converter as tensões e correntes CA do rotor de uma máquina CC em tensões e correntes CC em seus terminais. Segundo Chapman (2013, p. 416) “[...] é a parte mais crítica do projeto e funcionamento de qualquer máquina CC”.

Na Figura 27b observa-se a tensão de saída resultante de uma máquina com apenas uma espira, podemos ver que o nível CC não é perfeito, para a obtenção de um nível CC melhor é necessário a inserção de mais espiras. “Quando o número de espiras no rotor aumenta a aproximação para uma tensão CC perfeita continua a se tornar cada vez melhor” (CHAPMAN, 2013, p. 420). Na Figura 28, podemos observar o efeito da inserção de mais espiras na ondulação da tensão, na Figura 28a temos a ondulação de tensão em uma máquina com uma única espira, enquanto a Figura 28b ilustra a tensão em uma máquina com quatro espiras. Desta forma, fica ainda mais claro o efeito do número de espiras na ondulação de tensão.

Figura 28 - Comparação de Tensões Com Diferentes Quantidades de Espiras



Fonte: Adaptado de Eismin, 2016.

De forma resumida “comutação é o processo de chavear as conexões das espiras do rotor de uma máquina CC exatamente no momento em que a tensão na espira inverte a polaridade, de forma a manter uma tensão de saída CC basicamente constante” (CHAPMAN, 2013, p. 420).

A eficiência de uma máquina CC é definida conforme Equação (29).

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \times 100\% \quad (29)$$

A diferença entre a potência de entrada e a potência de saída da máquina corresponde às perdas que ocorrem em seu interior, portanto:

$$\eta = \frac{P_{saída} - P_{perdas}}{P_{entrada}} \times 100\% \quad (30)$$

As perdas em máquinas CC são análogas as perdas das máquinas CA, vistas no item 4.4.1.1, com a diferença que devem ser levadas em consideração também as perdas ocorridas

nas escovas, que consiste na potência perdida através do potencial de contato das escovas da máquina.

Os geradores CC diferem entre si nas características de terminal (tensão *versus* corrente), são comparados entre si por suas tensões, potências nominais, eficiências e regulações de tensão (CHAPMAN, 2013).

A regulação de tensão é definida pela Equação (31):

$$RT = \frac{V_{vz} - V_{pc}}{V_{pc}} \times 100\% \quad (31)$$

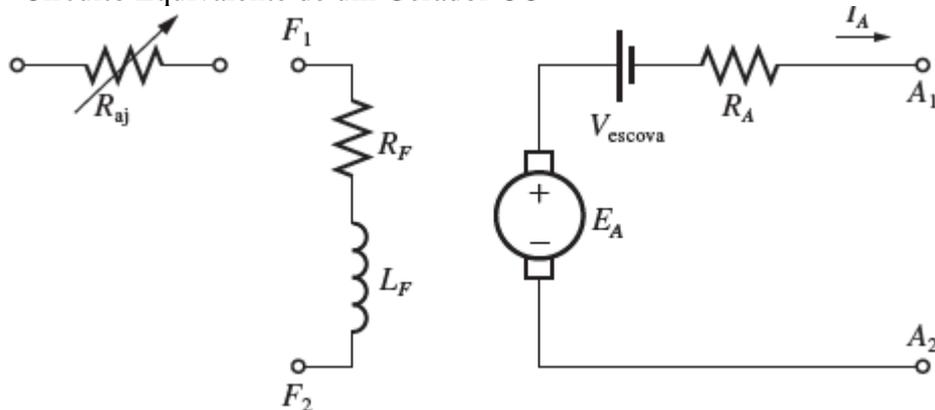
Onde:

V_{vz} = Tensão de terminal sem carga;

V_{pc} = Tensão de terminal a plena carga.

Chapman (2013, p. 527) estabelece que “todos os geradores são acionados por uma fonte de potência mecânica, que é usualmente denominada a máquina motriz do gerador”. A Figura 29 ilustra o circuito equivalente de um gerador CC.

Figura 29 - Circuito Equivalente de um Gerador CC



Fonte: Chapman, 2013.

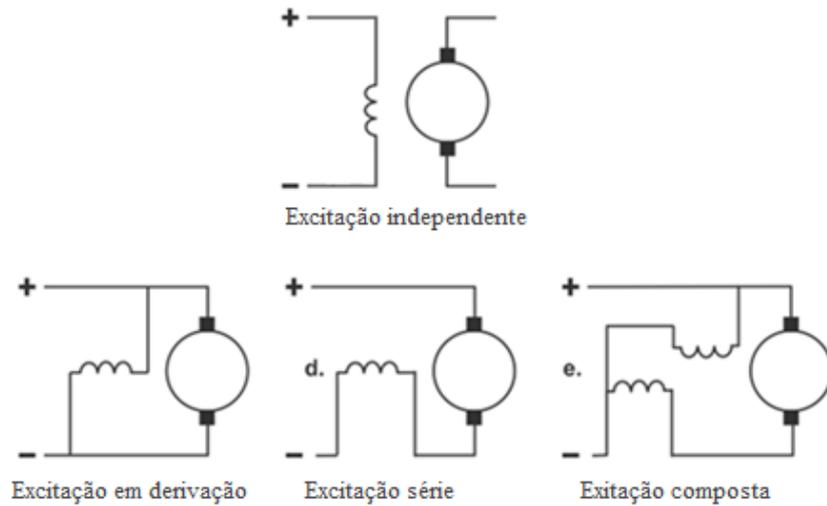
Há cinco tipos principais de geradores CC, classificados de acordo com o modo de produção do fluxo de campo, os quais conforme Chapman (2013, p. 526) são:

1. Gerador de excitação independente: No gerador de excitação independente, o fluxo de campo é obtido de uma fonte de potência separada do próprio gerador.
2. Gerador em derivação: No gerador em derivação, o fluxo de campo é obtido pela ligação do circuito de campo diretamente aos terminais do gerador.
3. Gerador série: No gerador série, o fluxo de campo é obtido ligando o circuito de campo em série com a armadura do gerador.

4. Gerador composto cumulativo: No gerador composto cumulativo, estão presentes ambos os campos em derivação e em série, e seus efeitos são aditivos.
5. Gerador composto diferencial: No gerador composto diferencial, estão presentes ambos os campos em derivação e em série, mas seus efeitos são subtrativos.

A Figura 30 apresenta de forma simplificada os circuitos para os diferentes tipos de excitação.

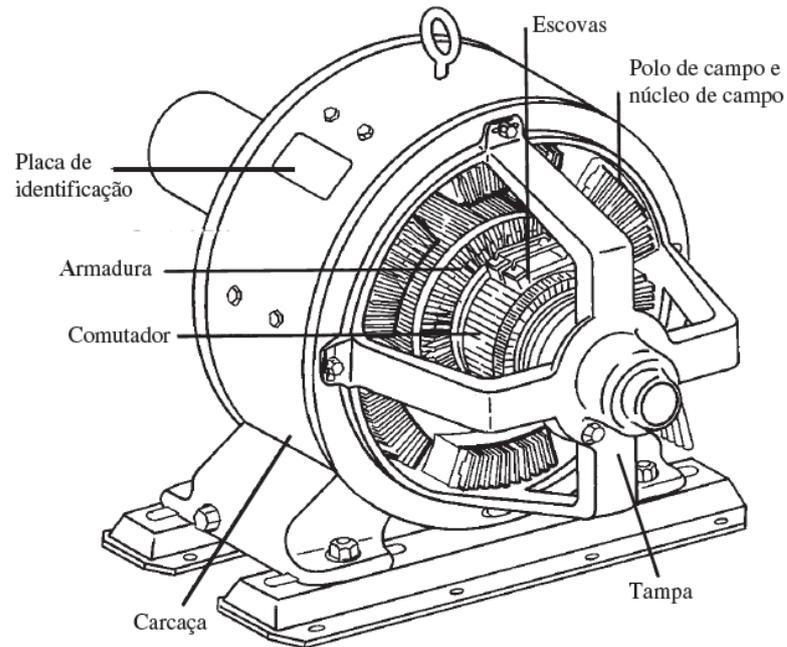
Figura 30 - Circuito dos Diferentes Tipos de Excitação



Fonte: Elaboração do Autores, 2017.

A Figura 31 apresenta um esquema simplificado de uma máquina CC.

Figura 31 - Diagrama Simplificado de uma Máquina CC.



Fonte: Chapman, 2013.

Devido ao desgaste o comutador e as escovas são os componentes das máquinas CC que mais necessitam de manutenção, um dos fatores que afeta o desgaste é a quantidade de corrente que circula na máquina. Caso a corrente seja muito pequena a camada de óxido, que lubrifica o movimento das escovas sobre os segmentos do comutador, rompe-se aumentando assim o atrito entre as escovas e o comutador, atrito esse que contribuirá para um desgaste mais rápido dos respectivos componentes (UMANS, 2014).

5 MINI GERADOR EÓLICO

Neste capítulo será descrito os estudos realizados para a construção do protótipo, os testes executados, além de descrever resumidamente as etapas de construção e, por fim, apresentar as dificuldades encontradas.

5.1 ESTUDO DO PROTÓTIPO

Nos tópicos a seguir serão apresentadas as definições e as escolhas realizadas para a construção do mini gerador eólico proposto.

5.1.1 Rotor

Para a definição do rotor a ser utilizado muitos aspectos foram considerados, tais como: simplicidade de montagem, facilidade de encontrar os materiais, custo empregado e desempenho. Abaixo, são expostos o raciocínio lógico e justificativas para as escolhas feitas no decorrer deste Trabalho de Conclusão de Curso com relação ao rotor.

5.1.1.1 Eixo do rotor

Como discorrido no tópico 4.1, existem basicamente dois tipos de rotores para aerogeradores. A seguir são apresentadas as principais vantagens do rotor vertical frente ao horizontal.

- Diferentemente do horizontal, no vertical não é necessário alinhamento com o vento, assim a estrutura do mini gerador eólico pode ser fixa, acarretando numa montagem menos complexa;
- Maior simplicidade de construção devido à pouca pressão sobre a estrutura de apoio em consequência das pás;
- O rotor vertical possui uma boa adaptação com a variação na velocidade do vento, podendo vencer a inércia com baixas velocidades;
- Rotores verticais geram menos poluição sonora e visual;

- Os rotores verticais possuem uma manutenção mais fácil, por trabalharem com os equipamentos de geração mais próximos ao solo.

Diante dos pontos expostos acima para o desenvolvimento deste projeto foi escolhido o rotor de eixo vertical.

5.1.1.2 Tipo de turbina

A turbina é o componente responsável pela transformação da energia cinética produzida pelos ventos em energia mecânica. Para a escolha do tipo de turbina a ser utilizada, diversos fatores devem ser levados em consideração, dentre os quais devemos destacar o local, a direção e velocidade do vento.

A versão montada do mini gerador eólico ficará instalada nas dependências da UNISUL, na Figura 32 é possível observar uma vista superior. Neste local, a velocidade v é em média 3 m/s , segundo dados observados no site Weather.com, portanto, este foi o valor utilizado nos cálculos indicados na sequência.

Figura 32 - Vista superior da UNISUL - Campus Grande Florianópolis



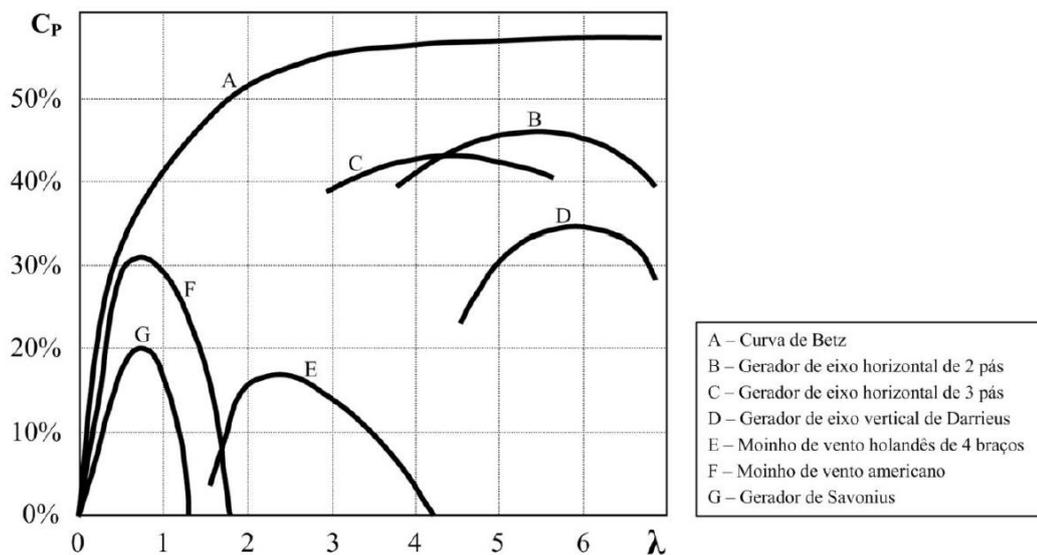
Fonte: Google Earth. Acesso em: 10 de junho de 2018.

Ôlo (2012) nos apresenta que uma turbina é medida pelo coeficiente de potência aerodinâmica C_p , que relaciona a potência extraída do vento pela turbina P_e com a potência disponível no vento P_v :

$$C_p = \frac{P_e}{P_v} \quad (32)$$

Outro dado importante apresentado por Ôlo (2012) é o λ , que representa a relação da velocidade angular com a velocidade tangencial. Assim, é possível traçar a curva apresentada no Gráfico 9 que indica o comportamento dos aerogeradores convencionais.

Gráfico 9 - Desempenho dos Principais Geradores Eólicos



Fonte: Ôlo, 2012.

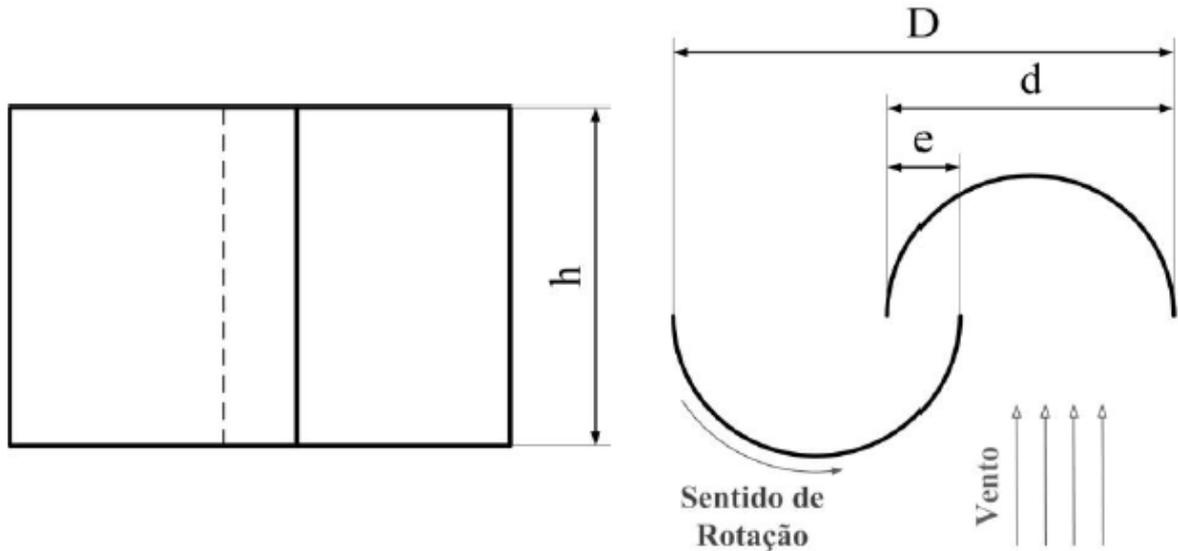
Apesar de não apresentar o melhor desempenho quando comparado com outros aerogeradores e ser difícil prever seu comportamento, o aerogerador Savonius ainda ostenta boas justificativas para seu uso. Ôlo (2012 apud Afungchui 2010, p. 21) apresenta que

Características tais como o reduzido tempo e custo de fabricação, bem como a tecnologia requerida na sua construção ser acessível, a simplicidade da forma da pá, não necessita de orientação à direção do vento, funciona a velocidades tão reduzidas quanto 1 m/s, permitem que a turbina de savonius se torne uma solução atrativa, quando utilizada para pequenos aproveitamentos energéticos.

Tais fundamentos fizeram com que esta turbina fosse escolhida para uso no mini gerador eólico.

Na Figura 33 é possível visualizar a vista frontal e superior de uma turbina tipo Savonius, segundo Ôlo (2012, p. 19) está turbina “consiste em duas formas semicilíndricas, dispostas na vertical, com uma ligeira sobreposição ao centro”.

Figura 33 - Vistas do Rotor Savonius



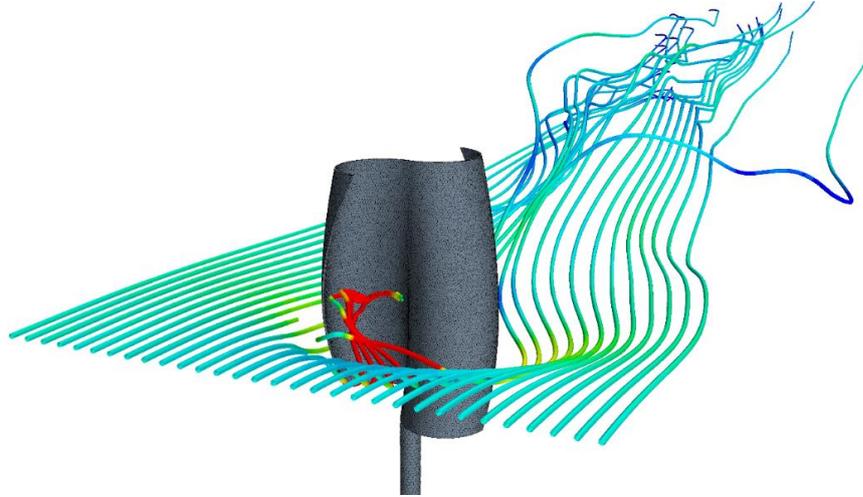
(a) Vista Frontal

(b) Vista Superior

Fonte: Ôlo, 2012.

Na Figura 34 pode-se analisar como o vento se comporta ao transpor uma turbina do tipo Savonius. Observa-se que a área de contato da turbina com a corrente de vento que efetivamente gera o movimento é equivalente aos traços em vermelho e que o vento fica perturbado após a passagem pela turbina, indicando que não é aconselhável um aerogerador atrás do outro, com o mesmo alinhamento.

Figura 34 - Comportamento do Vento Após Transpor um Aerogerador do Tipo Savonius



Fonte: Propulsive Wing; Disponível em: goo.gl/xMY6NP. Acesso em: 31 mar. 2018.

Após a definição do tipo de turbina é importante mapear qual a potência que ela pode fornecer a carga, para tal utiliza-se a Equação (6). Porém, Sigernes (2016) indica que as perdas aerodinâmicas e mecânicas deste modelo de aerogerador podem chegar a 50%. Portanto a nova equação se apresenta da seguinte forma:

$$P_e = C_p \frac{1}{4} \rho D A_p v^3 \quad (33)$$

É preciso também estimar a velocidade média de rotação da turbina, para isso utiliza-se a Equação (34).

$$n = \frac{60v}{2\pi r} \quad (34)$$

Onde:

r = raio [m];

Afim de um conhecimento mecânico maior sobre a estrutura também é possível calcular o torque através da Equação (35).

$$\tau_s = \frac{P_e r}{v} \quad (35)$$

Foram escolhidos para análise tambores metálicos e cochos⁵ de plástico para serem utilizados como matéria prima das turbinas devido seu baixo custo e acessibilidade (veja todo o material utilizado no item 5.3.1). As dimensões podem ser visualizadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Dimensões das Matérias Primas da Turbina

MATÉRIA PRIMA	ALTURA	LARGURA	DIÂMETRO	FORMATO
Tambor X	0,85 m	0,6 m	0,6 m	Redondo
Tambor Y	0,62 m	0,45 m	0,45 m	Redondo
Cocho	0,92 m	0,68 m	0,50 m	Oval

Fonte: Elaboração dos Autores, 2018.

Foram estudadas as estruturas com um tambor X, um tambor Y, outra com dois tambores Y dispostos um sobre o outro e o cocho. O custo para aquisição de cada um dos tambores e do cocho pode ser visualizado no Quadro 5. O valor total dos tambores é acrescido do valor da mão de obra especializada para corte, já para o cocho esse acréscimo não existe, pois, o mesmo já é comercializado em metades.

Quadro 5 - Custo para Aquisição e Mão de Obra da Turbina

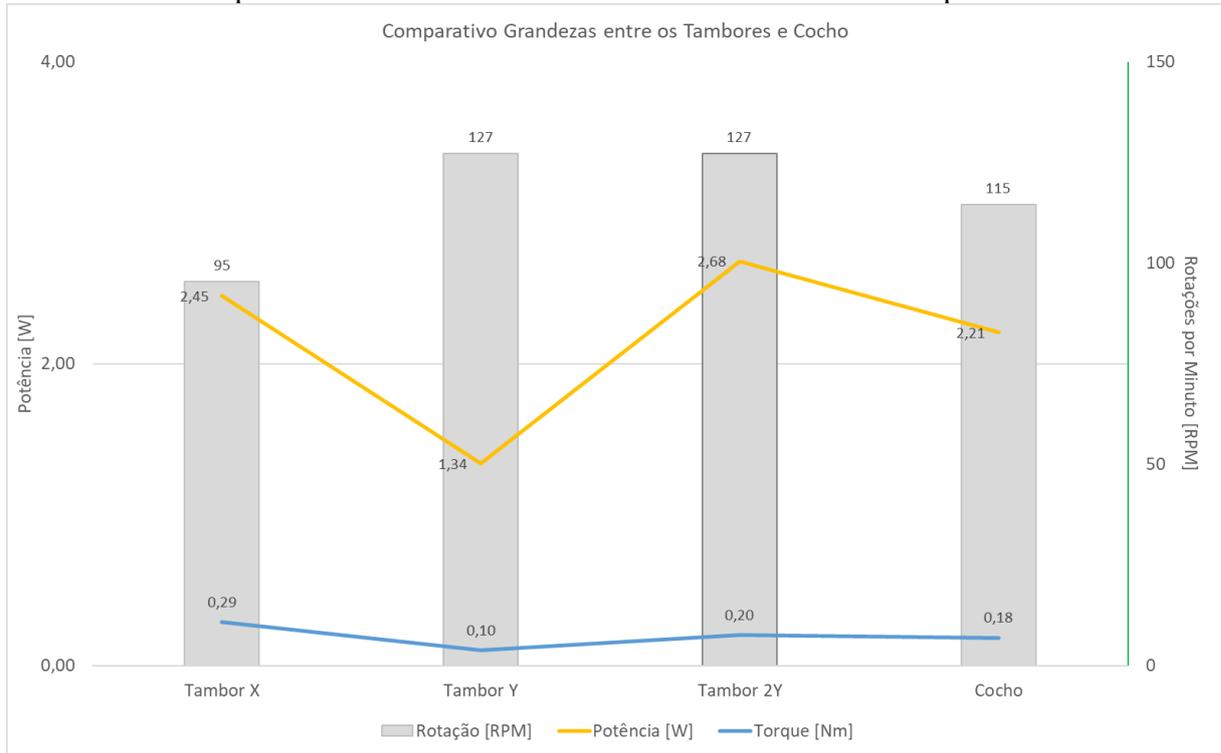
TIPO MATÉRIA PRIMA	QUANT.	VALOR MATÉRIA PRIMA UNIT.	VALOR MÃO DE OBRA UNIT.	VALOR MÃO DE OBRA TOTAL	VALOR TOTAL
Tambor X	1	R\$ 60,00	R\$ 50,00	R\$ 50,00	R\$ 110,00
Tambor Y	1	R\$ 50,00	R\$ 50,00	R\$ 50,00	R\$ 100,00
Tambor 2Y	2	R\$ 50,00	R\$ 50,00	R\$ 100,00	R\$ 200,00
Cocho	2	R\$ 50,00	-	-	R\$ 100,00

Fonte: Elaboração dos Autores, 2018.

Através das equações (33), (34) e (35) é possível calcular a potência, a velocidade de rotação e o torque extraído de uma turbina com as características semelhantes as expostas na Figura 33 e dimensões conforme Quadro 4. O resultado dessas equações pode ser visualizado no Gráfico 10.

⁵ Bebedouro ou comedouro para o gado, de material vário e formato semelhante ao tronco escavado (Dicionário Online de Português, 2017).

Gráfico 10 - Comparativo Grandezas entre as Estruturas de Turbinas Propostas



Fonte: Elaboração dos Autores, 2018.

Analisando os dados apresentados no Gráfico 10 e o Quadro 5, chegou-se à conclusão que o mais eficiente em questão de potência e torque é o tambor X, seguido pelo cocho, já que o tambor Y apresentou um pequeno valor de potência, e o tambor 2Y teria um valor mais elevado e maior complexibilidade de construção.

O tambor X foi adquirido e estudado, porém conforme será observado no item 5.4.1 houveram pontos que inviabilizaram sua utilização. Com isso, foi escolhida a segunda opção (o cocho, feito em polietileno de alta resistência), que pode ser visualizado na Figura 35.

Figura 35 - Cocho Utilizado no Protótipo



Fonte: Os Autores, 2018.

O processo de corte e instalação do cocho pode ser visto no item 5.3.2.2.

5.1.2 Gerador

O gerador consiste em componente crítico, em que sua escolha impacta diretamente nos demais componentes. A escolha errada deste componente pode tornar inviável a construção do mini gerador eólico. Para a escolha do gerador três fatores principais foram levados em consideração, sendo eles disponibilidade no mercado, custo e facilidade para manuseio. Para tanto foram elencadas diversas opções que poderiam ser utilizadas como gerador, dentre elas: alternador de automóvel, dínamo de automóvel, motor de geladeira, motor de máquina de lavar roupas e motor de portão eletrônico.

As opções dos motores foram descartadas logo no início da pesquisa, pois para que fosse possível obter uma eficiência razoável seria necessário fazer algumas alterações construtivas, como por exemplo, a inclusão de ímãs no núcleo e/ou rebobinagem. Com isso, a pesquisa limitou-se entre o estudo dos alternadores e dínamos automotivos.

Os alternadores e dínamos são responsáveis por alimentar os componentes elétricos e por carregar a bateria dos automóveis (Alves e Lourenço, 2009), o que por sua vez torna esses equipamentos fáceis de encontrar. Uma das principais diferenças entre os alternadores e dínamos, encontra-se no tipo de corrente produzida, o alternador produz corrente alternada, enquanto o dínamo produz corrente contínua.

Os ferros-velhos⁶ são o destino mais comum de veículos automotores ao fim de sua vida útil, onde as peças que ainda podem ser utilizadas são vendidas.

Os alternadores possuem algumas vantagens quando comparado aos dínamos, tais como menor manutenção, melhor arrefecimento e construção mais simples (Alves e Lourenço, 2009). Porém, o fato do dínamo produzir corrente continua foi o fator determinante para sua escolha como gerador, pois isso dispensaria o uso de um circuito retificador.

Com a definição pelo uso do dínamo, partiu-se para a etapa de busca no mercado e levantamento do custo para aquisição. Após a pesquisa em alguns ferros-velhos da região da Grande Florianópolis e Internet obteve-se os valores apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 - Pesquisa de Preços Dínamo

LOJA	TIPO DE COMPRA	VALOR UNIT.	FRETE	VALOR UNIT.
Loja 1	Internet	R\$ 39,90	R\$ 34,90	R\$ 74,80
Loja 2	Ferro velho na região	R\$ 50,00	-	R\$ 50,00
Loja 3	Ferro velho na região	R\$ 80,00	-	R\$ 80,00

Fonte: Elaboração dos Autores, 2018.

O dínamo, observado na Figura 36, foi adquirido na Loja 2.

⁶ Estabelecimentos onde se comercializa sucata.

Figura 36 - Dínamo Utilizado na Construção do Protótipo



Fonte: Os Autores, 2018.

O dínamo adquirido possui uma etiqueta de características:

- Modelo: DW-V-12;
- Corrente: 25A;
- Tensão: 14V.

Apesar disso, foram realizados dois testes, um para levantamento de alguns parâmetros diferentes dos apresentados e outro para testar o seu funcionamento. Os testes realizados e a descrição detalhada de cada um deles encontram-se no item 5.2.

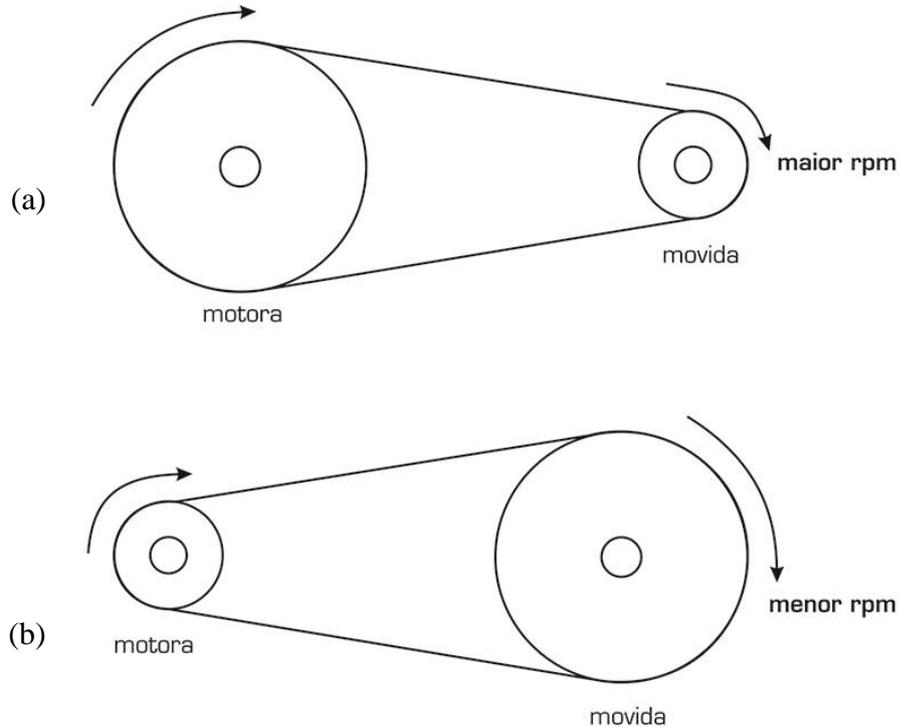
5.1.3 Sistema de Transmissão

Polias são peças cilíndricas que giram em torno de um eixo, ajudando a transferir energia e força cinética para movimentar objetos através de cordas ou correntes (AMARANTE, 2016), também podem ser utilizadas para transferir movimento de um eixo para outro através do uso de cabos ou correias. Conforme Bonfim (2012):

Polias de diâmetros diferentes transmitem velocidade maior ou menor à máquina. No caso onde a polia motora (polia que fornece o movimento) é maior que a movida (polia que recebe o movimento) a velocidade transmitida para a máquina será maior. Quando a polia motora é menor que a polia movida, a velocidade será menor, ou seja, haverá menor rotação na saída do sistema.

Na Figura 37a é possível observar o efeito onde a velocidade é aumentada, já a Figura 37b demonstra um exemplo onde a velocidade é reduzida.

Figura 37 - Relação de Polias: Motoras e Movidas



Fonte: Automatextile: Disponível em: <https://goo.gl/d62Rc3>. Acesso em: 16 jun. 2018.

A relação entre a polia motora e a polia movida pode ser expressa por:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1} \quad (36)$$

Onde:

n_1 = rotação da polia motora [RPM];

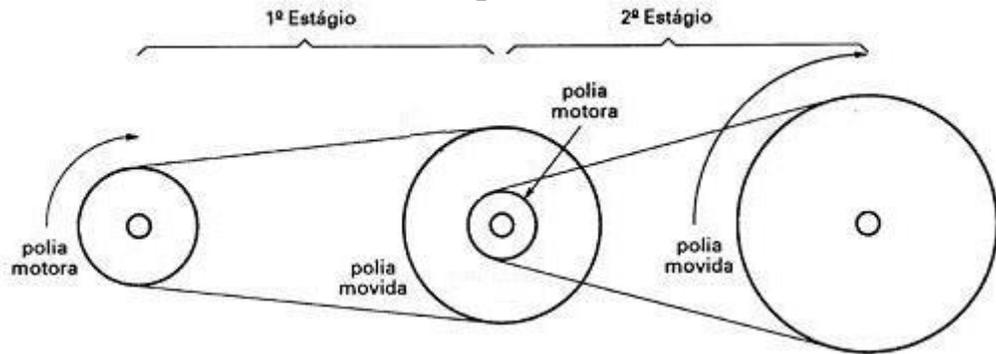
n_2 = rotação da polia movida [RPM];

D_1 = diâmetro da polia motora [m];

D_2 = diâmetro da polia motora [m];

Em muitos equipamentos é necessário utilizar mais de um conjunto de polias, neste caso pode-se utilizar a Equação (36), porém é necessário que os cálculos sejam realizados por estágios (BONFIM, 2012), a Figura 38 ilustra um exemplo deste tipo de configuração.

Figura 38 - Sistema de Polias com Dois Estágios



Fonte: Automatextile: Disponível em: <https://goo.gl/d62Rc3>. Acesso em: 16 jun. 2018.

Foi estabelecido que o dínamo deveria possuir uma rotação de 2000 RPM. Este valor provém dos testes realizados, conforme indicado no item 5.2 desse Trabalho de Conclusão de Curso, o qual faz com que o dínamo forneça aproximadamente 14 V, conforme sua especificação.

Através da Equação (36) e com o valor de 115 RPM, obtido no item 5.1.1.2 e no Gráfico 10, foi possível calcular os valores de rotações teóricas, os quais estão expostos no Quadro 7.

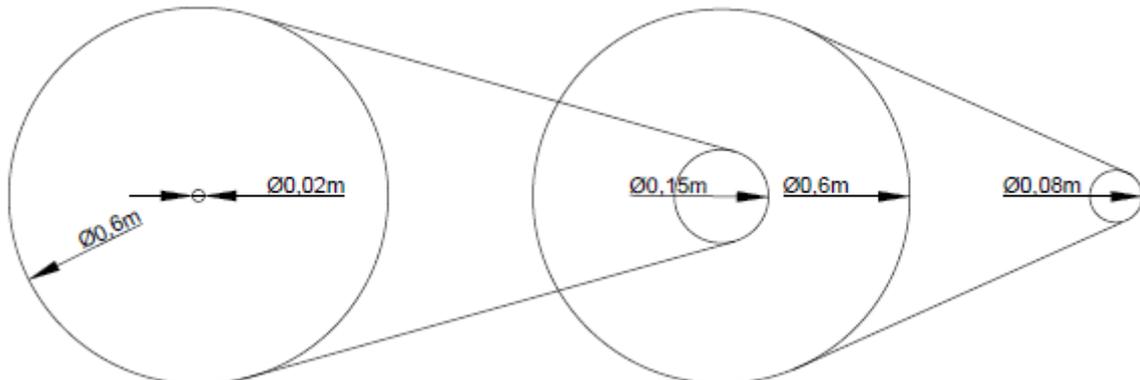
Quadro 7 - Relações Teóricas do Sistema de Transmissão

Estágio	N1	D1	N2	D2
1º Estágio	115	0,6	460	0,15
2º Estágio	460	0,6	3450	0,08

Fonte: Elaboração dos Autores, 2018.

O Quadro 7 ainda indica que o sistema projetado possui dois estágios, utilizando 4 polias. Essa relação pode ser vista de forma simplificada na Figura 39.

Figura 39 - Sistema de Polias em Estágios



Fonte: Elaboração dos Autores, 2018.

Os materiais estudados para a construção do protótipo foram os aros de bicicleta e polias de alumínio. Inicialmente foi estudado aros de 24" e 12", 0,60 m e 0,30 m respectivamente, além de polias de 0,60 m, 0,15 m e 0,08 m. No Quadro 8 está exposto os valores pesquisados de cada um destes itens.

Quadro 8 - Comparativo Custo⁷

ITEM		QUANT.	VALOR UNIT.	VALOR TOTAL
Aro de Bicicleta	Aro de Bicicleta 24"	2	R\$ 50,00	R\$ 100,00
	Aro de Bicicleta 12"	2	R\$ 39,90	R\$ 79,80
Polia de alumínio	Polia 0,60 m	2	R\$ 419,90	R\$ 839,80
	Polia 0,15 m	2	R\$ 29,90	R\$ 59,80
	Polia 0,08 m	2	R\$ 8,00	R\$ 16,00

Fonte: Elaboração dos Autores, 2018.

Optou-se por utilizar uma mescla de matérias, onde foi escolhido os aros de bicicleta 24" e polias de alumínio de 0,15 m e 0,08 m, pois está fornecia a melhor relação custo/benefício, devido ao alto custo da polia com o diâmetro de 0,60 m. O Quadro 9 consolida os materiais utilizados.

Quadro 9 - Quantidade e Tamanho das Polias Utilizadas

ITEM	QUANTIDADE	DIÂMETRO
Aro de Bicicleta	2	0,60 m
Polia	1	0,15 m
Polia	1	0,08 m

Fonte: Elaboração dos Autores, 2018.

Na Figura 40 pode ser visualizado o sistema construído. Para a transferência de rotação entre as polias foram utilizadas duas correias lisas.

⁷ Preços referentes ao período de maio de 2018.

Figura 40 - Sistema de Polias Construído



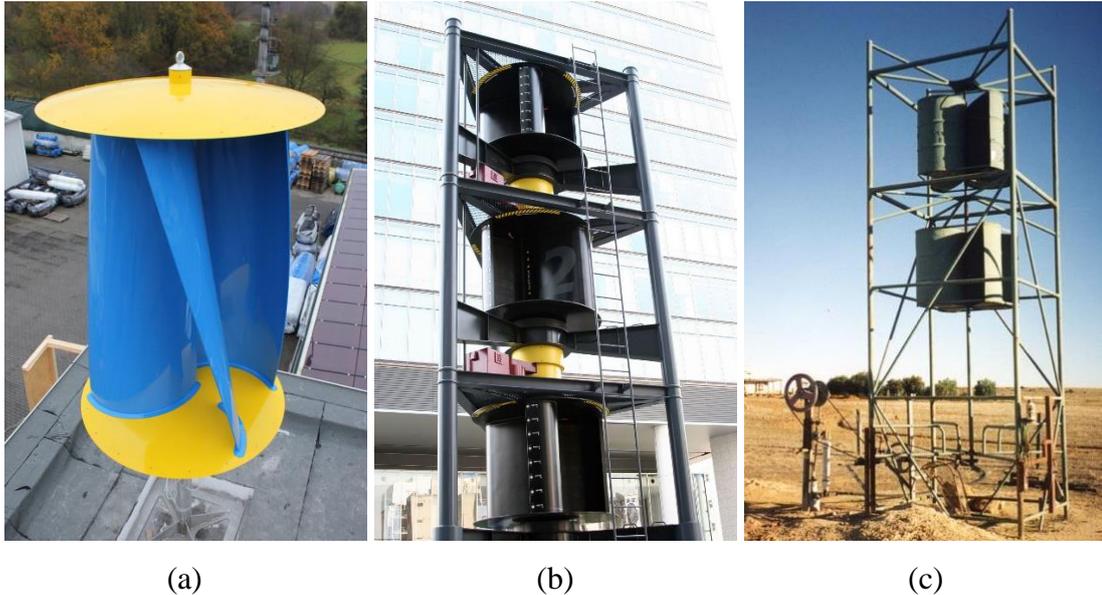
Fonte: Os Autores, 2018.

Como já mencionado, os aerogeradores de eixo vertical permitem que os sistemas de transmissão e geração fiquem mais próximos ao chão, assim, todo sistema foi construído em um nível inferior ao rotor.

5.1.4 Estrutura

A estrutura do mini gerador eólico do tipo Savonius pode variar de acordo com o local em que ele será instalado e os materiais utilizados. Existem aerogeradores que são sustentados apenas por uma barra interna, também utilizada como eixo para transferir a rotação das pás para outro elemento, como pode-se observar na Figura 41a. Já em outras estruturas, como por exemplo as apresentadas na Figura 41b e Figura 41c, o elemento de sustentação encontra-se externamente com 3 e 4 pontos fixos, respectivamente.

Figura 41 - Estruturas de Sustentação para Turbinas do Tipo Savonius



Fonte: (a) Pinterest. Disponível em: goo.gl/GbBiL3 (b) Flickr. Disponível em: <https://goo.gl/9GDfkg> (c) Angelfire. Disponível em: <https://goo.gl/54d5yw>. Acesso em: 21 abr. 2018.

Para trabalhar com a estrutura apresentada na Figura 41a é preciso que o local de apoio seja plano, pois, a estabilidade deste tipo de aerogerador pode ser facilmente afetada por quaisquer intempéries climáticas, tornando esse arranjo inviável para o protótipo em questão.

A força exercida em cada ponto de sustentação é inversamente proporcional a área de apoio, portanto, uma estrutura com 3 pontos precisa de barras mais grossas e fortes do que uma com 4 pontos. Já analisando por outro lado, a estrutura apresentada na Figura 41c necessita de mais materiais do que a apresentada na Figura 41b.

Por fim, para o mini gerador eólico deste Trabalho de Conclusão de Curso foi escolhida a estrutura indicada na Figura 41c por apresentar uma maior estabilidade devido aos 4 pontos de apoio fixo, maior independência em relação ao tipo de solo e possibilidade de trabalho com barras mais finas, apesar de usar uma maior quantidade.

Para viabilizar a construção da estrutura proposta foram analisados três pontos com relação aos materiais: tipo do material, complexidade e valor de investimento.

O tipo do material e o valor do investimento são parâmetros que caminham juntos, para tal foram analisados dois tipos de materiais: barras de aço 5/8" e barras de madeira de 5x5 cm. O aço foi escolhido por ser um material resistente, porém possui o manuseio mais complexo, já que sua junção é feita por um processo de soldagem, que necessita de um

profissional habilitado. Já a madeira é indicada por ser um material de fácil manuseio, pois sua união pode ser feita com cola específica e/ou parafusos, e ainda é fácil de encontrar.

Quadro 10 - Tipos de Material *versus* Valor⁸

TIPO MATERIAL	TAMANHO	PREÇO UNIT. MÉDIO	PREÇO TOTAL
Barra de aço 5/8"	18 m	R\$ 7,26	R\$ 130,68
Barra de madeira 5x5 cm	18 m	R\$ 3,33	R\$ 60,00

Fonte: Elaboração dos Autores, 2018.

Como é possível observar no Quadro 10 o aço apresenta um valor de investimento inicial maior do que a madeira, para um mesmo tamanho. Assim, analisando os três pontos apresentados, o melhor material a ser utilizado na construção da estrutura da Figura 41c é a madeira.

5.2 TESTES DE DESEMPENHO DO DÍNAMO

Para analisar o bom funcionamento do dínamo escolhido foram realizados alguns testes de desempenho. A partir destes testes foi possível descrever como o dínamo opera e ainda estabelecer a rotação para que uma lâmpada seja ligada.

5.2.1 Ensaio com Carga

Para analisar a potência que o dínamo é capaz de gerar foi realizado um ensaio com uma lâmpada incandescente, pois é possível analisar visualmente a intensidade da potência que está passando pelo circuito da lâmpada naquele instante, já que a resistência do filamento e a tensão que alimenta a lâmpada determina a intensidade de luz irradiada.

Para realizar o teste, além do próprio dínamo, foi necessário:

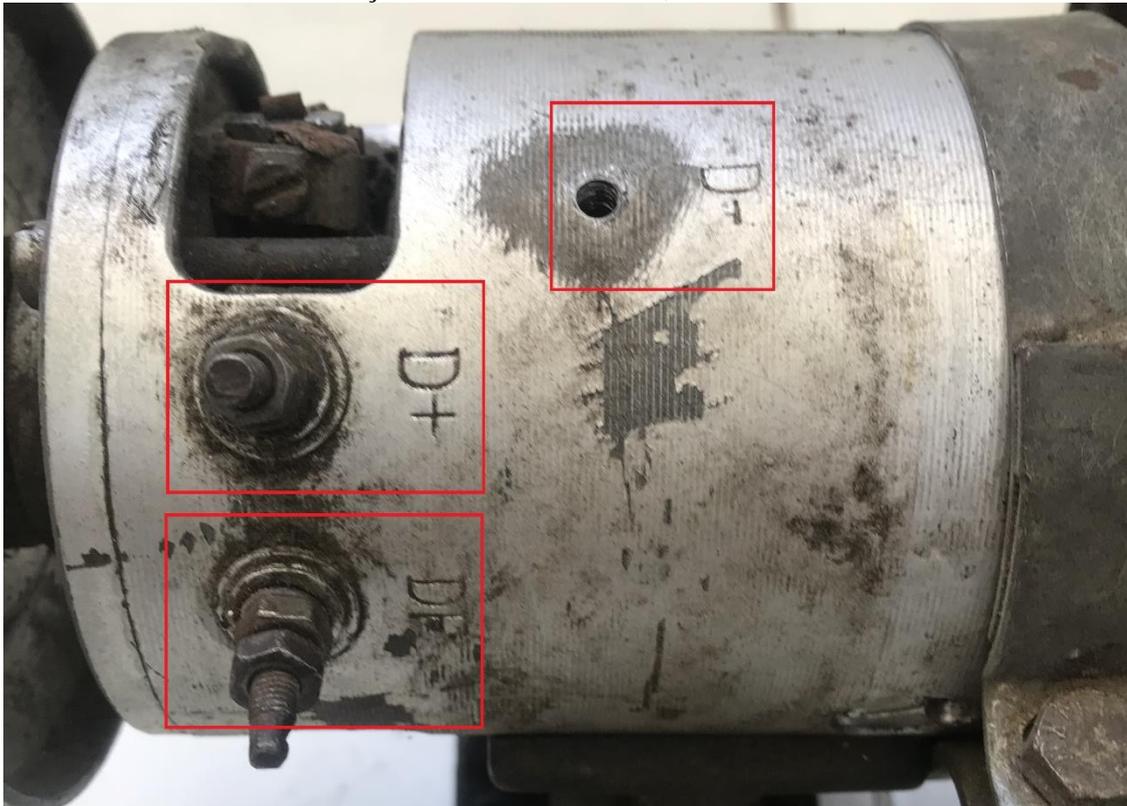
- 3 cabos de cobre flexível 1,5 mm² de 1 m com cores diferentes;
- 6 terminais em anel;
- 1 lâmpada incandescente de 12 V;
- 1 furadeira;

⁸ Preços referentes ao período de abril de 2018.

- 1 multímetro com duas ponteiras;
- Fita isolante.

Antes de iniciar o teste é preciso compreender que o dínamo possui 3 terminais de saída, D+, D- e o DF, a Figura 42 mostra onde estes terminais estão dispostos.

Figura 42 - Dínamo com Indicações dos Terminais D+, D- e DF



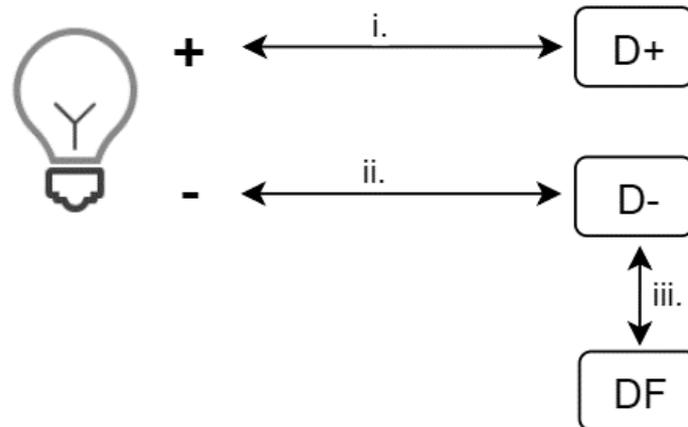
Fonte: Os Autores, 2018.

Localizando os terminais pode-se iniciar as conexões, conforme segue:

- i. Ligar o terminal positivo da lâmpada no terminal positivo do dínamo (D+);
- ii. Ligar o terminal negativo da lâmpada no terminal negativo do dínamo (D-);
- iii. Realizar conexão entre os terminais DF e D- do dínamo.

Após realizadas todas as conexões será obtida uma configuração parecida com a apresentada na Figura 43.

Figura 43 - Conexões para Teste do Dínamo

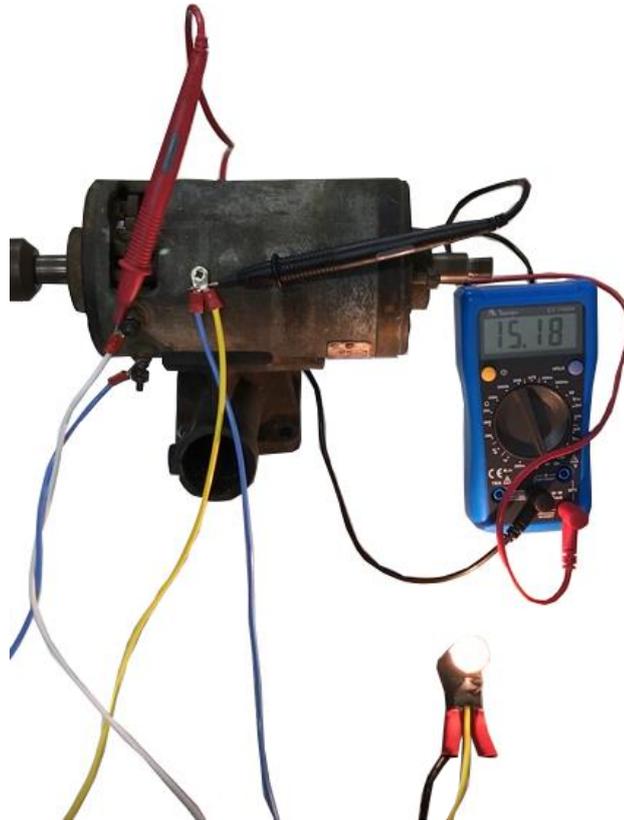


Fonte: Elaboração dos Autores, 2018.

Em seguida deve-se acoplar a furadeira ao eixo do dínamo, para que seja realizado o teste de funcionamento.

Realizados todos os procedimentos, descritos anteriormente, pode-se efetuar o teste, para tal basta ligar a furadeira, caso o dínamo esteja funcionando e todas as conexões tenham sido feitas de forma correta a lâmpada irá acender, do contrário, verifique se as conexões estão corretas. A Figura 44 mostra o funcionamento do dínamo através do acendimento da lâmpada.

Figura 44 - Dínamo em Teste



Fonte: Os Autores, 2018.

Na Figura 44 também pode-se visualizar um multímetro conectado ao dínamo, possibilitando assim a visualização da tensão gerada pelo dínamo.

5.2.2 Rotação *versus* Tensão de Saída

Em máquinas rotativas, como os geradores e motores, entender seu comportamento com relação a rotação é imprescindível. Para tal, foi feito um ensaio com carga com objetivo de obter os parâmetros de tensão e RPM, além de traçar a curva de tendência do dínamo. Foram utilizados os mesmos materiais do ensaio referenciado no item 5.2.1 e um tacômetro foto/contato digital.

Foram realizadas cinco medidas de rotação *versus* tensão e os valores obtidos estão no Quadro 11a. Através dos valores deste quadro foi traçado o Gráfico 11, a partir do qual foi extraída a equação de tendência:

$$y = 0,6497x^3 - 14,717x^2 + 162,7x + 1097,4$$

No Quadro 11b estão expressos os valores obtidos por meio da equação de tendência.

Quadro 11 - Relação de Tensão *versus* Rotações por Minuto

TENSÃO	ROTAÇÕES POR MINUTO
0,25 V	1000 RPM
0,36 V	1300 RPM
3,5 V	1500 RPM
6 V	1690 RPM
14,2 V	2300 RPM

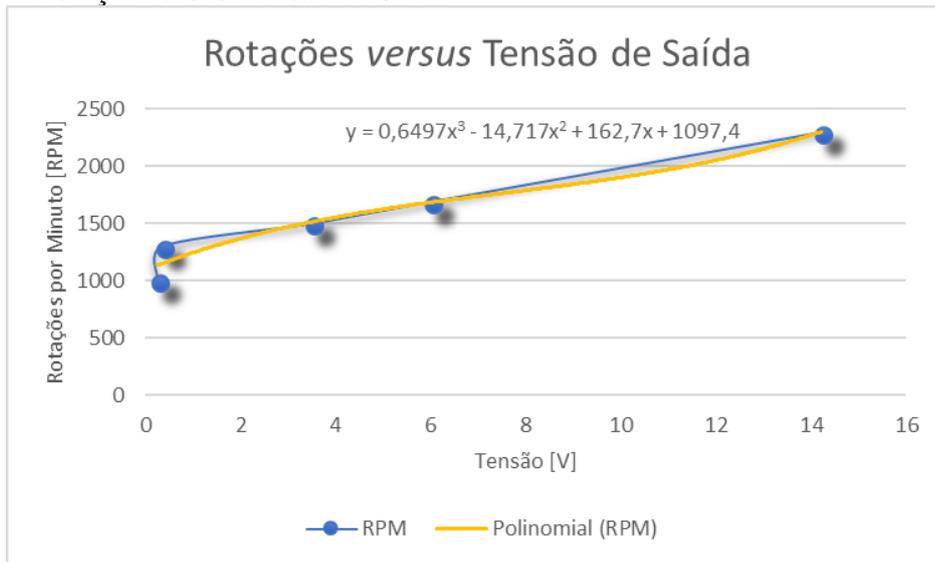
TENSÃO	ROTAÇÕES POR MINUTO
0 V	1097 RPM
1 V	1246 RPM
2 V	1369 RPM
3 V	1471 RPM
4 V	1554 RPM
5 V	1624 RPM
6 V	1684 RPM
7 V	1738 RPM
8 V	1790 RPM
9 V	1843 RPM
10 V	1902 RPM
11 V	1971 RPM
12 V	2053 RPM
13 V	2153 RPM
14 V	2273 RPM
15 V	2419 RPM

(a) Valores obtidos na medição

(b) Valores obtidos pela equação de tendência

Fonte: Elaboração dos Autores, 2018.

O gráfico resultante se encontra no Gráfico 11.

Gráfico 11 - Rotação *versus* Tensão de Saída

Fonte: Elaboração dos Autores, 2018.

É possível observar no Gráfico 11 que entre as tensões de 3 e 7 V o comportamento de ambas as curvas é praticamente igual. Também é possível notar que a partir de 3 V o comportamento da curva RPM torna-se semelhante a uma reta.

5.3 PROTÓTIPO

Este tópico destina-se a descrição completa da implementação do protótipo e dos materiais e ferramentas utilizados.

5.3.1 Materiais e Ferramentas

Para a construção do protótipo foram necessários diversos materiais e ferramentas, de acordo com as definições apresentadas nos tópicos anteriores. Os principais materiais utilizados estão relacionados no Quadro 12.

Quadro 12 - Relação de Material

ITEM	QUANTIDADE
Abraçadeira de Nylon 400 mm	2 unidades
Aro de Bicicleta 24"	2 unidades
Barra circular de metal 5/8"	2 metros
Barra de Madeira 1,3 m - 5x5 cm	8 unidades
Barra de Madeira 2 m - 5x5 cm	4 unidades
Cabos 1,5 mm ² (cores diversas)	1 metro
Cocho	2 unidades
Compensado 10 mm - 140x70 cm	4 unidades
Correia Lisa	2 unidades
Dinamo de Fusca 14 V	1 unidade
Durepoxi	250 gramas
Fita Isolante	1 unidade
Fundo Nivelador para Madeira	1 lata
Lâmpada 12 V	1 unidade
Parafusos	Diversos
Polia 0,15 m	1 unidade
Polia 0,08 m	1 unidade
Rolamento 20 mm com Mancal	2 unidades
Solvente	1 lata
Suporte de Fixação Cantoneira em L	8 unidades

Fonte: Elaboração dos Autores, 2018.

O Quadro 13 apresenta todas as ferramentas utilizadas durante a montagem do protótipo.

Quadro 13 - Ferramentas Utilizadas

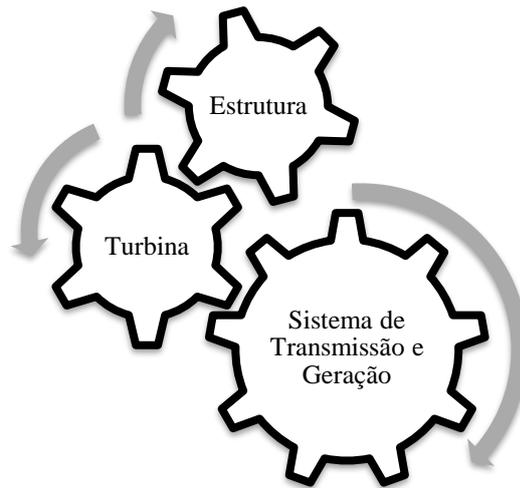
FERRAMENTAS
Alicate
Alicate de Corte
Chave Allen
Chave de Fenda
Chave Philips
Esmerilhadeira
Furradeira
Máquina de Solda
Multiteste
Parafusadeira
Serra Circular
Serra Manual para Ferro

Fonte: Elaboração dos Autores, 2018.

5.3.2 Processo Construtivo

O processo de construção do mini gerador eólico pode ser resumido em três etapas principais, elencadas na Figura 45.

Figura 45 - Sequência Cronológica de Construção



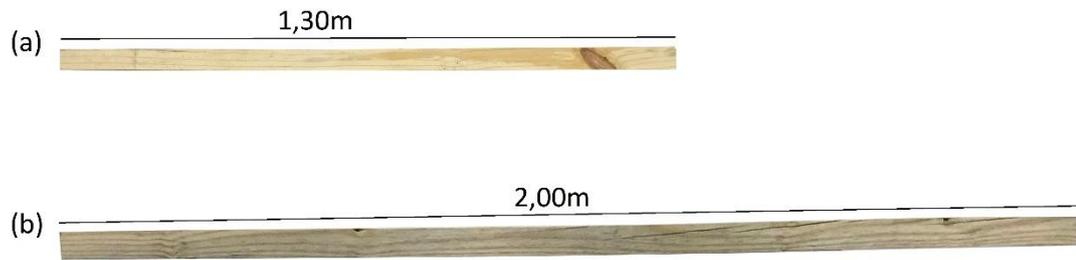
Fonte: Elaboração dos Autores, 2018.

Nos itens abaixo serão descritos cada processo individualmente.

5.3.2.1 Construção da Estrutura

Para a estrutura da Figura 41c, foi desenvolvido um desenho técnico que está apresentado no ANEXO A. Na estrutura foram utilizados dois tamanhos de barras distintos, conforme apresentado na Figura 46, sendo necessário oito unidades da barra (a) e 4 unidades da barra (b). As barras (a) foram utilizadas na horizontal, enquanto as barras (b) foram utilizadas como suporte vertical.

Figura 46 - Indicação das Barras de Madeira para Estrutura



Fonte: Os Autores, 2018.

Para a preparação das barras primeiramente foi utilizado um fundo para madeira, afim de potencializar a absorção da tinta nas superfícies de madeira nova, melhorar o aspecto final pós pintura e aumentar o rendimento da tinta. O resultado em cada barra pode ser visto na Figura 47.

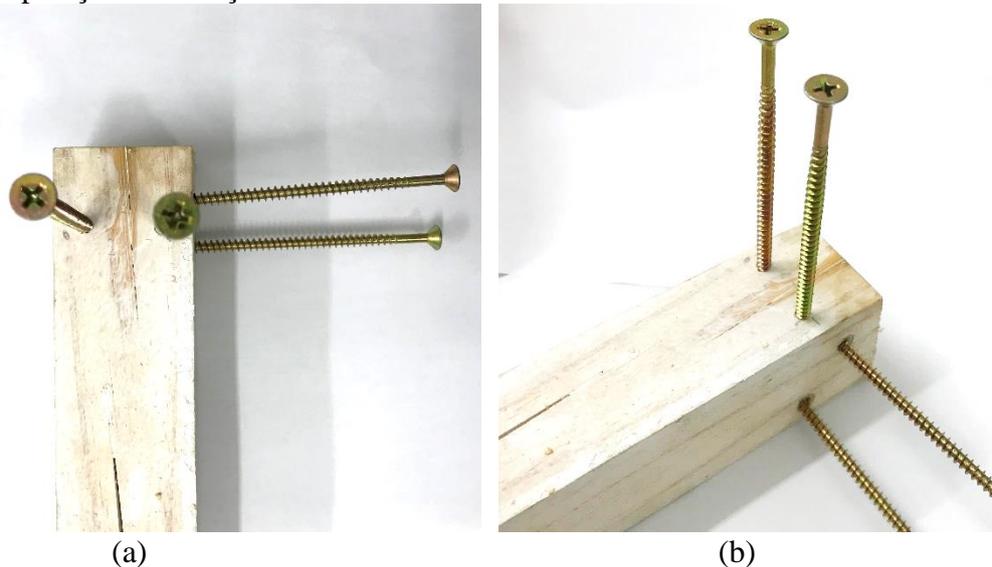
Figura 47 - Barras Após o Processo de Pintura com Fundo para Madeira



Fonte: Os Autores, 2018.

Após este processo iniciou-se a construção da estrutura, onde as barras foram fixadas umas às outras, conforme projeto, com a furação indicada na Figura 48, onde (a) mostra a furação com vista superior e (b) com uma vista lateral direita. Foram utilizados parafusos phillips para madeira com 10 cm de comprimento para fixar as barras umas às outras.

Figura 48 - Disposição da Furação das Barras de Madeira



Fonte: Os Autores, 2018.

Além das barras de apoio, a estrutura ainda conta com dois apoios fixos de 1,4x1,4 m um na parte superior e outro na inferior da turbina, para ajudar na estabilidade, sustentação do eixo de rotação central e criar um “túnel”, para se obter uma maior massa de vento passando pela turbina. O ANEXO B fornece mais detalhes dos cortes realizados nos apoios.

A estrutura também precisa contar com um apoio para o gerador e para o sistema de transmissão, assim toda a estrutura do mini gerador eólico ficará fixa sobre um apoio de madeira identico ao superior. Este apoio também servirá para dar mais estabilidade à estrutura.

5.3.2.2 Construção da Turbina

Conforme já mencionado no item 5.1.1.2, para a construção da turbina foram utilizados dois cochos, unidos através de parafusos e uma chapa de metal. Esta chapa foi soldada no eixo, com o objetivo de transferir a rotação obtida pela turbina para o sistema de transmissão. Na Figura 49 é possível observar a turbina fixa a estrutura do mini gerador eólico.

Figura 49 - Turbina Fixa ao Eixo e Estrutura



Fonte: Os Autores, 2018.

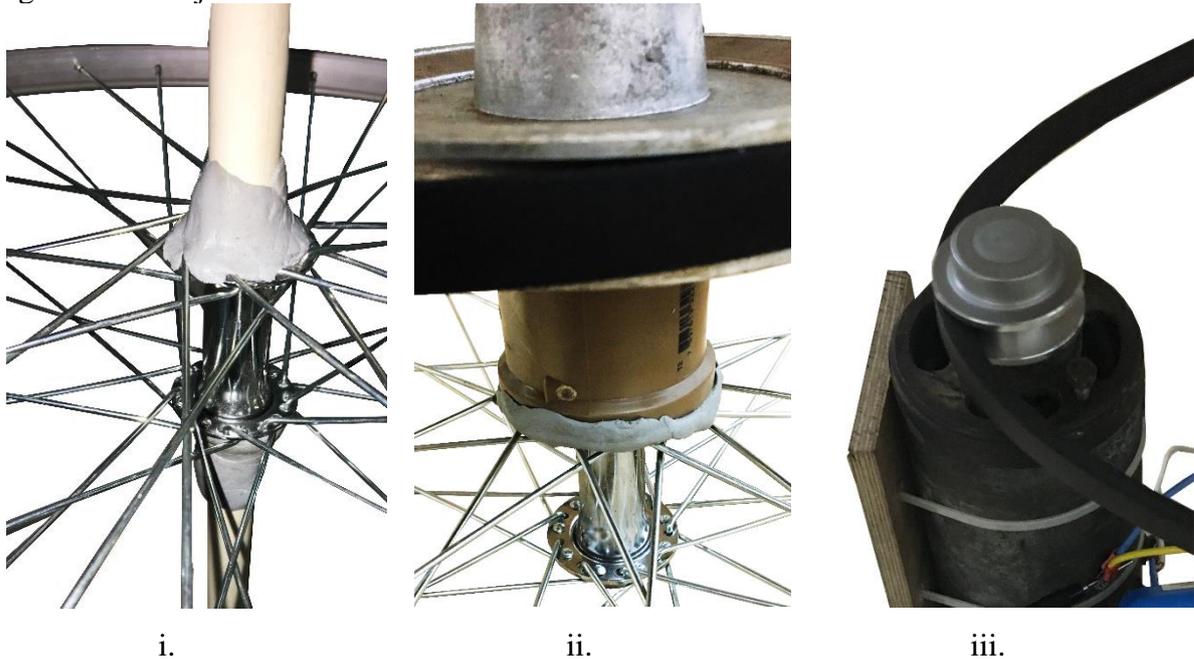
Ainda na Figura 49 é possível notar o uso de um mancal com rolamento, estes elementos foram utilizados para manter o alinhamento do eixo e também eliminar o atrito que este sofreria no caso de contato direto com a chapa de madeira.

5.3.2.3 Construção do Sistema de Transmissão

O sistema de transmissão descrito no item 5.1.3 é composto por dois estágios, sendo necessários três arranjos de polias, que serão descritos separadamente neste tópico. Para a fixação de todos os conjuntos foi utilizado a massa adesiva epóxi⁹.

⁹ É um plástico termofixo que se endurece quando misturado com um agente catalisador. As massas epóxi mais comuns são produtos de uma reação entre epiclorigrina e bisfenol-A. É um material que pode fixar, soldar, vedar e reparar muitos tipos de superfícies, sejam elas lisas, porosas ou irregulares (Handbook Of Epoxi Resins, 1967).

Figura 50 - Conjunto do Sistema de Transmissão



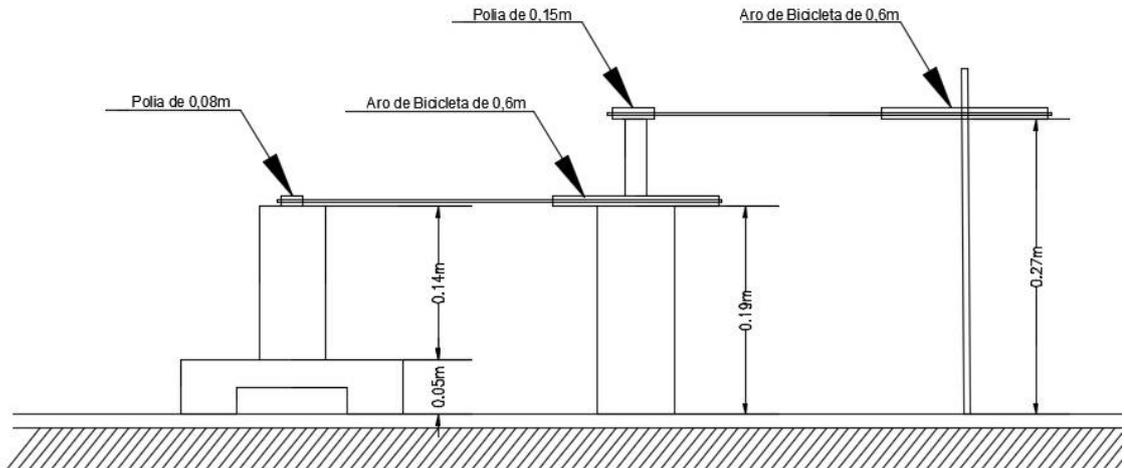
Fonte: Os Autores, 2018.

A Figura 50 ilustra os três arranjos utilizados, onde:

- i. Eixo com o aro de bicicleta 24”:
- ii. Aro de bicicleta 24” com polia de alumínio de 0,15 m:
- iii. Polia de alumínio de 0,08 m com eixo do dínamo.

O funcionamento deste sistema depende de um alinhamento vertical. As duas polias que compõem um mesmo estágio devem estar na mesma altura, pois o desnível faz com que a correia escape dos canais. Na Figura 51 está exposto o projeto com as alturas necessárias para cada arranjo. Como o dínamo é o único elemento de tamanho invariável, as demais alturas foram definidas a partir deste.

Figura 51 - Sistema de Transmissão com Indicação de Alturas



Fonte: Elaboração dos Autores, 2018.

O conjunto i não necessita de suporte, pois ele está diretamente acoplado ao eixo. Já o conjunto ii está sobre uma caixa de madeira. Para o arranjo iii foi desenvolvido um apoio também de madeira. Além disso, todos os suportes foram fixados no apoio inferior da estrutura com auxílio de cantoneiras em L.

Figura 52 - Sistema de Polias Fixo na Estrutura



Fonte: Os Autores, 2018.

A Figura 52 ilustra o sistema de transmissão fixado à estrutura, ademais também se observa as correias utilizadas para fazer a interconexão entre os estágios.

5.3.3 Protótipo e Considerações Finais

Após os processos de construção descritos anteriormente, foi realizada a união de todos os componentes do projeto resultando no mini gerador eólico proposto. Apesar das dificuldades que serão elencadas no item 5.4, a concepção do protótipo ocorreu dentro do esperado.

A Figura 54 e Figura 53 demonstram o protótipo finalizado.

Figura 53 - Protótipo Final com Vista Frontal



Fonte: Os Autores, 2018.

Figura 54 - Protótipo Final com Vista Lateral



Fonte: Os Autores, 2018.

Devido as condições climatológicas e cronograma, o modelo proposto foi ensaiado em ambiente controlado e *indoor*. O teste realizado consistiu em rotacionar a turbina de forma manual analisando o comportamento do sistema de forma conjunta. Com o auxílio de um

multímetro foi possível coletar a grandeza elétrica (tensão) desejada, conforme destacada na Figura 55.

Figura 55 - Grandeza Obtida no Teste do Protótipo



Fonte: Os Autores, 2018.

Era esperado obter-se uma tensão de 14 V, porém este valor não foi alcançado devido a um comportamento inesperado do sistema de transmissão. O comportamento idealizado do sistema se dava por meio da necessidade de um baixo torque em todas as suas conexões, o que não foi observado.

Apesar do imprevisto apresentado, foi possível comprovar o funcionamento do sistema proposto.

5.4 DIFICULDADES ENCONTRADAS

Seguir serão apresentadas as principais dificuldades encontradas durante o desenvolvimento do projeto, além dos pontos de atenção.

5.4.1 Tambor Metálico

Inicialmente foi escolhido para ser utilizado como turbina do mini gerador eólico um tambor metálico (tambor X), mostrado na Figura 56. O tambor X era utilizado para armazenar óleo lubrificante e seu corte (separação em duas metades na vertical) oferece perigo de explosão, visto que o resíduo existente pode reagir com a alta temperatura necessária para o corte e inflamar.

Figura 56 - Tambor X



Fonte: Os Autores, 2018.

Este fato inviabilizou totalmente o uso desse componente no protótipo, pois a segurança é um item primordial em qualquer projeto. No entanto, para que o resíduo de óleo do tambor tivesse uma forma de coleta e descarte correta, foi realizado um processo de limpeza, onde o óleo foi coletado com auxílio de uma solução aquosa quente acrescida de detergente neutro. Os béqueres indicados na Figura 57 possuem capacidade máxima de 2000 ml e armazenam os seis estágios realizados para limpeza. É possível observar – da esquerda para a direita – que a cada etapa a solução ficou mais homogênea, indicando que o óleo foi retirado.

Figura 57 - Béqueres com Solução Proveniente do Processo de Limpeza do Tambor X



Fonte: Os Autores, 2018.

Após isso, cada béquer passou pelo processo de sedimentação e decantação para separação da solução aquosa do óleo, dando o destino correto para este.

Mesmo com o processo de limpeza não é aconselhável o corte desde tipo de tambor com técnicas que podem causar faíscas, pois não se tem a certeza de que o resíduo foi totalmente removido e que não ocorrerá nenhum tipo de reação entre ele e a ferramenta de corte.

5.4.2 Sistema de Transmissão

As principais dificuldades encontradas no que tange o sistema de transmissão foram:

- i. Alto custo das polias: uma das premissas principais deste Trabalho foi pautada no desenvolvimento de um protótipo ao menor custo, as polias de alumínio implicam em um elevado valor de investimento, quando trata-se de polias com diâmetros maiores.
- ii. União entre as polias: devido as características construtivas dos materiais utilizados como polias (aro de bicicleta), o encaixe entre elas é dificultado, fazendo com que seja necessário soluções de contorno não previstas inicialmente.
- iii. Alto torque necessário para movimentar o sistema: para que o sistema de transmissão proposto seja eficiente, é preciso que o toque entre os estágios seja pequeno. Durante o desenvolvimento não foi levado em consideração a ocorrência do aumento de torque quando houvesse a conexão entre os estágios.

Os itens i e ii foram tratados e não impactaram no resultado final, ao passo que o item iii impactou diretamente nos resultados desejados, conforme já descrito.

6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A busca pela diversificação da matriz energética e a preocupação com o meio ambiente fez com que as energias renováveis se tornassem o centro das atenções do setor energético. Diversos estudos relacionados ao desenvolvimento destas tecnologias são elaborados diariamente ao redor do mundo. A energia eólica ocupa uma posição de destaque neste contexto, se diferenciando pela simplicidade da tecnologia que pode ser adotada para a geração de energia, dando assim extrema relevância ao seu estudo.

Este Trabalho de Conclusão de Curso teve por objetivo principal desenvolver os conhecimentos relacionados à energia eólica, abordando diversos conceitos interdisciplinares, além de servir como guia para que o leitor possa construir seu próprio mini gerador eólico. Além disso, trouxe conceitos mecânicos não estudados no decorrer do curso de Engenharia Elétrica.

De forma a comprovar o funcionamento do sistema proposto, foi construído um protótipo de um mini gerador eólico, que se mostrou extremamente pertinente perante o atual cenário energético e ambiental. Esta construção também se mostrou relevante devido aos inúmeros conhecimentos que foram aplicados e de toda a experiência adquirida ao longo do desenvolvimento.

Cabe destacar que os autores não possuíam familiaridade com a maioria das ferramentas utilizadas e pouca experiência com trabalhos manuais, o que dificultou a realização de algumas tarefas, mas não impedido sua conclusão, reforçando assim o conceito da técnica DIY. Tal técnica se mostrou eficaz diante do objetivo proposto, simplificando a implementação do protótipo. Esta construção também serviu como “teste de criatividade”, pois no decorrer do projeto diversos obstáculos tiveram que ser superados, tais como a falta de ferramentas e materiais adequados, obrigando a busca por soluções engenhosas com os recursos disponíveis.

Apesar de propor um modelo, este Trabalho de Conclusão de Curso fornece subsídios aos leitores para que eles possam realizar as suas próprias tomadas de decisões, fazendo escolhas que sejam mais adequadas as suas necessidades, ou seja, não limita a imaginação de quem está procurando inspiração.

Neste trabalho, o tema proposto foi abordado de maneira diferente do habitual, já que quando se trata de trabalhos acadêmicos, os objetivos são mais restritos e conservadores.

Apesar de amplos e ligeiramente complexos, todos os objetivos aqui traçados foram alcançados de forma plena, expressando que é possível gerar sua energia de forma limpa e sustentável, aproveitando uma grande quantidade de materiais reutilizáveis.

O protótipo construído foi doado para a UNISUL, de forma a possibilitar a realização de outros estudos, tais como:

- Acondicionamento da energia gerada em banco de baterias, afim de priorizar seu uso em momentos mais oportunos;
- Elaboração de análise de Custo x Benefício;
- Elaboração de material informativo sobre a técnica DIY aplicada a construção deste protótipo, fazendo passo a passo ilustrativo de como construir seu próprio aerogerador;
- Otimização do sistema de transmissão com o intuito de eliminar os problemas causados pelo alto torque entre os estágios.

Além dos estudos e aprimoramentos que podem ser realizados tomando como base o protótipo, este Trabalho também fornece subsídios para a realização de outras pesquisas:

- Construção de protótipos utilizando materiais diferentes dos propostos;
- Construção de um aerogerador Savonius com estrutura diferente da proposta;
- Construção dos demais modelos de aerogeradores apresentados.

Por fim, cabe observar que o contato com o desenvolvimento de protótipos, preparação de cronogramas e conceitos fora do mundo acadêmico fazem parte do dia-a-dia de um(a) engenheiro(a) eletricista, portanto, este Trabalho de Conclusão de Curso ampliou consideravelmente a visão dos autores, dando-lhes um senso crítico que ainda não havia sido explorado durante a formação.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica. **BIG – Banco de Informações de Geração**. Disponível em: < <https://goo.gl/UVoVxS> >. Acesso em: 20 de agosto de 2017.
- ALVES, Mário Jorge de Andrade Ferreira; LOURENÇO, Manuel Duarte Matos. **Automóvel: sistema de carga**. Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto, Departamento de Engenharia Eletrotécnica, 2009, p. 81.
- AMARANTE, Luís Carlos Verza. **Utilizando um Microcontrolador na Experimentação de Física: Montando um Plano Inclinado**. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto Federal de São Paulo, Campus Birigui, 2016, p. 50.
- AMARANTE, Odilon Antônio Camargo do et al. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília: 2001. 44p.
- Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial. **Mapeamento Da Cadeia Produtiva Da Indústria Eólica No Brasil**. 2014.152p.
- Associação Brasileira de Energia Eólica. **Dez Fatos Sobre Energia Eólica Brasileira Que Você Talvez Não Saiba**. Disponível em: < <https://goo.gl/ZXCShi/> >. Acesso em: 01 de agosto de 2017.
- BATISTA, Nelson António Martins da Costa. **Novo Aerogerador de Eixo Vertical Integrado Numa Rede Inteligente em Contexto Urbano**. Tese (Instituto de Investigação e Formação Avançada). Évora: Universidade de Évora. 2013. 251p.
- Bloomberg New Energy Finance. **Global Trends in Renewable Energy Investment 2017**. 2017. 90p.
- BONFIM, Leile. **Calculando RPM em Sistemas de Polias**. 2012. Disponível em: < <https://goo.gl/FtS8p1> >. Acesso em: 16 de agosto de 2018.
- BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Acordo de Paris**. Disponível em: < <https://goo.gl/za7o5n> >. Acesso em: 03 de agosto de 2017.
- CÂMERA, Rafael. **Você Sabe o Que é DIY?**. Disponível em: < <https://goo.gl/AowQVt> > . Acesso em: 01 de maio de 2018.
- Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte. **Geradores e Motores CC (Máquinas de Corrente Contínua)**. Mossoró: 2006.
- CHAUDHRY, Hassam Nasarullah. Et al. **Computational Analysis to Factor Wind into the Design of an Architectural Environment**. Artigo - Hindawi Publishing Corporation. 2015.
- CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Porto Alegre: AMGH, 2013. 698p.

COPEL. **Gerador Elétrico**. Disponível em: Disponível em: <<https://goo.gl/DS2udK>>. Acesso em: 12 de outubro de 2017.

CUSTÓDIO, Ronaldo dos Santos. **Energia Eólica para a Produção de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009. 319p.

Descola. **DIY: A Revolução do “Faça Você Mesmo”**. 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/PH3mfE>>. Acesso em: 01 de maio de 2018.

DUTRA, Ricardo Marques (organização). **Energia Eólica Princípios e Tecnologias**. 2008. 51p.

EISMIN, Thomas K. **Eletrônica de Aeronaves: Introdução aos Sistemas Aviônicos**. Bookman, 2016. 500p.

FADIGAS, Eliane Aparecida Faria Amaral. **Energia Eólica**. Barueri: Manole, 2011. 356 p.

FERREIRA, Nathan Augusto. **A Descoberta da Indução Eletromagnética**. Brasil Escola. Disponível em <<https://goo.gl/zqPvzd>>. Acesso em 11 de outubro de 2017.

FITZGERALD; A. Ernest at el. **Máquinas elétricas com introdução à eletrônica de potência**. Bookman, 2006. 607p.

FONSECA, João José Saraiva. **Metodologia da Pesquisa Científica**. Fortaleza: Universidade Estadual do Ceará, 2002. 127p.

GELBER, Steven M. **Do-It-Yourself: Constructing, Repairing and Maintaining Domestic Masculinity**. American Quarterly, Volume 49, Número 1, 1997. 66-112p.

GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. **Métodos de Pesquisa**. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, 2009. 120p.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. São Paulo: Atlas, 1999. 206p.

Global Wind Energy Council. **Global Wind Report 2016**. 2016. 76p.

Global Wind Energy Council. **Offshore Wind Power**. Disponível em: <<https://goo.gl/Ux5kMJ>>. Acesso em: 23 de julho de 2017.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. **Energias renováveis: um futuro sustentável**. São Paulo: Revista USP, 2007. 15p.

HALLIDAY, David. Et Al. **Fundamentos de Física 3 – Eletromagnetismo 4ª Edição**. LTC: 2012. 416p.

International Energy Agency. **World Energy Outlook 2016**. 2016. 684p.

International Renewable Energy Agency. **Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2017**. 2017. 24p.

International Renewable Energy Agency. **Renewable Energy Statistics 2017**. 2017. 344p.

International Renewable Energy Agency. **The Power to Change: Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025**. 2016. 112p.

Instituto Newton C Braga. **Como funciona o alternador (ART094)**. Disponível em: < <https://goo.gl/MynRht>>. Acesso em: 12 de outubro de 2017.

JERVELL, José Tor. **Estudo da Influência das Características do Vento no Desempenho de Aero geradores**. Relatório de Projeto Final (Faculdade de Engenharia Mecânica). Porto: Universidade do Porto, 2008. 87p.

JR., NASCIMENTO, Geraldo do. **Máquinas Elétricas**. São Paulo: Érica, 2014. 145p.

MCKELLAR, Susie. **Interior Design and Identity**. Manchester: Manchester University Press, 2004. 218p.

MENDONÇA, Rafael de Moura. **Avaliação do Potencial Eólico no Município de Laguna - SC Utilizando WASP**. Monografia (Curso de Especialização em Energia Eólica). Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, 2013. 66p.

NEW YORK STATE. **Governor Cuomo Announces Approval of Largest Offshore Wind Project in the Nation**. Disponível em: < <https://goo.gl/KqTR2M> >. Acesso em 24 de julho de 2017.

NUNES JUNIOR, Éden Rodrigues. **Metodologia de projeto de turbinas eólicas de pequeno porte**. Dissertação (Faculdade de Engenharia Mecânica). Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, 2008. 188p.

ÔLO, Carlos David Vaz. **Projecto de uma Turbina Savonius com Utilização de Componentes em Fim-de-Vida**. Dissertação (Faculdade de Ciência e Tecnologia). Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, NOVA, 2012. 82p.

PRADO, Ana. **A Volta da Cultura do “faça você mesmo”**. Disponível em: < <https://goo.gl/ahPhnU>>. Acesso em: 01 de maio de 2018.

REN21. **Renewables 2017 Global Status Report**. 2017. 302p.

Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – Espírito Santo. **Equipamentos e Sistemas Elétricos – Elétrica**. Vitória: 1997.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. Et al. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: EPE, 2016. 452p.

TRIVIÑOS, Augusto Nivaldo Silva. **Introdução à pesquisa em Ciências Sociais: a pesquisa qualitativa em educação**. São Paulo: Atlas, 1987. 176p.

UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. AMGH, 2014. 728p.

VIEIRA, Wladimir. **Energia Eólica**. Florianópolis: Universidade do Sul de Santa Catarina, 2017.

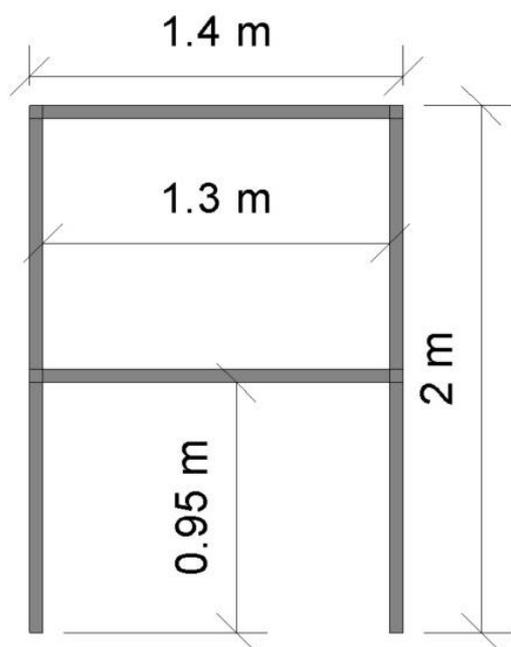
WOLF, Marco; MCQUITTY, Shaun. **Understanding the do-it-yourself consumer: DIY motivations and outcomes**. 2011. 17p.

World Energy Council. **World Energy Resources | 2016**. 2016. 1028p.

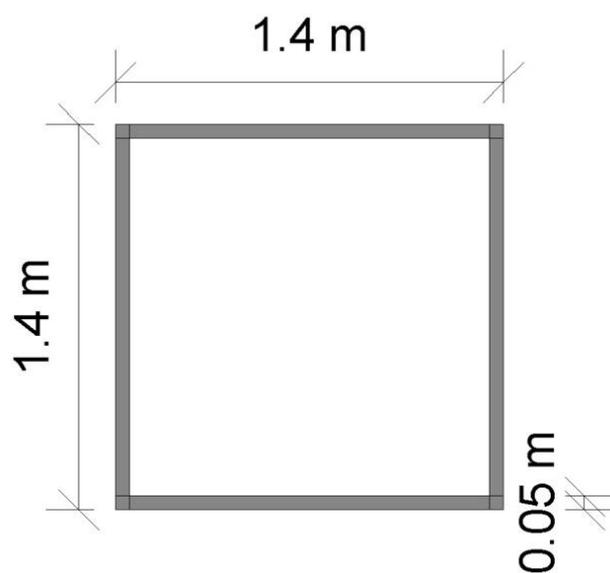
World Wind Energy Association. **Improving Investment Conditions for Wind and Other Renewables in the Developing World**. 2014. 23p.

ANEXOS

ANEXO A – Projeto Estrutural Mini Gerador Eólico



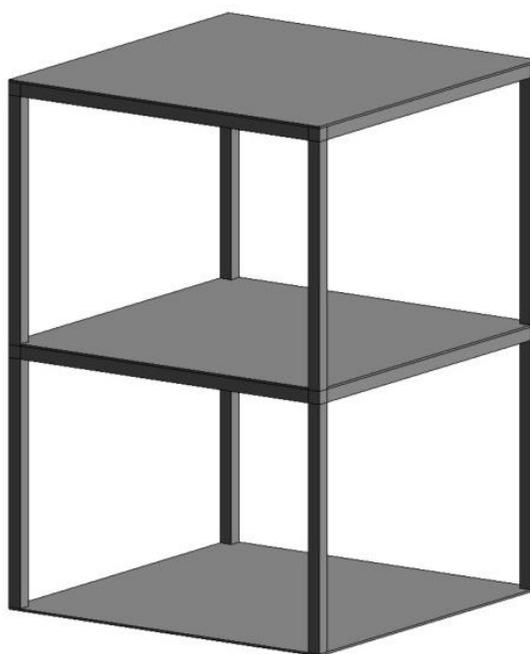
(a) Vista Lateral com Cotas



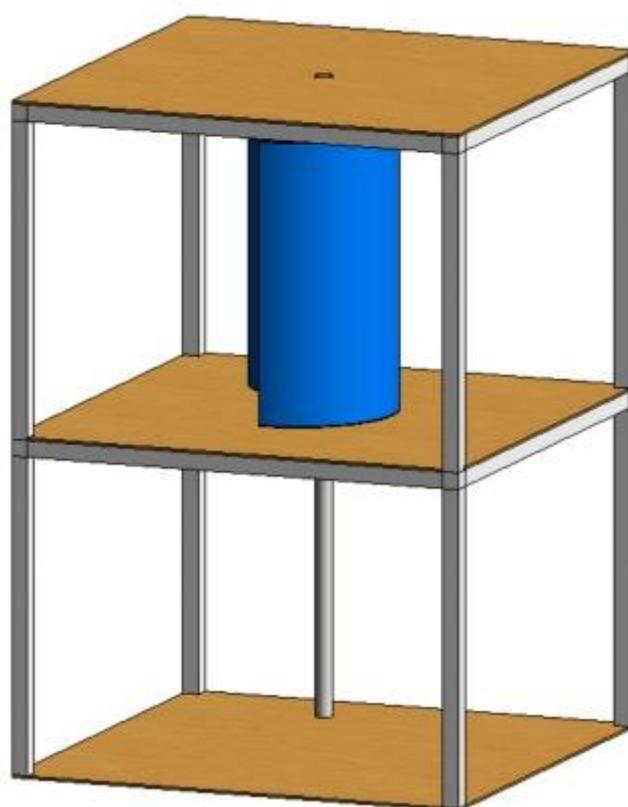
(b) Vista Superior com Cotas



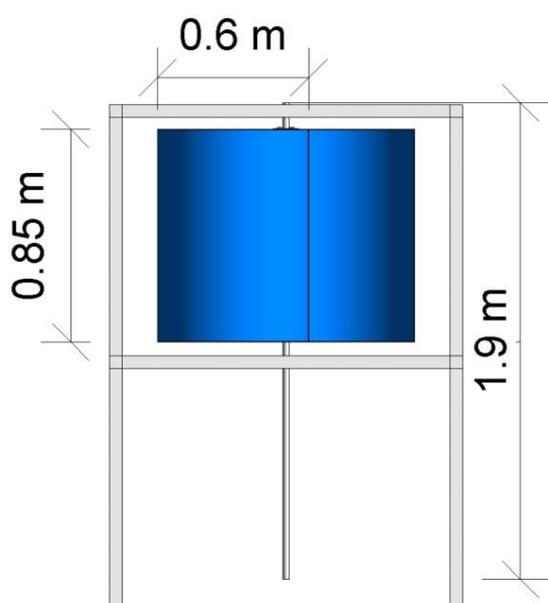
(c) Vista Lateral



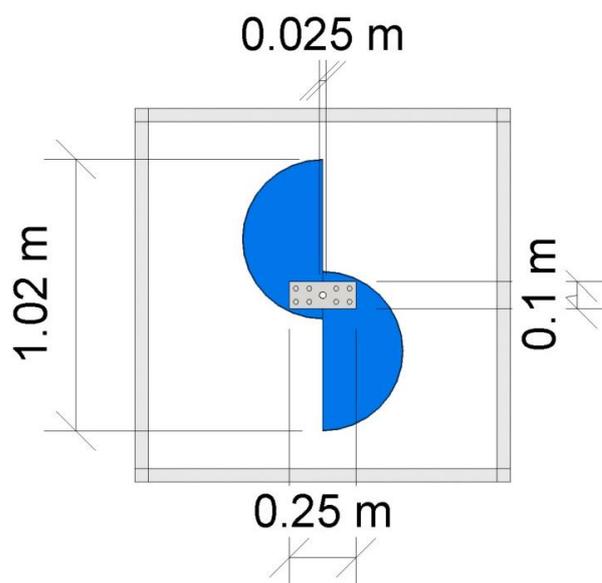
(d) Vista Lateral com Apoios



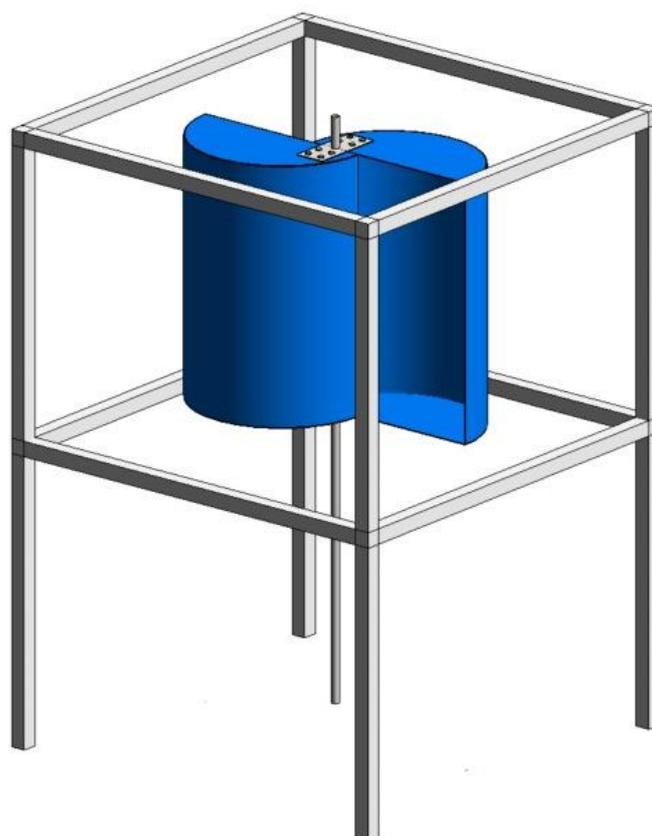
(e) Vista Lateral com Cores



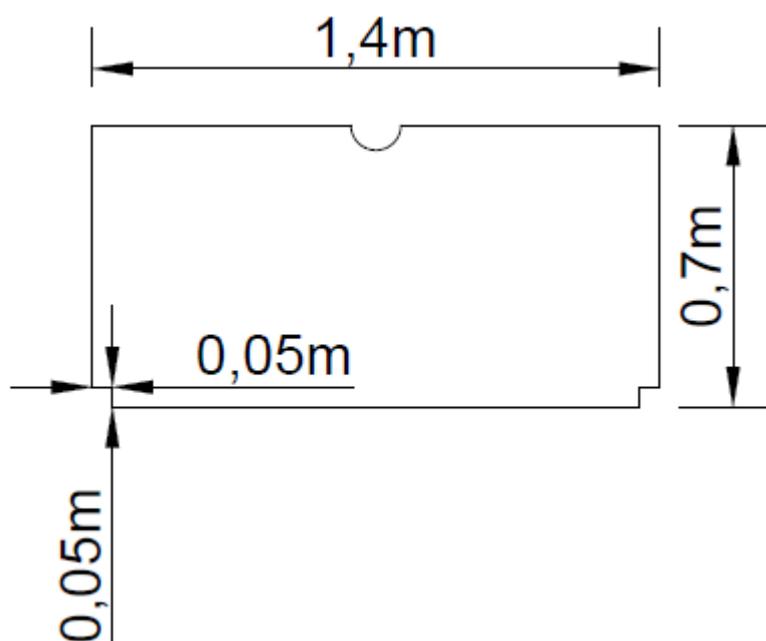
(f) Vista Lateral com Cochos e Cotas



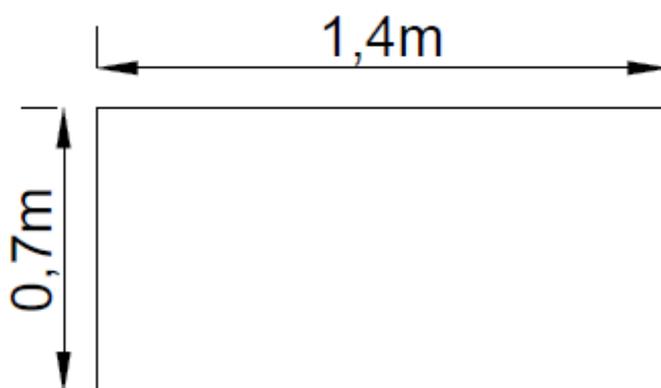
(g) Vista Superior com Cochos e Cotas



(h) Vista Lateral Sem Apoios

ANEXO B – Cortes Tábuas de Sustentação

(a) Corte da Tábua de Sustentação Intermediária



(b) Corte da Tábua de Sustentação Superior e Inferior