



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ARAGUAÍNA  
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

**PEDRO DOS SANTOS NASCIMENTO**

**CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UM ALTERNADOR AXIAL  
HORIZONTAL PARA AEROGERADORES DE ENERGIA ELÉTRICA  
COM BASE EM IMÃS DE NdFeB**

ARAGUAÍNA - TO  
2018

**PEDRO DOS SANTOS NASCIMENTO**

**CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UM ALTERNADOR AXIAL  
HORIZONTAL PARA AEROGERADORES DE ENERGIA ELÉTRICA  
COM BASE EM IMÃS DE NdFeB**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à UFT – Universidade Federal do Tocantins  
- Campus Universitário de Araguaína para  
obtenção do título de Licenciado em Física.  
Orientadora Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Liliana Yolanda An-  
calla Dávila

ARAGUAÍNA - TO

2018

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

- N244c Nascimento, Pedro dos Santos.  
CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UM ALTERNADOR AXIAL HORIZONTAL PARA AEROGERADORES DE ENERGIA ELÉTRICA COM BASE EM ÍMÃS DE NdFeB. / Pedro dos Santos Nascimento. – Araguaína, TO, 2018.  
69 f.  
  
Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Araguaína - Curso de Física, 2018.  
Orientadora : Profª Drª Liliana Yolanda Ancalla Dávila  
  
1. Energia Eólica. 2. Aerogeradores. 3. Fluxo Axial. 4. Ímãs de NdFeB. I.  
Título

**CDD 530**

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

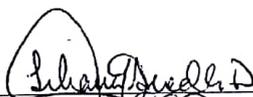
PEDRO DOS SANTOS NASCIMENTO

CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UM ALTERNADOR AXIAL  
HORIZONTAL PARA AEROGERADORES DE ENERGIA ELÉTRICA  
COM BASE EM IMÃS DE NdFeB

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à UFT - Universidade Federal do Tocantins  
- Campus Universitário de Araguaína para  
obtenção do título de Licenciado em Física,  
sob orientação da Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Liliana Yolanda  
Ancalla Dávila.

Aprovado em: 14 / 12 / 2018.

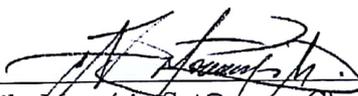
BANCA EXAMINADORA



Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Liliana Yolanda A. Dávila – Orientadora



Prof.<sup>o</sup> Dr.<sup>o</sup> Alexsandro Silvestre da Rocha – UFT



Prof.<sup>o</sup> dr.<sup>o</sup> Nilo Maurício Sotomayor Choque – UFT

ARAGUAÍNA - TO

2018

Dedico esse trabalho à Deus e a minha família, em especial à minha esposa.

# Agradecimentos

Quero agradecer primeiramente à Deus por sempre me abençoar, dando-me força e saúde para alcançar esse sonho.

Gostaria de deixar um agradecimento muito especial aos meus pais, José Luís e Benedita de Jesus, por todos os ensinamentos e incomparável amor que me foi dado, sem vocês não seria nada neste mundo. Agradeço também aos meus irmãos pelo apoio e incentivo.

Agradeço a minha esposa, Maria Aparecida, pelo apoio e incentivo nas horas boas e nas horas difíceis durante o curso. Este carinho recebido foi de fundamental importância para seguir adiante e chegar até aqui, serei eternamente grato.

Gostaria de agradecer também ao senhor José de Brito, sua esposa Maria Helena e toda sua família, por me acolherem em sua residência nesta cidade durante esses quatro anos de curso.

Quero agradecer também a Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Líliliana Dávila pela orientação e por ter me aceitado como orientando. Ao Prof. Dr. Nilo Maurício, pelo suporte e contribuição providencial na realização deste trabalho. E a todos os professores do colegiado de Física da Universidade Federal do Tocantins Campus de Araguaína pela contribuição na minha formação profissional.

Estendo esses agradecimentos aos meus amigos que de alguma forma contribuíram nessa caminhada. E agradeço também aos meus colegas de curso, pela parceria durante essa jornada que não foi fácil.

*“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará  
ao seu tamanho original”*

*Albert Einstein*

# Resumo

As fontes de energias limpas tiveram grandes investimentos nas últimas décadas, devido as preocupações ambientais e acrescidas a este problema existe a necessidade de novas fontes de energia para diversificar e universalizar a matriz energética mundial. Mas, apesar de todo esse investimento que vem sendo realizado nesta área, pesquisas estimam que cerca de 16% da população mundial ainda não tem acesso à eletricidade. Apesar do Brasil possuir uma matriz energética majoritariamente limpa, ainda estamos distantes do razoável e deixa a desejar na geração de energia das fontes não-convencionais, como por exemplo solar, eólica e biomassa. A fonte de energia elétrica predominante no Brasil é a hidrelétrica, que utiliza a energia cinética e potencial das quedas d'água para converter em energia elétrica. A capacidade de geração de energia eólica disponível no Brasil pode chegar a 143 GW de potência, mas atualmente são explorados cerca de 9% deste potencial eólico. Os aerogeradores, são equipamentos utilizados para converter a energia eólica dos ventos em eletricidade, podem variar sua forma estrutural de acordo com a aplicação e a geografia onde serão construídos os parques eólicos, para obter o melhor aproveitamento do potencial energético do local. O presente trabalho tem como objetivo desenvolver a construção, dimensionamento e caracterização de um alternador horizontal de fluxo axial, que será aplicável em aerogeradores. Através da construção deste protótipo foi possível aplicar os conhecimentos adquiridos ao longo do curso, utilizando materiais acessíveis, de baixo custo e de fácil manuseio. A construção deste protótipo foi baseada na técnica de construção e manuseio de objetos DIY (Do It Yourself), termo em inglês que significa “faça você mesmo”, essa técnica simplifica a construção de objetos e a sua possível aplicação.

**Palavras-chave:** Energia Eólica, Aerogeradores, Fluxo Axial, Ímãs de NdFeB.

# Abstract

Clean energy sources are major investments in the last few decades, while the environmental ones are a source of energy for new sources of energy to diversify and universalize a world energy source. But despite all the investment being made in this area, researchers estimate that about 16% of the world's population still do not have access to electricity. Although Brazil has a mostly clean energy matrix, we are still distancing ourselves from energy and leaving unconventional energy generation, such as solar, wind and biomass. The predominant source of electric power in Brazil is hydroelectric, which uses the kinetic and potential energy of the waterfalls to convert to electric energy. The wind generation capacity available in Brazil can reach 143 GW of power, but currently they are exploited in about 9% of this wind potential. Wind turbines are used to convert energy and wind into electricity, can be structured according to an application and a geography where wind farms are built, to obtain the best use of the energy potential of the site. The present work aims to construct a construction, design and characterization of a horizontal flow of axial flow, that will be applicable in aerogenerators. Through the industry the fact that it is possible to use the knowledge acquired throughout the course, the materials loaded, the low cost of easy handling. The construction of this prototype was based on the technique of building and handling DIY objects. Do it yourself, that is, do it yourself, that technique simplifies an object construction and its own application.

**Keywords:** Wind Energy, Wind Turbines, Axial Flow, NdFeB Magnets.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Capacidade Eólica Global instalada (MW) por ano entre 2001 e 2017. . . . .	20
Figura 2 – Componente de um aerogerador de eixo horizontal. . . . .	23
Figura 3 – Desenho representativo de uma máquina a ímãs permanentes de fluxo Radial. . . . .	25
Figura 4 – Desenho representativo de uma máquina a ímãs permanentes de fluxo axial. . . . .	26
Figura 5 – Máquina de fluxo transversal. . . . .	27
Figura 6 – Esquema de um circuito trifásico de corrente alternada ligado estrela. . . . .	43
Figura 7 – Esquema de um circuito ligado com a configuração triângulo. . . . .	46
Figura 8 – Tensões de um alternador trifásico ( $3\phi$ ) com defasagem de $120^\circ$ . . . . .	47
Figura 9 – Diagrama das bobinas com suas dimensões. . . . .	50
Figura 10 – Diagrama ilustrativo do estator com dimensões e as bobinas posicionadas. . . . .	51
Figura 11 – Configuração estrela com as seis bobinas. Os fios vermelho, azul e amarelo são as três fases respectivamente e o fio preto é o a saída do neutro. . . . .	52
Figura 12 – Configuração triângulo com seis bobinas. A saída vermelha é a fase 1, a saída azul é a fase 2 e a saída verde é a fase 3. . . . .	53
Figura 13 – Imagem mostra os ímãs de NdFeB com as dimensões em metros. . . . .	54
Figura 14 – Diagrama ilustrativo do rotor com os ímãs permanentes posicionados. . . . .	55
Figura 15 – Diagrama ilustrativo do protótipo montado em cores fantasia. . . . .	56
Figura 16 – Estator de acrílico com as bobinas fixadas em sua estrutura. . . . .	58
Figura 17 – Rotor montado. (A) vista superior e (B) vista lateral. . . . .	59
Figura 18 – (A) Estator e rotor separados, (B) Estator e rotor acoplados. . . . .	59
Figura 19 – Mostra o protótipo finalizado, posição vertical e horizontal. . . . .	61
Figura 20 – Mostra o protótipo montado em processo de teste. . . . .	62
Figura 21 – Mostra o gráfico de duas fases, com o circuito trifásico ligado em estrela. . . . .	63

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Resumo de relações matemáticas para ligações estrela e triângulo. . . .	46
Tabela 2 – Especificações do fio de cobre AWG 26 e das bobinas. . . . .	49
Tabela 3 – Características dos ímãs utilizados Neodímio-ferro-boro (NdFeB) no rotor. . . . .	54
Tabela 4 – Medidas experimentais das grandezas físicas. . . . .	61

# Lista de abreviaturas e siglas

NdFeB	Neodímio, Ferro e Boro.
GEE	Gás de Efeito Estufa.
d.C	depois de Cristo.
GWEC	Global Wind Energy Council.
GW	Giga Watts.
MW	Mega Watts.
ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica.
CBEE	Centro Brasileiro de Energia Eólica.
CELPE	Companhia Energética de Pernambuco.
PRÓEólica	Programa Emergencial de Energia Eólica.
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia.
LER	Leilão de Energia de Reserva.
TWH	Tera Watts Hora.
SIN	Sistema Interligado Nacional.
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica.
ETRs	Elementos Terras Raras.
EUA	Estados Unidos da América.
HDs	Hard Disk Drives.
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.
FEM	Força Eletro Motriz.
DIY	Do It Yourself.
AWG	American Wire Gauge.
LABMADE	Laboratório de Materiais Aplicados em Dispositivos Eletrônicos.

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Energia Renovável</b>	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Energia Eólica</b>	<b>18</b>
2.2.1	Energia Eólica no Mundo	19
2.2.2	Energia Eólica no Brasil	20
<b>2.3</b>	<b>Aerogeradores</b>	<b>22</b>
2.3.1	Alternadores de eixo horizontal	24
<b>2.4</b>	<b>Ímãs de Terras Raras (NdFeB)</b>	<b>28</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>31</b>
<b>3.1</b>	<b>Campo Magnético</b>	<b>31</b>
<b>3.2</b>	<b>Fluxo Magnético</b>	<b>32</b>
<b>3.3</b>	<b>Indução Eletromagnética</b>	<b>33</b>
3.3.1	Lei de Faraday	34
3.3.2	Lei de Lenz	35
3.3.3	Indutância	36
<b>3.4</b>	<b>Corrente elétrica</b>	<b>37</b>
<b>3.5</b>	<b>Tensão Elétrica</b>	<b>39</b>
<b>3.6</b>	<b>Potência Elétrica</b>	<b>40</b>
<b>3.7</b>	<b>Circuitos elétricos trifásicos</b>	<b>40</b>
3.7.1	Tensão e Corrente Trifásica	41
3.7.2	Ligações estrela	41
3.7.3	Ligações triângulo	44
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>48</b>
<b>4.1</b>	<b>Estator</b>	<b>49</b>
<b>4.2</b>	<b>Rotor</b>	<b>53</b>
<b>4.3</b>	<b>Diagrama Protótipo</b>	<b>55</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCURSÕES</b>	<b>57</b>
<b>5.1</b>	<b>Estator e Rotor</b>	<b>57</b>
<b>5.2</b>	<b>Protótipo montado</b>	<b>59</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>64</b>

**REFERÊNCIAS . . . . . 65**

# 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho de conclusão descreve a construção e caracterização de um alternador horizontal de fluxo axial com base em ímãs permanentes de NdFeB. Um alternador é uma das partes principais de um sistema de conversão da energia eólica dos ventos em energia elétrica. O equipamento desenvolvido nesse projeto utilizará produtos de baixo custo, com o intuito de produzir um produto barato e acessível a muitas pessoas.

A energia eólica é um tipo de energia alternativa que está ganhando espaço na crescente demanda mundial, por se tratar de uma fonte renovável, limpa, abundante, não emite gases de efeito estufa, não consome água e usa pequenas áreas de terras. As fontes de energias renováveis se destacam devido as grandes preocupações ambientais, entre elas a já mencionada energia eólica está entre as que mais cresceram e ganharam incentivos fiscais e investimentos nas últimas décadas.

O processo de conversão da energia eólica em elétrica é fundamentado no princípio da indução de Faraday, onde a energia cinética dos ventos é convertida em movimento das pás de uma turbina eólica, que por sua vez movimenta o rotor, o mesmo é uma das partes estruturais dos aerogeradores. O fluxo magnético criado por ímãs permanentes fixos no rotor que ao girar causam uma variação do mesmo nas bobinas fixas do estator induzindo uma corrente elétrica no circuito. Esse tipo de corrente é chamada de corrente alternada e é utilizada por vários equipamento do nosso cotidiano.

A eletricidade é, sem sombra de dúvida, uma das formas de energia mais utilizada pela humanidade nos dias atuais. A sua popularização ao longo do tempo ocorreu graças a sua grande versatilidade de uso, facilidade de transporte, baixo índice de perdas durante a conversão e, atualmente, em virtude da evolução tecnológica dos dispositivos eletrônicos como smartphones, notebooks e tablets. O aumento na demanda mundial de energia elétrica tem sido impulsionado por diversos fatores, entre os quais pode citar o crescimento demográfico da população mundial, expansão das áreas urbanizadas, desenvolvimento das indústrias, aquecimento global, mudanças nos padrões de vida em regiões de alta densidade populacional (BORBA, 2016 p. 17).

Essa crescente demanda nos países desenvolvidos e em desenvolvimento por energia elétrica, acarretou na necessidade de buscar novas alternativas energéticas para amenizar a dependência de combustíveis fósseis que causam poluição ambiental, desse modo, as demandas por essas fontes renováveis de energia aumentaram consideravelmente, se tornando alvo de interesse de muitos investidores. A energia eólica é uma das fontes de energias renováveis mais importante (SGUAREZI FILHO, 2010). A utilização da energia cinética disponível no vento para geração de energia elétrica é uma das principais apostas

no campo das fontes renováveis de energia e o seu uso vem crescendo exponencialmente a cada dia (BORBA, 2016).

Nesse sentido, muitos estudos vêm sendo desenvolvidos na área de geração de energias renováveis, que não causam impactos negativos, provindas do meio ambiente como por exemplo, solar; térmica; vibrações; eólica; eletromagnética; entre outras, que são alternativas de geração de energia elétrica limpa (GONÇALVES, 2011). Uma recente fonte de energia promissora que está ganhando força é a coleta de energia a partir de vibrações existente no meio ambiente. Essa técnica de coleta e armazenamento de energia é conhecida na literatura como “Energy Harvester”, que significa em português “coletor de energia” (RANGEL, 2014; MOREIRA FILHO, 2014).

A energia eólica que é convertida em energia elétrica ou mecânica, são mecanismos renováveis provenientes da natureza. A sua captação se dá através de aerogeradores, que são formados por geradores elétricos e turbinas eólicas, que transformam a força do vento em eletricidade (ALMEIDA, 2013). Além disso, existem outros meios de utilizar a força do vento, como por meio de papagaios ou paraquedas turbinados.

A idealização desse projeto deu-se através da necessidade de produzir um equipamento eficiente, que funcionasse a baixas rotações e com baixo custo de produção. Inicialmente a ideia é construir um produto simples, porém eficiente na geração de energia, uma vez que, futuramente poderá ser aprimorado e possivelmente será uma alternativa aos equipamentos do mercado e com um baixo custo na sua produção.

Este trabalho possui como objetivo principal, o desenho; a fabricação e caracterização de um alternador horizontal de fluxo axial com base em ímãs permanentes das ligas de NdFeB. Serão utilizados materiais de baixo custo para que o projeto fique acessível. Em razão das vantagens sobre o uso dos alternadores de ímãs permanentes de neodímio, ferro e boro, este trabalho tem a preocupação de que o equipamento produzido seja aplicável em aerogeradores.

Os objetivos específicos deste trabalho serão o dimensionamento e desenho de um alternador de fluxo axial para baixas rotações; dimensionamento e fabricação das bobinas de cobre e teste da tensão induzida em cada bobina; construção do estator para fixar o conjunto de bobinas e construção do rotor para fixar o conjunto de ímãs; testar as conexões estrela e triângulo e utilizar a mais eficiente; construção de um suporte para fixar o estator e o rotor e, por fim montar o protótipo.

Este trabalho está dividido em seis capítulos. Este primeiro capítulo, apresenta a introdução do trabalho com uma breve abordagem do tema em estudo; são descritos também os objetivos, geral e específicos; a motivação e justificativa do trabalho. No segundo capítulo, apresenta-se a fundamentação teórica, que é parte essencial em qualquer pesquisa científica, para dá embasamento em seus resultados, onde à abordagem do tema

será mais aprofundada. Na fundamentação teórica, discorre-se de forma contextualizada sobre os avanços e desenvolvimentos de novas técnicas para geração de energias renováveis, destacando a energia eólica que é o principal foco deste projeto. Além de traçar um breve panorama nacional e mundial sobre a geração de energia eólica.

Ainda no segundo capítulo, além das tecnologias utilizadas na geração de energia eólica, discorre-se também sobre os tipos de aerogeradores, que se dividem entre os de eixo vertical e os de eixo horizontal, exemplificando suas aplicações. Disserta também sobre os ímãs permanentes de terras raras e suas aplicações nas tecnologias. No terceiro capítulo, disserta e define os conceitos físicos aplicados na construção do protótipo e na geração de energia elétrica. Entre esses conceitos destacam-se, campo magnético; fluxo magnético; indução eletromagnética; indutância; corrente, tensão e potência elétrica.

No quarto capítulo, são descritos os materiais e os métodos utilizados no desenvolvimento desse trabalho. Os métodos utilizados neste projeto são baseados na técnica *Faça Você Mesmo*, do inglês *Do It Yourself*, que não será necessário a ajuda de um especialista para desenvolver ou manusear objetos (ROCHA, 2015; SOUZA JUNIOR; BESSA, 2018). O quinto capítulo, apresenta os resultados obtidos nos testes do protótipo e as discussões acerca desses resultados. Por fim no sexto capítulo, serão apresentadas as considerações finais desse projeto e possivelmente apresentaremos uma ideia para continuação do trabalho com uma possível aplicação do equipamento.

## 2 ESTADO DA ARTE

A revisão da literatura é o ponto de partida para a busca de respostas para qualquer trabalho científico. Através de um estudo bibliográfico é possível definir o problema e obter uma ideia sobre o atual estado deste, como por exemplo, suas lacunas e as contribuições que estão sendo realizadas para o desenvolvimento do tema em estudo.

Dessa forma, apresentamos aqui um breve estudo teórico do atual estado da arte, sobre assuntos importantes dentro da literatura, que serão necessários para o entendimento e compreensão deste trabalho. Os assuntos aqui abordados abrangem principalmente os conceitos e definições de energia eólica e aerogeradores, fazendo um breve histórico do desenvolvimento das fontes de energias limpas e a área de aplicação dos alternadores com base em Ímãs Permanentes de NdFeB, além de traçar um panorama da geração de energia eólica nos últimos anos. A seguir encontra-se os principais tópicos abordados nesta revisão da literatura que irão fornecer o conhecimento necessário para uma boa compreensão deste trabalho.

### 2.1 Energia Renovável

O aumento das mudanças climáticas nas últimas décadas e a necessidade de se adaptar a seus efeitos são os principais desafios que aflige a humanidade ultimamente. O progresso das sociedades envolvendo aspectos econômicos e científicos, contribuiu decisivamente para solucionar vários problemas históricos e melhorar o bem-estar da população nas últimas décadas, porém, teve como uma de suas consequências a devastação e poluição ambiental, devido a exploração descontrolada de seus recursos. Mais do que nunca a sociedade mundial depende das atividades ligadas ao progresso econômico e científico, como por exemplo a geração de energia elétrica, o transporte de passageiros e cargas e a produção de alimentos, todas essas atividades citadas emitem de alguma no seu processo de produção gases que causam o efeito estufa (GEE), elevando a temperatura do planeta. Esses fatos levaram muitos países a buscar um fornecimento energético que agredisse menos o meio ambiente e que reduzisse drasticamente a dependência de energias proveniente dos combustíveis fósseis (SIMAS, 2012).

Segundo Maia (2011, p.1), a demanda por essas fontes de energia tem atraído cada vez mais investidores e que contam ainda com incentivos fiscais em conjunto com iniciativas governamentais. Além disso, os avanços nas tecnologias de materiais com a redução nos custos de produção de equipamentos, promovem uma maior participação das fontes alternativas de energia nas matrizes energéticas mundiais.

Essa crescente preocupação da comunidade internacional com os efeitos supracitados levaram à uma intensificada busca por alternativas que pudessem de alguma forma suprir as necessidades econômicas e sociais, e que acima de tudo, agredissem menos o meio ambiente. Dentre as medidas que mais se destacam está o desenvolvimento das fontes renováveis de energia, uma vez que o setor de energia é responsável por cerca de dois terços das emissões globais de GEE (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA, 2018).

## 2.2 Energia Eólica

No cenário de grandes preocupações com o meio ambiente, as fontes de energia eólica têm se tornado muito atraente aos olhos dos investidores, devido a seus reduzidos impactos ambientais e seu elevado retorno financeiro. O processo de conversão de energia eólica em energia elétrica não emite gases de efeito estufa (GEE), não consome água e além de usar pequenas áreas de terras.

A energia cinética dos ventos começou a ser utilizada pelo homem há cerca de cinco mil anos para impulsionar as embarcações. Mas, somente no século III d.C. que começaram a surgir as primeiras máquinas que transformavam essa energia em trabalho. Durante vários séculos a energia dos ventos era utilizada para a moagem, produção de óleos vegetais e para o bombeamento de água. Porém, no século XIX começaram, pela primeira vez, converter esse tipo de energia em energia elétrica (DUTRA, 2008).

A energia eólica é definida como a conversão do movimento das massas de ar em eletricidade, seja pelo processo de aquecimento do mesmo pela luz solar ou pela movimentação do planeta.

A energia eólica pode ser considerada como o método de conversão de energia mais complexa atualmente, pois a mesma envolve elevado nível tecnológico, seja na regulação e controle da operação (geração) sazonal, ou devido ao seu monitoramento e operação autônoma. A suportabilidade frente a problemas na qualidade da rede elétrica, e até mesmo variações dinâmicas de carga (vento) forçam um elevado estresse de operação nos equipamentos (MAIA, 2011, p. 4).

O principal equipamento de um sistema eólico de conversão de energia é o alternador elétrico. Um alternador bem dimensionado e projetado é de suma importância para ter um bom desempenho e um melhor rendimento da máquina. O alto nível de eficiência da conversão, além de aumentar e melhorar a produção, aumenta também a vida útil do equipamento. Pois o mesmo trabalha em regime de sobrecarga, variações climáticas, desligamentos e religamentos, neste sentido é importante um ótimo dimensionamento dos alternadores elétricos para os projetos dos aerogeradores.

### 2.2.1 Energia Eólica no Mundo

Há uma revolução indiscutível acontecendo no mundo nas últimas décadas, estamos nos distanciando das fontes de energias poluentes e dando prioridade as fontes renováveis de baixo impacto ambiental, nesse contexto destacando-se a geração energia eólica. Em alguns países isso está ocorrendo rapidamente, porém em outros ainda caminha em passos lentos nessa transição. Independente da rapidez ou não na transição, é um fato comprovado que esta mudança no modo de gerar energia é irreversível e devemos engajar-se para que essa transição aconteça de forma eficiente e rápida em todo o mundo (PINTO 2014).

Em maio de 2018, o Conselho Global de Energia Eólica (GWEC) divulgou um relatório, mostrando que a indústria de energia renovável está cada vez mais madura e competindo com bastante sucesso no mercado mundial, mesmo contra tecnologias tradicionais de geração de energia que são altamente desenvolvidas em muitos países. Em 2017 foram adicionados mais de 52 GW de energia eólica limpa e livre de emissões de gases poluentes, elevando a capacidade total global instalada à 539 GW. A previsão de mercado do GWEC para 2022, estima-se que mais de 840 GW de energia eólica estejam instalados no mundo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA, 2018).

De acordo com a análise do GWEC no Relatório Anual, com novos recordes estabelecidos na Europa, na Índia e no setor “offshore”, que são os parques eólicos instalados no mar, o mercado retomará um crescimento mais rápido após 2018. A produção de energia eólica vem liderando a transição na geração e consumo de energia para longe dos combustíveis fósseis poluentes e continua impressionando em competitividade, desempenho e confiabilidade no setor. Tanto em projetos “onshore” quanto “offshore”, a produção de energia eólica é considerada a chave para definir um futuro energético sustentável.

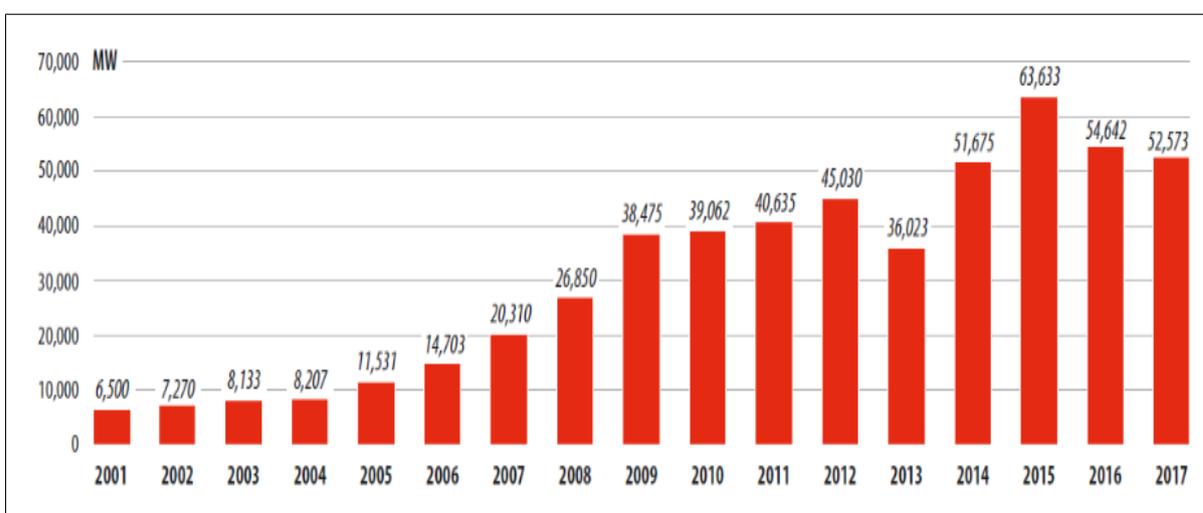
O relatório anual do GWEC de 2017 também faz um detalhamento da instalação de uma nova capacidade instalada de energia eólica, que está dividida por região e por ano. A região da América Latina e Caribe, registrou uma nova capacidade de instalação de 2,57 GW em 2017, este relatório destaca positivamente o papel do Brasil. O país mais uma vez dominou o mercado de energia eólica neste continente, com 2,02 GW na capacidade instalada, representando mais de três quartos das instalações nesse período na região.

Buscando reduzir as emissões de gases poluentes, a energia eólica se torna uma estratégia para diversos países, devido as suas características técnicas e do atual nível de desenvolvimento tecnológico. Por exemplo, a energia eólica oferece uma elevada capacidade de geração sem agredir o meio ambiente, reduzindo as emissões dos GEE, uma vez que a produção de energia tradicional é uma das principais causas das emissões de GEE, o potencial eólico mundial é bastante superior ao que temos atualmente instalado. Levando em consideração as barreiras políticas, econômicas e tecnológicas, a energia eólica poderia suprir cerca 20% da demanda de eletricidade até 2050 no mundo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA

DE ENERGIA EÓLICA, 2018).

Diante da preocupação com as mudanças do clima e com o desenvolvimento sustentável, muitos países decidiram investir há alguns anos em geração de energia renovável. O crescimento dessas fontes energia, especialmente a energia eólica, não é nenhuma novidade (TEDESCO, 2015). Como podemos observar na figura 1, a capacidade de energia eólica global instalada anualmente cresceu bastante nos últimos anos. No ano de 2013 esse crescimento deu uma estagnada, voltando a crescer nos dois anos seguintes e novamente em 2016 e 2017 teve um novo declínio.

Figura 1 – Capacidade Eólica Global instalada (MW) por ano entre 2001 e 2017.



Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA, (2018).

O Brasil nos últimos anos foi um dos países que mais se destacou na instalação e geração de energia eólica, ganhando algumas posições no Ranking global do GWEC e superando países como Canadá.

## 2.2.2 Energia Eólica no Brasil

No ano de 1992, no conjunto de ilhas de Fernando de Noronha, foi construído e começou a funcionar o primeiro aerogerador eólico instalado no Brasil, resultado de um projeto em uma parceria entre o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e a Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), financiado pelo instituto de pesquisas dinamarquês Folkecenter. Nos dez anos que se sucederam a década de 90, a geração de energia eólica no Brasil se estagnou e pouco se tinha investimentos nesse setor, em partes pela falta de políticas, mas o maior empecilho era o alto custo da tecnologia de produção dos equipamentos necessários gerar energia eólica (PINTO 2014).

Com a crise energética que ocorreu em 2001, houve uma tentativa de contratar alguns empreendimentos no setor de geração de energia eólica no país. Nessa época foi criado o então Programa Emergencial de Energia Eólica (PROEÓLICA). Esse projeto tinha como objetivo o de contratar cerca de 1050 MW em projetos de produção de energia eólica até dezembro de 2003. Tinha a ideia da complementaridade do regime do setor eólico com os fluxos de geração de energia nos reservatórios hidrelétricos do país. Esse programa, no entanto, não teve êxito e em seguida foi substituído pelo Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia, o chamado PROINFA. Além do incentivo no desenvolvimento das fontes renováveis de energia na matriz energética, o PROINFA ajudou a consolidar a indústria de componentes e turbinas eólicas no país, exigindo conteúdo nacional para os aerogeradores (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA, 2018).

Segundo a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA, no nascimento do PROINFA, a tecnologia de geração de energia eólica ainda era considerada muito cara e o desenvolvimento em leilões competitivos só viria mais tarde. No final de 2009, aconteceu o primeiro leilão voltado a comercialização de energia exclusivamente por fonte eólica. Este leilão, foi denominado de Leilão de Energia de Reserva (LER), e teve um grande êxito, contratando cerca de 1,8 GW e abrindo caminhos para novos leilões que ocorreriam nos anos posteriores. O 2º LER aconteceu em dezembro de 2009, contratando usinas eólicas com início para 2012 e cujo prazo dos contratos era de 20 anos.

Em 2017, foram gerados 42,25 TWH de energia eólica, representando um crescimento de 27,45% em relação ao ano anterior. Em termos de representatividade, as usinas eólicas foram responsáveis por cerca de 8% de toda a geração injetada no Sistema Interligado Nacional (SIN), sendo que, em agosto daquele ano, a energia eólica atingiu pela primeira vez os dois dígitos na matriz de geração, com 10%. Dados recentes da CCEE mostraram que a geração de energia eólica em operação comercial no SIN, ao final do primeiro semestre de 2018, subiu 16% em relação ao mesmo período de 2017 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA, 2018).

Em 2017, foram instaladas cerca de 79 novas usinas em parques eólicas no país, num total de 2027 MW na capacidade total instalada. Os estados que mais se destacaram na implantação desses novos empreendimentos foram os estados do Piauí e da Bahia, que juntos correspondem a mais da metade de toda instalação. Damos ênfase ainda ao Estado do Maranhão como um marco para o setor eólico dado pela instalação dos primeiros parques eólicos naquele estado.

Com aproximadamente 508 usinas no total, o ano de 2017 fechou com cerca de 12,8 MW de potência eólica instalada, o que representa efetivamente um crescimento em torno de 18,87% de potência em relação ao mesmo período de 2016, quando a capacidade total instalada era cerca de 10,74 GW. Considerando todas as fontes de geração de energia

elétrica, no ano de 2017, foram instalados 6,84 GW de potência, cujo crescimento foi liderado pelas fontes hidrelétrica e eólica, representando 47,86% e 29,62%, respectivamente da capacidade produzida. Acrescentado cerca de 2,02 GW da nova capacidade instalada, o total eólico permitiu uma participação de aproximadamente 8,10% da matriz energética brasileira, que representa a participação de todas as fontes de geração na matriz energética do país. Lembrando que, no final do ano de 2016, a participação das fontes eólicas era cerca de 7,12% da capacidade total.

Em 2017, o Brasil ganhou algumas posições no Ranking Mundial de capacidade instalada, ultrapassando o Canadá, passando a ocupar a 8ª posição, esse ranking é elaborado pelo GWEC (Global Wind Energy Council). Em 2012, o Brasil ocupava 15ª colocação. A capacidade prevista para o ano de 2018 é de aproximadamente 14.561 MW de capacidade instalada segundo dados do relatório anual do GWEC de 2017.

Na próxima seção serão definidos os principais equipamentos utilizados no processo de geração de energia elétrica. Esses equipamentos são usados principalmente para converter a energia eólica dos ventos em eletricidade, disserta-se aqui sobre os conceitos e aplicações dos aerogeradores.

## 2.3 Aerogeradores

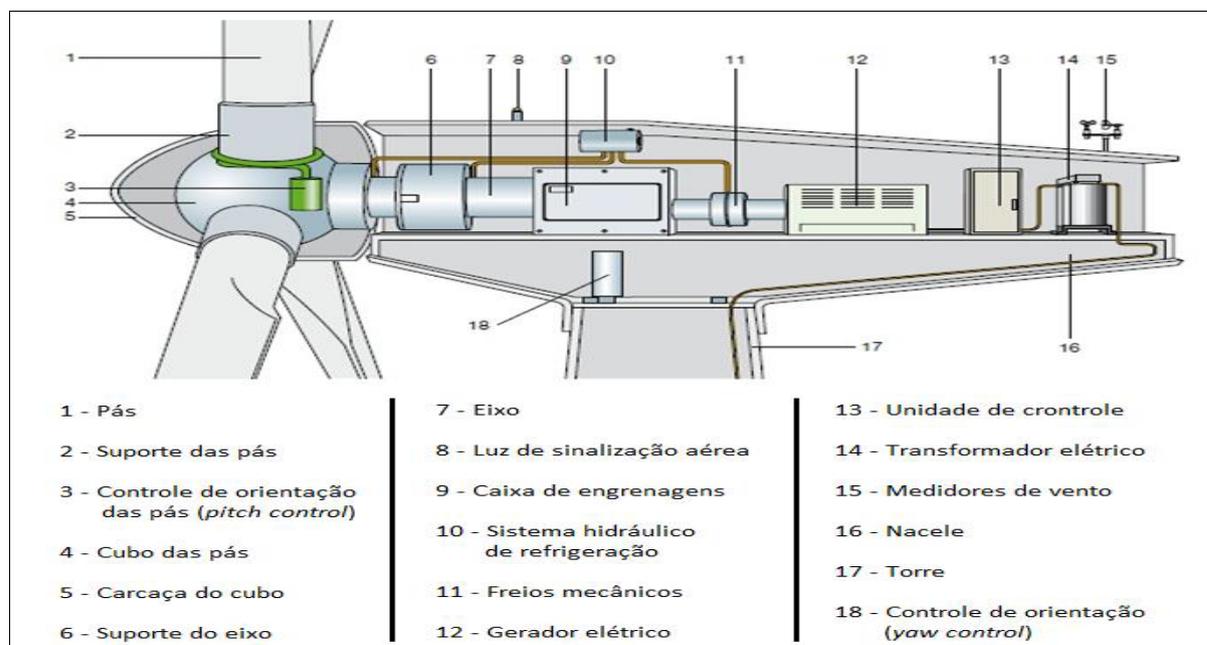
A utilização da força do vento é uma atividade explorada continuamente pelo homem século após século. Os primeiros registros históricos deste evento remetem as civilizações que habitaram as regiões das antigas Pérsias, Mesopotâmia, Egito e China. Moinhos de vento de eixo vertical foram desenvolvidos nessa época com a finalidade de substituir o uso da força humana ou animal no processo de moagem de grãos e elevação da água (BORBA, 2016).

Com o passar do tempo e o aperfeiçoamento das tecnologias os moinhos de vento evoluíram para os modernos aerogeradores que apresentam uma grande diversidade de formas construtivas. Hoje em dia, os aerogeradores podem ser diferenciados de acordo com a força aerodinâmica que incide nas pás, orientação do eixo de rotação (horizontal ou vertical), caixa de engrenagens (com multiplicador ou acionamento direto), número de pás (uma, duas, três ou multipás), posição das pás em relação à torre, potência (pequena, média ou grande), velocidade do rotor (constante ou variável), controle de potência e velocidade (estol passo ou estol ativo), local de instalação, tipo de gerador elétrico (síncrono ou assíncrono) entre outros (DUTRA, 2008).

Os aerogeradores são compostos por diversos componentes, dispositivos e sistemas tais como pás, cubo das pás, eixo do rotor, nacelle, torre, fundações, unidades de controle, sistema de mudança de direção, circuitos eletrônicos, caixa de engrenagem, freio, gerador

elétrico, transformador entre outros. Algumas modificações podem ocorrer dependendo dos fabricantes dos equipamentos e do tipo de tecnologia empregada nos dispositivos. A Figura 2 mostra, de uma maneira geral, onde estes diversos elementos que constituem um aerogerador de eixo horizontal estão distribuídos (CARVALHO, 2003; CUSTÓDIO, 2013).

Figura 2 – Componente de um aerogerador de eixo horizontal.



Fonte: Borba (2016) p. 31.

Atualmente os aerogeradores são utilizados em sua grande maioria para a produção de energia elétrica. Seu princípio de funcionamento está baseado na conversão eletromecânica de energia, decorrente do acionamento de um gerador elétrico conectado a turbina eólica. Com as evoluções ocorridas no campo das máquinas elétricas, os geradores passaram a ser uma peça chave no processo de geração de energia elétrica. A integração do gerador com o sistema eólico deve receber grande atenção, pois o gerador tem de lidar com as variações na velocidade do vento e no torque de entrada, exigência de frequência e tensão constante na energia produzida e, principalmente, necessita ter alta confiabilidade, pois muitas vezes o isolamento geográfico do aerogerador dificulta a instalação, operação e manutenção (MARQUES, 2004; JARDIM, 2014). Atendendo as diferentes configurações de modelo, potência requerida e condições de uso dos aerogeradores, os principais tipos de geradores utilizados são: assíncrono com gaiola de esquilo, assíncrono de dupla excitação, síncrono de rotor bobinado e síncrono de ímãs permanentes.

Os aerogeradores são definidos de acordo com sua topologia, tais como: de eixo horizontal ou vertical ou ainda as turbinas flutuantes, mas apesar de suas características inovadoras muitas dessas turbinas não tem mercado devido aos altos custos de produção. As turbinas de eixo horizontal com

três pás, histórica e comercialmente, apresenta uma melhor alternativa de conversão de energia eólica em energia elétrica, devido a sua eficiência de produção, estabilidade e dinâmica das correntes de ar (MAIA, 2011 p. 3).

Os aerogeradores de eixo horizontal, em sua maioria, fazem uso predominante de força de sustentação, apresentam elevada velocidade de rotação (sendo muitas vezes maior do que a própria velocidade do vento incidente), alto rendimento aerodinâmico e baixo torque, quando comparadas às máquinas que utilizam força de arrasto utilizando eixo vertical. Essas características as tornam preferíveis para aplicação em geração de energia elétrica, justificando sua maior utilização.

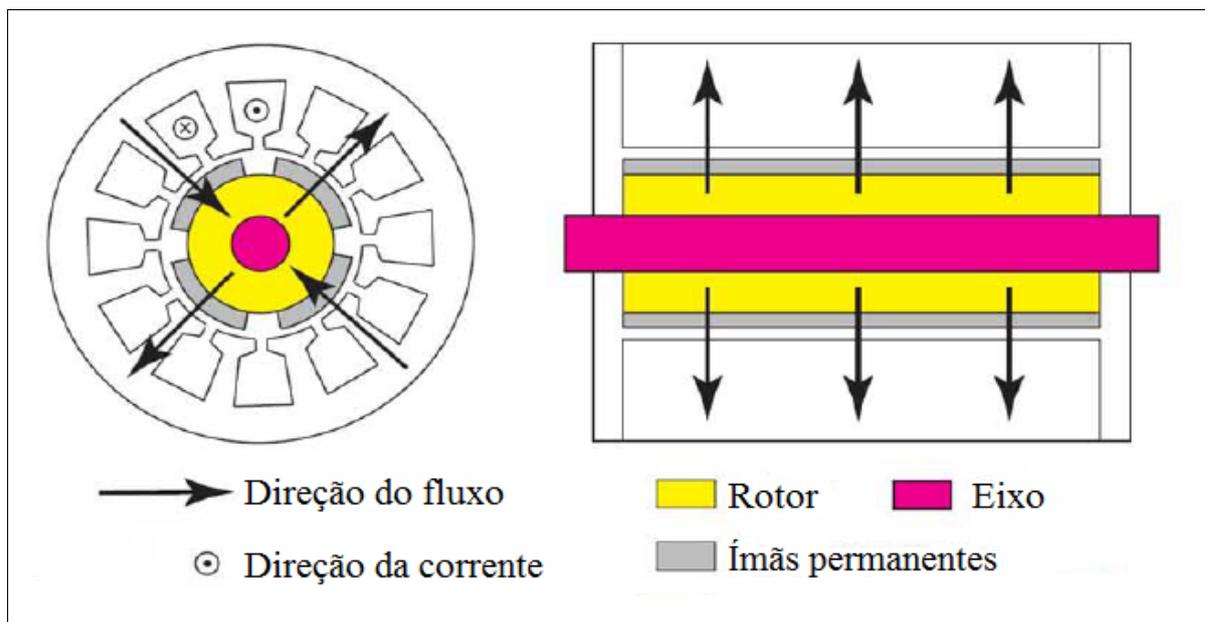
Os tipos mais comuns de geradores usados nas turbinas eólicas são os de alternadores de eixo horizontal, na seção a seguir define-se os principais tipos desses equipamentos.

### 2.3.1 Alternadores de eixo horizontal

Os alternadores eólicos (ou geradores eólicos) são equipamentos utilizados para converter energia mecânica em energia elétrica. Podemos classificar os alternadores de eixo horizontal em função da orientação do fluxo dentro da sua estrutura de três formas distintas, os alternadores de fluxo radial; os de fluxo axial e os de fluxo transversal.

Os alternadores de fluxo radial são encontrados em máquinas cilíndricas, a sua principal característica é que a orientação do fluxo magnético no interior de sua estrutura é radial, ou seja, percorre uma direção perpendicular ao eixo de rotação do rotor. A figura 3 mostra um desenho ilustrativo de um alternador de fluxo radial.

Figura 3 – Desenho representativo de uma máquina a ímãs permanentes de fluxo Radial.

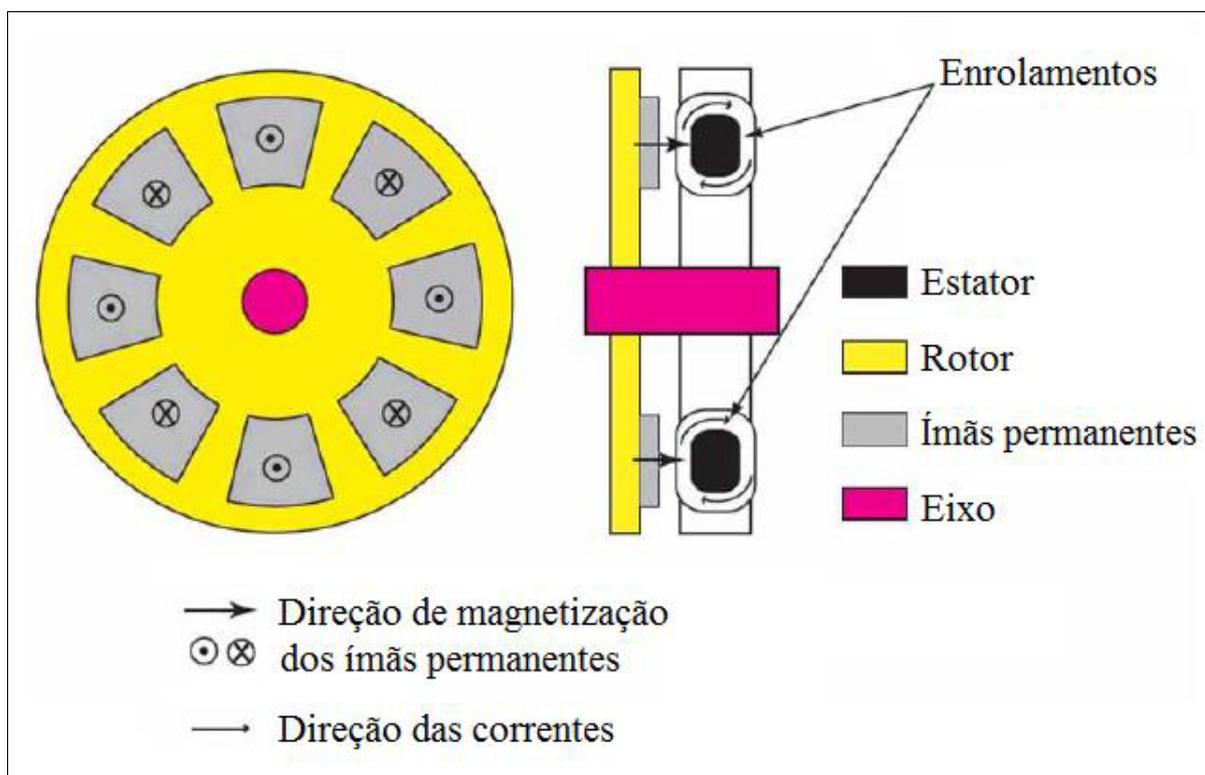


Fonte: Maia (2011) p. 8.

Os alternadores de fluxo axial são encontrados nas máquinas tipo disco, cuja orientação do fluxo magnético no interior de sua estrutura é paralelo ao eixo de rotação do rotor. Esse tipo de equipamento é pouco disseminado e existem poucos registros comerciais se comparado às máquinas de fluxo radial. Apesar das características inovadoras, essa tipologia de máquina surgiu antes das máquinas de fluxo radial, datando de 1831 inventadas por M. Faraday (SERWAY; JEWETT, 2011).

Para efeito de comparação, os alternadores de fluxo axial têm uma maior densidade de potência e um volume efetivo reduzido, o que favorece a sua utilização em sistemas eólicos de conversão de energia de baixa potência. As perdas são reduzidas no núcleo de ferromagnético nessa topologia, proporcionando um valor de eficiência superior nas máquinas de fluxo axial. O desenho ilustrativo mostrado na figura 4, apresenta uma topologia de um alternador de fluxo axial.

Figura 4 – Desenho representativo de uma máquina a ímãs permanentes de fluxo axial.



Fonte: Maia (2011) p. 9.

No caso de um alternador horizontal de fluxo axial que é o objeto de estudo deste trabalho, ele ficará fixado na posição de número 12 do aerogerador mostrado na figura 2. Os alternadores elétricos são geradores de eletricidade impulsionado por uma força mecânica externa. Os alternadores de fluxo axial são divididos pelos seguintes componentes mecânicos:

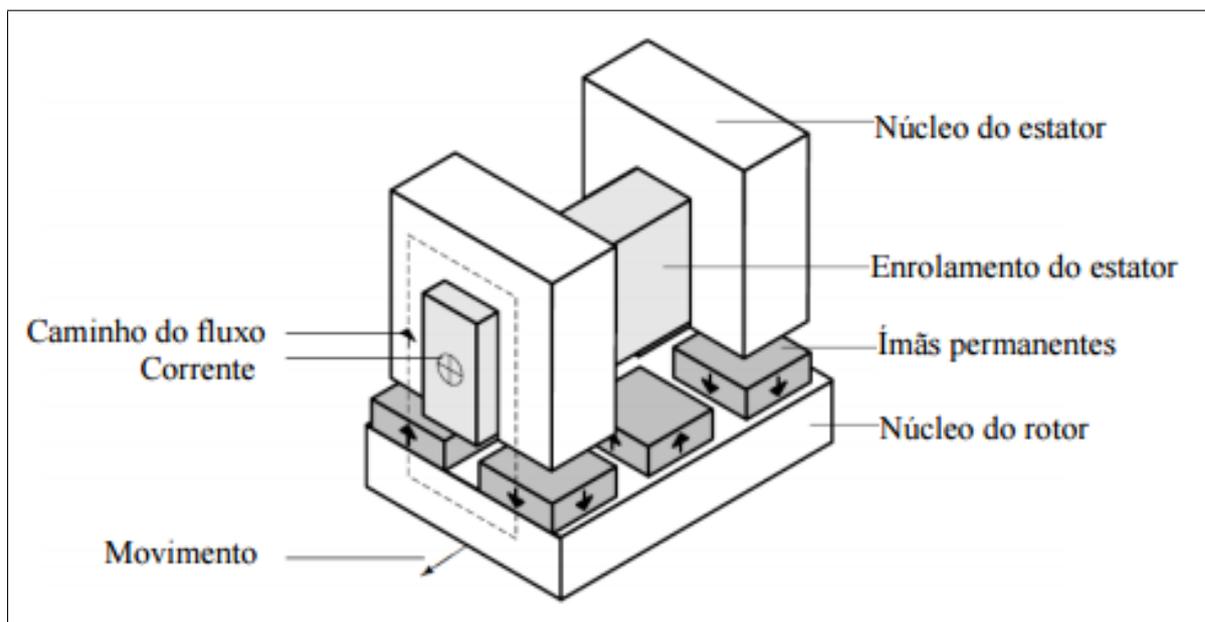
- Rotor, normalmente em forma de disco, onde são fixados os ímãs permanentes;
- Estator, também em forma de disco, onde são fixados as bobinas;
- Eixo, posicionado na horizontal;
- Bobinas, que são fixadas no estator;
- Ímãs permanentes, que são fixados no rotor.

Existe ainda um terceiro tipo de máquinas que é caracterizada pelo fluxo magnético em sua estrutura interna com ímãs permanentes que são as máquinas de fluxo transversal. Esse tipo de máquina é pouco difundida se comparadas as de fluxo radial e axial, porém vem ganhando um espaço considerável nos últimos anos, principalmente devido as suas

variadas possibilidades de aplicações em dispositivos, como por exemplo, os alternadores de velocidade variável e frequência constante (AZEVEDO, 2012).

Um das principais características das máquinas de fluxo transversal é o maior aproveitamento do fluxo magnético interno devido à forma de como foi projetada, estrutura eletromagnética complexa, enrolamentos anelares, essas máquinas possui um fator de potência muito baixo, porém com poucas perdas nos enrolamentos, alta densidade de torque, entre outras características presentes nessas máquinas. A sua principal vantagem em comparação com às máquinas de fluxo axial e radial está na possibilidade de aumentar o espaço destinado ao enrolamento sem que haja a redução do espaço para o fluxo principal, colaborando para a reduzir as perdas no cobre (FERREIRA, 2011; VERDUM, 2013). A Figura 5 apresenta um exemplo desta topologia de máquina.

Figura 5 – Máquina de fluxo transversal.



Fonte: Verdum (2013) p. 50.

As aplicações das máquinas elétricas síncronas com ímãs permanentes são diversificadas a cada novo desenvolvimento desta tecnologia. Um exemplo disto está no processo de geração de energia elétrica, onde o consumo cada vez maior de energia exige que a geração seja realizada sempre da forma mais efetiva. Partindo da premissa de obter energia elétrica com o mínimo de perdas possíveis durante a conversão da energia mecânica em elétrica, são realizadas inúmeras pesquisas que tem contribuído para a evolução e aprimoramento dos geradores elétricos. A energia eólica está entre as fontes geradoras que mais crescem, necessitando que seus equipamentos acompanhem este desenvolvimento.

Os geradores elétricos são equipamentos que tem como base na sua forma estrutural

os ímãs permanentes de Neodímio, que são potencialmente aplicados em projetos de aerogeradores de energia, na seção a seguir define-se os chamados ímãs de NdFeB e suas aplicações nas novas tecnologias.

## 2.4 Ímãs de Terras Raras (NdFeB)

Os elementos Terras Raras (ETRs) são considerados matérias primas importantes para a vida moderna, pois o mesmo possui uma grande possibilidade de aplicações nas altas tecnologias. Esse grupo de metais é composto por vários elementos da série dos lantanídeos (número atômico 57 a 71), além de escândio (21) e ítrio (39), os quais apresentam algumas propriedades químicas que são muito semelhantes. Pode-se encontrar esses elementos na natureza contidos em algumas espécies minerais de grande interesse econômico, como por exemplo, a monazita, a bastnaesita e a xenotima (ZIANI, 2015).

Com relação a aplicabilidade dos ETRs, não são conhecidos ainda outros elementos com as mesmas características que possam substituí-los com a mesma eficiência e com o mesmo desempenho. Até o início da década de 50, os ETRs eram considerados apenas curiosidades de laboratórios e durante muitos anos tinham uma pequena aplicabilidade em equipamentos. Porém, com o aprimoramento das técnicas de extração, separação e purificação desses elementos houve um grande impulso nas pesquisas relacionadas a esses metais (SOUZA FILHO; SERRA, 2014). Essa ampla aplicação das propriedades magnéticas e ópticas dessas espécies de metais, estão associadas à sua leveza, sua resistência e sua eficiência energética. Existe uma grande variedade de aplicações desses elementos, que englobam desde produtos corriqueiros do nosso dia a dia, como pedra de isqueiro, polimento de vidro, cerâmicas, até produtos usados em tecnologias de ponta, como ímãs permanentes e baterias (LOUREIRO, 2013).

Entre as principais aplicações dos ETRs que se destacam estão, os ímãs permanentes; fósforos luminescentes; catálise, entre outros, porém não são as únicas aplicações dos terras raras. A maioria dos ímãs utilizados nas tecnologias de ponta baseiam-se na composição Neodímio, Ferro e Boro (NdFeB), em alguns casos adicionados em sua composição o elemento disprósio. Esses ímãs são especialmente adequados em aplicações que requerem porções pequenas e com uma magnetização elevada, por exemplo, em alto falantes de telefones celulares e hard disk drives (HDS). Com o aumento no consumo de energia elétrica a tendência é a instalação de turbinas eólicas cada vez maiores, com um alto desempenho na geração de eletricidade. Essas turbinas gigantes funcionam com ímãs permanentes a base de NdFeB, pela necessidade de ser eficiente sem aumentar sua estrutura e, conseqüentemente o seu peso facilitando a montagem e o transporte das peças (SILVA JÚNIOR; CAMPOS, 2016).

Além de presentes nos equipamentos supracitados, os ímãs de neodímio são

encontrados também em vários outros equipamentos eletrônicos, como por exemplo, os equipamentos usados em ressonância magnética e aerogeradores. As suas propriedades magnéticas e ópticas destes elementos são os principais motivos de sua grande aplicabilidade. No entanto, os ímãs de neodímio apresentam uma baixa temperatura de desmagnetização, a chamada temperatura de Curie que é em torno de 312°C, considerada a menor entre os metais. Também apresenta uma baixa resistência à corrosão, por este motivo normalmente possui uma camada de proteção que na maioria das vezes é de Níquel, Zinco ou Epóxi. Em ambientes úmidos ou com maresia, é aconselhável que além do revestimento de sua camada de proteção o mesmo seja protegido por algum outro tipo de material, como tinta ou resina por exemplo para aumentar a vida útil do metal (LUNA, 2012; MÜNCHEN, 2016).

O aumento na demanda por estes recursos, ocasionado pelo grande número de aplicações dos mesmos, principalmente na área de Tecnologia da Informação juntamente com a baixa oferta de recursos resultado das poucas minas de exploração de Terras Raras em operação, fez com que o mundo considerasse a possibilidade de um novo olhar sobre a obtenção, uso e, mais recentemente, o reuso destes elementos (GIESE, 2017).

Na última década, a União Europeia classificou os elementos Terras Raras como matérias primas críticas, e também avaliou os riscos econômicos e políticos associados ao fato da exploração de Terras Raras serem feita quase que exclusivamente pela República Popular da China (SANDRONI, 2011). Em 2010, por exemplo, o Japão experimentou uma falta crítica de elementos de terras raras devido a um conflito geopolítico com a China. Atualmente, países como EUA, Japão e a União Europeia estudam os seus recursos minerais e estão desenvolvendo planos para responder a futuras faltas e interrupções nos seus fornecimentos (SAMPAIO; LIMA; LOVÓN-CANCHUMANI, 2018).

Diante destas circunstâncias, os países europeus para se manter e competir no mercado internacional de Terras Raras será necessário o máximo aproveitamento dos recursos naturais. Recursos estes que são extraídos a partir do desenvolvimento de processos de fontes secundárias, com por exemplo o uso de reciclagem e reutilização de produtos em fim de vida (CRÊSPO SANTOS, 2015). A mudança no ponto de vista da relação entre a matéria prima e o descarte do produto esgotado advém de práticas sustentáveis das preocupações com meio ambiente e de acordo com os conceitos atuais de economia circular.

Os ímãs permanentes de NdFeB foram apresentados pela primeira vez em 1982, simultaneamente, nos Estados Unidos (pela General Motors) e Japão (pela Sumitomo Metais Especiais) e posteriormente em 1986 passou a ser produzido em escala comercial (FERREIRA; NASCIMENTO, 2013). Muitos produtos supracitados seriam bastantes diferentes sem a utilização desses elementos. Esses ímãs são ideais para produzir uma variedade de equipamentos tecnológicos relativamente pequenos e eficientes do ponto de vista funcional. Essa característica faz com que esses metais ganhem cada vez mais espaços no

mercado e conseqüentemente maiores investimentos e incentivos fiscais.

A exploração dos Elementos Terras Raras no Brasil teve seu início por volta de 1885, na Bahia. Até o ano de 1896, a exploração era gratuita, uma vez que era levada para outros países sob o pretexto de ser usada como lastro dos navios, que não poderiam voltar vazios. Quando se trata de pesquisas em Elementos Terras Raras nas universidades brasileiras, as mesmas estão consideravelmente dispersas pelo território nacional. De acordo com dados do Diretório Nacional de Grupos de Pesquisa do CNPq, em 2013 havia 89 grupos de pesquisa que utilizavam as palavras terras raras ou lantanídeas em sua descrição. A grande maioria desses grupos concentrava-se na área de química, seguida pela física, engenharia de materiais e metalúrgica, geociências, engenharia química, engenharia nuclear, agronomia, oceanografia e microbiologia (SOUSA FILHO; SERRA, 2014).

## 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão descritos os conceitos físicos aplicados na realização deste trabalho. A ênfase maior será nos conceitos eletromagnéticos, como por exemplo, campo e fluxo magnético; indução eletromagnética; lei de Faraday e lei de Lenz; indutância; corrente, tensão e potência elétrica. Discorre-se brevemente sobre circuitos elétricos trifásicos e os tipos de ligações elétricas estrela e triângulo.

### 3.1 Campo Magnético

Campo magnético é definido como uma região onde há a possibilidade de haver uma interação magnética, seja ela gerada por um ímã ou por uma corrente elétrica em movimento. Existe também o campo magnético da terra, que às vezes causa fenômenos naturais através de uma interação eletromagnética, por exemplo, a aurora boreal. Um campo magnético é um fenômeno que exerce uma interação sobre qualquer outra corrente ou carga elétrica que se mova em seu interior (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2007). Essa interação recebe o nome de força magnética.

Existem basicamente quatro características principais da força magnética que atuam sobre uma carga em movimento. A primeira característica da força magnética é que o módulo dessa força sempre é proporcional ao módulo da carga geradora, a segunda característica, define que o módulo dessa força é proporcional ao módulo do campo magnético. Ou seja, se dobrarmos a intensidade do campo magnético mantendo o mesmo valor para a carga ou sem alterar a sua velocidade, a força dobrará em acordo com o valor do campo magnético. A terceira característica intrínseca a força magnética depende da velocidade que a partícula portadora de carga se movimentar. E a quarta característica define a direção e o sentido da força magnética, ou seja, a força magnética não possui a mesma direção do campo, porém atuando sempre em uma direção perpendicular ao campo magnético e a direção da velocidade da partícula portadora de carga. Portanto, o módulo da força magnética é proporcional a velocidade da partícula que por sua vez, também é perpendicular ao campo magnético (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

Quando a velocidade da partícula e o campo magnético forem paralelos, ou seja, o ângulo entre eles for zero, a força magnética também será igual à zero. Uma vez que produto vetorial entre os vetores campo magnético e velocidade são dados por,  $Bv\sin\theta$ . Podemos representar matematicamente a força de interação magnética pela equação 3.1,

$$\vec{F}_{(B)} = q(\vec{v} \times \vec{B}). \quad (3.1)$$

A equação (3.1) não foi deduzida e sim obtida com base em observações experimentais, e pode ser aplicada tanto para cargas positivas e negativas. Quando a carga é negativa, o sentido da força é sempre contrário ao sentido do produto vetorial entre a velocidade e o campo magnético  $\vec{v} \times \vec{B}$ . Em uma situação quando duas cargas possui o mesmo módulo e com sinais opostos se deslocando no mesmo campo magnético  $\vec{B}$ , com mesma velocidade, as forças geradas pelas duas cargas possuem o mesmo módulo, porém com sentidos contrária (YOUNG; FREEDMAN, 2009). Dessa forma representamos matematicamente o campo magnético através da relação de proporcionalidade mostrado na equação 3.2

$$\vec{B} = \frac{\vec{F}_B}{qv}. \quad (3.2)$$

## 3.2 Fluxo Magnético

O fluxo magnético  $\Phi_B$  é definido como a variação do campo magnético através de uma superfície de área, essa superfície pode ser dividida em elementos infinitesimais de área  $d\vec{A}$  (HAYT 2013). Para cada elemento determinamos a ortogonalidade do vetor campo magnético, que é o componente  $\vec{B}$  normal a superfície do elemento  $d\vec{A}$ . Assim temos  $\vec{B}_\perp = B \cos \phi$ , em que  $\phi$  é o ângulo entre a direção de  $\vec{B}$  e a reta perpendicular a superfície. Em geral, essa componente varia de ponto a ponto sobre a superfície.

Definimos a variação do fluxo magnético  $d\vec{\Phi}_B$  através de uma superfície como apresentado na equação 3.3 a seguir,

$$d\Phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{A} = B dA \cos \phi \quad (3.3)$$

O fluxo magnético total através da superfície é a soma das contribuições dos elementos de área individuais, dada apresentada pela integral da equação 3.4 assim temos,

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{A} = \oint B dA \cos \phi \quad (3.4)$$

Essa equação representa o fluxo magnético total através de uma superfície de área  $\vec{A}$ . Esse fenômeno é uma grandeza escalar, quando  $\vec{B}$  for uniforme sobre uma superfície plana com área  $\vec{A}$ . O campo  $\vec{B}$  ortogonal e o ângulo  $\phi$  são os mesmos em todos os pontos sobre a superfície, portanto, o fluxo magnético  $\Phi_B$  é dado pela equação 3.5,

$$\Phi_B = \vec{B}_\perp \vec{A} = BA \cos \phi \quad (3.5)$$

Se  $\vec{B}$  for perpendicular a superfície, então  $\cos \phi = 1$  e a equação 3.5 se torna na forma mais simplificada, apresentada na equação 3.6 abaixo,

$$\Phi_B = BA \quad (3.6)$$

No SI a unidade de medida de fluxo magnético é o tesla por unidade de metro ao quadrado  $\frac{T}{m^2}$ . O fluxo magnético através de uma superfície fechada é igual à zero, podemos representar matematicamente da seguinte forma,

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0. \quad (3.7)$$

A equação 3.7 é chamada de Lei de Gauss do eletromagnetismo. Para a lei de Gauss que se aplica a uma superfície fechada, o vetor da área aponta invariavelmente para fora da superfície. Contudo, algumas aplicações de fluxo magnético envolvem uma superfície aberta com uma linha de contorno, nesse caso, existe uma ambiguidade de sinal na equação 3.7, pois há dois sentidos possíveis para o vetor de área. Nesses casos, devemos escolher um dos dois sentidos como positivo e usar consistentemente a escolha feita.

Quando o elemento de área  $d\vec{A}$  na equação 3.5 forma um ângulo reto com a linha do campo magnético  $\vec{B}$ , então  $\vec{B} \perp d\vec{A} = B$ , chamando de  $dA$  o elemento de área, temos a representação matemática na equação 3.8,

$$B = \frac{d\Phi_B}{dA}. \quad (3.8)$$

Ou seja, o módulo do campo magnético é igual ao fluxo por unidade de área ao longo de uma área ortogonal ao campo magnético. Por essa razão, o campo magnético  $\vec{B}$  é algumas vezes, chamado de densidade de fluxo magnético.

### 3.3 Indução Eletromagnética

A indução eletromagnética ocorre quando o fluxo magnético varia através de um circuito, causando a indução de uma força eletromotriz induzida e de uma corrente no circuito. Nas usinas geradoras de energia elétrica, o movimento de um ímã em relação a uma bobina produz um fluxo magnético que varia através das espiras da bobina e, portanto, surge uma força eletromotriz induzida no circuito. Outros componentes essenciais de sistemas elétricos também dependem dessa indução, por exemplo, um transformador elétrico funciona em virtude da ação de uma FEM induzida (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016). Na realidade, graças ao papel central desempenhado na geração de energia elétrica que é fundamentalmente responsável pela estrutura do desenvolvimento tecnológico de nossa sociedade.

O princípio central da indução eletromagnética é a lei física da indução proposta por Michael Faraday por volta de 1831. Essa lei relaciona a FEM induzida ao fluxo magnético variável em qualquer tipo de espira, incluindo um circuito fechado (YOUNG; FREEDMAN, 2009). De acordo com a indução eletromagnética, um campo magnético  $\vec{B}$  que varia em função do tempo pode atuar como uma fonte de campo magnético. Esses importantes resultados fazem parte de um conjunto de formulas conhecidas como as equações de Maxwell, que sintetizam o comportamento de um campo magnético e de um campo elétrico para qualquer situação.

### 3.3.1 Lei de Faraday

Um dos fenômenos comuns em todos os efeitos de indução é a variação do fluxo magnético em um circuito. A priori, definiu-se o fluxo magnético e demonstrou a equação matemática que descreve esse fenômeno. Para um elemento infinitesimal de área  $d\vec{A}$  em um campo  $\vec{B}$ , a variação do fluxo magnético  $d\Phi_B$  através desse elemento de área é dado como mostrado na equação 3.3, onde  $\vec{B}_\perp$  é o componente perpendicular a superfície do elemento de área e  $\phi$  é o ângulo entre  $\vec{B}$  e  $d\vec{A}$ . Para encontrar o fluxo magnético total através de uma superfície finita integramos como mostra a equação 3.4 sobre a área considerada.

Quando o campo  $\vec{B}$  for uniforme ao longo de uma área plana  $\vec{A}$ , então o fluxo magnético é dado pelo produto escalar entre  $\vec{B}$  e  $d\vec{A}$ , apresentado na equação 3.4. Dessa forma a lei de Faraday da indução diz que a força eletromotriz induzida em uma espira fechada é dada pela taxa de variação do fluxo magnético, com sinal negativo, através da área delimitada pelas espiras.

Usando representações matemática, descrevemos a lei de Faraday da indução na forma integral e na forma derivada respectivamente, como mostrado nas equações 3.9 e 3.10,

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (3.9)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (3.10)$$

O sinal negativo na equação 3.11 representa o sentido da força eletromotriz induzida, definido pela lei de Lenz. Para uma bobina com N espiras, se o fluxo magnético que atravessar todas as espiras dessa bobina for o mesmo, a tensão induzida nessa bobina será dada pela equação da força eletromotriz induzida mostrada na equação 3.11,

$$fem = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (3.11)$$

Onde  $fem$  é a tensão induzida,  $N$  é número de espiras na bobina e  $\frac{d\Phi_B}{dt}$  é o fluxo magnético que varia no tempo. Para um campo magnético espacialmente homogêneo o fluxo  $\Phi_B = BA\cos(\phi)$ , desta forma a força eletromotriz induzida no condutor é dada pela equação 3.12,

$$fem = -N \left[ A\cos(\phi)\frac{dB}{dt} - B\cos(\phi)\frac{dA}{dt} - BA\frac{\cos(\phi)}{dt} \right] \quad (3.12)$$

Na prática, existe uma dificuldade na relação demonstrada na equação 3.6, essa relação pressupõe que em todas as espiras da bobina a intensidade do fluxo magnético seja o mesmo. Na realidade, parte do fluxo magnético se dispersa do núcleo indo para o ar circundante, isso impede que todas as espiras que todas as espiras sejam cruzadas pelo fluxo com a mesma intensidade (CHAPMAN, 2013). Porém se as espiras estiverem bem compactadas de modo que o fluxo que atravessa a maior parte das espiras seja igual, a equação 3.12 apresenta resultados relativamente satisfatórios. Caso a dispersão for muito grande ou se for necessário trabalhar com resultados próximos ao exato extremo, se faz necessário uma expressão que uma superposição do fluxo em cada espira da bobina.

### 3.3.2 Lei de Lenz

A Lei de Lenz é um método físico usado para determinar o sentido da corrente elétrica induzida em uma bobina. Essa lei é derivada da lei de indução de Faraday, considerada um método alternativo para o sentido da FEM induzida.

A lei de Lenz é um método alternativo para determinar o sentido da FEM ou da corrente elétrica induzida. Não é um princípio independente, pois a mesma pode ser deduzida a partir da lei de Faraday e conduz ao mesmo resultado obtido quando usamos a lei de indução de Faraday, porém é mais aplicação e de perceber em um sistema físico. Também ajuda a adquirir conhecimentos intuitivos dos diversos efeitos de indução e do papel desempenhado pela conservação da energia. A lei enuncia que “sentido de qualquer efeito de indução magnética é tal que ele se opõe a causa que produz esse efeito” (YOUNG; FREEDMAN, 2009, P. 290).

A causa que trata a citação acima pode ser um fluxo magnético variável gerado pelo movimento relativo de condutores que compõem o circuito ou qualquer outra combinação que produza variação de fluxo. Quando o fluxo magnético é variável através de um circuito em repouso, a própria corrente induzida produz um campo magnético, ao qual chamamos de campo induzido.

Esse campo induzido é oposto ao campo original que produziu a corrente, quando o campo original está crescendo, porém possui o mesmo sentido do campo original quando está diminuindo. Ou seja, a corrente induzida se opõe a variação do fluxo magnético no circuito e não ao próprio fluxo. Quando a variação do fluxo magnético é produzida pelo

movimento do condutor, o sentido da corrente induzida no condutor que se move é o mesmo sentido da força magnética que atua sobre o condutor, que causou a corrente induzida, essa corrente tende a manter o status quo, se opondo ao movimento ou contrariando a variação do fluxo magnético.

A aplicação da lei de Lenz a um circuito condutor colocado em campo magnético pode ser feita de acordo com os seguintes passos,

1. Define-se a direção positiva para o vetor área  $\vec{A}$ ;
2. Admite-se o campo uniforme e efetua-se o produto escalar  $(\vec{B} \cdot \vec{A})$ , para determinar o sinal do fluxo  $\Phi_B$ ;
3. Determina-se a taxa de variação do fluxo  $\frac{d\Phi_B}{dt}$  que leva às três possibilidades expressas nas equações 3.13, 3.14 e 3.15:

$$\frac{d\Phi_B}{dt} < 0 \implies fem > 0 \quad (3.13)$$

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = 0 \implies fem = 0 \quad (3.14)$$

$$\frac{d\Phi_B}{dt} > 0 \implies fem < 0 \quad (3.15)$$

4. Determina-se o sentido da corrente induzida com base na regra da mão direita: “com o polegar apontando na direção de  $\vec{A}$ , fechamos os dedos ao redor do eixo que define a direção de  $\vec{A}$ . A corrente induzida segue mesma direção que nossos dedos apontam ao se encurvarem, se a  $fem$  for maior que zero, e na direção oposta se a  $fem < 0$ ”.

### 3.3.3 Indutância

A indutância na bobina pode ser determinada utilizando a seguinte equação matemática que relaciona o fluxo magnético e o número de espira com a corrente elétrica em cada bobina.

$$L = -\frac{N\Phi_B}{i} \quad (3.16)$$

Onde,  $\Phi_B$  é o fluxo magnético que relaciona o campo magnético com a área da bobina,

$$\Phi_B = \oint \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (3.17)$$

E a densidade de campo magnético  $\vec{B}$  é dada por  $B = \mu n l$ , onde  $n = \frac{N}{l}$  é o número de espiras por unidade de comprimento. Dessa forma, o fluxo magnético através

de cada espira, onde o fluxo é perpendicular à área de seção transversal da bobina, é dada pela equação 3.18,

$$\Phi_B = BA = \mu \frac{NA}{l} i \quad (3.18)$$

Substituindo a equação 3.18 na equação 3.16, determinamos a indutância em cada bobina do circuito, temos a seguinte representação matemática para a indutância mostrada na equação 3.19,

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l} \quad (3.19)$$

Isso mostra que a indutância  $L$  depende da geometria e é proporcional ao quadrado do número de espiras. Com  $N = nl$ , podemos representar da seguinte equação matemática na equação 3.20,

$$L = \mu \frac{(nl)^2}{l} A = \mu n^2 Al \quad (3.20)$$

Onde,  $L$ : indutância em cada bobina;  $\mu$ : permeabilidade do material;  $l$ : espessura do enrolamento;  $n$ : número de espira por unidade de comprimento e  $A$ : área de seção reta da bobina.

No Sistema Internacional de unidades, a unidade de medida de indutância é henry que utiliza o símbolo H para definir sua medida. Esse fenômeno corresponde à indutância de um circuito fechado com uma força eletromotriz de 1 volt, quando a corrente elétrica varia à taxa de um ampere por segundo,  $1H = \frac{1V1s}{A}$ . Este nome é em homenagem ao físico americano Joseph Henry que descobriu o fenômeno da auto-indução eletromagnética.

### 3.4 Corrente elétrica

A corrente elétrica é definida como qualquer movimento de cargas de uma região no interior de um condutor para outra região dentro desse mesmo condutor. Por definição, em eletrostática, no interior de qualquer material condutor o campo elétrico é igual a zero em todos os pontos. Contudo, não significa que as cargas no interior estejam totalmente em repouso.

Existe basicamente dois tipos de corrente elétrica, à alternada e a contínua, ambos podem ser induzidas em circuito fechado.

A corrente elétrica alternada é uma corrente que periodicamente inverte a direção do fluxo de cargas. A corrente alternada é a forma pela qual a energia elétrica é fornecida a empresas e residências, e é a forma de energia elétrica que os consumidores usam quando conectam algum tipo de aparelho elétrico a uma tomada.

A corrente elétrica contínua é o fluxo unidirecional da carga elétrica, ou seja, a sentido do fluxo de cargas não inverte periodicamente. Uma bateria de automóvel é um bom exemplo de uma fonte de alimentação de corrente contínua. Esse tipo de corrente pode fluir em um condutor, como um fio, mas também pode fluir através de semicondutores, isoladores ou até mesmo através de um vácuo, como em feixes de elétrons ou de íons.

Define-se, portanto, corrente elétrica como o fluxo de cargas por unidade de tempo que flui sobre uma seção reta de área. Assim quando uma carga  $dQ$  flui sobre uma área em certo intervalo de tempo  $dt$ , ou seja, a corrente  $I$  através da área é expressa pela equação 3.21,

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (3.21)$$

Neste sentido podemos calcular por integração as cargas que passam por um plano de seção transversal reta em um intervalo de tempo que vai de 0 à  $t$ , como mostrado na equação 3.22

$$\int_0^Q dQ = \int_0^t I dt. \quad (3.22)$$

Nessa situação a intensidade da corrente elétrica  $I$  varia em um intervalo de tempo. No SI a unidades de medida para corrente elétrica é coulomb por segundo  $\left(\frac{C}{s}\right)$ , podendo ser representado por Ampère ( $A$ ).

Podemos expressar a corrente elétrica com base na velocidade de arraste das cargas que se movimentam nos condutores. Em um intervalo de tempo  $dt$  cada partícula carregada se desloca uma distância  $v_a dt$  e o número de partículas em seu interior é  $nAv_a dt$ . Se cada partícula possui carga  $dQ$  que flui em uma superfície cilíndrica durante o intervalo de tempo  $dt$  é dada pela equação 3.23,

$$dQ = q(nAv_a dt) = nqv_a A dt \quad (3.23)$$

Substituindo a equação 3.23 na equação 3.22, obtemos a corrente elétrica em função da velocidade de arraste, da área e da carga mostrada na equação 3.24,

$$I = nqv_a A \quad (3.24)$$

A densidade de corrente  $\vec{J}$  é uma grandeza vetorial e é definida como a corrente que flui por unidade de área da seção transversal reta,

$$J = \frac{I}{A} = nqv_a \quad (3.25)$$

Através da relação mostrada na equação 3.25, também podemos encontrar a corrente elétrica relacionando a densidade de corrente com a área de seção transversal do condutor, mostrada na equação 3.26,

$$I = JA \quad (3.26)$$

### 3.5 Tensão Elétrica

Da mesma forma que um conjunto de correntes elétricas em movimento gera um campo magnético induzido, um campo magnético variável também gera um conjunto de tensões em um circuito. Essa definição foi proposta e comprovada pelas equações de Maxwell, que comprova uma estabelece uma relação fundamental entre eletricidade e magnetismo.

Define-se tensão elétrica como a diferença de potencial entre dois pontos A e B ou ainda como a diferença em energia potencial elétrica distribuída por unidade de carga entre os pontos supracitados. Esta diferença de potencial será igual ao trabalho realizado por unidade de carga contra um campo elétrico para movimentar uma partícula carregada qualquer entre dois pontos arbitrários. A diferença de potencial pode ser representada tanto por uma fonte de força eletromotriz, ou ainda pode representar as perdas ou armazenamento de energia potencial. Há basicamente três formas de gerar tensão elétrica, pode ser causada por campos elétricos estáticos, por uma corrente elétrica gerada por um campo magnético, por campo magnético que varia com o tempo ou ainda por uma combinação das três situações.

Analogamente, pode-se comparar a tensão elétrica com a força responsável por movimentar os elétrons nos condutores. O potencial elétrico é responsável por medir a intensidade da força que atua sobre uma partícula carregada submetida a um campo elétrico, e é expressa em sua forma matemática pela lei de Coulomb. Dessa forma, a tensão elétrica é definida como a tendência que uma partícula carregada possui para ir de um ponto A até um ponto B. Teoricamente, é comum tomar-se um ponto como referência considerando a tensão neste local igual a zero e medindo-se a diferença de potencial até outros pontos arbitrários.

Portanto, a tensão elétrica ou diferença de potencial entre um ponto "A" e um ponto "B" é expressa matematicamente pela integral do produto escalar entre o vetor campo elétrico  $\vec{E}$  e o elemento infinitesimal  $d\vec{l}$ , mostrado na equação 3.27,

$$V_a - V_b = - \int_b^a \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int_b^a E dl \cos(\phi) \quad (3.27)$$

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade derivada para tensão é

denominada volt. Em unidades do SI, o trabalho por unidade de carga é expresso em joules por coulomb, onde 1 volt = 1joule por 1 coulomb. A definição oficial do SI para volt usa energia e corrente, onde 1 volt = 1 watt por 1 ampere. Esta definição é equivalente e mais comumente usados joules por coulomb. A tensão ou diferença de potencial elétrico é denotada simbolicamente por  $\Delta V$  ou  $\Delta U$ , mais comumente como  $V$  ou  $U$ , por exemplo no contexto das leis do Circuito de Ohm ou Kirchhoff.

### 3.6 Potência Elétrica

Defini-se potência elétrica como uma grandeza física usada para medir a quantidade de trabalho necessário a ser realizado em determinado intervalo de tempo, ou seja, é a quantidade de energia que varia por unidade de tempo. Pode-se medir a potência instantânea é definida como a quantidade de energia gasta em um intervalo de tempo infinitesimal, onde a mesma é expressa em sua forma matemática mostrada na equação 3.28,

$$P(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{dE}{dt} \quad (3.28)$$

Podemos calcular a potência média a partir da integração temporal da potência instantânea. Como  $dE = P(t)dt$ , então a energia gasta entre os instantes  $t_1$  e  $t_2$  será expressa na equação 3.29,

$$E = \int_{t_2}^{t_1} P(t)dt \quad (3.29)$$

Portanto a potência média será do circuito pode ser calculada matematicamente usando a equação 3.30,

$$P_{med} = \frac{E}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} P(t)dt = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} U(t) \cdot I(t)dt \quad (3.30)$$

A potência elétrica é uma grandeza física e, como tal, pode ser medida. A unidade de medida da potência elétrica no sistema internacional é o watt (W). Um watt (1W) corresponde à potência desenvolvida no tempo de 1 segundo em uma carga, alimentada por uma tensão de 1 Volt, na qual circula uma corrente de 1 Ampère.

### 3.7 Circuitos elétricos trifásicos

Atualmente, quase toda a geração de energia elétrica e a maioria da transmissão de energia elétrica no mundo ocorrem na forma de circuitos de corrente alternada trifásica. Um sistema de corrente alternada trifásica é constituído por geradores trifásicos, linhas de

transmissão e cargas elétricas. Esses sistemas de corrente alternada possui uma vantagem em relação aos sistemas de corrente contínua, pois as fases podem ser mudadas usando transformadores elétricos, permitindo uma redução nas perdas durante a transmissão (CHAPMAN, 2013).

Os circuitos de corrente alternada trifásicos possuem duas grandes vantagens em relação aos sistemas monofásicos:

1. Utiliza uma menor quantidade de cobre para fornecer a mesma potência que um sistema monofásico;
2. A potência entregue à uma carga resistiva trifásica é sempre constante durante todo o intervalo de tempo, diferente do que ocorre nos sistemas monofásicos, que se comportam em pulsos.

Os sistemas trifásicos também tornam mais fáceis o uso de motores de indução, porque permitem que a partida deles ocorra sem necessidade de enrolamentos auxiliares de partida.

### 3.7.1 Tensão e Corrente Trifásica

Um sistema elétrico trifásico consiste em três circuitos monofásicos, com tensões iguais que diferem entre si em  $120^\circ$  no ângulo de fase. Cada um desses três circuitos podem ser ligados a três cargas idênticas por um par de fios. Esses circuitos monofásicos que compõe o sistema trifásico possuem ângulos de fases de  $120^\circ$  entre si.

Nos geradores trifásicos de corrente alternada, existe basicamente dois tipos de ligação entre as bobinas que compõe o circuito interno do equipamento, as ligações em estrela, tem essa nomenclatura devido a semelhança que tem com a letra Y e as ligações em triângulo ou delta, por sua vez, se parece com a letra grega delta. A ligação em triângulo é possível porque é nula a soma das três tensões  $V_A + V_B + V_C = 0$ . Desse modo, não haverá correntes de curto-circuito circulando quando as três fontes forem ligadas.

As tensões e correntes de uma dada fase são denominadas grandezas de fase e as tensões entre as linhas e as correntes das linhas conectadas aos geradores são denominadas grandezas de linha. As relações entre as grandezas de linha e as de fase para um dado gerador dependem do tipo de conexão usado naquele gerador. Essas relações serão exploradas nas próximas duas subseções para cada uma das ligações em estrela e triângulo.

### 3.7.2 Ligações estrela

Um gerador trifásico ligado com a configuração estrela, com uma sequência de fases abc, terão suas tensões elétricas de fase dadas pelas equações 3.31, 3.32, 3.33. Essas

tensões de fases geradas por esse equipamento são representadas matematicamente por:

$$V_{an} = V_\phi < 0^\circ \quad (3.31)$$

$$V_{bn} = V_\phi < -120^\circ \quad (3.32)$$

$$V_{cn} = V_\phi < -240^\circ \quad (3.33)$$

Assumindo que a carga conectada a esse gerador é resistiva, a corrente em cada fase do gerador estará no mesmo ângulo que a tensão, ou seja, há um ângulo de  $120^\circ$  em relação a outra. Portanto, a corrente elétrica em cada fase será dada pelas equações 3.34, 3.35 e 3.36:

$$I_a = I_\phi < 0^\circ \quad (3.34)$$

$$I_b = I_\phi < -120^\circ \quad (3.35)$$

$$I_c = I_\phi < -240^\circ \quad (3.36)$$

Desse modo, é óbvio que a corrente em qualquer linha é a mesma que a corrente na respectiva fase. Portanto, para uma ligação estrela, temos que a corrente de linha é igual a corrente de fase, e é representada matematicamente na equação 3.37:

$$I_L = I_\phi \quad (3.37)$$

A relação entre as tensões de linha e as tensões de fase é mais complexa. Porém, pela lei de Kirchhoff, podemos definir uma relação entre a tensão linha a linha  $V_{ab}$ , ou seja, a tensão de linha a linha é a diferença entre a tensão  $V_a$  e a tensão  $V_b$ , são mostradas nas equações 3.38, 3.39, 3.40, 3.41 e 3.42:

$$V_{ab} = V_a - V_b \quad (3.38)$$

$$V_{ab} = V_\phi < 0^\circ - V_\phi < -120^\circ \quad (3.39)$$

$$V_{ab} = V_\phi - \left( -\frac{1}{2}V_\phi - J \left( -\frac{\sqrt{3}}{2}V_\phi \right) \right) = \frac{3}{2}V_\phi + J\frac{\sqrt{3}}{2}V_\phi \quad (3.40)$$

$$V_{ab} = \sqrt{3}V_{\phi} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right) \quad (3.41)$$

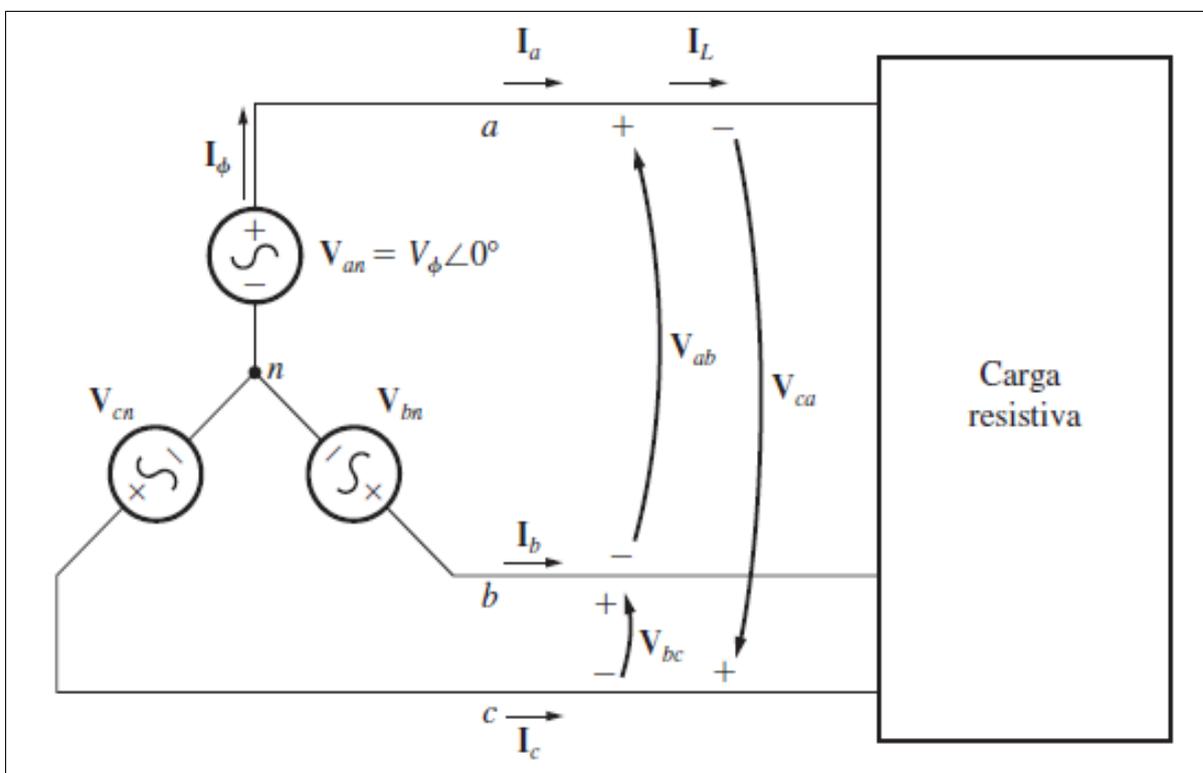
$$V_{ab} = \sqrt{3}V_{\phi} \angle 30^{\circ} \quad (3.42)$$

De forma que a relação entre as tensões de linha a linha ( $V_L$ ), que são as tensões medidas entre duas fases, e das tensões de fase ( $V_{\phi}$ ), que são as tensões medidas entre uma fase e o neutro, em um circuito elétrico ligados em estrela é equivalente ao mostrado na equação 3.43:

$$V_L = \sqrt{3}V_{\phi} \quad (3.43)$$

Além disso, há uma defasagem de  $30^{\circ}$  entre as tensões de linha ( $V_L$ ) e as tensões de fase. A Figura 6 abaixo mostra um esquema de um circuito ligado com a configuração estrela. Onde,  $V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$  são as tensões de fases ( $V_{\phi}$ );  $V_{ab}, V_{ca}, V_{bc}$  são as tensões de linha ( $V_L$ ); ( $I_{\phi}$ ) é a corrente de fase e; ( $I_a$ ), ( $I_b$ ), ( $I_c$ ) são as correntes de linha ( $I_L$ );  $a, b, c$  são as três fases e  $n$  é o neutro do circuito.

Figura 6 – Esquema de um circuito trifásico de corrente alternada ligado estrela.



Fonte: Chapman (2013) p. 618.

Observa-se que, nos circuitos ligados na configuração estrela com uma sequência de fases abc, a tensão elétrica em uma saída está defasada em relação à respectiva tensão de fase, com um adiantamento de  $30^\circ$ . Nas configurações estrela com uma sequência de fases acb, a tensão elétrica em outra saída está atrasada em relação à respectiva tensão de fase com uma defasagem também de  $30^\circ$ .

Ainda que, para a configuração estrela, assumiu-se que o fator de potência elétrica era unitário quando deduziu as relações que a tensão elétrica possuía com as correntes de linha e de fase do circuito, estas relações são, na verdade, válidas para qualquer fator de potência. A suposição de que as cargas possuíam fator unitário de potência facilitou a matemática envolvida para obter as medidas desses circuitos.

### 3.7.3 Ligações triângulo

Um circuito elétrico trifásico ligado com a configuração triângulo e conectado a uma fonte de carga resistiva terá suas tensões de fase representadas pelas equações a baixo. As tensões de fase desse circuito são expressas matematicamente pelas equações 3.44, 3.45 e 3.46:

$$V_{an} = V_\phi < 0^\circ \quad (3.44)$$

$$V_{bn} = V_\phi < -120^\circ \quad (3.45)$$

$$V_{cn} = V_\phi < -240^\circ \quad (3.46)$$

Como a carga que está conectada no circuito é resistiva, as saídas correntes de fase desse circuito seguem o mesmo raciocínio das tensões e são expressas em suas equações matemáticas 3.47, 3.48 e 3.49:

$$I_a = I_\phi < 0^\circ \quad (3.47)$$

$$I_b = I_\phi < -120^\circ \quad (3.48)$$

$$I_c = I_\phi < -240^\circ \quad (3.49)$$

No caso da configuração triângulo, a tensão elétrica de linha a linha ( $V_L$ ) entre qualquer das duas linhas será mesma que a tensão de fase ( $V_\phi$ ), pois nesta configuração só existe tensão de linha a linha. Desse modo em um circuito ligado com a configuração

triângulo temos a tensão de linha à linha igual a tensão elétrica de fase como mostra a equação 3.50 a seguir,

$$V_L = V_\phi \quad (3.50)$$

As relações existentes entre a corrente de linha e a corrente de fase é um pouco mais complexa. Podemos encontrar essa relação usando a lei de Kirchhoff em um nó da configuração triângulo. Por exemplo aplicando essa lei ao nó e fazendo as operações matemática necessárias, obtemos a equação para a corrente elétrica de linha,

$$I_a = I_{ab} - I_{ac} \quad (3.51)$$

$$I_a = I_\phi < 0^\circ - I_\phi < -240^\circ \quad (3.52)$$

$$I_a = I_\phi - \left( -\frac{1}{2}I_\phi - J \left( -\frac{\sqrt{3}}{2}I_\phi \right) \right) = \frac{3}{2}I_\phi + J\frac{\sqrt{3}}{2}I_\phi \quad (3.53)$$

$$I_a = \sqrt{3}I_\phi \left( \frac{\sqrt{3}}{2} - J\frac{1}{2} \right) \quad (3.54)$$

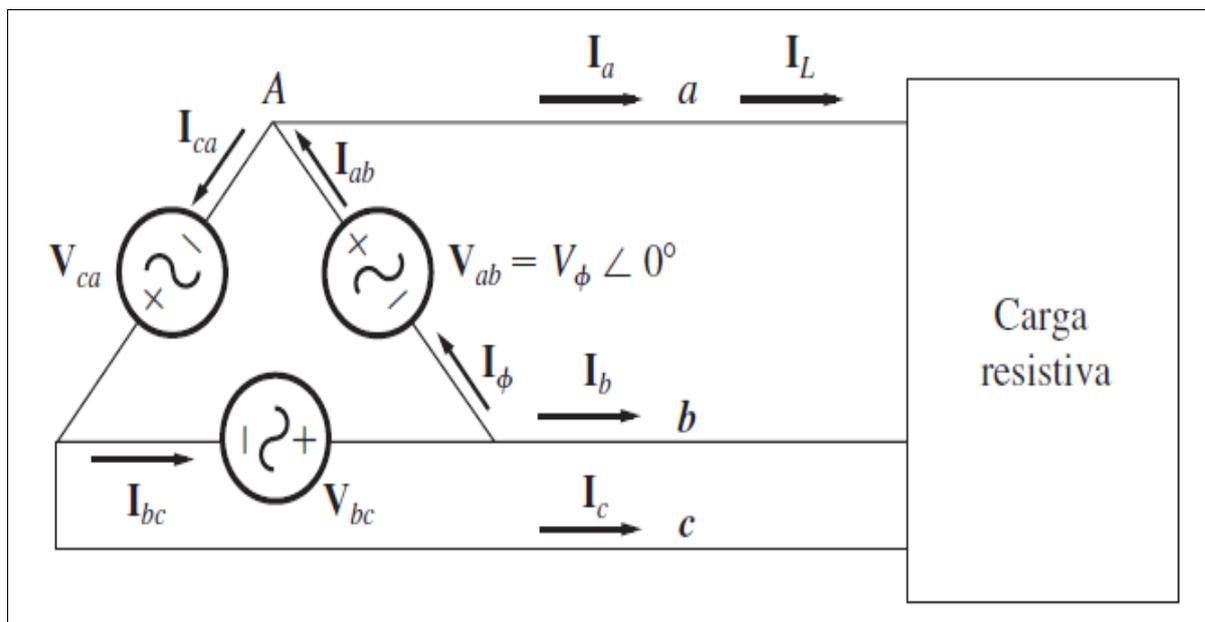
$$I_a = \sqrt{3}I_\phi < 30^\circ \quad (3.55)$$

De forma que, a relação entre as correntes de linha e correntes de fases, em um circuito ligado em triângulo, é representado pela expressão matemática mostrada na figura 3.56 a seguir.

$$I_L = \sqrt{3}I_\phi \quad (3.56)$$

Abaixo a figura 7 mostra um diagrama representando um circuito elétrico ligado com a configuração triângulo e uma carga resistiva. Onde,  $V_{ab}$ ,  $V_{ca}$ ,  $V_{bc}$  são as tensões de linha ( $V_L$ );  $(I_\phi)$  é a corrente de fase e;  $(I_a)$ ,  $(I_b)$ ,  $(I_c)$  são as correntes de linha ( $I_L$ );  $(I_{ab})$ ,  $(I_{bc})$ ,  $(I_{ca})$  são as correntes de linha ( $I_\phi$ );  $a$ ,  $b$ ,  $c$  são as três fases do circuito.

Figura 7 – Esquema de um circuito ligado com a configuração triângulo.



Fonte: Chapman (2013) p. 620.

E a defasagem entre as correntes de linha e as respectivas correntes de fase é  $30^\circ$ . Nas ligações em triângulo com uma sequência de fases abc a corrente em uma linha está atrasada em relação à respectiva corrente de fase de  $30^\circ$ . Nas ligações em triângulo cuja sequência de fases é acb, a corrente de uma linha está adiantada em relação à respectiva corrente de fase em  $30^\circ$ .

A tabela 1 a seguir resume as relações de tensão e corrente para circuitos elétricos ligados com a configuração estrela e configuração triângulo. Para a configuração estrela a tensão elétrica de linha é maior que a tensão elétrica de linha da configuração triângulo. Porém, quando se trata da corrente elétrica, a configuração triângulo é mais eficiente nesse aspecto, ou seja, a corrente elétrica de fase é maior na configuração triângulo do que na configuração estrela.

Tabela 1 – Resumo de relações matemáticas para ligações estrela e triângulo.

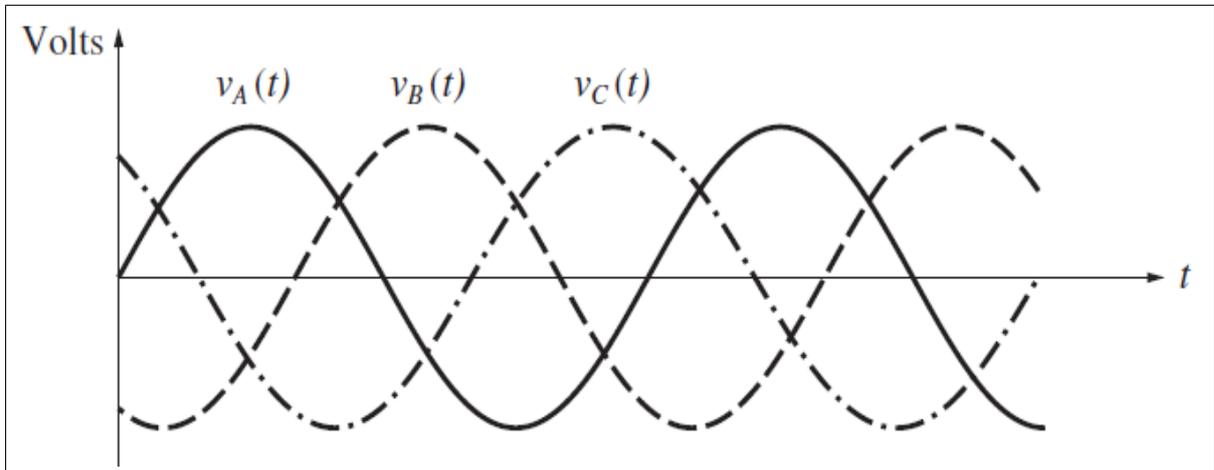
Grandezas	Ligação estrela	Ligação triângulo
Tensão	$V_{LL} = \sqrt{3}V_\phi$	$V_{LL} = V_\phi$
Corrente	$I_L = I_\phi$	$I_L = \sqrt{3}I_\phi$
fases abc	$V_{ab}$ adiantada em $30^\circ$	$I_a$ atrasada em $30^\circ$
fases acb	$V_{ab}$ atrasada em $30^\circ$	$I_a$ adiantada em $30^\circ$

Fonte: Adaptada de Chapman (2013).

A representação gráfica das tensões elétricas gerada em cada fase do circuito trifásico estão mostradas na figura 8, cada tensão elétrica está defasada  $120^\circ$  no tempo

respectivamente.  $V_A(t)$ ,  $V_B(t)$ ,  $V_C(t)$  são as três fases deste circuito medidas em volts, que são independentes entre si e  $t$  é o tempo em segundos.

Figura 8 – Tensões de um alternador trifásico ( $3\phi$ ) com defasagem de  $120^\circ$ .



Fonte: Chapman (2013) p. 614.

O tipo de configuração mais utilizados nos geradores trifásicos são as conexões estrela, pois este tipo de ligação pode alimentar facilmente as cargas resistivas monofásicas, pois existe um fio neutro.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Descreve-se neste capítulo a metodologia e o processo de construção e dimensionamento das partes mecânicas e os procedimentos de caracterização e teste de cada uma das partes deste alternador horizontal de fluxo axial.

A metodologia aplicada neste projeto é baseada na técnica Do It Yourself – DIY, que é um método de construção, modificação ou reparação dos objetos sem a ajuda direta de especialistas ou profissionais (ROCHA, 2015). Pesquisas descrevem o DIY como comportamento onde os indivíduos utilizam matérias primas cruas para produzir, transformar ou reconstruir bens materiais (WOLF; MCQUITTY, 2011).

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 (SOUZA JUNIOR; BESSA, 2018). O conceito também é importante para a preservação ambiental, pois muitos dos materiais que antes teriam como destino o lixo, passam a ser utilizados (TRIERVEILER; GOMES, 2018).

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 (WOLF; MCQUITTY, 2011).

Ao desenvolver este estudo, foi formulada uma pergunta sobre a possibilidade da utilização dos alternadores elétricos na geração de energia eólica. Na literatura científica consultada foram encontrados alguns trabalhos científicos relacionados à geração de energia eólica, porém poucos estão relacionados a construção de um equipamento de baixo custo e que operasse em baixas rotações.

A construção está dividida em três partes, a primeira é a construção do estator, a segunda é a construção do rotor e finalmente a montagem do aerogerador.

Os materiais utilizados neste projeto são encontrados com facilidade à venda e são descritos a seguir:

- 01 disco de acrílico de 0,22 m de diâmetro e 0,005 m de espessura;
- 01 disco de aço de 0,17 m de diâmetro e 0,008 m de espessura;
- 01 eixo de aço de 0,008 m de diâmetro e 0,0115 m de comprimento;
- 01 mancal de 0,061 m de diâmetro e 0,09 m de comprimento;
- 12 parafusos de 0,015 m de comprimento e 0,005 de espessura

- 08 ímãs de Neodímio, Ferro Boro(NdFeB);
- 01 fio azul de 0,25 m de comprimento;
- 01 fio amarelo de 0,25 m de comprimento;
- 01 fio roxo de 0,25 m de comprimento;
- 06 bobinas com 400 espiras;
- 18 abraçadeiras de Plástico;
- 01 rolamento de bicicleta;
- Fios de cobre AWG 26;

## 4.1 Estator

O estator é a parte fixa do alternador que é formado pelo disco de acrílico e as seis bobinas. O disco de acrílico tem um diâmetro de 0,22 m e as bobinas estão espaçadas no disco a uma distância de aproximadamente 0,02 m uma da outra e a uma distância de 0,063 m do centro do disco, onde ficarão fixadas (ver figuras 9 e 10).

As especificações técnicas do fio de cobre e das bobinas estão detalhadas na tabela 2. A escolha de um estator com apenas seis bobinas, deu-se pela facilidade de montagem e de fabricação de suas partes mecânicas. Para montar o circuito interno das bobinas seja na configuração de triângulo ou estrela com a mesma simetria é necessário utilizar quantidades de bobinas que sejam divisíveis por três, ou seja, poderia utilizar três, seis, nove,..., ou n bobinas, com n sendo um número divisível por Três.

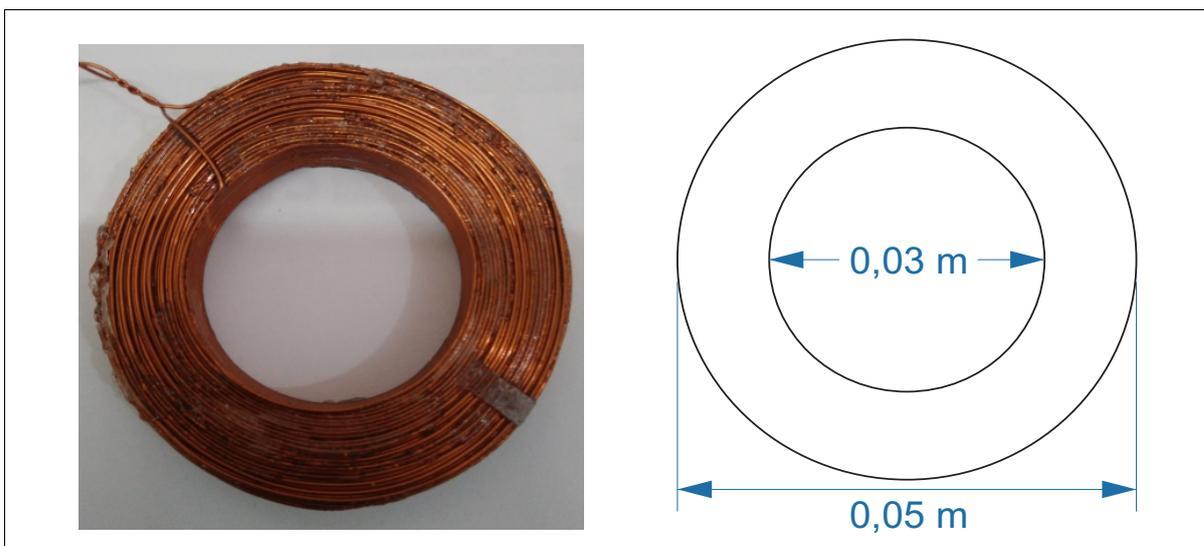
Tabela 2 – Especificações do fio de cobre AWG 26 e das bobinas.

Grandezas	Fios de cobre	Bobinas
Diâmetro (D)	0,4049 mm	50 mm
Espessura (l)	–	10 mm
Seção transversal (A)	0,13 mm <sup>2</sup>	1963,5 mm <sup>2</sup>
Resistência elétrica (R)	130,7 Ω/km	–
Capacidade de corrente (I)	0,37A	–
Espiras (N)	22,8/cm	400
Indutância <i>L</i>	–	204 mH

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 9 mostra-se o diagrama e a construção final de uma bobina. Esta bobina possui 400 espiras, de forma análoga foram fabricadas as outras cinco bobinas que foram fixadas no estator.

Figura 9 – Diagrama das bobinas com suas dimensões.

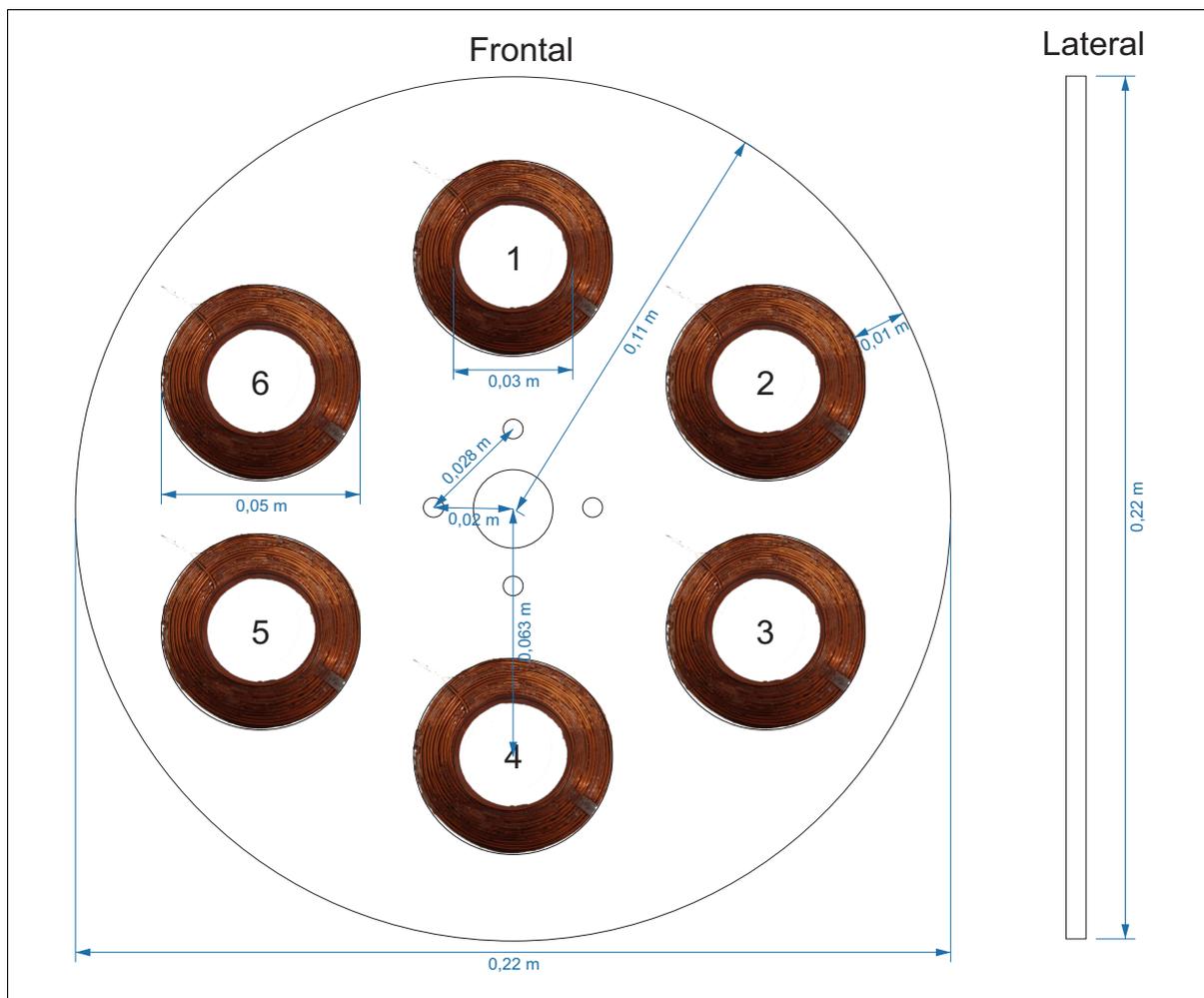


Fonte: Elaborado pelo autor.

A resistência elétrica de cada bobina foi medida usando um multímetro Icel MD-6111 e conseguiu-se um valor de 27,9 ohms( $\Omega$ ). O cálculo da indutância foi realizado usando a equação 3.19 e obtivemos um valor de aproximadamente 204  $mH$ , com esses dados será possível estimar teoricamente quanto de tensão será possível converter em baixas rotações.

O processo de fixar as bobinas no disco de acrílico do estator ocorreu utilizando abraçadeiras de plástico. Após o procedimento de fixar as bobinas começamos dimensionar e executar as conexões do circuito trifásico do estator. A figura 10 ilustra como ficarão distribuídas as bobinas no estator.

Figura 10 – Diagrama ilustrativo do estator com dimensões e as bobinas posicionadas.



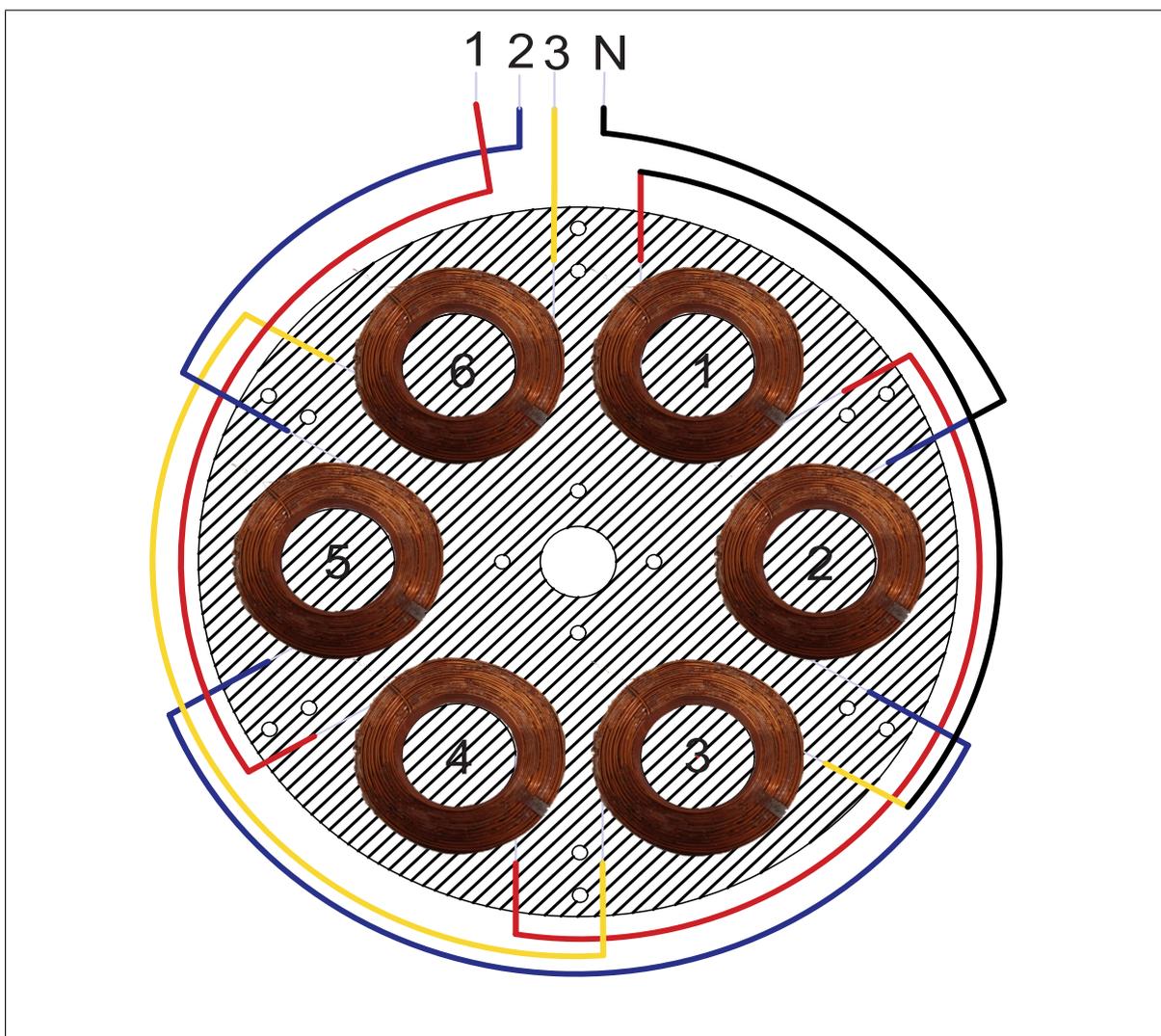
Fonte: Elaborado pelo autor.

As conexões do circuito interno do estator foram feitas com duas configurações, a primeira conexão entre as bobinas foi do tipo estrela e foi realizado todos os testes e medições de tensão, corrente e potência elétrica com essa configuração. Em seguida, mudou-se para a configuração triângulo e realizou os mesmos procedimentos da configuração anterior para colher os dados.

Iniciamos pela configuração estrela, as conexões foram realizadas em sentido horário. Primeiramente começamos ligando o primeiro circuito em serie de duas bobinas, da seguinte forma: o início da bobina 1 foi conectado no final da bobina 4. Para o segundo e terceiro circuito foram realizados os mesmos procedimentos. Após isso, foram realizadas as conexões entre os três circuitos. O final do primeiro circuito foi conectado ao final do segundo e terceiro circuitos, formando assim o ponto estrela da primeira configuração que será utilizada para os testes. Neste local onde foi conectado a saída dos três circuitos será o ponto estrela ou mais conhecido como neutro.

A figura 11 mostra a configuração final do circuito estrela. Nesta configuração o circuito elétrico possui três fases e um neutro.

Figura 11 – Configuração estrela com as seis bobinas. Os fios vermelho, azul e amarelo são as três fases respectivamente e o fio preto é o a saída do neutro.



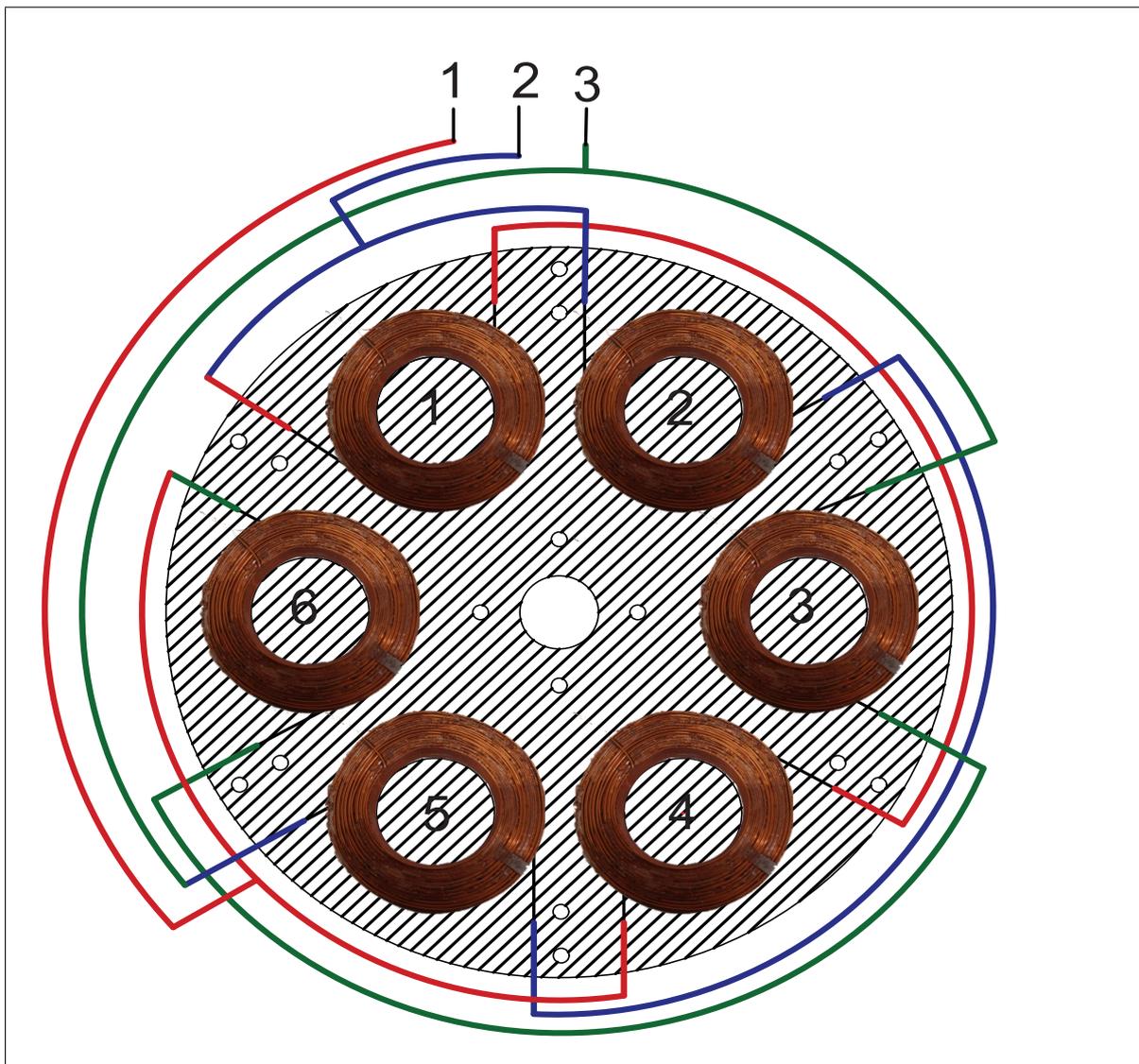
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para fazer a alteração da configuração estrela para a configuração triângulo basta fazer o fechamento do final do primeiro circuito com início do segundo. Neste caso o fechamento será um ponto de fase que será chamada de fase 01, conectar o final do segundo circuito com o início do terceiro, aí será a fase 02 e por último conectar o final do terceiro circuito com o início do primeiro, onde será a fase 03. Assim será feita a configuração triângulo para o circuito.

A figura 12, mostra as conexões triângulo, que serão testadas. Esta configuração possui apenas as fases, sem a presença de uma saída neutra como acontece nos circuitos

estrela. Os procedimentos mostrados serão os mesmos aplicados na realização das conexões do estator para os primeiros testes.

Figura 12 – Configuração triângulo com seis bobinas. A saída vermelha é a fase 1, a saída azul é a fase 2 e a saída verde é a fase 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.2 Rotor

O rotor é a parte girante do alternador que foi construída de uma chapa de aço de 0,08 m de espessura com diâmetro de 0,17 m na qual ficarão fixados os ímãs permanentes de NdFeB. Os ímãs permanentes serão fixados no disco do rotor com as distâncias iguais as das bobinas em relação ao centro do disco que é de aproximadamente 0,0063 m. As distancias entre eles são de 0,05 m.

Para a construção do rotor que será usado nesse projeto, utilizamos oito ímãs permanentes de NdFeB em formato de disco, onde as características se encontram descritas na tabela 3. A quantidade de ímãs permanentes que foram utilizados neste projeto está baseada em estudos teóricos que apresentam a melhor configuração de como fixar os ímãs para aumentar a eficiência do equipamento

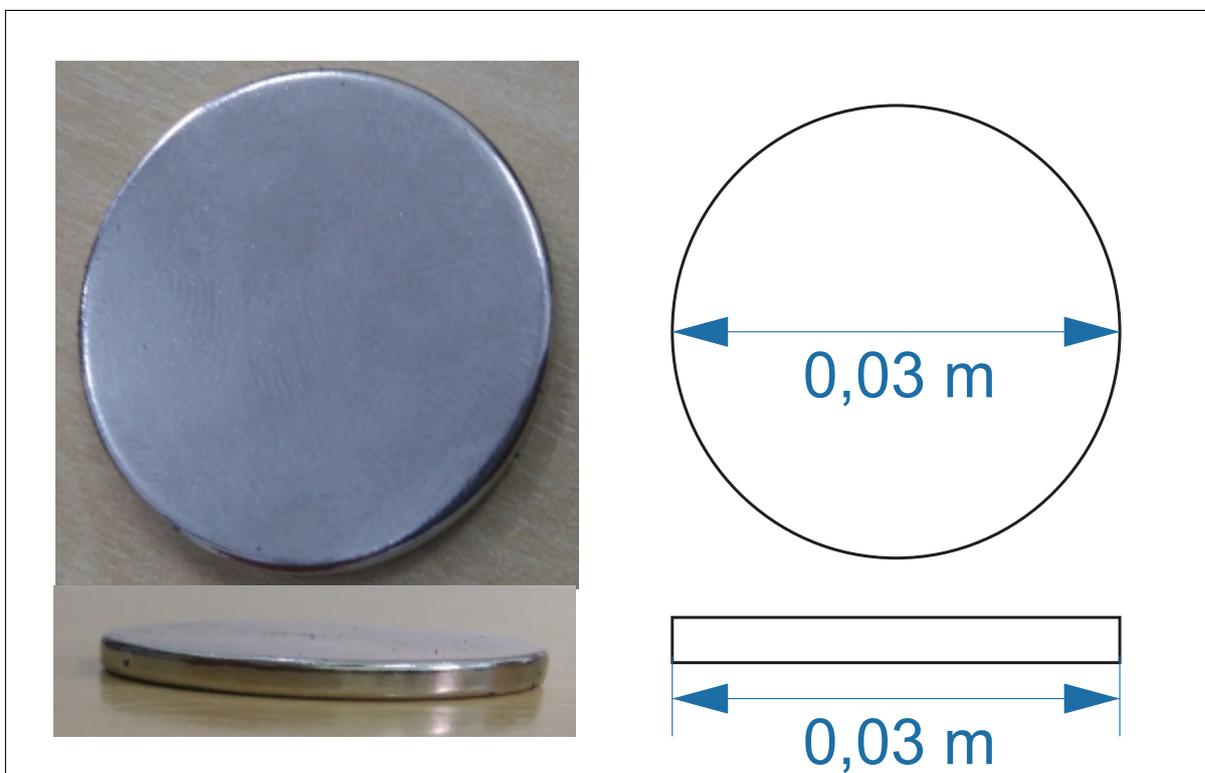
Tabela 3 – Características dos ímãs utilizados Neodímio-ferro-boro (NdFeB) no rotor.

	ímãs permanentes de NdFeB	
Diâmetro ( $D$ )	30 mm	0,03 m
Raio ( $R$ )	15 mm	0,0015 m
Espessura ( $E$ )	03 mm	0,003 m
Campo magnético ( $B$ )	1345 G	0,1345 T
Força de Torque ( $\tau$ )	6800 g	6,8 kg
Seção transversal ( $A$ )	706,9 mm <sup>2</sup>	0,7069 m <sup>2</sup>

Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 13 mostra em detalhe os dados de um ímã de NdFeB que foi utilizado na construção do rotor

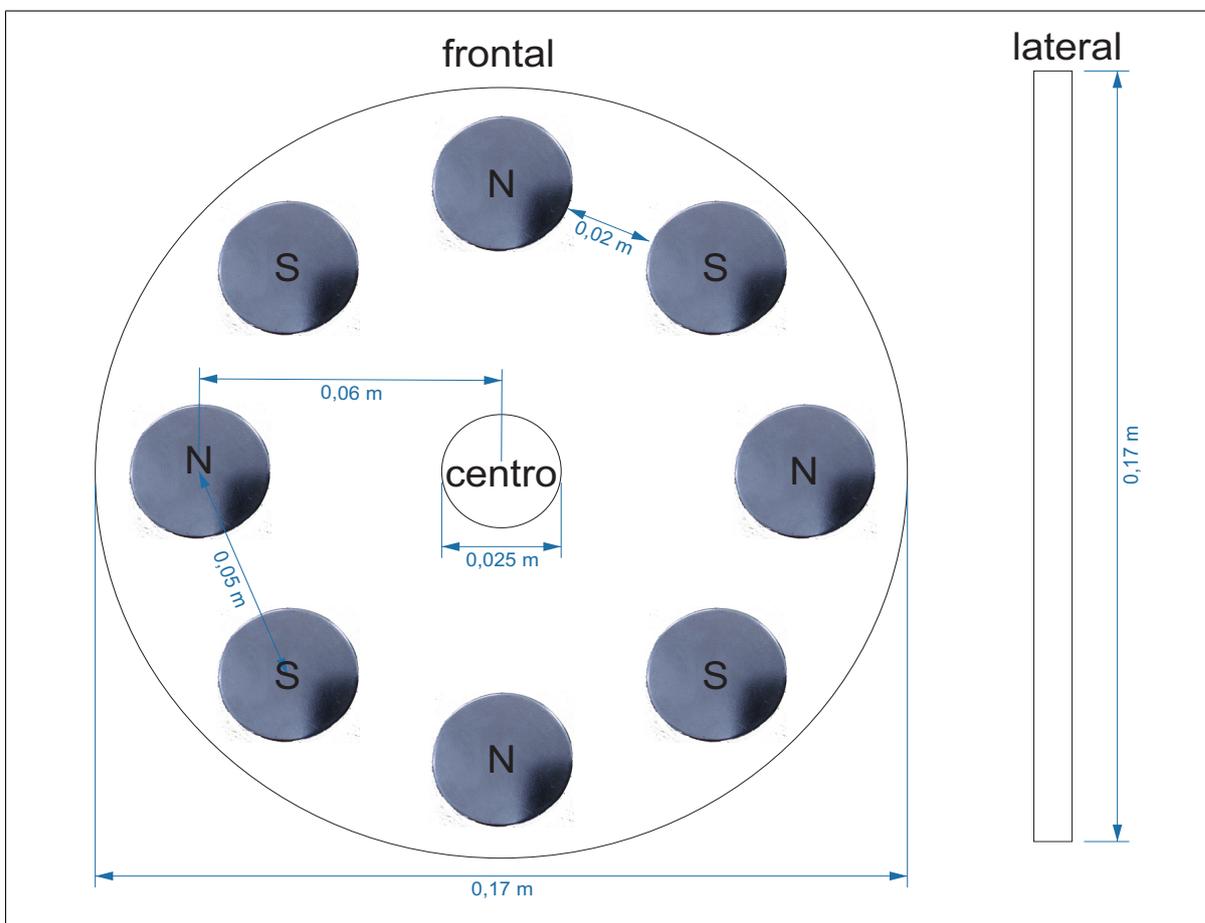
Figura 13 – Imagem mostra os ímãs de NdFeB com as dimensões em metros.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 14 ilustra o rotor e o ímãs permanentes com suas respectivas dimensões. Nesta imagem é mostrado como foi colocado cada ímã no disco, ou seja, eles foram fixados alternando os polos para aumentar a eficiência energética do alternador.

Figura 14 – Diagrama ilustrativo do rotor com os ímãs permanentes posicionados.

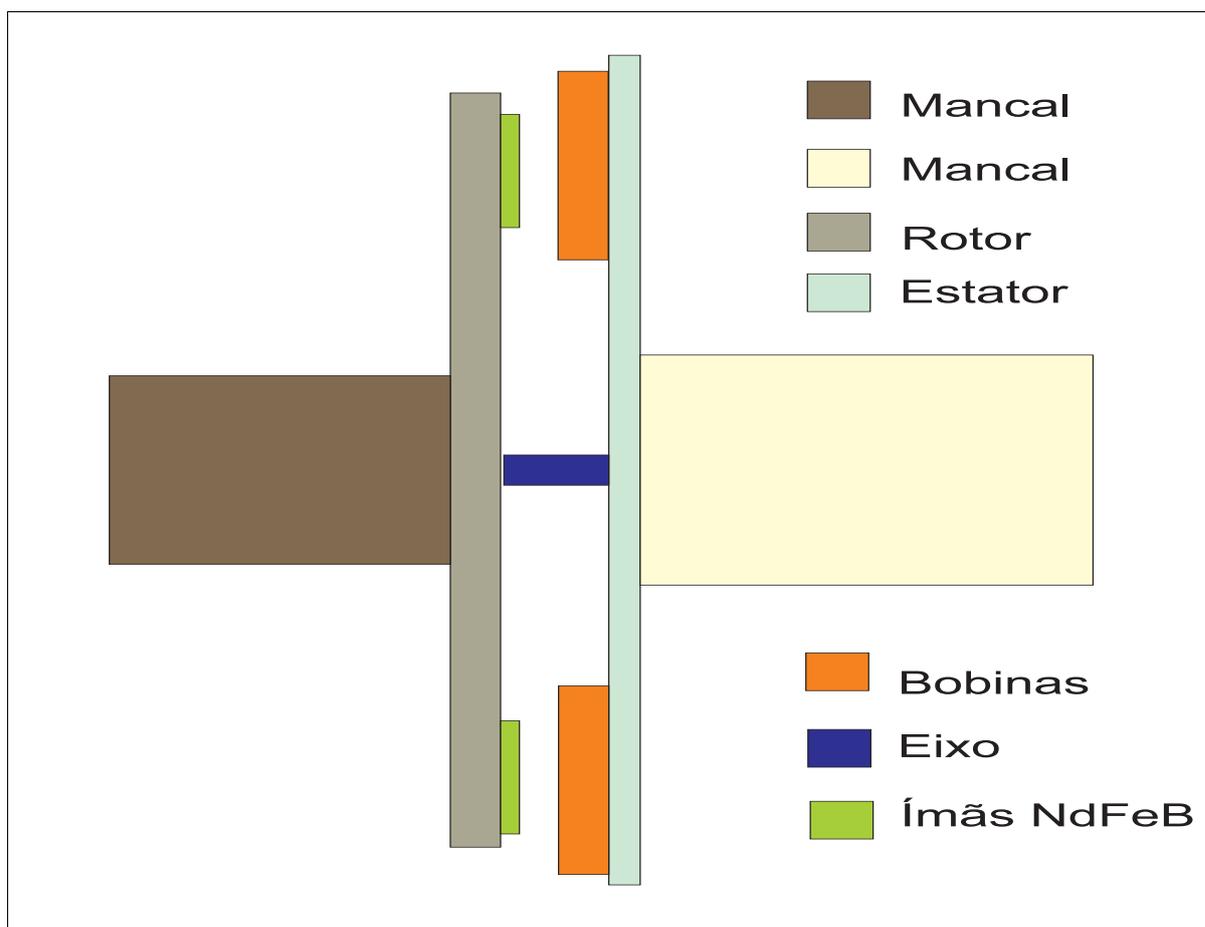


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.3 Diagrama Protótipo

Após finalizar a montagem do rotor, fizemos a montagem do protótipo e medimos uma tensão elétrica usando um multímetro digital, este teste foi realizado usando a configuração do circuito interno das bobinas em estrela. A figura 15, ilustra como ficará o protótipo após a montagem. O resultado foi bastante animador, pois conseguimos um valor para a tensão elétrica bem razoável, considerando o procedimento usado para girar o rotor.

Figura 15 – Diagrama ilustrativo do protótipo montado em cores fantasia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O diagrama mostrado na figura 15 está sem escala, apenas mostrando uma imagem ilustrativa do protótipo com cores fantasia. Após a montagem do protótipo, o mesmo ficará com esta forma estrutural.

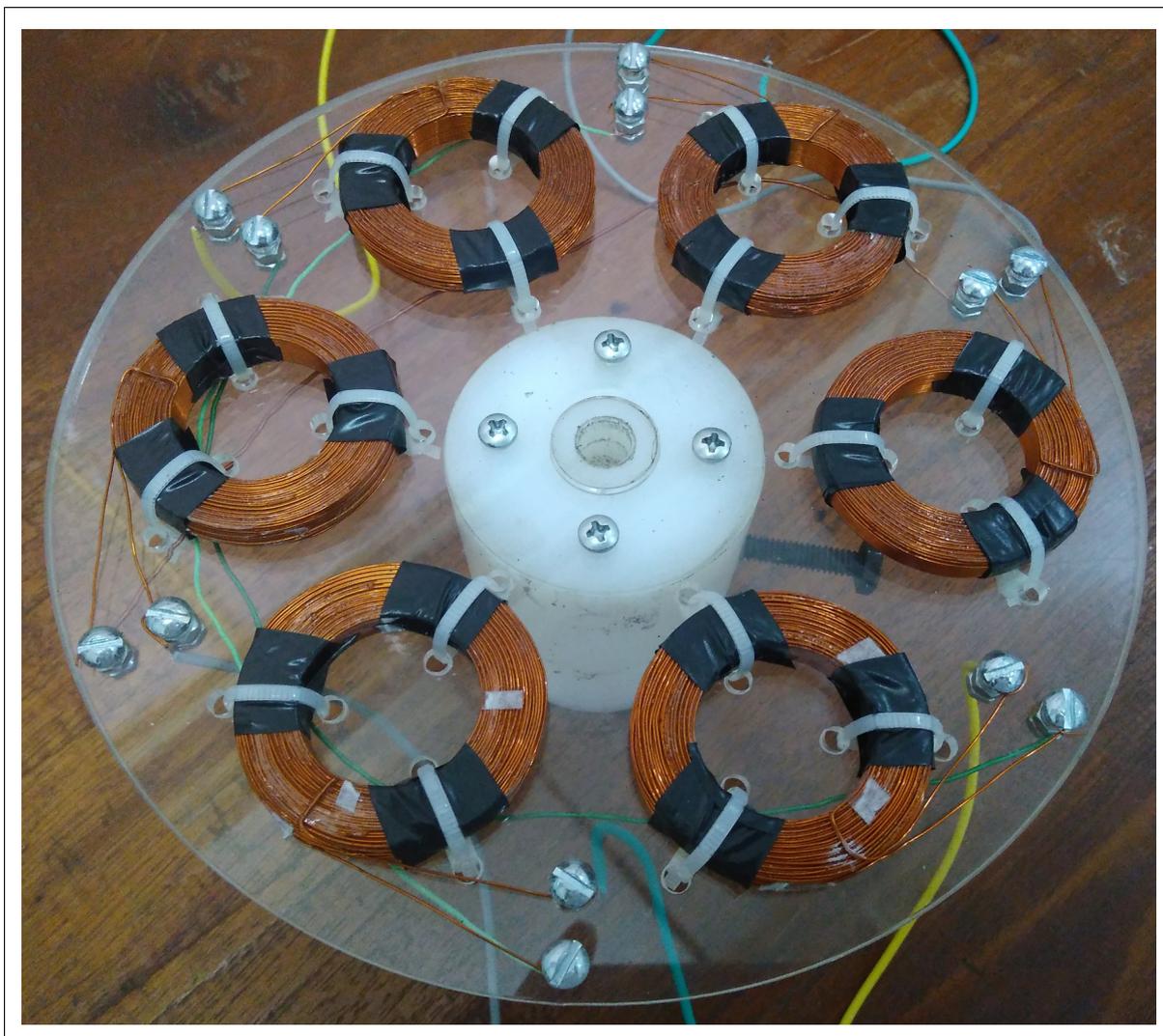
## 5 RESULTADOS E DISCURSÕES

Neste capítulo apresentamos os resultados do trabalho realizados no processo de construção do alternador utilizando as configurações estrela e triângulo respectivamente, no circuito interno. Inicialmente apresenta-se a montagem de cada uma das partes mecânicas do alternador, ou seja, primeiro começamos mostrando o estator montado, em seguida mostramos o rotor montado. E por fim apresentamos o alternador montado, nesta etapa do processo de construção foram realizados os teste.

### 5.1 Estator e Rotor

A figura 16 mostra o estator montado com as seis bobinas fixadas. Após montar o estator e finalizar as conexões do circuito interno medimos a resistência elétrica do mesmo utilizando um multímetro digital Icel MD-6111 e obtemos um valor de aproximadamente 27,9 ohms. Os cálculos da indutância em cada bobina já foram mencionados anteriormente e foram obtidos por meio da equação 3.19 um valor de aproximadamente 204 *mH*.

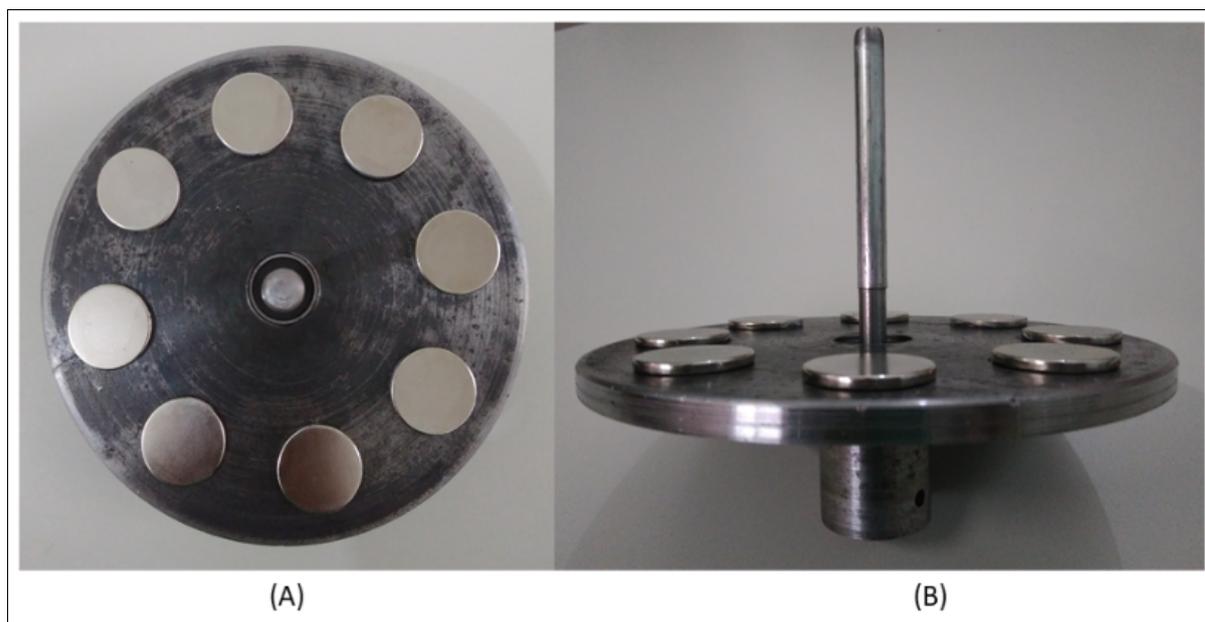
Figura 16 – Estator de acrílico com as bobinas fixadas em sua estrutura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 17 mostra o rotor montado após o processo de construção. As dimensões e as características da chapa de aço que foi usada para construir o rotor foram descritas no capítulo anterior.

Figura 17 – Rotor montado. (A) vista superior e (B) vista lateral.

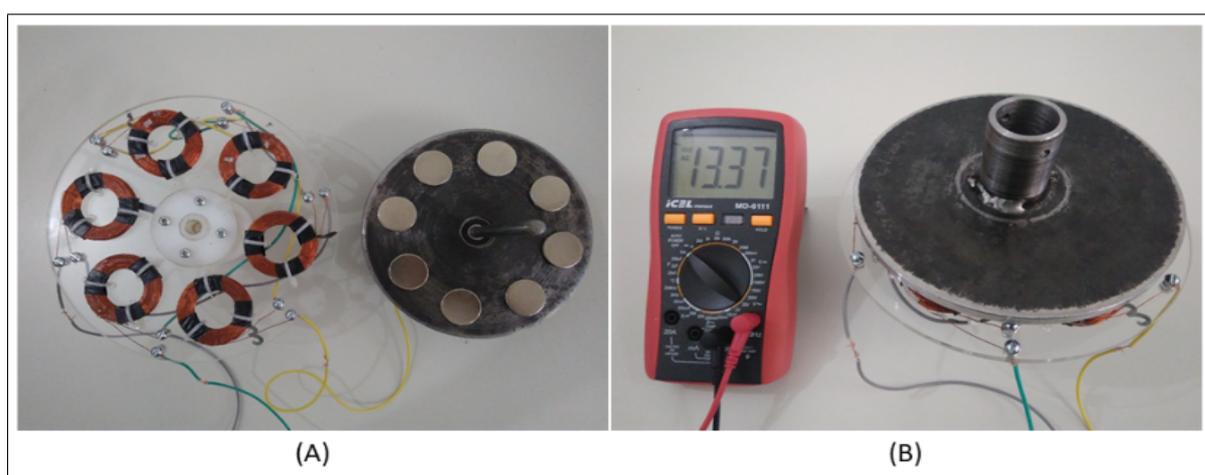


Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5.2 Protótipo montado

A montagem do protótipo foi realizada acoplando o rotor com o estator (ver 18 e 19). Neste protótipo testamos a configuração estrela e triângulo, fazendo medidas de tensão elétrica.

Figura 18 – (A) Estator e rotor separados, (B) Estator e rotor acoplados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O funcionamento do gerador se deu pelo movimento mecânico ou manual do rotor. Após conseguir um movimento razoavelmente constante foram realizadas as medidas de

tensão. Este movimento mecânico foi repetido várias vezes até obter um valor de tensão constante.

O protótipo foi testado usando a configuração estrela medindo um valor de tensão de 13,37 volts.

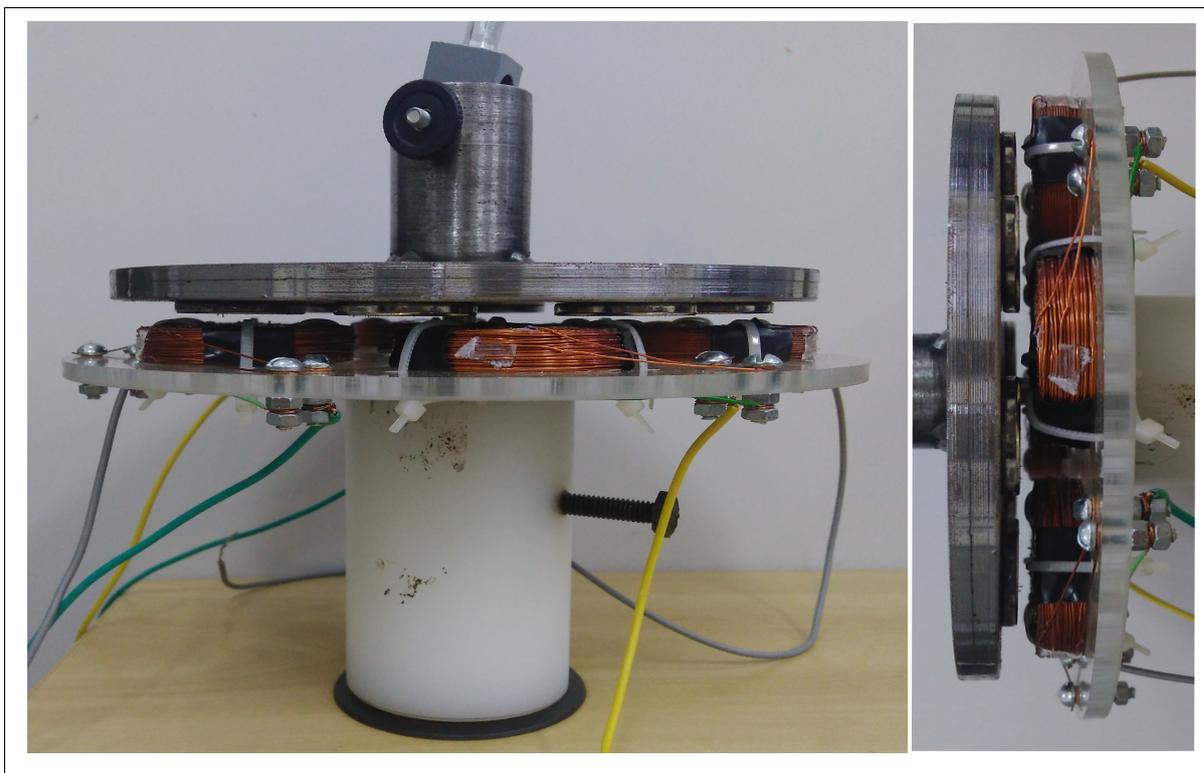
Após realizar os testes na configuração estrela, fizemos uma mudança para a configuração triângulo e realizamos os testes de funcionamento. Com o circuito interno das bobinas ligadas em triângulo medimos um valor para a tensão de aproximadamente 6,18 volts.

O princípio de funcionamento dos motores elétricos nos mostram 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 em um 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. No nosso caso o movimento do gerador foi realizado manualmente. De forma simplificada corrente  $\leftrightarrow$  Torque e torque  $\leftrightarrow$  corrente (HALLIDAY, D; RESNICK, R; WALKER, 2016).

O surgimento da corrente elétrica na bobina é governado pela Lei da Indução de Faraday, considerada uma das descobertas mais importantes da Física, feita pelo inglês Michael Faraday em 1831. A forma matemática da Lei de Faraday foi dada pelo físico alemão Franz Ernst Neumann (SERWAY; JEWETT, 2011).

Após os processos de construção descritos no capítulo anterior e realizada a união de todos os componentes do alternador o resultando no protótipo está mostrado na figura 19. Apesar das dificuldades encontradas no processo de realização deste projeto, a construção ocorreu dentro do esperado.

Figura 19 – Mostra o protótipo finalizado, posição vertical e horizontal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 4 mostra os resultados dos testes realizados com as duas configurações, estrela e triângulo, respectivamente. Esses dados foram obtidos de forma experimental, usando equipamentos de medição disponíveis no Laboratório de Materiais Aplicados em Dispositivos Eletrônicos (LABMADE).

Tabela 4 – Medidas experimentais das grandezas físicas.

Grandezas	Ligação estrela	Ligação triângulo
Tensão ( $V$ )	13,37 $V$	6,18 $V$
Corrente ( $I$ )	0,24 $A$	0,78 $A$
Resistência ( $R$ )	27,9 $\Omega$	9,4 $\Omega$
Potência ( $P$ )	6,41 $W$	4,10 $W$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após os testes realizados para a configuração estrela e triângulo, escolhemos a configuração estrela. Essa configuração no circuito apresentou valores de tensão elétrica mais eficientes frente aos obtidos com a configuração triângulo. Os dados da tabela 4, nos confirma que o alternador ligado na configuração estrela apresentou uma maior eficiência no processo de geração de energia.

Seguidamente com a configuração escolhida fizemos testes de medidas de tensão com o osciloscópio digital Tektronix TDS 1001C-EDU com dois canais. Estes testes visam esclarecer o comportamento de fasorial da tensão elétrica (ver figura 20)

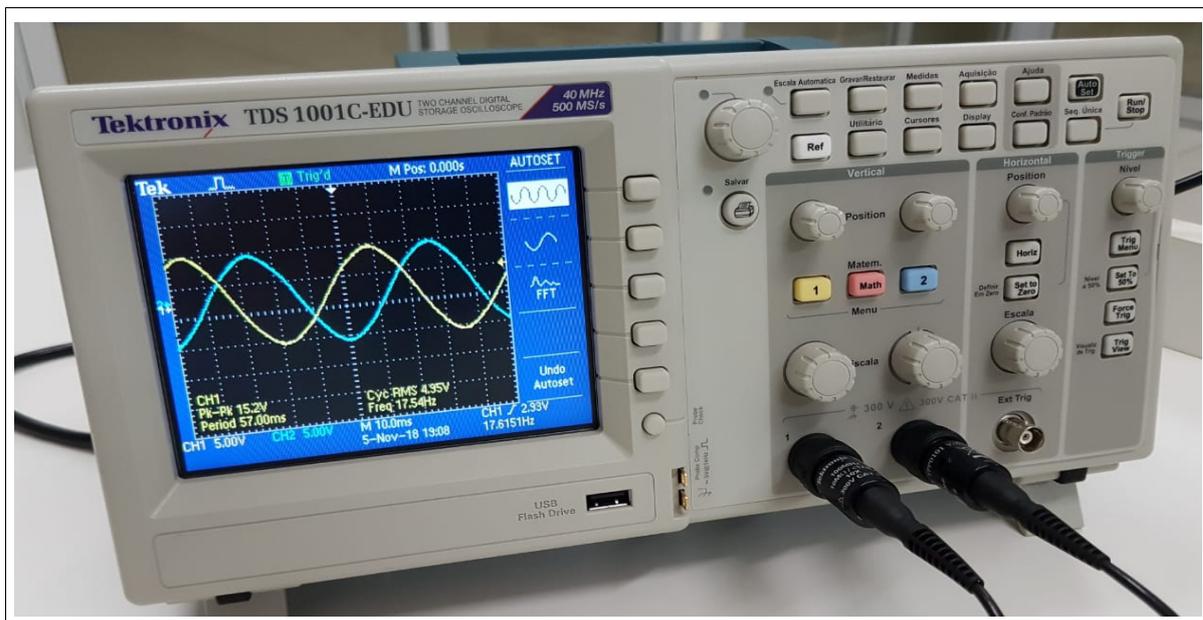
Figura 20 – Mostra o protótipo montado em processo de teste.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 21 mostramos unicamente duas fases da tensão, o valor máximo de tensão elétrica obtido de pico à pico de 15,2 V em um período de oscilação de aproximadamente 57 ms (milissegundos) e uma frequência de 17,54 Hz para a fase do canal 1 do osciloscópio ver figura 21.

Figura 21 – Mostra o gráfico de duas fases, com o circuito trifásico ligado em estrela.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através dos testes realizados e dos resultados obtidos, podemos ressaltar a viabilidade do equipamento. De certa forma, a construção deste projeto possibilitou aplicar na prática conceitos físicos importantes estudados durante o curso.

As figuras 18, 19 e 20, mostram o protótipo montado, em processo de testes. Devido as condições de não implementação das pás para acoplar no protótipo, os testes foram realizados de forma limitada.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A busca pela diversificação da matriz energética e as preocupações com as mudanças climáticas fez com que as fontes de energias limpas ganhassem uma maior atenção no cenário energético mundial. Ao longo das últimas décadas, diversos estudos relacionados ao desenvolvimento de novas tecnologias e equipamentos nessa área são elaborados frequentemente no mundo. A energia eólica ocupa uma posição de destaque neste contexto, se diferenciando por causar menos danos ambientais e um alto retorno financeiro aos seus investidores. A tecnologia empregada na geração de energia elétrica através da conversão eólica, está bastante difundida atualmente e vários estudos estão dando uma extrema relevância no seu desenvolvimento e aprimoramento, com novas tecnologias de materiais para o desenvolvimento de equipamentos cada vez mais eficazes.

O desenvolvimento deste projeto obedeceu a um objetivo geral, que era construir um equipamento que fosse aplicável em aerogeradores para geração de energia elétrica através da conversão eólica. Todos os objetivos foram alcançados de forma satisfatória, com resultados animadores. No decorrer deste projeto, aplicamos novos conhecimentos relacionados a geração de energia elétrica, abordando diversos conceitos físicos interdisciplinares disponíveis na literatura. Este projeto contribuiu de forma significativa na emancipação de algumas ideias relacionadas a geração de energia renovável, além de servir como guia para que interessados possam construir seu próprio gerador eólico futuramente. Além disso, trouxe conceitos físicos importantes que não foram estudados durante o curso.

A construção deste alternador horizontal de fluxo axial, comprovou a eficiência dos materiais utilizados, como por exemplo os ímãs permanentes de NdFeB e a validade dos conceitos físicos envolvidos. O protótipo se mostrou extremamente pertinente perante o atual cenário energético e ambiental, uma vez que se utilizou materiais que causam poucos impactos ambientais para a construção do equipamento. O processo de construção do equipamento também se mostrou relevante devido aos inúmeros conhecimentos que foram aplicados e de toda a experiência adquirida ao longo do desenvolvimento, desde o início, amadurecimento da ideia até a montagem do equipamento.

Portanto, apesar de apresentar apenas um protótipo, este projeto fornece subsídios necessários ao público interessado em construir seu próprio gerador de energia elétrica de forma limpa e sustentável. Neste trabalho, abordamos o tema proposto de forma simples e objetiva, uma vez que se tratando de trabalhos acadêmicos, os objetivos são na maioria das vezes mais técnicos e precisos. Porém, apesar de serem amplos e teoricamente complexos, todos os objetivos aqui traçados foram alcançados de forma satisfatória, mostrando que é possível de forma consciente gerar energia elétrica de maneira sustentável.

## Referências

- [1] BORBA, Monir Goethel. **Desenvolvimento de uma máquina síncrona trifásica com núcleo do rotor produzido a partir da metalurgia do pó e ímãs de neodímio-ferro-boro para aplicação em aerogeradores**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2016. Disponível em <<http://hdl.handle.net/10183/180119>>. Acesso em 13 de setembro de 2018.
- [2] SGUAREZI FILHO, Alfeu Joãozinho et al. **Controle de potências ativa e reativa de geradores de indução trifásicos de rotor bobinado para aplicação em geração eólica com a utilização de controladores baseados no modelo matemático dinâmico do gerador**. 2010. Disponível em <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/260744>>. Acesso 12 de Setembro de 2018.
- [3] GONÇALVES, Tito Rafael da Silva. **Colheita Piezoelétrica de Energia**. 2011. 76 f. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. 2011. Disponível em <<http://hdl.handle.net/10362/5998>>. Acesso em 10 de setembro de 2018.
- [4] RANGEL, Renato Franklin. **Caracterização de uma célula tubular piezoelétrica para geração de energia elétrica**. 2014. Dissertação (em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2014. 107 f. Disponível em <<http://tede.biblioteca.ufpb.br/handle/tede/5295>>. Acesso em 02 set. 2018.
- [5] MOREIRA FILHO, Robério Paredes. **Análise e caracterização da potência elétrica gerada com elemento piezoelétrico**. 2014. 141 f. Dissertação (mestre em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB. 2014. 142 f. Disponível em: <<http://tede.biblioteca.ufpb.br/handle/tede/5299>>. Acesso em 20 set. 2018.
- [6] ALMEIDA, Joana de Sousa. **Conversão das vibrações provenientes do vento em electricidade** . 2013. 77 f. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis – Conversão Elétrica e Utilização Sustentável) - Universidade Nova de Lisboa, Curso de Pós-Graduação em Energias Renováveis, Lisboa. 2013. Disponível em <<http://hdl.handle.net/10362/11085>>. Acesso em 09 de setembro de 2018.
- [7] ROCHA, Bruno Massara. **Do it yourself e improviso: por uma outra epistemologia da projeção: uma análise do processo de improvisação a partir do**

- método de reflexão-em-ação.** VIRUS, São Carlos, n. 10, 2015. [online] Disponível em: <<http://www.nomads.usp.br/virus/virus10/?sec=4&item=2&lang=pt>>. Acesso em: 17 de novembro 2018.
- [8] SOUZA JUNIOR, Francisco Fernando de; BESSA, Olavo Fontes Magalhães. **Faça você mesmo (do it yourself): o movimento maker e os benefícios no processo de fabricação dos produtos.** Brazilian Journal of Develop. v. 4, n. 5, Edição Especial, p. 2288-2308, ISSN 2525-8761. Curitiba, 2018. Disponível em <<http://brjd.com.br/index.php/BRJD/article/view/253/213>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
- [9] SIMAS, Moana Silva. **Energia eólica e desenvolvimento sustentável no Brasil: estimativa da geração de empregos por meio de uma matriz insumo-produto ampliada.** 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. LOPES, J. A. Peças. Energia Eólica e Solar, 2012. Disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-10092012-095724/en.php>>. Acesso em de setembro de 2018.
- [10] MAIA, Thales Alexandre Carvalho. **Projeto e construção de um gerador a ímãs permanentes de fluxo axial para turbina eólica de pequena potência.** 2011. 197 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em <<https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/187M.PDF>>. Acesso em 12 de agosto de 2018.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEÓLICA). **Eólica: energia para um futuro inovador.** São Paulo 2018. Disponível em <<http://abeeolica.org.br/>>. Acesso em 22 de setembro de 2018.
- [12] DUTRA, Ricardo (org.). **Energia eólica: Princípios e tecnologia.** Rio de Janeiro: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Britto, 2008. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorialeolica2008e-book.pdf>>. Acesso em 12 de setembro 2018.
- [13] PINTO, Milton Oliveira. **Fundamentos de Energia Eólica.** 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2014.
- [14] TEDESCO, Henrique Tasca. **Estudo de diferentes direcionadores de escoamento na otimização da potência convertida de uma turbina eólica de eixo vertical,** Graduação (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, POA, 2015. Disponível em <<http://hdl.handle.net/10183/132694>>. Acesso em de setembro de 2018.

- [15] CARVALHO, Paulo. **Geração eólica**. Fortaleza: Editora da Universidade/UFCE, 2003.
- [16] CUSTÓDIO, Ronaldo dos Santos. **Energia eólica para produção de energia elétrica**. 2 ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2013.
- [17] MARQUES, Jeferson. **Turbinas eólicas: modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação**. 2004. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004. Disponível em <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/8442>>. Acesso em 12 set. 2018.
- [18] JARDIM, Andrei Silva. **Utilização de máquina de indução duplamente alimentada sem escovas (BDFM) como gerador eólico**. 2014. 62 p. Trabalho de conclusão (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10012471.pdf>>. Acesso em 12 de setembro de 2018.
- [19] SERWAY, R. A.; JEWETT, J. W. J. **Princípios de Física: eletromagnetismo**. Tradução Leonardo Freire de Mello e Tânia M. V. Freire de Mello; Revisão Técnica André Koch Torres Assis. 7<sup>a</sup> ed. vol. 3. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 941 p. Tradução de: Principles of Physics.
- [20] AZEVEDO, Thiago Paula Silva de. **Bancada experimental para ensaios em geradores elétricos utilizados em aerogeradores de pequeno porte**. 2012. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012. Disponível em <<http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/3036>>. Acesso em 15 de Setembro de 2018.
- [21] FERREIRA, Ângela Paula Barbosa da Silva. **Projecto de uma máquina de ímanes permanentes de fluxo axial orientado para os sistemas de conversão de energia eólica**. 2011. 318 p. Tese (Doutorado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2011. Disponível em <<http://hdl.handle.net/10216/63310>>. Acesso em 15 de Setembro de 2018.
- [22] VERDUM, Valdirene. **Projeto de aerogerador com segurança inerente para aplicação urbana**. 2013. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/86478>>. Acesso em: 12 de agosto de 2018.

- [23] ZIANI, Paola Rampelotto. **Elementos terras-raras: características e aplicações**, 2015. Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Curso de Química - Bacharelado, RS, 2015. Disponível em <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/11378>>. Acesso em 09 de setembro de 2018.
- [24] GIESE, E. C. **Tendências europeias para o uso dos recursos de terras-raras**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2017. 26p. Disponível em <<http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2093>>. Acesso em 12 de setembro de 2018.
- [25] SANDRONI, Gabriela A. **O impacto do monopólio chinês de terras raras no sistema internacional**. Universidad del País Vasco, 2011.
- [26] SAMPAIO, M. S., LIMA, F. M. R. S., LOVÓN-CANCHUMANI, G. A. **Inventário do ciclo de vida ICV da produção de ímãs permanentes a partir de um minério brasileiro** = Life cycle inventory - LCI of the production of permanent magnets from a brazilian ore. In: anais da jornada de iniciação científica, 26. Rio de Janeiro: cetem/mctic, 2018. 5p. Disponível em <<http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2142>>. Acesso em 15 de setembro de 2018.
- [27] CRÊSPO SANTOS, Carlos José. **Recursos naturais e terras raras**. Revista Política Hoje - ISSN: 0104-7094 [S.l.], v. 23, n. 1, p. 175-192, fev. 2015. ISSN 0104-7094. Disponível em <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/politica hoje/article/view/3759>>. Acesso em: 13 de setembro de 2018.
- [28] SOUSA FILHO, Paulo C. de; SERRA, Osvaldo A. **Terras raras no Brasil: histórico, produção e perspectivas**. Quím. Nova, São Paulo, v. 37, n. 4, p. 753-760, 2014. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422014000400029&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422014000400029&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em 21 de Setembro de 2018.
- [29] LOUREIRO, F. E. L.; SANTOS, R. L. C.(Ed.) **O Brasil e a re-globalização da indústria das terras raras**. Rev. Prof. Iran Ferreira Machado. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. 216p. Disponível em <<http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1505>>. Acesso de setembro de 2018.
- [30] SILVA JÚNIOR, Amilton Ferreira da; CAMPOS, Marcos Flávio de. **Relevância das Terras Raras para o Setor Energético**. Rev. Hólos, [S.l.], v. 1, p. 350-363, fev. 2016. ISSN 1807-1600. Disponível em <<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/3753>>. Acesso em: 12 de setembro de 2018.

- [31] LUNA, Wilberth Harold Deza. **Desenvolvimento de ímãs de NdFeB pelo processo MPI-aplicados em máquinas elétricas (motores)**. 2012. Disponível em <<http://hdl.handle.net/10183/109162>>. Acesso em 20 de setembro de 2018.
- [32] MÜNCHEN, Daniel Dotto. **Recuperação de neodímio a partir de ímãs de neodímio-ferro-boro por meio de processos mecânicos e hidro metalúrgicos**. Porto Alegre, setembro de 2016. Disponível em <<http://hdl.handle.net/10183/149837>>. Acesso em 20 de setembro de 2018.
- [33] FERREIRA, Flávia Alves; NASCIMENTO, Marisa. **Terras raras: aplicações atuais e reciclagem**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. 72 p. (Série Tecnologia Mineral, 91). Disponível em <<http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1827>>. Acesso 12 de setembro de 2018.
- [34] HALLIDAY, D; RESNICK, R; WALKER, J. **Fundamentos de Física: eletromagnetismo**. Tradução: Ronaldo Sergio de Biasi 4<sup>a</sup> ed. vol. 3 Rio de Janeiro: LTC editora, 2007. Tradução de: Fundamentals of Physics.
- [35] HALLIDAY, D; RESNICK, R; WALKER, J. **Fundamentos de Física: eletromagnetismo**. Tradução: Ronaldo Sergio de Biasi 10<sup>a</sup> ed. vol. 3 Rio de Janeiro: LTC editora, 2016. Tradução de: Fundamentals of Physics.
- [36] YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física III: eletromagnetismo**. Tradução: Sonia Midori Yamamoto. 12<sup>a</sup> ed. São Paulo: Editora Pearson Brasil, 2009.
- [37] HAYT JR, William H.; BUCK, John A. **Eletromagnetismo**. 8<sup>a</sup> ed. vol. Único, São Paulo: Bookman, 2013.
- [38] CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Tradução: Anatólio Laschuk. 5<sup>a</sup> ed., Porto Alegre: AMGH, 2013. Tradução de: Electric Machinery Fundamentals.
- [39] WOLF, Marco; MCQUITTY, Shaun. **Understanding the do-it-yourself consumer: DIY motivations and outcomes**. AMS review, v. 1, n. 3-4, p. 154-170, 2011. Disponível em <<https://link.springer.com/article/10.1007/s13162-011-0021-2#Bib1>>. Acesso em 18 de setembro de 2018.
- [40] TRIERVEILER, Matheus; GOMES, Amanda Mendes Ferreira. **Desenvolvimento de um mini gerador eólico de baixo custo utilizando a técnica do it yourself**. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) Universidade do Sul de Santa Catarina, 2018. Disponível em <<http://www.riuni.unisul.br/handle/12345/5247>>. Acesso em 22 de setembro de 2018.