



**UNISUL**

**UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA**

**RODRIGO JEREMIAS**

**MICROGERAÇÃO DE ENERGIA EM UM GERADOR LINEAR**

Palhoça

2019

**RODRIGO JEREMIAS**

**MICROGERAÇÃO DE ENERGIA EM UM GERADOR LINEAR**

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

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Francielli Scarpini Barbosa Cordeiro, Ms.

Palhoça

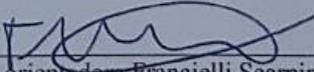
2019

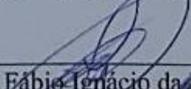
**RODRIGO JEREMIAS**

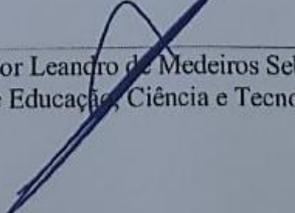
**MICROGERAÇÃO DE ENERGIA EM UM GERADOR LINEAR**

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

Palhoça, 06 de novembro de 2019.

  
\_\_\_\_\_  
Professora e orientadora Francieli Scarpini Barbosa Cordeiro, Ms.  
Universidade do Sul de Santa Catarina

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

  
\_\_\_\_\_  
Professor Leandro de Medeiros Sebastião, Ms.  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Dedico este Trabalho de Conclusão de Curso aos meus familiares, professores e amigos que acreditaram e me apoiaram.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais Marcos e Denise, que sempre me ajudaram em toda minha caminhada até hoje, sempre se esforçando e fazendo o impossível para me darem o melhor estudo.

Gostaria também de agradecer minha avó Lurdes, que sempre me ajudou desde pequeno com os meus estudos e também, até neste trabalho, não mediu esforços para me ajudar sempre que possível e apoiando para que tudo desse certo.

Gostaria de agradecer aos meus familiares e amigos que na medida do possível acreditaram no meu esforço e sempre me apoiaram não somente neste trabalho, mas como em tudo na vida.

À UNISUL, pela oportunidade, pelos professores que sempre que possível me deram um pouco do seu tempo para me dar a graça do aprendizado. Agradecer principalmente a minha orientadora Francielli, que desde o início confiou em mim e principalmente me ajudou muito no desenvolvimento desse trabalho, trazendo-me várias oportunidades durante o trabalho, além do conhecimento consigo.

“Sinta-se envergonhado em morrer até que você tenha conseguido alguma vitória para a humanidade” (HORACE MANN, 1859).

## RESUMO

O aumento da preocupação com o meio ambiente culminou em uma crescente série de estudos e pesquisas para a descoberta e viabilidade de fontes alternativas de energia. Estas fontes alternativas de energia permitiram obter a geração de energia elétrica de maneiras que não agredam o meio ambiente. Em linhas gerais, a geração de energia elétrica utilizado na grande maioria dos sistemas de energia utiliza um gerador síncrono ou assíncrono rotativo para obter energia elétrica. Por outro lado, ao utilizar um gerador linear, permite então aproveitar em sua totalidade a energia mecânica resultante de um sistema independentemente do sentido do movimento em que se encontra o sistema. Este trabalho busca desenvolver os fundamentos e ferramentas necessárias para a elaboração de um gerador elétrico linear, capaz de gerar energia a partir de uma forma de movimento mecânico diferente, a fim de aproveitar alguns sistemas de movimento mecânico que em sua totalidade não são completamente aproveitados com outras formas de geração de energia elétrica convencional.

Palavras-chave: Gerador Elétrico Linear. Geração de Energia Elétrica. Energia Sustentável.

## **ABSTRACT**

Increasing concern for the environment has culminated in a growing series of studies and research into the discovery and viability of alternative energy sources. These alternative sources of energy have made it possible to obtain forms of electricity generation in a way that does not harm the environment. Generally speaking, the electric power generation used in the vast majority of power systems utilizes a synchronous or asynchronous rotary generator to obtain electric power. On the other hand, by using a linear generator, will allows to fully utilize the mechanical energy resulting from a system regardless of the direction of movement in which the system is located. This work seeks to develop the fundamentals and tools necessary for the elaboration of a linear electric generator capable of generating energy from a different form of mechanical motion, in order to take advantage of some mechanical motion systems that in your totality use are not fully harnessed with other forms of conventional electric power generation.

**Keywords:** Linear Electric Generator. Electric Power Generation. Sustainable Energy.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Produção mundial bruta de eletricidade.....	15
Figura 2 – Esquemático de funcionamento do sistema K.E.R.S.....	16
Figura 3 – Vetor campo magnético ( <b>H</b> ) criado por cargas em movimento.....	20
Figura 4– Campo elétrico criador por uma carga $Q$ .....	21
Figura 5 – Linhas de fluxo magnético saindo do plano.....	22
Figura 6 – Condutor com corrente $I$ .....	24
Figura 7 – Posicionamento entre o campo magnético e a densidade de corrente.....	27
Figura 8 –Fluxo que sai de uma superfície fechada devido à carga magnética.....	28
Figura 9 – Posicionamento entre o campo elétrico e a variação temporal de indução magnética.....	29
Figura 10 – Variação da indução magnética <b>B</b> em uma área <b>S</b> .....	30
Figura 11 – Vista superior da Figura 10, mostrando o campo elétrico <b>E</b> resultante.....	30
Figura 12 – Ciclo de Histerese.....	35
Figura 13 – Circuito elétrico x Circuito magnético.....	36
Figura 14 – Desenho esquemático de um transformador ideal.....	40
Figura 15 – Motor Elétrico.....	41
Figura 16 – Projeção isométrica de um motor elétrico de corrente contínua (CC).....	42
Figura 17 – Motor Elétrico Síncrono.....	43
Figura 18 – Gerador linear com estator de face única.....	46
Figura 19 – Gerador linear com estator de face dupla.....	46
Figura 20 – Linor de ímãs de superfície.....	47
Figura 21 – Linor de enrolamento.....	47
Figura 22 – Linor planar de aço carbono 1020.....	49
Figura 23 – Polos do ímã de neodímio definidos inicialmente no trabalho.....	51
Figura 24 – Comportamento dos polos magnéticos dos ímãs de neodímio.....	52
Figura 25 – Ímã de Neodímio.....	54
Figura 26 – Linor de aço carbono 1020 com 30 centímetros de comprimento.....	55
Figura 27 – Corte da lâmina com dente longo.....	55
Figura 28 – Corte da lâmina de dente curto.....	56
Figura 29 – Lâmina de dente longo.....	56
Figura 30 – Medida lateral de 90 milímetros da lâmina de dente longo.....	57
Figura 31 – Medida lateral de 117 milímetros da lâmina de dente longo.....	57

Figura 32 – Lâmina de dente curto. ....	58
Figura 33 – Medida lateral de 90 milímetros da lâmina de dente curto. ....	58
Figura 34 – Medida lateral de 117 milímetros da lâmina de dente curto. ....	59
Figura 35 – Densidade de fluxo magnético com dente de 1 centímetro.....	60
Figura 36 – Densidade de fluxo magnético com dente de 0,9 centímetros. ....	60
Figura 37 – Densidade de fluxo magnético com dente de 0,8 centímetros. ....	61
Figura 38 – Densidade de fluxo magnético com dente de 0,7 centímetros. ....	61
Figura 39 – Densidade de fluxo magnético com dente de 0,6 centímetros.....	62
Figura 40 – Densidade de fluxo magnético com dente de 0,5 centímetros.....	62
Figura 41 – Vista frontal da lâmina de dente longo com linor e os ímãs.....	64
Figura 42 – Vista frontal da lâmina de dente curto com linor e os ímãs.....	64
Figura 43 – Vista superior, mostrando as lâminas de dente curto, longo com linor e os ímãs.....	64
Figura 44 – Linor de aço carbono 1020.....	65
Figura 45 – Cola Epóxi utilizada na colagem das lâminas.....	67
Figura 46 – Bloco de dez lâminas para uso no estator como dente, bem como a descrição de sentido e área de enrolamento. ....	68
Figura 47 – Vista frontal do linor com ímã conectado a ele, onde na zona amarela mostra o local do enrolamento efetuado nos dentes.....	69
Figura 48 – Vista frontal com as linhas de fluxo geradas pelo ímã que percorrem o dente do estator. ....	70
Figura 49 – Bloco de dente com enrolamento do estator.....	70
Figura 50 – Linor com os ímãs e separadores colados.....	71
Figura 51 – Placa de alumínio do tipo cantoneira.....	72
Figura 52 – Placa de madeira com as placas de alumínio do tipo cantoneira fixadas.....	72
Figura 53 – Base inferior do gerador linear fixada.....	73
Figura 54 – Peça do polímero termoplástico semicristalino.....	73
Figura 55 – Peça de poliacetal e parte superior do gerador linear fixadas.....	74
Figura 56 – Medição da tensão gerada por uma bobina do gerador e seu formato de onda. ....	75

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Variação da densidade do fluxo magnético (Tesla) pela variação da distância entre os ímãs (centímetros).....	66
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação das principais relações entre as propriedades físicas das grandezas elétricas e magnéticas. ....	35
Tabela 2 – Composição química do aço carbono 1020 .....	52
Tabela 3 – Especificações do ímã de neodímio.....	54
Tabela 4 – Densidade de fluxo em espessuras diferentes.....	63
Tabela 5 – Especificações do fio 22 AWG.....	69

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1 TEMA .....	17
1.2 OBJETIVOS .....	17
<b>1.2.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>17</b>
<b>1.2.2 Objetivo Específico.....</b>	<b>18</b>
1.3 METODOLOGIA DE PESQUISA.....	18
1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO .....	19
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>20</b>
2.1 ELETROMAGNETISMO APLICADO.....	20
<b>2.1.1 Conceitos Fundamentais do Eletromagnetismo .....</b>	<b>20</b>
2.1.1.1 Campo Magnético .....	20
2.1.1.2 Campo Elétrico.....	21
2.1.1.3 Indução Magnética .....	21
2.1.1.4 Permeabilidade Magnética .....	22
2.1.1.5 Fluxo Magnético.....	22
2.1.1.6 Indução Elétrica.....	23
2.1.1.7 Permissividade Elétrica .....	23
2.1.1.8 Fluxo Elétrico .....	23
2.1.1.9 Densidade Superficial de Corrente.....	24
2.1.1.10 Densidade Volumétrica de Carga.....	24
2.1.1.11 Condutividade Elétrica .....	25
<b>2.1.2 Equações de Maxwell.....</b>	<b>25</b>
2.1.2.1 Equações de Maxwell sob forma local.....	26
2.1.2.2 Lei de Ampère-Maxwell (Lei Circuital de Ampère).....	26
2.1.2.3 Lei de Gauss do Magnetismo (Lei da conservação do fluxo magnético).....	28
2.1.2.4 Lei de Faraday-Lenz.....	29
2.1.2.5 Lei de Gauss .....	31
2.2 CIRCUITOS MAGNÉTICOS .....	31
<b>2.2.1 Materiais magnéticos .....</b>	<b>32</b>
2.2.1.1 Meios Moles .....	32
2.2.1.1.1 <i>Ligas de aço</i> .....	33
2.2.1.2 Meios Duros .....	34

<b>2.2.2</b>	<b>Analogia entre circuitos magnéticos e circuitos elétricos .....</b>	<b>35</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Indutância magnética.....</b>	<b>36</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Perdas .....</b>	<b>37</b>
2.2.4.1	Perdas Elétricas .....	37
2.2.4.2	Perdas Magnéticas .....	37
2.2.4.2.1	<i>Perdas por histerese .....</i>	<i>37</i>
2.2.4.2.2	<i>Perdas por corrente de Foucault.....</i>	<i>38</i>
<b>2.3</b>	<b>MÁQUINAS ELÉTRICAS .....</b>	<b>38</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Conversão de Energia .....</b>	<b>39</b>
2.3.1.1	Fluxo Concatenado.....	39
2.3.1.2	Conversão Eletromecânica de Energia.....	39
<b>2.3.2</b>	<b>Transformadores.....</b>	<b>40</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Motores Elétricos.....</b>	<b>41</b>
2.3.3.1	Motores elétricos de corrente contínua (CC).....	41
2.3.3.2	Motores elétricos de corrente alternada.....	42
<b>2.3.4</b>	<b>Geradores Elétricos.....</b>	<b>43</b>
2.3.4.1	Geradores Lineares .....	43
2.3.4.1.1	<i>Tipos de geradores lineares.....</i>	<i>44</i>
2.3.4.1.2	<i>Morfologia de Geradores lineares .....</i>	<i>45</i>
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO .....</b>	<b>48</b>
<b>3.1</b>	<b>ESCOLHA DO TIPO DE GERADOR LINEAR .....</b>	<b>48</b>
<b>3.1.1</b>	<b>Estator .....</b>	<b>48</b>
3.1.1.1	Comprimento.....	48
3.1.1.2	Tipo de face .....	48
<b>3.1.2</b>	<b>Linor .....</b>	<b>49</b>
3.1.2.1	Tipo de linor .....	49
3.1.2.2	Tipo de excitação.....	49
3.1.2.3	Tipo de ímã permanente .....	50
<b>3.2</b>	<b>DEFINIÇÃO DO MATERIAL DOS COMPONENTES DO GERADOR LINEAR .....</b>	<b>50</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Software FEMM.....</b>	<b>51</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Ímã permanente.....</b>	<b>51</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Linor .....</b>	<b>52</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Estator .....</b>	<b>53</b>
<b>3.3</b>	<b>DIMENSIONAMENTO DOS MATERIAIS DO GERADOR LINEAR .....</b>	<b>53</b>

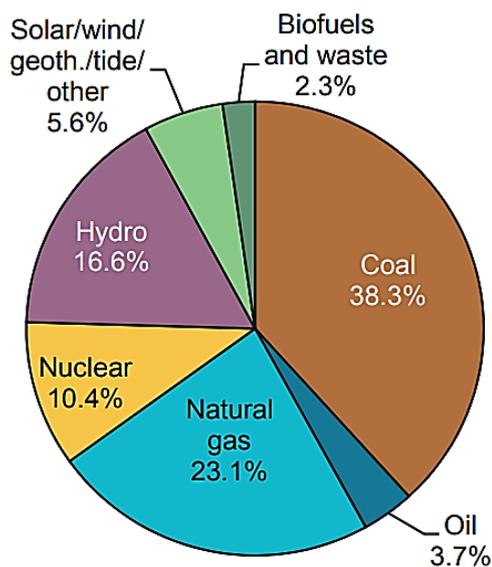
<b>3.4</b>	<b>CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DE GERADOR LINEAR .....</b>	<b>67</b>
<b>3.4.1</b>	<b>Construção dos dentes do estator .....</b>	<b>67</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Elaboração do enrolamento do estator.....</b>	<b>68</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Colocação dos ímãs permanentes no linor .....</b>	<b>71</b>
<b>3.4.4</b>	<b>Fixação do gerador linear .....</b>	<b>71</b>
<b>3.5</b>	<b>RESULTADOS DO EXPERIMENTO.....</b>	<b>74</b>
<b>3.6</b>	<b>DIFICULDADES ENCONTRADAS.....</b>	<b>75</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>77</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>79</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje há uma crescente busca por geração de energia renovável, devido a alguns fatores hoje existentes como destruição da camada de ozônio ou então o efeito estufa estão ocorrendo principalmente, de acordo com o IPAM (2015), a dois fatores principais: a queima de combustíveis fósseis e desmatamento de florestas tropicais.

Mundialmente a principal fonte de energia elétrica gerada é a partir de termoeletricas, de acordo com a figura 1, havendo assim um consumo muito alto de combustíveis fósseis (IEA, 2018), não somente para grande termoeletricas, mas também para máquinas de uso comum, como veículos por exemplo.

Figura 1 – Produção mundial bruta de eletricidade.



Fonte: IEA (2018)

Segundo Monteiro (2009 p. 1), esse aumento da preocupação com o meio ambiente culminou em uma crescente série de estudos e pesquisas para a descoberta e viabilidade de fontes alternativas de energia. Estas fontes alternativas de energia permitiram obter a geração de energia elétrica de maneiras que não agridam o meio ambiente. Pode citar-se fontes alternativas de energia como a energia eólica, energia solar, energia maremotriz, energia geotérmica e biomassa são alguns exemplos de fontes alternativas de energia.

Para veículos automotores a busca segue a mesma linha, no qual o foco atual das companhias está em criação e aperfeiçoamento de carros elétricos. Um dos maiores desafios da

utilização dos carros elétricos nos dias atuais é a autonomia que a bateria do automóvel terá com o seu uso constante e também a forma de recarregá-la mais rapidamente.

Uma das formas encontradas para auxiliar na melhoria da autonomia da bateria do veículo elétrico foi a da utilização do sistema K.E.R.S (Kinetic Energy Regeneration System), como na figura 2. Esse sistema é acoplado juntamente ao eixo do veículo, que durante a frenagem, utiliza o movimento do próprio eixo para captar a energia mecânica, assim de certa forma gerando energia elétrica que até então seria perdida, para que possa ser utilizada posteriormente no sistema do veículo (adaptado de B. Sampurno, A. Abdurrakhman e H. S. Hadi, 2015).

Figura 2 – Esquemático de funcionamento do sistema K.E.R.S.



Fonte: Brasil Acadêmico. Disponível em [tinyurl.com/y2dj9ec4](http://tinyurl.com/y2dj9ec4). Acessado em 02 jul. 2019

Entretanto, não somente a energia mecânica da frenagem poderá ser regenerada. Um outro sistema autônomo, como de amortecimento e suspensão de um automóvel, por exemplo, poderá ter sua energia mecânica que até então vem sendo desperdiçada, seja transformada em energia útil.

O sistema de amortecimento e suspensão possuem a função de absorver o impacto exercido sobre as rodas para que assim garante uma melhor estabilidade ao veículo e conforto ao motorista e passageiros (IEZZO, 2010). Esse sistema é regido por um sistema linear de movimento bem como um movimento de mola, onde o movimento muda o seu sentido baseado quando está sendo efetuado o trabalho mecânico.

Em linhas gerais, a geração de energia elétrica utilizado na grande maioria dos sistemas de energia utiliza um gerador síncrono ou assíncrono rotativo para obter energia elétrica, como a queda d'água que ao encontrar a pá das hélices da turbina, girando o eixo mecânico acoplado ao gerador de energia elétrica, ou como em uma termoelétrica com o vapor d'água.

No caso do sistema de amortecimento, o sistema utilizando um gerador síncrono não seria útil em sua totalidade, pois o sentido do movimento de amortecimento muda conforme o trabalho efetuado pelo amortecedor, assim não conseguindo ser uma fonte de energia mecânica útil para o gerador síncrono.

Por outro lado, ao utilizar um gerador linear, permite então aproveitar em sua totalidade a energia mecânica resultante do sistema de amortecimento do automóvel, independentemente do sentido do movimento em que se encontra o sistema.

## 1.1 TEMA

Análise e estudo da possibilidade de uma microgeração de energia com um gerador linear.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal do trabalho é de analisar e verificar a possibilidade de uma microgeração de energia com um gerador linear, para que possa ser implementado em situações onde a energia mecânica geradora não é de origem rotativa ou de sentido único e contínuo.

Comumente são utilizados geradores síncronos para efetuar a geração de energia. Este fato ocorre, pois, grande maioria da energia mecânica que irá ser convertida e assim gerar energia elétrica é de fácil aplicação em rotores, como uma queda d'água ou movimento de vapor d'água, pois aplicam movimento mecânico contínuo no rotor, fazendo-o girar.

Entretanto algumas fontes de energia mecânica não contêm seu movimento com sentido contínuo, invertendo o sentido constantemente ou então cessando o movimento gerado, portanto objetiva-se neste trabalho desenvolver um gerador para que possa transformar esses movimentos mecânicos descontínuos, como por exemplo a onda do mar ou como movimento

de suspensão de um carro, em energia elétrica utilizando os princípios básicos do eletromagnetismo.

### 1.2.2 Objetivo Específico

Sendo então como objetivos específicos deste trabalho, as atividades propostas:

- a) Analisar e definir o tipo de circuito elétrico e magnético utilizado no gerador linear;
- b) Analisar a viabilidade da geração de energia do gerador linear;
- c) Elaborar um protótipo de um gerador elétrico linear.
- d) Definir componentes construtivos do gerador linear;

### 1.3 METODOLOGIA DE PESQUISA

Este trabalho envolve o estudo e análise de uma microgeração de energia a partir de um gerador linear, sendo que para sua elaboração foi utilizado métodos de pesquisa para o desenvolvimento do trabalho.

De acordo com Fonseca (2002, p. 20)

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

O tipo de pesquisa a ser utilizado no trabalho será do tipo experimental e bibliográfica.

De acordo com Fonseca (2002, p. 38)

“A pesquisa experimental seleciona grupos de assuntos coincidentes, submete-os a tratamentos diferentes, verificando as variáveis estranhas e checando se as diferenças observadas nas respostas são estatisticamente significantes. Para avaliar quais os fatores extrínsecos são eliminados ou controlados. Os efeitos observados são relacionados com as variações nos estímulos, pois o propósito da pesquisa experimental é apreender as relações de causa-e-efeito ao eliminar explicações conflitantes das descobertas realizadas.”

A pesquisa bibliográfica será a base para o conhecimento teórico a ser aplicado e desenvolvido nas análises e cálculos a serem efetuados para a criação de um protótipo. O estudo experimental seguirá um planejamento e cronograma, dividido por etapas e tópicos.

#### 1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho se limitará ao estudo e desenvolvimento do protótipo de um gerador elétrico linear, desde a análise construtiva do gerador, simulações de geração de energia elétrica do gerador elétrico linear, até a construção do protótipo.

Não serão abordados assuntos como aplicação prática do protótipo do gerador elétrico linear em sistemas de movimento linear, como um cenário de captação do movimento de onda, bem como o rendimento total do gerador elétrico linear e a sua aplicação com cargas, sejam elas resistivas, capacitivas ou indutivas, apenas sua geração a vazio.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 ELETROMAGNETISMO APLICADO

A base teórica de todo o eletromagnetismo está representada pelo conjunto das quatro equações de Maxwell, das relações constitutivas do meio e pelos seus conceitos fundamentais. Assim, neste capítulo será introduzido todo o conceito básico para compreensão sobre o eletromagnetismo, bem como analisar a relação dessas grandezas com as equações de Maxwell, analisando-as individualmente, para que assim possa se compreender melhor o funcionamento de um gerador linear.

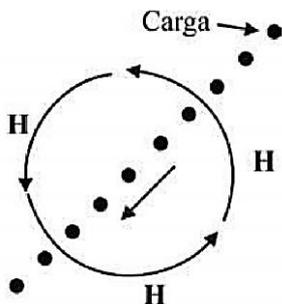
#### 2.1.1 Conceitos Fundamentais do Eletromagnetismo

##### 2.1.1.1 Campo Magnético

O campo magnético ( $H$ ) é uma força gerada em um ponto a partir de um movimento de cargas, ou seja, uma corrente elétrica  $I$  que circula em um meio condutor, como demonstrado na figura 3 (BARROCA, 2012).

De acordo com Bastos (2012), “[...] Se este movimento de cargas ocorrer em um fio condutor, o campo elétrico passa praticamente a não existir, pois os elétrons transitam entre posições vagas dos átomos que compõem o meio condutor e o somatório final de cargas é praticamente nulo.

Figura 3 – Vetor campo magnético ( $H$ ) criado por cargas em movimento.



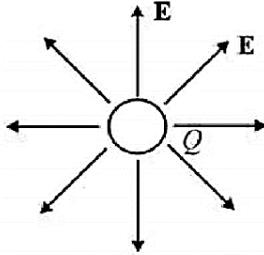
Fonte: Bastos (2012, p. 45).

A intensidade do campo magnético é expressa em amperes por metro [ $A/m$ ].

### 2.1.1.2 Campo Elétrico

Quando um conjunto de cargas elétricas  $Q$  encontra-se sem movimento em um meio, apresenta uma grandeza chamada campo elétrico ( $E$ ), como demonstrado na figura 4 (BASTOS, 2012).

Figura 4– Campo elétrico criador por uma carga  $Q$



Fonte: Bastos (2012, p. 44)

A intensidade desse campo elétrico ( $E$ ) vetorialmente é apresentado pela força ( $N$ ) ou intensidade exercida em cada carga desse campo elétrico (SADIKU, 2012) sendo que sua unidade pode ser medida em Newtons por coulomb ou mais comumente em Volts por metro [ $V/m$ ].

### 2.1.1.3 Indução Magnética

Segundo Bastos (2012), a indução magnética ( $B$ ) “[...] expressa a capacidade de induzir um fluxo magnético em um dado meio”. Sua unidade é expressa em Tesla [ $T$ ].

Como a indução magnética é a capacidade de induzir um fluxo magnético, sendo este gerado a partir de um campo magnético, podemos então utilizar a relação constitutiva

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad (2.1)$$

Onde então a indução magnética irá variar dependendo da permeabilidade do meio e da intensidade do campo magnético.

#### 2.1.1.4 Permeabilidade Magnética

A permeabilidade magnética ( $\mu$ ) de um meio é uma grandeza que permite mensurar a capacidade que um este meio possui de permitir ou de se opor a passagem de um fluxo magnético (BASTOS, 2012). Sendo sua unidade expressa em Henry por metro [ $H/m$ ].

Pode citar-se também que o valor da permeabilidade do ar é  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ . Portanto pode se utilizar uma notação de permeabilidade relativa ( $\mu_r$ ), expressa por

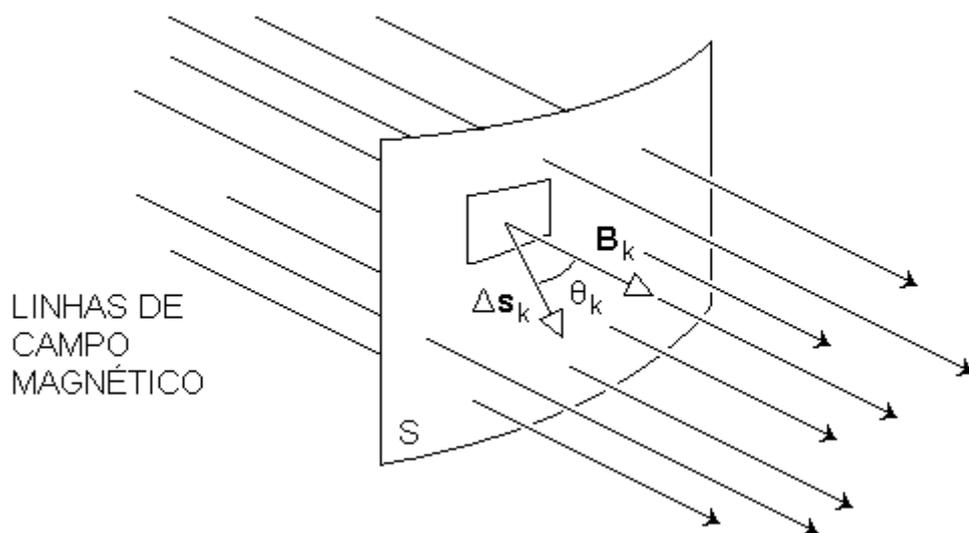
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.2)$$

#### 2.1.1.5 Fluxo Magnético

Fluxo Magnético ( $\Phi$ ) é a grandeza medida do campo magnético que atravessa um meio ou área  $S$  específica, como mostra a figura 5 (BARROCA, 2012). Esta grandeza é medida em Webers [ $Wb$ ] e pode ser definida pela equação

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad (2.3)$$

Figura 5 – Linhas de fluxo magnético saindo do plano.



Fonte: <https://tinyurl.com/y4kweqw5>

### 2.1.1.6 Indução Elétrica

A indução elétrica ( $\mathbf{D}$ ) é a grandeza que indica a capacidade de um fluxo elétrico seja induzido em um meio (SADIKU, 2012). Sua unidade de medida é Coulombs por metro quadrado [ $C/m^2$ ].

Podemos efetuar um paralelismo entre as grandezas de indução elétrica e indução magnética, portanto podemos também definir a relação constitutiva

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (2.4)$$

Pois a indução elétrica pode variar mediante a permissividade do meio e a intensidade do campo elétrico.

### 2.1.1.7 Permissividade Elétrica

Assim como a permeabilidade magnética está para o fluxo magnético, a permissividade elétrica ( $\epsilon$ ) de um meio expressa a capacidade de um meio ser mais ou menos suscetível à passagem de fluxo elétrico. Sendo assim, sua unidade de medida é Farad por metro [ $F/m$ ] (BASTOS, 2012).

Como a permeabilidade magnética, pode também citar-se que o valor da permissividade elétrica em um espaço livre, ou do ar é de  $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} F/m$ . A permissividade relativa é definida da mesma forma que a permeabilidade relativa. Portanto podemos defini-la como

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.5)$$

### 2.1.1.8 Fluxo Elétrico

Fluxo Elétrico ( $\psi$ ) é a grandeza medida decorrente a um campo elétrico que atravessa um meio ou uma área (SADIKU, 2012). Esta grandeza é medida em Coulombs [ $C$ ] e pode ser definida pela equação

$$\psi = \int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} \quad (2.6)$$

### 2.1.1.9 Densidade Superficial de Corrente

O conceito de densidade superficial de corrente ( $\mathbf{J}$ ) é definido como o vetor perpendicular a uma certa área definida, cuja corrente  $I$  flui para o mesmo sentido no meio (BASTOS, 2012).

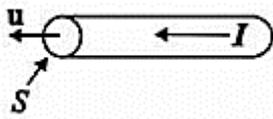
Podemos definir corrente  $I$  como sendo uma variação de carga no tempo. Sendo assim podemos definir a equação de corrente  $I$  como

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (2.7)$$

Segundo Bastos (2012, p.48), de acordo com a figura 6, “[...] a densidade superficial média de corrente atravessando a seção é dada por”

$$J = \frac{I}{S} \quad (2.8)$$

Figura 6 – Condutor com corrente  $I$



Fonte: Bastos (2012, p. 48)

De acordo com a figura 6, podemos então definir que o vetor  $\mathbf{J}$  possui um sentido e direção indicado pelo vetor  $\mathbf{u}$  na figura 6, no qual segundo Bastos (2012, p. 48) o seu módulo será igual ao valor da sua média, ou seja, igual a  $J$ . Portanto podemos concluir que a corrente  $I$  é definida como

$$I = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} \quad (2.9)$$

Desta maneira podemos definir que a densidade superficial é a corrente percorrida por unidade de área, sendo sua unidade Ampere por metro quadrado [ $A/m^2$ ] (SADIKU, 2012).

### 2.1.1.10 Densidade Volumétrica de Carga

A densidade de carga é o somatório de cargas elétricas  $Q$  que ocupa uma linha, superfície ou volume. Sendo assim, a densidade volumétrica de carga ( $\rho$ ) é o somatório dessas

cargas elétricas  $Q$  em um certo volume  $Vol$  (BASTOS, 2012). Sua unidade de medida é Coulomb por metro cúbico [ $C/m^3$ ].

Temos como densidade volumétrica média de carga a equação

$$\rho = \frac{Q}{Vol} \quad (2.10)$$

Entretanto, essa densidade de carga pode estar ou não distribuída igualmente neste volume ocupado, assim de acordo com Bastos (2012 p.49), temos que

$$Q = \int_{Vol} \rho dvol \quad (2.11)$$

#### 2.1.1.11 Condutividade Elétrica

De forma geral, segundo Bastos (2012), podemos definir a condutividade elétrica ( $\sigma$ ) como a capacidade que um meio possui de permitir a passagem de corrente elétrica. Os meios condutores são caracterizados por sua condutividade, cuja unidade é Siemens por metro [ $S/m$ ].

Se em um condutor houver um campo elétrico induzido, gerando assim uma corrente elétrica, percorrerá neste condutor uma densidade superficial de corrente. Neste condutor haverá, portanto, um fator de proporcionalidade entre o campo elétrico induzido e a densidade superficial de corrente total, sendo este fator a condutividade elétrica (BASTOS, 2012), portanto podemos definir a relação de passagem, ou constitutiva

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.12)$$

#### 2.1.2 Equações de Maxwell

Ao contrário das leis da Mecânica estabelecidas por Newton, a Teoria do Eletromagnetismo encontrou dificuldades maiores para se estabelecer devido ao fato de que a eletricidade é algo invisível ao olho humano, dificultando assim a comprovação e visualização de certas grandezas elétricas.

Eis que o físico escocês James Clerk Maxwell, conseguiu de forma genial estabelecer as quatro leis que hoje definem as grandezas eletromagnéticas e o eletromagnetismo, baseando-

se em leis e trabalhos desenvolvidos por outros físicos como Carl Gauss, André Marie Ampère, Michael Faraday, Emil Lenz, entre outros (BASTOS, 2012).

De acordo com Bastos (2012), “[...] Através da introdução da noção de “corrente de deslocamento” (1862), Maxwell possibilitou, sob forma completa, o estabelecimento de um grupo de equações que sintetiza o comportamento físico das grandezas eletromagnéticas. ” Dentro o qual serão apresentadas a seguir.

#### 2.1.2.1 Equações de Maxwell sob forma local

As equações de Maxwell podem ser apresentadas da seguinte maneira (BASTOS, 2012):

$$\text{rot}\mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t} \text{ (Lei de Ampère-Maxwell)} \quad (2.13)$$

$$\text{div}\mathbf{B} = 0 \text{ (Lei de Gauss do Magnetismo)} \quad (2.14)$$

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} \text{ (Lei de Faraday-Lenz)} \quad (2.15)$$

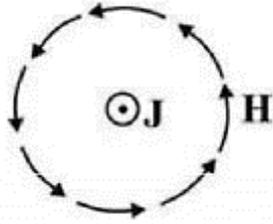
$$\text{div}\mathbf{D} = \rho \text{ (Lei de Gauss)} \quad (2.16)$$

#### 2.1.2.2 Lei de Ampère-Maxwell (Lei Circuital de Ampère)

“Inspirado pela descoberta do físico dinamarquês Hans Christian Oersted, que em 1820 observou que a passagem de uma corrente elétrica por um fio gera um campo magnético, André Marie Ampère formulou a Lei que leva o seu nome no início do século XIX” (FRAIJI, 2007).

A Lei de Ampère-Maxwell ou Lei Circuital de Ampère, equação 2.13, demonstra que um campo magnético pode ser estabelecido por uma densidade superficial de corrente ( $\mathbf{J}$ ), cujo vetor indica o sentido e direção em que flui a corrente elétrica, e por uma variação da indução de corrente elétrica no tempo (associada ao termo  $\frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t}$  da equação), como mostrado na figura 7 (BASTOS, 2012).

Figura 7 – Posicionamento entre o campo magnético e a densidade de corrente



Fonte: Bastos (2012, p. 50)

Segundo Sadiku (2012), “a lei circuital de Ampère estabelece que a integral de linha da componente tangencial de  $\mathbf{H}$  em torno de um caminho *fechado* é igual à corrente líquida  $I_{env}$  envolvida pelo caminho”. Sendo assim, temos que

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{env} \quad (2.17)$$

Aplicando o teorema de Stokes, temos:

$$I_{env} = \int_S \text{rot}\mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} \quad (2.18)$$

Comparando as equações 2.18 e 2.9, percebe-se que,

$$\text{rot}\mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (2.19)$$

A densidade superficial de corrente  $\mathbf{J}$ , pode também ser descrita na equação 2.13 como sendo a corrente de condução. Considerando um domínio de baixas frequências, como será tratado no gerador linear, o valor do termo  $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$  será insignificante se comparado ao de  $\mathbf{J}$  (BASTOS, 2012).

Sadiku (2012) define que:

O termo  $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$  é conhecido como densidade de corrente de deslocamento e  $\mathbf{J}$  é a densidade de corrente de condução. A inserção do termo  $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$  na equação 2.19 foi uma das maiores contribuições de Maxwell. Sem o termo  $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$  a propagação de ondas eletromagnéticas (ondas de rádio ou de TV, por exemplo) não poderia ter sido prevista, como Maxwell o fez. Em baixas frequências,  $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$  é usualmente desprezível quando comparado com  $\mathbf{J}$ . Entretanto, em frequências de rádio, os dois termos são comparáveis. Na época de Maxwell, fontes de alta frequência não eram disponíveis, e a equação 2.13 não poderia ser verificada experimentalmente, Anos mais tarde,

Hertz conseguiu gerar e detectar ondas de rádio verificando, dessa forma, a equação 2.13.

### 2.1.2.3 Lei de Gauss do Magnetismo (Lei da conservação do fluxo magnético)

A equação 2.14, mostra que o fluxo magnético é conservativo. Segundo Bastos (2012), “pode-se entender então que o fluxo magnético que entra em um volume é idêntico ao que sai do mesmo volume.”

“Diferentemente das linhas de fluxo elétrico, as linhas de fluxo magnético sempre se fecham sobre si mesmas. Isto se deve ao fato de que não é possível ter um polo magnético isolado (ou cargas magnéticas)” (SADIKU, 2012).

Ainda segundo Sadiku (2012), não é possível a existência de uma carga magnética isolada, pelo fato de que sempre haverá a presença de dois polos magnéticos independentemente de quantas vezes seja dividido um polo, como é demonstrado na figura 8. Portanto, o fluxo magnético contido em uma superfície fechada deverá ser zero,

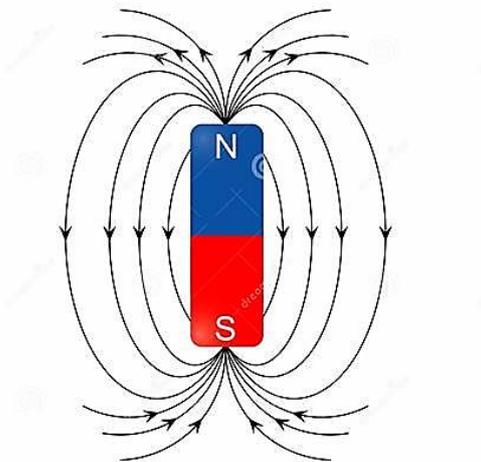
$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (2.20)$$

Aplicando o teorema da divergência na equação 2.20, temos

$$\oint_V \text{div} \mathbf{B} dv = 0 \quad (2.21)$$

Ao aplicar a integral obteremos a equação 2.14.

Figura 8 –Fluxo que sai de uma superfície fechada devido à carga magnética



#### 2.1.2.4 Lei de Faraday-Lenz

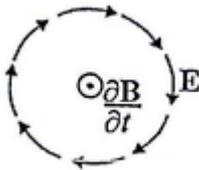
“Em 1831, aproximadamente onze anos após a descoberta de Oersted, Michael Faraday, em Londres, e Joseph Henry, em Nova York, descobriram que um campo magnético variável no tempo poderia produzir uma corrente elétrica” (SADIKU, 2012 p. 334).

De acordo com Sadiku (2012), com os experimentos de Michael Faraday, foi constatado que o fluxo de corrente em um meio é fruto do resultado de uma força eletromotriz ( $V_{fem}$ ) produzida pela variação do campo magnético no tempo.

Heinrich Friedrich Lenz, entretanto, determinou que o fluxo da corrente gerada pela força eletromotriz possui sentido inverso a própria variação do campo magnético (FRAIJI, 2007).

Portanto o valor da indução magnética ( $\mathbf{B}$ ) na equação 2.1, ao conter uma variação no campo magnético ( $\mathbf{H}$ ), apresentará também uma variação. Sendo assim, analogamente, ao variar a indução magnética ( $\mathbf{B}$ ) no meio, apresentará então um campo elétrico ( $\mathbf{E}$ ) com um sentido oposto, de acordo com a figura 9.

Figura 9 – Posicionamento entre o campo elétrico e a variação temporal de indução magnética



Fonte: Bastos (2012, p. 51)

De acordo com a definição de indução magnética  $\mathbf{B}$  e fluxo magnético  $\Phi$ , temos que

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$$

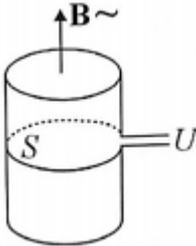
Ao variarmos o fluxo no tempo, temos que

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{d \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}}{dt} \quad (2.22)$$

Como  $\mathbf{B}$  somente apresenta variação no tempo e não na superfície, como mostrado nas figuras 10 e 11, é possível igualar a variação de  $\mathbf{B}$  com uma derivada parcial, sendo assim

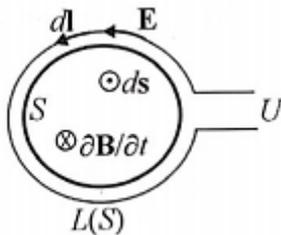
$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \frac{d\mathbf{B}}{dt} \quad (2.23)$$

Figura 10 – Variação da indução magnética  $\mathbf{B}$  em uma área  $S$



Fonte: Bastos (2012, p. 57)

Figura 11 – Vista superior da Figura 10, mostrando o campo elétrico  $\mathbf{E}$  resultante



Fonte: Bastos (2012, p. 57)

Ao conter uma indução magnética variante no tempo, criando assim um campo elétrico induzido  $\mathbf{E}$  em uma área como mostrado nas figuras 10 e 11, o sentido desse campo circula em uma região conduzido por uma força eletromotriz ( $V_{fem}$ ) (BASTOS, 2012), sendo assim temos

$$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (2.24)$$

Aplicando o teorema de Stokes, obtemos então

$$\int_S \text{rot} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (2.25)$$

ou

$$\text{rot} \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.26)$$

Seguindo a Lei de Lenz, para que haja uma conservação de energia a equação 2.26 deverá apresentar um sinal negativo, pelo fato que o sentido do campo elétrico gerado é sempre inverso do sentido do campo magnético que o produziu, apresentando-se assim a equação 2.15.

### 2.1.2.5 Lei de Gauss

Ao verificar inicialmente que o divergente do vetor  $\mathbf{D}$  é diferente de zero, de acordo com o teorema da divergência, conclui-se que o seu fluxo não será conservativo, ou seja, o fluxo que entra em um volume é diferente do fluxo que sai do volume (BASTOS, 2012).

Segundo Sadiku (2012, p. 113), “a Lei de Gauss estabelece que o fluxo elétrico total através de qualquer superfície fechada é igual à carga total encerrada ( $Q_{\text{enc}}$ ) por essa superfície.”

Assim temos,

$$\psi = Q_{\text{enc}} \quad (2.27)$$

Comparando a equação 2.27 e 2.6 temos que,

$$Q_{\text{enc}} = \oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} \quad (2.28)$$

De acordo com a equação 2.11 a carga total em um volume é igual ao somatório de cargas em um volume, ou seja, a integral da densidade volumétrica de cargas, temos que

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = \int_V \rho dv \quad (2.29)$$

Aplicando o teorema da divergência à integral de superfície da equação 2.29, obtemos

$$\int_V \text{div}\mathbf{D} \cdot dv = \int_V \rho dv \quad (2.30)$$

Aplicando as integrais em ambas as igualdades, obtemos a equação 2.16

## 2.2 CIRCUITOS MAGNÉTICOS

Os circuitos magnéticos fazem parte de um conjunto de importantes etapas na construção de qualquer equipamento elétrico. Os circuitos magnéticos juntamente com os circuitos elétricos possibilitam a formação de vários dispositivos e a criação de ferramentas de modelagem. A concepção básica de um circuito magnético é composta de material ferromagnético e de condutores elétricos, que compõe os enrolamentos.

## 2.2.1 Materiais magnéticos

De acordo com Bastos (2012, p. 155), podemos definir materiais magnéticos em dois grandes grupos: meios moles e meios duros.

### 2.2.1.1 Meios Moles

Podemos citar como meio moles os seguintes tipos de materiais (BASTOS, 2012 p. 155):

- a) Materiais diamagnéticos: São meios onde possuem uma permeabilidade relativa próxima a 1, porém menor que 1, ou seja, caso haja uma ação de um campo magnético uniforme no meio diamagnético, o fluxo irá percorrer pelo o ar, pois possui uma permeabilidade maior;
- b) Materiais paramagnéticos: São meios onde possuem uma permeabilidade relativa próxima a 1, porém maior que 1. De forma prática, podemos considerar que a sua permeabilidade relativa é igual a 1 ( $\mu_r = 1$ ), pois os seus efeitos práticos são desprezíveis;
- c) Materiais ferromagnéticos: São meios onde seus materiais apresentam uma permeabilidade elevada, muito superior a 1 ( $\mu_r \gg 1$ ), fazendo com que o fluxo percorra pelo material ferromagnético invés do ar. Este tipo de material, de acordo com Bastos (2012, p.156), possui duas importantes características relacionadas a temperatura e um fenômeno chamado “saturação”. Os materiais ferromagnéticos possuem a característica de perder suas propriedades magnéticas mediante uma temperatura elevada, tornando-se paramagnético. Em relação ao fenômeno “saturação”, de acordo com Bastos (2012), o valor da permeabilidade ( $\mu_r$ ) pode ser alterada dependendo do módulo do campo magnético (**H**) aplicado no material;

### 2.2.1.1.1 Ligas de aço

O aço é de longe o material mais amplamente empregado na fabricação de bens de consumo e bens de produção, como indústria, construção civil, etc (ALBINOX). O aço é uma liga de ferro-carbono onde apresenta um teor de carbono de até 2% do composto total.

Os principais motivos da popularidade do aço são seu baixo custo de fabricação, de conformação e de processamento, em relação a outras ligas e a abundância das matérias primas (ALBINOX).

Existem, no mundo inteiro, milhares de tipos de aços, com composições químicas registradas e patenteadas ou definidas por normas, classificados segundo sistema de numeração e codificação desenvolvidos em diferentes países.

O aço inoxidável é o nome dado à família de aços resistentes à corrosão e ao calor contendo no mínimo 10,5% de cromo (ALBINOX). Os tipos de aço inoxidável podem ser classificados em: ferrítico, martensítico e austenítico

Os aços inoxidáveis austeníticos são os mais utilizados segundo Albincox. Os aços austeníticos não podem ser endurecidos por tratamento térmico, tendo o nível de teor de carbono restrito, mas com adições de níquel, por exemplo, muda a estrutura em temperaturas ambientes, apresentando assim baixa permeabilidade magnética pelo arranjo atômico cúbico de face centrado obtido.

Os aços inoxidáveis ferríticos tem uma estrutura cristalina cúbico de corpo centrado, que é o mesmo do ferro puro a temperatura ambiente, sendo assim um material magnético (ALBINOX). O principal elemento de liga é o cromo com teores tipicamente entre 11 e 17%. O teor de carbono é mantido baixo o que resulta nestes aços uma limitada resistência mecânica. Os aços ferríticos são de baixo custo, porém limita-se em questão de resistência à corrosão, tenacidade, conformabilidade e soldabilidade se comparado com os austeníticos.

Os aços inoxidáveis martensítico possui uma estrutura similar aos ferríticos, com uma estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado, sendo também um material com permeabilidade magnética alta. O principal elemento desta liga de aço inoxidável é o cromo, com um teor de 12 a 15%. Os aços inoxidáveis martensítico foram desenvolvidos, segundo

Albinox, com adições de nitrogênio e níquel, mas com teores de carbono mais baixos que os tipos tradicionais, apresentando uma melhor tenacidade, soldabilidade e resistência à corrosão.

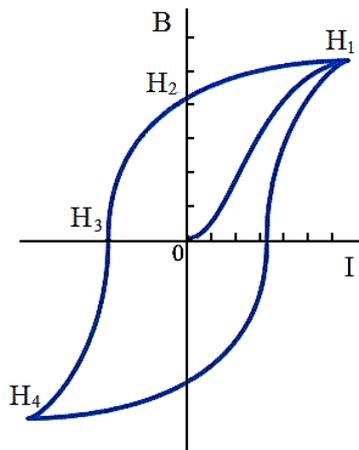
#### 2.2.1.2 Meios Duros

Como material do tipo meio duro, podemos citar como exemplo os ímãs permanentes. De acordo com Bastos (2012), “[...]os ímãs permanentes são materiais duros que guardam internamente uma certa indução uma vez que o campo externo é extinto.”

Um ímã permanente poderá apresentar um ciclo de magnetização chamado de ciclo de histerese. Segundo Bastos (2012, p.163), se conectarmos um ímã permanente entre uma fissura de um circuito magnético feito de um material ferromagnético, podemos definir o ciclo de histerese em 4 etapas:

1. Com o sistema inicial, o valor do campo  $H$  é 0. Ao agir uma corrente sobre o material ferromagnético, o valor do campo  $H$  muda, que de acordo com a figura 12, será considerado como  $H_1$ .
2. Quando o valor da corrente  $I$  volta a tornasse zero, o valor de  $H_1$  também irá diminuir até o valor zero, porém, o ímã irá guardar uma certa indução interna a ele e, portanto, no momento onde a corrente  $I$  for igual a zero, haverá um fluxo circulando no circuito magnético, devido a indução remanescente do ímã, este fluxo é definido na figura 12 como  $H_2$ .
3. Ao inverter o sentido da corrente  $I$  induzida no circuito, o valor do campo  $H$  passará a se diferente de zero, no qual será considerado na figura 12 como  $H_3$ . Neste campo  $H_3$ , o fluxo do ímã é igual ao módulo do fluxo gerado, porém de sentido contrário. Como resultado, o fluxo no circuito magnético será igual a zero e, portanto,  $B = 0$ .
4. Caso o valor da corrente  $I$  aumente novamente, porém com um sentido inverso da etapa 1, um novo fluxo passará pelo circuito magnético, porém agora no mesmo sentido que o fluxo do ímã. Este ponto da etapa é considerado como  $H_4$  na figura 12. Seguindo novamente a primeira e segunda etapa, resultará em um novo fluxo remanescente no ímã, fechando assim o ciclo completo de histerese.

Figura 12 – Ciclo de Histerese



Fonte: O autor (2019)

### 2.2.2 Analogia entre circuitos magnéticos e circuitos elétricos

De acordo com Bastos (2012, p.174), “[...] podemos de forma análoga associar as grandezas elétricas e magnéticas, a fim de apresentar equivalência entre as propriedades físicas dessas grandezas. “

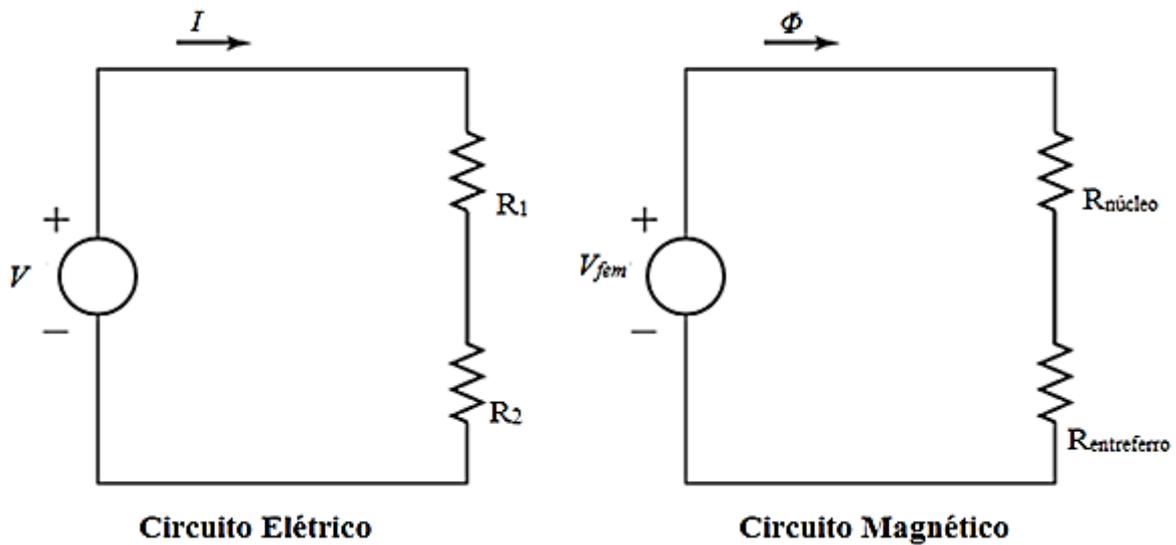
De forma a simplificar a comparação, a tabela 1 mostrará de forma comparativa as principais relações entre as propriedades físicas das grandezas elétricas e magnéticas e na figura 13 como pode ser representado cada tipo de circuito.

Tabela 1 – Comparação das principais relações entre as propriedades físicas das grandezas elétricas e magnéticas.

Grandezas	Elétrica	Magnética
Força de excitação	Tensão elétrica (V)	Força Magnetomotriz
Resposta a excitação	$I = \frac{V}{R}$	$\Phi = \frac{V}{R}$
Impedância	$R = \frac{V}{I} = \frac{l}{\sigma S}$	$R = \frac{V}{\Phi} = \frac{l}{\mu_0 S}$
Intensidade do campo	$E = -gradV$	$H = -gradV_{fem}$

Fonte: O autor (2019)

Figura 13 – Circuito elétrico x Circuito magnético



Fonte: O autor (2019)

### 2.2.3 Indutância magnética

De acordo com Bastos (2012), “[...]indutância é um fenômeno que ocorre quando em um circuito elétrico com “n” espiras produz um fluxo ( $\Phi$ ) na sua própria região de existência.”

Se considerarmos um material ferromagnético, onde possui nele dois circuitos elétricos com “n” espiras cada e desprezando qualquer tipo de perda, observasse que no circuito 1 ao apresentar uma corrente  $I$  variável no tempo, um fluxo magnético será criado no material ferromagnético. Parte deste fluxo criado pelo circuito 1 irá percorrer o material ferromagnético e será enlaçado pelas espiras do circuito 2, sendo este fluxo criado pelo circuito 1 proporcional a corrente  $I$  nele gerada.

No circuito elétrico 2, o número de espiras existentes será o produto de vezes que o circuito 2 enlaçará o fluxo e assim pode se definir que o fluxo existente no circuito 2 é  $n_2 \Phi$ , chamado também de fluxo concatenado, no qual

$$\lambda = n_2 \Phi \quad (2.31)$$

Caso o material ferromagnético não apresente saturação, podemos afirmar que o fluxo existente no enlace das espiras no circuito 2 e a corrente  $I$  apresentam um fator de proporcionalidade, no qual podemos definir como

$$K = \frac{\lambda}{I} \quad (2.32)$$

tal que  $K$  é o fator de proporcionalidade.

Esse fator de acordo com Bastos (2012) podemos chamar como indutância mútua entre o circuito 1 e o circuito 2, tal que:

$$L = \frac{\lambda}{I} \quad (2.33)$$

## 2.2.4 Perdas

As perdas existentes em um gerador linear podem ser descritas como: perdas elétricas e perdas magnéticas.

### 2.2.4.1 Perdas Elétricas

As perdas elétricas correspondem às perdas pelo efeito Joule, assim representando a quantidade de energia dissipada em forma de calor nos enrolamentos de um gerador ou motor, por este enrolamento apresentar uma certa resistividade a passagem de energia elétrica. Em um gerador ou motor onde é utilizado ímãs permanentes, ou seja, não apresenta enrolamento de bobina de campo, a perda elétrica pelo efeito Joule irá se manifestar somente no enrolamento presente no indutor.

### 2.2.4.2 Perdas Magnéticas

As perdas magnéticas consistem em perdas relativas à alteração do campo magnético, usualmente referidas como perdas no ferro, pois boa parte destas perdas ocorrem nos componentes de ferro do estator. Existem dois tipos de perdas magnéticas presentes em um gerador: perdas por histerese e perdas por correntes de Foucault.

#### 2.2.4.2.1 Perdas por histerese

Segundo Chapman (2013), “as perdas por histerese estão associadas à alteração da configuração dos domínios magnéticos no núcleo durante cada semiciclo, sendo uma função não linear”.

As perdas por histerese refletem a energia que é consumida para inverter a magnetização de um material, ou seja, são perdas provocadas pela propriedade das substâncias ferromagnéticas de apresentarem um atraso entre a intensidade do campo magnético e o campo de indução magnética (BARROCA, 2012)

A utilização de materiais ferromagnéticos para o núcleo é feita com o intuito de melhorar a propagação das ondas eletromagnéticas do motor, diminuindo as perdas por histerese (SAKAMOTO E PAES, 2016).

#### 2.2.4.2.2 *Perdas por corrente de Foucault*

Segundo Chapman (2013), “podemos definir as perdas por corrente de Foucault como perdas devido ao aquecimento resistivo no núcleo ferromagnético.”

As correntes de Foucault podem ser chamadas também de correntes parasitas, cuja descrição do nome é associada com as correntes circulantes que existem em percursos fechados dentro do corpo de um material ferromagnético e causam uma perda indesejável por aquecimento.

Essas correntes circulantes são geradas pelas diferenças de potencial magnético existentes por todo o corpo do material devido à ação do fluxo variável, ou seja, se o circuito magnético for composto de ferro sólido, a perda de potência resultante é significativa porque as correntes circulantes encontram relativamente pouca resistência (DEL TORO, 1990).

Com o objetivo de diminuir as perdas ocasionadas pelas correntes de Foucault, a resistência encontrada por essas correntes deverá ser maior. Para se aumentar de forma significativa essa resistência, a prática de laminação do núcleo se faz necessário.

### 2.3 MÁQUINAS ELÉTRICAS

Segundo Chapman (2013), “uma máquina elétrica é um dispositivo que pode converter tanto a energia mecânica em energia elétrica como a energia elétrica em energia mecânica.”

As máquinas elétricas podem servir como conversores eletromecânicos de energia, podendo ser divididas em três grandes grupos (CHAPMAN, 2013):

- 1) Motores: quando o dispositivo converte energia elétrica em energia mecânica;
- 2) Geradores: quando o dispositivo converte energia mecânica em energia elétrica;
- 3) Transformador: quando o dispositivo converte energia elétrica de corrente alternada em uma outra energia de corrente alternada, porém com um nível de tensão elétrica e corrente elétrica diferente;

### 2.3.1 Conversão de Energia

Para que possa ser definido o princípio de conversão de energia utilizado em motores, geradores e transformadores, primeiramente deverá ser definido o conceito de fluxo concatenado.

#### 2.3.1.1 Fluxo Concatenado

Como já definido na Lei de Faraday-Lenz, quando um campo magnético varia no tempo, produz-se um campo elétrico no espaço.

Sendo assim, a Lei de Faraday-Lenz pode ser expressa como

$$V_{fem} = - \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.32)$$

Onde o  $\lambda$  define-se como fluxo concatenado, podendo também ser definido como

$$\lambda = N\psi \quad (2.33)$$

Onde  $N$  é o número de espiras do enrolamento onde o fluxo concatena, portanto

$$V_{fem} = - \frac{d\lambda}{dt} = - N \frac{d\psi}{dt}$$

#### 2.3.1.2 Conversão Eletromecânica de Energia

Foi visto que o fluxo concatenado é resultante de um campo magnético que varia no tempo em estruturas metálicas, com enrolamentos de alta condutividade.

Sendo assim, Fitzgerald (2006 p. 174) define que:

A conversão eletromagnética de energia ocorre quando surgem alterações no fluxo concatenado decorrentes do movimento mecânico. Nas máquinas rotativas, as tensões são geradas nos enrolamentos ou grupos de bobinas quando esses giram mecanicamente dentro de um campo magnético, ou quando o circuito magnético gira mecanicamente próximo aos enrolamentos, ou ainda quando o circuito magnético é projetado de modo que a relutância varie com a rotação do rotor. Por meio desses métodos, o fluxo concatenado em uma bobina específica é alterado ciclicamente e uma tensão variável no tempo é gerada.

### 2.3.2 Transformadores

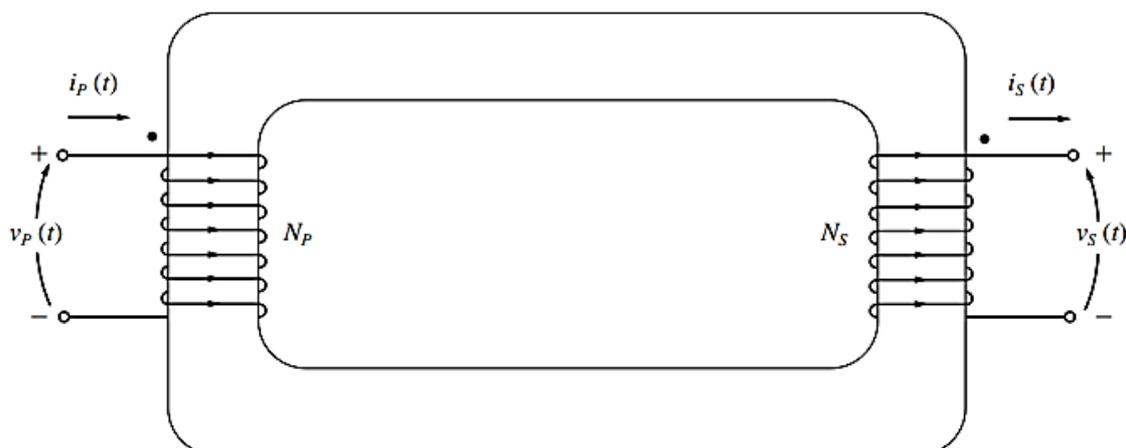
Chapman (2013, p. 66) define que:

Um transformador é um dispositivo que converte, por meio da ação de um campo magnético, a energia elétrica CA de uma dada frequência e nível de tensão em energia elétrica CA de mesma frequência, mas outro nível de tensão. Ele consiste em duas ou mais bobinas de fio enroladas em torno de um núcleo ferromagnético comum. Essas bobinas (usualmente) não estão conectadas diretamente entre si. A única conexão entre as bobinas é o fluxo magnético comum presente dentro do núcleo.

Para que haja essa conversão, há a necessidade que em um dos enrolamentos possua um fluxo elétrico variante no tempo produzindo assim um campo magnético no núcleo do transformador, sendo ele ferromagnético ou não. (FITZGERALD, 2006).

Esse fluxo magnético resultante no núcleo, que por variar no tempo, produzirá, portanto, um campo elétrico induzido no segundo enrolamento. Este segundo enrolamento poderá apresentar um número de espiras maior ou menor se comparado ao outro enrolamento, variando assim o valor da tensão nos terminais do segundo enrolamento (FITZGERALD, 2006 p. 70).

Figura 14 – Desenho esquemático de um transformador ideal

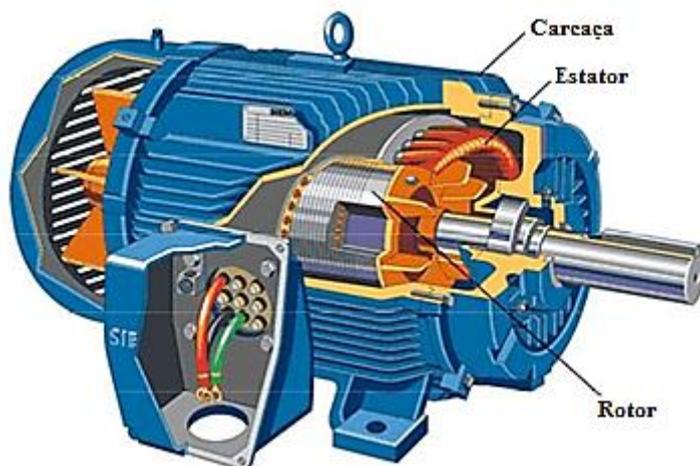


Fonte: Chapman (2013, p. 70)

### 2.3.3 Motores Elétricos

Um motor elétrico pode ser definido como uma máquina elétrica que realiza a conversão de uma energia elétrica em mecânica, podendo haver diversas aplicações, pois somente pelo fato de possuir uma corrente elétrica em um motor, produzirá movimento em um eixo mecânico (FRANCHI, 2008).

Figura 15 – Motor Elétrico



Fonte: Soluções Industriais. Disponível em [tinyurl.com/y4lhufnr](http://tinyurl.com/y4lhufnr). Acessado em 07 jul. de 2019

De acordo com FRANCHI (2008), os motores elétricos podem ser divididos em dois grupos, motores elétricos de corrente contínua (CC) e motores elétricos de corrente alternada (CA).

#### 2.3.3.1 Motores elétricos de corrente contínua (CC)

Segundo Chapman (2013, p. 404):

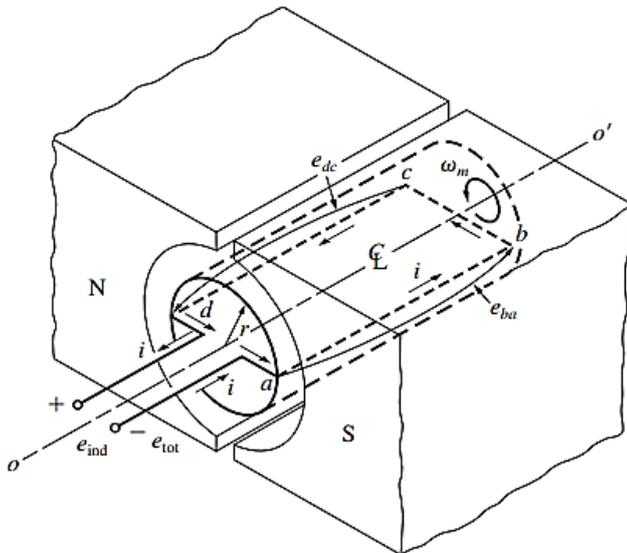
As máquinas CC são geradores que convertem a energia mecânica em energia elétrica CC e motores que convertem a energia elétrica CC em energia mecânica. A maioria das máquinas CC é como as máquinas CA no sentido de que elas contêm tensões e correntes CA em seu interior – as máquinas CC têm uma saída CC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

Os motores elétricos de corrente contínua (CC) são amplamente utilizados para situações onde haja um controle preciso da velocidade do eixo do motor, porém vem perdendo espaço para motores de corrente alternada (CA), como informa Fitzgerald (2006, p. 343), “[...]”

a tecnologia de estado sólido que é utilizada nos sistemas de acionamento de corrente alternada (CA) desenvolveu-se o suficiente para que esses sistemas estejam substituindo as máquinas de corrente contínua (CC) em aplicações antes associadas quase exclusivamente às máquinas de corrente contínua (CC).[...]"

A figura 16 mostra em perspectiva um exemplo de motor elétrico de corrente contínua (CC). Esta máquina possui um enrolamento de apenas um fio fixado no eixo rotativo da máquina, denominado rotor e a parte fixa do motor é denominado estator, que com auxílio de comutadores, permitem que com uma corrente contínua (CC) possa movimentar o eixo. (CHAPMAN, 2013).

Figura 16 – Projeção isométrica de um motor elétrico de corrente contínua (CC)



Fonte: Chapman (2013, p. 406)

### 2.3.3.2 Motores elétricos de corrente alternada

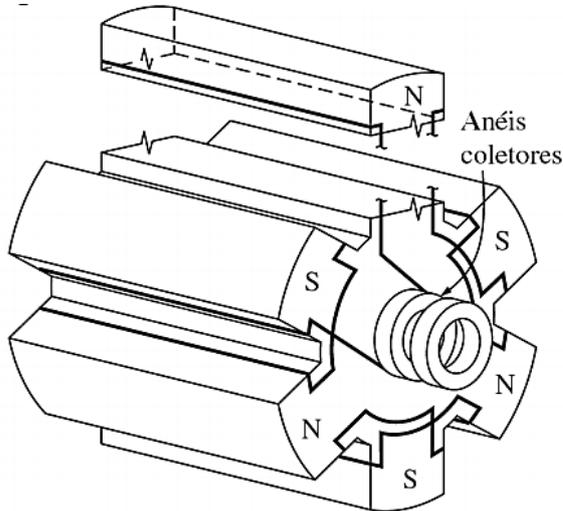
Motores elétricos de corrente alternada convertem uma energia elétrica de corrente alternada em uma energia mecânica de alto torque. Segundo Chapman (2013, p. 152), “Os princípios fundamentais das máquinas de corrente alternada (CA) são muito simples, mas infelizmente são obscurecidos pela construção complicada das máquinas reais. ”

Fitzgerald (2006, p. 177), define que:

As máquinas CA tradicionais classificam-se em duas categorias: síncronas e de indução. Nas máquinas síncronas, as correntes do enrolamento do rotor são fornecidas através de contatos rotativos fixados diretamente na parte estacionária do motor. Nas

máquinas de indução, as correntes são induzidas nos enrolamentos do rotor por meio da combinação da variação, no tempo, de correntes no estator e do movimento do rotor em relação ao estator.

Figura 17 – Motor Elétrico Síncrono



Fonte: Chapman (2013, p. 193)

Nos motores síncronos, a corrente de excitação, ou seja, a corrente de campo magnético é de uma fonte de corrente contínua, ao passo que os motores de indução, a corrente de excitação é fornecida por indução magnética nas bobinas de campo (CHAPMAN, 2013).

### 2.3.4 Geradores Elétricos

O gerador elétrico é uma máquina elétrica onde possui a função de converter a energia mecânica obtida a partir de uma fonte primária em uma energia elétrica. O seu princípio de funcionamento são os mesmos que motores elétricos, com a diferença que a conversão de energia é inversa (CHAPMAN, 2013).

#### 2.3.4.1 Geradores Lineares

As máquinas lineares podem ser vistas como o resultado de uma máquina cilíndrica rotacional dividida ao longo de um eixo de plano radial. Da mesma maneira que uma máquina rotativa, as máquinas lineares também podem ser reversíveis, ou seja, podem atuar como um motor, assim transformando energia elétrica em energia mecânica ou então como um gerador, transformando energia mecânica em elétrica (CHIARAMONTE, 2016).

Um gerador elétrico linear é um conversor de energia eletromecânica que ao se acionar um movimento no seu linor<sup>1</sup>, irá converter essa energia mecânica em elétrica de corrente alternada. Neste sistema linear, a energia mecânica recebida é de movimento unidirecional ou então bidirecional (BOLDEA et al, 2005).

O princípio de funcionamento de um gerador linear é exatamente igual ao de um gerador rotativo convencional. A única diferença consiste na forma como a fonte de energia mecânica estabelece o movimento no linor, um movimento linear. (CORDOVIL, 2013).

O gerador elétrico linear é formado por duas partes: o estator e o linor. O estator compõe a parte fixa do gerador, onde encontra-se um enrolamento inserido em um material magnético ou não, onde ocorrerá a variação do fluxo magnético.

O linor é a parte móvel do gerador, onde irá receber a energia mecânica para que gere movimento. O linor é o responsável pela geração do campo magnético principal, podendo conter ímãs permanentes em todos o seu eixo ou então bobinas, dependendo do tipo de gerador linear utilizado (JULIANI, 2011).

#### *2.3.4.1.1 Tipos de geradores lineares*

Os geradores lineares, assim como os geradores rotativos possuem uma variedade de tipos que se diferem por variados princípios de funcionamento, podendo ser citados os geradores de indução, geradores de corrente contínua e geradores síncronos.

Os geradores de indução possuem o seu enrolamento de forma similar ao de geradores de indução em máquinas rotativas. “O linor consiste em uma placa, podendo ser apoiada em um material ferromagnético ou em gaiola. Raramente é utilizado enrolamento em sua constituição, como os rotores bobinados” (JULIANI, 2011).

Dependendo da construção do gerador linear de indução, dois tipos de fluxo magnético poderão ser apresentados, de acordo com Juliani (2011, p. 48): “longitudinal, em que as linhas

---

<sup>1</sup> “O nome linor foi proposto pelo professor E. R. Laithwaite em 1957 para denominar então o eixo utilizado em motores em que o seu movimento não se caracteriza como rotativo, caracterizando o eixo então com movimento linear” (JULIANI, 2011).

de fluxo são paralelas à direção do movimento do campo magnético, ou transversal, em que as linhas são perpendiculares à direção de movimento do campo magnético.”

O tipo de fluxo magnético longitudinal apresenta característica de possuir uma baixa corrente de magnetização, sendo uma vantagem se comparado com o tipo transversal, que possui característica de poder gerar suspensão eletrodinâmica, muito utilizado em sistemas de veículos elétricos, como trem bala (JULIANI, 2011).

Segundo Sakamoto e Paes (2016, p. 20):

Os motores de corrente contínua são compostos de um estator, componente onde normalmente estão alocados os ímãs permanentes ou eletroímãs que produzem um campo magnético constante, e um rotor composto de um enrolamento, conhecido como enrolamento de armadura, por onde circula corrente contínua produzindo também um campo magnético. A interação, atração ou repulsão, entre os campos magnéticos do estator e do rotor produz uma força que faz com que o rotor se movimente. A corrente de armadura deve ter seu sentido invertido de tal forma que altere os polos do rotor, a fim de manter a oposição destes em relação aos polos do estator e, assim, proporcionar a continuidade do movimento

De acordo com Juliani (2011, p. 48), os geradores lineares de corrente contínua “[...] embora teoricamente plausíveis, são de pouco interesse prático[...]”, pelo fato de apresentar baixa confiabilidade, baixa eficiência se comparado a geradores síncronos e manutenção periódica (BARROCA, 2012).

A denominação de geradores lineares síncronos se dá pelo fato de que o linor trabalha em uma velocidade síncrona do campo. De acordo com Sakamoto e Paes (2016), “os geradores síncronos apresentam duas partes básicas, sendo elas: o enrolamento do campo de excitação, alimentado por corrente contínua ou então por ímãs permanentes e o enrolamento da armadura, responsável por gerar o campo móvel.”

#### 2.3.4.1.2 *Morfologia de Geradores lineares*

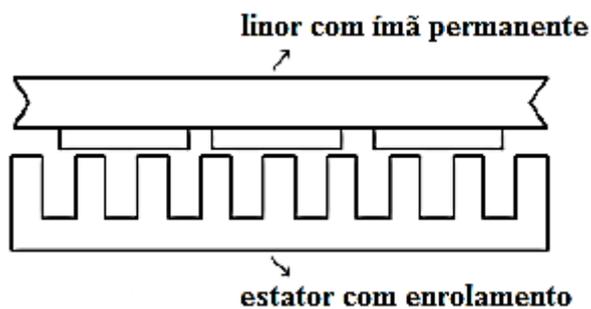
Segundo Juliani (2011), os geradores lineares podem possuir diversas formas de construção dependendo da sua aplicação. Como um gerador linear é composto de dois componentes, o linor e o estator.

Um estator pode ser construído possuindo ou não um núcleo ferromagnético. Entretanto, segundo Juliani (2011), um estator pode se diferenciar também pelo seu comprimento, quantidade de faces e presença ou não de ranhuras.

Em relação ao comprimento do estator, poderá apresentar um comprimento mais longo ou mais curto. O comprimento mais curto possui melhor eficiência se comparado ao mais longo, pois como apresentará um menor número de bobinas, haverá uma perda menor. Entretanto no comprimento mais longo a densidade de corrente será maior (JULIANI, 2011).

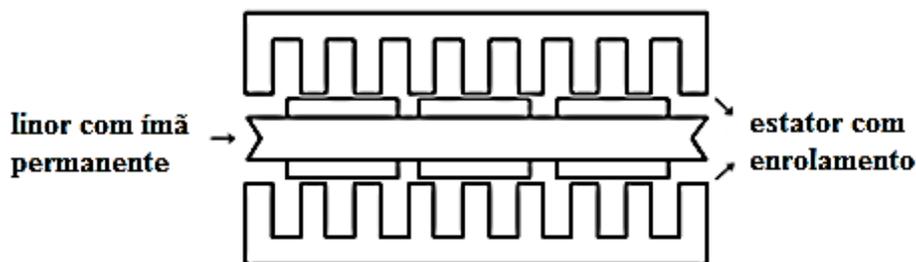
Como apresentado na figura 18 e 19, o estator pode também se diferenciar pela quantidade de faces, sendo única ou dupla, indicando a quantidade de estatores o gerador linear possuirá. A aplicação de cada tipo de face dependerá do tipo de gerador a ser utilizado, sendo a face dupla para utilização de um gerador mais compacto e de face única ser de mais fácil construção (JULIANI, 2011).

Figura 18 – Gerador linear com estator de face única



Fonte: JULIANI (2011)

Figura 19 – Gerador linear com estator de face dupla



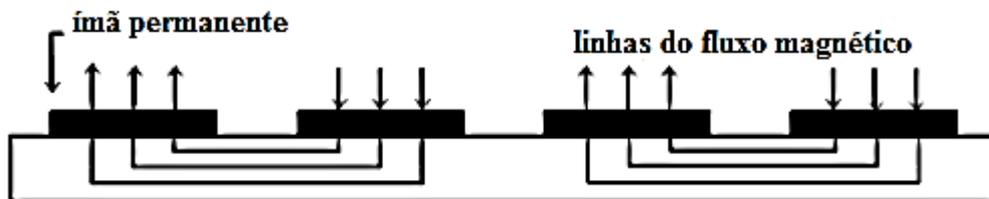
Fonte: JULIANI (2011)

O fato de não conter ranhuras no estator pode, de acordo com Juliani (2011), “eliminar as oscilações na força causada pela variação periódica da relutância devido à presença de dentes e ranhuras, e melhora o desempenho dinâmico”.

Podemos citar como morfologia possível de um linor dois tipos distintos de configuração: linor com ímãs e o linor de enrolamento (JULIANI, 2011).

O linor com ímãs é o mais comum, onde exige-se uma simplicidade mecânica. De acordo com Juliani (2011), o linor com ímãs “[...] consiste em um suporte, com a função de caminho para o retorno do fluxo magnético, e ímãs que podem estar dispostos em sua superfície ou em seu interior”.

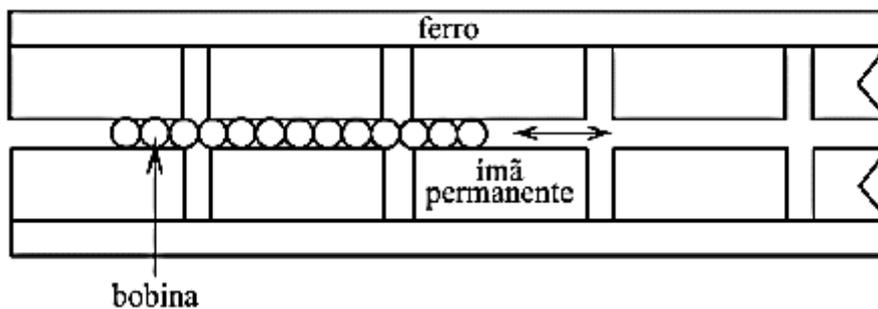
Figura 20 – Linor de ímãs de superfície



Fonte: JULIANI (2011)

O tipo de linor de enrolamento apresenta bobinas ao redor da estrutura do linor, como na figura 21. “Este tipo de configuração é o que oferece a maior taxa de força/inércia. Pode ser projetado para atingir níveis de força com oscilações extremamente baixas, devido à ausência da força de relutância [...]” (JULIANI, 2011).

Figura 21 – Linor de enrolamento



Fonte: JULIANI (2011)

### **3 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO**

Neste capítulo será apresentado todo o desenvolvimento prático do gerador linear, desde a definição do tipo de gerador a ser projetado até os detalhes da construção que foram efetuados durante o desenvolvimento deste trabalho.

#### **3.1 ESCOLHA DO TIPO DE GERADOR LINEAR**

Para a elaboração e construção do gerador linear, foi levado em consideração toda a fundamentação teórica vista sobre cada parte construtiva de um gerador linear, no qual a escolha da topologia utilizada do estator e linor será apresentado a seguir.

##### **3.1.1 Estator**

Em um projeto de um gerador linear, o tamanho do seu estator irá depender da aplicação em que este gerador será projetado. O material da armadura poderá ser composto de um material ferromagnético ou não (JULIANI, 2011).

###### **3.1.1.1 Comprimento**

Segundo Juliani (2011), “as diferenças entre o estator com maior comprimento e o de um de menor comprimento interfere no cálculo de eficiência, custo, comportamento térmico e nos conectores elétricos, sem influenciar o modelo magnético final. ”

Levando em consideração os meios construtivos, um estator de menor comprimento pode apresentar uma eficiência maior, pois as perdas que irão apresentar nos possíveis enrolamentos de cobre serão menores. Já em um estator mais longo, a densidade de corrente presente no estator é maior (Juliani, 2011).

###### **3.1.1.2 Tipo de face**

Um estator de um gerador linear pode apresentar dois tipos de configuração em relação a sua face, como mostrado nas figuras 18 e 19: face única ou face dupla.

De acordo com Juliani (2011), “a definição de qual tipo de face utilizar em um projeto dependerá de características mecânicas.” Com um gerador de uma face pode apresentar uma menor geração de energia elétrica, pelo fato de apresentar somente um lado do estator.

Mesmo que apresente uma maior facilidade no controle e construção do gerador utilizando apenas uma face, será utilizado no projeto a configuração de face dupla, deixando o projeto mais compacto e com maior aproveitamento da geração gerada.

### 3.1.2 Linor

#### 3.1.2.1 Tipo de linor

De acordo com BOLDEA et al (2005), um gerador linear pode apresentar um linor do tipo planar ou tubular. O linor do tipo planar apresenta uma densidade de força resultante menor que o linor do tipo tubular (Juliani, 2011), entretanto possui característica construtiva mais simples.

O fato de apresentar uma superfície plana no linor como na figura 22, permite que seja utilizado a configuração com ímãs permanentes de forma mais simples e eficaz, pois utilizando um linor tubular exigiria a elaboração de um ímã permanente com um certo ângulo, de forma a manter uma forma de um semicírculo, sendo de difícil obtenção para o projeto.

Figura 22 – Linor planar de aço carbono 1020.



Fonte: O autor

#### 3.1.2.2 Tipo de excitação

Em um linor, de acordo com Juliani (2011), pode apresentar duas formas de excitação como mostrado na figura 20 e 21: com ímãs permanentes ou de enrolamento.

Um linor com a presença de ímãs permanentes é a topologia mais comum de construção. Este tipo de configuração apresenta uma simples forma construtiva, melhor aproveitamento por ocupar também um menor espaço e menor peso (BOLDEA et al., 2005).

Em um linor de enrolamento, apresenta uma dificuldade construtiva maior, principalmente pelo fato de que apresenta uma resistência térmica maior que com ímãs permanentes, necessitando-se de uma refrigeração caso a frequência da fonte mecânica no linor seja com alta velocidade (Juliani, 2011).

### 3.1.2.3 Tipo de ímã permanente

Os ímãs utilizados em um linor com ímãs permanentes podem variar dependendo da aplicação, podendo estes ímãs serem ímãs NdFeB (neodímio-ferro-boro) ou popularmente chamado “ímã de neodímio” ou “ímã de terras-raras”, ímã SmCo (Smário-Cobalto), Alnico e Ferrita.

Os ímãs NdFeB e SmCo, de acordo com Juliani (2011), possuem um produto de energia máximo superior aos ímãs de Alnico e principalmente de ferrita. Segundo Juliani (2011), o ímã de neodímio apresenta melhores resultados para geração de energia, pois apresenta um produto de energia maior para um menor ímã.

## 3.2 DEFINIÇÃO DO MATERIAL DOS COMPONENTES DO GERADOR LINEAR

Neste tópico será apresentado as definições dos materiais a serem utilizados para a montagem do protótipo de gerador linear.

Para auxiliar na definição do tipo de material a ser utilizado como componente do gerador linear, bem como outras definições de dimensionamento, foi utilizado o software FEMM (Finite Element Method Magnetics).

O software FEMM permitiu efetuar simulações do comportamento das linhas de campo magnético gerado no circuito, assim podendo definir o melhor tipo de material para o protótipo.

### 3.2.1 Software FEMM

O software FEMM é um programa para Windows, onde é possível solucionar problemas magnéticos em 2D e axissimétricos, eletroestáticos, fluxo de calor e fluxo de corrente com gráficos pré-processados e pós-processados.

Neste software, permite-se que seja definido uma geometria em 2D, onde nessa geometria pode ser definido um material com propriedades magnéticas específicas de uma biblioteca do software ou então definida manualmente e assim podendo ser aplicado em problemas práticos, conseguindo definir o comportamento do sistema.

### 3.2.2 Ímã permanente

Os ímãs encontrados no mercado para aquisição, possuem diversas formas, tamanhos e tipos. Para melhor aproveitamento no protótipo, foi efetuado a busca inicialmente por um ímã NdFeB (neodímio).

Este tipo de ímã encontra-se com facilidade no mercado, pois é bem difundido comercialmente, entretanto com um formato de uma circunferência, não podendo ser utilizada no protótipo, por razões construtivas. O ímã escolhido foi de um tipo retangular, onde será possível manusear mais facilmente e com uma aplicabilidade melhor no protótipo, já que o eixo escolhido a ser utilizado será planar.

Antes da aquisição do ímã de neodímio foi efetuado algumas simulações no software FEMM, utilizando ímãs de neodímio retangulares, distribuídos regularmente em um linor de alumínio de cerca de 30 centímetros. Nesta primeira simulação, foi definido que os ímãs apresentariam polos nos sentidos apresentado na figura 23.

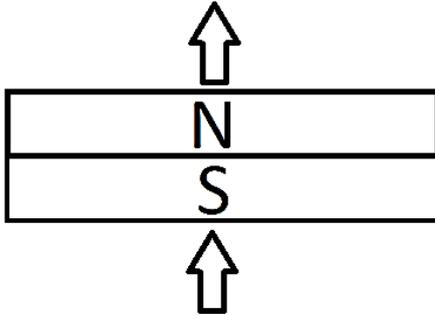
Figura 23 – Polos do ímã de neodímio definidos inicialmente no trabalho.



Fonte: O autor

Entretanto, após a aquisição de cerca de 30 ímãs de neodímio retangulares, foi verificado que o comportamento dos polos não é de acordo com a figura 23, sendo que os ímãs seguem o comportamento da figura 24, modificando totalmente a simulação inicialmente efetuada,

Figura 24 – Comportamento dos polos magnéticos dos ímãs de neodímio.



Fonte: O autor

### 3.2.3 Linor

Foi definido um tipo de aço ferromagnético, onde permita estar utilizando como um linor, o aço carbono 1020. Por ser apenas comercializado na região como uma barra maciça e em proporções aplicáveis no protótipo do gerador linear, o aço carbono 1020, demonstrado na figura 22, foi definido para utilizar como linor no protótipo. O aço carbono 1020 é um dos aços mais comuns encontrados, pois possui características de excelente conformabilidade, soldabilidade e baixo-custo (LUZ, 2019).

De acordo com LUZ (2019), podemos definir a composição química do aço carbono 1020 de acordo com a tabela 2.

Tabela 2 – Composição química do aço carbono 1020

Elemento Químico	Concentração (%)
Manganês (Mn)	0,30 a 0,60
Carbono (C)	0,18 a 0,23
Enxofre (S)	0,05 (máx.)
Fósforo (P)	0,04 (máx.)
Ferro (Fe)	99,08 a 99,43

Fonte: LUZ (2019)

### 3.2.4 Estator

Para a elaboração do estator do gerador linear, foi inicialmente avaliada a utilização do material aço-silício. O aço-silício possui características de possuir uma pequena área de histerese, apresentando uma perda por histerese pequena e grande permeabilidade, sendo muito utilizado na fabricação de máquinas elétricas (GARRISON, AARONSON, KUMAR, 2017).

O aço-silício é um material utilizado por fabricantes de máquinas elétricas em geral e, portanto, sua venda muito específica. Infelizmente apenas foi localizado a venda de materiais de aço-silício em grande escala, como grandes bobinas de lâminas de aço-silício, tornando-se inviável a sua utilização.

Foi verificado vários tipos de aços, onde possuem uma permeabilidade para que possam servir como material do estator. Foi definido o uso do aço inoxidável 430. De acordo com o International Stainless Steel Forum - ISSF (2019), existem três tipos de aço inoxidável: aço inoxidável martensítico, aço inoxidável ferrítico e aço inoxidável austenítico.

O aço inoxidável austenítico é um tipo de aço inoxidável que não é magnético, não podendo ser aplicado no protótipo de gerador linear. Tanto o aço inoxidável ferrítico quanto o aço inoxidável martensítico possuem características magnéticas, podendo ser aplicados como material para o estator, sendo o aço inoxidável 430 um tipo de aço inoxidável martensítico (ISSF, 2019)

Este tipo de aço inoxidável é encontrado em diversos tipos de espessuras e tamanhos. Para facilitar na construção do gerador linear, onde a definição da espessura dos dentes pode variar, foi adquirido uma chapa de aço inoxidável 430 com espessura de 0,5 milímetros, com 3 metros de comprimento e 1,25 metros de largura.

### 3.3 DIMENSIONAMENTO DOS MATERIAIS DO GERADOR LINEAR

Neste tópico será apresentado as definições das dimensões a serem utilizadas para construção do gerador linear, levando em consideração simulações efetuadas. Para o projeto, foi adquirido o ímã de neodímio da figura 25 com as especificações da tabela 3.

Figura 25 – Ímã de Neodímio.



Fonte: Fornecedor MundoMag - <https://tinyurl.com/y46pv3e2> - Acessado em 20 de out. de 2019.

Tabela 3 – Especificações do ímã de neodímio

Formato	Bloco
Material	Neodímio
Medida	25x15x5mm
Máx. Temperatura de Trabalho	80°C
Força de Tração Vertical	7,350kg
Grade Magnética	N35
Campo Magnético em Gauss	2650

Fonte: Fornecedor MundoMag - <https://tinyurl.com/y46pv3e2>

Para melhor utilizar o ímã no protótipo foi definido que sua instalação no linor seria distribuído uniformemente com um certo espaçamento para que as linhas de fluxo geradas fossem mais bem aproveitadas nos dentes do estator.

Para comportar vários ímãs acoplados no linor, o linor necessitaria de uma largura mínima de cinco centímetros, a ponto de que dois ímãs de neodímio pudessem ficar lado a lado. Portanto foi inicialmente utilizado um linor de trinta centímetros de comprimento, cinco centímetros de largura (cerca de duas polegadas) e dois centímetros e meio de espessura (cerca de uma polegada) de acordo com a figura 26.

Figura 26 – Linor de aço carbono 1020 com 30 centímetros de comprimento

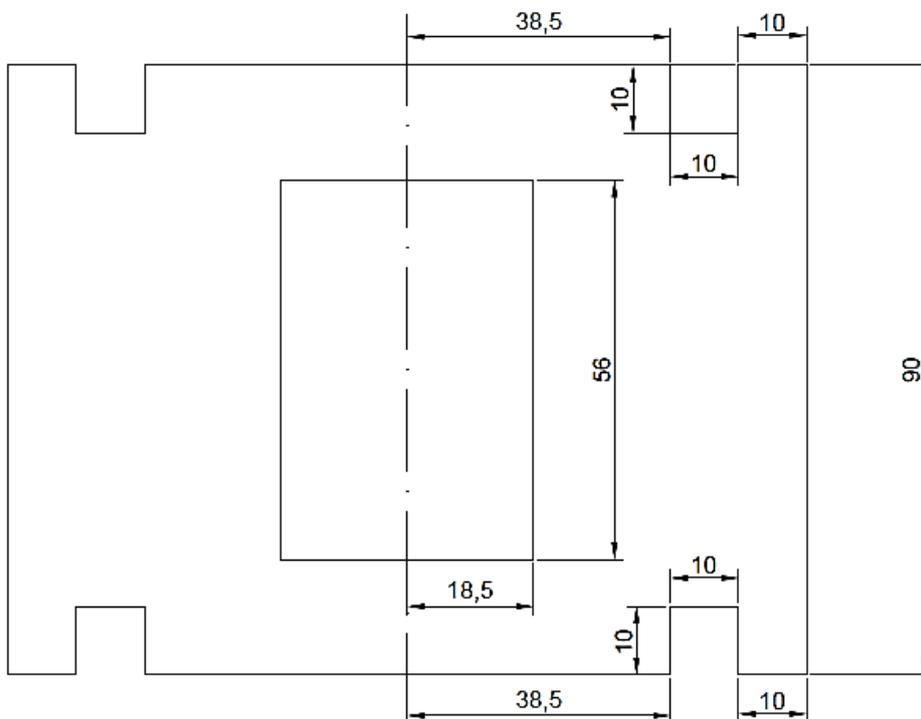


Fonte: O autor

Para que a chapa de aço inoxidável sirva de núcleo para o gerador linear, foram efetuados alguns cortes transformando a chapa em pequenas lâminas. Para que possa ser simulado dentes dentro do núcleo, foi elaborado dois tipos de cortes, para que ao se aglomerar, simular dentes internos ao núcleo.

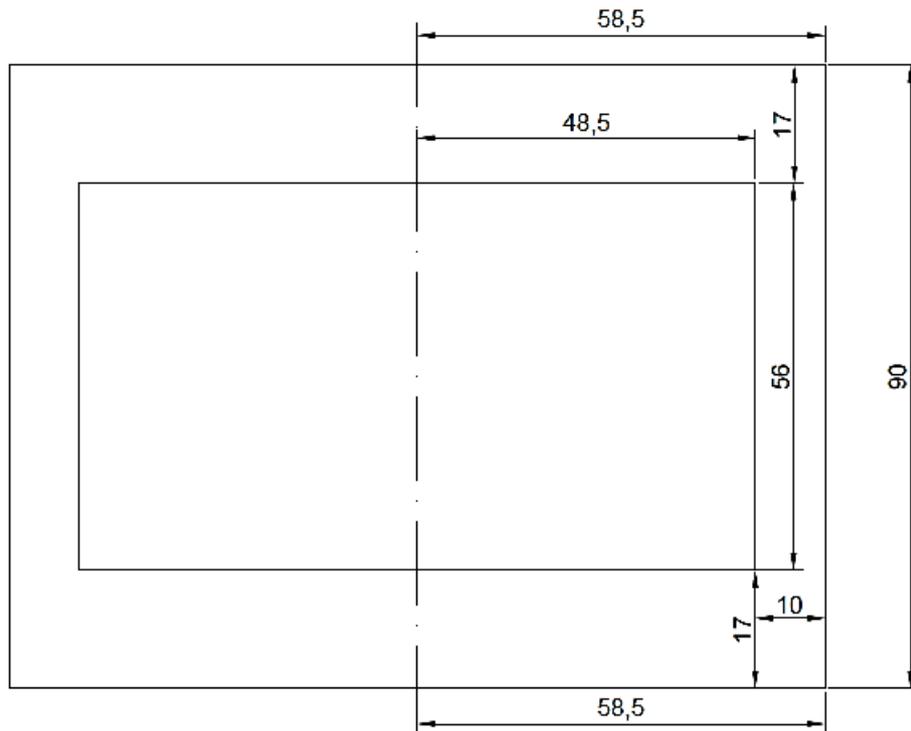
Estes cortes foram efetuados com uma máquina de corte industrial a laser seguindo o desenho efetuado na figura 27 e na figura 28, sendo suas dimensões em milímetros.

Figura 27 – Corte da lâmina com dente longo.



Fonte: O autor

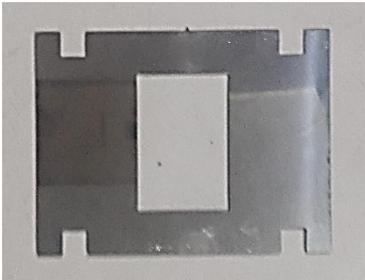
Figura 28 – Corte da lâmina de dente curto.



Fonte: O autor

O corte efetuado resultou em um total de 312 peças de lâmina, sendo metade de cada tipo de dente. Logo depois foi efetuado uma lavagem para retirada de materiais indesejados provindo do corte a laser, sendo assim obtido com sucesso as lâminas a serem utilizadas no projeto com as medidas corretas, conforme as figuras a seguir.

Figura 29 – Lâmina de dente longo



Fonte: O autor

Figura 30 – Medida lateral de 90 milímetros da lâmina de dente longo.



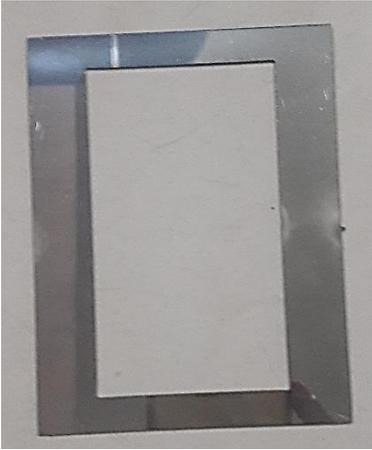
Fonte: O autor

Figura 31 – Medida lateral de 117 milímetros da lâmina de dente longo.



Fonte: O autor

Figura 32 – Lâmina de dente curto.



Fonte: O autor

Figura 33 – Medida lateral de 90 milímetros da lâmina de dente curto.



Fonte: O autor

Figura 34 – Medida lateral de 117 milímetros da lâmina de dente curto.



Fonte: O autor

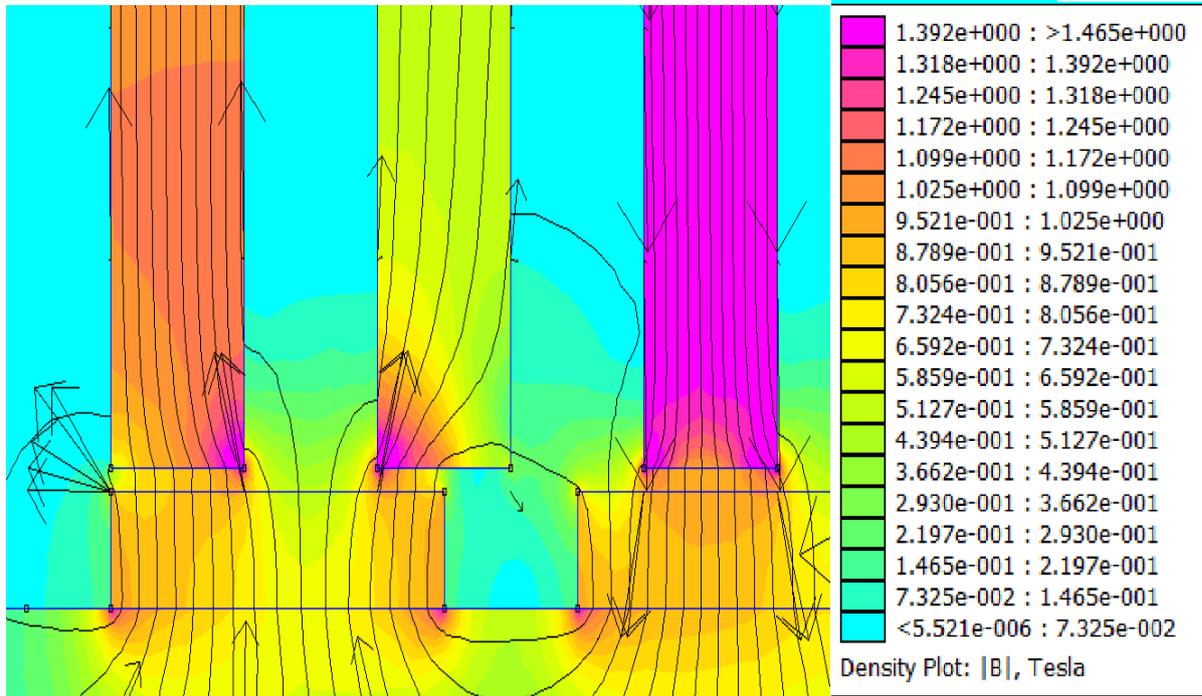
Definidos os parâmetros do linor, estator e do ímã permanente, foram efetuadas algumas simulações para definição da espessura de dente em que se melhor aplica ao protótipo de gerador linear.

Como o software FEMM apenas efetua simulações em 2D, foi analisado o valor da densidade de fluxo magnético que adentra cada dente individualmente, levando-se em consideração uma distância de um centímetro para cada ímã.

Foi também disposto nas simulações os ímãs em que os seus polos se alternassem, fazendo com que o fluxo magnético adentrasse e saísse respectivamente em cada ímã. Tal aplicação na simulação impõe que o sentido do fluxo avance transversalmente nas lâminas de aço inoxidável, fazendo com que o fluxo passasse ortogonalmente em cada lâmina, não sendo o desejável.

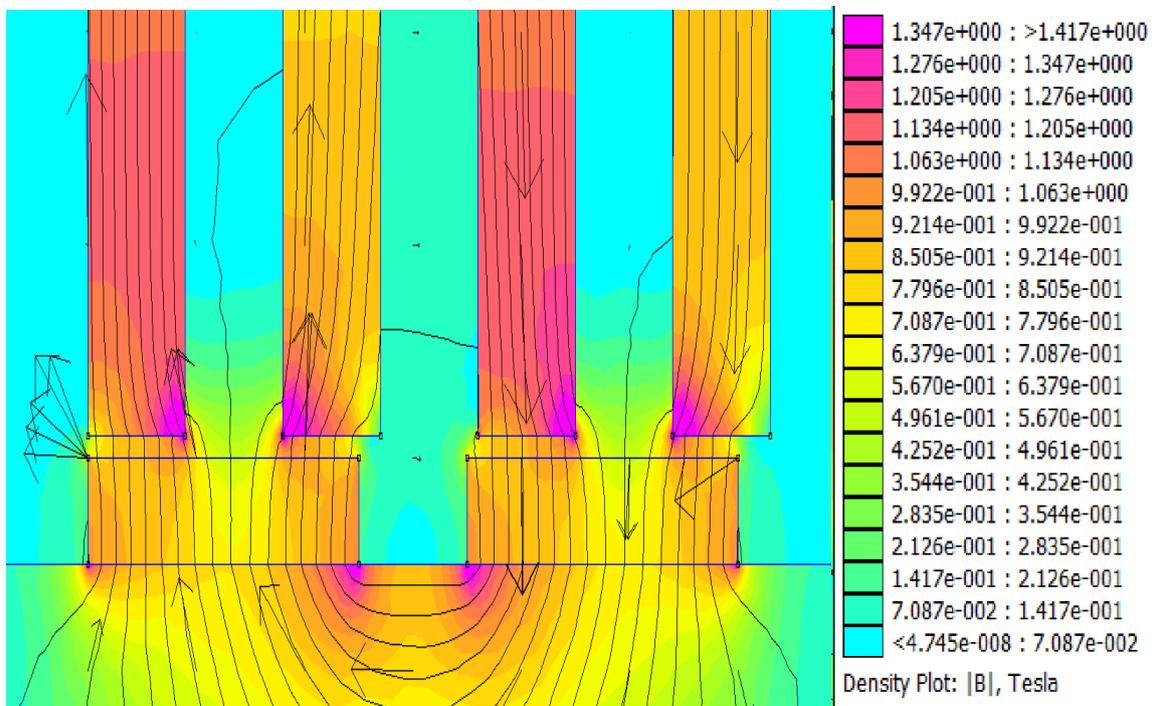
Entretanto, o que está sendo analisado nesta simulação é apenas a densidade de fluxo que adentra no dente e não o seu comportamento interno ao núcleo, podendo ser assim levado a simulação no software FEMM em consideração para avaliar a melhor espessura a ser utilizada no protótipo do gerador linear. As figuras 35, 36, 37, 38, 39 e 40 mostram a densidade de fluxo magnético de cada espessura diferente.

Figura 35 – Densidade de fluxo magnético com dente de 1 centímetro.



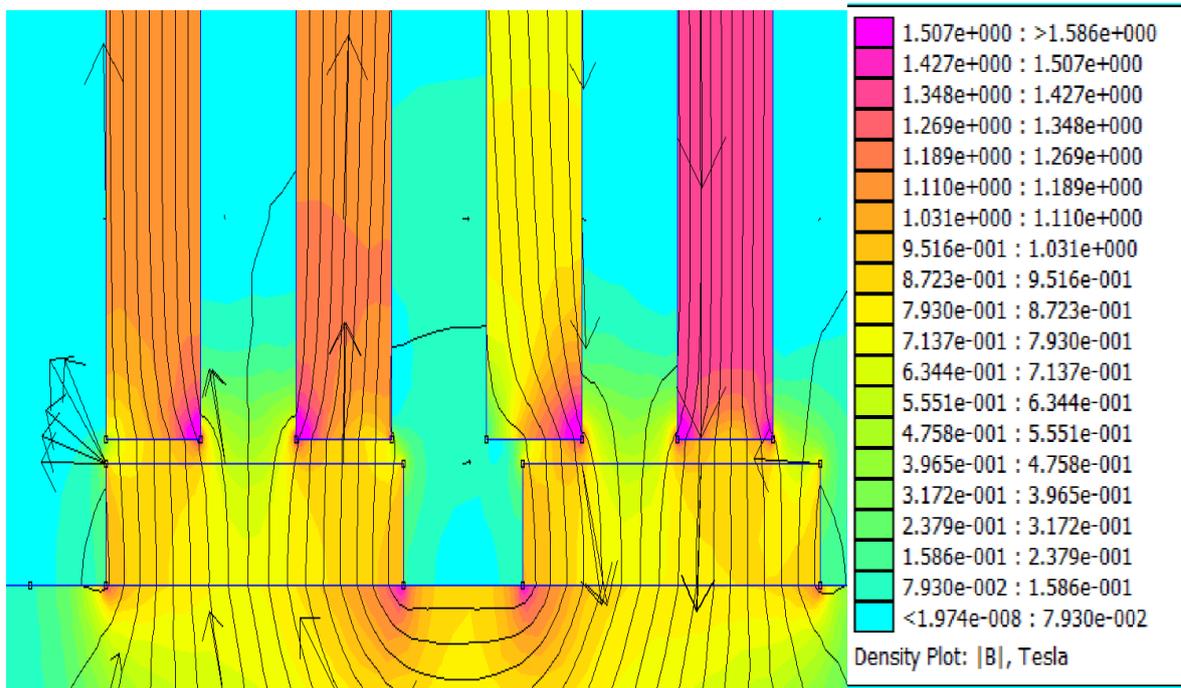
Fonte: O autor

Figura 36 – Densidade de fluxo magnético com dente de 0,9 centímetros.



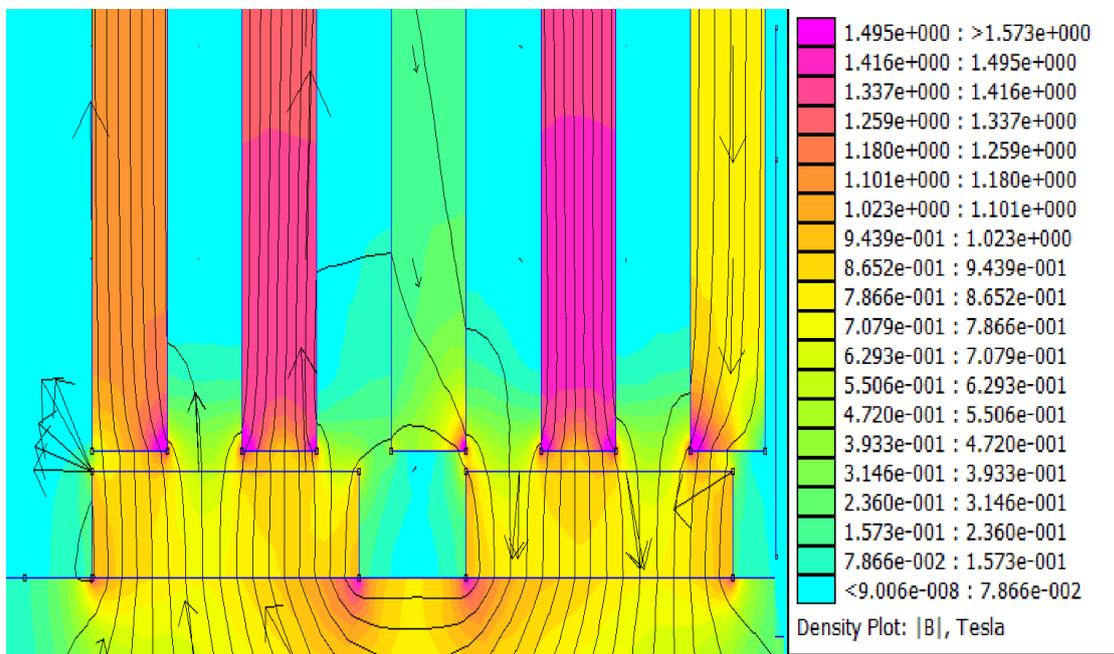
Fonte: O autor

Figura 37 – Densidade de fluxo magnético com dente de 0,8 centímetros.



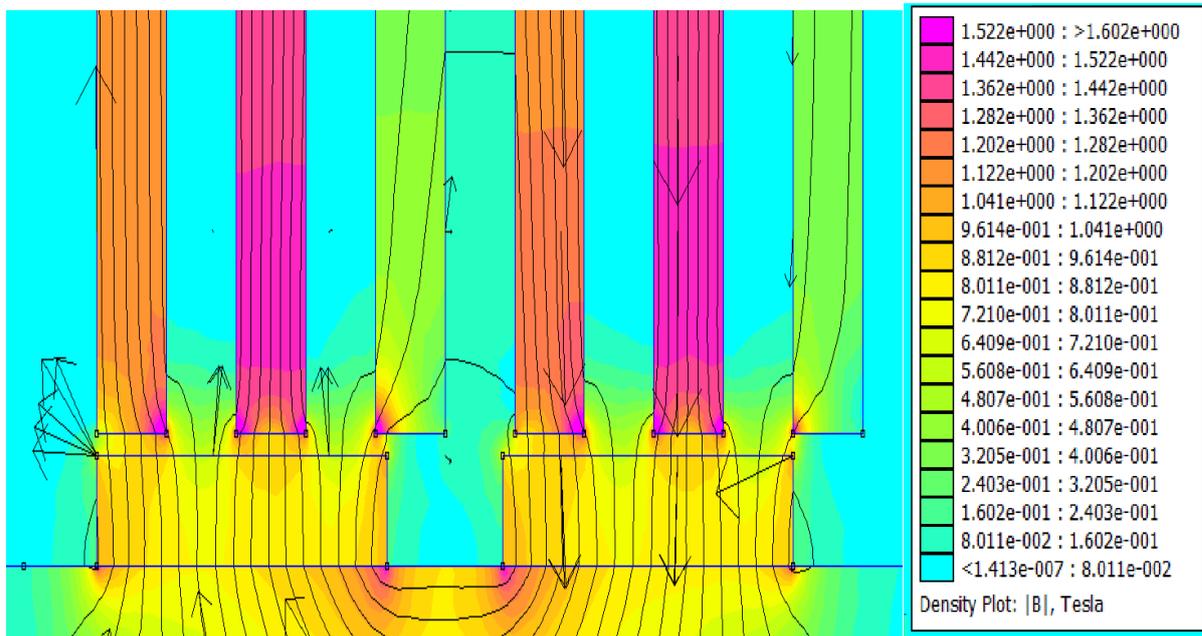
Fonte: O autor

Figura 38 – Densidade de fluxo magnético com dente de 0,7 centímetros.



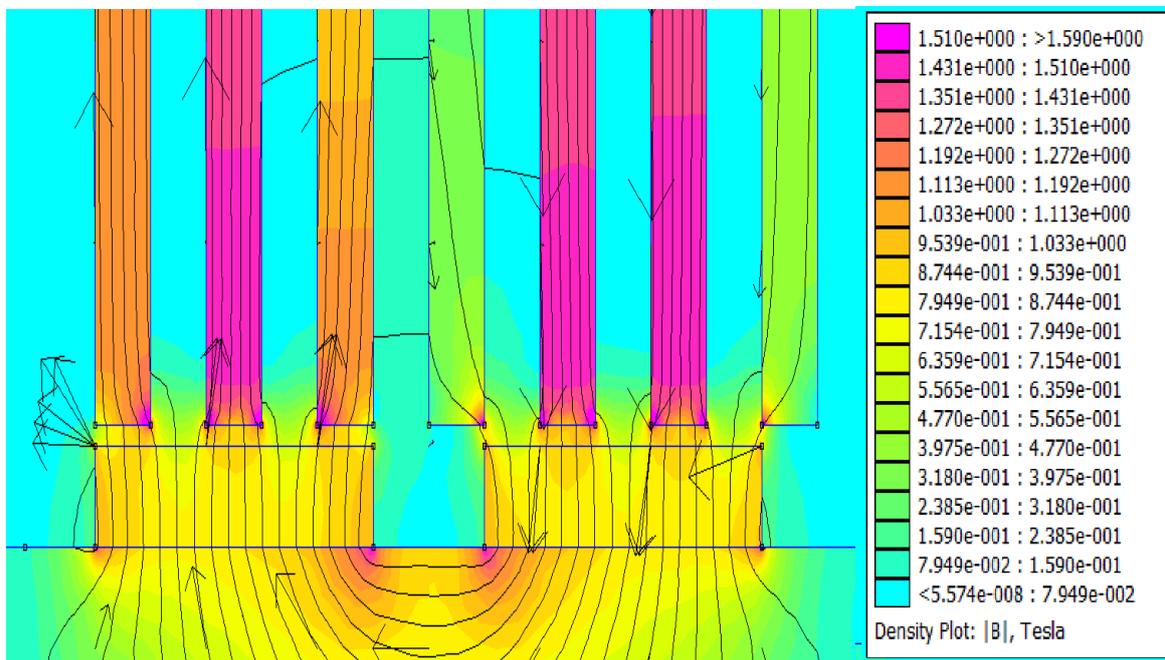
Fonte: O autor

Figura 39 – Densidade de fluxo magnético com dente de 0,6 centímetros



Fonte: O autor

Figura 40 – Densidade de fluxo magnético com dente de 0,5 centímetros



Fonte: O autor

Verificado pelas simulações que quanto menor a espessura do dente, maior a concentração de linhas de fluxo presentes no dente, conseqüentemente quanto maior a espessura do dente, as linhas de fluxo tendem a se dividir entre todos os dentes, tendendo a uniformidade.

Nessas simulações foi buscado dois fatores importantes para a construção do protótipo:

- a) O primeiro fator é verificar em qual das simulações apresenta as maiores variações de fluxo magnético e maiores densidades de fluxo penetrando o dente, para que assim possa gerar uma força eletromotriz maior.
- b) O segundo fator é verificar dentre as melhores, qual é a possível de ser aplicada. Como a tendência da variação e densidade do fluxo é de aumentar, quando diminuir o dente, podemos levar em consideração a utilização da espessura de uma única lâmina para servir como dente (um dente de 0,5 milímetros), entretanto ficaria difícil aplicar no protótipo. Nas figuras 35, 36, 37, 38, 39 e 40 apresentaram uma densidade de fluxo de acordo com a tabela 4

Tabela 4 – Densidade de fluxo em espessuras diferentes.

Espessura (centímetro)	Densidade de fluxo (Tesla)
1	0,90
0,9	0,91
0,8	0,96
0,7	1,04
0,6	1,05
0,5	1,07

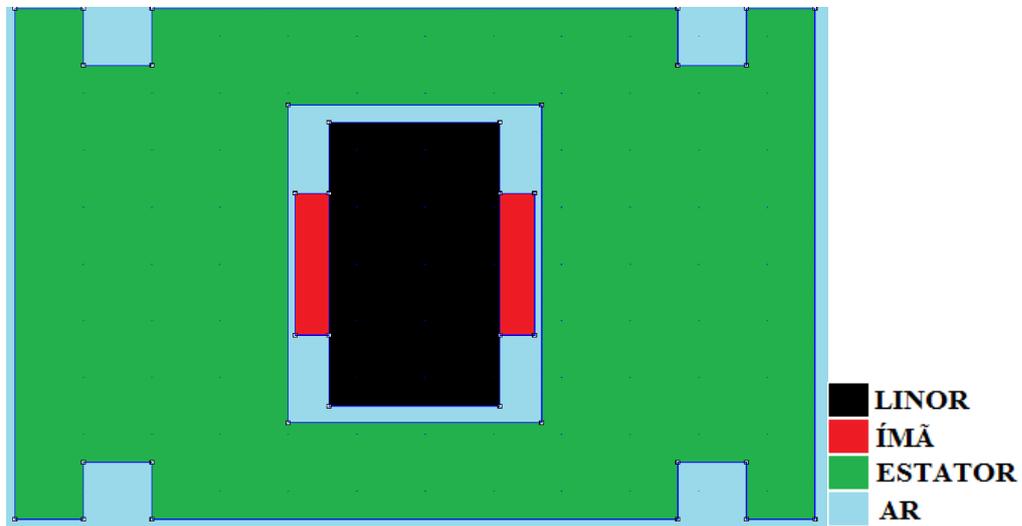
Fonte: O autor (2019)

Com a definição da espessura do dente em 0,5 centímetros, foi definido a quantidade de blocos de lâminas que irão formar dentes longos e curtos, pelo fato de existir 312 peças. Então foi definido que dezesseis blocos com dez lâminas de dente longo e quinze blocos com dez lâminas de dente curto irão compor todo o núcleo do protótipo do gerador linear.

Ao verificar que quanto menor o dente, maior a variação e densidade de fluxo no dente e determinado que a espessura a ser utilizada seria de 0,5 centímetros, foi determinado que a posição do ímã também poderia mudar, a fim de concentrar ainda mais as linhas de fluxo no

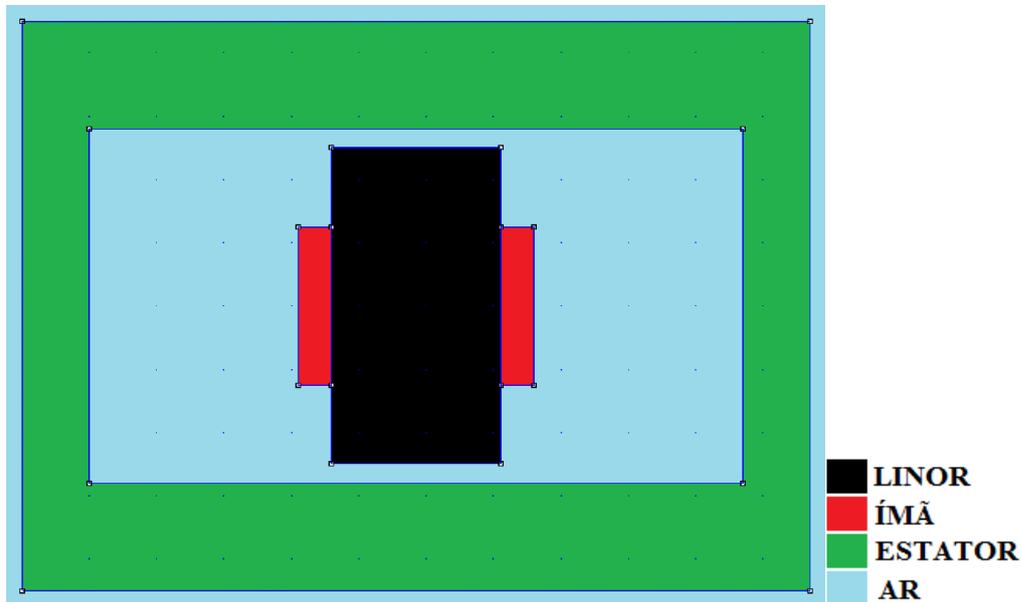
dente do estator. Para isso foi simulado uma vista frontal do linor com os ímãs nele conectado internamente no núcleo do gerador linear, conforme as figuras 41,42 e 43.

Figura 41 – Vista frontal da lâmina de dente longo com linor e os ímãs



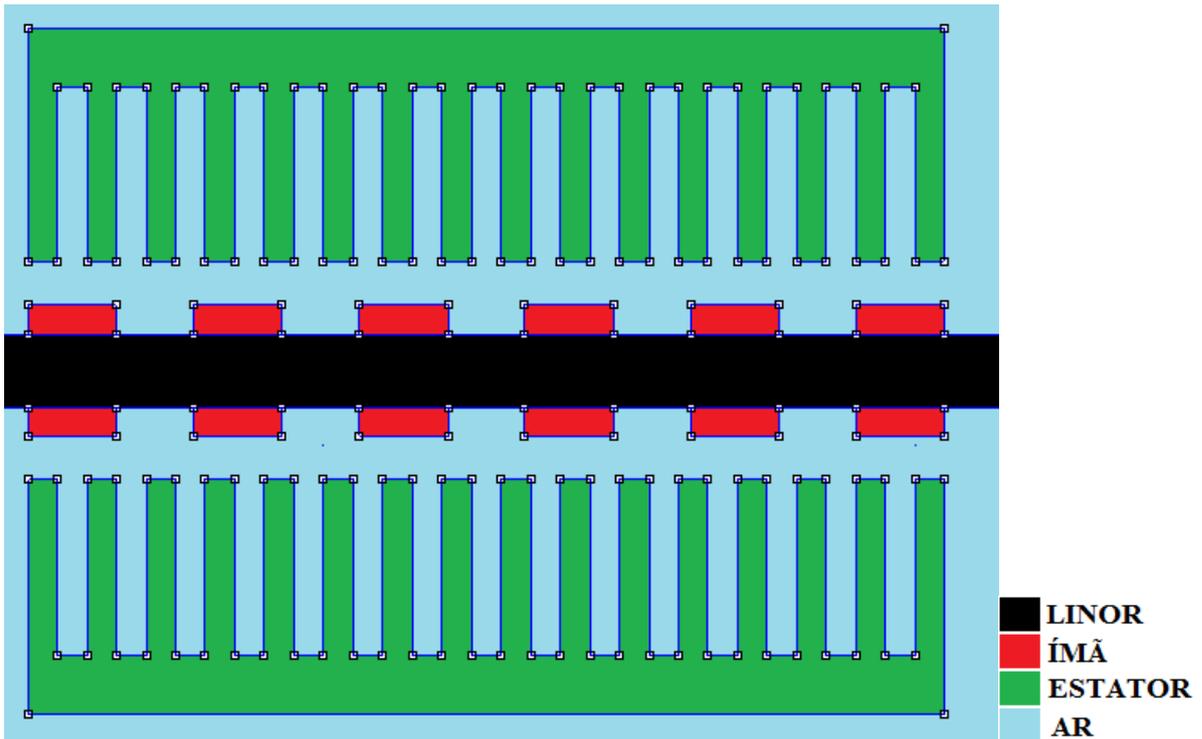
Fonte: O autor

Figura 42 – Vista frontal da lâmina de dente curto com linor e os ímãs



Fonte: O autor

Figura 43 – Vista superior, mostrando as lâminas de dente curto, longo com linor e os ímãs.



Fonte: O autor

Com o núcleo definido, foi efetuado um teste físico para verificar o comportamento dos ímãs com o núcleo laminado e a força necessária para movimentar o linor. A força de atração do ímã com um entreferro de cerca de 1 milímetro foi muito grande, não conseguindo sequer movimentar o linor e, portanto, foi adquirido um linor com uma espessura menor.

O novo linor também de aço carbono 1020, como consta na figura 44, possui cerca de quarenta centímetros de comprimento, mantendo sua largura de cinco centímetros, porém sua espessura foi diminuída pela metade, para cerca de meia polegada (cerca de 1,27 centímetros), aumentando o entreferro, diminuindo a força eletromotriz a ser gerada, porém possibilitando a prática de geração do gerador linear.

Figura 44 – Linor de aço carbono 1020.

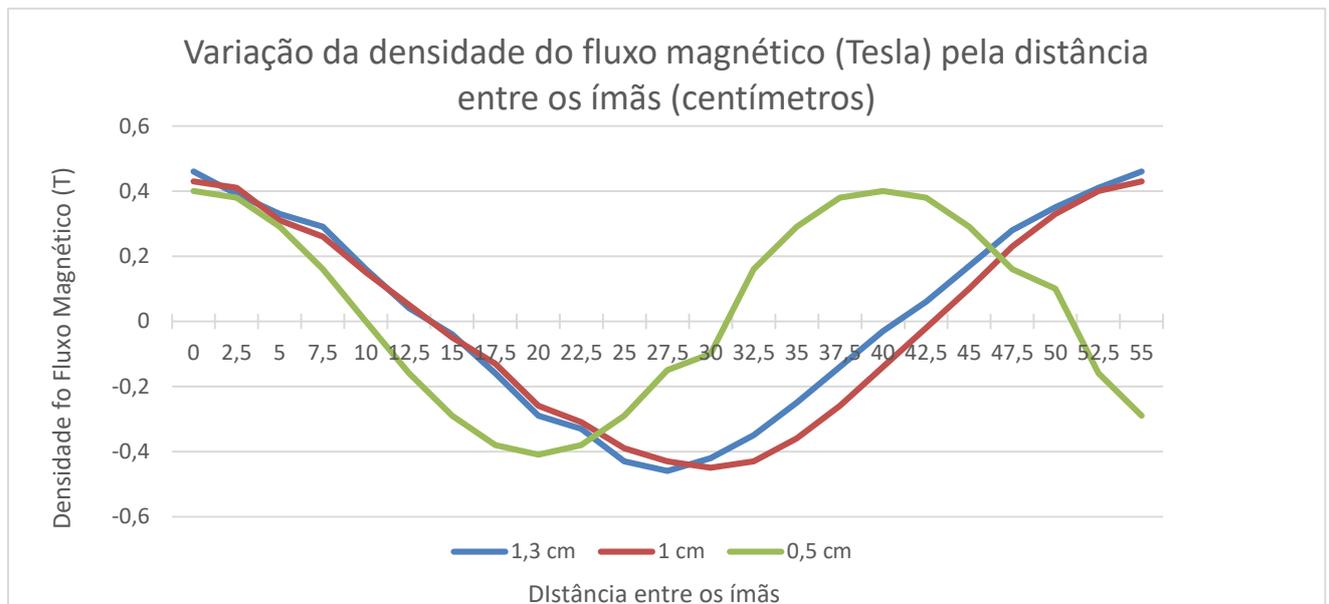


Fonte: O autor

Por fim, fica a necessidade de definir a distância entre os ímãs a ser utilizado. Para isso foram efetuadas simulações onde é previsto um movimento no linor do gerador linear a ponto de verificar o comportamento do fluxo e suas variações no tempo.

Como o software não possui recurso de simulação de movimento, foi alterado o posicionamento dos ímãs em cerca de 0,25 centímetros horizontalmente, a fim de verificar a alteração do fluxo magnético em um dente. Foi também definido na simulação que os polos dos ímãs sejam invertidos alternadamente, permitindo variar o fluxo para o potencial máximo positivo e para o potencial máximo negativo, conforme demonstrado no gráfico 1.

Gráfico 1 – Variação da densidade do fluxo magnético (Tesla) pela variação da distância entre os ímãs (centímetros).



Fonte: O autor (2019).

Verificado pelo gráfico que quanto menor a distância entre os ímãs, mais rápido será a variação da densidade de fluxo magnético do seu potencial máximo positivo ao potencial máximo negativo. Entretanto, ao aproximar muito os ímãs, a densidade de fluxo magnético máximo se diminui levemente, pelo fato de que algumas linhas de fluxo tendem a ir pelo ar diretamente ao ímã adjacente.

Isso ocorre pelo fato de ter diminuído o entreferro entre os ímãs, assim fecharão o circuito magnético entre eles e diminuirá as linhas de fluxo que passam pelos dentes do núcleo. Além deste fato, ao aproximar muito os ímãs, a força de atração entre eles aumentará, prejudicando e dificultando a construção do gerador.

Pelo fato de que a distância de um centímetro e de 1,3 centímetros mostraram pouca diferença, foi adotado a distância de 1,3 centímetros entre os ímãs, utilizando um separador de alumínio para manter a distância entre eles.

### 3.4 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DE GERADOR LINEAR

A construção do protótipo de gerador linear foi efetuada em quatro etapas distintas, construção dos dentes do estator, elaboração do enrolamento do estator, elaboração e colocação dos ímãs permanentes no linor e fixação do gerador linear.

#### 3.4.1 Construção dos dentes do estator

Para a construção dos dentes do estator, foi selecionado um grupo de dez lâminas de 0,5 milímetros de espessura, para que transforme no dente de 0,5 centímetros da simulação efetuada. Este grupo de dez lâminas foram coladas utilizando uma cola especial EPOXI, como mostrado na figura 45, permitindo efetuar uma colagem rápida entre as placas de aço.

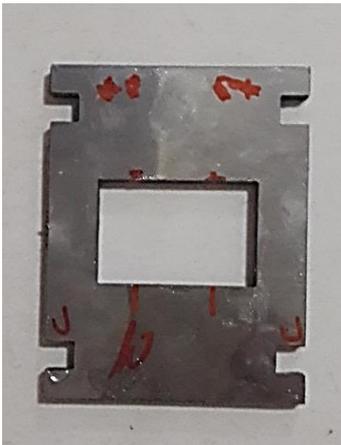
Figura 45 – Cola Epóxi utilizada na colagem das lâminas.



Fonte: O autor

A cola foi aplicada em todo o contato entre lâminas, permitindo que a cola fique como um isolante em todo o entorno entre as lâminas. Ao finalizar a colagem de todo o bloco de lâmina, foi efetuado uma descrição em um lado de uma placa informando o sentido em que a placa iria ser instalada no gerador, bem como a área específica para o enrolamento da bobina do estator, como demonstrado na figura 46.

Figura 46 – Bloco de dez lâminas para uso no estator como dente, bem como a descrição de sentido e área de enrolamento.



Fonte: O autor

### 3.4.2 Elaboração do enrolamento do estator

Depois de coladas todas as lâminas de dente longo em bloco de dez em dez lâminas, foi enrolado manualmente com um fio esmaltado 22 AWG cerca de 25 voltas em cada canto interno do corte da lâmina de aço inoxidável 430.

A nomenclatura AWG (American Wire Gauge) é uma designação de uma escala americana para fios e cabos, onde com o seu número pode definir especificações padrões do fio ou do cabo (BRAGA, 2019). A escolha do fio esmaltado 22 AWG foi efetuada por questões de seção do fio, capacidade de condução de corrente elétrica e apresentar uma certa resistência física. Na tabela 5 é possível verificar as especificações do fio esmaltado 22 AWG.

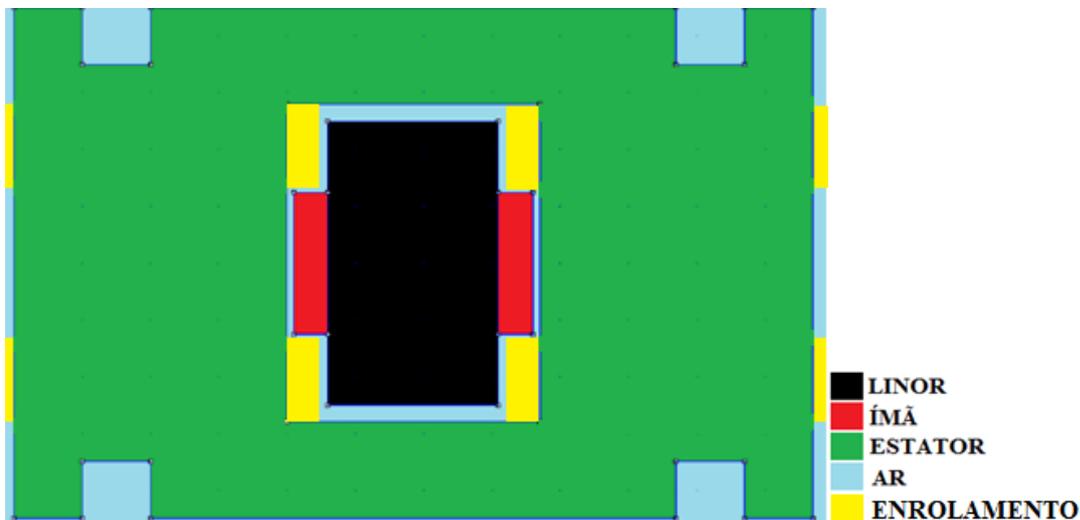
Tabela 5 – Especificações do fio 22 AWG

AWG	22
Seção (mm <sup>2</sup> )	0,33
Diâmetro (mm)	0,64
Resistência (ohm/km)	0,053
Corrente Máxima (A)	6

Fonte: Eu Faço em Casa - <https://tinyurl.com/yxwlfbbr>

A quantidade de voltas foi estipulada como um limite físico para que o enrolamento não ultrapasse uma área estipulada. Esta área estipulada foi designada de acordo com a figura 47. Esta região estipulada possui uma área de 96,875 mm<sup>2</sup> (6,25mm x 15,5mm).

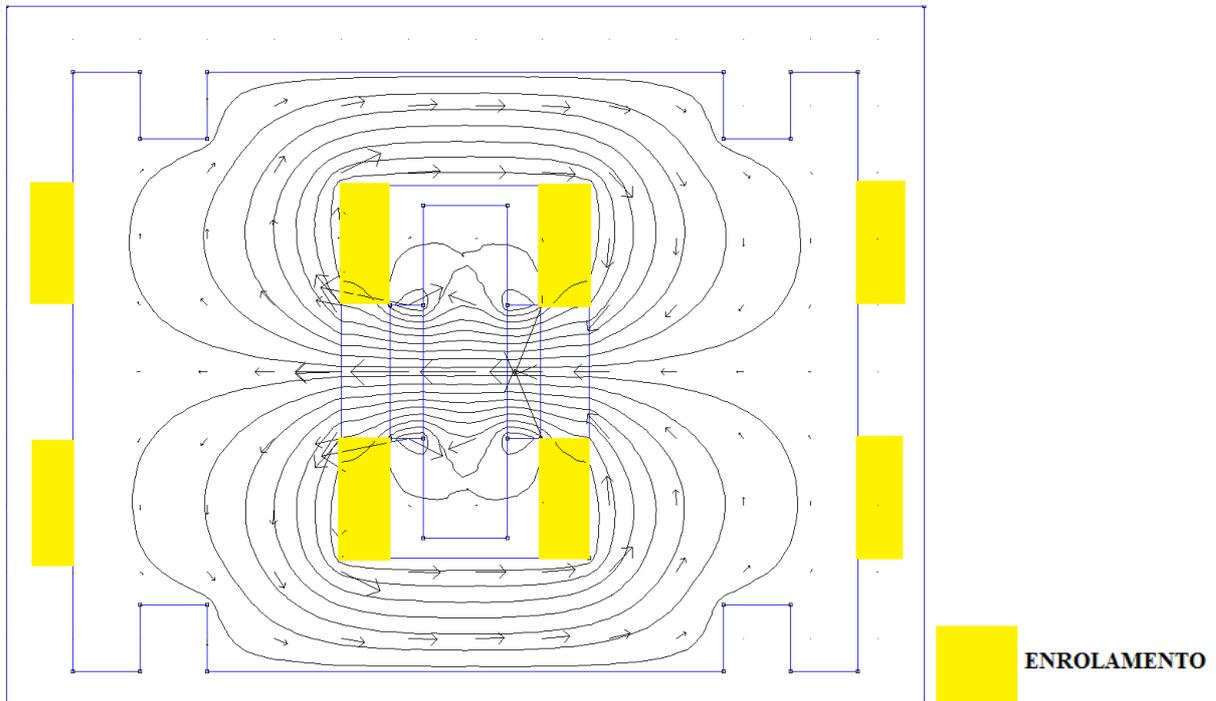
Figura 47 – Vista frontal do linor com ímã conectado a ele, onde na zona amarela mostra o local do enrolamento efetuado nos dentes.



Fonte: O autor

A razão para este local de enrolamento, além do espaço físico, foi determinada pelo fato de que o enrolamento não deve ficar ao lado do ímã, pois as linhas de fluxo magnético gerado irão adentrar a lâmina como na figura 48 e percorrerão ambos os lados da lâmina, sendo que caso o enrolamento esteja ao centro da lâmina, a diferença de potencial no enrolamento será zero.

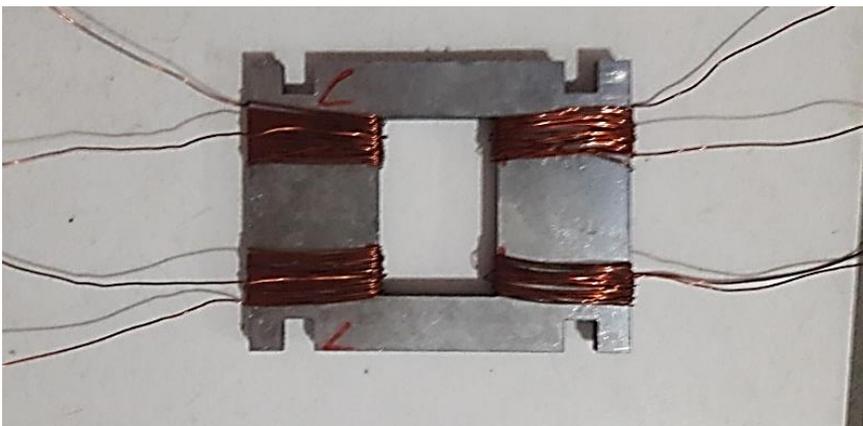
Figura 48 – Vista frontal com as linhas de fluxo geradas pelo ímã que percorrem o dente do estator.



Fonte: O autor

Para cada bobina enrolada no dente do estator, foram utilizados cerca de 2,80 metros de fio esmaltado 22 AWG. Cada bloco de dente do estator apresenta, portanto, 4 bobinas de enrolamento como demonstrado na figura 49.

Figura 49 – Bloco de dente com enrolamento do estator



Fonte: O autor

### 3.4.3 Colocação dos ímãs permanentes no linor

Inicialmente no projeto, o linor iria ser movido com um servo-motor, entretanto foi verificado que a força de atração do ímã de neodímio é alta, somado ao fator de que com a variação do movimento, a força de atração dos ímãs irá variar por causa da presença dos dentes. Com estes fatores, não foi possível efetuar a medição de uma força mínima para o movimento do linor, bem como um circuito eletrônico para medir a variação da força. Por esta razão o movimento neste projeto foi efetuado manualmente.

Para que haja um espaço para o movimento manual, foi determinada a utilização de 7 blocos de lâmina com dente longo e com enrolamento e 8 blocos de lâminas com dente curto, assim ocupando cerca de 150 mm do comprimento total do linor.

Para a colocação dos ímãs de neodímio e dos separadores de alumínio no linor foi utilizada, uma cola super-bonder, para que com o movimento do linor e a força de atração dos ímãs não faça com que eles alterem o seu posicionamento. Para o correto posicionamento, foi definida uma área lateral de cerca de 1,5cm para o ímã de neodímio e 1,3cm para o separador de alumínio, para que assim ao aplicar a cola, fiquem na posição exata, conforme figura 50.

Figura 50 – Linor com os ímãs e separadores colados.

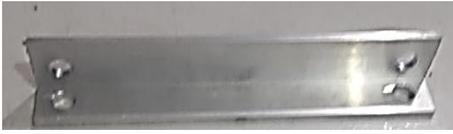


Fonte: O autor

### 3.4.4 Fixação do gerador linear

Para que possa ser fixado lado a lado todos os blocos, apertando-os para não haver alteração na sua posição e diminui o possível entreferro entre os blocos de lâmina de aço inoxidável 430, foi utilizado placas de alumínio do tipo cantoneira com quinze centímetros de comprimento, dois centímetros de altura e dois centímetros e meio de largura conforme a figura 51.

Figura 51 – Placa de alumínio do tipo cantoneira



Fonte: O autor

Para fixar uma placa de alumínio do tipo cantoneira em outra, será utilizado duas barras de rosca  $\frac{5}{16}$  polegadas com cerca de quarenta centímetros de comprimento, juntamente com uma porca  $\frac{5}{16}$ . As placas de alumínio do tipo cantoneira foram fixadas em uma placa de madeira, para evitar que o movimento do linor movimentasse todo o gerador, como mostra a figura 52.

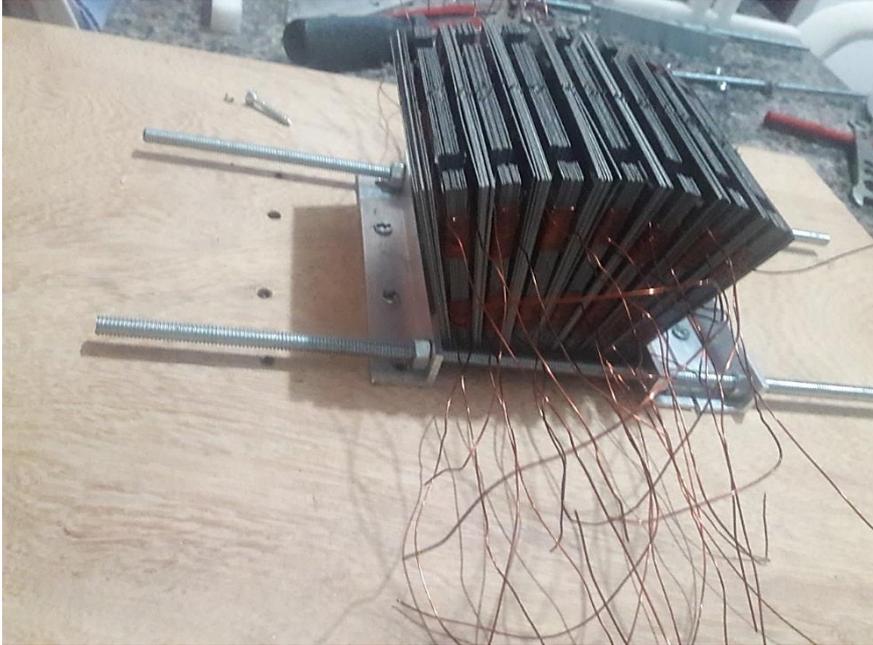
Figura 52 – Placa de madeira com as placas de alumínio do tipo cantoneira fixadas.



Fonte: O autor

Depois de fixado as primeiras placas de alumínio, foi colocado o estator e com o auxílio de uma chave de boca ajustável, foi apertado a porca até que o estator fique bem comprimido, diminuindo o entreferro e mantendo-o firme conforme figura 53.

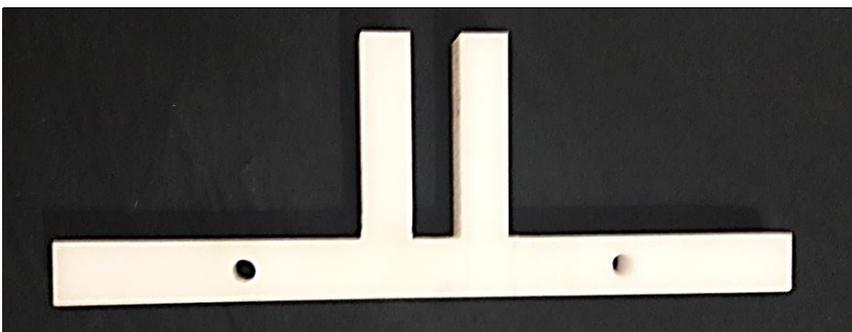
Figura 53 – Base inferior do gerador linear fixada.



Fonte: O autor

Para que o linor se movimente, será necessária uma superfície para que possa permitir o movimento do linor com o menor atrito possível e capaz de suportar o seu peso. Para foi utilizado uma peça de um polímero termoplástico semicristalino, o polióxido de metileno, ou popularmente nomeado como poliacetal, conforme a figura 54.

Figura 54 – Peça do polímero termoplástico semicristalino.



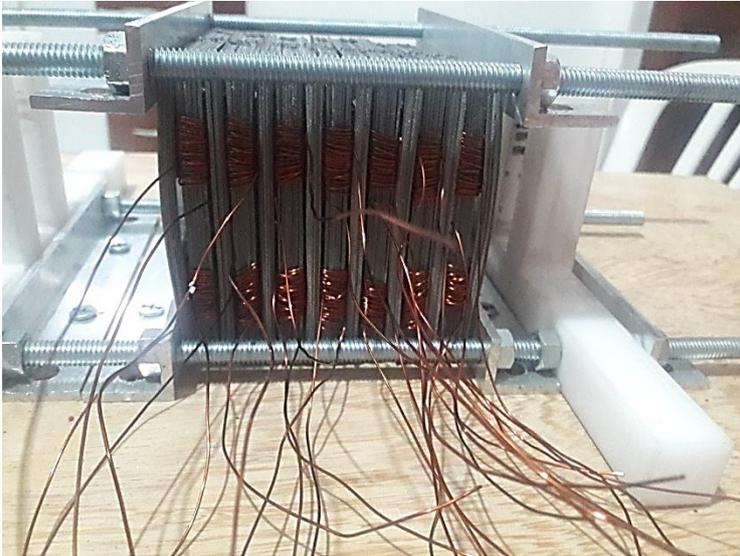
Fonte: O autor

O poliacetal apresenta uma elevada rigidez mecânica, boa resistência ao impacto e tração, baixo coeficiente de atrito e boa resistência dielétrica, sendo um material ideal para aplicação na construção do gerador linear, servindo como uma espécie de mancal para o linor.

Depois da fixação do poliacetal, foi efetuada a colocação das placas de alumínio do tipo cantoneira na parte superior do gerador linear com auxílio de porcas e da barra de rosca, a fim

de firmar todas as lâminas do núcleo, da mesma forma que fora fixado na parte inferior, como mostra a figura 55.

Figura 55 – Peça de poliacetal e parte superior do gerador linear fixadas.



Fonte: O autor

A última peça de poliacetal não foi firmada com porcas, permitindo assim que possa ter um ajuste na posição da peça, permitindo ou não um movimento mais longo do linor. Este movimento mais longo do linor fará com que os ímãs passem com totalidade pelo circuito, porém a frequência de movimento do linor será menor, diminuindo o potencial total gerado.

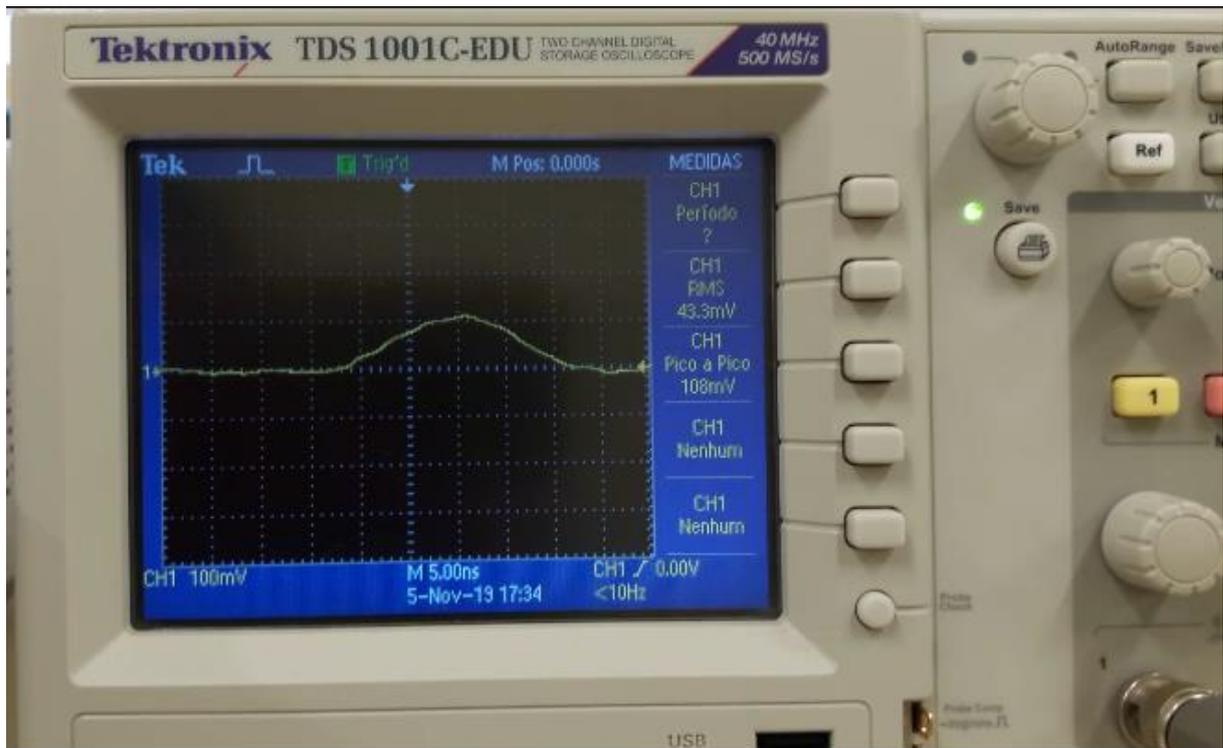
### 3.5 RESULTADOS DO EXPERIMENTO

Para realizar o experimento e verificar a energia gerada pelo gerador, foi levado o gerador para o laboratório de eletrônica da UNISUL – Universidade do Sul de Santa Catarina – e efetuar o teste com o auxílio de um osciloscópio.

Para a elaboração do teste do experimento, foi efetuado a retirada da camada de esmalte do fio de todas as bobinas com um processo de lixamento. Ao final do processo, foi conectado um a um as bobinas nas ponteiros do osciloscópio e efetuado o movimento do linor para verificar o comportamento do sinal de cada bobina separadamente.

Verificado que a tensão de pico a pico gerada foi de em torno de 100mV de tensão para cada bobina de enrolamento no estator como mostrado na figura 56. Como o protótipo do gerador linear possui cerca de quatro bobinas de enrolamento para cada dente do estator e o estator possui cerca de oito dentes, a tensão total gerada foi de em torno de 2,8V.

Figura 56 – Medição da tensão gerada por uma bobina do gerador e seu formato de onda.



Fonte: O autor

### 3.6 DIFICULDADES ENCONTRADAS

Para a elaboração deste projeto, desde sua concepção até a criação do gerador elétrico linear e seus testes práticos foram encontrados diversas dificuldades, começando pelo tema e a bibliografia.

Ao iniciar este projeto foi buscado bibliografias para as citações e fundamentação teórica de todo o projeto, entretanto a bibliografia é extremamente escassa. O gerador linear apresenta pouca pesquisa acadêmica e muito menos informação em livros didáticos, sendo que em vários livros renomados o gerador linear é apenas citado ou então com um simples parágrafo informando da sua existência e funcionamento.

Uma outra grande dificuldade encontrada foi de localizar um material que servisse como núcleo do estator para o gerador elétrico linear, pois este material precisaria ser ferromagnético e também com uma espessura pequena, para poder efetuar a laminação do núcleo. Foi efetuado por muito tempo pesquisa de materiais com possuíam tais características e desses possíveis materiais, quais seriam comercializáveis na região com um preço acessível.

Vale citar também que mesmo depois de localizar a chapa de aço inoxidável 430 para servir como núcleo do estator, um outro fator que dificultou muito o trabalho foi efetuar o corte preciso em todas as peças para a montagem do gerador elétrico linear, pois para sua elaboração, a dimensão dos componentes precisava ser com tal perfeição que a diferença de pouquíssimos milímetros afetaria muito o projeto.

E uma última dificuldade que ocorrera no trabalho foi efetuar o movimento no linor. Como a força de atração do ímã varia de acordo com sua posição, somado ao peso total do linor (cerca de 2 quilos), um servo-motor para efetuar o movimento precisaria ser grande, além do fato de necessitar de um circuito eletrônico acoplado ao servo para mensurar a força necessária para o movimento constante do linor a uma frequência constante, sendo necessário desenvolver tal projeto.

## 4 CONCLUSÃO

A busca por novas tecnologias de geração de energia elétrica pelo fato do momento em que a preocupação com o meio ambiente cresce cada vez mais, fez com que energias renováveis e sustentabilidade se tornassem a principal atenção do setor elétrico. Muito dessas novas tecnologias tendem a utilizar novos tipos de recursos renováveis para gerar energia com o mesmo princípio, um gerador de energia elétrica rotativo.

Alguns desses recursos podem apresentar baixo rendimento neste tipo de gerador a ponto de não ser explorado ou comercializado, pelo fato de que o recurso deve ser adaptável o suficiente para ser aproveitado como energia mecânica em um gerador elétrico rotativo.

Este trabalho de conclusão de curso teve por objetivo principal desenvolver os conhecimentos relacionados a máquinas elétricas e conversão de energia, abordando diversos conceitos de geração de energia elétrica, afim de elaborar e construir um gerador elétrico linear, servido como base de conhecimento e pesquisa para outros estudantes ou leitores, para que o conceito e o conhecimento do funcionamento de um gerador linear seja mais difundido, demonstrando as diversas possibilidades de aplicação que um gerador linear possa ter.

De forma a demonstrar o funcionamento e o desenvolvimento de um gerador elétrico linear proposto, foi construído etapa por etapa o gerador linear, sendo registrado cada etapa e trazendo as dificuldades de se construir uma máquina elétrica, seja pelos tipos diferentes de material quanto a sua elaboração por meio de simulações e pesquisa.

Essa construção se mostrou muito relevante devido aos inúmeros conhecimentos que foram aplicados no desenvolvimento quanto a experiência de desenvolver um protótipo de uma máquina elétrica. Diversas dificuldades e obstáculos foram encontrados no desenvolver do projeto, onde tiveram que ser superados, obrigando que o autor buscasse soluções alternativas com recursos limitados.

Apesar da complexidade dos objetivos propostos, foi possível alcançá-los plenamente no desenvolver do trabalho, mesmo que seja apenas um protótipo inicialmente com pouco aplicabilidade, expressa-se a possibilidade de uma geração de energia elétrica de uma forma diferente da usual, possibilitando e expandindo novos estudos sobre o funcionamento e aplicação dos geradores elétricos lineares.

Por fim, com o desenvolvimento do protótipo de gerador elétrico linear, preparação de cronogramas e a utilização de conceitos práticos para desenvolvimento de um produto mostrou ao autor a visão do mundo de um engenheiro eletricitista, apresentando uma visão que não havia sido mostrado e explorado durante a formação acadêmica.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE AÇO INOXIDÁVEL, Albinox. **Tipos de Aços Inoxidáveis**. ABC do Aço Inox. Disponível em: <https://www.abinox.org.br/site/aco-inox-abc-do-aco-inox.php>. Acessado em 01 de dezembro de 2019.
- BARROCA, Tiago Nuno Pedro. **Dimensionamento de um gerador linear para aproveitamento da energia das ondas**. 2012. 96p.
- BASTOS, João Pedro Assumpção. **Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase estática**. Florianópolis: Editora UFSC, 2012.
- BOLDEA, Ion at el. **Linear Electric Actuators and Generators**. Cambridge: Cambridge University Press. 2005.
- BRAGA, Newton C.. **Conhecendo fios esmaltados (ART963)**. Instituto NCB, 2019. Disponível em: <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/robotica-e-mecatronica/52-artigos-tecnicos/artigos-diversos/6330-art963>. Acesso em 01 de novembro de 2019
- CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- CHIARAMONTE, Giuseppe. **Design of a Tubular Permanent Magnet Linear Generator for Marine Applications**. 2016. 133p.
- CORDOVIL, Paulo Torres de Carvalho. **O Gerador Linear de Magnetos Permanentes Aplicado à Recuperação de Energia de Ondas**. 2013. 94p.
- DEL TORO, Vincent. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. New Jersey: Prentice-Hall, 1990
- FITZGERALD, Arthur E. at el. **Máquinas Elétricas**. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- FRAJI, Tiana Kiesslich. **Interferência eletromagnética entre linha de transmissão e dutos, utilizando o ATP – Uma análise da LT 525KV Campos novos – Blumenau**. 2007. 80p.
- FRANCHI, Claiton Moro. **Acionamento Elétricos**. São Paulo: Editora Érica, 2008
- GARRISON, W.M. e AARONSON, H.I.. **Ferrous Alloys: Overview**. Encyclopedia of Materials: Science and Technology, 2001.
- IEZZO, Robson. **Desenvolvimento de um Sistema de Suspensão com Amortecimento Semi-ativo “slow-active” com Custo Competitivo**. 2010. 284p.
- INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA. **Quais são as principais fontes de gases de efeito estufa decorrentes das atividades humanas?**. Disponível em: <http://ipam.org.br/entenda/quais-sao-as-principais-fontes-de-gases-de-efeito-estufa-decorrentes-das-atividades-humanas-2/>. Acessado em: 05 de abr. de 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, IEA. **World Energy Balances. 2018.** Disponível em:

[https://webstore.iea.org/download/direct/2261?fileName=Electricity\\_Information\\_%202018\\_Overview.pdf](https://webstore.iea.org/download/direct/2261?fileName=Electricity_Information_%202018_Overview.pdf). Acessado em: 07 de abr. de 2019.

INTERNACIONAL STAINLESS STEEL FORUM, ISSF. **The Stainless Steel family.** World Stainless, 2019. Disponível em: <http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/TheStainlessSteelFamily.pdf>. Acesso em 16 de outubro de 2019.

JULIANI, Aline D. Patelli. **Projeto e Construção de um motor elétrico linear aplicado à Bioengenharia.** 2011. 147p.

LUZ, Gelson. **Aço SAE 1020 Propriedades Mecânicas e Composição Química.** Blog Materiais, 2017. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1020-propriedades-mecanicas.html>. Acesso em 14 de outubro de 2019

MONTEIRO, Thiago Machado. **Análise de Gerador de Indução para Produção de Energia Elétrica a partir das Ondas do Mar.** 2009. 83p.

SADIKU, Matthew N. O. **Elementos de eletromagnetismo.** Porto Alegre: Bookman, 2012.

SAKAMOTO, Aristeu Yuki e PAES, André Luiz. **Projeto e construção de protótipo de motor linear para fins didáticos.** 2016. 89p.

SAMPURNO, Bambang et al. Development of electrical Kinetic Energy Recovery System (KERS) on motorcycle. **International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture, and Industrial Automation (ICAMIMIA)**, Surabaya, p. 131-136, 2015.