

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

BRISA RIBEIRO PECHINCHA

**CONSTRUÇÃO DE MODELOS DIDÁTICOS DE MÁQUINAS
ELÉTRICAS POR MEIO DE IMPRESSÃO 3D**

VIÇOSA
2019

BRISA RIBEIRO PECHINCHA

**CONSTRUÇÃO DE MODELOS DIDÁTICOS DE MÁQUINAS
ELÉTRICAS POR MEIO DE IMPRESSÃO 3D**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 402 – Monografia e Seminário – e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates.

VIÇOSA
2019

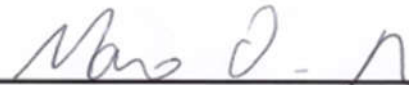
BRISA RIBEIRO PECHINCHA

**CONSTRUÇÃO DE MODELOS DIDÁTICOS DE MÁQUINAS
ELÉTRICAS POR MEIO DE IMPRESSÃO 3D**

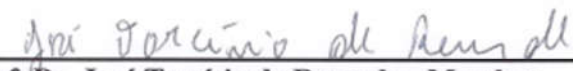
Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 402 – Projeto de Engenharia II e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 12 de dezembro de 2019.

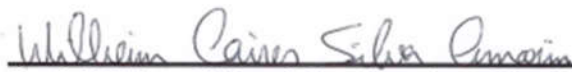
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates - Orientador
Universidade Federal de Viçosa



Prof. Dr. José Tarcísio de Resende - Membro
Universidade Federal de Viçosa



Prof. William Caires Silva Amorim - Membro
Universidade Federal de Viçosa

“O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia.”
(Robert Collier)

Aos meus avós, Irene e José.

Agradecimentos

A CNPq pelo apoio financeiro concedido, sem o qual esta pesquisa não teria sido possível.

Ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Viçosa, por disponibilizar os laboratórios e equipamentos utilizados durante a pesquisa.

Ao meu orientador Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa, e pelo compromisso e dedicação durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao Grupo de Pesquisa NERO (Núcleo de Especialização em Robótica) do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Viçosa pela parceria nesta pesquisa, que possibilitou a aplicação da técnica de impressão 3D proposta.

Ao grupo de pesquisas Nó.Lab, do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Viçosa, por compartilhar seus equipamentos e técnicas para aprimoramento deste projeto.

Aos alunos de engenharia elétrica que compuseram a equipe de pesquisa, e que trouxeram grandes contribuições com seus conhecimentos.

Resumo

Os conceitos de máquinas elétricas aprendidos ao longo da graduação possuem maior ênfase nos aspectos teóricos, sendo apresentados o funcionamento, aplicações e conceitos matemáticos das máquinas estudadas. Entretanto, o processo construtivo destas é igualmente importante para o profissional da engenharia elétrica, auxiliando a compreensão das teorias apresentadas. Desta forma, o presente trabalho visa a construção de modelos didáticos de máquinas elétricas através da técnica de impressão 3D, visando a utilização destes em aulas sobre o assunto, a fim de elucidar seus princípios de funcionamento bem como exemplificar de maneira intuitiva e prática seus princípios construtivos. Para este fim, foram selecionados dois modelos de máquinas com amplas aplicações: o motor síncrono e o motor de indução. Para a construção do motor síncrono, foram utilizados como referência projetos similares com o mesmo propósito. Já para a construção do motor de indução, foram realizados uma série de cálculos para modelagem do protótipo, e este foi então construído no software *SolidWorks* e posteriormente impresso. Em ambos os casos foram utilizados filamentos de dois tipos de materiais para impressão, sendo estes o PLA e o PLA magnético. Ambos os modelos construídos cumprem com sua proposta para utilização didática, representando de maneira fiel a construção do rotor e estator dos modelos de máquinas estudados, podendo ser utilizados como material auxiliar em aulas sobre o tema.

Sumário

1	Introdução	11
1.1	Máquinas síncronas	12
1.2	Máquinas de indução	13
1.3	Objetivo Geral.....	14
2	Materiais e Métodos	16
2.1	Softwares e Materiais	16
2.1.1	SolidWorks.....	16
2.1.2	ABS, PLA e PLA magnético.....	17
2.2	Máquina Síncrona.....	18
2.3	Máquina de Indução	19
3	Resultados e Discussões	26
3.1	Máquina Síncrona.....	26
3.2	Máquina de Indução	29
4	Conclusões	34

Lista de Figuras

Figura 1 - Máquina de Corrente Contínua (C.C.) [2].	11
Figura 2 - Máquinas de corrente alternada - Máquina de indução (à esquerda) e Máquina Síncrona (à direita) [3].	11
Figura 3 - Vista explodida de uma máquina síncrona [6].	12
Figura 4 - Exemplo de um rotor bobinado [9].	13
Figura 5 - Exemplo de um rotor gaiola de esquilo [10].	13
Figura 6 - Vista explodida de um motor de indução da WEG [4].	14
Figura 7 - Impressoras 3D - modelo cubify 2nd (à esquerda) [11] e Zortrax M200 (à direita) [12].	16
Figura 8 - Esboço em SolidWorks para a máquina síncrona - escudo do estator (superior esquerdo), núcleo de enrolamento do estator (superior direito), rotor (inferior esquerdo) e colar do eixo (inferior direito) [16].	18
Figura 9 - Metodologia para enrolamento do estator [16].	19
Figura 10 - Exemplo de Motor de Indução comercial da WEG [4].	20
Figura 11 - Modelo proposto de tampa para a máquina de indução.	22
Figura 12 - Vista frontal do estator da máquina de indução.	23
Figura 13 - Metodologia utilizada para construção do enrolamento da máquina de indução.	24
Figura 14 - Vista lateral do rotor da máquina de indução.	24
Figura 15 - Montagem da estrutura completa da máquina de indução no <i>software</i> SolidWorks.	25
Figura 16 - Partes impressas da máquina síncrona: escudo do estator (à esquerda), núcleo do estator (ao centro) e rotor (à direita).	26
Figura 17 - Protótipo de estator da máquina síncrona, com enrolamento feito em linhas de crochê.	27
Figura 18 - Estator da máquina síncrona impresso em PLA magnético, com enrolamento em fio de cobre esmaltado.	27
Figura 19 - Rotor da máquina síncrona, com os ímãs devidamente alocados.	28
Figura 20 - Motor síncrono completo.	28
Figura 21 - Resultado do teste realizado como gerador.	29
Figura 22 - Processo de impressão do estator da máquina de indução.	30
Figura 23 - Estator da máquina de indução impresso em ABS.	30
Figura 24 - Estator da máquina de indução com os devidos enrolamentos trifásicos.	31
Figura 25 - Tampa do estator da máquina de indução impresso em ABS.	31
Figura 26 - Rotor da máquina de indução impresso em PLA magnético.	32
Figura 27 - Teste prático realizado no estator da máquina de indução.	33

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Características do materiais utilizados.....	16
Tabela 2 - Parâmetros.....	21

1 Introdução

As máquinas elétricas rotativas são dispositivos de conversão eletromecânica de energia que convertem energia elétrica em mecânica e vice-versa. Os motores convertem energia elétrica em mecânica, e os geradores convertem energia mecânica em elétrica. Qualquer máquina elétrica realiza conversão de energia em ambos os sentidos, de modo que a classificação como motor ou gerador irá depender da forma que a máquina se conecta ao circuito como um todo [1]. De acordo com a alimentação da máquina, sua construção, princípio de funcionamento, dentre outros fatores, as máquinas podem ser classificadas em diversas categorias, sendo as principais delas as máquinas de corrente contínua (C.C.), e as de corrente alternada (C.A.), síncronas e assíncronas. Estas máquinas podem ser vistas nas Figuras 1 e 2.

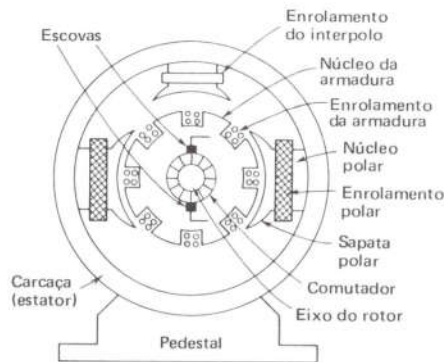


Figura 1 - Máquina de Corrente Contínua (C.C.) [2].

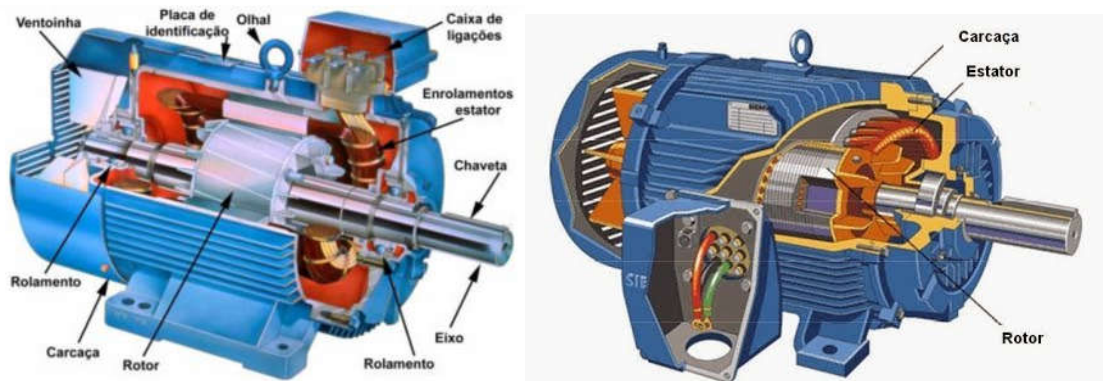


Figura 2 - Máquinas de corrente alternada - Máquina de indução (à esquerda) e Máquina Síncrona (à direita) [3].

Além destas, o mercado atual conta com uma grande variedade de máquinas elétricas, que são utilizadas para as mais diversas aplicações. O princípio de funcionamento de algumas destas máquinas são amplamente discutidos ao longo da graduação em engenharia elétrica. Por outro lado, os princípios construtivos destas não são abordados com profundidade. Entretanto, o conhecimento sobre a construção de máquinas é de grande importância para os profissionais da área, auxiliando até mesmo a compreensão dos princípios de funcionamento destas. Desta

forma, este trabalho apresenta a construção de modelos didáticos de máquinas elétricas através de técnicas de impressão 3D, visando sua utilização como material auxiliar em aulas sobre o assunto. Para este fim, foram selecionadas duas classes de máquinas amplamente utilizadas, sendo estas a máquina de indução e a máquina síncrona trifásicas.

As semelhanças e particularidades construtivas de cada uma das máquinas supracitadas, bem como a metodologia, resultados e as dificuldades encontradas ao longo do projeto são apresentadas e discutidas posteriormente neste trabalho.

1.1 Máquinas síncronas

As máquinas síncronas recebem este nome devido ao sincronismo existente entre a velocidade do campo magnético girante e a velocidade mecânica do rotor. Na operação como gerador síncrono a tensão gerada depende da velocidade do eixo de rotação e da intensidade do fluxo de campo, sendo esta a máquina mais usada na geração de energia em todo o mundo [4]. Do ponto de vista do acionamento de cargas, este motor apresenta ainda as vantagens de apresentar valores elevados de rendimento e poder atuar na correção do fator de potência da rede [5]. Entretanto, devido aos elevados custos de produção em tamanhos reduzidos, estes motores são mais utilizados para aplicações em altas potências [6].

Do ponto de vista construtivo, as máquinas síncronas possuem como componentes básicos uma parte fixa, denominada estator, e uma parte móvel, denominada rotor. No estator desta máquina são alocados os enrolamentos trifásicos por onde é realizada a alimentação da máquina [6]. Já o rotor possui polaridades fixas, e se comporta como um ímã suspenso no campo magnético girante do estator. Desta forma, ocorre um acoplamento magnético entre o rotor e o estator, de modo que o rotor gira sempre na mesma velocidade que o campo magnético girante [5].

Os motores síncronos possuem exatamente os mesmos princípios construtivos que um gerador síncrono, alterando-se apenas o sentido do fluxo de potência ativa [7]. A Figura 3 traz uma vista explodida de uma máquina síncrona.

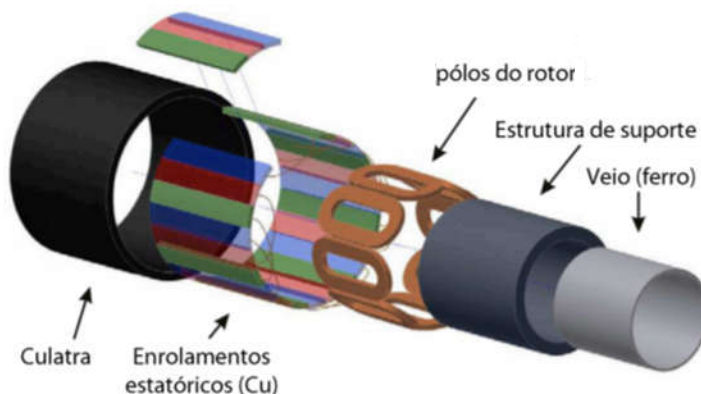


Figura 3 - Vista explodida de uma máquina síncrona [8].

1.2 Máquinas de indução

As máquinas de indução, também chamadas de máquinas assíncronas e, assim como as máquinas síncronas, possuem como componentes construtivos básicos um rotor e um estator. É possível distinguir dois tipos de construção de rotores para as máquinas de indução, sendo estes o rotor bobinado e o rotor do tipo gaiola de esquilo [9].

O rotor do tipo bobinado é composto por um enrolamento trifásico ligado a anéis de cobre, como pode ser visto na Figura 4. A ligação ao exterior é feita através do uso de escovas que fazem contato com estes anéis. A presença de escovas neste modelo de rotor é uma desvantagem, visto que, graças a este componente, este tipo de construção demanda de maior manutenção, visto que as escovas se desgastam com maior facilidade quando comparado aos componentes da máquina com rotor gaiola de esquilo [10].

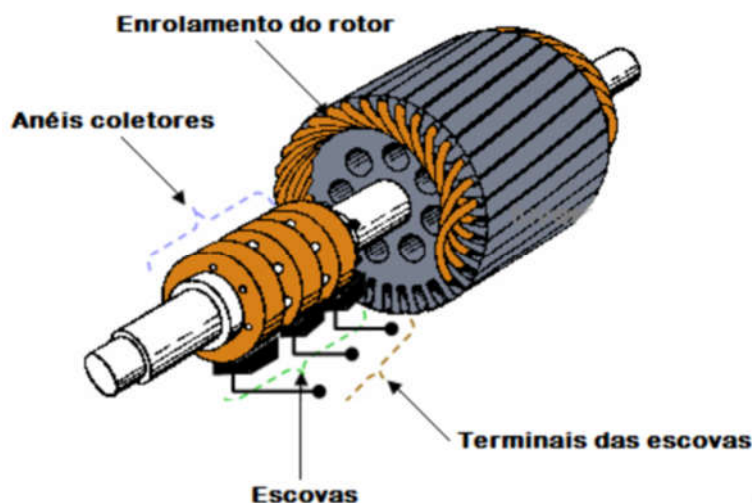


Figura 4 - Exemplo de um rotor bobinado [11].

Já o rotor do tipo gaiola de esquilo é composto por barras de cobre dispostas paralelamente em torno de um núcleo magnético, unidas em suas extremidades por anéis de cobre ou bronze [5]. A disposição das barras em torno do núcleo se dá de forma similar ao demonstrado na Figura 5.



Figura 5 – Exemplo de um rotor gaiola de esquilo [12].

Esta máquina se caracteriza pela presença de um campo magnético girante no estator, que possui construção similar ao estator de uma máquina síncrona. A estrutura do rotor não possui ligação elétrica com a linha de alimentação. As correntes rotóricas são geradas pela

indução eletromagnética, comportando-se o circuito elétrico do rotor como o secundário de um transformador. A Figura 6 mostra uma vista explodida de um modelo comercial de motor de indução com rotor gaiola de esquilo.



Figura 6 - Vista explodida de um motor de indução da WEG [6].

As máquinas de indução são mais utilizadas como motores [4], visto que a sua operação como gerador exige a necessidade de uma fonte auxiliar para compensar a energia reativa consumida, ao contrário dos geradores síncronos que dispõem de sua própria fonte de reativos, que é o enrolamento de campo [10]. Uma das grandes vantagens do motor de indução, quando comparado ao síncrono, é o fato de possuir partida própria, mesmo com carga. Devido a este, e outros fatores como baixo custo, facilidade de transporte, simplicidade de comando, construção relativamente simples e versatilidade de adaptação a diversos tipos de cargas, os motores de indução são o mais usados dentre todos os tipos de motores [6].

1.3 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver modelos didáticos das duas principais máquinas elétricas utilizadas no dia a dia, que são as síncronas e assíncronas, através de técnicas de impressão 3D.

Como objetivos específicos pode-se destacar:

- Estudar os princípios construtivos das máquinas de corrente alternada síncronas e assíncronas;
- Disponibilizar materiais didáticos para complementar a aprendizagem teórica em máquinas elétricas para os estudantes de Engenharia Elétrica;
- Analisar a viabilidade prática dos protótipos mediante testes experimentais.

2 *Materiais e Métodos*

2.1 *Softwares e Materiais*

Para a construção de ambos os modelos de máquinas propostos, foi necessária a utilização de um *software* para desenvolver modelos tridimensionais das peças propostas. O *software* escolhido foi o SolidWorks, devido à compatibilidade dos arquivos desenvolvidos por este com a impressora a ser utilizada. Os modelos foram exportados em formato *.stl* e posteriormente impressos, utilizando a técnica de impressão 3D. Para a máquina de indução foi utilizado o modelo de impressora Zortrax M200, em parceria com o grupo de pesquisa Nó.Lab, do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Viçosa. Já para a máquina síncrona, foi utilizada a impressora do modelo cubify 2nd em parceria com o grupo de pesquisa NERO (Núcleo de Especialização em Robótica) do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Viçosa. Os modelos de impressoras utilizados podem ser vistos na Figura 7.

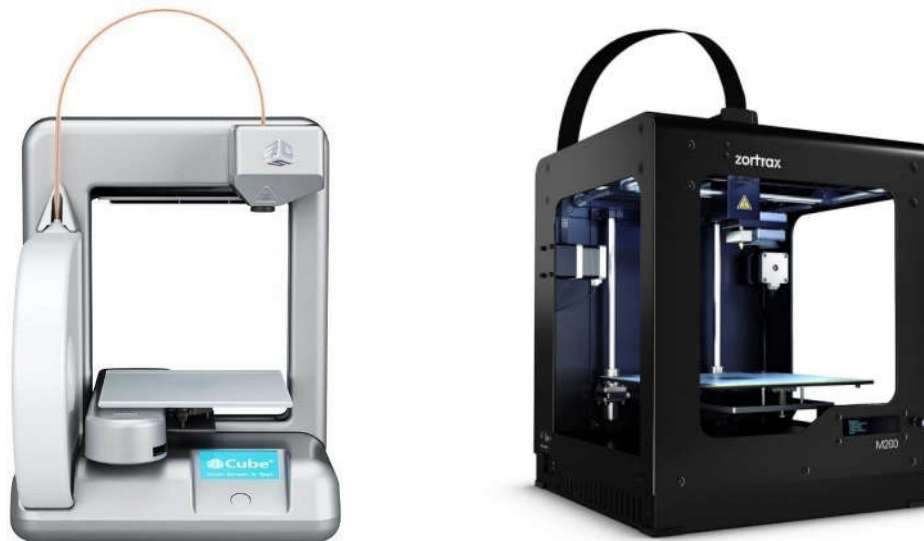


Figura 7 - Impressoras 3D - modelo cubify 2nd (à esquerda) [13] e Zortrax M200 (à direita) [14].

Estas impressora aceitam alguns diferentes tipos de filamentos poliméricos como material para impressão. Para este projeto, foram utilizados filamentos de ABS, PLA e PLA magnético, sendo escolhidos levando em consideração a proposta de cada máquina e as limitações de cada impressora. A seguir, os materiais utilizados são descritos com maior detalhamento.

2.1.1 **SolidWorks**

O SolidWorks é um software amplamente utilizado para fins de criar ou representar modelos em três dimensões. A ferramenta pode ser utilizada para criar, simular, publicar e

gerenciar dados de forma simplificada, o que torna suas aplicações muito úteis nas mais diversas áreas [15]. No presente trabalho, este software foi utilizado para criação das peças a serem modeladas pela técnica de impressão 3D.

A versão do software utilizada ao longo de todo o processo é o SolidWorks 2016. O software fornece uma interface simplificada e intuitiva, o que torna seu uso mais simples para as aplicações desejadas.

2.1.2 ABS, PLA e PLA magnético

Para a impressão do rotor, do colar do eixo e do núcleo de enrolamento do estator da máquina síncrona, foi utilizado filamento de Ácido Polilático, popularmente conhecido como PLA (*Poly Lactic Acid*). Este é um material biodegradável derivado do milho, amplamente utilizado para impressão 3D. Uma de suas grandes vantagens quando comparado aos demais materiais utilizados é sua rigidez [16]. Outro fator relevante na escolha deste material para este modelo foi o melhor desempenho da impressora utilizada - cubify 2nd – com este tipo de material, sendo possível explorar de um maior nível de detalhamento das peças optando por este material.

Já o escudo do estator desta máquina foi impresso em PLA magnético. Este material é composto por ferro encapsulado em plástico, possuindo assim propriedades ferromagnéticas, porém não atua como ímã e não conduz eletricidade. O processamento deste material é muito similar ao de um filamento do PLA convencional, de modo que o método de impressão utilizado para ambos é idêntico [17]. A escolha deste material se deu visando utilizar suas propriedades ferromagnéticas para intensificar o campo magnético no estator da máquina, melhorando o desempenho da máquina em testes práticos.

Já a máquina de indução teve suas partes estáticas – estator e tampas – impressas em Acrilonitrila Butadieno Estireno, popularmente conhecido como ABS. O ABS apresenta como vantagens o fato de ser resistente e durável, além de apresentar um ponto de fusão elevado (quando comparado aos demais materiais utilizados) [16], fator relevante dada a possibilidade de aquecimento na realização de testes práticos com a máquina. Além destes fatores, outro ponto relevante na escolha foi o melhor desempenho deste material no modelo de impressora Zortrax M200, escolhido para este modelo. Para a impressão do rotor desta máquina foi utilizado o PLA magnético, também visando melhorar a concentração do campo magnético. A Tabela 1 traz uma comparação entre os materiais utilizados.

Tabela 1 - Características dos materiais utilizados.

PLA	ABS	PLA magnético
Derivado de amido vegetal	Derivado do petróleo	Composição de ferro e polímero
Em média R\$120,00/kg	Em média R\$ 150,00/kg	Em média R\$ 500,00/kg*
Rigidez elevada	Resistência e durabilidade elevadas	Presença de propriedades ferromagnéticas
Processo de impressão simples	Demanda mais cuidados para impressão	Processo de impressão simples (idêntico ao PLA)

*Material importado, sujeito a variações cambiais.

2.2 Máquina Síncrona

A construção do modelo didático de uma máquina síncrona teve como ponto de partida o modelo de máquina síncrona sem escovas proposto pela empresa MakeSEA [18]. Este modelo é uma versão em pequena escala de um motor síncrono, com alimentação trifásica e que pode ser usado para diversas aplicações de pequena escala, como por exemplo em aeromodelos. No presente trabalho, entretanto, a principal finalidade do modelo é sua utilização em aplicações didáticas, de modo a melhorar a compreensão dos alunos a respeito da construção desta classe de motores. Este modelo é dividido em 4 partes separadas, sendo elas: rotor, colar do eixo, escudo do estator e núcleo de enrolamento do estator, sendo este último item uma peça impressa em duas partes espelhadas, que são posteriormente unidas através do enrolamento do motor. O modelo em SolidWorks das quatro peças citadas pode ser vista na Figura 8.

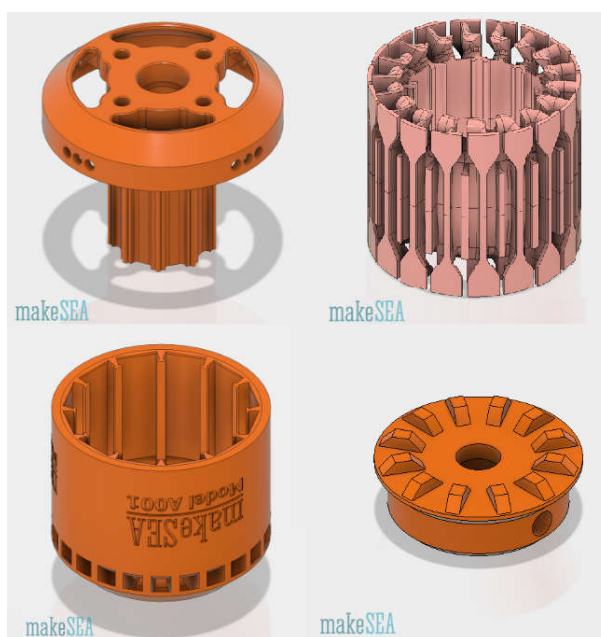


Figura 8 - Esboço em SolidWorks para a máquina síncrona - escudo do estator (superior esquerdo), núcleo de enrolamento do estator (superior direito), rotor (inferior esquerdo) e colar do eixo (inferior direito) [18].

O núcleo do estator deve ser unido através do enrolamento trifásico a ser construído ao seu redor. O modelo de enrolamento utilizado é todo feito utilizando fio de cobre esmaltado de diâmetro 0,67mm, e pode ser melhor compreendido através da Figura 9. Na representação utilizada, cada coloração corresponde a uma fase, os círculos marcados com X indicam que o fio está entrando na ranhura e os círculos marcados com um ponto indicam que o fio está saindo da ranhura correspondente.

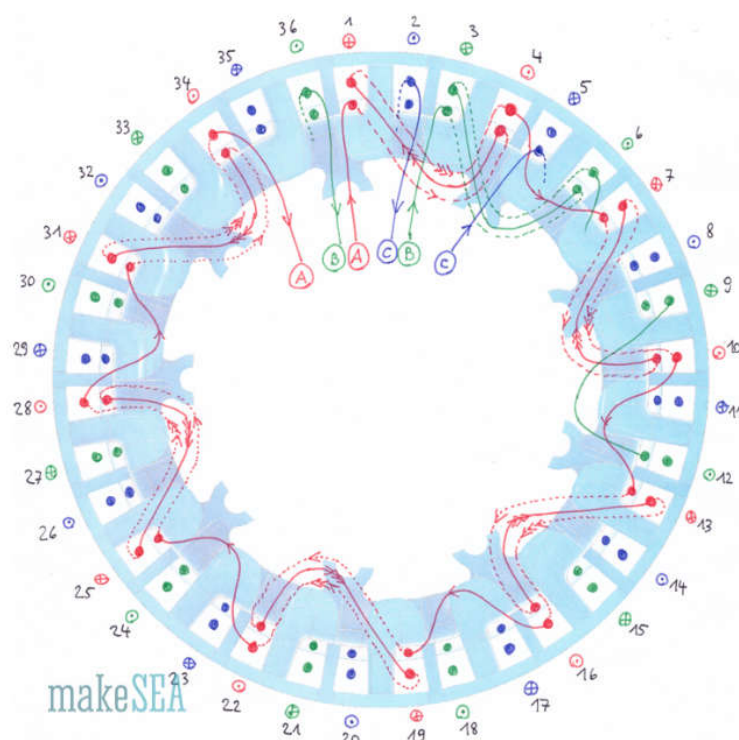


Figura 9 - Metodologia para enrolamento do estator [18].

2.3 Máquina de Indução

A construção do modelo didático de um motor de indução trifásico teve início com a análise da construção de motores comerciais. Estes modelos podem apresentar diferentes características construtivas, apresentando diferenças, por exemplo, quanto ao número de pólos e ao tipo de enrolamento do estator. Entretanto, a diferença mais notável entre os modelos de máquinas de indução, diz respeito à construção do rotor, que pode ser do tipo gaiola de esquilo ou rotor bobinado [5]. Para a modelagem realizada neste trabalho, foi escolhido o rotor em gaiola de esquilo, por ser o mais utilizado dentro desta classe de máquinas [19]. Foram então analisados todos os componentes construtivos de um motor de indução comercial, cedido pelo Laboratório de Engenharia Elétrica para fins da pesquisa. A Figura 10 ilustra um modelo comercial de uma máquina de indução.



Figura 10 – Exemplo de Motor de Indução comercial da WEG [6].

O estudo visual realizado no modelo comercial disponibilizado, possibilitou definir o esboço do estator a ser reproduzido, sendo este bastante similar ao modelo comercial, consistindo em um cilindro com uma série de ranhuras em seu interior. Assim como o motor estudado, em cada ranhura do modelo didático são acopladas as bobinas do enrolamento de campo. Quanto ao esboço definido para o rotor, também inspirado pelo modelo comercial, foi definido que teria o formato de um cilindro com uma série de ranhuras laterais, onde seriam alojados fios de cobre rígido, que exerceriam a função das barras metálicas presentes no rotor que dá nome ao modelo gaiola de esquilo, sendo estes curto-circuitados em suas extremidades por anéis de cobre. Neste modelo de máquinas, a corrente que flui através do rotor advém de um processo de indução eletromagnética, em um princípio de funcionamento análogo ao de um transformador. Esta corrente é induzida pelo campo magnético girante presente no estator da máquina, que possui alimentação em corrente alternada. [20].

Para dar início à modelagem da máquina proposta, foi necessário definir parâmetros desejados para a máquina, e com isso calcular as propriedades e dimensões a serem utilizadas, como por exemplo o número de condutores, número de ranhuras e bem como o comprimento do rotor [21]. O motor teve a sua potência fixada inicialmente em 0,5 CV, utilizando uma tensão de 220V. A sua potência em kVA é expressa pela Equação 1:

$$kVA = CV \cdot \frac{736 \times 10^{-3}}{\mu \cdot \cos(\varphi)} \quad (1)$$

A proposta abordada traz uma máquina com um par de pólos, rendimento (μ) de 0,75 e um fator de potência ($\cos(\varphi)$) de 0,83. Nestas circunstâncias, temos uma potência aparente nominal de 0,59kVA e uma corrente de linha de 1,55A.

Para a determinação do número de ranhuras a serem utilizadas para o rotor e o estator, foi levada em conta a existência de modelos comerciais com a mesma relação de ranhuras e que apresentam bom desempenho. Outro fator relevante para a escolha foi a limitação de dimensões imposta pelos limites máximos da impressora utilizada. Assim, definiu-se os valores de 18 ranhuras para o estator e 24 ranhuras para o rotor, respeitando uma proporção de 3x4 entre estes. Deste modo, o estator possui 3 canais por polo e por fase, conforme mostra a Equação 2:

$$Z = \frac{\text{Canais}}{\text{fase} * \text{polos}} = \frac{18}{3 \cdot 2} = 3 \quad (2)$$

Outro parâmetro utilizado para as comparações do modelo proposto com modelos comerciais foi o fator volumétrico (M), calculado de acordo com a Equação 3:

$$M = 10^{11} \cdot 5,8 \cdot \frac{CV}{K'a \cdot Bm \cdot n \cdot A \cdot (\mu \cdot \cos(\varphi))} \quad (3)$$

Onde o fator de distribuição do enrolamento ($K'a$) é 0,966, o valor máximo de densidade de fluxo magnético (Bm) é igual a 0,53T e A densidade linear de corrente no estator (A) é igual a 135, conforme tabelas disponíveis na literatura [21]. Tem-se então um fator volumétrico $M = 186,788 \text{ cm}^3$, que representa um valor 2,63% maior que o valor tabelado na literatura, onde $M = 182 \text{ cm}^3$ para este tipo de motor operando a 60Hz.

A relação entre o diâmetro D e o comprimento magnético l_m varia de acordo com o número de polos da máquina. Para um par de polos temos $\varepsilon = D/l_m = 0,8$, podendo variar em média 20%. Sendo assim, o diâmetro induzido é igual a $D = \sqrt[3]{\varepsilon M} = 5,31 \text{ cm}$. Já o comprimento magnético é igual a $l_m = \frac{M}{D^2} = 6,62 \text{ cm}$.

Uma máquina de indução trifásica funcionando como motor tem uma velocidade de rotação que varia sempre entre zero e velocidade síncrona, ou velocidade do campo magnético gigante. A velocidade do rotor, n , é sempre menor que a velocidade do campo girante, n_s . A diferença entre estas velocidades é definida como escorregamento, propriedade esta que confere a indução do campo magnético ao enrolamento e faz o motor girar [22].

Com base na discussão realizada, foram definidos os valores de passo polar (τ), rotações por minuto do campo girante (n_s) e velocidade periférica ou tangencial (v) para a máquina, como mostram as Equações 4, 5 e 6.

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = 8,5 \text{ cm}, \quad (4)$$

$$n = \frac{60f}{p} = 3600 \text{ rpm}, \quad (5)$$

$$v = \frac{\pi D n}{60} = 10,01 \frac{m}{s}. \quad (6)$$

Nestas condições, o valor de corrente absorvida pelo estator (I_f) pode ser calculado conforme a Equação 7. Já a tensão máxima gerada quando da operação como gerador será como o definido pela Equação 8.

$$I_f = kVA \cdot \frac{10^{-3}}{3Vf} = 1,548A \quad (7)$$

$$V = Vf \cdot \frac{Nr}{Nl} = \frac{220}{\sqrt[3]{3}} \cdot \frac{8}{468} = 2,12V \quad (8)$$

Ao final da etapa de cálculo dos parâmetros e estudo dos resultados, foi possível chegar as seguintes características construtivas apresentadas na Tabela 2:

Tabela 2 - Parâmetros.

Parâmetros	
Número de ranhuras do estator	18
Número de ranhuras do rotor	24
Canais por polo e por fase no estator	3
Número de condutores por fase no rotor	8
Diâmetro do rotor	5,4 cm
Comprimento geométrico do estator	7,66 cm
Condutores por canal por fase	23

Com a finalização das etapas de cálculo, foi então criado o modelo tridimensional da máquina no ambiente do SolidWorks. A Figura 11 apresenta o desenho da tampa, que possui aberturas laterais, facilitando assim a circulação de ar pelo interior do motor. Para o modelo completo da máquina, são necessárias duas tampas idênticas. Em um motor comercial o aquecimento no interior da máquina é dissipado através da carcaça metálica. Entretanto, como no modelo proposto a carcaça é construída em ABS, esta dissipação de calor é reduzida drasticamente, tornando necessária esta adequação.

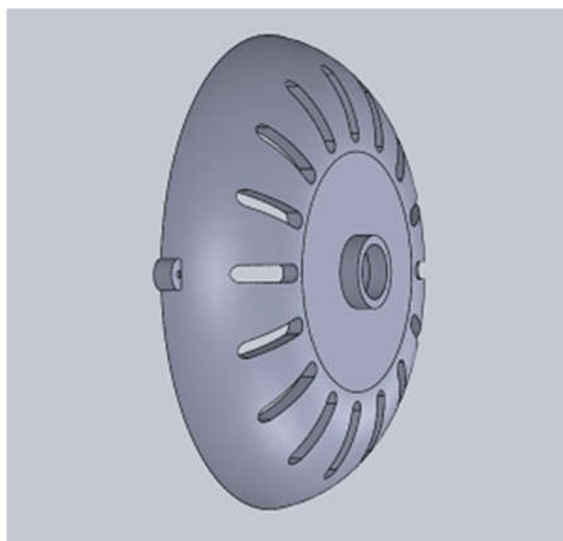


Figura 11 - Modelo proposto de tampa para a máquina de indução.

A Figura 12 mostra uma vista frontal do estator proposto para a máquina. Através desta é possível identificar as ranhuras onde, após a impressão, serão acomodados os enrolamentos

trifásicos, junto com seus respectivos isolantes. Cada ranhura apresenta uma área igual a 320mm^2 . A partir desta área e do espaço ocupado pelo filme poliéster utilizado como isolante, foi possível definir o número de 23 condutores por fase para cada ranhura.

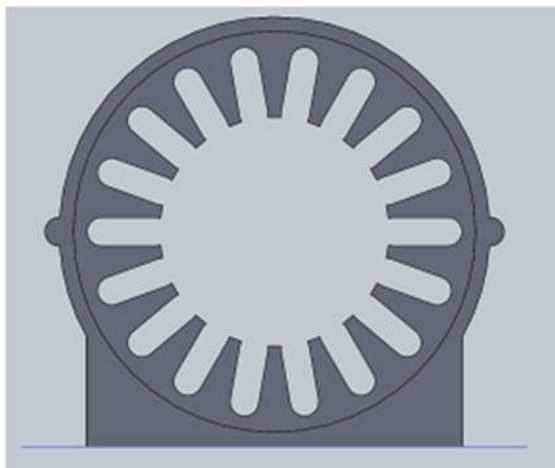


Figura 12 - Vista frontal do estator da máquina de indução.

O enrolamento do estator foi feito conforme ilustra a Figura 13. No método utilizado, cada fase é composta por um único condutor, que é estruturado de modo a formar 5 bobinas interligadas, com cada bobina contendo 23 voltas deste mesmo condutor. A primeira bobina, equivalente à fase A, foi inserida entre as ranhuras 1 e 6. Já a segunda bobina da mesma fase, foi inserida entre as ranhuras 2 e 7, e assim sucessivamente até a inserção da quinta bobina da fase A, entre as ranhuras 5 e 10. Para o correto funcionamento da máquina, o início e o final de cada uma das fases devem estar defasadas entre si em 120° elétricos. Assim, a mesma metodologia foi replicada às fases B e C, de modo que as bobinas da fase B estão entre as ranhuras 7 e 16, e as bobinas da fase C entre as ranhuras 13 e 4.

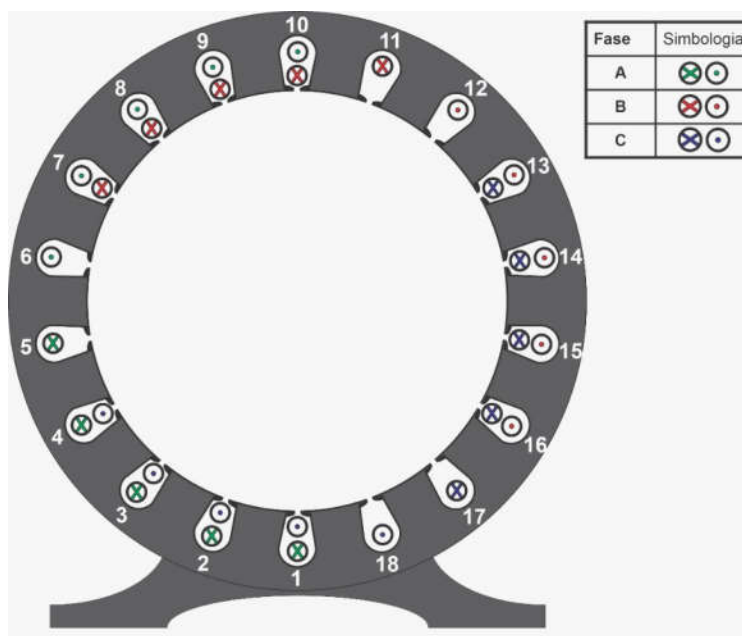


Figura 13 - Metodologia utilizada para construção do enrolamento da máquina de indução.

Conforme mencionado anteriormente, o rotor escolhido para este modelo foi o gaiola de esquilo. O esboço foi desenvolvido respeitando os parâmetros definidos através dos cálculos, respeitando ainda dimensões que viabilizassem a impressão do modelo na impressora Zortrax M200. Esta peça possui um maior nível de complexidade para desenvolvimento e impressão, dado o elevado nível de detalhamento proposto para tal. A vista lateral deste rotor pode ser observada na Figura 14.

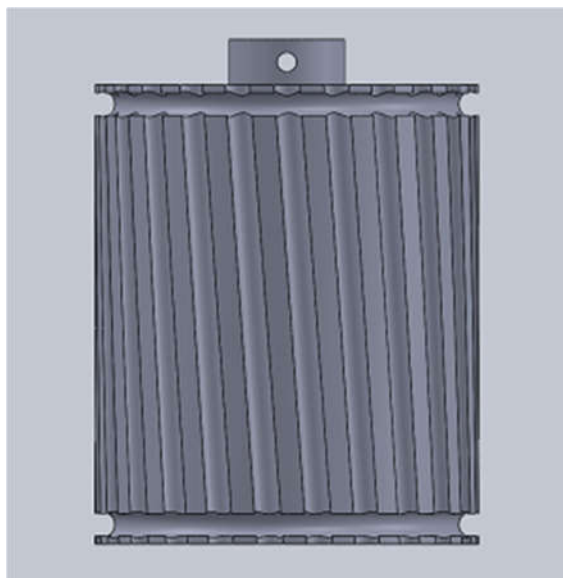


Figura 14 - Vista lateral do rotor da máquina de indução.

A estrutura completa da máquina de indução é uma composição de todas as peças ilustradas, conforme ilustra a Figura 15. Através da montagem da estrutura completa em ambiente de *software* é possível verificar uma boa relação de proporcionalidade entre as peças

desenvolvidas, além de ressaltar as similaridades do modelo proposto com modelos comerciais desta classe de máquinas.

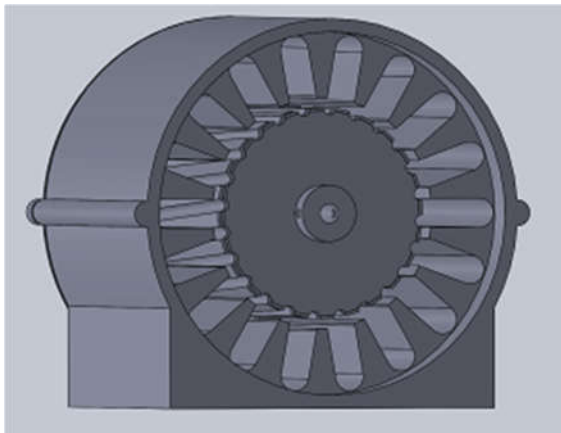


Figura 15 - Montagem da estrutura completa da máquina de indução no *software* SolidWorks.

3 *Resultados e Discussões*

Após a realização dos estudos teóricos a respeito de máquinas síncronas e máquinas de indução, e tendo sido definidos os modelos no SolidWorks para cada caso, iniciaram-se então os processos de impressão, montagem e testes práticos, descritos a seguir.

3.1 *Máquina Síncrona*

Inicialmente, os modelos em *.stl* foram impressos em PLA e ABS, a fim de comparar o desempenho dos dois materiais na impressora cubify 2nd. Notou-se então uma maior precisão na impressão com o uso do PLA. Assim, devido ao bom desempenho prático e às características estruturais favoráveis, o PLA foi o polímero escolhido para a construção do modelo final. O resultado obtido com a impressão neste material pode ser observado na Figura 16.



Figura 16 - Partes impressas da máquina síncrona: escudo do estator (à esquerda), núcleo do estator (ao centro) e rotor (à direita).

Para melhor compreensão do procedimento proposto para construção do enrolamento trifásico, foi feito um protótipo do enrolamento na versão de teste do estator. Este enrolamento foi feito utilizando linhas de diferentes cores, de modo a facilitar a identificação das fases, conforme mostrado na Figura 17.



Figura 17 – Protótipo de estator da máquina síncrona, com enrolamento feito em linhas de crochê.

A versão de teste do estator foi impressa em PLA comum, visto que este material tem menor custo. Após as verificações necessárias no modelo de testes, a versão final do estator foi então impressa em PLA magnético, sendo esta a única peça impressa com este material. Devido ao alto nível de detalhamento desta peça, houve dificuldade por parte da impressora em atingir o nível de precisão necessário, de modo que foi necessário um extenso processo de finalização com o auxílio de lixas e brocas especiais. Após os devidos reparos, foi então feito o enrolamento utilizando fios de cobre esmaltado, e o resultado obtido é mostrado na Figura 18. Os pontos de início e fim de cada fase foram marcados com etiquetas.



Figura 18 - Estator da máquina síncrona impresso em PLA magnético, com enrolamento em fio de cobre esmaltado.

O rotor, impresso em PLA, conta com 12 ranhuras em seu interior, destinados ao encaixe de 12 ímãs responsáveis pelo circuito de campo da máquina. Esta peça foi finalizada com a inserção dos ímãs, posicionados lado a lado, com polaridades invertidas, como mostrado na Figura 19.



Figura 19 - Rotor da máquina síncrona, com os ímãs devidamente alocados.

Por fim, todas as partes da máquina foram encaixadas, juntamente ao eixo da máquina, resultando no modelo mostrado na Figura 20. Este modelo conta com 6 pontas de fios de cobre, sendo estes os pontos de início e fim de cada uma das três fases. Os pontos devem ser conectados entre si, em delta ou estrela. Neste caso, optou-se por realizar a conexão das três fases em estrela, de modo que os pontos de início foram curto circuitados entre si, enquanto os pontos de fim, foram conectados à alimentação do motor.

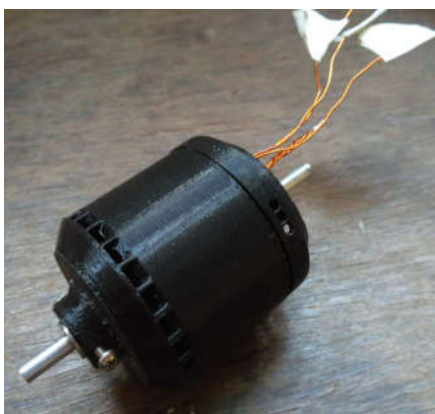


Figura 20 - Motor síncrono completo.

Após finalizada, a máquina foi submetida a testes práticos, inicialmente avaliando sua operação como gerador. Para isto, o rotor foi submetido a valores elevados de rotação, enquanto era medida a tensão na saída entre duas fases da máquina. Primeiramente, a máquina foi conectada a uma parafusadeira, que possui valores intermediários de rotação. Neste caso, para uma faixa de rotação de 495 rpm verificou-se uma tensão gerada de cerca de 800 mV de amplitude, gerando uma onda senoidal como mostrado na Figura 21.

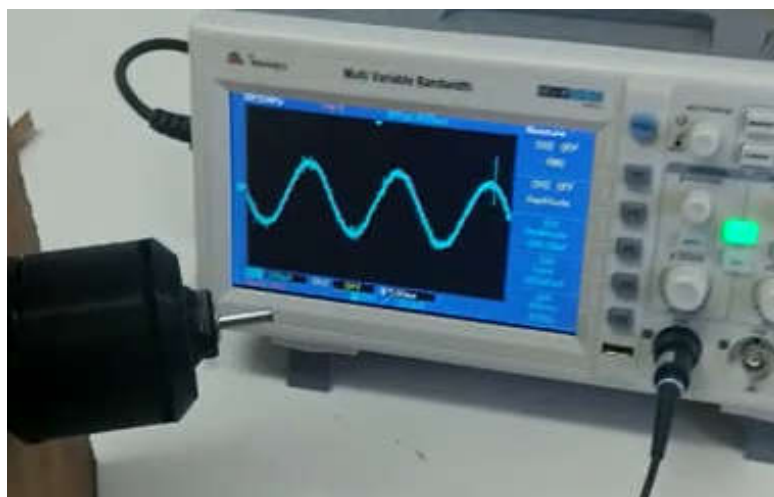


Figura 21 - Resultado do teste realizado como gerador.

Posteriormente, a máquina foi conectada a uma furadeira, que possui valores de rotação acima de 1000 rpm. Neste teste, devido à alta velocidade à qual a máquina foi submetida, esta começou a apresentar algumas falhas estruturais devido ao excessivo atrito entre as peças. Durante a rotação houve contato direto do rotor com o estator da máquina, causando aquecimento excessivo deste, além de um alto ruído.

Em seguida, foi avaliada a operação da máquina como motor. Para este teste, cada fase da máquina foi conectada a uma saída de um variavolt, de modo que a tensão de alimentação do motor foi acrescida lentamente, sendo monitorada com o uso de um voltímetro. Para a operação como motor, novamente o atrito entre rotor e estator apresentou-se como um problema. Devido à dificuldade imposta pelo atrito na rotação do motor, este tende a consumir um valor muito alto de corrente para conseguir vencer a inércia. Para que o motor entrasse em rotação, foi registrada uma corrente de cerca de 20A. Este valor de corrente causou significativo aquecimento nos fios de cobre, de modo que os testes foram interrompidos a fim de evitar danos à máquina.

3.2 Máquina de Indução

Após a determinação matemática dos parâmetros construtivos, e a devida modelagem da máquina no SolidWorks, iniciou-se o processo de impressão da máquina. Para esta máquina, o ABS foi escolhido para a construção das partes estáticas, visto que possui um ponto de fusão mais alto [16], fato que foi levado em conta pois o projeto não possui um sistema de refrigeração próprio para a dissipação do calor gerado pela efeito Joule nas bobinas. Outro fator relevante para a escolha foi seu melhor desempenho na impressora Zortrax M200, O processo de impressão do estator da máquina pode ser visto na Figura 22.

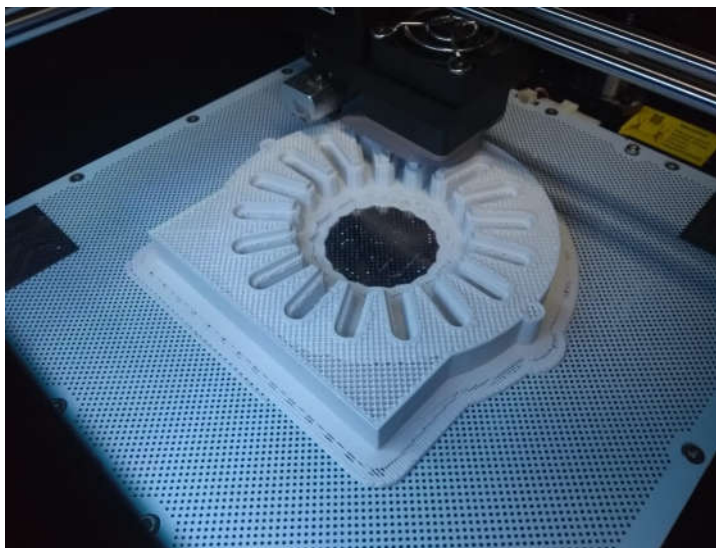


Figura 22 - Processo de impressão do estator da máquina de indução.

O resultado final após a impressão do estator pode ser visto na Figura 23, onde é possível notar as 18 ranhuras reservadas para as bobinas.

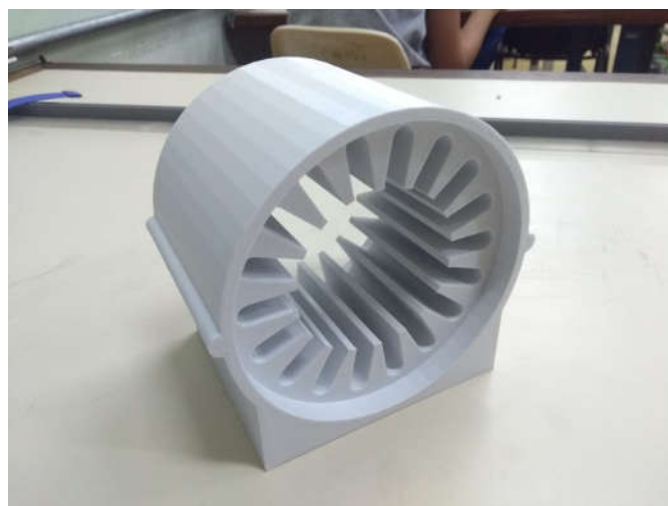


Figura 23 - Estator da máquina de indução impresso em ABS.

Após finalizada a impressão, foi então construído o enrolamento trifásico do estator conforme metodologia descrita anteriormente. Cada agrupamento de fios inserido nas ranhuras foi revestido com filme poliéster, um material isolante, como pode ser visto da Figura 24. Após concluído o enrolamento, as três fases foram conectadas em estrela, de modo que as três extremidades de início dos enrolamentos de cada fase (ranhuras 1, 7 e 3) foram utilizadas para alimentação da máquina, enquanto as extremidades de fim dos enrolamentos de cada fase (ranhuras 10, 16 e 4) foram curto circuitadas para finalizar a ligação em estrela. O resultado obtido apresenta grande similaridade estética com os modelos de estatores comerciais.



Figura 24 - Estator da máquina de indução com os devidos enrolamentos trifásicos.

A Figura 25 traz o modelo impresso da tampa da máquina de indução. Foram impressas duas tampas idênticas, de modo a encaixar uma tampa em cada extremidade da máquina. A diferenciação de cores entre as peças impressas contribui para o fator didático do modelo, visto que facilita a diferenciação de cada peça que compõe a montagem da máquina como um todo.



Figura 25 - Tampa do estator da máquina de indução impresso em ABS.

Por fim, foi então impresso o rotor da máquina. Para esta peça, conforme descrito anteriormente, foi utilizado PLA magnético. Nota-se pela Figura 26 que, apesar da maior complexidade desta peça em comparação às demais, seu formato ficou evidente.



Figura 26 - Rotor da máquina de indução impresso em PLA magnético.

As ranhuras construídas na estrutura do rotor foram projetadas com a finalidade de acoplar fios rígidos de cobre, formando a estrutura em gaiola de esquilo que caracteriza este tipo de motor. Ao contrário dos motores comerciais, o modelo didático desenvolvido tem a estrutura da gaiola de esquilo exposta, sem nenhum revestimento. Este fato também tem finalidade didática, permitindo que os estudantes tenham melhor visualização do modelo, podendo assim obter maior compreensão a respeito da estrutura destas máquinas.

Para verificar na prática a funcionalidade da máquina proposta, estão sendo realizados testes práticos. Os primeiros testes propostos envolvem a avaliação do campo magnético girante gerado no estator da máquina quando esta recebe alimentação trifásica balanceada. Para este teste foi utilizado um varivolt, de modo que a tensão de alimentação fosse aumentada gradativamente. No centro do estator foi colocada uma bússola, conforme ilustra a Figura 27 para verificar o comportamento da mesma sob ação do campo do estator. Através deste teste foi possível verificar a presença do campo magnético girante, graças a rotação da bússola. Foi possível ainda verificar que a velocidade de rotação da bússola aumentou a medida que a tensão de alimentação foi aumentada, o que indica um aumento na intensidade do campo magnético, conforme esperado.

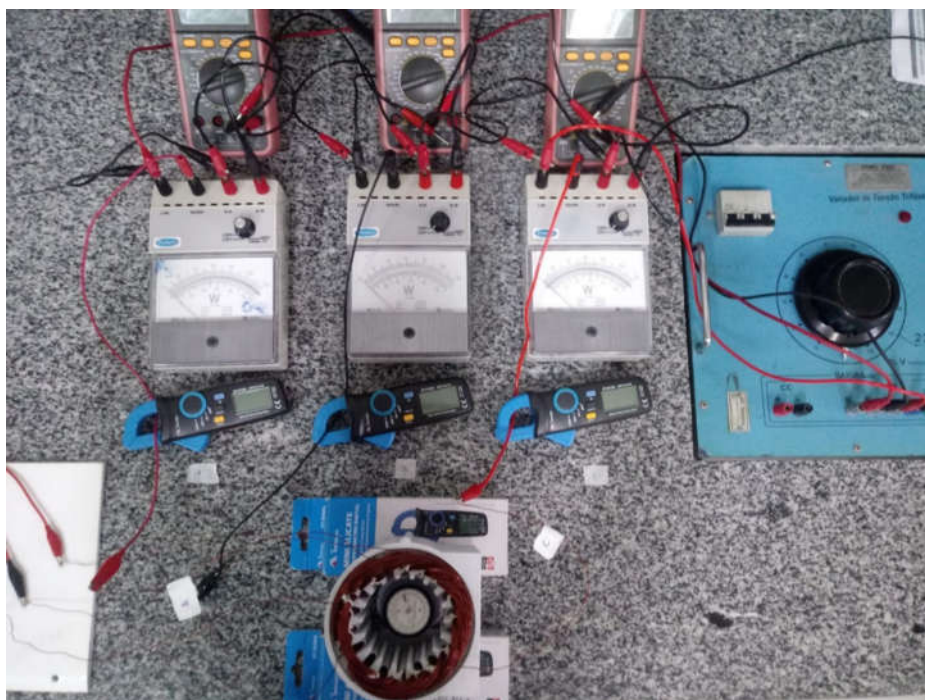


Figura 27 - Teste prático realizado no estator da máquina de indução.

4 *Conclusões*

Este projeto apresentou a construção de dois modelos de máquinas elétricas para fins didáticos, onde foram utilizadas técnicas de impressão 3D. Os modelos de máquinas selecionados para este fim foram a máquina síncrona e a máquina de indução. Para o desenvolvimento dos modelos, foram respeitadas as premissas de viabilidade de reprodução, similaridade com modelos comerciais e fácil manuseio em sala de aula.

Em ambos os casos, a técnica de impressão 3D se mostrou muito confiável com relação a reprodução dos desenhos propostos, com peças bem robustas, que respeitam as dimensões inseridas. Estas qualidades facilitam o processo de reprodução e tornam o projeto ainda mais interessante em ambientes acadêmicos onde os recursos financeiros são baixos e o acesso de visualização de montagens práticas são escassos.

A máquina síncrona apresentou resultados bastante satisfatórios, tendo sido concluído um modelo didático completo da máquina. Devido às dimensões reduzidas do modelo, o mesmo pode ser utilizado durante as aulas de disciplinas correlatas, havendo a possibilidade de se apresentar cada uma das peças individualmente, e também de apresentar a composição de todas as peças unidas construindo junto aos alunos o modelo completo da máquina estudada. Para este modelo foi possível ainda verificar testes satisfatórios de funcionalidade, onde a máquina operou como gerador e como motor. Para ambos os casos, é necessário atenção aos níveis de aquecimento da máquina para que a mesma não seja danificada. Para continuidade do projeto, propõe-se melhorias no acabamento da máquina, de modo que a estrutura final seja mais precisa, a fim de diminuir o atrito entre as peças, diminuindo também o desgaste e o aquecimento da máquina.

Já a máquina de indução encontra-se em fase final de construção, com todas as estruturas sendo polidas e montadas na mesma peça. O modelo final obtido tem seu aspecto físico bastante similar aos usualmente encontrados no mercado, se mostrou bem robusto estruturalmente e íntegro. Todas as peças são facilmente destacadas e possibilitam a sua diferenciação uma das outras devido as cores utilizadas. Os testes realizados demonstram que o campo magnético girante do estator se comporta como o esperado durante os estudos teóricos. Os próximos passos envolvem a finalização do estator, além de testes práticos envolvendo a estrutura completa da máquina de indução. Devem ainda ser analisadas melhorias estruturais no modelo, a fim de melhorar a dissipação de calor da máquina, visto que verificou-se aquecimento da estrutura durante os testes já realizados.

O projeto conseguiu provar a viabilidade da iniciativa, a soma dos resultados obtidos, que vão desde os conhecimentos específicos levantados até a experiência adquirida na efetiva implementação, possibilitam e justificam a continuidade de projetos futuros. Projetos estes que podem expandir a gama de motores didáticos para outros tipos de máquinas elétricas, abordando e melhorando ainda mais o ensino sobre os mais diversos tipos de máquinas elétricas.

Referências Bibliográficas

- [1] V. D. Toro, Fundamentos de Máquinas Elétricas, 1999.
- [2] G. J. d. V. Villar, “Geradores e Motores CC - Máquinas de Corrente Contínua,” Mossoró, 2006.
- [3] Portal Eletricista, “Motor de Indução – funcionalidade, significado, dicas, passo a passo,” Portal Eletricista, [Online]. Available: <https://www.portaleletricista.com.br/motor-de-inducao-funcionalidade-significado-dicas-passo-a-passo/>. [Acesso em 12 Dezembro 2019].
- [4] S. J. Chapman, Fundamentos de Máquinas Elétricas, 5ª edição ed., 2013.
- [5] H. Pinheiro, Máquinas e Acionamentos Elétricos - Motores Trifásicos de Corrente Alternada, Mossoró, Rio Grande do Norte: Instituição Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte .
- [6] Grupo WEG, *Motores Elétricos - Guia de Especificação*, Jaraguá do Sul, Santa Catarina.
- [7] I. I. Kosow, Máquinas elétricas e transformadores, 14ª edição ed.
- [8] M. F. d. O. Simões, “Estudo do Gerador Síncrono com Excitação,” 2013.
- [9] P. C. Sen, Principles of electric machines and power electronics, 2ª edição ed.
- [10] A. S. S. Junior, “Estudo de um Gerador de Indução Assíncrono autoexcitado por capacitores,” Rio de Janeiro, RJ., Agosto de 2015.
- [11] G. Zanetti, “Estudo de Viabilidade para Implementação de Sistema de Frenagem Elétrico para Segurança de Serra Circular de Bancada,” Ijuí, 2016.
- [12] A. Augusto, “Motor de Indução Trifásico,” 2006.
- [13] Bluesoft, “Cosmos Bluesoft,” [Online]. Available: <https://cosmos.bluesoft.com.br/produtos/610370653500-cubify-cube-3d-printer-2nd-generation-silver>. [Acesso em 12 Dezembro 2019].
- [14] Mercado Livre, “Impressora 3d Zortrax M200 90-390 Micros Quad Core - Android,” [Online]. Available: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-978865159-impressora-3d-zortrax-m200-90-390-micros-quad-core-android-_JM?quantity=1. [Acesso em 12 Dezembro 2019].
- [15] Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, “SolidWorks,” [Online]. Available: <https://www.solidworks.com/>. [Acesso em 3 Dezembro 2019].
- [16] A. Godoy, “Qual é a Diferença Entre ABS e PLA?,” Escola de Impressão 3D, [Online]. Available: <https://www.escoladeimpressao3d.com.br/qual-e-a-diferenca-entre-abs-e-pla>. [Acesso em 3 Dezembro 2019].
- [17] Protoplant Inc., “Proto-pasta - Iron-filled Metal Composite PLA,” Protoplant Inc., [Online]. Available: <https://www.proto-pasta.com/products/magnetic-iron-pla>. [Acesso em 3 Dezembro 2019].
- [18] C. Laimer, “makeSEA 3D Printed Brushless Motor v2,” makeSEA, [Online]. Available: <https://www.makesea.com/web/claimer/brushless-motor>. [Acesso em 3 Dezembro 2019].
- [19] A. S. Aleixo, A. C. d. Silva, F. C. Rodrigues e M. A. D. Junior, “Ensaio a vazio e de rotor bloqueado de um motor de indução com e sem tratamento HVOF,” São José dos Campos, 2014.
- [20] J. G. S. M. d. Oliveira, “Materiais Usados na Construção de Motores Elétricos,” 2009.

- [21] A. Martignoni, Máquinas de Corrente Alternada, 3ª ed., Porto Alegre: GLOBO, 1978.
- [22] A. J. L. Correia, “Estimação de parâmetros mecânicos de motores de indução trifásicos com rotor em gaiola de esquilo,” Coimbra, 2014.