



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

MARCOS SAMPAIO DE SOUSA

Elaboração e Confeção de Protótipo de um Motor de Indução Trifásico Utilizando Impressão 3D

**PALMAS - TO
2023**

MARCOS SAMPAIO DE SOUSA

Elaboração e Confeção de Protótipo de um Motor de Indução Trifásico Utilizando Impressão 3D

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal do Tocantins – *Campus* Palmas, como exigência à obtenção do grau de bacharel em engenharia elétrica.

Orientador: Prof. Me. Kaison Teodoro de Souza

**PALMAS - TO
2023**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

- S725e Sousa, Marcos Sampaio de
 Elaboração e confecção de protótipo de um motor de indução trifásico utilizando impressão 3D / Marcos Sampaio de Sousa. – Palmas, TO, 2023.
 68 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2023.
- Orientador: Me. Kaison Teodoro de Souza
Coorientador: Esp. Walther Xanthopulo
1. Motor de indução trifásico. 2. Manufatura aditiva. 3. Impressão 3D. I. de Souza, Kaison Teodoro. II. Xanthopulo, Walther. III. Título.

CDD 621

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

MARCOS SAMPAIO DE SOUSA

Elaboração e Confeção de Protótipo de um Motor de Indução Trifásico Utilizando Impressão 3D

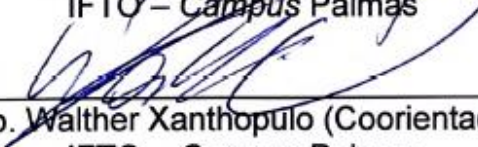
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal do Tocantins – *Campus* Palmas, como exigência à obtenção do grau de bacharel em engenharia elétrica.

Orientador: Prof. Me. Kaison Teodoro de Souza

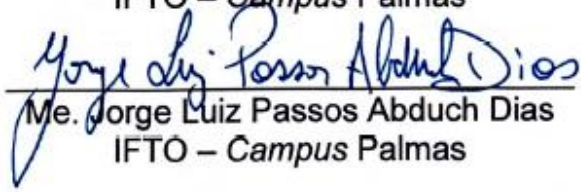
Aprovado em: 12 /12 / 2023

BANCA AVALIADORA


Me. Kaison Teodoro de Souza (Orientador)
IFTO – *Campus* Palmas


Esp. Walther Xanthopulo (Coorientador)
IFTO – *Campus* Palmas


Dr. Elcio Precioso de Paiva
IFTO – *Campus* Palmas


Me. Jorge Luiz Passos Abduch Dias
IFTO – *Campus* Palmas

RESUMO

A economia globalizada conectando todos os seres humanos nos mais longínquos pontos terrestres torna necessário uma produção cada vez mais acelerada de bens e serviços. Essa rapidez é alcançada com tecnologias cada vez mais modernas, que possibilitam controle e comando de processos, muitas vezes à distância, que vão tornando a presença do ser humano cada vez menor no ambiente das indústrias. Com todo esse avanço, porém percebemos que um componente principal, o que dá a vida a esse ambiente produtivo ainda permanece intacto, “O motor elétrico”. Ele faz o papel principal no processo, desde a extração da matéria-prima na natureza até os acabamentos finais do produto. Portanto, o objeto dessa pesquisa será o motor de indução trifásico, largamente utilizado no ambiente industrial. Serão abordados conceitos como funcionamento, estrutura interna e algumas particularidades do tipo de rotor gaiola de esquilo. Com base nessas informações, será construído um protótipo reduzido desse mesmo motor, utilizando uma impressora 3D para fabricar cada componente, para que seja usado como material de apoio em sala de aula, onde os estudantes poderão visualizar cada estrutura desse tipo de máquina, contribuindo assim para melhor aprendizagem e compreensão do assunto.

Palavras chave: Motor de Indução Trifásico, Máquina Assíncrona, Manufatura Aditiva, Impressão 3D.

ABSTRACT

The globalized economy connecting all human beings in the farthest points on earth makes it necessary to produce goods and services at an ever-increasing pace. This speed is achieved with increasingly modern technologies, which enable control and command of processes, often from a distance, which makes the presence of human beings less and less in the industrial environment. With all this progress, however, we realized that a main component, which gives life to this productive environment, still remains intact, "The Electric motor". He plays the main role in the process, from the extraction of raw materials in nature to the final finishing of the product. Therefore, the object of this research will be the three-phase induction motor, widely used due to its high reliability, concepts such as operation, internal structure and some particularities of the type of squirrel-cage rotor will be addressed. Based on this information, a reduced prototype of the same engine will be built, using a 3D printer to manufacture each component, to be used as support material in the classroom, where academics will be able to clearly visualize each structure of this type of machine, contributing thus for a better learning and understanding of this subject.

Keywords: Three-Phase Induction Motor, Asynchronous Machine, Additive Manufacturing, 3D Printing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura do rotor

Figura 2 – Barras condutoras do rotor

Figura 3 – Bobinas defasadas 120°

Figura 4 – Correntes trifásicas

Figura 5 – Demonstração da intensidade de campo (H) e densidade de fluxo (B).

Figura 6 – Modelo transformador para motor de indução

Figura 7 – Circuito equivalente do motor

Figura 8 – Curva torque x velocidade motor de indução

Figura 9 – Curva torque x velocidade motor trifásico incluídas todas as zonas de operação.

Figura 10 – Diagrama de fluxo de potência de um motor CA trifásico

Figura 11 – Motor de indução trifásico

Figura 12 – Confeção de objeto utilizando manufatura aditiva

Figura 13 – Objeto sendo moldado na impressora 3D

Figura 14 – Modelagem de deposição fundida

Figura 15 – Objeto impresso usando estereolitografia

Figura 16 – Processamento digital de luz utilizando um projetor

Figura 17 – Objeto impresso com tecnologia SLS

Figura 18 – Peças impressas por DMLS

Figura 19 – Filamento de PLA

Figura 20 – Filamento de ABS

Figura 21 – Filamento de PETG

Figura 22 – Filamento de Nylon

Figura 23 – Filamento de policarbonato

Figura 24 – Filamento de madeira

Figura 25 – Oxidação do objeto impresso em PLA magnético

Figura 26 – Filamento de PLA magnético

Figura 27 – Filamento a base de grafeno

- Figura 28 – Lâmina de 1mm espessura do estator
- Figura 29 – Lâmina de 1mm espessura do rotor
- Figura 30 – Saída de cabos de alimentação
- Figura 31 – Encaixe para a estrutura do estator
- Figura 32 – Orifícios para fixação de tampas e bancadas
- Figura 33 – Tampa do motor
- Figura 34 – Ventilador
- Figura 35 – Eixo do motor
- Figura 36 – Impressora 3D modelo ENDER 3 S1
- Figura 37 – Montagem do estator
- Figura 38 – Estator com bobinas
- Figura 39 – Disposição das bobinas no estator
- Figura 40 – Montagem da estrutura do rotor
- Figura 41 – Impressão das tampas
- Figura 42 – Impressão do ventilador
- Figura 43 – Impressão da carcaça
- Figura 44 – Teste feito com bússola provando a existência do campo girante

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Parâmetros calculados para o motor
- Tabela 2 – Custo de cada filamento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 Objetivo geral	9
1.2 Objetivos específicos	9
1.3 Justificativa	9
1.4 Metodologia	9
2 REVISÃO DA LITERATURA	10
2.1 Máquinas elétricas rotativas	10
2.2 Motor de indução trifásico	10
2.3 Características construtivas	11
2.3.1 Motor de indução gaiola de esquilo	11
2.3.2 Funcionamento do rotor	12
2.4 Funcionamento	14
2.5 Características operacionais	18
2.5.1 Circuito equivalente	18
2.5.1.1 Circuito do rotor	19
2.5.1.2 Circuito equivalente final	21
2.5.2 Característica torque x velocidade	22
2.5.3 Perdas em máquinas CA	24
2.5.4 Estrutura do motor de indução trifásico	26
3 MANUFATURA ADITIVA	27
3.1 Impressão 3D	29
3.1.2 Processos de impressão 3D	30
3.1.3 Tipos de filamentos utilizados em impressoras 3D	33
4 PROJETO E CÁLCULO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	38
4.1 Potência aparente	38
4.2 Solicitações elétricas no estator	39
4.3 Solicitações magnéticas	39
4.4 Entreferro	39
4.5 Número de polos	40
4.6 Dimensões do rotor	40
4.7 Velocidade periférica	41

4.8 Velocidade do campo girante	42
4.9 Passo polar	42
4.10 Numero de ranhuras do estator	42
4.11 Número de canais por polo e por fase	43
4.12 Cálculo do fluxo magnético dos condutores e das dimensões dos canais estatóricos	43
4.13 Seção dos condutores estatóricos	45
4.14 Dimensões dos condutores rotóricos	45
5 CONSTRUÇÃO E ENSAIOS DO MOTOR	48
5.1 Ensaio do motor	58
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
7 REFERÊNCIAS	60

1. INTRODUÇÃO

Os motores elétricos são responsáveis por transformar energia em movimento e dão vida a milhares de equipamentos eletrônicos usados rotineiramente. Em nossas residências, estão presentes em *freezers*, geladeiras, condicionadores de ar, máquinas de lavar roupa, liquidificadores, etc. No ambiente industrial, estão presentes em compressores, elevadores, misturadores, bombas, esteiras e em quase todo tipo de maquinário.

Hoje na sociedade em que vivemos, no mundo globalizado, em que a produção deve ser massiva, com grande rapidez e eficiência é praticamente impossível imaginar a vida sem os motores elétricos suas praticidades e confortos proporcionados.

Mas como todo processo evolutivo, o desenvolvimento foi lento e gradativo passando por vários pesquisadores e inventores. Entre os primeiros estudos e o surgimento dos motores elétricos em 1886 foram quase três séculos. (MUSEU WEG, 2018).

Ao longo de muitos anos cientistas, físicos, engenheiros e outros profissionais que às vezes nem eram ligados à ciência, puderam promover pequenos avanços no desenvolvimento dessas máquinas tão essenciais no dia-a-dia. No que diz respeito a motores trifásicos assíncronos, em 1889, o engenheiro eletricista russo Michael Von Dolivo Dobrowolsky, que promovia pesquisas no ramo de motores de corrente alternada, requereu patente do motor trifásico com rotor de gaiola de esquilo, que era bastante simples, quase não produzia ruídos (som), baixa frequência de manutenções e nas operações tinha bastante confiabilidade e segurança. Assim em 1891, iniciou-se a fabricação de motores assíncronos com baixa potência variando de 0,4 a 7,5 kW. (MUSEU WEG, 2018).

Os motores trifásicos usados na indústria, possuem várias aplicações, e para cada uma um tipo diferente de construção.

Será apresentado ao longo desse trabalho de conclusão de curso, num primeiro momento, o levantamento bibliográfico sobre o funcionamento do motor trifásico com rotor gaiola de esquilo, e num segundo momento os resultados da versão em miniatura do modelo. Serão abordados todos os componentes que fazem parte de sua construção, para que possam ser usados em sala de aula

(como modelo didático) nas disciplinas que abordam o tema de máquinas elétricas.

1.1 Objetivo geral:

Construir um protótipo de motor de indução trifásico, que possa ser utilizado em práticas laboratoriais de máquinas elétricas, a partir do processo de manufatura aditiva utilizando a impressão 3D para a confecção de suas partes.

1.2 Objetivos específicos:

- Estudar os princípios construtivos das máquinas elétricas, em particular, o motor de indução trifásico;
- Aplicar técnicas de manufatura aditiva, através da impressão 3D;
- Desenvolver novas ferramentas laboratoriais para complementar a aprendizagem teórica em máquinas elétricas;
- Analisar a viabilidade prática dos protótipos mediante testes experimentais.

1.3 Justificativa

As técnicas de impressão 3D, são uma realidade cada vez mais presente nos ambientes industriais, apresentando vantagens como construção de peças específicas, rápida reposição e evitando ainda a formação de grandes estoques. Então, como forma de aprofundar conhecimentos e disponibilizá-los para o corpo docente da instituição, o projeto do motor tornou-se um desafio que depois de finalizado proporcionou uma vasta experiência tanto no conhecimento das máquinas elétricas quanto no processo de manufatura aditiva.

1.4 Metodologia

Para a construção da maioria das partes que constitui o protótipo do motor de indução trifásico, será utilizada a impressora 3D (tridimensional) do tipo FDM (modelagem de deposição fundida). Cada peça será modelada no *software*

específico de criação de objetos em três dimensões o *SolidWorks*, sendo posteriormente impresso.

Para a fabricação do estator e da estrutura do rotor, será empregado um tipo de PLA específico, que tem em sua composição ferro encapsulado em plástico, possuindo propriedades ferromagnéticas (que intensificam o campo magnético). Para os demais elementos serão usados o ABS e o grafeno.

As dimensões e especificações do protótipo, serão determinadas através de cálculos matemáticos. O custo do projeto estará a cargo do orientador e do acadêmico redator deste Trabalho de conclusão de curso.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Máquinas elétricas rotativas

Máquinas elétricas rotativas usualmente são empregadas para os seguintes fins: ora transformam energia mecânica em energia elétrica (gerador) e ora convertem energia elétrica em energia mecânica (motor). São separados em três grandes grupos: Motores de corrente contínua (CC), motores de corrente alternada (CA) e motores universais que podem ser alimentados com fontes (CC e CA).

2.2 Motor de indução trifásico

São largamente utilizados em aplicações industriais possuindo duas configurações de rotor, a saber, gaiola de esquilo e rotor bobinado, ambos com mesmos princípios de funcionamento. São assim denominados pois funcionam a partir de três bobinas defasadas no espaço, onde circulam correntes que geram o movimento de rotação do eixo rotórico.

Possuem uma série de vantagens, como por exemplo, baixo custo de manutenção, montagem, fabricação e simplicidade em relação aos motores de corrente contínua.

Os motores trifásicos atuam nas indústrias no interior de tornos, fresa, esteiras, misturadores, etc. e fora delas podemos encontra-los em elevadores, escada rolante, etc.

2.3 Características construtivas

As principais partes construtivas das máquinas de indução são estator e rotor.

O estator é construído a partir de lâminas de aço magnético empilhadas com o objetivo de diminuir ao máximo as perdas por correntes parasitas de Foucault e histerese magnética.

O rotor é também constituído de material ferromagnético laminado, possuindo ranhuras na superfície onde são alojadas as barras condutoras.

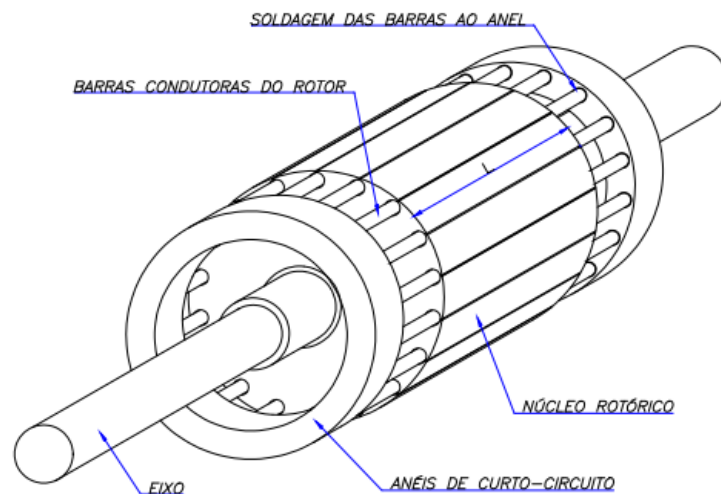
Para que seja possível o giro mecânico do rotor, são utilizados rolamentos fixos nos mancais. (JUNIOR; SILVA, 2018).

O processo de rotação do rotor ocorre pois há espaço de ar entre rotor e estator denominado entreferro, onde ocorre a conversão eletromecânica de energia, transformando energia elétrica em movimento (JUNIOR; SILVA, 2018).

2.3.1 Motor de indução gaiola de esquilo

Esse tipo de motor é o mais empregado em qualquer aplicação industrial, considerando que suas partes construtivas são robustas e relativamente simples sendo ainda a solução mais econômica, tanto em termos de manutenção quanto para acionamento, pois não são necessários comandos e proteção sofisticados (NASCIMENTO JUNIOR, 2011).

Figura 1: Estrutura do rotor.

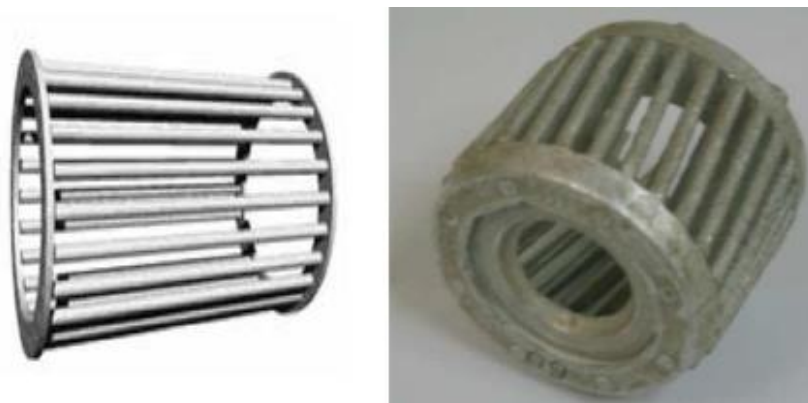


Fonte: PEA 3311, 2016.

No modelo da figura 1, o material que forma o núcleo é cilíndrico, laminado, ferromagnético e a face externa apresenta ranhuras, onde serão alocadas barras condutoras constituídas de cobre ou alumínio. Nas extremidades tem-se anéis eletricamente conectados de mesmo material. Esta estrutura forma um circuito elétrico fechado em curto-circuito. As barras condutoras são montadas sobre o núcleo sem isolamento alguma. Para este modelo ainda existe um processo de fabricação por fundição, onde as barras de alumínio são injetadas diretamente no núcleo do rotor, contribuindo para redução dos custos de montagem. (PEA 3311, 2016).

2.3.2 Funcionamento do rotor

Figura 2: Barras condutoras do rotor.



Fonte: NIED A., [s.d.]

Toda estrutura da figura 2, estará mergulhada no campo magnético girante criado pelo estator, surgindo tensões induzidas em cada barra de alumínio na presença do campo magnético. Dessa forma a tensão induzida calculada em Volts (V), será o produto vetorial entre velocidade (V) e densidade de fluxo magnético (B) multiplicado pelo comprimento do condutor (l), cuja intensidade é calculada pela (equação 1):

$$E_{ind} = (V \times B)l \text{ (V)} \quad (1)$$

A finalidade de todos condutores formando a gaiola estarem em curto-circuito, é a circulação da corrente induzida, que por sua vez favorece o surgimento da força induzida (torque), calculada pela intensidade da corrente (i) fluindo na barra condutora, multiplicado pelo produto vetorial entre o comprimento do condutor (l) e a densidade de fluxo magnético (B). Tem sentido determinado pela regra da mão direita e é representada pela (equação 2):

$$F = i(l \times B) \text{ (N)} \quad (2)$$

Desenvolvendo a equação (2), chega-se ao torque induzido, que é o produto vetorial entre densidade de fluxo do rotor (B) e estator (B_s), multiplicado por uma constante de construção da máquina (k), intensidade dada em Newtons*metro (N.m), pela (equação 3). (CHAPMAN, 2013).

$$\tau_{ind} = k B \times B_s \text{ (N.m)} \quad (3)$$

O torque induzido é responsável por retirar o rotor da inércia e iniciar o movimento de rotação até que chegue próximo à velocidade do campo girante, onde a variação do fluxo magnético segue decrescendo (velocidade relativa entre rotor e campo magnético ficam bem próximas), diminuindo cada vez mais a corrente e o torque induzidos no rotor. (IFBA, [s.d.]).

Analisando um motor de indução sem perdas, o rotor iria acelerar até o limite do campo magnético ficando em sincronia, nesse instante, aceleração, corrente e força induzidas (torque) seriam nulos em relação a barra condutora

(já que não haveria variação de fluxos) somente a velocidade iria permanecer constante. Nos motores de indução isso nunca ocorre devido à várias perdas rotacionais e surge uma pequena diferença de velocidade chamada de escorregamento. (CARVALHO, 2011).

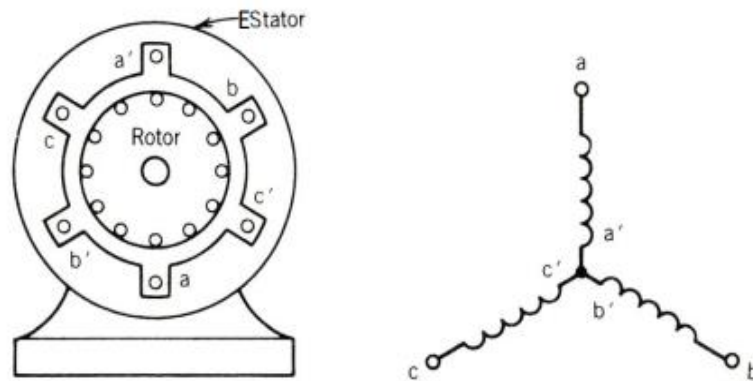
Se o rotor opera em uma velocidade abaixo da síncrona, os condutores do enrolamento de armadura “cortam” as linhas de força magnética do campo, produzindo correntes induzidas. Operando com grande carga no eixo, o conjugado (torque) também deverá ser alto para movê-la. Quanto mais conjugado a máquina necessitar, maior deverá ser a diferença de velocidade, para que campo e correntes induzidas criados sejam suficientes para retirar a carga da inercia. Quanto maior a carga, menor é a velocidade do rotor. Portanto, o escorregamento é simplesmente a diferença entre a velocidade síncrona (n_{sinc}) e velocidade do eixo (nm). É expressa em termos percentuais, sua unidade de medida é o rpm (rotações por minuto) e calculado pela (equação 4). (WEG, [s.d.]).

$$s = \frac{n_{sinc} - nm}{n_{sinc}} (x100\%) \quad (4)$$

2.4 Funcionamento

Para o perfeito funcionamento do motor de indução trifásico necessitamos formar o campo magnético girante no interior do estator. O criamos a partir de bobinas defasadas fisicamente de 120° graus mecânicos conforme figura 3. (DEL TORO, 1999).

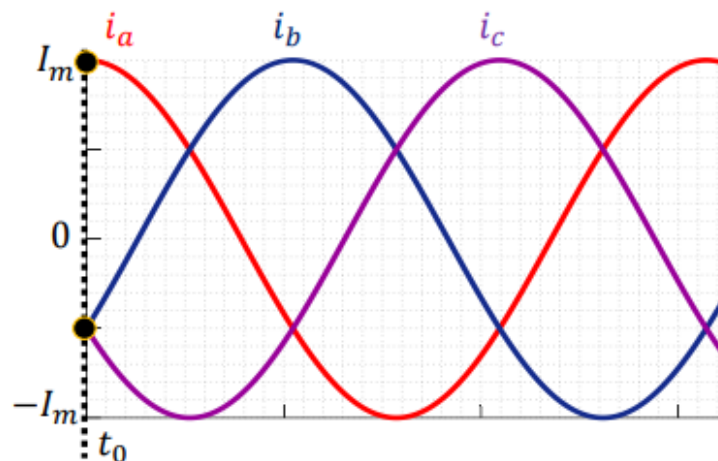
Figura 3: Bobinas defasadas 120°.



Fonte: CUPERTINO A.F.,2020.

Em toda extensão das bobinas circulam correntes trifásicas e equilibradas defasadas de 120° elétricos demonstradas na figura 4.

Figura 4: Correntes trifásicas.



Fonte :CUPERTINO A.F.,2020.

Quando bobinas estão defasados de 120° mecânicos e são percorridas por correntes trifásicas e equilibradas, o campo magnético de intensidade constante será produzido. Matematicamente, o giro do campo pode ser explicado da seguinte maneira: (CHAPMAN, 2013).

As correntes trifásicas que circulam em cada bobina são calculadas pelas (equações 5,6 e 7):

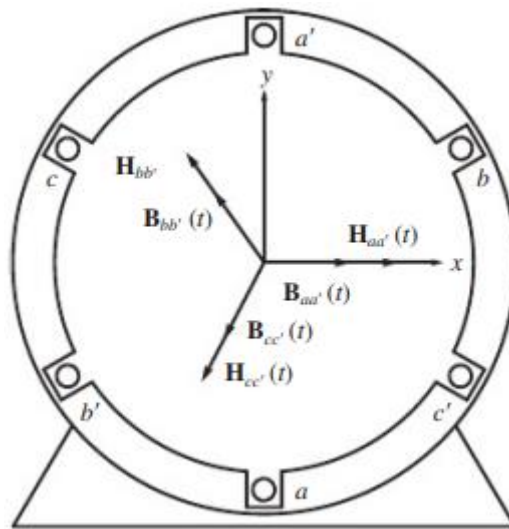
$$i_{aa'}(t) = I_M \sin \omega t \quad \text{A} \quad (5)$$

$$i_{bb'}(t) = I_M \sin (\omega t - 120^\circ) \quad \text{A} \quad (6)$$

$$i_{cc'}(t) = I_M \sin (\omega t - 240^\circ) \quad \text{A} \quad (7)$$

Vamos assumir que cada corrente entre pelas fases a, b, c e saiam pelas respectivas fases a', b' e c', conforme figura 5.

Figura 5: Demonstração da intensidade de campo (H) e densidade de fluxo (B).



Fonte: CHAPMAN, 2013.

Bobinas percorridas por correntes geram campo magnético. Utilizamos a regra da mão direita para deduzir a direção do campo (H). Percebe-se que, cada bobina gera um campo magnético em um sentido diferente. Assim, a cada instante estes se somam e produzem uma resultante. A intensidade de campo (H) pode ser calculada usando as (equações 8,9 e 10):

$$\mathbf{H}_{aa'}(t) = H_M \sin \omega t \angle 0^\circ \quad \text{A} \cdot \text{e} / \text{m} \quad (8)$$

$$\mathbf{H}_{bb'}(t) = H_M \sin (\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ \quad \text{A} \cdot \text{e} / \text{m} \quad (9)$$

$$\mathbf{H}_{cc'}(t) = H_M \sin (\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \quad \text{A} \cdot \text{e} / \text{m} \quad (10)$$

A intensidade de campo magnético faz surgir a densidade de fluxo magnético (B) é calculado pela (equação 11):

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (11)$$

A partir dela aplicamos em todas as bobinas, como representado nas (equações 12, 13 e 14):

$$\mathbf{B}_{aa'}(t) = B_M \text{sen } \omega t \angle 0^\circ \quad \text{T} \quad (12)$$

$$\mathbf{B}_{bb'}(t) = B_M \text{sen } (\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ \quad \text{T} \quad (13)$$

$$\mathbf{B}_{cc'}(t) = B_M \text{sen } (\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \quad \text{T} \quad (14)$$

Uma vez analisadas as densidades de fluxo nas bobinas, pode-se estabelecer o campo magnético resultante líquido no estator, pois em cada instante de tempo, aparecerá uma força resultante com dois polos apontando para uma posição diferente até completar um giro completo. O valor da intensidade do fluxo magnético resultante será sempre 1,5 vezes a intensidade gerada em cada bobina. (CHAPMAN, 2013).

Para provar, analisaremos como exemplo as (equações 15, 16, 17 e 18).

O fluxo magnético resultante em $\omega t = 0^\circ$, nesse instante o campo magnético da bobina aa' será:

$$\mathbf{B}_{aa'} = 0 \quad (15)$$

O campo magnético da bobina bb' será:

$$\mathbf{B}_{bb'} = B_M \text{sen } (-120^\circ) \angle 120^\circ \quad (16)$$

E o campo magnético da bobina cc' será:

$$\mathbf{B}_{cc'} = B_M \text{sen } (-240^\circ) \angle 240^\circ \quad (17)$$

O campo magnético total, das três bobinas em conjunto será:

$$\mathbf{B}_{\text{líquido}} = \mathbf{B}_{aa'} + \mathbf{B}_{bb'} + \mathbf{B}_{cc'} \quad (18)$$

Assim, desenvolvendo e somando o campo magnético total das bobinas da (equação 18):

$$\begin{aligned}
 &= 0 + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}B_M\right) \angle 120^\circ + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}B_M\right) \angle 240^\circ \\
 &= \left(\frac{\sqrt{3}}{2}B_M\right) \left[-(\cos 120^\circ \hat{x} + \sin 120^\circ \hat{y}) + (\cos 240^\circ \hat{x} + \sin 240^\circ \hat{y})\right] \\
 &= \left(\frac{\sqrt{3}}{2}B_M\right) \left(\frac{1}{2} \hat{x} - \frac{\sqrt{3}}{2} \hat{y} - \frac{1}{2} \hat{x} - \frac{\sqrt{3}}{2} \hat{y}\right) \\
 &= \left(\frac{\sqrt{3}}{2}B_M\right) (-\sqrt{3} \hat{y}) \\
 &= -1,5B_M \hat{y} \\
 &= 1,5B_M \angle -90^\circ
 \end{aligned}$$

Dessa forma, provamos matematicamente (o campo magnético resultante), de módulo (uma vez e meia) maior que o campo gerado em cada bobina.

O campo girante criado pelo fluxo magnético, estará girando numa velocidade de acordo com a frequência da rede aplicada ao estator e ao número de polos de que é formado. Sua velocidade corresponde à velocidade síncrona e é calculada em rotações por minuto (rpm) pela (equação 19):

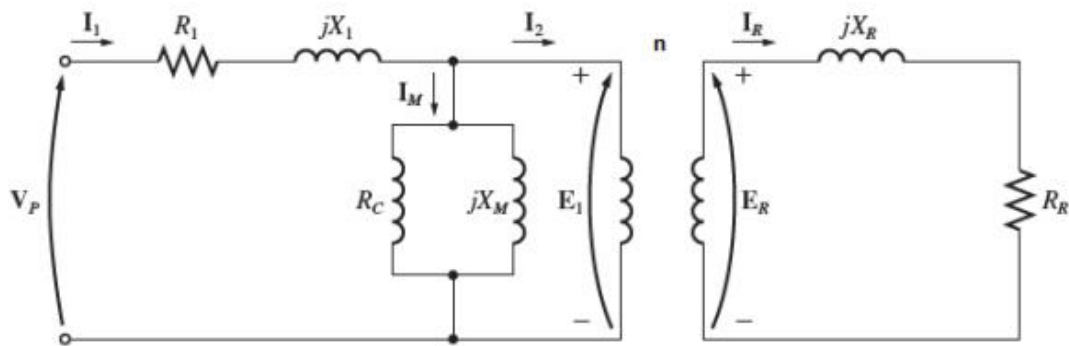
$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (19)$$

2.5 Características operacionais

2.5.1 Circuito equivalente

A operação do motor trifásico baseia-se no processo de indução (de tensões e correntes) que o circuito do estator realiza no circuito do rotor (CHAPMAN, 2013). Estas surgem por meio de interações semelhantes ao transformador, ficando o modelo do circuito do motor, parecido com o do transformador como mostra a figura 6.

Figura 6. Modelo transformador para motor de indução



Fonte: CHAPMAN, 2013.

Onde:

- jX_M - reatância de magnetização;
- R_C - resistor de perdas no núcleo;
- R_1 - resistência do enrolamento do estator;
- jX_1 - reatância de dispersão;
- I_M - corrente de magnetização;
- E_1 - tensão induzida;
- R_R - resistência do rotor;
- jX_R - reatância do rotor;
- E_R - tensão induzida no rotor;

2.5.1.1 Circuito do rotor

Quando um MIT (motor de indução trifásico) está em operação, a tensão aplicada nos enrolamentos do estator geram correntes induzidas no rotor da máquina. Portanto, existe na partida do motor, uma diferença de velocidade entre campo magnético girante e rotor. Denominamos essa diferença de velocidade relativa, quanto maior essa diferença, maior a corrente induzida no rotor, pois temos um número maior de linhas de campo magnético sendo atravessadas e gerando torque.

A menor indução ocorre próximo da velocidade síncrona onde o movimento relativo é quase zero. No caso da (tensão e corrente) induzidas no rotor, seu módulo e frequência são diretamente proporcionais ao escorregamento. (CHAPMAN, 2013).

Estando o rotor parado, ocorre o movimento relativo máximo, assim, se o valor da tensão induzida no rotor, estando parado for escrita como E_{R0} , então o valor da tensão induzida para qualquer escorregamento pode ser representado pela (equação 20):

$$E_R = sE_{R0} \quad (20)$$

E a frequência dessa tensão será dada pela (equação 21):

$$f_r = sf_e \quad (21)$$

Onde:

f_r - Frequência da corrente induzida no rotor ou (frequência do rotor);

f_e - Frequência da tensão no estator ou (tensão da rede de alimentação);

s - Escorregamento.

A resistência R_R será constante não dependendo de s (escorregamento). Mas a reatância do motor sofre efeitos do escorregamento, o termo X_R é representado pela (equação 22):

$$X_R = \omega_r L_R = 2\pi f_r L_R \quad (22)$$

Onde: L_R é a indutância no enrolamento do rotor.

Aplicando a (equação 21) na (equação 22):

$$X_R = 2\pi s f_e L_R \quad (23)$$

Reorganizando os termos e aplicando X_{R0} , que é o valor da reatância do rotor bloqueado temos que:

$$X_R = sX_{R0} \quad (24)$$

Aplicando a lei de Kirchhoff que diz que a soma algébrica das tensões em uma malha é igual a zero, no circuito do rotor indicada na figura 6:

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R} \quad (25)$$

Fazendo a substituição da (equação 24) na (equação 25) e multiplicando numerador e denominador por (1/s) temos:

$$I_R = \frac{E_{R0}}{\frac{R_R}{s} + jX_{R0}} \quad (26)$$

Assim, a partir da (equação 26), podemos representar a impedância equivalente do rotor pela (equação 27):

$$Z_{eq} = \frac{R_R}{s} + jX_{R0} \quad (27)$$

2.5.1.2 Circuito equivalente final

Para se obter o circuito equivalente por fase em um MIT, é necessário que a parte do rotor seja referida ao lado do estator (CHAPMAN, 2013).

Referindo os parâmetros do lado do rotor para o lado do estator por meio da relação de espiras n , tem-se:

$$E_1 = nE_{R0} \quad (28)$$

$$R_2 = n^2 R_R \text{ e } X_2 = n^2 jX_{R0}. \quad (29)$$

$$I_2 = \frac{I_R}{n} \quad (30)$$

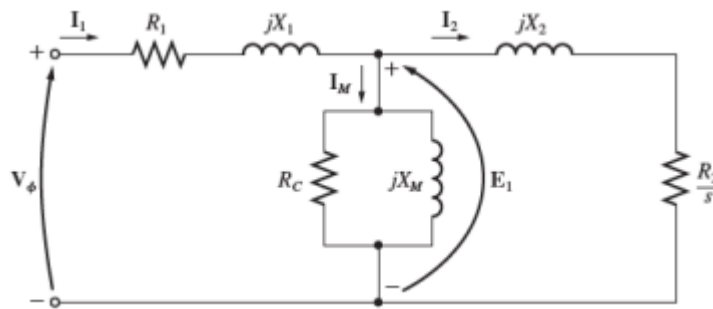
$$Z_2 = n^2 \left(\frac{R_R}{s} + jX_{R0} \right) \quad (31)$$

Na (equação 32), organizamos R_2 e X_2 :

$$R_2 = n^2 R_R \text{ e } X_2 = n^2 jX_{R0} \quad (32)$$

Consequentemente o circuito final equivalente será representado pela figura 7.

Figura 7. Circuito equivalente do motor



Fonte: CHAPMAN, 2013.

2.5.2 Característica torque x velocidade.

Na análise do desempenho de motores o torque é uma das principais variáveis consideradas, pois sofre influência do tipo e da quantidade de carga aplicada no eixo do rotor.

A carga gera uma variação que altera o escorregamento da máquina, influenciando a tensão induzida no rotor e produzindo correntes proporcionais a essa variação de tensão. (CHAPMAN, 2013).

A (equação 33) é usada para cálculo do torque em termos gerais:

$$T = \frac{\pi}{8} * p^2 * \Phi * J_m * \cos \Psi \quad (33)$$

Sendo que:

T - Torque em $N*m$;

p - Número de polos;

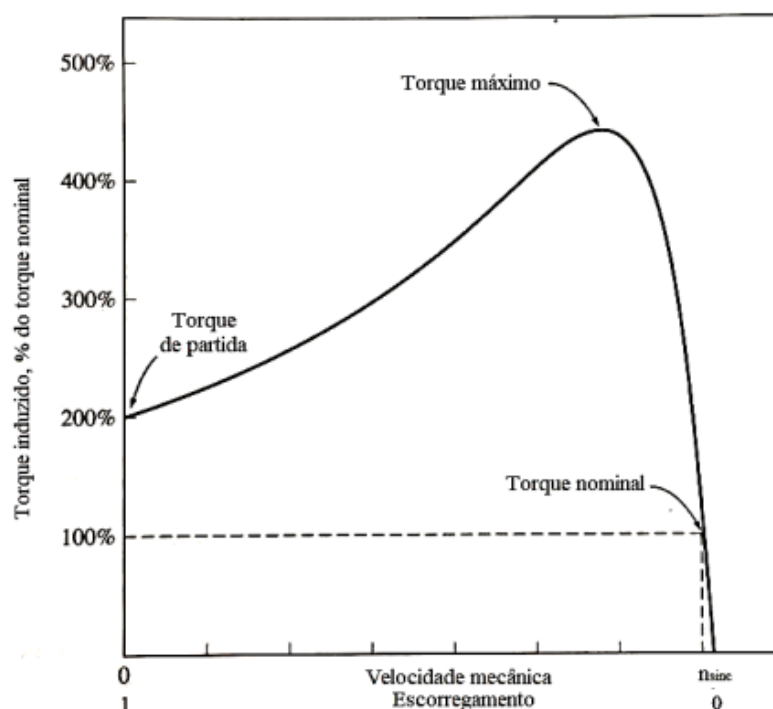
Φ - Fluxo por polo em Wb ;

J_m - Lâmina de corrente que representa uma distribuição ampere-condutor em A/rad ;

Ψ - Ângulo de deslocamento de fase entre o início da lâmina de corrente e o início da onda de densidade de fluxo debaixo de um polo (DEL TORO, 1999);

Pela (equação 33), podemos traçar a curva de torque x velocidade dos motores de indução trifásicos. Esse gráfico mostra o comportamento do torque do motor quando sua velocidade é alterada desde o momento da partida até próximo da velocidade síncrona.

Figura 8. Curva torque x velocidade motor de indução



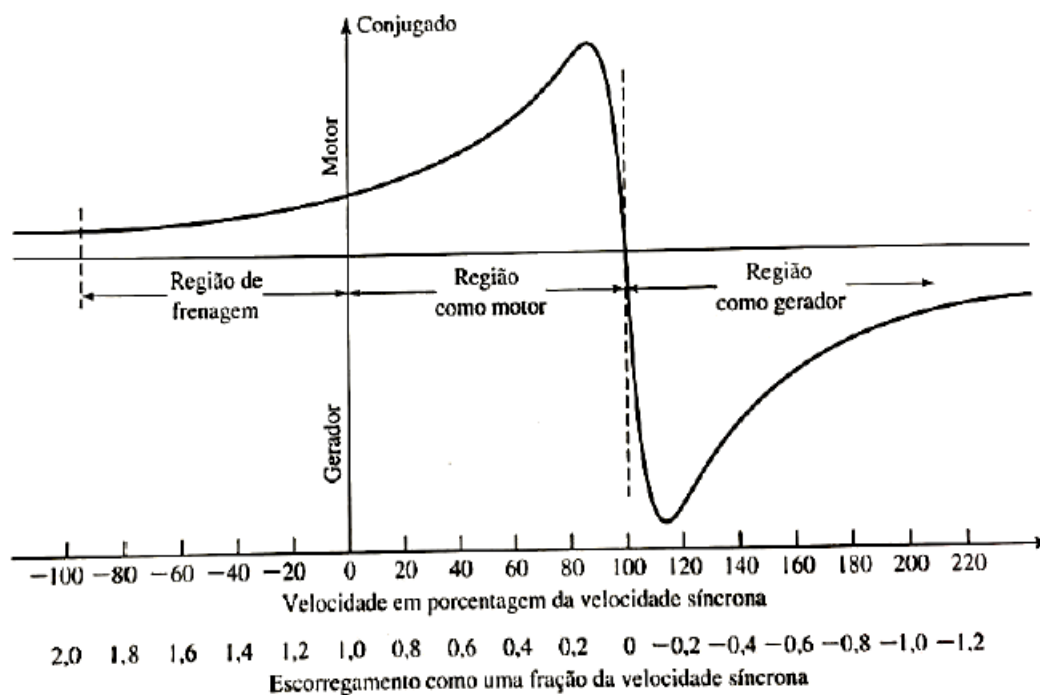
Fonte: CHAPMAN, 2013.

Pelo gráfico nota-se que: não existe torque quando o motor está próximo da velocidade síncrona, o torque de partida é maior que o nominal e existe um ponto máximo de torque que não pode ser excedido, a partir do qual um

acréscimo de velocidade resulta em grande diminuição de torque. (CHAPMAN, 2013).

O gráfico da figura 9, ilustra todas as regiões de operação do motor de indução trifásico e inclui também a operação como gerador.

Figura 9. Curva torque x velocidade motor trifásico incluídas todas as zonas de operação.



Fonte: FITZGERALD; KINKSLEY JR; UMANS, 2014.

O gráfico mostra que se o motor ultrapassar o limite da velocidade síncrona ocorre a inversão do sentido do torque, passando a máquina a operar como gerador. Outra situação seria se a máquina rotacionar no sentido inverso dos campos magnéticos, ficando com escorregamento negativo, o torque induzido irá frear o rotor, e após sua parada tentará gira-lo em sentido contrário. (CHAPMAN, 2013).

2.5.3 Perdas em máquinas CA.

No processo de conversão eletromecânica de energia nem toda a potência que entra na máquina aparece de forma útil no outro lado para ser

aproveitado, essas perdas ocorrem tanto em motores quanto geradores CA. Então para dimensionar essas perdas usamos o rendimento do motor, razão entre potência de saída e entrada, expressa em termos percentuais, calculado pela (equação 34).(CHAPMAN, 2013).

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \times 100\% \quad (34)$$

Determina-se as perdas no interior da máquina subtraindo a potência de entrada do total de perdas, conforme (equação 35). (CHAPMAN, 2013).

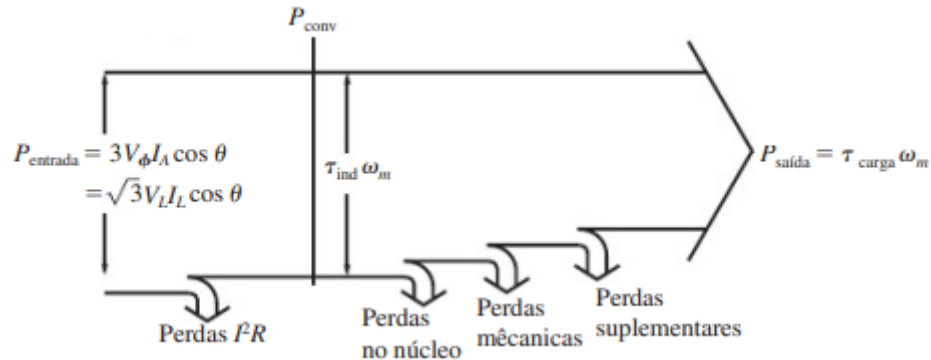
$$\eta = \frac{P_{entrada} - P_{perdas}}{P_{entrada}} \times 100\% \quad (35)$$

Pode-se descrever as perdas nas máquinas CA em:

- Perdas elétricas ou no cobre (I^2R):
Perdas por efeito joule, ou aquecimento por efeito resistivo nos enrolamentos do estator e rotor da máquina;
- Perdas no núcleo:
Perdas por histerese magnética e por correntes parasitas de Foucault, que ocorrem no núcleo do rotor, variam com o quadrado da densidade de fluxo magnético (B^2).
- Perdas mecânicas:
Perdas inerentes aos efeitos mecânicos (giro) pelo atrito e ventilação. O atrito vem dos rolamentos da máquina e a ventilação vem do contato das partes móveis da máquina com o ar dentro da carcaça do motor. Variam de acordo com o cubo da velocidade de rotação da máquina.
- Perdas suplementares:
Perdas que não podem ser classificadas, nem incluídas nas anteriores, por mais que a máquina seja analisada minuciosamente, então, para a maioria das cargas é considerada como sendo 1% da carga total.

Todas as perdas podem ser contabilizadas analisando o diagrama de fluxo de potência da figura 10.

Figura 10: Diagrama de fluxo de potência de um motor CA trifásico.



Fonte: CHAPMAN, 2013.

2.5.4 Estrutura do Motor de indução trifásico.

Foi consultado o catálogo da (WEG, [s.d.]), e descritas a seguir, todas as peças que compõem o motor de indução trifásico, ilustrado na figura 11.

Estator:

- 1. Carcaça estrutura de suporte das demais peças;
- 2. Núcleo de chapas do estator;
- 8. Enrolamento trifásico – conjunto de bobinas em cada fase;

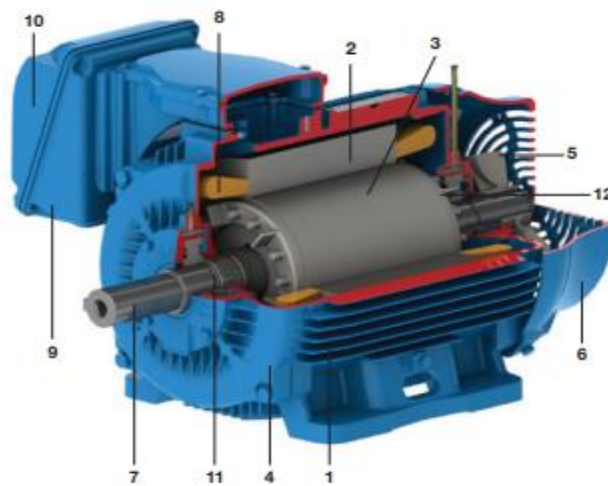
Rotor:

- 7. Eixo: Transmite a potência mecânica do motor;
- 3. Núcleo de chapas: Mesmas características das chapas laminadas do estator;
- 12. Barras e anéis em curto;

Demais peças:

- 4. Tampa;
- 5. Ventilador;
- 6. Tampa defletora;
- 9. Caixa de ligação;
- 10. Terminais;
- 11. Rolamentos;

Figura 11: Motor de indução trifásico



Fonte: WEG, [s.d.]

3. MANUFATURA ADITIVA.

O processo de impressão em três dimensões, também chamado de manufatura aditiva já está em uso há muito tempo. O funcionamento da primeira impressora tridimensional (Sterolithgraphy Apparatus) iniciou-se em 1984, por Charles W. Hull, da 3-d Systems corp. (SILVA A.L.A; et al., 2018).

É um tipo de tecnologia usada na fabricação de objetos que consiste na deposição do material camada por camada, até que a peça esteja totalmente construída. Totalmente diferente de outros tipos de fabricação já existentes como perfuração, forjamento e soldagem, em que se faz a subtração do material para modelar a peça. (CONNER BRETT P; et. al., 2014).

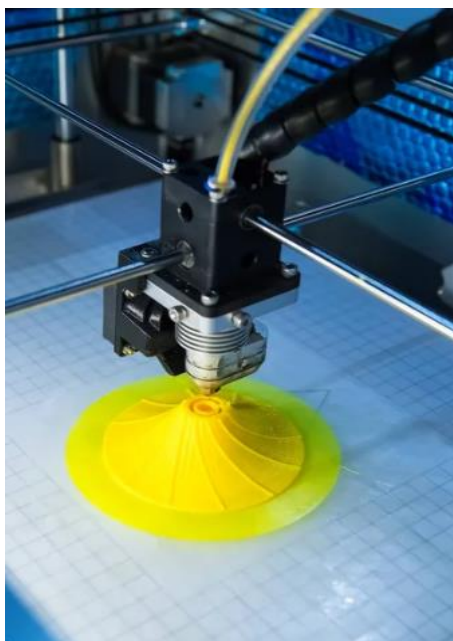
A impressão em 3 dimensões surgiu como uma importante tecnologia nos últimos anos, pois proporciona um novo método de construção (adição ou invés de subtração) e aliado a isso permite um nível maior de personalização de objetos. (CONNER BRETT P; et. al., 2014).

Em relação ao uso podemos enumerar alguns benefícios da manufatura aditiva (WELLER CHRISTIAN; et. al., 2015):

- Tecnologia com processo de fabricação universal baseado em modelos;
- Não há custo adicional relacionado à complexidade do *design*;
- Customização e flexibilidade são gratuitas;
- Produtos funcionalmente integrados podem reduzir o trabalho de montagem.

No processo de fabricação em 3D, a impressora funciona de forma muito semelhante a impressora à jato de tinta, bastante conhecida no mercado. Entretanto, no lugar de tintas multicores, essa nova tecnologia despeja filamentos em altas temperaturas que vão desenhando o modelo tridimensional do objeto em uma base, conforme figura 12. (ZHAI YUWEI; et.al., 2014).

Figura 12. Confeção de objeto utilizando manufatura aditiva



Fonte: FIREFOX, [s.d].

3.1 Impressão 3D

Impressão 3D é a técnica utilizada para reproduzir objetos previamente projetados em 3 dimensões. Esse modelo de fabricação permite a reprodução de peças através da manufatura aditiva. Nesse processo, as impressoras montam modelos tridimensionais através da sobreposição de finas camadas, até que o modelo esteja pronto para uso.

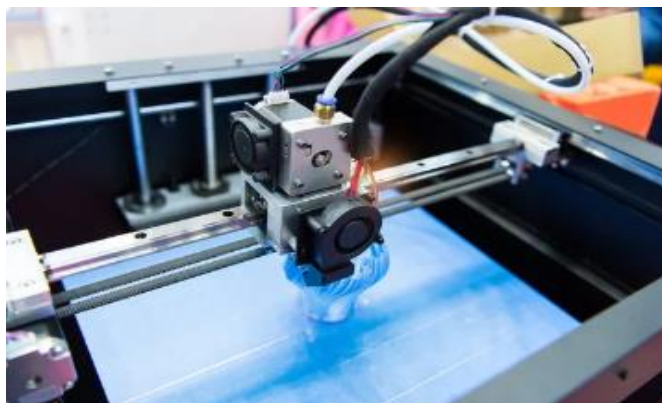
Através dela podem ser fabricados variados modelos para os mais diversos fins como: peças de máquinas, objetos de decoração, joias e até alimentos. Esse tipo de impressão tem revolucionado a realização de atividades tanto na medicina, quanto na engenharia, pois qualquer peça idealizada pode ser impressa e já colocada em uso, assim, protótipos de qualquer natureza podem ser rapidamente desenvolvidos.

É largamente utilizada em aplicações cujos componentes tem baixos níveis de produção, tamanhos bastantes reduzidos de peças e projetos complexos, como por exemplo: prototipagem rápida, indústria automotiva e setor médico.

No uso de aplicações médicas, embora esteja engatinhando, apresenta potencial de crescimento, em especial na fabricação de próteses onde já é bastante utilizada. (BERMAN BARRY, 2012).

No processo de fabricação a impressora injeta diferentes tipos de materiais que vão compor o objeto, que se inicia sempre de baixo para cima, modelando uma camada por vez, podendo a montagem demorar de alguns minutos a várias horas para ser concluído. (CRUZEIRO A.C., 2019).

Figura 13. Objeto sendo moldado na impressora 3D



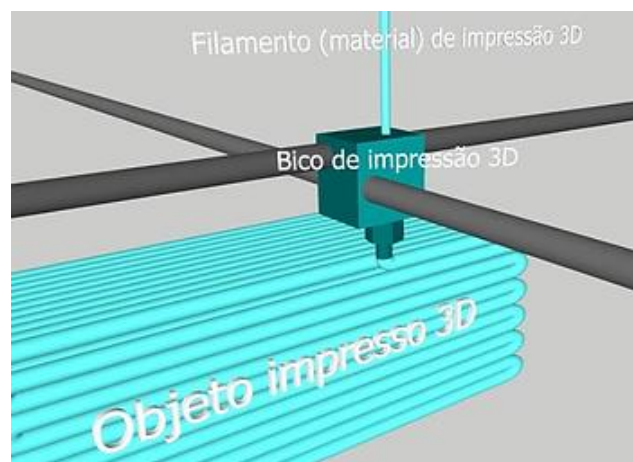
Fonte: FIREFOX, [s.d].

3.1.1 Processos de impressão 3D. (GUEY W., 2018).

- FDM (Modelagem de deposição fundida).

Funciona aplicando várias camadas sobrepostas de material através de um bico de impressão em altas temperaturas. O material se resfria instantaneamente após a aplicação.

Figura 14. Modelagem de deposição fundida

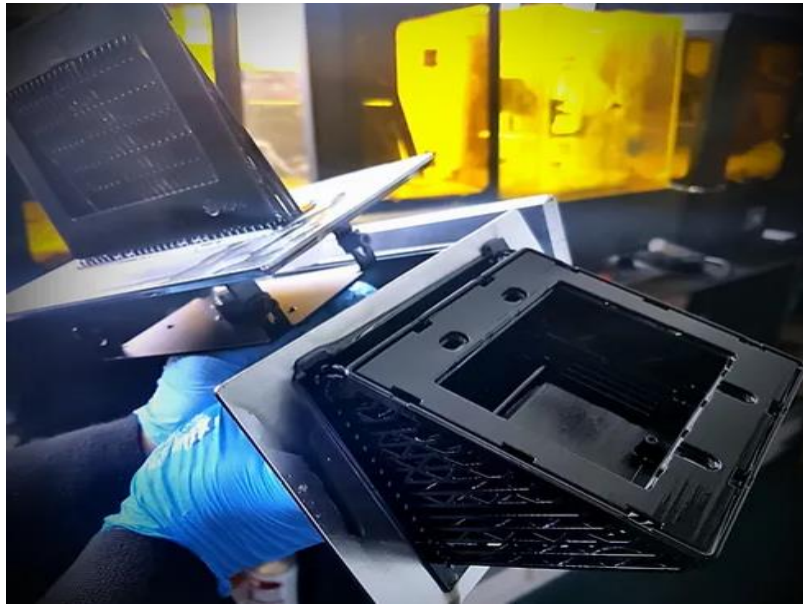


Fonte: GUEY W., 2018

- Estereolitografia (SLA).

A Tecnologia SLA forma peças plásticas, curando uma resina termoendurecível líquida com um laser UV (ultravioleta) à medida que as peças são construídas. Exigem uma estrutura de suporte que são removidas quando a construção é concluída.

Figura 15. Objeto Impresso usando estereolitografia



Fonte: GUEY W., 2018

- DLP (Processamento digital de luz).

É semelhante ao SLA, pois cura a resina líquida usando a luz UV, a diferença é que o DLP utiliza um projetor como forma de manipulação da luz UV, conforme (figura 16), enquanto o SLA-LCD utiliza uma tela LCD para controlar a passagem da luz UV.

Figura 16. Processamento digital de luz utilizando um projetor



Fonte: GUEY W., 2018

- SLS (Sinterização seletiva a laser)

Derrete materiais a base de *nylon* em plástico sólido. Como são feitas de termoplástico real são peças duráveis, adequadas para testes funcionais e podem suportar dobradiças vivas e encaixes.

Figura 17. Objeto impresso com tecnologia SLS



Fonte: GUEY W., 2018

- DMLS (Sinterização a laser de metal direto)

Envolve a propagação de uma camada muito fina de pó de metal na superfície a ser impressa. Um laser é movido lenta e firmemente através da superfície para sintetizar esse pó (as partículas dentro do metal são fundidas). Outras camadas de pó são então aplicadas e sintetizadas, para assim “imprimir” o objeto uma secção transversal por vez.

Figura 18. Peças impressas por DMLS



Fonte: GUEY W., 2018

Existem várias formas de impressão tridimensional, dependendo da aplicação, nível de detalhamento, dureza e natureza do produto. As descritas foram apenas alguns exemplos da gama de formas disponíveis no mercado para os mais diversos usos.

3.1.2 Tipos de filamentos utilizados em impressoras 3D.

- PLA (ácido polilático).

Consiste em um termoplástico de origem vegetal (derivado do milho), portanto biodegradável é o mais usado para impressões pela facilidade no manuseio. Os materiais de que é composto são utilizados em louças

descartáveis, produtos de higiene e embalagens de alimentos (B. MARIANA, 2021).

Figura 19. Filamento de *PLA*



Fonte: B. MARIANA, 2021)

- *ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno)*

O ABS foi desenvolvido para que seu uso seja feito em todos os modelos de impressoras 3D. Possui maior dificuldade de impressão em relação ao *PLA*, no entanto é superior em relação a durabilidade e resistência a altas temperaturas (B. MARIANA, 2021).

Figura 20. Filamento de ABS



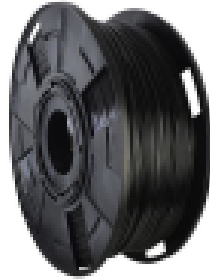
Fonte: B. MARIANA, 2021

- *PETG (Polietileno tereftalato de etileno glicol)*

Esse material é muito utilizado nas garrafas de refrigerante, água, etc. possui várias cores e misturas. No processo de moldagem do material proporciona alta resistência mecânica, dotado de maior durabilidade e

flexibilidade em relação ao *PLA*, possuindo maior facilidade no processo de impressão comparado ao *ABS*. É um material reciclável. (B. MARIANA, 2021).

Figura 21. Filamento de PETG

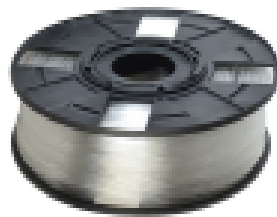


Fonte: B. MARIANA, 2021

- Nylon

Possui grande resistência, flexibilidade e durabilidade, tem maior durabilidade que o PETG, porém demanda maior dificuldade no processo de impressão. É mais indicado para aplicações como engrenagens ou buchas, que trabalham em movimentação (B. MARIANA, 2021).

Figura 22. Filamento de NYLON



Fonte: B. MARIANA, 2021

- PC (Policarbonato)

Filamento bastante durável, resistente a temperaturas mais elevadas e impactos, indicado para uso em aplicações que exigem alta resistência como peças mecânicas ou automotivas (B. MARIANA, 2021).

Figura 23. Filamento de policarbonato

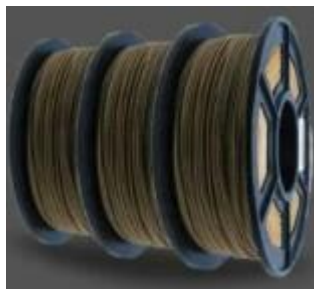


Fonte: B. MARIANA, 2021

- Madeira

Este filamento usa *PLA* na composição da fibra de madeira, e é uma novidade no mercado assim como vários outros filamentos, podendo ser usados vários tipos como pinho, videiro, cedro, ébano, etc. (B. MARIANA, 2021).

Figura 24. Filamento de madeira



Fonte: B. MARIANA, 2021

- PLA magnético

Este filamento, figura 26, é composto do PLA e pó de ferro pulverizado. Dessa forma possui propriedades semelhantes aos do ferro, respondendo inclusive aos ímãs chegando ao ponto de oxidar-se, conforme figura 25, se exposto a umidade. Pode ser utilizado em aplicações que exigem propriedades ferromagnéticas, pois, assim como o ferro possui os benefícios do magnetismo, porém não atua como ímã e não conduz eletricidade (FILAMENT2PRINT, [s.d]).

Figura 25. Oxidação do objeto impresso em PLA magnético



Fonte: FILAMENT2PRINT, [s.d]

Figura 26. Filamento de *PLA* magnético



Fonte: FILAMENT2PRINT, [s.d]

- Grafeno

O filamento a base de grafeno, se lançou no mercado como uma proposta à melhoria das propriedades mecânicas dos objetos moldados, como tração, flexão e impacto. O *PLA* Grafeno é mecanicamente mais resistente que o ABS e o *PLA* comum e pode ser usado em objetos que requeiram um uso mais rústico como ferramentas de mão e objetos de perfuração (VOOLT3D, 2021).

Figura 27. Filamento a base de grafeno



Fonte:VOOLT3D, 2021.

4. PROJETO E CÁLCULO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO.

Para a modelagem desse motor, foi necessário realizar uma série de cálculos para que fosse possível dimensionar cada peça de modo a suportar as correntes, tensões, esforços mecânicos, etc. a que serão submetidas. Todas as etapas de cálculo e projeto a seguir foram extraídas de (MARTIGNONI A., 1978).

É importante destacar que todos estes cálculos foram feitos com base em um motor convencional, composto de chapas de material ferromagnético, barras de alumínio, etc. Os resultados obtidos aqui, serão usados apenas como referência para o protótipo.

Uma vez que na impressão tridimensional serão usados filamentos a base de plásticos, polímeros, etc. é de esperar que os resultados práticos serão bastante diferentes dos calculados, pois a natureza elétrica dos materiais impressos em 3D utilizados no protótipo, não possui o mesmo comportamento dos materiais ferromagnéticos.

4.1 Potência aparente

Foi estabelecido pelo projetista que a potência do motor será 0,6 CV (cavalo vapor), a tensão de operação 220 V (volts), terá (01) par de polos, rendimento (μ) de 0,75 e fator de potência ($\cos \varphi$) de 0.83.

Usando como base o (anexo B), sua corrente de linha será 1,84 A (amperes) e sua potência aparente (kVA) (kilo volt amperes) será calculada pela (equação 36):

$$kVA = CV \cdot \frac{736 \times 10^{-3}}{\mu \cdot \cos(\varphi)} = 0,6 * \frac{736 \times 10^{-3}}{0,75 * 0,83} \quad (36)$$

Resultando em 0.7 kVA.

4.2 Solicitações elétricas no estator

Efeito que os condutores estatóricos, percorridos por corrente, exercem no entreferro. Para caracterizar esse efeito denominamos como “densidade linear da corrente” o número de amperes-fios que atuam em cada centímetro do entreferro. Na bibliografia consultada essa variável é tabelada em função da potência do motor conforme (anexo C).

A unidade de medida é o amperes-fio por centímetro. Para a variável em questão foi usado ($A = 135 \text{ Af/cm}$).

4.3 Solicitações magnéticas

O processo de indução magnética no entreferro depende de:

- Volume da máquina;
- Intensidade de corrente de magnetização;
- Dispersões magnéticas;
- Fator de potência.

Para o motor em questão ficou definido que essa variável será ($B_m = 5300 \text{ Gauss}$), conforme (anexo D).

4.4 Entreferro

Deve atender aos critérios:

- Mecânicos;
- Perdas adicionais;

- Dispersões magnéticas;
- Corrente de magnetização.

Para projetos de motores devemos obedecer aos limites máximos de entreferros já previamente tabelados conforme (anexo E), em função do comprimento do passo polar e do número de pólos. Como a máquina proposta é para fins didáticos, foi escolhido um entreferro de tamanho suficiente para que não houvesse atrito do rotor com o estator, resultando em (2 mm).

4.5 Número de polos

Ao se definir o valor da frequência da rede e a velocidade (rpm), podemos calcular a quantidade de polos usando a (equação 37).

$$P = \frac{60*f}{n} = \frac{60*60}{3600} \quad (37)$$

Em que:

f – Frequência da rede Hz;

n – Rotações por minuto do campo magnético girante em rpm;

O (anexo F), nos fornece a velocidade do motor a vazio.

Essa equação resultou em um número de polos igual a 1, ou seja, um par.

4.6 Dimensões do rotor

Para um motor estável mecanicamente, perdas aceitáveis e bom rendimento é necessário haver proporção entre diâmetro D e comprimento magnético L_m . Buscando isso usamos a relação $\epsilon = \frac{D}{L_m} = 0,8$ conforme (anexo G). Logo em seguida, precisamos calcular o fator volumérico, onde definimos o diâmetro e a largura do rotor.

O fator volumérico é calculado (mas também existe uma tabela pré-determinada com seu valor), multiplicando o quadrado do diâmetro do rotor pelo comprimento, conforme (equação 38).

$$M = D * D * Lm = 157 \text{ cm}^3. \quad (38)$$

Dimensionando o rotor: (equações 39 e 40).

- Diâmetro: $D = \sqrt[3]{\varepsilon M} = \sqrt[3]{0,8 * 157} = 5 \text{ cm}. \quad (39)$

- Comprimento: $Lm = \frac{M}{D^2} = \frac{157}{5^2} = 6,3 \text{ cm} \quad (40)$

Portanto, o diâmetro e o comprimento do rotor ficaram respectivamente iguais a 5 e 6,3 cm.

Como todo o processo de dimensionamento usa tabelas pré-determinadas, o fator volumérico desse motor deveria ser 182 cm³ conforme (anexo H), porém como podemos escolher um fator com 20% para mais ou para menos, adotamos 157 cm³, que é um valor 13% menor que o tabelado, ficando dessa forma dentro dos parâmetros aceitáveis.

4.7 Velocidade periférica

Velocidade com que se desloca a superfície do rotor. Não pode exceder determinados limites, pois a força centrífuga pode comprometer a estabilidade das massas em rotação. É calculada pela (equação 41).

$$V = \frac{\pi * D * n}{60} = \frac{\pi * 5^{-2} * 3600}{60} \quad (41)$$

Em que:

D – Diâmetro do rotor;

n – Rotação por minuto do campo girante;

Para este cálculo o resultado foi $V = 9,42 \text{ m/s}$ (metros por segundo), valor compatível com os limites tabelado no (anexo I).

4.8 Velocidade do campo girante.

Calculado pela equação (42).

$$n = \frac{60*f}{p} = \frac{60*60}{1} \quad (42)$$

em que:

f – Frequência da rede Hz;

p – Número de polos;

A velocidade do campo girante ficou estabelecida em 3600 rotações por minuto (rpm);

4.9 Passo polar

Número de ranhuras que compreendem um polo da máquina, ou seja, a área que será ocupada por uma bobina que forma o polo. Calculada pela (equação 43).

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi*5}{2} \quad (43)$$

Obtivemos como resultado: 7,85 cm.

4.10 Numero de ranhuras do estator

Para se evitar ruídos e “zumbidos”, com o motor em movimento é necessário que haja uma diferença de até 10% entre canais do rotor e estator. As relações mais usadas são 3x4 ou 4x5, conforme (MARTIGNONI A., 1978). No motor em questão será usada a relação 3x4. Ou seja, 18 ranhuras no estator e 24 ranhuras no rotor.

4.11 Número de canais por polo e por fase

O número de canais que cada fase irá abranger nos enrolamentos será calculado pela (equação 44).

$$Z = \frac{\text{Canais}}{\text{fase} * \text{polos}} = \frac{18}{3 * 2} \quad (44)$$

Resultando em ($Z = 3$), ou seja, no bobinamento cada fase irá percorrer por 03 ranhuras no interior do estator.

4.12 Cálculo do fluxo magnético dos condutores e das dimensões dos canais estatóricos.

- **Dimensões do polo** (equação 45).

$$S_p = (\tau * 0,7) * L_m = (7,85 * 0,7) * 6,3 \quad (45)$$

A seção do polo resultou em 34 cm²

- **Fluxo magnético máximo em cada polo:**

Variável $B_m = 5300$ Gauss segundo (anexo D).

O fluxo magnético é calculado pela (equação 46)

$$\Phi_m = B_m * S_p = 5300 * 34 \text{ cm}^2 \quad (46)$$

Resultando em $180 * 10^3$ Maxwell.

Como a tensão de fase é $V_f = 220V$, considera-se a força contra-eletromotriz por fase $E_f = 220 * 0,975 = 215V$.

Pelo fato de usarmos 3 canais por polo e por fase (ou seja, cada fase irá passar por três ranhuras no estator), a variável ($k_a = 0,960$), segundo o (anexo J).

- **Número de condutores por fase** (equação 47).

$$N1 = \frac{10^8 * Ef}{2,22 * k_a * \Phi_m * f} = \frac{215 * 10^8}{2,22 * 0,96 * 180 * 10^3 * 60} \quad (47)$$

Utilizamos para este projeto 93 (condutores por fase), uma vez que é um protótipo para fins didáticos. Uma quantidade maior de condutores, iria dificultar a montagem e alojamento dos condutores no estator.

- **Número de canais estatóricos.**

Quantidade de ranhuras que deverá possuir no estator para que as bobinas sejam alojadas. A bibliografia consultada indica que para este motor deverão ser usados 18 ranhuras. Para justificar, usamos a (equação 48), em que fizemos o produto entre as (03) fases, (01) par de polos e os (03) canais do estator que compõem cada fase.

$$Z1 = \text{fase} * \text{polos} * \text{nº de canais por fase} = 3 * 2 * 3 \quad (48)$$

Dessa forma chegamos ao número de 18 canais estatóricos;

- **Número de canais por fase:**

Representa a quantidade de ranhuras que cada fase irá ocupar dentro do estator. Calculada pela (equação 49).

$$Z = \frac{\text{Canais}}{\text{fase} * \text{polos}} = \frac{18}{3 * 2} \quad (49)$$

Resultando em 3 canais por fase.

- **Número de condutores por canal:**

A (equação 50), calcula a quantidade de condutores por fase que irão passar por cada ranhura no interior do estator.

$$N^o = \frac{N1}{\text{canais por fase}} = \frac{93}{3} \quad (50)$$

Resultando em 31 condutores por canal.

- **Corrente de fase absorvida pela máquina (equação 51):**

$$I_f = \frac{kVA * 1000}{3 * V_f} = \frac{0,7 * 1000}{3 * 220} \quad (51)$$

Resultando em 1,06 A (corrente de fase).

4.13 Seção dos condutores estatóricos.

A densidade de corrente deve ser feita obedecendo a uma estreita faixa de variação segundo o (anexo K). Para o estator, devemos escolher uma variação de 3 até 5 A/mm²; foi escolhido 5.

Portanto a seção do condutor será determinada pela (equação 52):

$$S = \frac{I_f}{\text{variação}} = \frac{1,06}{5} \quad (52)$$

Resultando em 0,21 mm²; foi usado o fio 23 AWG;

4.14 Dimensões dos condutores rotóricos.

Para determinar o número de barras do rotor, foi usada a indicação da referência bibliográfica. Sendo assim, usamos 24 ranhuras para o rotor. Para justificar esta escolha, o seguinte procedimento foi adotado.

O rotor foi projetado com 4 barras por pólo e por fase. Então, buscou-se o resultado do produto entre o número de fases (trifásico), o par de polos e a quantidade de barras que compunham cada polo. Resultando na (equação 53).

$$Nr = \text{fase} * \text{polos} * \text{barras por polo} = 3 * 2 * 4 \quad (53)$$

Resultando em 24 barras condutoras no rotor.

Em seguida calculamos a quantidade de barras rotóricas que iriam ser abrangidas por cada fase do estator demonstrada na (equação 54).

$$\text{Número de barras por fase} - Nr_f = \frac{n^{\circ} \text{ Barras do rotor}}{n^{\circ} \text{ de fases do motor}} = \frac{24}{3} \quad (54)$$

Resultando em 8 barras por fase.

- Corrente nos condutores rotóricos:

Corrente induzida que circulará nos condutores do rotor, calculada pela (equação 55).

$$Ir = Mr * \frac{N * I}{Nr_f} = 0,66 * \frac{93 * 1,06}{8} \quad (55)$$

Resultando em 8,13 A.

Onde:

Mr – Coeficiente tabelado no (anexo L);

N – Número de condutores por fase;

Nr_f – Número de barras por fase;

I – Corrente de fase.

Para escolher a seção das barras do rotor usamos a (equação 56), e nela

devemos respeitar uma variação de 4 até 6 A/mm²; foi escolhido 6, conforme (anexo K).

$$S_r = \frac{I_r}{\text{variação}} = \frac{8,13}{6} \quad (56)$$

Resultando em 1,35 mm², dessa forma, a seção das barras escolhida para o rotor foi de 1,5 mm².

Após realizar toda etapa de cálculos foi elaborada a (tabela 1) representando cada parâmetro.

Potência aparente	0,7 kVA
Tensão de alimentação	220 V
Potência	0,6 CV
Número de polos	1 par
Velocidade do campo girante	3600 rpm
Diâmetro do rotor	5 cm
Comprimento do rotor	6,3 cm
Número de ranhuras do estator	18
Número de ranhuras do rotor	24
Número de condutores por fase	93
Número de condutores por canal	31
Seção dos condutores estatóricos	0,21 mm ²
Seção das barras do rotor	1,5 mm ²

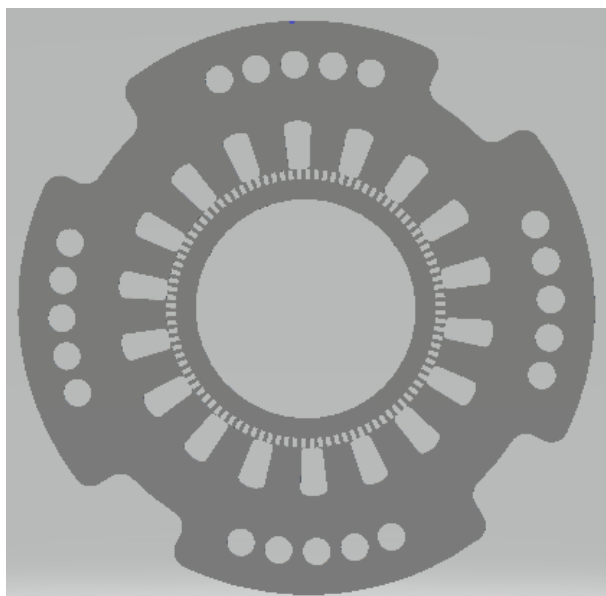
Tabela 1. Parâmetros calculados para o motor

5. CONSTRUÇÃO E ENSAIOS DO MOTOR

De posse dos parâmetros do motor, foi iniciado o processo de desenho de cada peça no *software solidWorks*. Este *software* permite a visualização em três dimensões de cada componente projetado, permitindo um melhor planejamento dos detalhes de encaixe, possíveis folgas, atritos e outros detalhes que possam comprometer o funcionamento, para que no processo de impressão e montagem haja um perfeito acoplamento das partes da máquina em questão.

Na etapa de desenho das peças, podemos visualizar na figura 28, a lâmina em 3D do estator. Cada lâmina possui 1mm de espessura, e foram empilhadas de forma a compor uma peça sólida, onde serão alojadas as espiras condutoras. Este modelo foi projetado de forma semelhante aos estatores comerciais da Weg.

Figura 28. Lâmina de 1mm espessura do estator.



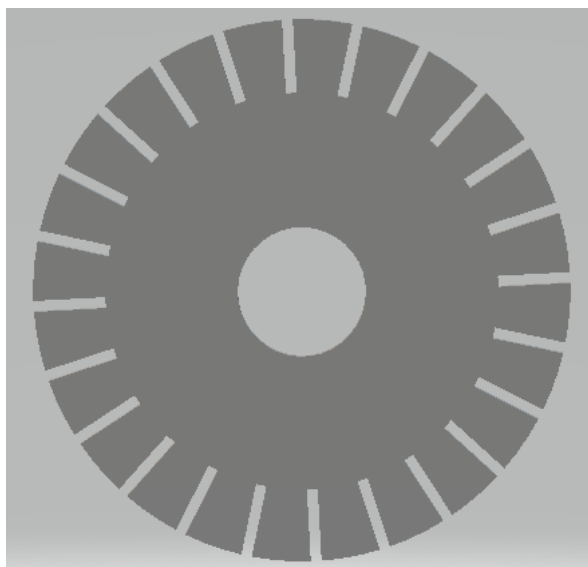
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Possui 18 ranhuras e cada uma tem área suficiente para alojar 62 espiras além do material isolante entre elas. A estrutura que une todas as ranhuras ao centro, foi colocada para ajudar na impressão de cada lâmina, pois no processo de retirada da base após a impressão, havia uma certa adesão da peça à base, e na retirada algumas ranhuras ficavam empenadas. Então, para corrigir esse

defeito, foi necessário fazer essa adequação. Depois de impressa essa estrutura ao centro é eliminada.

Na Figura 29, visualizamos a lâmina do rotor da máquina. Tem a mesma espessura da lâmina do estator, sendo empilhadas de forma a compor uma estrutura sólida e única. Possui 24 ranhuras onde serão alojadas barras de dimensões 10x15mm, que formarão a estrutura gaiola de esquilo, onde circularão correntes que darão movimento ao rotor.

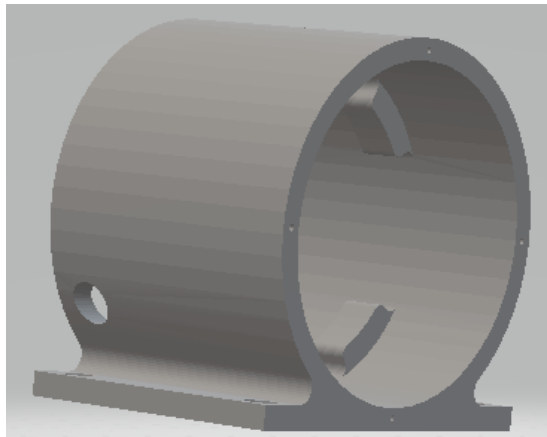
Figura 29. Lâmina de 1mm de espessura do rotor



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

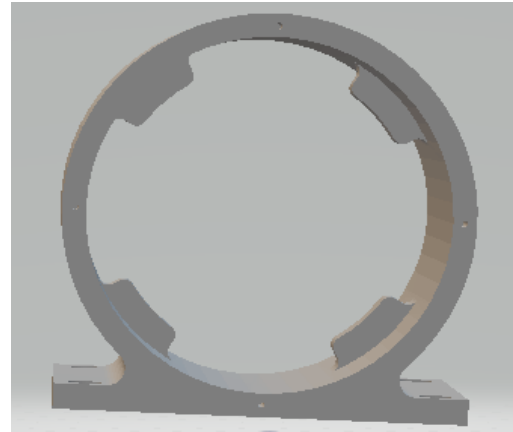
Na construção da carcaça do motor, foi levado em consideração a saída dos cabos de alimentação sendo deixada uma abertura lateral. Foram projetadas pequenas elevações no interior, para perfeito encaixe do estator, não permitindo que se desloque de sua posição. E deixados orifícios para encaixe das tampas dianteiras e traseiras além da estrutura de fixação em bancadas, conforme figuras 30, 31 e 32.

Figura 30. Saída de cabos de alimentação



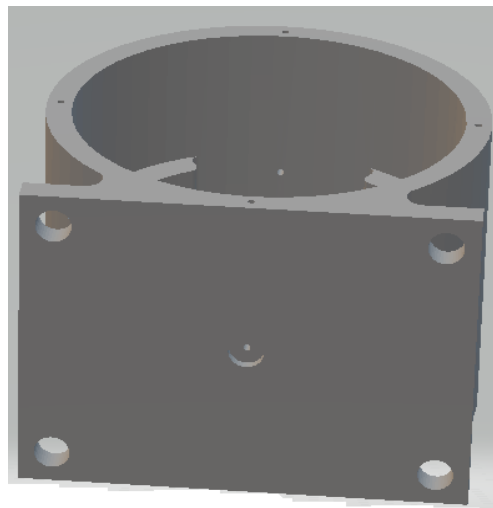
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Figura 31. Encaixe para a estrutura do estator



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

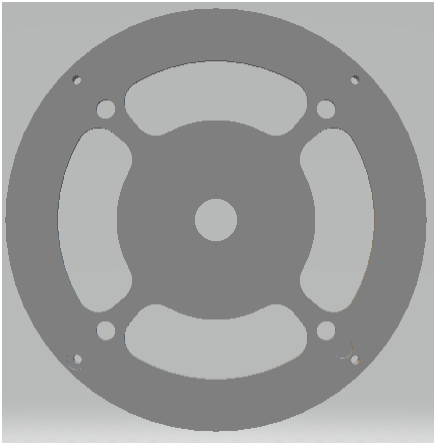
Figura 32. Orifícios para fixação de tampas e bancadas



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

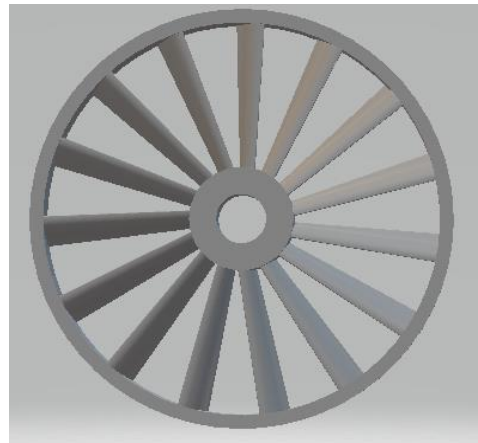
Na figura 33, temos o modelo das tampas do motor que possui aberturas em seu entorno possibilitando a circulação de ar pelo interior, o que resulta no processo de resfriamento da máquina quando o ventilador, figura 34, está em pleno funcionamento.

Figura 33. Tampa do motor



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Figura 34. Ventilador



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Conectando todas as peças que compõem o núcleo rotórico temos o eixo, como demonstrado na figura 35.

Figura 35. Eixo do motor



Fonte: AUTORIA PROPRIA

Foi utilizada a impressora tridimensional modelo ENDER 3 S1, conforme figura 36, necessária para construir todas as peças modeladas no *software solidWorks*.

Foram usados na impressão 3D, um total de 3 rolos (500 gramas cada) de filamento PLA magnético, 1 rolo de filamento ABS e uma pequena porção do filamento de grafeno, todos com espessura de 1,75mm. O PLA magnético por ser um material bem exótico precisou ser importado, já o ABS e o grafeno foram obtidos no mercado nacional. Os custos de cada filamento estão descritos na (tabela 2). Os demais materiais não fizeram parte da impressão como: rolamentos, materiais isolantes, barras/anéis de cobre do rotor e bobinas condutoras.

Tabela 2 – Custo de cada filamento

Filamento	Preço R\$/kg
PLA magnético	580*
ABS	55
Grafeno	200

* Material importado sujeito a variação do preço do dólar.

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Figura 36. Impressora 3D modelo ENDER 3 S1



Fonte: B&H, 2023

As figuras abaixo trazem a sequência de peças que foram moldadas na impressora tridimensional. Como foram muitas peças pequenas, foi demandado um tempo bastante longo para a conclusão das impressões. Algumas peças necessitaram mais de 12 horas de trabalho ininterrupto. De forma que foram empregados vários dias para terminar 100% das impressões.

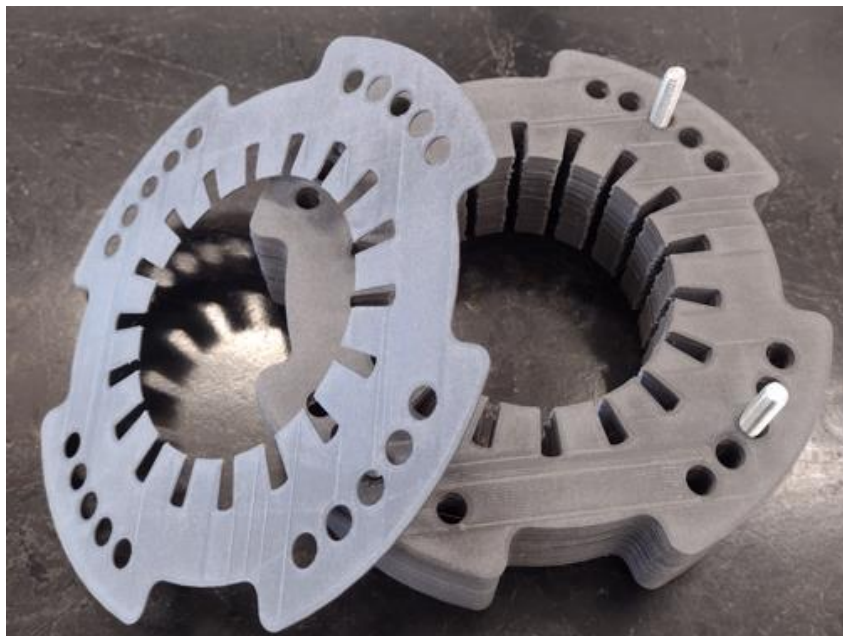
O tipo de impressão utilizada foi o de modelagem de deposição fundida (FDM) que funciona aplicando várias camadas sobrepostas de material através de um bico de impressão a altas temperaturas, em que o material se resfria instantaneamente após a aplicação.

Depois de impressas, as peças tiveram um acabamento aceitável, porém a impressora não é tão precisa nas bordas, e deixa uma pequena imperfeição ao longo do material. Para corrigir esse percalço, uma lixa precisou ser atritada nas camadas internas de algumas peças.

De posse dos dados, dimensionamento e desenho de todas as peças necessárias, foi iniciado o processo de impressão de cada componente do motor, listado a seguir.

- **Estator**

Figura 37. Montagem do estator



Fonte: AUTORIA PROPRIA.

Após a impressão de cada lâmina em *PLA magnético*, foi feito o empilhamento de todas as peças, conforme ilustrado na figura 37, formando um único bloco sólido. Em seguida, foram inseridas bobinas com as costuras necessárias e o material isolante no interior das ranhuras, conforme pode ser demonstrado na figura 38.

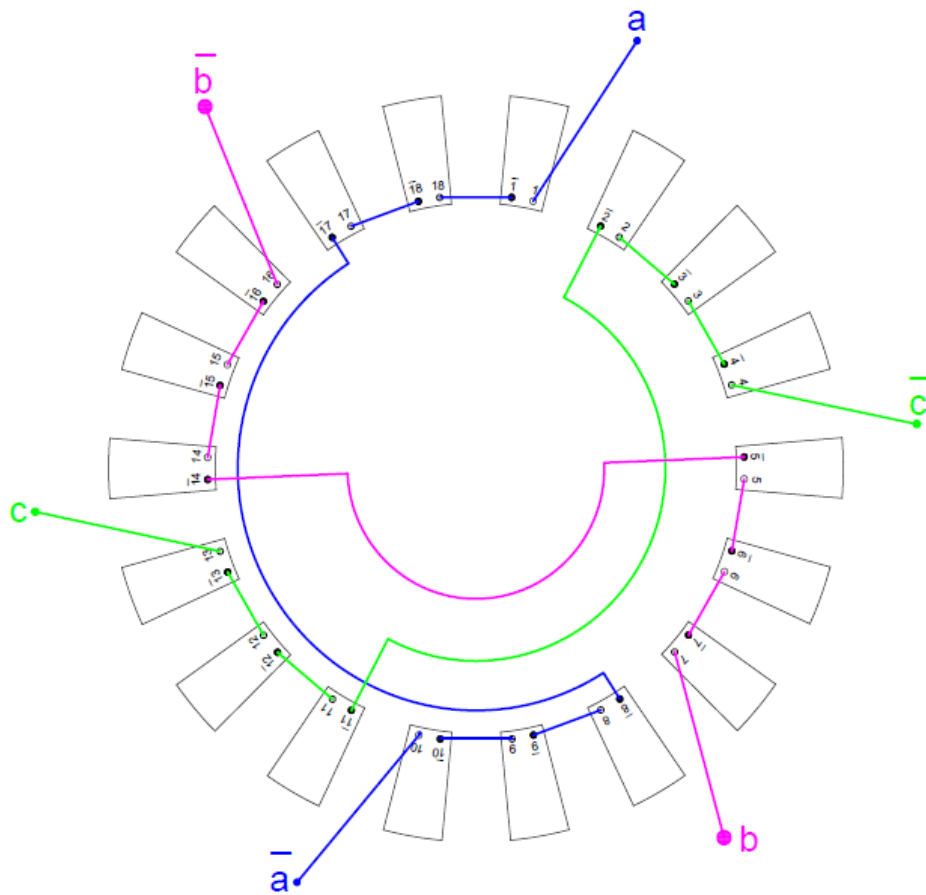
Figura 38. Estator com bobinas.



Fonte: AUTORIA PROPRIA

As bobinas foram alojadas em cada ranhura, seguindo o esquema de ligação da figura 39, sempre respeitando a defasagem de 120° entre elas.

Figura 39. Disposição das bobinas no estator.



Fonte: AUTORIA PROPRIA

Na figura 39 temos a representação das fases A, B e C, do modo como estão distribuídas no interior das ranhuras ao longo de todo o estator, com seus respectivos pontos de entrada e saída. Para facilitar a visualização, cada uma está representada em cor diferente.

- **Rotor**

Figura 40. Montagem da estrutura do Rotor.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Como já mencionado anteriormente o rotor (figura 40), é laminado e constituído de *PLA magnético*. Já a gaiola é formada a partir de chapas com 1,5 mm² de cobre formando curto-circuito com um anel de mesmo material. A junção desses materiais foi possível através de solda. O eixo é constituído de grafeno, que tem uma maior resistência a temperatura, e nas extremidades temos os rolamentos que possibilitam o giro do eixo, estes não fizeram parte da impressão 3D.

- **Tampas e demais peças.**

A seguir temos as tampas, ventilador e carcaça todos impressos em ABS, que é um material bastante resistente e utilizado nas diversas impressões 3D atualmente.

Figura 41. Impressão das tampas.



Fonte: AUTORIA PROPRIA

Figura 42. Impressão do ventilador.



Fonte: AUTORIA PROPRIA

Figura 43. Impressão da carcaça



Fonte: AUTORIA PROPRIA

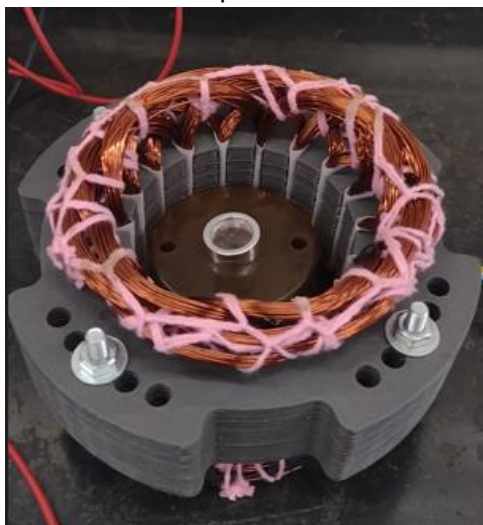
5.1 Ensaio do motor

Depois de montada toda a estrutura do estator, foi providenciado o teste de continuidade entre as bobinas para se verificar a ocorrência de algum possível curto circuito. Após a constatação de que a isolamento estava preservada, o motor foi fechado na ligação estrela e conectado na fonte de tensão para verificar a formação do campo girante no interior do estator. Foi usada uma bancada que permitia o acréscimo gradual da corrente. Para que fosse possível visualizar o campo girante, foi colocado uma bússola no interior do estator conforme a figura 44, que começou a girar assim que as bobinas foram alimentadas, provando que a montagem estava de acordo com o esperado.

Além da bússola também foi usado uma latinha de alumínio, que foi inserida no espaço interno do estator. Assim que as bobinas foram percorridas por corrente, a latinha entrou em movimento de rotação sendo impulsionada pelo campo magnético, que atuou conforme a teoria de campos girantes e provando que a posição das bobinas, ligação e fechamento das ligações estavam funcionando perfeitamente e de acordo com a literatura técnica.

Os testes com o rotor em rotação não foram possíveis pois ocorreu um pequeno atrito nos limites do entreferro, dificultando a rotação, esse empecilho surgiu porque na fase de projeto, colocamos um entreferro bem preciso e a impressora não imprimiu com a perfeição desejada, ficando o material com algumas rugosidades nas bordas, tanto do estator quanto do rotor.

Figura 44. Teste feito com bússola provando a existência do campo girante



Fonte: AUTORIA PROPRIA

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A montagem do protótipo demandou um vasto conhecimento no campo das máquinas elétricas, pois as equações, modelagem, projeto, e no fim a execução, exigiu a junção de várias áreas de conhecimento que por vezes não temos contato, como por exemplo, modelagem de máquinas, assunto pouco aprofundado no campo acadêmico.

Através desta experiência foi oportunizado o contato com tecnologias inovadoras como a modelagem/impressão tridimensional, que soluciona vários problemas de reposição ou criação de novas peças ou objetos. Sabemos que ao se trabalhar no campo de pesquisa e inovação na área da indústria principalmente de motores, engrenagens, eixos, etc. este tipo de conhecimento se torna essencial para revolucionar a eficiência e aplicações específicas das máquinas.

A impressora usada atendeu quase todas as expectativas, pois possibilitou o uso de diversos materiais como grafeno, ABS e PLA magnético, entregando peças firmes, robustas e bem trabalhadas, porém devido a dilatação do material ferromagnético e erros de precisão nas bordas das lâminas impressas, resultaram em um entreferro menor que o planejado no *solidWorks*, fazendo com que o rotor tivesse atrito em algumas partes do estator dificultando a rotação e impossibilitando a realização de ensaios com o rotor em movimento.

Quanto ao objetivo de tornar a construção do motor um modelo didático obtivemos êxito, pois todas as peças são de fácil manuseio, visualização, montagem, sendo possível demonstrar o fechamento das bobinas (se estrela ou triângulo), e após a alimentação das mesmas, usando um material adequado como por exemplo um corpo de alumínio, podemos fazer a demonstração da rotação dos campos magnéticos que funciona de acordo com as teorias já abordadas no escopo da pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

S. J. CHAPMAN. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**, 5ª edição, 2013.

V. D. TORO. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**, 1999.

L.C.F. JUNIOR e R.S SILVA, “**Maquinas elétricas**” Londrina, 2018.

D.U. STEPHEN, “**Maquinas elétricas**”, 7º edição, Porto alegre, 2014

G. CARVALHO,” **Máquinas elétricas teorias e ensaios**”, 4º edição, São Paulo, 2011.

IFBA - Instituto federal da Bahia.” **Motor de indução trifásico**”. Disponível em: <<http://www.ifba.edu.br/PROFESSORES/castro/MIT>>. acesso em: 25 out 2022.

WEG. **Motores elétricos Guia de especificação**. Disponível em: <https://static2.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web>>. Acesso em: 18 de out 2022.

MUSEU WEG. **A história do motor elétrico que você precisa conhecer**. Disponível em: <<https://museuweg.net/blog/a-historia-do-motor-eletrico/>>. Acesso em 25 de out 2022.

NASCIMENTO JUNIOR G.C. **Máquinas elétricas: Teorias e ensaios: Editora Érica LTD**, São Paulo, 2011. Disponível em: <<https://materialpublic.imd.ufrn.br/curso/disciplina/1/58/4/3>>. Acesso em 22 out 2022.

PEA 3311. Escola politécnica da universidade de São Paulo. **Motor de indução parte 1 e 2**. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1615249/mod_resource/content/6/MI_PEA3311_2016_Resumo%20.pdf>. Acesso em 25 out 2022.

SILVA A.L.A; FEITOSA A.D; ALBUQUERQUE R.M; XAVIER A.S. **Manufatura aditiva: Caracterização e comparação com os processos de produção existentes.** Disponível em:

<https://abepro.org.br/biblioteca/TN_WIC_264_516_35268.pdf>.

Acesso em 01 dez 2022.

CONNER, BRETT P.; MANOGHARAN GUHA P.; MARTOF ASHLEY N.; RODOMSKY LAUREN M.; RODOMSKY CITLYN M.; JORDAN DAKESHA C.; LIMPEROS; JAMES W. **Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services.** Addit. Manuf., vol. 1, pp. 64–76, 2014.

WELLER CHRISTIAN; KLEER ROBIN; PILLER FRANK T. **Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited.** Int. J. Prod. Econ., vol. 164, pp. 43– 56, 2015.

ZHAI YUWEI; LADOS DIANA A.; LAGOY JANE. L. **Additive Manufacturing: Making Imagination the Major Limitation.** The Minerals, Metals & Materials The Minerals, Metals & Materials Society, vol 66, pp. 808-815, 2014.

BERMAN BARRY. **3-D printing: The new industrial revolution.** Bus Horiz. Vol. 55, no. 2, pp. 155–162, 2012.

CRUZEIRO A.C. **Explorando a impressão 3D – conceito, etapas e futuro.** Disponível em:

<<https://via.ufsc.br/explorando-a-impressao-3d-conceito-etapas-e-futuro/>>.

Acesso em 01 dez de 2022.

GUEY W. **Tipos de Impressora 3D e suas aplicações.** Disponível em:

<<https://www.printit3d.com.br/post/tipos-de-impressora-3d>>. acesso em 01 dez 2022.

FITZGERALD A. E.; KINGSLEY JR CHARLES; UMANS STEPHEN D. **Máquinas Elétricas. 6. ed.** Porto Alegre: Bookman, 2014. ISBN 978-85-60031-04-7.

MARTIGNONI A. **Máquinas de Corrente Alternada, 3ª ed.**, Porto Alegre: GLOBO, 1978.

NIED A. **Maquinas elétricas.** Disponível em: <<https://docplayer.com.br/15635805-Aula-25-unidade-3-maquinas-eletricas-prof-ademir-nied-dr-eng-eletrica-dee2an-joinville-udesc-br.html>>. Acesso em 04 out 2023.

CUPERTINO A.F. **Teoria do campo girante.** Disponível em: <<https://www.gesep.ufv.br/wp-content/uploads/Aula-13-Teoria-do-campo-girante.pdf>>. Acesso em 04 out 2023.

B. MARIANA. **Filamentos de impressora 3D.** Disponível em: <https://www.camboriu.ifc.edu.br/labifmaker/wpcontent/uploads/sites/19/2021/10/CT_01-Filamentos-de-impressora-3D> acesso em 28 nov 2023.

FILAMENT2PRINT. **Pla magnético proto-pasta.** Disponível em: <<https://filament2print.com/pt/pla-especiais/658-pla-magnetico-proto-pasta.html>> acesso em 27 nov 2023.

FIREFOX. **Depositphotos.** Disponível em: <<https://depositphotos.com/br/portfolio-1006354.html?content=photo>> acesso em 28 nov 2023.

VOOLT3D. **Filamento PLA Grafeno.** Disponível em: <<https://www.lojavoolt3d.com.br/filamento-pla-grafeno>> acesso em 29 nov 2023.

B&H. **Impressora 3D Creality Ender-3 S1 Pro FDM.** Disponível em: <https://www.bhphotovideo.com/c/product/1707834REG/creality_ender_3_s1_pro_3d.html> acesso em 28 nov 2023.

ANEXO A – Potência aparente, (fator de potência x rendimento) e corrente absorvida pelos

MOTORES ASSINCRONOS TRIFÁSICOS

Potência em CV	2 Pólos				4 Pólos				6 Pólos				8 Pólos			
	Potência Aparente kVA	Fator de Potência X Rendimento	220 V.	380 V.	Potência Aparente kVA	Fator de Potência X Rendimento	220 V.	380 V.	Potência Aparente kVA	Fator de Potência X Rendimento	220 V.	380 V.	Potência Aparente kVA	Fator de Potência X Rendimento	220 V.	380 V.
			Corrente (Amp.)	Corrente (Amp.)			Corrente (Amp.)	Corrente (Amp.)			Corrente (Amp.)	Corrente (Amp.)			Corrente (Amp.)	Corrente (Amp.)
0,1	0,14	0,526	0,35	0,208	0,19	0,388	0,49	0,29	0,244	0,308	0,63	0,37	0,318	0,233	0,82	0,478
0,15	0,2	0,553	0,50	0,292	0,265	0,417	0,685	0,40	0,33	0,334	0,825	0,495	0,418	0,264	1,08	0,63
0,2	0,25	0,586	0,64	0,380	0,34	0,431	0,88	0,51	0,41	0,359	1,06	0,62	0,51	0,289	1,32	0,77
0,3	0,37	0,596	0,95	0,560	0,476	0,465	1,25	0,72	0,563	0,392	1,46	0,85	0,70	0,315	1,82	1,06
0,4	0,48	0,613	1,25	0,720	0,603	0,488	1,56	0,92	0,72	0,408	1,88	1,09	0,86	0,342	2,22	1,30
0,5	0,59	0,624	1,55	0,90	0,74	0,496	1,93	1,11	0,86	0,428	2,22	1,30	1,02	0,360	2,65	1,54
0,6	0,70	0,630	1,84	1,06	0,86	0,513	2,23	1,30	1,00	0,441	2,60	1,51	1,19	0,371	3,1	1,80
0,7	0,82	0,631	2,12	1,24	0,97	0,530	2,52	1,46	1,11	0,464	2,91	1,70	1,34	0,384	3,5	2,02
0,8	0,93	0,632	2,42	1,40	1,07	0,550	2,80	1,65	1,25	0,470	3,25	1,90	1,46	0,402	3,82	2,22
0,9	1,03	0,640	2,7	1,56	1,19	0,556	3,10	1,80	1,37	0,484	3,58	2,08	1,60	0,414	4,2	2,42
1	1,13	0,650	2,95	1,73	1,32	0,557	3,41	2,00	1,5	0,490	3,80	2,25	1,75	0,421	4,55	2,65
1,5	1,7	0,650	4,4	2,60	1,87	0,590	4,86	2,85	2,1	0,525	5,45	2,40	2,47	0,446	6,45	3,75
2	2,25	0,654	5,9	3,42	2,41	0,610	6,30	3,65	2,7	0,545	7,00	4,20	3,20	0,460	8,20	4,75
2,5	2,73	0,685	7,1	4,15	2,92	0,630	7,60	4,45	3,22	0,565	8,20	4,90	3,80	0,484	9,95	5,75
3	3,2	0,690	8,3	4,82	3,45	0,640	9,00	5,20	3,87	0,573	10,1	5,85	4,35	0,507	11,4	6,65
3,5	3,67	0,703	9,6	5,55	3,96	0,650	10,4	6,00	4,4	0,585	10,15	6,7	4,95	0,520	13,0	7,50
4	4,15	0,710	10,8	6,30	4,49	0,656	11,6	6,80	4,95	0,594	10,3	7,5	5,55	0,530	14,5	8,40
5	5,2	0,720	13,6	7,90	5,55	0,663	14,5	8,40	6,00	0,614	15,5	9,1	6,65	0,550	17,4	10,1
6	6,05	0,725	15,8	9,20	6,55	0,674	17,1	10,00	7,05	0,625	18,3	10,6	7,80	0,565	20,2	11,8
7	7,1	0,726	18,5	10,7	7,65	0,680	19,9	11,50	8,17	0,630	21,2	12,4	9,0	0,572	23,3	13,6
8	8,0	0,736	20,8	12,0	8,65	0,681	22,3	13,10	9,2	0,638	24,0	14,0	10,0	0,589	26,0	15,2
9	9,0	0,736	23,4	13,7	9,82	0,682	25,1	14,60	10,3	0,643	26,8	15,6	11,1	0,597	29,0	16,8
10	10,0	0,736	26,2	15,3	10,7	0,690	28,0	16,40	11,25	0,654	29,2	17,1	12,0	0,614	31,2	18,2
15	14,8	0,746	38,2	22,3	15,7	0,703	40,9	23,80	16,4	0,673	42,2	24,8	17,1	0,645	44,0	26,0
20	19,0	0,774	48,0	28,8	20	0,736	51,8	30,30	20,9	0,705	54,0	31,7	21,8	0,675	56,0	33,0
25	23,2	0,794	60,0	35,1	24,9	0,738	64,2	37,50	25,6	0,718	66,0	38,5	26,9	0,684	69,0	40,0
30	27,5	0,804	72,0	43,0	29,3	0,740	76,0	44,30	30,2	0,730	78,0	45,8	31,8	0,695	82,0	48,0
40	36,0	0,823	93,0	54,8	38,5	0,765	100,0	58,00	39,8	0,740	103,0	60,0	41,0	0,718	106,0	62,0
50	44,7	0,825	116,0	67,5	48,0	0,768	125,0	72,00	48,9	0,752	126,0	74,0	49,0	0,750	127,0	74,0
60	53,0	0,832	138,0	80,5	56,5	0,780	146,0	85,0	57,0	0,774	147,0	86,0	57,5	0,760	152,0	88,5
70	62,0	0,832	162,0	93,0	65,0	0,792	170,0	98,00	66,0	0,780	171,0	100,0	68,0	0,760	180,0	104,0
80	71,0	0,832	183,0	106,0	74,0	0,796	192,0	112,00	74,0	0,796	194,0	113,0	77,0	0,765	200,0	116,0
90	78,0	0,850	203,0	118,0	83,0	0,800	216,0	125,00	83,0	0,80	216,0	126,0	85,0	0,775	223,0	130,0
100	85,7	0,850	222,0	130,0	90,0	0,820	235,0	138,00	92,0	0,80	240,0	140,0	95,0	0,775	247,0	144,0
150	129,0	0,850	337,0	195,0	135,0	0,820	350,0	205,00	137	0,805	356,0	208,0	140,0	0,787	360,0	210,0
200	173,0	0,850	450,0	262,0	180,0	0,820	465,0	270,00	182	0,810	475,0	286,0	185,0	0,795	480,0	280,0
300	260,0	0,850	680,0	395,0	270,0	0,820	700,0	408,00	272	0,810	705,0	410,0	274,0	0,800	710,0	415,0
400	349,0	0,850	908,0	523,0	358,0	0,820	930,0	540,00	369	0,810	925,0	555,0	372,0	0,800	985,0	565,0
500	430,0	0,850	—	650	450	0,820	—	680,00	457	0,810	—	680,0	465,0	—	—	710,0

ANEXO B – (Recorte usado para análise do projeto).

Potência aparente, (fator de potência x rendimento) e corrente absorvida pelos MOTORES ASSINCRONOS TRIFÁSICOS

Potência em CV	2 Pólos			
	Potência Aparente kVA	Fator de Potência X Rendimento	220 V.	380 V.
			Corrente (Amp.)	Corrente (Amp.)
0,1	0,14	0,526	0,35	0,208
0,15	0,2	0,553	0,50	0,292
0,2	0,25	0,586	0,64	0,380
0,3	0,37	0,596	0,95	0,560
0,4	0,48	0,613	1,25	0,720
0,5	0,59	0,624	1,55	0,90
0,6	0,70	0,630	1,84	1,06
0,7	0,82	0,631	2,12	1,24

ANEXO C – Densidade linear da corrente

CV	A				
	2 pólos	4 pólos	6 pólos	8 pólos	12 ou mais pólos
0,5	135	195	190	—	—
0,8	160	205	200	—	—
1	170	215	205	—	—
2	185	225	225	—	—
3	185	230	235	—	—
5	190	235	240	—	—
10	200	240	250	—	—
20	200	245	270	—	—
50	240	285	290	300	310
100	255	295	300	300	310
200	290	310	320	330	330
500	340	360	370	370	370

ANEXO D – Valores de indução no entreferro

CV	B_m				
	2 pólos	4 pólos	6 pólos	8 pólos	12 pólos ou mais
0,5	5.300	5.700	5.700	—	—
0,8	5.500	5.900	5.900	—	—
1	5.600	6.100	6.100	—	—
2	5.800	6.300	6.300	—	—
3	5.900	6.300	6.600	—	—
5	6.100	6.400	6.700	—	—
10	6.100	6.500	6.800	—	—
20	6.200	6.500	6.900	—	—
50	6.300	6.600	7.000	7.100	7.500
100	6.300	6.600	7.000	7.200	7.500
200	6.300	6.700	7.100	7.300	7.700
500	6.400	6.800	7.200	7.400	7.800

ANEXO E – Valor mínimo dos entreferros em (mm).

τ cm	l_e (mm)						
	2 pólos	4 pólos	6 pólos	8 pólos	12 pólos	20 pólos	24 pólos
6	—	0,22	0,26	0,27	0,30	—	—
8	—	0,26	0,32	0,33	0,34	—	—
10	—	0,30	0,36	0,37	0,38	0,45	0,52
15	0,32	0,42	0,50	0,53	0,60	0,70	0,80
20	0,47	0,52	0,70	0,73	0,82	0,95	1,10
25	0,62	0,70	0,90	0,95	1,10	1,20	1,30
30	0,80	0,90	1,10	1,20	1,30	1,40	1,60
40	1,20	1,30	1,60	1,70	—	—	—
50	1,70	1,70	2,00	—	—	—	—
60	2,20	2,20	2,50	—	—	—	—
70	2,70	2,70	3,00	—	—	—	—
80	3,20	3,20	—	—	—	—	—

ANEXO F – Velocidade do motor a vazio

$n =$ rotações por minuto, a vazio			
Pólos $2p$	Frequência		
	50/3	50	60
2	1.000	3.000	3.600
4	500	1.500	1.800
6	333	1.000	1.200
8	250	750	900
10	200	600	720
12	166	500	600
16	125	375	450
20	100	300	360
24	83	250	300

ANEXO G – Proporção entre diâmetro e comprimento magnético

Pares de pólos p	1	2	3	4	5	6	8	10	12	20
$\epsilon = \frac{D}{l_m}$	0,8	1,0	1,2	1,6	2	2,3	2,8	3,3	3,8	6

ANEXO H – Fator volumérico

CV	Fator volumétrico M dos motores de 60 Hz				
	2 pólos	4 pólos	6 pólos	8 pólos	12 pólos
0,5	182	300	530	—	—
0,8	240	400	700	—	—
1	265	455	800	—	—
2	470	790	1 300	—	—
3	655	1 100	1 610	—	—
5	980	1 700	2 500	—	—
10	1 800	3 000	4 500	—	—
20	4 000	6 600	8 650	—	—
50	7 700	13 500	19 000	24 000	35 000
200	14 000	24 000	34 600	46 000	72 000
100	24 800	44 000	61 000	80 000	114 000
500	52 000	96 000	133 000	175 000	260 000

ANEXO I – Velocidade periférica

CV	Velocidade periférica em m/seg				
	2 pólos	4 pólos	6 pólos	8 pólos	12 pólos
0,5	15,50	9,60	7,50	—	—
0,8	15,50	11,00	8,00	—	—
1	17,00	11,50	8,50	—	—
2	22,00	14,00	10,00	—	—
3	23,50	14,50	11,00	—	—
5	26,50	16,00	12,00	—	—
10	28,00	17,00	13,00	—	—
20	29,50	19,00	16,00	—	—
50	38,50	25,00	20,00	18,00	16,00
100	—	30,00	24,00	22,00	19,00
200	—	36,00	30,00	27,00	23,00
500	—	—	38,50	34,00	29,00

ANEXO J – Fator de enrolamento para enrolamentos trifásicos

Número dos canais por pólo-fase	1	2	3	4	5	6	$\frac{b}{\tau_p} = \frac{1}{3}$	$\frac{b}{\tau_p} = \frac{2}{3}$
K_a'	1	0,966	0,960	0,958	0,957	0,956	0,956	0,830

ANEXO K – Densidade de corrente

Para o estator: $\delta = 3$ até 5 A/mm^2

Para o rotor: $\delta = 4$ até 6 A/mm^2

Para os anéis do rotor: $\delta = 3$ até 6 A/mm^2

Se o rotor for executado
com alumínio injetado: $\delta = 2$ até 3 A/mm^2

ANEXO L – Coeficiente M_R

CV	M_R
até 1	0,66
de 1 a 2	0,70
de 2 a 5	0,75
de 5 a 10	0,80
de 10 a 15	0,82
de 15 a 50	0,85
acima de 50	0,86