

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ALLISON HIDEO POGLITSCH MORIYAMA

**PARTIDA PRÓPRIA EM MOTOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES
UTILIZANDO ROTOR COM NÚCLEO ENVOLVIDO POR TUBO DE ALUMÍNIO**

PONTA GROSSA

2023

ALLISON HIDEO POGLITSCH MORIYAMA

**PARTIDA PRÓPRIA EM MOTOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES
UTILIZANDO ROTOR COM NÚCLEO ENVOLVIDO POR TUBO DE ALUMÍNIO**

**Self-starting permanent magnet synchronous motor using rotor with core
encased in aluminum tube**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Prof. Msc. Edison Luiz Salgado Silva

PONTA GROSSA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ALLISON HIDEO POGLITSCH MORIYAMA

**PARTIDA PRÓPRIA EM MOTOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES
UTILIZANDO ROTOR COM NÚCLEO ENVOLVIDO POR TUBO DE ALUMÍNIO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Prof. Msc. Edison Luiz Salgado Silva

Data de aprovação: 26/junho/2023

Edison Luiz Salgado Silva
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcella Scoczynski Ribeiro Martins
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcio Mendes Casaro
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PONTA GROSSA

2023

RESUMO

Este trabalho propõe a construção de um motor síncrono de ímãs permanentes que quando alimentado diretamente com a frequência da rede elétrica é capaz de realizar partida própria, a partir da estrutura de seu rotor que é composto por um material condutor, paramagnético envolvendo o núcleo ferromagnético. O método proposto permite dispensar a utilização de métodos de partida convencionais para motores síncronos, como inversores de frequência, rotores do tipo gaiola-de-esquilo ou motores externos dedicados à partida. O método se mostrou eficiente em gerar torque durante a partida para que o motor entre em sincronismo.

Palavras-chave: paramagnetismo; gaiola-de-esquilo; campo girante; força contra eletromotriz.

ABSTRACT

This work proposes the construction of a permanent magnet synchronous motor that when connected directly to the frequency of the power grid is capable of starting itself, due to the structure of its rotor, which is composed of a conductor, paramagnetic material encasing the ferromagnetic core. The proposed method makes it possible to dispense with the use of conventional starting methods for synchronous motors, such as variable frequency drives, squirrel-cage rotor or external motor dedicated to the start-up. The method proved to be efficient in generating torque during the start-up, so that the motor gets in sync.

Keywords: paramagnetism, squirrel-cage, rotating magnetic field, counter-electromotive force.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Curvas B x H dos principais ímãs.....	19
Figura 2 – Condutor movendo-se em um campo magnético gerando uma FEM	21
Figura 3 – Tensão resultante de uma bobina envolvendo um fluxo magnético	23
Figura 4 – Classes de motores elétricos	24
Figura 5 - Motor de indução trifásico	25
Figura 6 – Orientação do campo girante em função do tempo	27
Figura 7 – Estator com 2 e 4 polos	27
Figura 8 - Rotor gaiola de esquilo.....	29
Figura 9 – Torque resultante nulo quando o motor está parado	31
Figura 10 – Efeito de um campo variável sobre um material condutor paramagnético.....	34
Figura 11 - Desenho e medidas do estator	36
Figura 12 – Medidas do rotor original em mm	37
Figura 13 - Desenho e medidas em mm do rotor da máquina síncrona.....	39
Figura 14 - Desenho e medidas em mm do núcleo	40
Figura 15 - Sistema montado para medição de torque	42
Figura 16 - Motor síncrono com polos salientes e enrolamentos de indução...	47
Figura 17 - Motor síncrono de Relutância SynRM ABB	48
Fotografia 1 - Carcaça e estator utilizados	36
Fotografia 2 - Tubo de alumínio utilizado.....	37
Fotografia 3 – Dimensões em mm dos ímãs utilizados	38
Fotografia 4 - Primeira configuração de rotor	40
Fotografia 5 segunda configuração do rotor	43
Fotografia 6- Estroboscópio utilizado para verificar sincronismo	44
Fotografia 7 - Terceira configuração de rotor.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resistividade de alguns materiais à temperatura ambiente	13
Tabela 2 - Condutividade relativa e permeabilidade magnética.....	15
Tabela 3 – Valores usuais de rotação síncrona em motores.....	28
Tabela 4 - Especificações do motor pelos dados de placa do fabricante	35
Tabela 5 - Valores aplicados ao motor pelo inversor.....	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Problema	9
1.2	Objetivos	10
1.3	Metodologia	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	Materiais elétricos e magnéticos	12
2.1.1	Classificação dos materiais sob o ponto de vista elétrico.....	12
2.1.2	Classificação dos materiais sob o ponto de vista magnético.....	14
<u>2.1.2.1</u>	<u>Materiais diamagnéticos</u>	<u>16</u>
<u>2.1.2.2</u>	<u>Materiais paramagnéticos</u>	<u>16</u>
<u>2.1.2.3</u>	<u>Materiais ferromagnéticos</u>	<u>17</u>
2.1.3	Ímãs Permanentes	18
2.2	Conversão eletromecânica de energia	20
2.2.1	Indução eletromagnética	21
2.2.2	Lei de Lenz.....	22
2.3	Funcionamento de Máquinas CA	23
2.3.1	Campo magnético girante	25
2.3.2	Motor de indução trifásico	28
2.3.3	Motor síncrono.....	30
3	PROPOSTA DE TRABALHO	33
4	MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1	Especificações do motor	35
4.2	Tubo de alumínio	37
4.3	Ímãs permanentes	38
4.4	Projeto do rotor	38
4.5	Usinagem do núcleo e prensagem do tubo	39
4.5.1	Teste de partida.....	41
4.5.2	Medição de torque de partida	42
4.6	Fresagem das janelas para alojamento dos ímãs	42
4.6.1	Teste de partida.....	43
4.6.2	Medição de torque de partida	44
4.7	Colagem dos ímãs permanentes	44
4.7.1	Teste de partida.....	45

5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	46
5.1	Testes de partida	46
5.2	Testes de torque estático	49
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS	
FUTUROS		50
	REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

Os motores elétricos estão presentes nas mais diversas aplicações, seja na indústria, nos aparelhos residenciais, nos automóveis, sendo praticamente indispensáveis nesses processos devido à sua eficiência, facilidade de acionamento, simplicidade de construção e versatilidade, quando comparado a outros tipos de máquinas motrizes.

Sabe-se que os motores elétricos são máquinas capazes de converter energia elétrica em energia mecânica através da interação entre campos eletromagnéticos, porém existe uma imensa variedade de categorias e subcategorias de motores, que utilizam diferentes conceitos, materiais e formas construtivas para gerar movimento, de acordo com a necessidade de cada aplicação (WEG, 2023, p. 6).

Pode-se começar a dividir os vários tipos de motores entre os que são alimentados em corrente contínua (CC) e motores alimentados em corrente alternada (CA), podendo estes ser monofásicos ou polifásicos. Dentro da categoria de motores de corrente alternada encontram-se os motores trifásicos de indução, ou assíncronos, e os motores trifásicos síncronos. Esses dois subtipos de motores serão enfatizados neste trabalho para o desenvolvimento do projeto (UMANS, 2014, p. 193).

O projeto em questão propõe a construção de um motor síncrono com um método de partida própria que difere dos métodos de partida convencionais para motores síncronos, já que é capaz de partir sozinho quando alimentado na frequência da rede, sem a utilização de inversores de frequência, torque externo ou rotor com gaiola-de-esquilo.

Esse tipo de experimento pode servir como base didática ou até mesmo comercial para o desenvolvimento de motores, já que aplica a utilização de materiais e forma construtiva diferentes das máquinas convencionais e é independente de sistemas dedicados à partida, assim como o motor de indução trifásico.

1.1 Problema

Quando se fala em motores elétricos, existem diversas necessidades de mercado que variam de acordo com cada aplicação. Em máquinas industriais por exemplo, deseja-se que seus motores sejam cada vez mais eficientes para que se atinjam as metas de consumo de energia da unidade. Para as montadoras de veículos elétricos, principalmente, é extremamente necessário que os motores dos carros

sejam cada vez mais eficientes para se ter melhor autonomia no veículo, que suas dimensões e peso sejam cada vez menores para atender as especificações do projeto bem como o custo seja reduzido para que se reflita em um valor final mais competitivo. No geral, a busca por motores mais eficientes, menores, mais baratos e que se adequem às políticas ambientais é interessante para todas as partes, bem como motores cujo acionamento seja o mais simples possível.

Dessa forma, abre-se a oportunidade para pesquisas que envolvem diferentes formas construtivas, aplicação de outros tipos de materiais e conceitos utilizados na fabricação desses motores.

1.2 Objetivos

Tem-se como principal objetivo deste trabalho realizar a partida própria de um motor síncrono de ímãs permanentes a partir do método proposto que consiste em utilizar um rotor envolvido por alumínio para produzir torque de partida de forma que ele saia da inércia, acelerando até próximo da velocidade síncrona e entrando em sincronismo.

Também é importante avaliar o desempenho das diferentes configurações de construção do rotor com relação às grandezas de torque mecânico gerado e corrente elétrica na alimentação do motor.

1.3 Metodologia

Para o desenvolvimento prático do projeto utilizou-se de um estator de um motor de indução trifásico de 4 polos da marca WEG, sendo que as alterações para transformar a máquina em um motor síncrono seriam exclusivamente no rotor. Baseando-se nas medidas do estator pôde-se realizar o desenho dos modelos de rotor a serem utilizados.

Após o desenvolvimento do rotor, realizou-se a aquisição dos materiais necessários para a sua construção, como os ímãs permanentes e o tubo de alumínio nas medidas específicas que serão apresentadas em capítulos posteriores.

Com os materiais necessários em mãos, o núcleo do rotor foi usinado em aço carbono. Realizou-se a fixação do tubo de alumínio envolvendo o núcleo de aço e posteriormente o rotor foi fresado para a fixação dos ímãs permanentes e para a abertura do canal de chaveta.

Os ensaios realizados no motor envolveram a observação de valores de corrente de alimentação monitorados por alicate amperímetro, rotação utilizando tacômetro digital ótico, utilização de estroboscópio para a verificação de sincronismo entre rotor e campo girante, e valores de torque estático que foram medidos através de um sistema com polia e cargas.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica contendo o embasamento teórico que dá fundamento para a realização deste projeto. O capítulo 3 descreve a proposta de trabalho e como ela está relacionada ao embasamento teórico mostrado no capítulo 2. O capítulo 4 detalha como foi o processo de projeto e construção da máquina, bem como os procedimentos adotados nos ensaios. O capítulo 5 contém a análise dos resultados obtidos nos testes práticos. O capítulo 6 encerra este trabalho com as considerações finais e sugestões para estudos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O conhecimento teórico que será apresentado ao longo desse capítulo serve como embasamento para a justificar a proposta deste trabalho, tornar possível o entendimento do projeto e auxiliar na realização da etapa prática. Tratando-se do tema de máquinas elétricas é de extrema importância abordar as noções sobre materiais elétricos e magnéticos, conceitos sobre conversão eletromecânica de energia como indução eletromagnética, força eletromotriz, lei de Faraday, lei de Lenz e força contra eletromotriz. Posteriormente ainda serão abordados os conceitos que envolvem o funcionamento dos motores trifásicos de indução e síncronos.

2.1 Materiais elétricos e magnéticos

Schmidt (1979, p. 19) classifica os materiais elétricos basicamente sob dois pontos de vista, sendo eles o ponto de vista elétrico, em materiais condutores, semicondutores e isolantes e o ponto de vista magnético, em materiais ferromagnéticos, diamagnéticos, paramagnéticos.

Callister (2002, p. 463) acrescenta outros dois tipos de magnetismo, que são o antiferromagnetismo e ferrimagnetismo que podem ser considerados como subclasses do ferromagnetismo.

Essas classificações não devem ser encaradas como precisas em suas aplicações práticas, já que não existe um material perfeitamente condutor e nem um material totalmente isolante, por exemplo. O mesmo ocorre do ponto de vista magnético dos materiais. A classificação desses materiais leva em consideração as características predominantes dos mesmos, podendo separá-los por faixas de grandezas. Do ponto de vista elétrico classificam-se os materiais quanto a sua resistividade, enquanto do ponto de vista magnético leva-se em conta a permeabilidade magnética e susceptibilidade do material (SCHMIDT, 1979, p. 19).

2.1.1 Classificação dos materiais sob o ponto de vista elétrico

Segundo Callister (2002, p. 416), a lei de Ohm relaciona a tensão V como sendo o produto da corrente I , pela resistência R do objeto. A resistência depende da geometria do objeto, enquanto que a resistividade ρ é independente da geometria da amostra, porém está relacionada com a resistência a partir dessa expressão:

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (1)$$

Onde l é o comprimento entre dois pontos de uma seção reta uniforme e A é a área da seção reta.

Portanto, de acordo com Halliday, Resnick e Walker (2016, p. 335), pode se considerar que “A resistência é uma propriedade de um componente; a resistividade é uma propriedade de um material.”

Callister (2002, p. 416) descreve a resistividade como sendo o inverso da condutividade elétrica σ , que é a facilidade que um determinado material tem de conduzir uma corrente elétrica. Portanto:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

Levando-se em conta a resistividade, pode-se classificar os materiais da seguinte forma (SCHMIDT, 1979, p. 20):

- Materiais condutores, 10^{-5} a $10^{-2} \Omega.m$;
- Materiais semicondutores, 10^{-2} a $10^9 \Omega.m$;
- Materiais isolantes, 10^9 a $10^{21} \Omega.m$.

Tabela 1 - Resistividade de alguns materiais à temperatura ambiente

Material	Resistividade, ρ ($\Omega.m$)
Metais típicos	
Prata	$1,62 \times 10^{-8}$
Cobre	$1,69 \times 10^{-8}$
Ouro	$2,35 \times 10^{-8}$
Alumínio	$2,75 \times 10^{-8}$
Manganin	$4,82 \times 10^{-8}$
Tungstênio	$5,25 \times 10^{-8}$
Platina	$9,68 \times 10^{-8}$
Semicondutores típicos	
Silício puro	$2,5 \times 10^3$
Silício tipo n	$8,7 \times 10^{-4}$
Silício tipo p	$2,8 \times 10^{-3}$
Isolantes típicos	
Vidro	$10^{10} - 10^{14}$
Quartzo fundido	10^{16}

Fonte: Adaptado de Halliday, Resnick e Walker (2016)

2.1.2 Classificação dos materiais sob o ponto de vista magnético

Como visto anteriormente, os principais tipos de magnetismo são ferromagnetismo, paramagnetismo e diamagnetismo. Para classificar um material sob o ponto de vista magnético leva-se em conta o valor da permeabilidade magnética desse material.

De acordo com Callister (2002, p. 462), um dos parâmetros para descrever as propriedades magnéticas de um sólido é a razão entre a permeabilidade de um material μ e a permeabilidade magnética no vácuo μ_0 . Essa razão resulta na permeabilidade relativa μ_r e é adimensional.

“Em sua forma mais simples, a permeabilidade magnética pode ser entendida como uma razão entre a densidade de fluxo magnético B e a intensidade de campo magnético H ” (UMANS, 2014, p. 3).

Pinho (2009, p.4) apresenta que a permeabilidade magnética indica a quantidade de indução magnética gerada por um material quando o mesmo é exposto à um determinado campo magnético.

Segundo Rocha *et al.* (2018, p. 54) a permeabilidade pode ser definida como a facilidade com que a força H de um campo magnético induz a densidade de fluxo B em um determinado material. Assim sendo:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (3)$$

Assim sendo, podemos comparar a permeabilidade magnética do ponto de vista magnético com a condutância elétrica no ponto de vista elétrico, já que a condutância exprime a facilidade com que o material conduz corrente elétrica e a permeabilidade representa a facilidade com que o fluxo magnético se estabelece no interior de um determinado material.

Umans (2014, p. 5) ainda acrescenta que a permeabilidade dos materiais magnéticos pode ser representada pela permeabilidade relativa μ_r que se relaciona com o valor da permeabilidade magnética do vácuo μ_0 , sendo ela $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ henrys por metro, de forma que μ_r seja equivalente a:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (4)$$

A seguinte tabela apresenta a permeabilidade magnética relativa de alguns materiais.

Tabela 2 - Condutividade relativa e permeabilidade magnética

Material	Condutividade relativa ao cobre	Permeabilidade relativa
Prata	1,05	1
Cobre	1,00	1
Ouro	0,70	1
Alumínio	0,61	1
Zinco	0,32	1
Latão	0,26	1
Níquel	0,2	100
Bronze	0,15	1
Estanho	0,15	1
Aço (SAE 1045)	0,1	1000
Chumbo	0,08	1
Aço inox	0,02	500

Fonte: Adaptado de Sanches (2014)

Callister (2002, p. 462) relaciona a permeabilidade com a susceptibilidade magnética a partir da seguinte relação:

$$\chi_m = \mu_r - 1 \quad (5)$$

Segundo Rocha *et al.* (2018, p. 54), a susceptibilidade magnética pode ser definida pela relação entre o momento dipolar magnético e a intensidade do campo magnético.

Pinho (2009, p. 5) diz que a magnetização M de um material é proporcional ao campo externo e esse fator de proporcionalidade é a susceptibilidade magnética χ_m e pode ser descrito por:

$$\chi_m = \frac{M}{H} \quad (6)$$

Cullity e Graham (2009, p. 13) descreve a susceptibilidade como a relação entre M e H , e que as propriedades magnéticas de um material dependem não apenas da magnitude e sentido de M mas também da forma com que M varia com H .

2.1.2.1 Materiais diamagnéticos

Pinho (2009, p. 6) descreve o diamagnetismo como um efeito magnético negativo, gerado pela interação entre determinado tipo de material e um campo magnético, através de uma situação em que a influência de um campo magnético faz com que os átomos do material sofram pequenas perturbações nos elétrons em órbita que geram pequenos dipolos magnéticos nos átomos, e estes se opõem ao campo magnético. Esse efeito diamagnético gera uma pequena susceptibilidade magnética negativa e uma permeabilidade relativa em torno de 0,99995.

Rocha *et al.* (2018, p. 55) descrevem o diamagnetismo como sendo um fenômeno que ocorre devido à reação dos elétrons de um material quando o mesmo é exposto à um campo magnético e quando o campo é removido o efeito desaparece. Essa reação gera uma pequena susceptibilidade negativa de aproximadamente -10^{-6} . Esse efeito ocorre em todos os materiais, porém é muito fraco e quando o material possui também outras características não é possível observar os efeitos diamagnéticos. Sendo assim um material pode ser classificado como diamagnético quando não possuir outras características simultaneamente.

O diamagnetismo é uma forma muito fraca de magnetismo que é não permanente e que persiste somente enquanto um campo externo está sendo aplicado. Ele é induzido através de uma alteração no movimento orbital dos elétrons devido à aplicação de um campo magnético. A magnitude do momento magnético induzido é extremamente pequena, e em uma direção oposta àquela do campo que foi aplicado. Dessa forma a permeabilidade relativa é menor do que a unidade e a susceptibilidade magnética é negativa (CALLISTER, 2002, p. 463).

Halliday, Resnick e Walker (2016, p. 141) reforçam a ideia de que o diamagnetismo está presente em todos os materiais, mas que não pode ser observado caso o material apresente outras propriedades, portanto classificam-se como diamagnéticos aqueles materiais que possuem apenas essa característica. Quando um material diamagnético é submetido à um campo magnético, momentos dipolares são produzidos nos átomos, a combinação desses momentos dipolares induzidos gera um campo magnético de baixa intensidade no sentido contrário ao do campo externo. Quando o campo externo é removido esse efeito desaparece.

2.1.2.2 Materiais paramagnéticos

Rocha *et al.* (2018, p. 52) classificam os materiais paramagnéticos como sendo aqueles em que sob o efeito de um campo magnético apresentam baixa

susceptibilidade magnética positiva, e quando retirado o campo magnético esse efeito desaparece, assim como no diamagnetismo.

Pinho (2009, p. 6), acrescenta que o paramagnetismo se dá pelo alinhamento dos dipolos magnéticos individuais de átomos ou moléculas num campo magnético, sendo os materiais paramagnéticos aqueles que tem uma pequena susceptibilidade magnética positiva quando inseridos em um campo magnético. Quando se remove o material da influência desse campo magnético, o efeito paramagnético do material é nulo.

Os materiais paramagnéticos são aqueles que se enquadram com permeabilidade relativa entre 1 e 1,01, a exemplo do alumínio.

Cullity e Graham (2009, p.15) classificam os materiais paramagnéticos como sendo aqueles que possuem susceptibilidade magnética pequena e positiva, e permeabilidade magnética pouco superior à 1.

Para Halliday, Resnick e Walker (2016, p. 745) quando um material paramagnético é submetido à um campo magnético externo apresenta um momento dipolar magnético no mesmo sentido do campo externo. Se o campo externo é não uniforme, esse material paramagnético é atraído da região de menor intensidade para a região de maior intensidade do campo magnético.

2.1.2.3 Materiais ferromagnéticos

Pinho (2009, p. 6) compara o efeito dos materiais paramagnéticos e diamagnéticos com o dos materiais ferromagnéticos quando o campo aplicado ao material é removido. Nos materiais ferromagnéticos o material conserva grande parte da magnetização, enquanto nos materiais diamagnéticos e paramagnéticos a magnetização só permanece enquanto se mantiver o campo. Nos materiais ferromagnéticos, os dipolos desemparelhados se alinham facilmente com o campo magnético. A permeabilidade relativa μ_r desses materiais caracteriza-se por ser muito maior que 1 e pode atingir a casa de 10^6 . Mesmo com campos magnéticos fracos é possível obter altas magnetizações.

Para Rocha *et al.* (2018, p. 52), os materiais ferromagnéticos podem possuir momentos magnéticos mesmo na ausência de um campo magnético externo, já que após ser exposto à um campo, o material ferromagnético continua apresentando magnetização. Quando expostos à um campo esses materiais são capazes de

produzir fortes campos magnéticos com susceptibilidades bastante elevadas no mesmo sentido do campo externo. São exemplos de materiais ferromagnéticos o ferro, cobalto, níquel, disprósio e gadolínio.

Segundo Halliday, Resnick e Walker (2016, p. 757) no interior dos materiais ferromagnéticos existem regiões que apresentam um momento dipolar magnético diferente de zero. Quando se aplica um campo magnético externo a esse material, essas regiões se alinham ao campo magnético, produzindo um momento dipolar magnético elevado, na direção do campo externo. Quando se remove o campo magnético externo, parte desse momento dipolar magnético permanece. Se o campo externo é não uniforme, o material é atraído pelo campo magnético.

2.1.3 Ímãs Permanentes

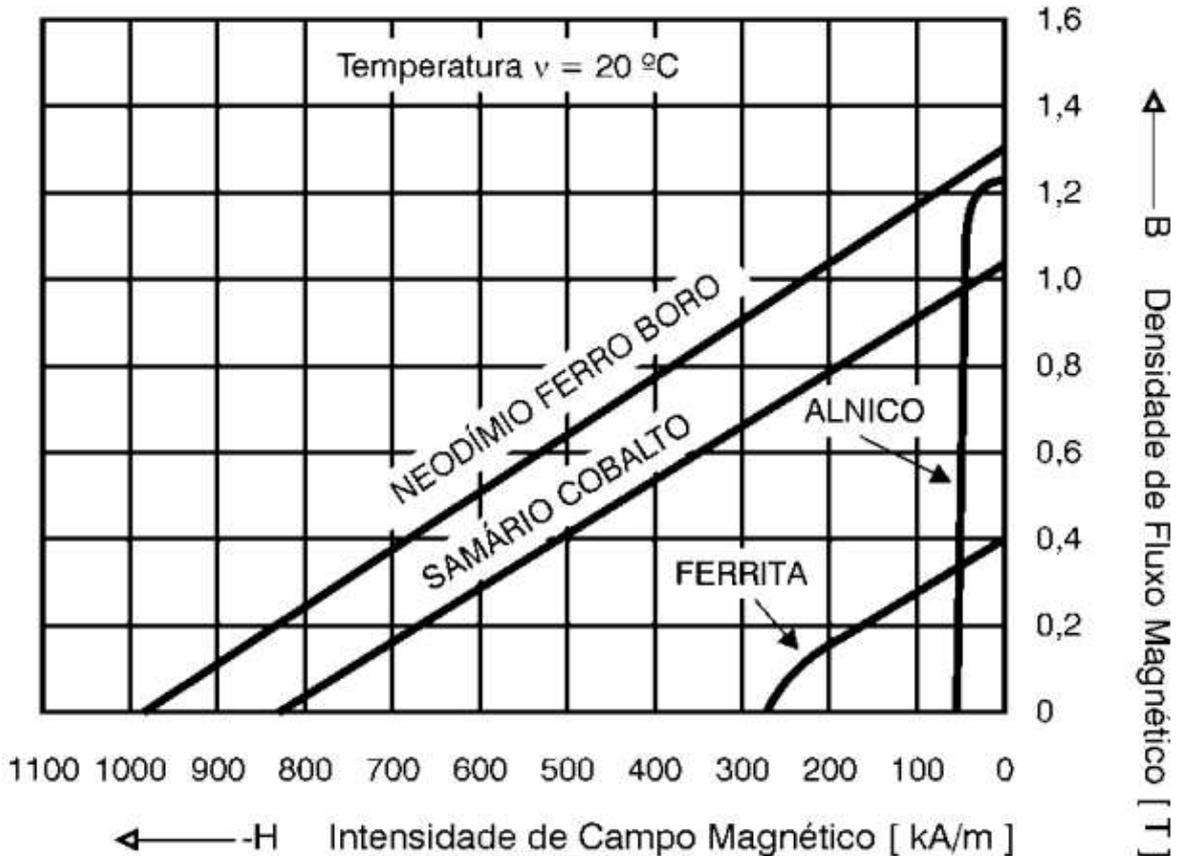
Segundo Cullity e Graham (2009, p. 477), o objetivo de se utilizar ímãs permanentes é fornecer um campo magnético em um volume de espaço específico. Um campo magnético pode ser produzido por uma corrente em um condutor ou por polos de um ímã. Em muitas aplicações, o uso de ímãs permanentes é mais interessante, já que eles fornecem um campo magnético constante sem o consumo de energia elétrica e sem a geração de calor. Um ímã pode ser considerado um dispositivo que armazena energia. Essa energia é armazenada no ímã no momento em que ele é magnetizado e continua no material de forma permanente, desde que o processo de magnetização e a sua utilização sejam feitos corretamente. Hoje, existem inúmeras aplicações para os ímãs permanentes, seja na indústria, residências, automóveis e no espaço.

Os ímãs permanentes são objetos que possuem campo magnético próprio, sendo assim capazes de atrair materiais ferromagnéticos, podendo ser objetos naturais como a magnetita ou artificiais, que são fabricados através de ligas metálicas sem propriedades magnéticas mas que são capazes de receber e manter essas propriedades até que algum fator externo como temperatura, impacto ou corrosão cause sua desmagnetização, sendo que a composição de cada tipo de ímã vai determinar a sensibilidade à tais fatores, bem como a intensidade do campo magnético (METALMAG, 2019).

Os principais materiais empregados na fabricação de ímãs permanentes são os de alumínio, níquel e cobalto (Alnico), de Ferrita, de Samário-Cobalto e o de Neodímio-Ferro-Boro. A Figura 1 apresenta o segundo quadrante dos principais tipos

de ímãs permanentes (GUIA DE APLICAÇÃO SERVOACIONAMENTOS – WEG, 2023, p.26)

Figura 1 - Curvas B x H dos principais ímãs



Fonte: Guia de Aplicação de Servoacionamentos – WEG (2023)

O Alnico apresenta elevado magnetismo remanente, porém é facilmente desmagnetizado. A Ferrita possui valores médios de densidade de fluxo magnético (B) e de força coercitiva (H) que é o campo que deve ser aplicada para desmagnetizar um material. O Sm-Co (Samário-Cobalto) e o Nd-Fe-B (Neodímio-Ferro-Boro) apresentam elevada densidade de fluxo magnético (B) e elevada força coercitiva (H), além disso possuem uma curva B x H linear, isso significa que não ocorrerá perda de densidade de fluxo magnético caso o material passe por uma variação cíclica de intensidade de campo magnético (GUIA DE APLICAÇÃO SERVOACIONAMENTOS – WEG, 2023, p.26).

O Alnico é uma liga bastante utilizada contendo ferro, níquel, alumínio e cobalto. Apresenta uma densidade de fluxo residual relativamente elevada. As desvantagens dos materiais do tipo Alnico são a coercividade relativamente baixa e a fragilidade mecânica. Os ímãs permanentes de Ferrite são feitos de pós de óxido de

ferro ou carbonato de bário ou estrôncio e têm densidades de fluxo residual inferiores às dos materiais do tipo Alnico, mas suas coercividades são expressivamente maiores. Por isso, são menos propensos à desmagnetização. Os ímãs de Ferrite possuem boas características mecânicas e possuem baixo custo de fabricação. O samário-cobalto possui uma elevada densidade de fluxo residual, da mesma forma que nos ímãs de Alnico, e ao mesmo tempo apresenta coercividade e produto energético máximo muito maiores. Os ímãs de neodímio-ferro-boro possuem valores de densidade de fluxo residual, coercividade e produto energético máximo maiores ainda que os do samário-cobalto, por isso são amplamente utilizados em máquinas elétricas rotativas possibilitando especificações nominais cada vez maiores nos motores de ímãs permanentes (UMANS, 2014, p. 35).

Os ímãs permanentes de NdFeB, pertencem à família dos ímãs de terras raras. É o tipo de ímã com maior densidade de fluxo e possui custo moderado. Os ímãs de neodímio são fabricados através de um processo de sinterização e necessitam de um revestimento de proteção, como zinco, ouro e níquel, ou epóxi, pois sem esse revestimento apresenta alta oxidação (MAIA, 2011, p. 46).

Pinho (2009, p. 35) salienta que os ímãs de Neodímio-Ferro-Boro são os materiais magnéticos mais modernos, apresentando os valores de produto energético e coercitividade mais elevados e a indução remanescente apresenta um valor relativamente alto. Esse tipo de ímã, também conhecido como super ímã é o que possui as melhores características com uma excelente relação indução/peso e são extremamente competitivos com relação à custo.

2.2 Conversão eletromecânica de energia

De acordo com Kosow (1982, p. 4), a primeira indicação da possibilidade de interação entre energia elétrica e mecânica foi apresentada por Michael Faraday em 1831 e tornou possível o desenvolvimento de dispositivos como geradores e motores elétricos, microfones, alto-falante e transformadores.

A conversão eletromecânica de energia, como a entendemos hoje, relaciona as forças elétricas e magnéticas do átomo com a força mecânica aplicada à matéria e ao movimento. Como resultado dessa relação, a energia mecânica pode ser convertida em energia elétrica, e vice-versa, através das máquinas elétricas (KOSOW 1982, p.4).

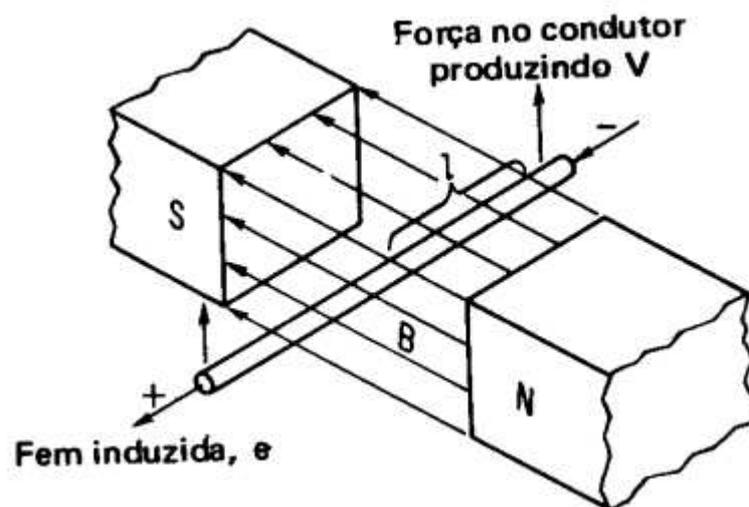
Para Chapman (2013, p. 1), uma máquina elétrica é um dispositivo capaz de converter energia mecânica em elétrica, ou o contrário. Quando é utilizada para

converter energia mecânica em elétrica, esse dispositivo é chamado de gerador. Quando converte energia elétrica em mecânica, é chamado de motor. Para realizar ambos os processos de conversão, as máquinas utilizam da interação de um campo magnético.

2.2.1 Indução eletromagnética

Kosow (1982, p.4) afirma, que em 1831 Faraday descobriu que era possível se gerar tensão a partir do movimento relativo entre um condutor e um campo magnético e a chamou de “tensão induzida” ou força eletromotriz (FEM) induzida, pois não há contato físico entre as partes.

Figura 2 – Condutor movendo-se em um campo magnético gerando uma FEM



Fonte: Kosow (1982)

Segundo Halliday, Resnick e Walker (2016, p.567), uma corrente passando por um condutor é capaz de produzir um campo magnético, porém o oposto também acontece. Um campo magnético pode gerar um campo elétrico que é capaz de produzir uma corrente. Essa interação entre um campo magnético e um campo induzido é chamada de lei de indução de Faraday.

Kosow (1982, p.4) diz que a lei de Faraday pode ser descrita pela seguinte afirmação:

“O valor da tensão induzida em uma simples espira de fio é proporcional à razão de variação das linhas de força que passam através daquela espira (ou se concatenam com ela).”

Posteriormente Newmann descreveu essa afirmação em uma equação onde o valor da força eletromotriz induzida gerada era diretamente proporcional à razão da variação do fluxo concatenado.

Chapman (2013, p. 28) diz que segundo a Lei de Faraday, se um fluxo magnético passa por uma espira de um fio condutor uma tensão é induzida e ela é proporcional à taxa de variação do fluxo em relação ao tempo. Portanto:

$$e_{ind} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (7)$$

Sendo que e_{ind} é a tensão induzida em uma espira de bobina e Φ é o fluxo que passa pela espira. Em uma bobina com N espiras e se o mesmo fluxo passar por elas a tensão induzida na bobina será:

$$e_{ind} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (8)$$

Assim, pode-se concluir que uma força eletromotriz induzida gerada aumenta, caso a força do campo magnético seja maior, ou caso haja um aumento na velocidade do movimento relativo entre o condutor e campo magnético.

2.2.2 Lei de Lenz

De acordo com Halliday, Resnick e Walker (2016, p. 573), pouco tempo após Faraday descobrir a lei da indução, Heinrich Friedrich Lenz propôs uma regra para determinar o sentido da corrente induzida em uma espira, conhecida como lei de Lenz, que determina que “a corrente induzida em uma espira tem um sentido tal que o campo magnético produzido pela corrente se opõe ao campo magnético que induz a corrente.”

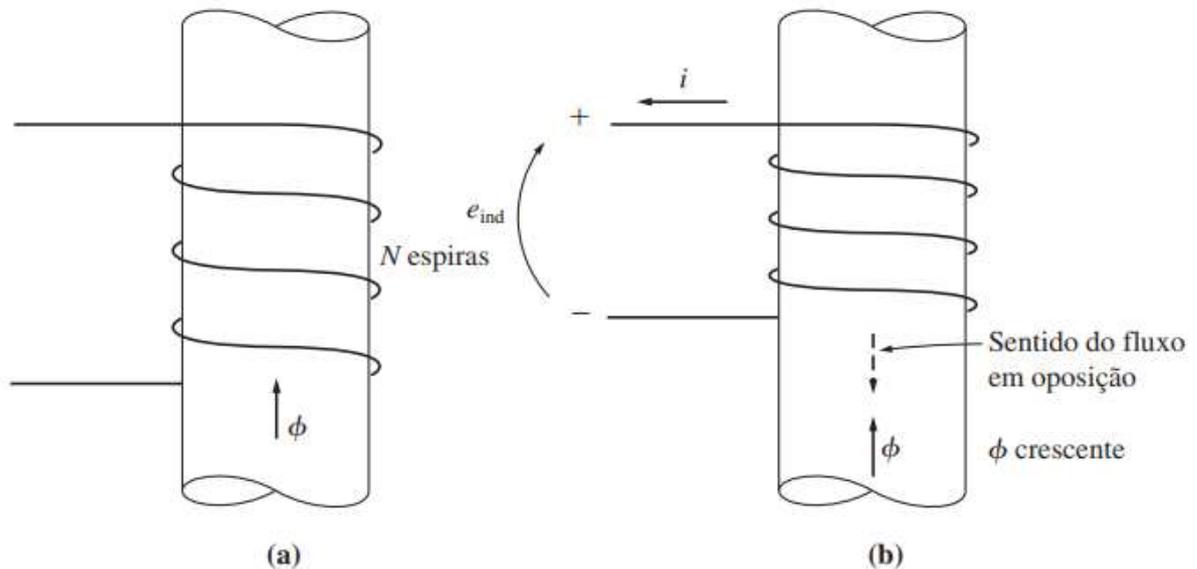
Segundo Kosow (1982, p.10), a lei de Lenz pode ser descrita como:

“Em todos os casos de indução eletromagnética, uma FEM induzida fará com que a corrente circule em um circuito fechado, num sentido tal que seu efeito magnético se oponha à variação que a produziu”.

Isso significa que quando uma tensão é induzida no condutor, uma corrente é estabelecida numa direção que produz um campo magnético que se opõe ao campo que deu origem à essa tensão.

Segundo Chapman (2013, p. 29), a lei de Lenz afirma que “o sentido com que a tensão cresce na bobina é tal que, se os terminais da bobina fossem colocados em curto-circuito, então seria produzida uma corrente que causaria um fluxo oposto à variação original de fluxo”.

Figura 3 – Tensão resultante de uma bobina envolvendo um fluxo magnético



Fonte: Chapman (2013)

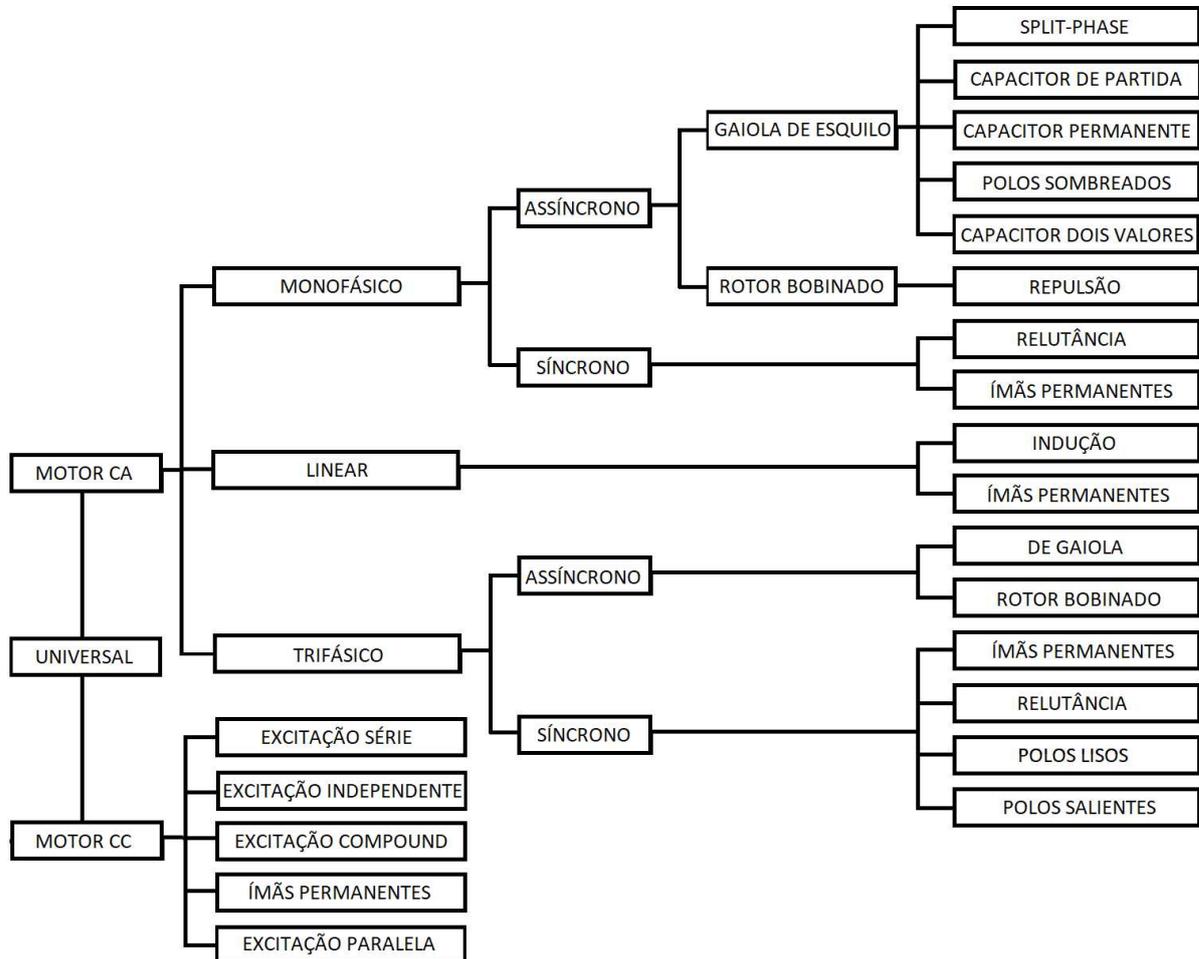
A figura 3 mostra o conceito por trás da lei de Lenz, se a intensidade do fluxo de campo magnético estiver aumentando, uma tensão é induzida na bobina e a corrente circulando pelo condutor da bobina gera um fluxo de campo magnético que se opõe ao campo externo.

2.3 Funcionamento de Máquinas CA

Segundo WEG (2023, p. 6), os motores elétricos são máquinas capazes de converter energia elétrica em energia mecânica, através da interação entre campos eletromagnéticos. O alto rendimento, versatilidade, simplicidade de construção e de comando, fazem com que os motores elétricos sejam amplamente utilizados em diversas aplicações. Existem basicamente dois tipos de categorias de motores. Quando é alimentado com corrente contínua, é denominado motor CC, e chamado de motor CA, quando a energia elétrica que o alimenta é de corrente alternada, podendo ser monofásicos ou polifásicos. Dentro da categoria de motores CA, encontram-se os

motores trifásicos de indução, ou assíncronos, e os motores trifásicos síncronos.

Figura 4 – Classes de motores elétricos



Fonte: Adaptado de WEG (2023)

Seixas (2012, p. 4) classifica os principais tipos de máquinas em máquinas de corrente contínua, máquina de indução e máquina síncrona:

- Máquina de corrente contínua: Apresenta facilidade de comando e ampla variação de velocidade, porém necessita de um conjunto de escovas e comutador, o que acaba gerando altos custos construtivos e manutenção. Funciona bem como gerador ou como motor, necessitando de uma fonte de corrente contínua.
- Máquina de indução: Quando utilizada como motor dispensa a utilização de uma fonte de alimentação específica como nos motores CC, podendo ser ligada direto na rede elétrica seja trifásica ou monofásica. Pode ser encontrada em pequenas e baixas potências. Por não utilizar escovas, possui baixa necessidade de manutenção.

- Máquina síncrona: Pode ser utilizada tanto como gerador como motor, porém não possui torque de partida. Pode ser com ímãs permanentes ou utilizar um sistema de excitação que requer alimentação em corrente contínua. Sua velocidade é constante quando a frequência na alimentação é constante. Pode ser utilizada para correção de fator de potência.

2.3.1 Campo magnético girante

Tratando-se de motores trifásicos síncronos e assíncronos, a estrutura da máquina é dividida basicamente em duas partes principais, o estator, que corresponde à parte fixa do motor, e o rotor sendo a parte que se movimenta junto ao eixo, como mostra a figura 5.

Figura 5 - Motor de indução trifásico



Fonte: Augusto Junior, Amorim Filho (2023)

O estator é formado por um núcleo ferromagnético, mais especificamente por chapas de aço-silício, com o objetivo de reduzir perdas e amenizar o efeito das correntes parasitas. As chapas possuem ranhuras onde são alojados os enrolamentos de fio condutor, formando as bobinas que irão criar o campo magnético do estator (AUGUSTO JUNIOR, AMORIM FILHO, 2023, p. 3).

(UNESP, 2023, p. 2) Considerem-se três conjuntos independentes de enrolamentos separados em 120° no espaço. Cada conjunto é alimentado com uma das fases da fonte de alimentação trifásica. Quando as correntes senoidais defasadas em 120° elétricos percorrem essas bobinas do estator, surge um efeito de campo magnético girante no centro do estator.

As correntes das bobinas do estator podem ser representadas por:

$$\begin{aligned} I_a &= I \cdot \text{sen}(\omega t) \\ I_b &= I \cdot \text{sen}(\omega t - 120^\circ) \\ I_c &= I \cdot \text{sen}(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (9)$$

Segundo Chapman (2013, p. 160) a corrente nas bobinas a, b e c produzem os respectivos campos magnéticos de intensidades:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_a(t) &= H_M \cdot \text{sen}(\omega t) \angle 0^\circ \\ \mathbf{H}_b(t) &= H_M \cdot \text{sen}(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ \\ \mathbf{H}_c(t) &= H_M \cdot \text{sen}(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \end{aligned} \quad (10)$$

As densidades de fluxo resultantes dessas intensidades de campo magnético são obtidas através da relação $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$:

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_a(t) &= B_M \cdot \text{sen}(\omega t) \angle 0^\circ \\ \mathbf{B}_b(t) &= B_M \cdot \text{sen}(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ \\ \mathbf{B}_c(t) &= B_M \cdot \text{sen}(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \end{aligned} \quad (11)$$

A densidade líquida de fluxo magnético no estator é:

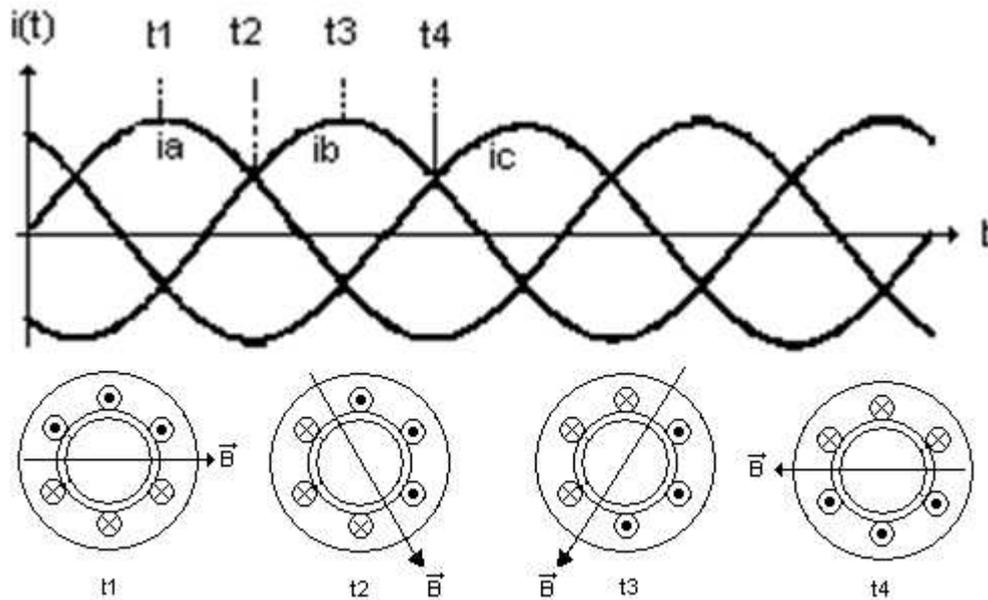
$$\begin{aligned} \mathbf{B}_{liq}(t) &= \mathbf{B}_a(t) + \mathbf{B}_b(t) + \mathbf{B}_c(t) \\ \mathbf{B}_{liq}(t) &= B_M \cdot \text{sen}(\omega t) \angle 0^\circ + B_M \cdot \text{sen}(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ + \\ & \quad B_M \cdot \text{sen}(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \end{aligned} \quad (12)$$

Após o desenvolvimento trigonométrico e substituições tem-se:

$$\mathbf{B}_{liq}(t) = (1,5B_M \cdot \text{sen } \omega t)\hat{\mathbf{x}} - (1,5B_M \cdot \cos \omega t)\hat{\mathbf{y}} \quad (13)$$

De acordo com Augusto Junior, Amorim Filho (2023, p. 8), a força magnetomotriz varia de forma senoidal no tempo, de forma que temos um campo magnético que gira no espaço seguindo uma distribuição senoidal em função do tempo e a velocidade angular desse campo depende da frequência das correntes aplicadas nas bobinas do estator. A figura 6 indica a direção do campo girante em quatro instantes:

Figura 6 – Orientação do campo girante em função do tempo

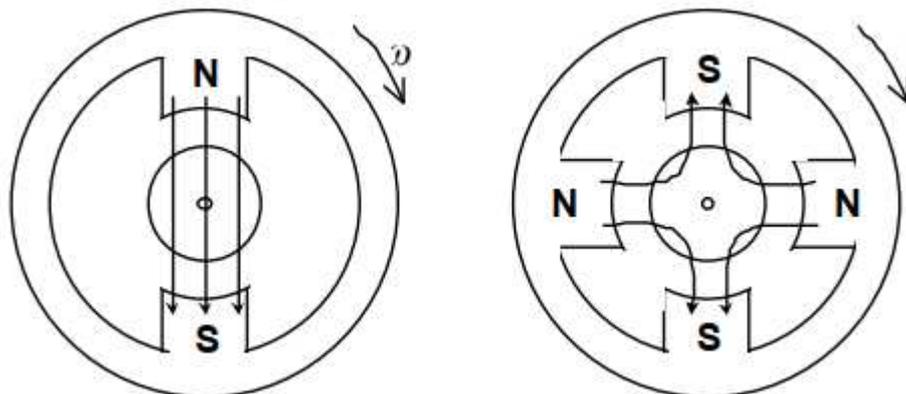


Fonte: Augusto Junior, Amorim Filho (2023)

Pode-se perceber que o campo magnético ilustrado na figura 6 girou no sentido horário. Caso ocorra a inversão de duas fases quaisquer, o sentido de giro do campo é alterado, por exemplo, caso a bobina B seja percorrida pela corrente i_c e a bobina C seja percorrida pela corrente i_b .

Motores Síncronos WEG (2023, p. 4) define que a velocidade angular do campo girante gerado no estator é conhecida como velocidade síncrona e é dependente do número de polos do motor e da frequência da rede. Os enrolamentos do estator podem ser construídos com um ou mais pares de polos e devem ser distribuídos de forma alternada, ou seja, sempre alternando entre polo norte e sul.

Figura 7 – Estator com 2 e 4 polos



Fonte: UNESP (2023)

Portanto, a velocidade de rotação do campo magnético girante criado por $F(t)$, que não necessariamente é a mesma velocidade do rotor, é chamada de velocidade síncrona N_s e depende da frequência f da fonte de alimentação e, também do número de polos p do motor. Podendo ser calculada da seguinte forma:

$$N_s = \frac{120 f}{p} \quad (13)$$

Sendo que N_s é dada em rpm e f em Hz.

WEG (2023, p. 14) afirma que o número de polos do motor deve ser sempre par, pois deve haver no mínimo um par de polos e apresenta alguns valores usuais de rotação síncrona com relação à número de polos conforme a tabela 3.

Tabela 3 – Valores usuais de rotação síncrona em motores

Nº de polos	Rotação síncrona por minuto (rpm)	
	60 Hz	50 Hz
2	3600	3000
4	1800	1500
6	1200	1000
8	900	750
10	720	600

Fonte: Autoria própria, adaptado de WEG (2023)

2.3.2 Motor de indução trifásico

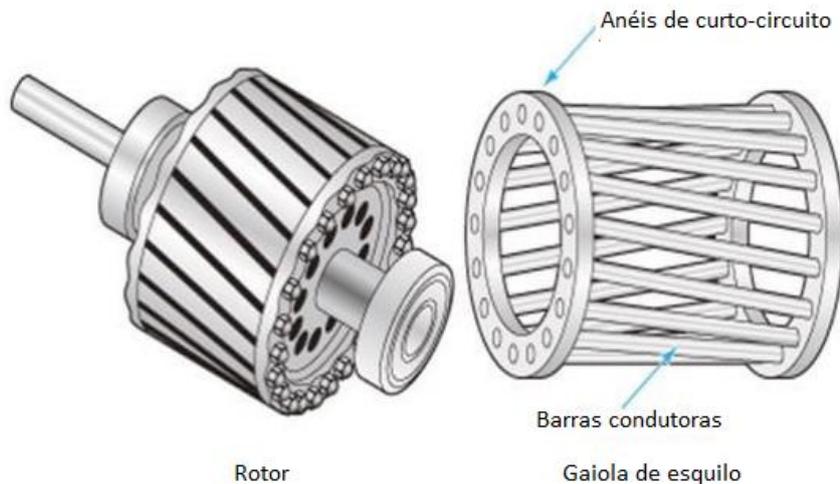
Motores de indução, também chamados de motores assíncronos, são as máquinas mais utilizadas em aplicações industriais.

De acordo com Chapman (2013, p. 309), a construção e funcionamento do estator de um motor trifásico de indução e de um motor síncrono é a mesma. A principal diferença construtiva entre essas máquinas está na estrutura do rotor. Os motores de indução possuem dois tipos básicos de rotor: rotor do tipo gaiola de esquilo, mostrado na figura 8, com o maior número de aplicações, e rotor bobinado, ou de anéis, para algumas aplicações específicas.

Kosow (1982, p. 295) explica que nos motores de indução o rotor é formado por um núcleo de aço laminado onde condutores de cobre ou alumínio são alojados de forma paralela ao rotor. Nos motores de rotor bobinado, condutores de cobre são colocados e isolados em ranhuras no núcleo e conectados à anéis coletores, podendo

ser ligados à resistores através de escovas. Nos rotores do tipo gaiola de esquilo as barras condutoras, geralmente de alumínio, são curto-circuitadas nas extremidades do rotor por anéis, chamados de anéis de curto-circuito, por essa aparência, que pode ser vista na figura 8 esse tipo de rotor leva o nome de gaiola de esquilo. Geralmente as barras são colocadas em um certo ângulo, para diminuição de ruído durante operação do motor.

Figura 8 - Rotor gaiola de esquilo



Fonte: Adaptado Vasconcelos (2020)

Seixas (2012, p. 26) mostra que se o rotor estiver parado, ou seja, em situação de rotor bloqueado, quando o estator é alimentado pela fonte trifásica produz-se o campo girante. Esse campo desloca-se em velocidade angular com relação ao rotor que está nesse instante em repouso, o que é o mesmo que dizer que o rotor se desloca em uma velocidade angular no sentido contrário ao campo girante. Esse movimento relativo induz tensões nas barras condutoras, que por conta dos anéis de curto circuito, faz com que uma corrente circule gerando um campo magnético que se opõe ao campo girante. Baseando-se na lei de Lenz uma força eletro-motriz é induzida nos condutores da gaiola e essa composição de forças resulta em torque no rotor, no mesmo sentido de giro do campo girante. Se esse torque for maior que o torque resistente o motor partirá.

O movimento relativo entre campo girante e rotor é necessário para que haja indução nos condutores, portanto esse tipo de motor trabalha em uma velocidade pouco abaixo do campo girante e nunca pode atingir a velocidade síncrona, o que dá origem ao conceito de escorregamento ou deslizamento nos motores assíncronos.

Umans (2014, p. 346) mostra que o escorregamento pode ser obtido como uma fração da velocidade síncrona, ou seja:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (14)$$

O escorregamento geralmente é expresso em forma de porcentagem, portanto pode-se simplesmente multiplicar o valor fracionário encontrado na equação. Também costuma-se representar o escorregamento pela diferença de velocidade em rpm entre rotor e campo girante da seguinte forma:

$$s = n_s - n \quad (15)$$

Sendo s o escorregamento, n_s velocidade síncrona e n a velocidade de rotação do rotor em rpm.

2.3.3 Motor síncrono

As máquinas síncronas são muito importantes para algumas aplicações específicas. São muito utilizadas como gerador, convertendo energia mecânica em energia elétrica, e como motor para aplicações em que se necessita de velocidade constante independentemente da carga, podendo também operar como dispositivo de correção de fator de potência. Diferentemente do motor de indução, que apresenta escorregamento variável de acordo com a carga, a velocidade do rotor do motor síncrono é sempre igual a velocidade do campo girante, com ou sem carga, desde que se respeite o limite de carga nominal da máquina. (KOSOW, 1982, p. 230).

Segundo Matos (2012, p.33), os motores síncronos podem possuir rotores bobinados ou com ímãs permanentes. O rotor trabalha na mesma velocidade do campo girante, portanto pode-se dizer que a velocidade do rotor é diretamente proporcional à frequência de alimentação das bobinas do estator e é inversamente proporcional ao número de polos do motor.

De acordo com Umans (2014, p. 198), nos motores síncronos com rotor bobinado aplica-se uma corrente alternada nos enrolamentos de armadura do estator, o que produz um campo girante. Nos enrolamentos do rotor, ou comumente chamados de enrolamentos de campo, aplica-se uma excitação CC. Quando o rotor está em

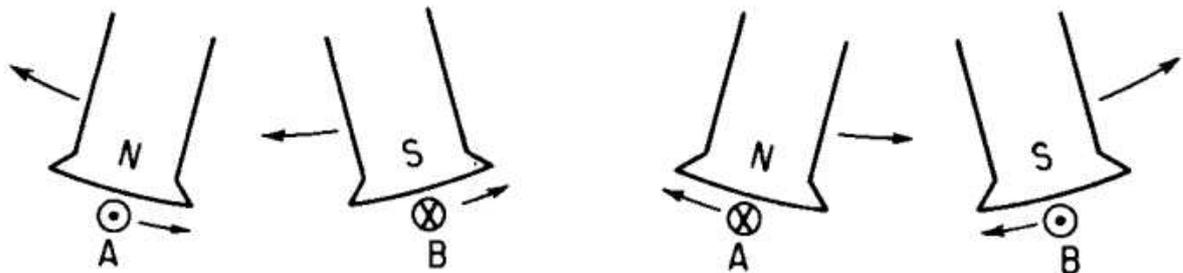
sincronismo com o campo girante produz-se um conjugado eletromagnético constante. Portanto, se a frequência de alimentação dos enrolamentos do estator, ou armadura, for constante, o rotor irá girar em velocidade igualmente constante.

Este tipo de máquina pode operar com fator de potência, indutivo, capacitivo ou unitário dependendo da excitação aplicada no rotor, podendo assim operar como correção de fator de potência.

Kosow (1982, p. 231) mostra que o motor síncrono não possui torque de partida, ou seja, não é capaz de partir sozinho, sem a utilização de enrolamentos de compensação quando a armadura é alimentada por uma frequência CA. Isso se deve porque num primeiro instante, ao se aplicar uma corrente CA no estator, gera-se um torque eletromagnético no rotor orientado para um sentido. Numa fração de segundo mais tarde, o sentido da corrente no condutor é invertido, isso gera um torque eletromagnético orientado para o outro sentido. Devido à inércia do conjunto, o rotor é incapaz de acelerar e atingir a velocidade síncrona, sendo atraído alternativamente nos sentidos horário e anti-horário 60 vezes por segundo, no caso de uma frequência de alimentação de 60 Hz, o que nos dá um torque resultante zero durante esse segundo.

Chapman (2013, p. 291) mostra que ao aplicar potência nos enrolamentos do estator, o conjugado alterna-se rapidamente em módulo e sentido, produzindo um conjugado líquido de partida igual a zero, o resultado é que o motor vibra intensamente a cada ciclo elétrico até sobreaquecer.

Figura 9 – Torque resultante nulo quando o motor está parado



Fonte: Kosow (1982)

Para Chapman (2013, p. 291), existem três abordagens básicas para realizar a partida de um motor síncrono de forma segura:

- Reduzir a velocidade do campo girante a um valor suficientemente baixo de forma que o rotor consiga acelerar e entrar em sincronismo. Geralmente utilizam-se inversores de frequência.
- Utilizar uma máquina motriz externa para gerar torque e acelerar o motor síncrono até pelo ao menos uma velocidade próxima da velocidade síncrona, permitindo que o motor entre em sincronismo.
- Utilizar enrolamentos amortecedores ou gaiola-de-esquilo a fim de gerar torque na partida.

Matos (2012, p. 9) diz que podem-se utilizar rotores em gaiola com ímãs permanentes internos. Essa configuração confere um caráter híbrido ao motor, de forma que ele possa realizar uma partida assíncrona com alimentação direta da rede e em regime trabalha de forma síncrona.

Motores Síncronos WEG (2023, p. 6) aponta para a existência de três conjugados importantes no funcionamento de um motor síncrono e os classifica da seguinte forma:

- Conjugado de partida: é o torque que o motor deve produzir para superar o conjugado resistente da carga, ou seja, vencer a inércia do conjunto.
- Conjugado de sincronização, ou *pull-in torque*: é o torque que o motor deve desenvolver para que o rotor atinja uma velocidade próxima o suficiente da velocidade síncrona e o motor seja capaz de entrar em sincronismo.
- Conjugado máximo em sincronismo, ou *pull-out torque*: é o conjugado que o motor deve produzir para manter o motor em sincronismo.

3 PROPOSTA DE TRABALHO

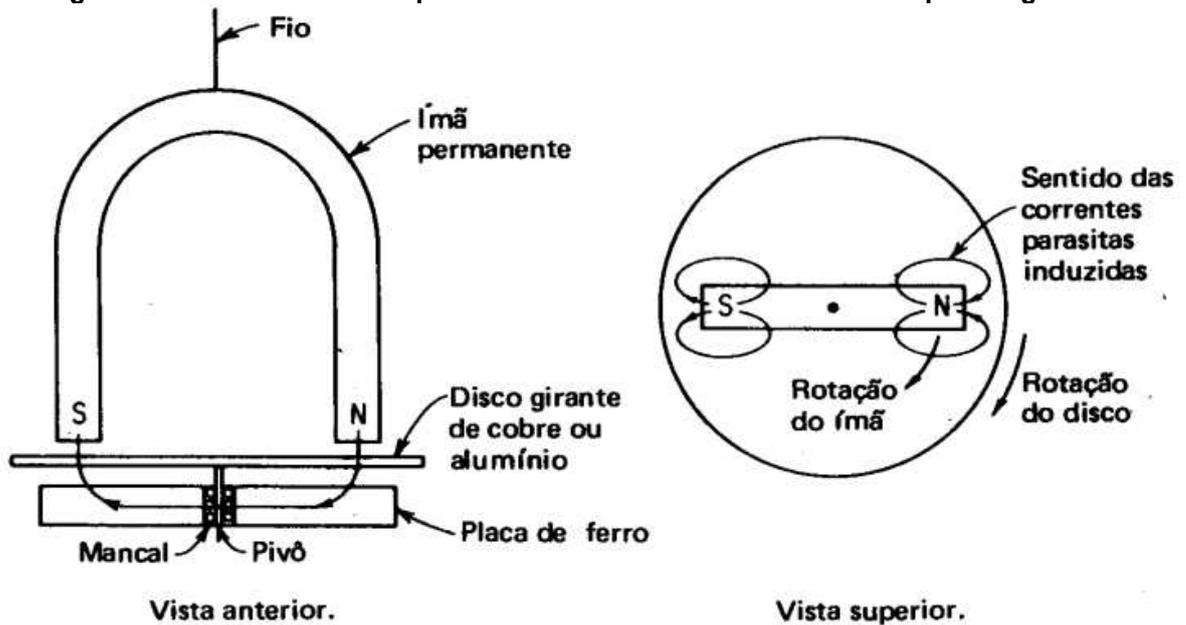
Como previamente comentado, os motores síncronos de ímãs permanentes não possuem partida própria e existem diferentes maneiras de executar a sua partida. Uma delas seria aplicar um campo girante em uma velocidade baixa, de forma que o rotor possa vencer a inércia e se alinhar ao campo girante do estator, e a partir disso aumentar gradualmente a frequência, conseqüentemente a velocidade do campo girante, o que pode se conseguir utilizando um inversor de frequência.

A segunda forma seria basicamente adicionar um torque mecânico externo ao rotor, por exemplo acoplando-se um motor de partida, e após o rotor atingir uma velocidade igual ou próxima à velocidade síncrona ele é capaz de se alinhar com o campo girante. Esse torque mecânico também pode ser gerado por barras condutoras e anéis de curto-circuito embutidos no rotor, que fariam com que a máquina funcionasse exatamente como um motor assíncrono com rotor de gaiola-de-esquilo no momento da partida, e após atingir o sincronismo tivesse o funcionamento de um motor síncrono. Nesse segundo instante as barras condutoras e anéis de curto circuito já não influenciam no funcionamento.

A máquina proposta nesse trabalho deve ter um funcionamento muito similar a esse último exemplo com gaiola-de-esquilo para gerar torque de partida. Porém ao invés de ter as barras condutoras e anéis de curto-circuito para gerar torque, utilizou-se de um tubo de material paramagnético, no caso o alumínio envolvendo o núcleo de aço. Na presença de um campo magnético variável no espaço, o material paramagnético inicialmente sofre repulsão, pelas correntes de Foucault (geradas pelo efeito do campo girante) e em seguida sofrem atração, pelas mesmas, considerando-se um ponto de referência no tubo de alumínio, o que faz com que o rotor acelere de forma similar ao rotor de um motor de indução.

Esse efeito de um campo magnético variável sobre um material condutor paramagnético é ilustrado por Kosow (1982, p. 300) que dá o exemplo de um ímã permanente suspenso por um fio sobre um disco de alumínio apoiado em um mancal sobre uma placa fixa de ferro. A placa de ferro tem a função de completar o campo do ímã permanente.

Figura 10 – Efeito de um campo variável sobre um material condutor paramagnético



Fonte: Kosow (1982)

Neste exemplo Kosow (1982, p. 300) mostra que quando o ímã gira no fio, o disco de alumínio gira no mesmo sentido. Isso acontece devido às correntes parasitas induzidas que aparecem devido ao movimento relativo entre o disco de material condutor em relação ao campo magnético do ímã. De acordo com a lei de Lenz, essas correntes parasitas produzem um campo que se opõem ao campo magnético que as produziu. Essa interação entre os campos magnéticos produz um torque e consequentemente movimento no disco de alumínio.

Esse torque gerado pelo tubo de alumínio deve ser suficiente para fazer com que o rotor tenha aceleração e atinja uma velocidade um pouco inferior à velocidade síncrona devido ao escorregamento, porém como essa diferença de velocidade entre rotor e campo girante é pequena, torna-se possível que a polaridade do rotor ditada pelo posicionamento dos ímãs permanentes, se alinhe com a do campo magnético girante. Portanto, pode-se dizer que essa máquina possui duas etapas de funcionamento, uma fase assíncrona, que só acontece por um breve período de tempo no momento da partida, e uma fase síncrona que é o funcionamento de trabalho da máquina.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a implementação deste projeto, foi disponibilizado um motor assíncrono trifásico de 4 polos que utiliza rotor em gaiola-de-esquilo, um modelo bastante comum e amplamente utilizado em aplicações industriais. Deste motor deseja-se retirar o rotor original e utilizar apenas estator, conjunto de tampas, mancais e rolamentos, adaptando o projeto do rotor da máquina síncrona para essas medidas.

4.1 Especificações do motor

As especificações do motor de acordo com os dados de placa do fabricante são as seguintes:

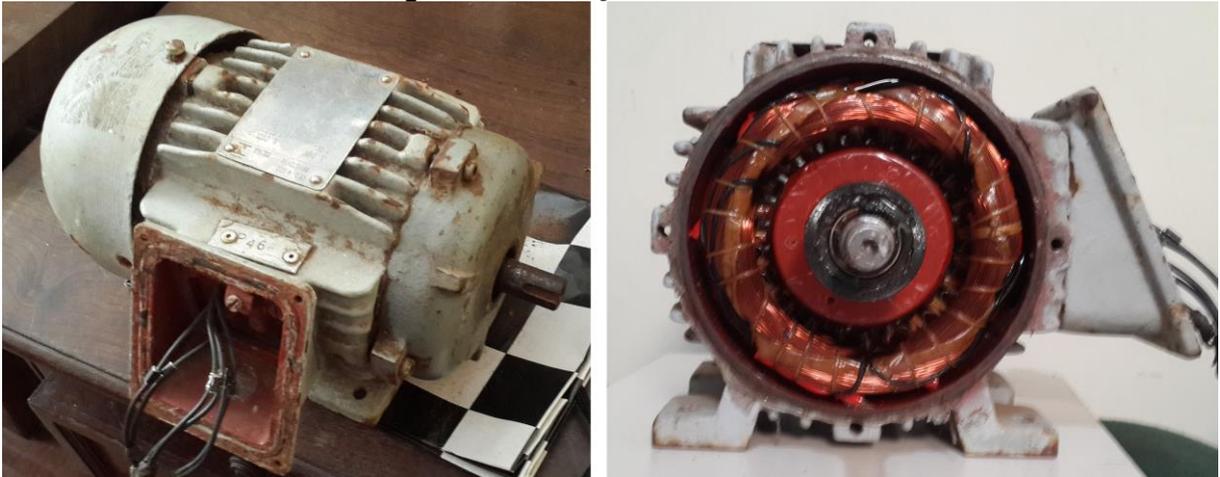
Tabela 4 - Especificações do motor pelos dados de placa do fabricante

Marca	WEG
Tipo	Trifásico indução
Carcaça	71
Potência	0,5 cv
Polos	4
Rotação nominal	1730 rpm
Frequência	60 Hz
I_p/I_n	5.0
Regime	S1
FS	1.25
Proteção	IP 54
Isol	B
Tensão	220/380 V
Corrente	2,25/1,30 A
Rendimento	66%
$\cos(\varphi)$	0.65

Fonte: Autoria própria (2020)

Feita a escolha do motor a ser utilizado, foi necessário realizar a desmontagem para tirar as medidas do rotor original juntamente com as medidas do estator para realizar o projeto e posteriormente a aquisição de materiais para a construção da máquina síncrona.

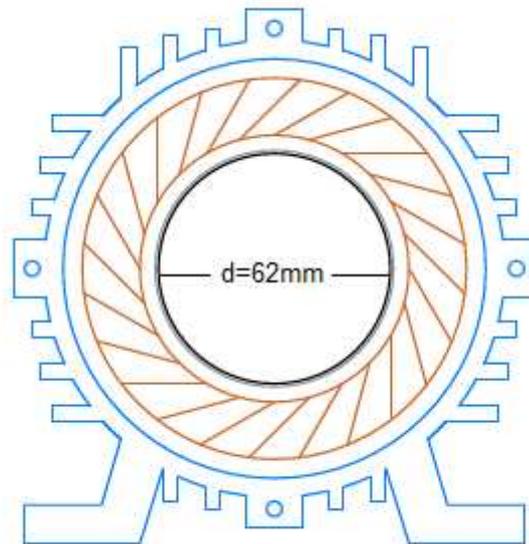
Fotografia 1 - Carcaça e estator utilizados



Fonte: Autoria própria (2020)

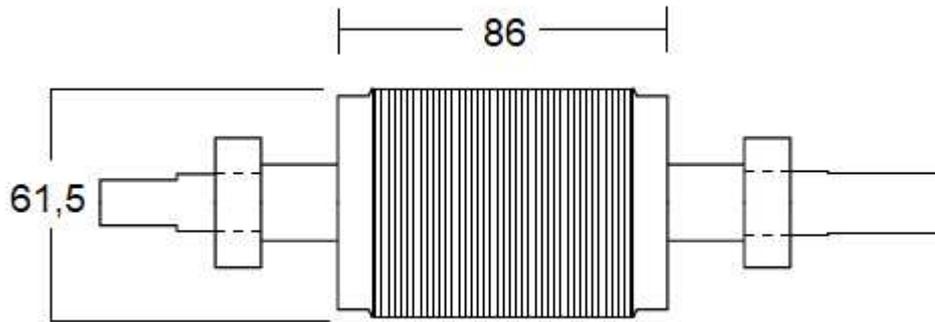
Com o uso do *software* AutoCad 2021 foi realizado o desenho do estator separadamente do rotor original para possibilitar o projeto para implementação do rotor. A representação do estator em questão, com suas medidas, pode ser observada na figura 11.

Figura 11 - Desenho e medidas do estator



Fonte: Autoria própria (2020)

Para projetar as medidas do rotor da máquina síncrona, foi possível tomar como base principalmente as medidas originais do rotor do motor, sendo elas representadas na figura 12.

Figura 12 – Medidas do rotor original em mm

Fonte: Autoria própria (2020)

4.2 Tubo de alumínio

A proposta para gerar torque de partida para o rotor consiste em envolver o núcleo de material ferromagnético por uma camada de material paramagnético, que no caso foi o alumínio. Utilizando como base as medidas originais do motor, iniciou-se uma procura por medidas comerciais de tubo de alumínio que se aproximassem das dimensões desejadas para o projeto, no que se refere à diâmetro, espessura e comprimento do tubo. A medida comercial que mais se aproximou do desejado foi de 60,33mm de diâmetro externo e 3,91mm de espessura, levando-se em consideração que a espessura do tubo de alumínio seria significativa quanto a proporcionar torque para o rotor. A liga do tubo de alumínio utilizada foi a 6101-t6.

Fotografia 2 - Tubo de alumínio utilizado

Fonte: Autoria própria (2020)

4.3 Ímãs permanentes

Para este projeto de rotor, optou-se pela utilização de ímãs de Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB) por sua característica de alta densidade de fluxo magnético em comparação com outros tipos de ímã, tendo uma excelente relação entre indução e volume, o que o torna ideal para este tipo de projeto, já que quanto maior o ímã, menor seria a área de alumínio exposta ao campo magnético do estator, portanto menor o torque disponível para a partida do motor.

De acordo com as medidas idealizadas para a construção do rotor, realizou-se a busca por medidas comerciais de ímãs permanentes e optou-se por utilizar quatro ímãs de neodímio de grade N35 com medidas de 40mm de comprimento, 20mm de largura e 5mm de espessura.



Fonte: polo magnético (acesso em 2020)

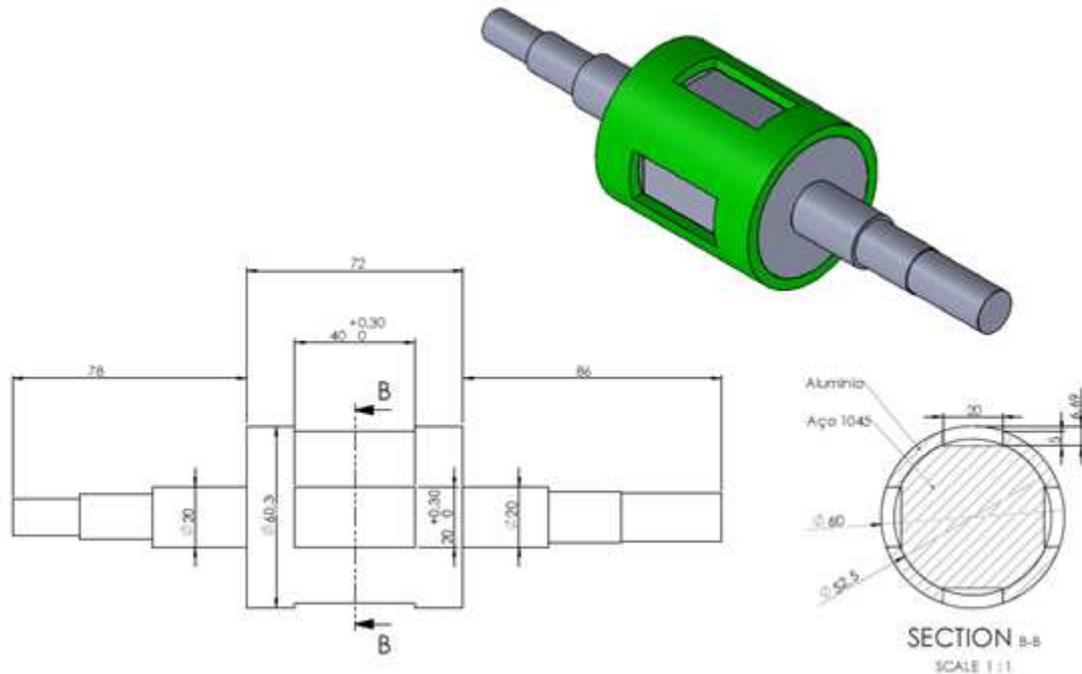
Cada unidade deste ímã possui 30g de massa, possui revestimento niquelado (Ni-Cu-Ni) e possui 2100 Gauss de medida de indução magnética. Sua temperatura máxima de trabalho é 80°C. Sua força de tração é de 12kg para cada peça, em testes realizados pelo fabricante com metais com bom magnetismo, em superfície lisa, na horizontal e sem interferências.

4.4 Projeto do rotor

Após definir as medidas do tubo de alumínio e dos ímãs permanentes a serem utilizados foi possível projetar como seria o rotor, que consiste basicamente no núcleo e eixo usinado em aço 1045, envolto pelo tubo de alumínio, com as janelas fresadas para alojamento dos ímãs permanentes.

As dimensões do rotor finalizado podem ser representadas pela figura 13.

Figura 13 - Desenho e medidas em mm do rotor da máquina síncrona



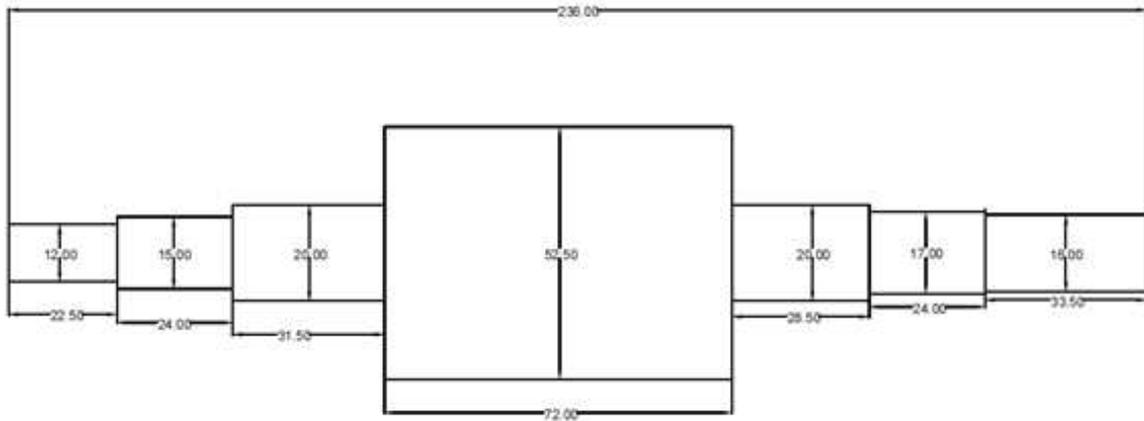
Fonte: Autoria própria (2020)

4.5 Usinagem do núcleo e prensagem do tubo

A primeira etapa de fabricação consiste na usinagem do núcleo em aço 1045. A escolha deste material se deu pela fácil disponibilidade, boas propriedades mecânicas como resistência do material e facilidade de usinagem, e as propriedades magnéticas adequadas para a fabricação de um núcleo por se tratar de um material ferromagnético, que permite um bom fluxo das linhas de campo magnético provenientes do estator.

O núcleo foi usinado em torno convencional conforme as medidas representadas na figura 14.

Figura 14 - Desenho e medidas em mm do núcleo



Fonte: autoria própria (2020)

Após o núcleo ser usinado, o tubo de alumínio foi cortado conforme a medida de comprimento do núcleo. A medida de diâmetro do núcleo foi usinada de forma a oferecer uma folga em relação à medida interna do tubo possibilitando assim a fixação por prensagem, além disso foi utilizado o fixador químico TEK BOND 138 para peças cilíndricas com baixa viscosidade utilizado para fixação de metais. A fotografia 4 mostra como ficou o rotor após esse processo.

Fotografia 4 - Primeira configuração de rotor



Fonte: Autoria própria (2020)

4.5.1 Teste de partida

Nessa configuração, espera-se que o motor tenha o funcionamento semelhante ao de um motor assíncrono com rotor em gaiola-de-esquilo. Para validar esse funcionamento realizou-se a partida do motor utilizando um inversor de frequência para limitar a corrente do estator, já que a eficiência da máquina já não seria a original, portanto a corrente seria alta, o que poderia causar aquecimento e conseqüentemente a queima das bobinas do estator.

Utilizou-se o fechamento do motor em triângulo, que no caso desse estator é para tensão de 220V, porém nos primeiros testes de partida limitou-se a tensão de saída do inversor para não exceder a corrente no estator. Utilizando um tacômetro digital ótico da marca Minipa, modelo MDT-2244A, foi medido a rotação no eixo do motor.

Assim obteve-se os seguintes valores de rotação, para cada valor de tensão aplicado:

Tabela 5 - Valores aplicados ao motor pelo inversor

Tensão	Corrente	Frequência	Rotação
100 V	2,2 A	60 Hz	600 rpm
90 V	2,2 A	54 Hz	900 rpm
90 V	2,2 A	56 Hz	1054 rpm
80 V	2,2 A	60 Hz	1100 rpm

Fonte: Autoria própria (2020)

Esses testes de partida serviram para mostrar que o motor é capaz de partir nessa configuração, portanto é capaz de gerar torque. Porém nos testes realizados com o inversor de frequência o mesmo entra em falha quando se excede o valor de corrente nominal, dessa forma não é possível explorar o torque máximo do motor.

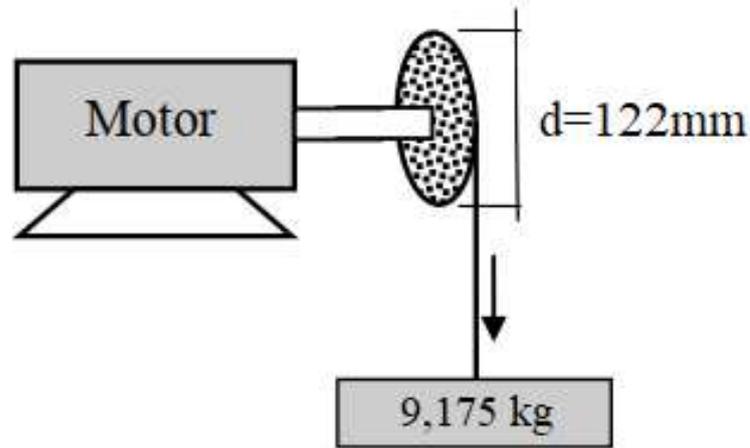
Para realizar o teste em partida direta, utilizou-se de uma ventilação externa para resfriar e preservar o estator, já que a corrente seria muito mais alta do que a nominal.

Utilizando o alicate amperímetro, pôde se constatar que nessa configuração a corrente do motor em partida direta, sem carga é de 10,5 A que é o mesmo valor da corrente de rotor bloqueado do motor, e é capaz de atingir uma rotação de 1700 RPM como pôde se medir com o tacômetro na ponta do eixo. Esse resultado mostra que essa máquina está trabalhando como um motor assíncrono, entregando uma rotação pouco abaixo da rotação síncrona que para esse caso é de 1800 RPM, devido ao escorregamento.

4.5.2 Medição de torque de partida

Para mensurar o torque de partida gerado nessa configuração, deseja-se obter o valor de torque estático, ou seja, o valor de torque gerado na partida no instante em que o rotor está em 0 RPM. Para isso utilizou-se de uma polia de 61mm de raio na ponta do rotor. Fixou-se um cabo de aço de 2mm de diâmetro na polia e na ponta do cabo adicionou-se carga até o momento em que o motor não era capaz de erguer essa carga.

Figura 15 - Sistema montado para medição de torque



Fonte: Autoria própria (2023)

Novamente, utilizou-se partida direta com o fechamento de 220V. O valor da carga máxima que o motor foi capaz de erguer foi 9,175 kg.

Sabe-se que o torque, ou momento de inércia, é obtido através da multiplicação do comprimento do braço de torque, que no caso é o raio da polia (61mm) pela carga adicionada (9,175 kg). Assim sendo, o motor nessa configuração foi capaz de gerar um torque de 0,56 kg. m.

Nessa situação o motor está em situação de rotor bloqueado, já que se adiciona carga até o rotor não ser capaz de erguer essa carga, assim pôde-se confirmar que o valor da corrente com o rotor bloqueado fica em torno de 10,5 A, como pôde-se constatar com o uso do alicate amperímetro.

4.6 Fresagem das janelas para alojamento dos ímãs

De acordo com o desenho mostrado na seção 4.4, os ímãs permanentes seriam alojados no rotor de forma que não ultrapassassem a medida de diâmetro do rotor. Para isso o rotor precisou ser fresado na medida exata para encaixe dos ímãs, como pode-se observar pela figura 16.

Fotografia 5 segunda configuração do rotor



Fonte: Autoria própria (2020)

Após a fresagem, fez-se necessário realizar novos testes de partida e medição de torque, a fim de comparar os resultados com a configuração anterior, já que a retirada de material da superfície do rotor deve causar um impacto significativo na geração de torque pelo tubo de alumínio.

4.6.1 Teste de partida

Esse teste tem o objetivo de verificar se nessa configuração o motor é capaz de realizar a partida, qual é o valor da corrente de trabalho, e qual a rotação no eixo.

Para isso, utilizou-se de uma partida direta, na rede elétrica em 60 Hz, com uma ventilação forçada externa para resfriar o estator, já que espera-se que a corrente seja elevada, excedendo os níveis de trabalho nominais do estator original.

Utilizando um alicate amperímetro da marca Minipa, modelo ET-3200, pôde-se constatar que a corrente é muito próxima da corrente obtida no teste anterior, ficando próximo de 10 A, o que mostra que nessa configuração também se gerou uma baixa força contra eletromotriz, que é responsável por limitar a corrente de trabalho de um motor assíncrono.

Para medir a rotação do eixo nessa configuração, utilizou-se de um tacômetro digital ótico. O resultado obtido foi de 1800 RPM, que é a velocidade síncrona.

Esse resultado não era esperado, já que nessa configuração, esperava-se que a máquina tivesse o funcionamento de um motor assíncrono e somente quando o rotor tivesse os ímãs permanentes fixados é que seria capaz de atingir o sincronismo. Nesse caso, apenas com as janelas fresadas no rotor, o motor foi capaz de partir e entrar em sincronismo.

Para comprovar que o motor estava em sincronismo utilizou-se também de um estroboscópio, mostrado na fotografia 6, montado para as aulas de Máquinas Elétricas. O equipamento é conectado à mesma alimentação elétrica que fornece

tensão para o estator e compara o sinal da rede com o sinal de rotação no eixo do motor. Caso o motor esteja em sincronismo, o equipamento apresenta uma indicação visual através do ponteiro.

Fotografia 6- Estroboscópio utilizado para verificar sincronismo



Fonte: Aatoria Própria (2023)

É importante salientar que nessa configuração, mesmo sendo capaz de atingir a velocidade síncrona, ao se adicionar uma pequena carga a rotação caía de exatos 1800 RPM para a velocidade assíncrona em torno de 1650 RPM.

4.6.2 Medição de torque de partida

Para mensurar o torque de partida gerado nessa configuração, utilizou-se do mesmo procedimento mostrado na seção 4.5.2. Deseja-se obter o valor de torque estático. Utilizou-se do mesmo sistema com a polia de 61 mm de raio, adicionando-se carga até o instante em que o motor não era capaz de elevar a carga.

Novamente, utilizou-se partida direta com o fechamento de 220V. O valor da carga máxima que o motor foi capaz de erguer foi 7,920 kg.

Assim sendo, o motor nessa configuração foi capaz de gerar um torque de 0,48 kg.m na partida.

4.7 Colagem dos ímãs permanentes

Para realizar a fixação dos ímãs permanentes ao rotor, utilizou-se do fixador químico TEK BOND 138, de forma que os ímãs fiquem posicionados alternando a polaridade, ou seja, na primeira e terceira janela com a face S voltada pra fora, e na segunda e quarta janela com a face N voltada pra fora.

Fotografia 7 - Terceira configuração de rotor

Fonte: Autoria própria (2020)

4.7.1 Teste de partida

Esse teste tem o objetivo de verificar se nessa configuração o motor é capaz de realizar a partida e atingir a velocidade síncrona de 1800 RPM e qual a corrente de trabalho.

Para isso, utilizou-se de uma partida direta, na rede elétrica em 60 Hz, com uma ventilação forçada externa para resfriar o estator, já que se espera que a corrente seja elevada, excedendo os níveis de trabalho nominais do estator original.

Utilizando um alicate amperímetro, pôde-se constatar que a corrente baixou com relação as correntes obtidas nos testes anteriores, ficando próximo de 5 A, o que mostra que nessa configuração o campo magnético gerado pelos ímãs de neodímio que é de alta intensidade foi capaz de limitar a corrente do estator.

Para medir a rotação do eixo nessa configuração, utilizou-se de um tacômetro digital ótico. O resultado obtido foi de 1800 RPM, que é a velocidade síncrona.

Para comprovar que o motor estava em sincronismo utilizou-se também o estroboscópio citado no item 4.6.1.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

No capítulo 4 foram descritos os procedimentos adotados para a realização dos ensaios de partida e de obtenção do valor de torque estático do motor nas 3 diferentes configurações de rotor que foram construídas.

5.1 Testes de partida

No teste de partida da primeira configuração de rotor construída, que pode ser vista no item 4.5, esperava-se que o motor tivesse o funcionamento similar ao de um motor de gaiola-de-esquilo, ou seja, funcionamento de motor assíncrono. O resultado esperado era que o motor fosse capaz de partir em partida direta, atingir uma velocidade próxima, porém menor que a velocidade síncrona, que é de 1800 RPM e a corrente fosse elevada, já que nessa configuração o rotor não é capaz de produzir uma elevada força contra eletromotriz para limitar a corrente.

O resultado obtido foi que o motor foi capaz de partir, atingiu uma velocidade de aproximadamente 1700 rpm, com uma corrente de 10,5 A, que é um valor muito próximo da corrente de rotor bloqueado. Esse comportamento e resultados satisfazem o que era esperado para essa configuração.

No teste de partida da segunda configuração de rotor construída, que pode ser vista no item 4.6. também se esperava que o motor tivesse o funcionamento de máquina assíncrona, sendo capaz de realizar a partida atingindo uma velocidade próxima da síncrona, porém menor que 1800 rpm, e que o valor de corrente fosse alto.

O motor foi capaz de partir em partida direta, porém o valor de rotação estava exatamente 1800 RPM, que é o valor da velocidade síncrona. Esse valor foi indicado inicialmente por tacômetro digital ótico, e posteriormente foi comprovado utilizando um estroboscópio.

Nessa configuração não era esperado que o rotor atingisse a velocidade síncrona, já que ainda não estava com os ímãs permanentes, que seriam os responsáveis por garantir o acoplamento entre o rotor e o campo girante. Entretanto, pôde-se observar que ao se acrescentar uma pequena carga no eixo, o motor perdia o sincronismo, voltando a apresentar escorregamento em uma velocidade de aproximadamente 1650 RPM.

A explicação para o motor ter entrado em sincronismo nessa configuração é a mesma que justifica o funcionamento dos motores síncronos não-excitados,

apresentados por Kosow (1982, p.279) e dos motores síncronos de relutância apresentados por Martins (2003) e por Silveira (2022).

Segundo Kosow (1982, p. 279), existe uma subcategoria de motores síncronos que não empregam excitação CC no campo, nem mesmo utilizam ímãs permanentes. Esse tipo de motor utiliza enrolamento em gaiola de esquilo, podendo ser fundido ou bobinado, o que faz com que o motor parta como um motor de indução na presença do campo girante. Devido ao rotor com polos salientes, como pode-se observar na figura 16, o motor entra em sincronismo.

Figura 16 - Motor síncrono com polos salientes e enrolamentos de indução



Fonte: Kosow (1982)

Assim, o motor desenvolve um torque de relutância, e costuma ser chamado de motor polifásico de relutância.

Cavalcante (2002, p.15) compara a relutância em um circuito magnético com a resistência elétrica em um circuito elétrico, ou seja, a relutância magnética é como uma resistência que se opõe ao fluxo magnético dificultando a sua passagem. Sendo que a relutância \mathfrak{R} pode ser obtida em função da permeabilidade magnética μ do material, do comprimento L e área A da seção reta do circuito magnético. Ou seja:

$$\mathfrak{R} = \frac{L}{\mu A} \quad (16)$$

Diferentemente dos motores comuns, que se baseiam no princípio da interação entre dois campos magnéticos, Silveira (2022, p. 21) explica que o princípio do motor síncrono de relutância se baseia na relutância magnética. Nesse caso, o

sentido de menor relutância do rotor é chamado de eixo direto e esse eixo tende a se alinhar ao campo girante, de modo que a relutância seja mínima. O eixo de maior relutância é chamado de eixo em quadratura.

De acordo com Martins (2003, p. 8), nos motores de polos salientes o torque de relutância depende da diferença entre as reatâncias do eixo direto e do eixo em quadratura. O motor parte de forma assíncrona por conta dos enrolamentos de indução e é levado ao sincronismo por conta do conjugado de relutância, pois o campo girante tende a alinhar o rotor em uma posição em que seja mínima a relutância ao fluxo que atravessa o entreferro até o rotor.

Figura 17 - Motor síncrono de Relutância SynRM ABB



Fonte: ABB Automação (2018)

A corrente na alimentação do motor para essa configuração foi de aproximadamente 10 A, que era esperado, já que a precisão de fabricação com um entreferro muito grande e os materiais que foram utilizados (núcleo do rotor em aço 1045 em vez de ferro-silício e tubo de alumínio) geram uma eficiência muito menor do que a construção original da máquina.

No teste de partida da terceira configuração de rotor, que pode ser vista no item 4.7. esperava-se que o motor tivesse o funcionamento de máquina síncrona, ou seja, que o rotor atingisse a velocidade síncrona de 1800 RPM. E que o valor de corrente fosse mais baixo do que nas configurações anteriores.

O motor foi capaz de partir em partida direta, atingindo os 1800 RPM.

Diferente da configuração anterior, já seria necessário adicionar uma carga muito maior no eixo para tirar o motor de sincronismo e cair para uma rotação assíncrona de aproximadamente 1650 RPM.

Com relação à corrente na alimentação da máquina foi de 5 A, que é um valor muito baixo quando comparado às configurações anteriores. Isso se deve ao fato de que a densidade de campo magnético dos ímãs de neodímio é muito alta e a sua interação com o estator quando está em movimento relativo ao conjunto de bobinas gera uma força contra eletromotriz muito maior que nas configurações contendo apenas o núcleo de aço e o tubo de alumínio.

5.2 Testes de torque estático

A primeira medição de torque estático foi realizada com a configuração de rotor descrita no item 4.5. Com essa medição esperava-se obter o torque de partida proporcionado pelo conjunto do núcleo e tubo de alumínio, ainda sem ter sido realizada a fresagem das janelas de alojamento dos ímãs permanentes. Nessa situação o motor foi capaz de gerar um torque de partida de 0,56kg.m.

A segunda medição de torque de partida foi realizada com a configuração de rotor mostrada no item 4.6, já com as janelas fresadas no rotor. O objetivo dessa medição era realizar a comparação entre a capacidade de geração de torque de partida entre a primeira e a segunda configuração de rotor, tendo em vista que após o processo de fresagem é retirado uma quantidade de material do rotor, diminuindo a capacidade de gerar torque, que é o que faz com que o motor chegue em uma velocidade próxima da síncrona para então entrar em sincronismo.

Nesse segundo ensaio o motor gerou um torque de partida de 0,48 kg.m., um valor que corresponde à 85,71% do torque gerado na primeira configuração. Isso mostra que assim como o esperado, essa retirada de material foi significativa para o resultado na geração de torque.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O método proposto se mostrou eficiente no que se refere à capacidade do motor em realizar partida própria quando alimentado em partida direta na frequência da rede elétrica. Em sua configuração final, o alumínio foi capaz de proporcionar torque suficiente durante a partida para que o rotor acelerasse até uma rotação próxima à da velocidade do campo girante, permitindo que o rotor entrasse em sincronismo por conta dos ímãs permanentes.

Além de sua aplicação prática, este projeto tem uma finalidade didática, pois sua construção aplicou e comprovou diversos conceitos das áreas de materiais elétricos, eletromagnetismo e máquinas elétricas.

Os testes de partida e de torque puderam evidenciar a influência de diferentes configurações de dimensões e materiais no resultado de torque e corrente de alimentação, o que basicamente aponta a eficiência do conjunto.

Os resultados mostrados neste trabalho servem como ponto de partida para estudos mais aprofundados no assunto buscando melhorar a eficiência de trabalho da máquina o que pode possibilitar um estudo sobre a viabilidade comercial desse sistema.

Buscando otimizar o funcionamento da máquina, podem-se realizar testes com diferentes ligas de aço para o núcleo, diferentes ligas de alumínio ou até mesmo algum outro material paramagnético, e também com outros tipos de ímã permanente.

Da mesma forma, podem-se realizar testes utilizando desenhos diferentes para o rotor, utilizando ímãs com outras dimensões, espessura do alumínio ou diâmetro do núcleo. Essa mudança poderia gerar um resultado positivo na eficiência de trabalho da máquina, já que existe margem para diminuir o entreferro entre o rotor e núcleo do estator.

Outra sugestão para trabalhos futuros seria realizar a medição de torque dinâmico, através de um dinamômetro com o objetivo de adicionar e medir a carga necessária no eixo do motor para que o motor saia de sincronismo.

REFERÊNCIAS

- WEG. **Motores elétricos**: Guia de Especificação. Jaraguá do Sul, 2023. Disponível em: <https://static2.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em: 19 mai. 2023.
- UMANS, S. D. **Máquinas elétricas**: de Fitzgerald e Kingsley. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.
- SCHMIDT, W. **Materiais elétricos**: Condutores e semicondutores. 2. ed. EDGARD BLÜCHER, 1979. v. 1.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais**: Uma Introdução. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- HALLIDAY, D; RESNICK, R; WALKER, J. **Fundamentos de Física**: Eletromagnetismo. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 3.
- PINHO, L. C. A. B. **Materiais Magnéticos e suas Aplicações**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- ROCHA, M. F.; *et al.* **Materiais Elétricos**. Porto Alegre: SAGAH, 2018.
- SANCHES, D. **Tópicos Especiais em Eletrônica**: Interferência Eletromagnética – EMI. CLUBE DE AUTORES, 2014. 93 p. *E-book*.
- CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. **Introduction to Magnetic Materials**. 2 ed. WILEY, 2009.
- METALMAG. **Ímã Permanente**. 27 dez. 2019. Disponível em: <https://www.metalmag.com.br/artigo/ima-permanente/>. Acesso em 25 mai. 2020.
- WEG. **Guia de Aplicação Servoacionamentos**. 1. ed. Jaraguá do Sul: WEG AUTOMAÇÃO, 194 p. Disponível em: http://professorcesarcosta.com.br/upload/imagens_upload/Guia_de_Aplicacao_de_Servoacionamentos.pdf. Acesso em: 7 jun. 2023.
- MAIA, T. A. C. **Projeto e construção de um gerador a ímãs permanentes de fluxo axial para turbina eólica de pequena potência**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.
- KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 4. ed. Porto Alegre: GLOBO, 1982. v. 1.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- SEIXAS, F. J. M., **Máquinas Elétricas**. 2. ed. Ilha Solteira: 2012. v. 2.

AUGUSTO JUNIOR, N., AMORIM FILHO, T. M. **Motores Trifásicos De Indução** – FESP. Disponível em: http://paginapessoal.utfpr.edu.br/edisonsilva/conversao-de-energia-2/maquina-de-inducao/MOTOR_INDUCAO_FESP.doc/at_download/file. Acesso em 12 jun. 2023.

UNESP. **Eletrotécnica Geral: IX. Motores Elétricos**. Apostila parte 2. Disponível em: <http://www.marioloureiro.net/tecnica/electrif/motores.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2023.

WEG. **Motores Síncronos: Aplicações, Funcionamento e Características Construtivas**. 1. ed. Jaraguá do Sul: WEG MÁQUINAS, 202-?. 17 p. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hf2/h3b/WEG-motores-sincronos-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>. Acesso em 10 jun. 2023.

VASCONCELOS, F. M. **Máquinas Elétricas: Aula 01 – Máquinas de Indução (Assíncronas)**. São Paulo: USP, 2020.

MATOS, N. M. R. **Análise do Funcionamento de um Servomotor de Corrente Alternada com Ímãs Permanentes**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Blumentau, 2012.

POLO MAGNÉTICO. Ímã de Neodímio Bloco N35 40x20x5mm. Disponível em: <https://www.polomagnetico.com.br/ima-de-neodimio/bloco/ima-de-neodimio-40-x-20-x-5-mm-n35>. Acesso em: 17 ago. 2020.

MARTINS, C. E. G. **Motores Síncronos de Relutância com Barreiras de Fluxo e Partida Assíncrona**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina. 2003.

SILVEIRA, A. M. M. Motor Síncrono de Relutância. **Neutro à Terra**, n. 28, p. 17-26, 19 jan. 2022. Disponível em: <https://parc.ipp.pt/index.php/neutroaterra/article/view/4490>. Acesso em: 02 jun. 2023.

ABB AUTOMAÇÃO. **Motor Síncrono de Relutância (SynRM)**. 2018. Disponível em: https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AUA0000132610_PT&LanguageCode=pt&DocumentPartId=&Action=Launch. Acesso em 12 jun. 2023.