

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

IFG – CÂMPUS ITUMBIARA

**DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA EXPERIMENTAL PARA O ESTUDO
DO DESEMPENHO DINÂMICO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA OPERANDO EM
VELOCIDADE VARIÁVEL PARA APLICAÇÃO EM TRAÇÃO ELÉTRICA**

ÁREA DE CONHECIMENTO: 30400007 – Engenharia Elétrica

LINHA DE PESQUISA: 30404053 MÁQUINAS ELÉTRICAS E DISPOSITIVOS DE
POTÊNCIA.

ALUNO: LEONARDO RODRIGUES MENDES DA CUNHA.

ORIENTADOR: Victor Régis Bernardeli.

ITUMBIARA

Julho/2022.

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Leonardo Rodrigues Mendes da Cunha.

Matrícula: 20161040070333

Título do Trabalho: DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA EXPERIMENTAL PARA O ESTUDO DO DESEMPENHO DINÂMICO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA OPERANDO EM VELOCIDADE VARIÁVEL PARA APLICAÇÃO EM TRAÇÃO ELÉTRICA

Autorização - Marque uma das opções

1. (☒) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. (☐) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. (☐) Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- (☐) O documento está sujeito a registro de patente.
(☐) O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
(☐) Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara-GO, 08/08/2022.
Local Data

Leonardo Rodrigues
Mendes da Cunha

Assinado de forma digital por
Leonardo Rodrigues Mendes da
Cunha
Dados: 2022.08.08 16:22:15 -03'00'

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA EXPERIMENTAL PARA O ESTUDO
DO DESEMPENHO DINÂMICO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA OPERANDO EM
VELOCIDADE VARIÁVEL PARA APLICAÇÃO EM TRAÇÃO ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada por
Leonardo Rodrigues Mendes da Cunha ao
Instituto Federal de Goiás Campus Itumbiara
para a **obtenção do título de Graduação**
em Engenharia Elétrica em 04/07/2022.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Victor Régis Bernardeli.

ITUMBIARA

Julho/2022.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C972d Cunha, Leonardo Rodrigues Mendes da
Desenvolvimento de plataforma experimental para o estudo do desempenho dinâmico da máquina assíncrona operando em velocidade variável para aplicação em tração elétrica. / Leonardo Rodrigues Mendes da Cunha. -- Itumbiara, 2022.
74 p. : il. color.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2022.

Orientador: Prof. Dr. Victor Régis Bernardeli.

1. Engenharia elétrica. 2. Motores elétricos de indução. 3. Máquinas elétricas. I. Título. II. Bernardeli, Victor Régis. III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

CDD 621.31

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara
Bibliotecário: Eduardo Pereira Resende CRB1/3266



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA

Termo de Aprovação

Leonardo Rodrigues Mendes da Cunha

DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA EXPERIMENTAL PARA O ESTUDO DO DESEMPENHO DINÂMICO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA OPERANDO EM VELOCIDADE VARIÁVEL PARA APLICAÇÃO EM TRACÇÃO ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Itumbiara, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado, em 04 de julho de 2022, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Victor Régis Bernardeli - Orientador

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Prof. Dr. Roberlam Gonçalves de Mendonça - Membro

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Prof. MSc. Carlos Antunes Queiros Júnior - Membro

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Itumbiara – GO

Documento assinado eletronicamente por:

- Carlos Antunes de Queiroz Junior, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 01/08/2022 14:55:28.
- Roberlam Goncalves de Mendonca, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 01/08/2022 12:27:18.
- Victor Regis Bernardeli, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 01/08/2022 12:13:59.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 01/08/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 307774

Código de Autenticação: 381b1a11a4



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Avenida Furnas, nº 55, Bairro Village Imperial, ITUMBIARA / GO, CEP 75524-010
(64) 2103-5612 (ramal: 5612)

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho ao meu pai, Sebastião Mendes da Cunha,
pelo apoio incondicional, pela contribuição com meu crescimento
profissional e intelectual, pelo carinho e compreensão e inspiração
para graduação no curso de Engenharia Elétrica.*

“O homem científico não pretende alcançar um resultado imediato. Ele não espera que suas ideias avançadas sejam imediatamente aceitas. Seus trabalhos são como sementes para o futuro. Seu dever é lançar as bases para aqueles que estão por vir e apontar o caminho.”

Nikola Tesla

RESUMO

Este trabalho contribui com a implementação e estruturação de uma plataforma para ensaios com motores de indução trifásicos, observando as recomendações da norma NBR 17190-3 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A plataforma possui base ajustável e resistente, permitindo que sejam estudados motores de até 10cv, com diferentes tipos de carcaças. Ensaios fundamentados em normas técnicas atestam a verificação da situação do motor quanto à sua eficiência, além de auxiliar na identificação e correção de possíveis problemas elétricos e mecânicos. A aquisição e o monitoramento dados como tensão, corrente, potência, velocidade, conjugado, entre outros, é feita com precisão e confiabilidade, e com a garantia de segurança para pessoas e equipamentos. São abordados o princípio de funcionamento e as principais características dos motores de indução trifásicos, assim como a apresentação dos elementos da plataforma de ensaios. O desfecho do trabalho passa pelo detalhamento dos ensaios realizados bem como pela análise dos resultados obtidos.

Palavras-chave: Motor de indução trifásico, plataforma experimental, ensaios, torque.

ABSTRACT

This work contributes to the implementation and structuring of a test bench with three-phase induction motors, observing the recommendations of NBR 17190-3 standard of the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT). The platform has a resistant and adjustable base, allowing to be studied motors until 10cv, with different types of motor housing. Tests based on technical standards attest to the verification of the state of the motor in terms of efficiency, as well as assisting in the identification and correction of possible electrical and mechanical problems. The acquisition and monitoring data such as voltage, current, power, speed, torque, and others, is made with precision and reliability, and with safety for people and equipment guarantee. The operating principle and main characteristics of three-phase induction motors are discussed, as well as the presentation of the elements of the test bench. The outcome of the work goes through the details of the tests performed as well as the analysis of the results obtained.

Keywords: Three-phase induction motor, test bench, tests, torque.

Sumário

1	CAPITULO 1-INTRODUÇÃO	13
1.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	13
1.2	JUSTIFICATIVA	14
1.3	OBJETIVOS	14
1.4	MOTOR ASSÍNCRONO TRIFÁSICO OU MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO (MIT):	14
2	CAPITULO 2- MONTAGEM DA PLATAFORMA EXPERIMENTAL	15
2.1	AQUISIÇÃO DE EQUIPAMENTOS	15
2.2	MONTAGEM DA PLANTA DE EXPERIMENTOS	19
2.3	INSTALAÇÃO DA PLATAFORMA	21
2.3.1	<i>Proteção contra choques elétricos (nbr5410)</i>	<i>21</i>
2.3.2	<i>Proteção contra efeitos térmicos</i>	<i>21</i>
2.3.3	<i>Proteção contra sobrecorrentes</i>	<i>22</i>
2.3.4	<i>Proteção contra sobretensões</i>	<i>22</i>
2.3.5	<i>Seleção dos componentes</i>	<i>22</i>
2.3.6	<i>Prevenção de efeitos danosos ou indesejados</i>	<i>22</i>
2.3.7	<i>Previsão de cargas instaladas</i>	<i>22</i>
3	CAPITULO 3- MODELAGEM DO MIT	24
3.1	CONSTRUÇÃO DO MIT (MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO)	24
3.1.1	<i>A obtenção de torque induzido em uma máquina assíncrona</i>	<i>25</i>
3.1.2	<i>O conceito de escorregamento do rotor</i>	<i>27</i>
3.2	O CIRCUITO EQUIVALENTE DE UMA MÁQUINA ASSÍNCRONA	29
3.2.1	<i>Modelo de circuito do rotor</i>	<i>29</i>
3.2.2	<i>O circuito equivalente final</i>	<i>31</i>
3.3	POTÊNCIA E TORQUE EM MÁQUINAS ASSÍNCRONAS	32
3.3.1	<i>Perdas de fluxo de potência</i>	<i>32</i>
3.3.2	<i>Potência e torque em uma máquina assíncrona</i>	<i>34</i>
3.3.3	<i>Separação entre as perdas no cobre do rotor e a potência convertida, no circuito equivalente do MIT</i>	<i>36</i>
3.4	CARACTERÍSTICAS DE TORQUE VERSUS VELOCIDADE DA MÁQUINA ASSÍNCRONA	37
3.4.1	<i>Dedução da equação do torque induzido de um MIT</i>	<i>38</i>
3.4.2	<i>Torque máximo da máquina assíncrona</i>	<i>43</i>
3.5	VARIAÇÕES NAS CARACTERÍSTICAS DE TORQUE VERSUS VELOCIDADE DA MÁQUINA ASSÍNCRONA	45
3.5.1	<i>Classes de projeto de motor de indução</i>	<i>46</i>
4	CAPITULO 4- ACIONAMENTO E ENSAIOS DO MIT	47
4.1	ACIONAMENTO DE ESTADO SÓLIDO PARA MOTORES DE INDUÇÃO	47
4.1.1	<i>Uma seleção de padrões de tensão versus frequência</i>	<i>49</i>

4.2 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO DE CIRCUITO.....	51
4.2.1 O ensaio sem carga ou a vazio	52
4.2.2 O ensaio CC para a resistência de estator	54
4.2.3 O ensaio de rotor bloqueado	55
4.3 ENSAIOS E MODELAGEM MATEMÁTICA DO MIT DE 3CV:	58
4.3.1 Ensaio CC obtenção da resistência de estator R_1 :	58
4.3.2 Ensaio a vazio:	59
4.3.3 Ensaio de rotor bloqueado:	61
4.4 DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS A PARTIR DOS ENSAIOS MÉTODO 2.....	64
4.4.1 Ensaio a vazio.....	64
4.4.2 Do ensaio de rotor bloqueado	65
4.5 EXTRAÇÃO DE INFORMAÇÕES	66
4.5.1 Para esse circuito equivalente, os equivalentes thévenin	67
4.5.2 Ensaios na plataforma, visando os estudos em variadas rotações	70
5 CAPITULO 5- CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	75
6 REFERÊNCIAS	76
ANEXO I- MATLAB CONJUGADO VERSUS VELOCIDADE.....	78

1 CAPÍTULO 1-INTRODUÇÃO

1.1 Descrição do problema

O acionamento de motores de indução para aplicações em velocidades variáveis de alto desempenho desenvolveu-se substancialmente nas últimas duas décadas, tendo se tornado prática comum em processos industriais, veículos elétricos, mecanismos de tração elétrica e acionamentos de eixos rotativos de máquinas ferramentas.

Nos últimos tempos devido a evolução da Eletrônica de Potência e dispositivos microprocessados, em especial Processador Digital de Sinal (DSP), tem havido um crescente avanço em técnicas novas de controles digitais de sistemas de acionamento de máquinas elétricas, em especial Máquinas de Indução, Máquinas Síncrona a Relutância, Máquinas de Corrente Contínua sem escovas e Máquinas a Relutância Variável. Várias arquiteturas de DSP incluindo periféricos dedicados aos controles de conversores estáticos têm sido introduzidas no mercado, elevando a gama de aplicações de das máquinas citadas anteriormente. As vantagens da máquina de indução em relação a máquina de corrente contínua que utilizam escovas, como robustez e reduzido custo levaram a superação das dificuldades de controle e substituição da mesma. [1-5]

Nesse sentido, a presente proposta tem como foco o estudo do desempenho dinâmico do MIT operando em velocidade variável, para tanto serão levantados dados por meio de ensaios em uma plataforma experimental, que será montada de forma específica para a pesquisa. A plataforma atenderá em sua composição elementos que obedeçam a norma da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 17190-3 (Ensaio em Máquinas Elétricas Girantes).

Esse projeto de Trabalho de Conclusão de Curso consiste no projeto e construção de um laboratório para ensaios e controle de máquinas elétricas. Todo projeto contempla a parte mecânica e elétrica, com o objetivo de suportar as ligações elétricas de equipamentos de leitura, simuladores de cargas no eixo rotativo e das máquinas elétricas girantes a serem ensaiadas, além de seus esforços mecânicos e regulagens geométricas exigidos em testes, servindo para vários tipos de máquinas de até 5cv. Ao final do trabalho todo sistema será submetido aos diversos ensaios da máquina assíncrona trifásico, com intuito de levantar dados que servirão de parâmetros para análise entre a parte teórica e prática contestando a eficiência da plataforma experimental.

1.2 Justificativa

O resultado mais imediato a ser alcançado é a disponibilização de uma plataforma de estudos e ensaios de tração elétrica para pesquisas realizadas no Instituto Federal de Goiás, campus Itumbiara. A partir daí existe uma perspectiva significativa de contribuição tecnologia no campo do controle de Motores de Indução Trifásico (MIT) e demais motores, como por exemplo Motores a Relutância Variável. Apesar do sistema de acionamento do MIT ser bastante consolidado, espera-se analisar os problemas advindos na região de controle vetorial, e acionamento com frequência de chaveamento constante.

A instalação da plataforma experimental no Campus, tem como intenção expandir para contribuições científicas futuras e também inserção desta instituição no campo de pesquisa em Veículos Elétricos (VE) de forma especial propor técnicas modernas no controle da máquina dos VE, de forma que seja consolidado o estudo de forma teórica e prática no aprendizado na área de máquinas elétricas e dispositivos de potência e demais áreas do ensino.

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste projeto, está na execução de partes do projeto aprovado pelo Edital FAPEG/CNPQ nr. 03/2015 e implementação de dois sistemas de acionamento à velocidade variável, uma utilizada máquina assíncrona Trifásico (MIT) e outro utilizada máquina a Relutância Variável Trifásico (MRV) e a comparação de desempenho dinâmico e eficiência de ambos os acionamentos para aplicação em tração elétrica.

Como projeto tem duração de 24 meses o presente trabalho terá constituirá duas partes: 1) Montagem e adequação da plataforma e 2) Testes no MIT. Toda estrutura que será montada servirá de base para o início de pesquisas, de forma inicial, no Campus. Salienta-se também que o presente projeto será desenvolvido em outros projetos.

1.4 Motor assíncrono trifásico ou motor de indução trifásico (MIT):

O esquema completo de um sistema de tração elétrica como o motor de indução trifásico (MIT) pode ser visto na figura 1. O diagrama apresentado mostra os elementos principais que constituem o sistema, omitindo os detalhes de controle, supervisão e proteção. O controle do torque será feito através das técnicas de controle já conhecidas e disponíveis comercialmente via inversores.

O conversor de acionamento do sistema de carga, a ser implementado via gerador de corrente contínua com excitação independente. A seguir serão apresentadas as etapas de desenvolvimento para a construção deste sistema.

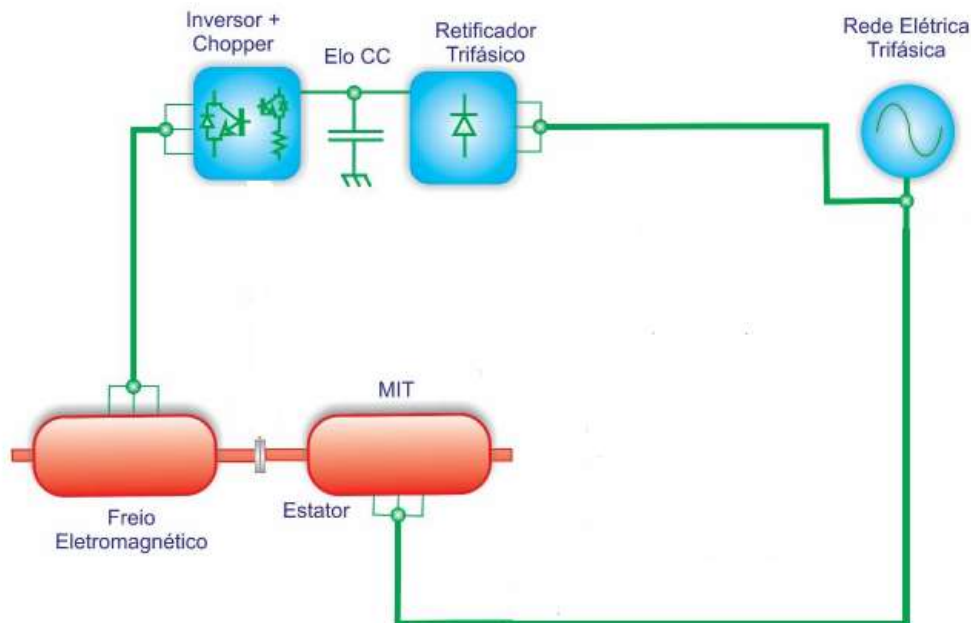


Figura 1. Sistema de tração elétrica com o MIT.

2 CAPITULO 2- MONTAGEM DA PLATAFORMA EXPERIMENTAL

2.1 Aquisição de equipamentos

Nesta etapa será realizada a especificação formal dos elementos constituintes do sistema e o correspondente processo de compra dos equipamentos e materiais de consumo. Visando a aceleração do processo de implementação, sempre que possível, dar-se-á preferência à aquisição do equipamento pronto no mercado, eliminado o processo de montagem, como no caso dos conversores do circuito de acionamento da máquina assíncrona trifásico. Pretende-se construir uma planta com um motor de 3CV. Como a planta possui finalidade de pesquisa os conversores serão sobre dimensionados de modo a permitir ensaios em condições críticas de transitórios com a rede elétrica. Assim, tais conversores serão de, pelo menos, 8 KVA, conforme a disponibilidade e relação custo-benefício no mercado.



Figura 2. Inversor de Frequência CFW500.

O inversor CFW 500 tem a função do controle de tensão e frequência do moto de 10 CV, com este inversor será possível acoplar a carga de forma que simule a tração em altas rotações onde o motor de 3CV apresenta o enfraquecimento de campo, para o ensaio os motores serão submetidos a rotações acima da rotação nominal, pois os motores de tração veicular a combustão tem uma rotação que chegam até 5500 rpm. O papel principal deste inversor é simular com fidelidade a carga de um veículo a combustão. Veja a Figura 2.



Figura 3. Motor de Indução de 3CV.

O MIT rotor gaiola de esquilo simples da Figura 3, representa o motor de tração que será ensaiado posteriormente, apresentando uma potência de 2200W, com dois modelos de ligações trifásica com tensões de linha de 220V e 380V, a corrente nominal de 8.18A em 220V e 4.74A em 380V, rotação em regime de 1735 rpm, frequência de 60Hz, fator de serviço de 1.15, corrente de partida de 6,5 vezes a nominal, fator de potência de 0,83, índice de proteção IP55, resistente ao tempo.



Figura 4. Motor de Indução de 10 CV

O motor de indução armadura gaiola de esquilo simples da Figura 4, representa o motor de carga que será ensaiado posteriormente, apresentando uma potência de 7500W, com três modelos de ligações trifásica com tensões de linha de 220V, 380V e 440V, a corrente nominal de 25,8A em 220V, 14,9A em 380V e 12,9A em 440V, rotação em regime de 1760 rpm, frequência de 60Hz, fator de serviço de 1.15, corrente de partida de 7,5 vezes a nominal, fator de potência de 0,84, índice de proteção IP55, resistente ao tempo.

Para a montagem de equipamentos de infraestrutura do laboratório foi feita uma compra de demais componentes elétricos, que serviram para instalações elétricas do laboratório para este projeto e demais projetos que serão desenvolvidos posteriormente, alguns dos equipamentos irão auxiliar em aulas de forma pedagógica de maneira que facilite os estudos e o aprendizado. Veja a tabela 01.

Unidade	QTD.	Descrição do Material
pç	2	Fita isolante 19mmx20m
pç	6	Disjuntor tripolar DIN 10A
pç	2	Disjuntor bipolar DIN 20A
pç	8	Disjuntor monopolar DIN 25A
pç	2	Disjuntor tripolar DIN 32A
pç	1	Disjuntor tripolar residual 40A 220-400V 30mA
pç	20	Prensa Cabo 1/2"
m	20	Espiral 1/4" branco
pç	20	Parafuso 1/4x30mm sextavado
pç	50	Parafuso 4,8x50mm philipis zincado
pç	10	Parafuso 5,16x58mm sextavado
pç	10	Pino Macho 2P+T 20A
pç	20	Porca 1/4x30mm sextavado
pç	1	Quadro de comando 40x30x20
pç	50	Rebite de repuxo 1/8"
pç	4	Botão iluminado verde 220V 1 NA
pç	4	Botão iluminado vermelho 220V 1 NF
pç	5	Led 110/220V verde
pç	5	Led 110/220V vermelho
pç	2	Trilho Din 35x7,5x2000mm
pç	8	Plugue 3P+T 16A 380/440V
pç	8	Tomada Sobrepor 3P+T 16A 380/440V
pç	10	Conector barra borne 4mm
pç	10	Conector barra borne 6mm
pç	10	Terminal forquilha isolado 2,5mm ²
pç	50	Terminal olhal isolado 4,0mm
pç	50	Terminal pino isolado 4,0mm
pç	100	Abraçadeira nylon 14cm x 2,5mm
pç	101	Abraçadeira nylon 20cm x 3,5mm
pç	40	Aarruela lisa 1/4 zincada
pç	1	Barramento pente trifásico 1m
pç	50	Bucha plastica com anél N08
pç	10	Bucha plastica com anél N10
m	10	Cabo flexivel 1,5mm ²
m	35	Cabo flexivel 2,5mm ² azul
m	35	Cabo flexivel 2,5mm ² Preto
m	50	Cabo PP Naxflex 2x2,5mm ²
m	50	Cabo PP Naxflex 4x4mm ²
pç	12	Caixa pvc 4x2
pç	6	Caixa pvc 140x140mm com feixo
pç	10	Canaleta semi Aberta 30x30mm
pç	12	Tomada 2P+T 20A 220V
pç	20	Cola bastão
pç	3	DPS 270V I máx. 40KA

Tabela 01- Lista de materiais adquiridos.

2.2 Montagem da planta de experimentos

A montagem da planta do MIT no laboratório foi executada nesta etapa. Foi então realizado o assentamento dos equipamentos principais do sistema na área prevista no laboratório, seguida da conexão do cabeamento de força e do cabeamento de sinais.

As bancadas foram montadas de forma que atendessem com segurança os usuários, primeiramente foi projetado em autocad 3D, partidos deste projeto inicial foram feitas mudanças de acordo com a necessidade, uma das bancadas serve para suporte dos motores e demais equipamentos de acionamento, a necessidade de acoplamento de motores de diferentes medidas levaram a conclusão de que a plataforma deveria ter movimentações nos três eixos principais proporcionando um encaixe para variados tipos de motores.

Para o MIT de 10 CV, que serve como freio eletromagnético, a plataforma se desloca no plano x,y, através de uma chapa de aço de 2,5mm com encaixe em tubos de seção retangular de aço de 100x20mm com aletas que se fixam ao determinar a posição final de forma que aproxime do eixo da máquina de ensaio.

Para o motor de ensaio MIT 3CV a plataforma se desloca no plano x,y, movendo para os lados sobre uma chapa de aço de 2,5mm com encaixe em tubos de seção retangular de aço de 100x20mm, e através de roscas de 10mm de diâmetro a mesa se eleva proporcionando um ajuste em altura no eixo z, para o acoplamento com uma variação de altura de 50cm.

Na Finalidade evitar choque elétricos e vibrações mecânicas, na parte superior tem uma borracha de 2.5mm de espessura que cobre por completo todas as partes superiores da bancada. (Fig.5)



Figura 5- bancada de suporte das máquinas assíncronas.

A outra bancada possui uma altura de 1,25m com comprimento de 3m e largura de 1 metro, para que seja possível a ligação de equipamentos na parte frontal da bancada foram adicionadas seis tomadas 220V de 20A, e três tomadas padrão industrial com ligação trifásica com neutro, estas tomadas possibilitam a ligação dos motores de ensaio e equipamentos de sensores de tensão, corrente, torque e inversores. A bancada é revestida com material isolante de borracha de 2,5mm o que evita choques elétricos e contato com a parte de metal da mesa, evitando também desgastes mecânicos. (Fig.6)



Figura 6- Bancada de ligação das máquinas assíncronas e sensores.

Ambas as bancadas possuem uma parte inferior que serve para alojamento dos equipamentos do laboratório, é composta por uma chapa de aço de 1,5mm de espessura e possui a mesma dimensão da parte superior das mesas.

Para a ligação mecânica entre os eixos das máquinas assíncronas trifásico de ensaio e de freio, utiliza um acoplamento de encaixe rápido que tem uma borracha que serve de amortecimento, para que fosse possível o encaixe entre os eixos de diferentes espessuras um dos lados foi feito uma abertura em torno da mesma espessura dos eixos dos motores com fixação de parafusos do tipo torque, a fixação dos motores na bancada foi feito por parafusos de rosca fina e arruelas, de modo que se posicione com ajuste e fiquem alinhados reduzindo possíveis vibrações nos eixos, o que ocasionaria um esforço adicional nos eixos. (Fig.07)



Figura 07- Bancada de suporte com acoplamento das máquinas assíncronas.

2.3 Instalação da Plataforma

Nesta seção serão descritas as atividades comuns necessárias à instalação das duas plantas, MIT e SRM. Adequação das instalações elétricas do Laboratório (sala a ser disponibilizada pelo departamento e direção geral, sala 23) visando a absorção da nova plataforma de pesquisa em sistemas de tração elétrica. Convém ressaltar aqui que todos os custos desta reforma serão custeados com recursos da FAPEG. Os recursos dos materiais para esta reforma e adequação do laboratório para o projeto será disponibilizado pela agência de fomento.

Após um levantamento de matérias elétricos que constituíram a montagem dos ensaios juntamente com a infraestrutura e elaboração do laboratório contempla a instalação das tomadas de parede, tomadas de bancada, disjuntores de proteção, condutores, com a finalidade de trazer a experiencia de utilização do laboratório com segurança.

2.3.1 Proteção contra choques elétricos (nbr5410)

As pessoas e animais devem ser protegidos contra choques elétricos, seja o risco em contato acidental com parte viva perigosa, seja falhas que podem colocar uma massa acidentalmente sob tensão. Apesar de disjuntores residuais serem indicados na norma NBR-5410 para áreas molhadas, no laboratório afim de garantir a segurança dos usuários este dispositivo foi utilizado, com característica de fuga de corrente de 30mA, garantindo a proteção contra choques.

2.3.2 Proteção contra efeitos térmicos

A instalação elétrica deve ser concebida de maneira a excluir qualquer risco de incêndio de materiais inflamáveis, devido a temperaturas elevadas ou arcos elétricos, além disso, em serviço

normal não deve haver risco de queimaduras para pessoas e animais, para esta proteção os condutores e demais equipamentos utilizado em teste são devidamente isolados, e se tratando dos condutores foram dimensionados de acordo com a corrente de nominal dos circuitos evitando o sobreaquecimento, assim como os elementos de agrupamentos dos cabos, além das proteções de disjuntores eletromagnéticos, evitando que a instalação tenha contato com substâncias inflamáveis

2.3.3 Proteção contra sobrecorrentes

As pessoas, os animais e os bens devem ser protegidos contra os efeitos negativos de temperaturas ou solicitações eletromecânicas excessivas resultantes de sobrecorrentes a que os condutores vivos possam ser submetidos. Para esta proteção foram utilizados disjuntores termomagnéticos modelo DIN, de acordo com os cálculos de corrente demandada por cada circuito elétrico.

2.3.4 Proteção contra sobretensões

As pessoas, os animais e os bens devem ser protegidos contra as consequências prejudiciais de ocorrências que possam resultar em sobretensões, como faltas entre partes vivas de circuitos sob diferentes tensões, fenômenos atmosféricos e manobras. Para esta proteção foram utilizados disjuntores termomagnéticos modelo DIN, de acordo com os cálculos de tensão demandada por cada circuito elétrico.

2.3.5 Seleção dos componentes

Os componentes da instalação elétrica devem ser conforme as normas técnicas aplicáveis e possuir características compatíveis com as condições elétricas, operacionais e ambientais a que forem submetidos. Se o componente selecionado não reunir, originalmente, essas características, devem ser providas medidas compensatórias, capazes de compatibilizá-las com as exigências da aplicação.

2.3.6 Prevenção de efeitos danosos ou indesejados

Na seleção dos componentes, devem ser levados em consideração os efeitos danosos ou indesejados que o componente possa apresentar, em serviço normal (incluindo operações de manobra), sobre outros componentes ou na rede de alimentação. Entre as características e fenômenos suscetíveis de gerar perturbações ou comprometer o desempenho satisfatório da instalação podem ser citados: o fator de potência; as correntes iniciais ou de energização; o desequilíbrio de fases; as harmônicas.

2.3.7 Previsão de cargas instaladas

QUADRO DE CARGAS								Divisão de fases		
Nº Circuito	Descrição	qtd.	Potência[w]	Tensão[V]	Corrente[A]	Condutor [mm²]	Disjuntor[A]	A	B	C
1	Tomadas da parede 500W	2	1000	220	4,5	2,5	25	1000		
2	Tomadas da parede 500W	2	1000	220	4,5	2,5	25		1000	
3	Tomadas da parede 500W	2	1000	220	4,5	2,5	25			1000
4	Tomadas da bancada 200W	3	600	220	2,7	2,5	25	600		
5	Tomadas da bancada 200W	3	600	220	2,7	2,5	25		600	
6	Tomadas da parede trifásca 500W	2	1000	380	2,6	2,5	10	334	334	334
7	Tomadas da parede trifásca 500W	2	1000	380	2,6	2,5	10	334	334	334
8	Tomadas da parede bancada 500W	3	1500	380	3,9	2,5	10	500	500	500
9	Motor trifásico 2200W	1	2200	220	8,2	2,5	10	734	734	734
10	Motor trifásico 7500W	1	7500	380	14,9	2,5	16	2500	2500	2500

Tabela 02- Quadro de Cargas.



Figura 08- Quadro de Distribuição de Cargas.

O quadro de distribuição serve para divisão das cargas conforme a tabela 02, cada circuito tem a sua devida proteção contra sobretensão e curto circuito, os disjuntores utilizados são disjuntores do modelo DIN mencionados na tabela 01, os disjuntores estão dimensionados de acordo com a carga e o diâmetro dos fios para que evite o sobreaquecimento dos condutores na hora de utilização, eles foram instalados sobre um trilho de fixação que fica fixado na chapa de metal do quadro assim como também foram fixados os barramentos de neutro e terra.

Para maior segurança por se tratar de um laboratório de uso comum entre alunos e professores foi instalado no ramal da entrada um disjuntor residual que tem a finalidade de analisar

qualquer fuga de corrente seja ela devido ao choque elétrico ou contato das fases com um condutor terra, sendo assim este dispositivo previne acidentes provenientes de algum erro no manuseio dos equipamentos que leve ao choque elétrico.

Os DPSs (Dispositivo de Proteção Contra surtos) foram instalados com a finalidade de proteção dos equipamentos, como motores, inversores e sensores, caso ocorra alguma descarga atmosférica no momento de utilização dos equipamentos, o que evita prejuízos futuros devido a queima de equipamentos por descarga atmosférica, estes equipamentos são ligados no ramal de entrada e acoplado sua saída no barramento de terra que irá drenar possíveis excessos de corrente.

Todas as tomadas estão devidamente aterradas conforme a norma NBR5410. O que proporciona uma segurança maior ao ligar equipamentos prevenindo contra choques elétricos.

3 CAPITULO 3- MODELAGEM DO MIT

Nesta etapa foi realizada a modelagem e simulação do sistema com os parâmetros específicos dos equipamentos adquiridos. Este procedimento visa o estabelecimento das faixas operacionais das grandezas envolvidas visando a correta especificação dos sensores e circuitos de condicionamento de sinais. Além da medição das grandezas elétricas, tensão e corrente.

Para um melhor entendimento dos procedimentos uma breve parte teórica sobre o MIT deve ser relatada, com a finalidade de entender o funcionamento teórico que irá servir de referência nas simulações posteriores.

3.1 Construção do MIT (motor de indução trifásico)

Um MIT possui fisicamente o estator que consiste em um conjunto de enrolamentos que são fixados em ranhuras no núcleo ferro magnético estes enrolamentos são posicionados em defasagem de 120 graus entre si no caso do motor trifásico, de modo que a diferença angular do posicionamento das bobinas produza um campo magnético girante.

O rotor possui um enrolamento ranhuras que são completamente imersas no núcleo ferro magnético com um enrolamento curto circuitado independente de ligação com a rede, este modelo de rotor é denominado rotor de gaiola de esquilo, outro tipo de enrolamento de rotor também alojados em ranhuras mas com conexões com a rede através das escovas que transmite tensões e correntes para este rotor é denominado motor de indução de rotor bobinado, este possibilita acesso mais direto as leituras de sua resistência.

A Figura 09 mostra rotores de MIT do tipo gaiola de esquilo, que serão os modelos de motores que serão utilizados neste projeto. O outro tipo MIT de rotor bobinado é mostrado Figura 10.



Figura 09- Motor Assíncrono rotor Gaiola de esquilo.[16]

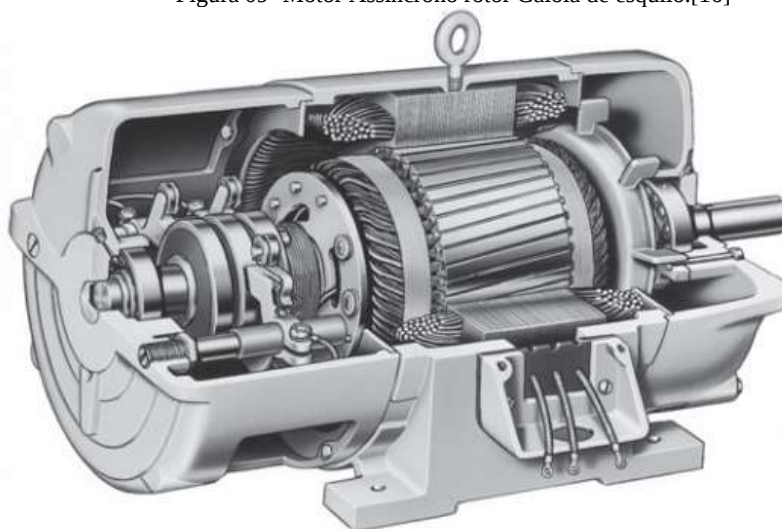


Figura 10- Motor Assíncrono de Rotor Bobinado. [16]

3.1.1 A obtenção de torque induzido em uma máquina assíncrona

Aplicando um grupo de tensão trifásica defasadas em 120 graus ao estator resulta em um grupo de correntes trifásico circulando no estator. Estas tensões e correntes passam a produzir um campo magnético B_s , este campo magnético é formado pelo princípio da lei de Lenz, devido ao posicionamento dos enrolamentos, estes que estão distribuídos com diferença de 120 graus uma da outra, faz com que este campo magnético seja um campo girante. A velocidade síncrona de rotação do campo magnético formado nos enrolamentos é dada por

$$n_{sinc} = \frac{120f_{se}}{P} \quad (1)$$

em que f_{se} é a frequência do sistema das componentes trifásicas aplicada ao estator em hertz que para o nosso sistema de energia é de 60 hertz, e P é o número de polos distribuídos pelo motor.

Esse campo magnético girante formado no estator e representado por B_s passa pelas barras condutoras do rotor, que por estar curto circuitadas agem como espiras submersas no campo magnético que está em movimento induz uma tensão no mesmo através da lei de Lenz. A tensão induzida depende da velocidade e o comprimento do condutor em uma dada barra do rotor que é dada pela equação a seguir

$$e_{ind} = (v \times B) \cdot l$$

em que v se refere a velocidade da barra em relação ao campo magnético B que representa o vetor da densidade de fluxo magnético, l é o comprimento do condutor que passa pelas linhas formadas no campo magnético.

A lei de Lenz aplicada nas espiras do enrolamento do rotor produz um campo magnético de rotor B_r . Enfim, como o torque induzido na máquina assíncrona é dado por

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_S$$

O rotor irá girar no mesmo sentido do seu campo magnético e no sentido contrário do campo magnético do estator. O limite da velocidade deste motor de indução é determinado como velocidade síncrona de rotação, que é dada pela Equação 1.

Se o rotor do MIT estivesse girando na velocidade síncrona, os condutores do rotor estariam girando na mesma velocidade do campo do estator deixando de haver diferença relativa entre os campos e tensão induzida. Se e_{ind} fosse igual a 0, consequentemente não haveria corrente nem campo magnético no rotor. Sem campo magnético no rotor, o torque induzido seria zero e o rotor perderia velocidade como resultado das perdas por atrito e ventilação. Entretanto, uma máquina assíncrona pode ganhar velocidade de modo que se aproxime da velocidade síncrona, mas nunca alcançará a velocidade síncrona. Observe que, em funcionamento normal, ambos os campos magnéticos do rotor e do estator B_R e B_S giram juntos na velocidade síncrona n_{sinc} dado pela Equação 1, ao passo que o próprio rotor movimenta

a uma velocidade menor, o que faz com que o rotor siga o campo magnético, esta diferença de ângulos faz com que haja torque no rotor, de acordo com a carga acoplada a distância entre os campos variam mudando os parâmetros desta máquina com relação as reatâncias de forma que quanto maior a distância relativa dos campos maior o torque no eixo do rotor.

3.1.2. O conceito de escorregamento do rotor

A diferença de velocidade entre a rotação mecânica do rotor e a rotação do campo magnético gerado no estator é determinado como velocidade relativa. A rotação de escorregamento, é definida como a diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade mecânica do rotor:

$$n_{esc} = n_{sinc} - n_m \quad (2)$$

em que n_{esc} velocidade de escorregamento da máquina, n_{sinc} velocidade dos campos magnéticos, n_m velocidade mecânica do eixo da máquina. O escorregamento é expresso por uma unidade de porcentagem como podemos observar na questão a seguir.

$$s = \frac{n_{esc}}{n_{sinc}} (100\%) \quad (3)$$

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} (100\%) \quad (4)$$

Ou em forma de velocidade angular (radianos por segundo)

$$s = \frac{\omega_{sinc} - \omega_m}{\omega_{sinc}} (100\%) \quad (5)$$

Se o rotor estiver girando na velocidade síncrona, então $s = 0$, ao passo que, se o rotor estiver estacionário, então $s = 1$. Valores entre 0 e 1 determina parâmetros de carga. É possível expressar a velocidade mecânica do eixo do rotor em termos de velocidade síncrona e de escorregamento. Resolvendo as Equações (4) e (5) em relação à velocidade mecânica, obtemos

$$n_m = (1 - s)n_{sinc} \quad (6)$$

$$\omega_m = (1 - s)\omega_{sinc} \quad (7)$$

Caso o rotor seja parado de maneira que não possa girar, o rotor terá a mesma frequência do estator. E se, o rotor girar na velocidade síncrona, então a frequência de rotor será zero. Para n_m 0 rpm, a frequência de rotor é $f_{re} = f_{se}$ e o escorregamento é máximo.

Para $n_m = n_{sinc}$, a frequência de rotor é f_{re} 0 Hz e o escorregamento é s 0. Para qualquer velocidade intermediária, a frequência de rotor é diretamente proporcional à diferença entre a velocidade do campo magnético n_{sinc} e a velocidade de rotor n_m . Uma vez que o escorregamento de rotor é definido como

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} \quad (4)$$

então a frequência de rotor pode ser expressa como

$$f_{re} = s f_{se} \quad (8)$$

Substituindo a Equação (4) do escorregamento na Equação (8) e, em seguida, fazendo uma substituição em n_{sinc} no denominador da expressão:

$$f_{re} = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} f_{se}$$

Como $n_{sinc} = 120 f_{se} / P$, temos

$$f_{re} = (n_{sinc} - n_m) \frac{P}{120 f_{se}} f_{se}$$

Portanto,

$$f_{re} = \frac{P}{120} (n_{sinc} - n_m) \quad (9)$$

3.2 O circuito equivalente de uma máquina assíncrona

O funcionamento de uma máquina assíncrona depende das tensões e correntes que são induzidas em seu rotor. No caso do rotor no formato de gaiola de esquilo que recebe uma única excitação através do estator, podemos chama-la de máquina de excitação simples. A máquina assíncrona não recebe uma alimentação interna E_a , e a tensão no rotor é transmitida através do entreferro do circuito magnético.

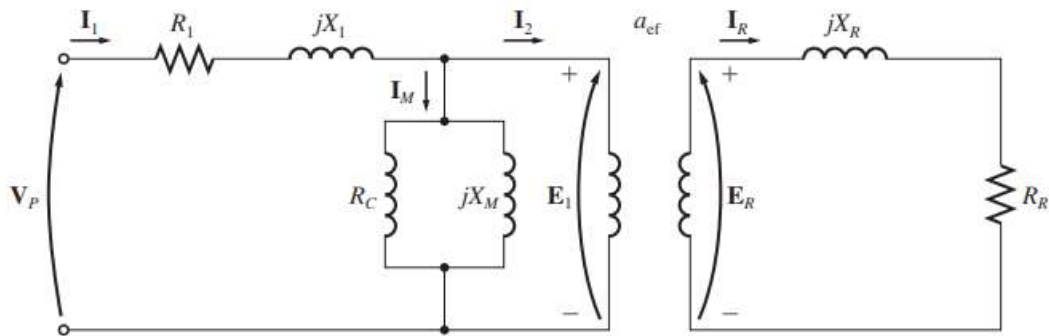


Figura 11- O modelo de circuito de transformador para uma máquina assíncrona, com armadura e estator conectados através de um transformador ideal com relação de espiras a_{ef}

3.2.1 Modelo de circuito do rotor

Em uma máquina assíncrona, quando aplica se tensão aos condutores de estator, uma tensão é induzida nos condutores do rotor da máquina. Quanto maior o atraso do campo magnético do rotor em relação ao campo do estator, maiores serão a tensão e a corrente do rotor. O valor do escorregamento máximo ocorre quando o rotor está bloqueado, consequentemente a maior tensão e a maior frequência do rotor. A menor tensão (0 V) e a menor frequência (0 Hz) acontece quando o rotor está se movendo com a mesma velocidade que o campo magnético do estator, ou seja, a velocidade de rotação mecânica na mesma velocidade do campo magnético, resultando um movimento relativo nulo. Portanto, se o valor da tensão induzida no rotor, estando este bloqueado é denominado E_{R0} , então o valor da tensão induzida, para qualquer escorregamento será

$$E_R = sE_{R0} \quad (10)$$

e a frequência da tensão induzida será para qualquer escorregamento

$$f_{re} = sf_{se} \quad (8)$$

A resistência do rotor R_R é um valor constante que não depende do escorregamento, já a reatância do rotor é diretamente afetada pelo escorregamento. A reatância do rotor de uma máquina assíncrona depende da indutância e da frequência da tensão e da corrente do rotor. Através da indutância de rotor L_R , a reatância do rotor é dada por

$$X_R = \omega_{re} L_R = 2\pi f_{re} L_R$$

como $f_{re} = sf_{se}$, substituindo temos

$$\begin{aligned} X_R &= 2\pi s f_{se} L_R \\ &= s(2\pi f_{se} L_R) \\ &= sX_{R0} \end{aligned} \quad (11)$$

em que X_{R0} é a reatância do rotor bloqueada. O circuito do rotor está representado na Figura 12. A corrente do rotor é encontrada através da Equação 13 a seguir, que também varia com escorregamento.

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R}$$

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jsX_{R0}} \quad (12)$$

Ou

$$I_R = \frac{E_R}{R_R/s + jX_{R0}} \quad (13)$$

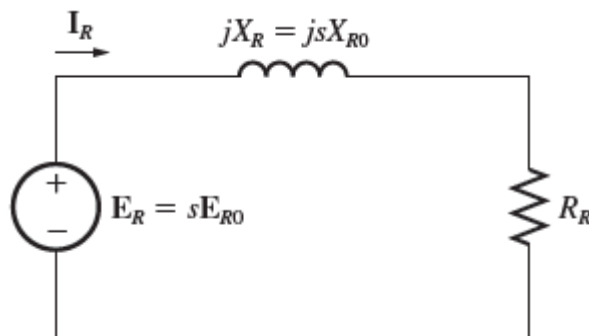


Figura 12-O circuito do rotor de uma máquina assíncrona.

Na Equação (13), observando os efeitos que ocorrem no rotor devidos a um valor de escorregamento qualquer, causando *impedância variável* alimentada por uma tensão constante E_{R0} . Por este ponto, a impedância equivalente do rotor é

$$Z_{Req} = \frac{R_R}{s} + jX_{R0} \quad (14)$$

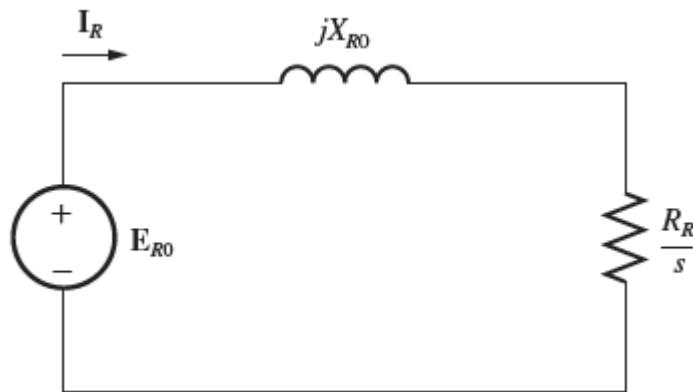


Figura 13- O circuito do rotor com todos os efeitos do escorregamento concentrados na resistência R_R .

O circuito equivalente do rotor está representado na Figura 13. Nesse circuito, a tensão do rotor é um valor constante de E_{R0} volts e a impedância do rotor $Z_{R,eq}$ inclui todos os efeitos devido a um escorregamento variável do rotor.

3.2.2 O circuito equivalente final

O circuito final por fase de uma máquina assíncrona, de modo que a parte do rotor no modelo seja referida ao lado do estator, os sinais de linha (') indicam os valores referidos de tensão, corrente e impedância. Se a relação de espiras efetiva de uma máquina assíncrona for a_{ef} , a tensão de rotor transformada torna-se

$$E_R = E'_R = a_{ef} E_{R0} \quad (18)$$

e a corrente do rotor torna-se

$$I_2 = I_R / a_{ef} \quad (19)$$

temos que a impedância do rotor se torna

$$Z_2 = a_{ef}^2 \left(\frac{R_R}{s} + jX_{R0} \right) \quad (20)$$

Adotando as definições a seguir

$$R_2 = a_{ef}^2 R_R \quad (21)$$

$$X_2 = a_{ef}^2 X_{R0} \quad (22)$$

O circuito final por fase da máquina assíncrona na Figura 14.

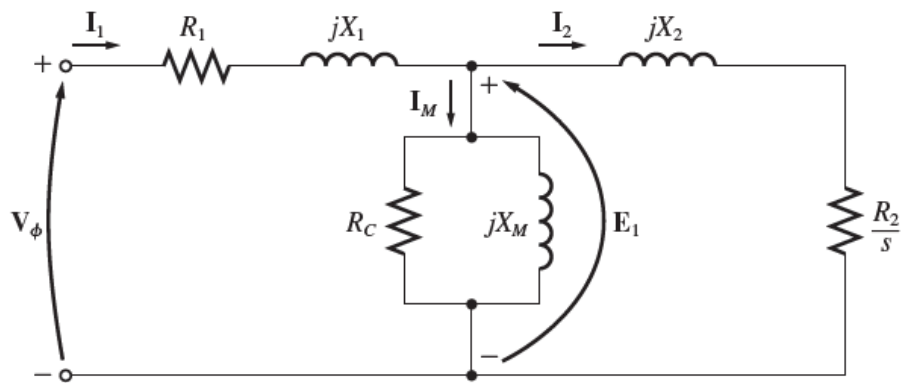


Figura 14- O circuito equivalente por fase de uma máquina assíncrona.

3.3 Potência e torque em máquinas assíncronas

A potência em máquinas assíncronas sofre diversas perdas no estator e no rotor até que esta potência seja convertida em potência mecânica ou torque, algumas destas perdas que mostram um efeito maior no resultado de saída de torque final serão tratadas a seguir. Neste projeto não serão analisadas as perdas de núcleo, pois para o motor de estudo na tração estas perdas não são perdas de grande impacto, por se tratar de um motor de baixa potência.

3.3.1 Perdas de fluxo de potência

Uma máquina assíncrona pode ser comparada com um transformador rotativo, pois o circuito magnético do rotor é desconectado e ligado em um eixo girante que possui uma parte de entreferro. Para este projeto sua entrada é um sistema trifásico de tensões e correntes. Em uma máquina assíncrona comum, os condutores do secundário (armadura) estão em curto-

circuito, provocando uma reação o rotor e uma saída mecânica. Os detalhes de potência elétrica de entrada sendo convertida em potência mecânica esta detalhada na Figura 15.

Na entrada de uma máquina assíncrona (P_{entrada}) a potência é na forma de tensões e correntes trifásicas ou seja potência elétrica. As primeiras perdas encontradas na máquina são perdas I^2R nos condutores de cobre do estator (P_{PCE}). Outra quantidade de potência é perdida como histerese e corrente parasita no estator ($P_{\text{núcleo}}$). O fluxo de potência restante é transferido o rotor da máquina através do entreferro do circuito magnético entre o estator e o rotor denominada potência de entreferro (P_{EF}) da máquina. Após a potência ser transferida o rotor, uma parte dela é perdida nos condutores de cobre como perdas I^2R (P_{PCR}) e o restante é convertido da forma elétrica para a forma mecânica (P_{conv}). No rotor, as perdas por atrito e ventilação P_{AeV} e as perdas suplementares $P_{\text{suplem.}}$ são subtraídas. A potência mecânica restante é a saída da máquina $P_{\text{saída}}$.

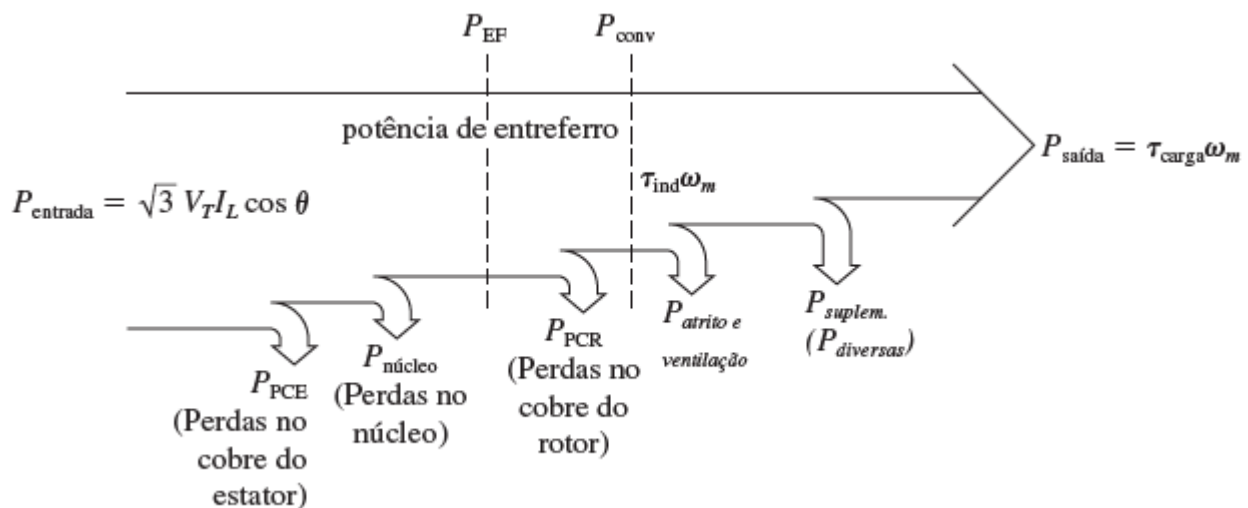


Figura 15- O diagrama do fluxo de potência de uma máquina assíncrona.

As perdas no núcleo do rotor são muito pequenas em comparação com as do estator por este fato e pela dificuldade de representa-las no circuito, normalmente são desprezadas. Essas perdas são representadas no circuito equivalente da máquina assíncrona pelo resistor R_c (ou condutância G_c).

Quanto maior a velocidade de uma máquina assíncrona, maiores serão as perdas por atrito, ventilação e suplementares. e, quanto maior for a velocidade da máquina (até nsinc), menores serão suas perdas no núcleo. As perdas rotacionais totais de um motor são frequentemente consideradas constantes com a velocidade variável, porque as diversas perdas variam em sentidos opostos com mudança de velocidade.

3.3.2 Potência e torque em uma máquina assíncrona

A corrente de entrada de uma fase da máquina pode ser obtida dividindo a tensão de entrada pela impedância equivalente total:

$$I_1 = \frac{V_\phi}{Z_{eq}} \quad (23)$$

A impedância equivalente:

$$Z_{eq} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{G_C - jB_M + \frac{1}{\frac{V_2}{s} + jX_2}} \quad (24)$$

As perdas no cobre do estator nas três fases são dadas por

$$P_{PCE} = 3I_1^2 R_1 \quad (25)$$

As perdas no núcleo são dadas por

$$P_{núcleo} = 3E_1^2 G_C \quad (26)$$

A potência de entreferro transferida para o rotor pode ser deduzida pela subtração das perdas na potência de entrada

$$P_{EF} = P_{entrada} - P_{PCE} - P_{núcleo} \quad (27)$$

O elemento do circuito equivalente em que a potência de entreferro pode ser consumida é no resistor R_2/s . Enfim, a *potência de entreferro* que chega até o rotor está a seguir

$$P_{EF} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (28)$$

As perdas resistivas do circuito do rotor são

$$P_{PCR} = 3I_R^2 R_R \quad (29)$$

Ou como a corrente esta referida no primário temos

$$P_{PCR} = 3I_2^2 R_2 \quad (30)$$

As perdas nos condutores de cobre do estator, no núcleo e nos condutores de cobre do rotor são subtraídas da potência de entrada da máquina, a potência restante é convertida em potência mecânica. Essa potência convertida, é dada por

$$\begin{aligned} P_{conv} &= P_{EF} - P_{PCR} \\ &= 3I_2^2 \frac{R_2}{s} - 3I_2^2 R_2 \\ &= 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \\ P_{conv} &= 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \end{aligned} \quad (31)$$

As perdas no cobre do estator são iguais à potência de entreferro vezes o escorregamento

$$P_{PCR} = sP_{EF} \quad (32)$$

Como $P_{conv} = P_{EF} - P_{PCR}$, isso também fornece outra relação entre a potência de entreferro e a potência convertida da forma elétrica em mecânica:

$$\begin{aligned} P_{conv} &= P_{EF} - P_{PCR} \\ &= P_{EF} - sP_{EF} \\ P_{conv} &= (1-s)P_{AG} \end{aligned} \quad (33)$$

Finalmente, se as perdas por atrito e ventilação e as perdas suplementares forem conhecidas, a potência de saída poderá ser obtida por

$$P_{saída} = P_{conv} - P_{AeV} - P_{suplemntar} \quad (34)$$

O *torque induzido* τ_{ind} de uma máquina foi definido como o torque gerado pela conversão interna de potência elétrica em mecânica, é dado pela equação

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \quad (35)$$

O torque induzido de uma máquina assíncrona também pode ser expresso de forma diferente. A Equação (7) fornece a velocidade real em termos de escorregamento, ao passo que a Equação (33) expressa P_{conv} em termos de P_{EF} e escorregamento. Substituindo as duas equações na Equação (35), temos

$$\tau_{ind} = \frac{(1-s)P_{EF}}{(1-s)\omega_{sinc}}$$

$$\tau_{ind} = \frac{P_{EF}}{\omega_{sinc}} \quad (36)$$

Expressando o torque induzido diretamente em termos de potência de entreferro e *velocidade síncrona*, que não varia. Portanto, o conhecimento de P_{EF} fornece diretamente τ_{ind} .

3.3.3 Separação entre as perdas no cobre do rotor e a potência convertida, no circuito equivalente do MIT

Parte da potência que flui no entreferro de uma máquina assíncrona é consumida como perdas no cobre do rotor e outra parte é convertida em potência mecânica para acionar o eixo da máquina. A potência de entreferro é a potência que seria consumida em um resistor de valor R_2/s , enquanto as perdas no cobre do rotor são expressas pela potência que seria consumida em um resistor de valor R_2 . A diferença entre elas é P_{conv} , consumida pelo resistor abaixo

$$R_{conv} = \frac{R_2}{s} - R_2 = R_2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right)$$

$$R_{conv} = R_2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \quad (37)$$

A Figura 16 mostra o circuito equivalente por fase, na forma de elementos distintos de circuito, as perdas no cobre do rotor e a potência convertida para a forma mecânica.

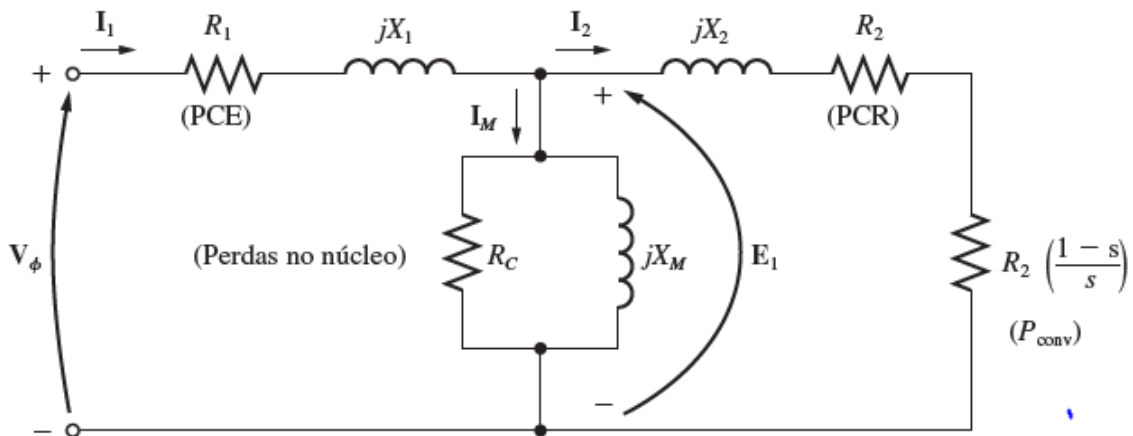


Figura 16- O circuito equivalente por fase, com as perdas do rotor e a $P_{núcleo}$ separadas.

3.4 Características de torque versus velocidade da máquina assíncrona

A relação entre o torque e a velocidade será inicialmente examinada do ponto de vista físico do comportamento do campo magnético da máquina. Em seguida, uma equação genérica será deduzida para o torque em função do escorregamento, a partir do circuito equivalente da máquina (Figura 17).

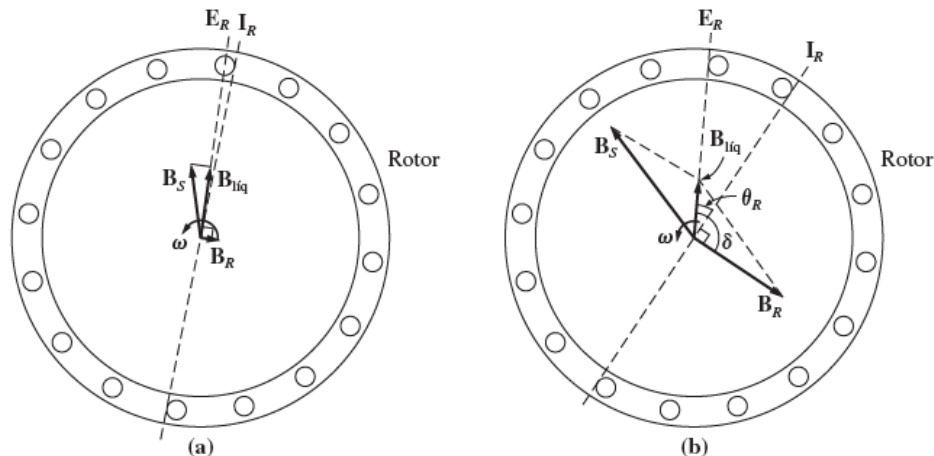


Figura 17- (a) Os campos magnéticos de uma máquina assíncrona sob condições de carga leve.
(b) Os campos magnéticos de uma máquina assíncrona sob condições de carga pesada.

3.4.1 Dedução da equação do torque induzido de um MIT

Usando o circuito equivalente de uma máquina assíncrona, para desenvolver uma expressão genérica do torque induzido em função da velocidade. O torque induzido em uma máquina assíncrona é dado pelas Equações (35) ou (36):

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \quad (35)$$

$$\tau_{ind} = \frac{P_{EF}}{\omega_{sinc}} \quad (36)$$

Como ω_{sinc} é constante, conhecendo-se a potência de entreferro, pode-se obter o torque induzido da máquina. Ela é igual à potência absorvida na resistência R_2/s .

$$P_{EF1\phi} = I_2^2 \frac{R_2}{s}$$

Portanto, a potência de entreferro total é

$$P_{EF3\phi} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s}$$

Se I_2 puder ser determinada, então a potência de entreferro e o torque induzido serão conhecidos. A Figura 19 determina o equivalente Thévenin da parte do circuito que está à esquerda das cruzes (X) desenhadas na figura. O teorema de Thévenin afirma que qualquer circuito linear pode ser separado por dois terminais do resto do sistema e pode ser substituído por uma única fonte de tensão em série com impedância equivalente. Aplicando Thévenin com o circuito equivalente da máquina assíncrona, o circuito resultante seria uma combinação simples de elementos em série, conforme mostra a Figura 19c.

Para calcular o equivalente de Thévenin do lado de entrada do circuito equivalente da máquina assíncrona, primeiro abra o circuito nos pontos terminais indicados por cruzes (x) e encontre a tensão resultante de circuito aberto nesse ponto. A seguir, para encontrar a impedância de Thévenin, coloque em curto-circuito a tensão de fase e encontre a Z_{eq} que pode ser obtida observando para dentro dos terminais.

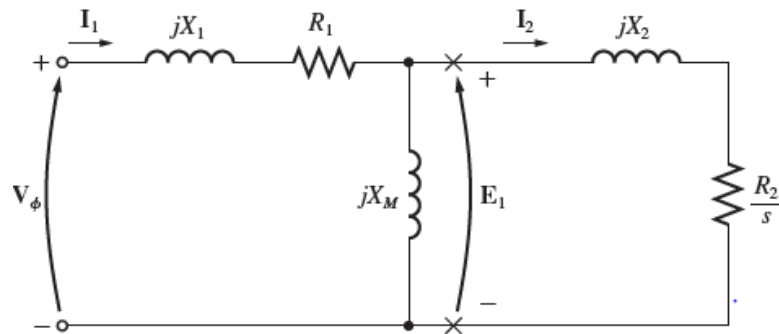


Figura 18-O circuito equivalente por fase de uma máquina assíncrona.

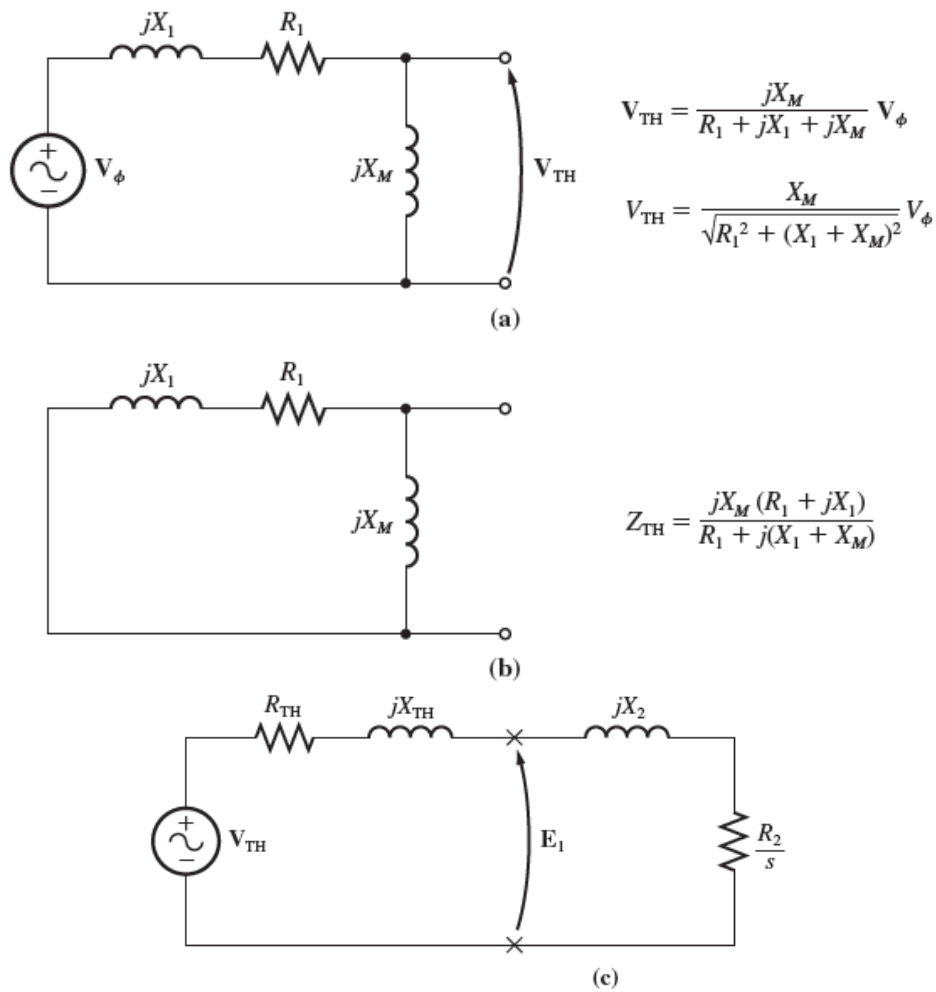


Figura 19- a) A tensão equivalente de Thévenin do circuito de entrada de uma máquina assíncrona. (b) A impedância equivalente de Thévenin do circuito de entrada. (c) O circuito equivalente simplificado resultante da máquina assíncrona.

Pela regra do divisor de tensão, temos

$$V_{TH} = V_\phi \frac{Z_M}{Z_M + Z_1}$$

$$V_{TH} = V_{\phi} \frac{jX_M}{R_1 + jX_1 + jX_M}$$

O valor da tensão de Thévenin V_{TH} é

$$V_{TH} = V_{\phi} \frac{jX_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} \quad (41a)$$

Como a reatância de magnetização $X_M \gg X_1$ e $X_M \gg R_1$, o valor da tensão de Thévenin é aproximadamente real.

$$V_{TH} \approx V_{\phi} \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right) \quad (41b)$$

A Figura 19b mostra o circuito de entrada com a fonte de tensão de entrada curto circuitada. As duas impedâncias estão em paralelo e a impedância de Thévenin é dada por

$$Z_{TH} = \frac{Z_1 Z_M}{Z_1 + Z_M} \quad (42)$$

Essa impedância reduz-se a

$$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH} = \frac{jX_M(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)} \quad (43)$$

Como $X_M \gg X_1$ e $X_M \gg R_1$, a resistência e reatância de Thévenin são dadas aproximadamente por

$$R_{TH} \approx R_1 \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2 \quad (44)$$

$$X_{TH} \approx X_1 \quad (45)$$

O circuito equivalente resultante está mostrado na Figura 19c. Deste circuito, pode-se obter a corrente I_2 como

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + Z_2} \quad (46)$$

$$= \frac{V_{TH}}{R_{TH} + \frac{R_2}{s} + jX_{TH} + jX_2} \quad (47)$$

O valor dessa corrente é

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{\sqrt{\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (48)$$

A potência de entreferro é dada, portanto, por

$$\begin{aligned} P_{EF} &= 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \\ &= \frac{3V_{TH}^2 R_2/s}{\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \end{aligned} \quad (49)$$

e o torque induzido de rotor é dado por

$$\tau_{ind} = \frac{P_{EF}}{\omega_{sinc}} \quad (36)$$

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 R_2/s}{\omega_{sinc} \left[\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \quad (50)$$

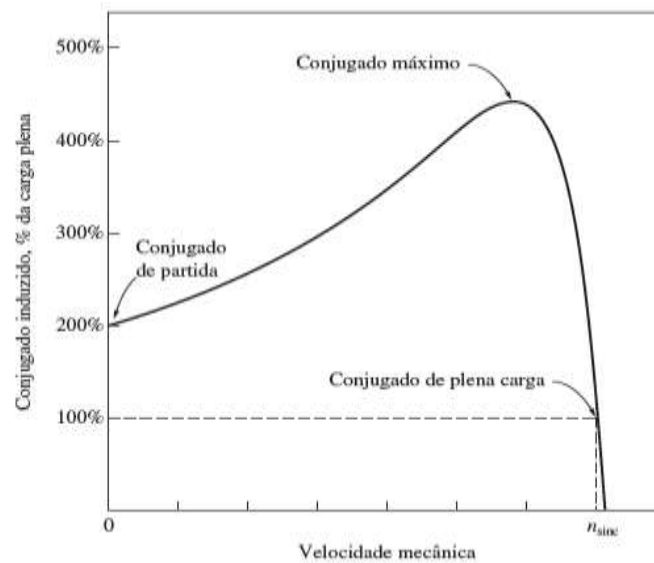


Figura 20- Uma curva característica de torque *versus* velocidade de uma máquina assíncrona gaiola de esquilo.

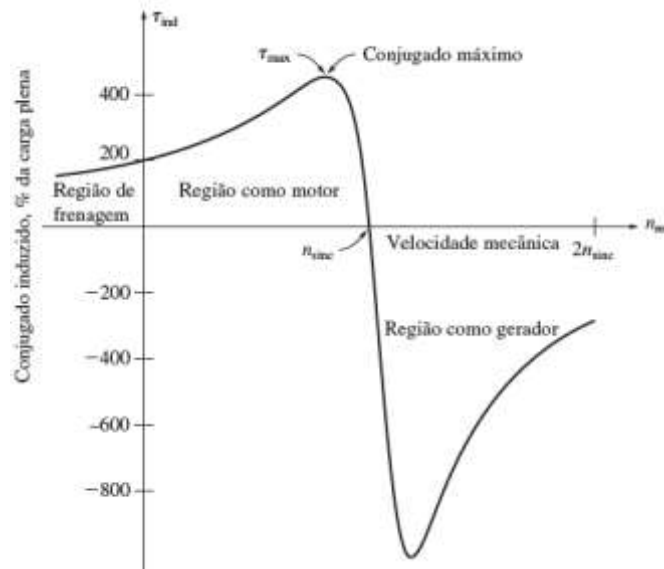


Figura 21- Uma curva característica de torque *versus* velocidade de uma máquina assíncrona, mostrando as faixas estendidas de operação (região de frenagem e região como gerador).

A Figura 20 mostra um gráfico do torque de uma máquina assíncrona em função da velocidade e a Figura 21 mostra um gráfico com as velocidades acima e abaixo da faixa normal de funcionamento da máquina. A potência convertida para a forma mecânica em uma máquina assíncrona é igual a

$$P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m$$

Na Figura 22. Observe que a potência de pico fornecida pelo motor de indução ocorre em uma velocidade diferente da de torque máximo isto ocorre porque a frequência da potência elétrica é maior do que a frequência da velocidade mecânica no eixo.

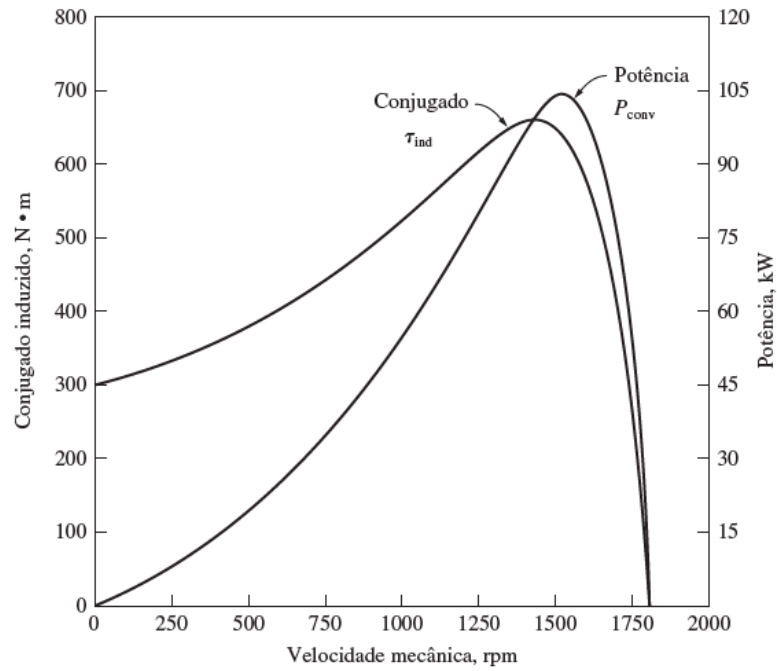


Figura 22- Torque induzido e potência convertida *versus* velocidade da máquina em rotações por minuto para uma máquina assíncrona de quatro polos.

3.4.2 Torque máximo da máquina assíncrona

Como o torque induzido é igual a P_{EF} / ω_{sinc} , o torque máximo possível ocorre quando a potência de entreferro é máxima. Como a potência de entreferro é igual à potência consumida no resistor R_2/s , o torque máximo induzido ocorrerá quando a potência consumida por esse resistor for máxima. Em uma situação na qual o ângulo da impedância de carga é fixo, a transferência máxima de potência para o resistor de carga R_2/s ocorrerá quando o valor da impedância for igual ao valor da impedância da fonte. [18]

$$Z_{fonte} = R_{TH} + jX_{TH} + jX_2 \quad (51)$$

A transferência máxima de potência ocorre quando

$$\frac{R_2}{s} = \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad (52)$$

Isolando o escorregamento na Equação (52), vemos que o *escorregamento de torque máximo é dado por*

$$s_{m\acute{a}x} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (53)$$

Observe que a resistência de rotor referida R_2 aparece apenas no numerador. Assim, o escorregamento do rotor no torque máximo é diretamente proporcional à resistência do rotor. O valor do torque máximo pode ser encontrado inserindo a expressão para o escorregamento de torque máximo na equação de torque [Equação (50)].

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{TH}^2}{2\omega_{sinc} \left[R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \right]} \quad (54)$$

Quanto menores forem as reatâncias de uma máquina, maior será o torque máximo que ela é capaz de alcançar. Observe que o *escorregamento* para o qual ocorre o torque máximo é diretamente proporcional à resistência do rotor [Equação (53)], mas o *valor* do torque máximo independe do valor dessa resistência [Equação (54)].

A característica de torque *versus* velocidade de uma máquina assíncrona de rotor bobinado está mostrada na Figura 23. Quando a resistência do rotor é aumentada, a velocidade do torque máximo do rotor diminui, mas o torque máximo permanece constante.

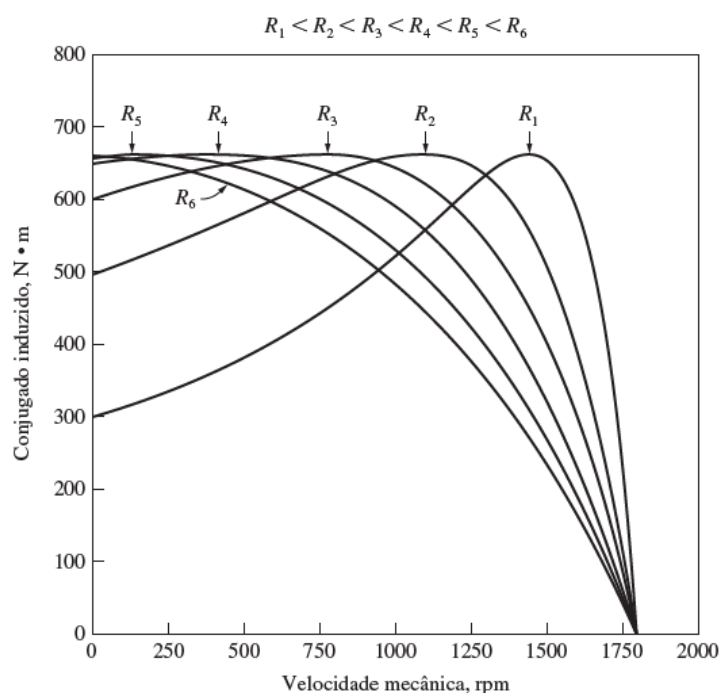


Figura 23-O efeito da variação de resistência do rotor sobre a característica de torque *versus* velocidade de uma máquina assíncrona de rotor bobinado.

3.5 Variações nas características de torque versus velocidade da máquina assíncrona

Como $P_{conv} = (1 - s) P_{EF}$, de modo que quanto maior o escorregamento, menor será a fração da potência de entreferro que será realmente convertida para a forma mecânica e, portanto, menor será a eficiência da máquina à medida que aumenta a rotação. Um motor com resistência de rotor elevada tem bom torque de partida, mas sua eficiência é ruim à medida que aumenta a rotação da máquina. Por outro lado, um motor com resistência de rotor baixa tem torque de partida baixo e corrente de partida elevada, mas sua eficiência é bem elevada em condições normais de funcionamento.

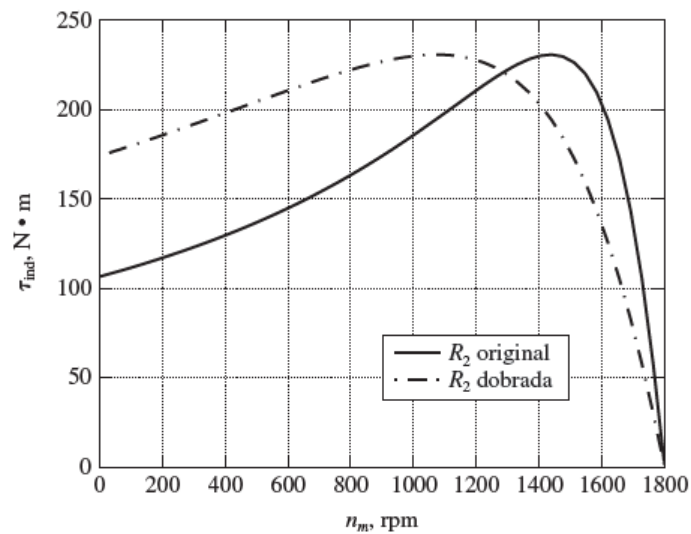


Figura 24- Características de torque *versus* velocidade para o motor de rotor bobinado mudando a resistência de rotor.

A Figura 25 ilustra a característica que se deseja da máquina. Ela mostra duas características de rotor bobinado, uma com resistência elevada e uma com resistência baixa. Com escorregamentos elevados, o motor desejado deveria se comportar como na curva da máquina de rotor bobinado de resistência elevada. Com escorregamentos baixos, ele deveria se comportar como na curva da máquina de rotor bobinado de resistência baixa.

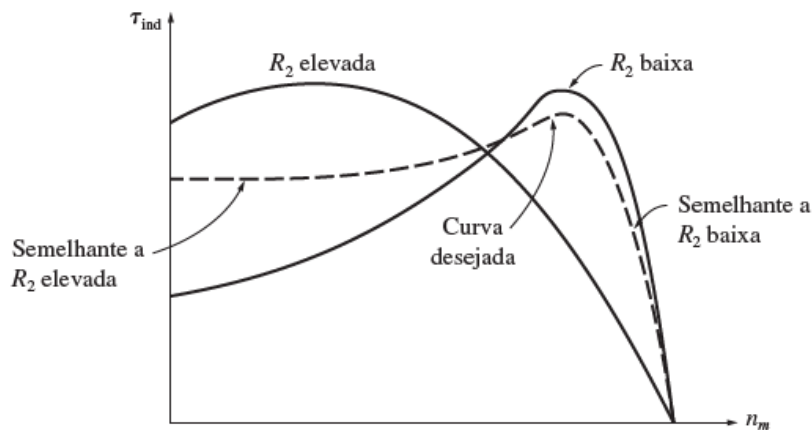


Figura 25- Uma curva característica de torque *versus* velocidade que combina efeitos de resistência elevada em baixas velocidades (escorregamento elevado) com efeitos de resistência baixa em altas velocidades (escorregamento baixo).

3.5.1 Classes de projeto de motor de indução

É possível produzir uma grande variedade de curvas de torque *versus* velocidade variando as características das armaduras das máquinas assíncronas. Para auxiliar a indústria a selecionar motores para diversas aplicações na faixa de potência elevada, a NEMA nos Estados Unidos e a Internacional Electrotechnical Commission (IEC) na Europa definiram uma série de classes padronizadas de projeto com diversas curvas de torque *versus* velocidade. Esses projetos

padronizados são denominados *classes de projeto* e um motor individual pode ser referido como um motor da classe X de projeto. A Figura 26 mostra curvas típicas de torque *versus* velocidade para as quatro classes padronizadas de projeto NEMA.

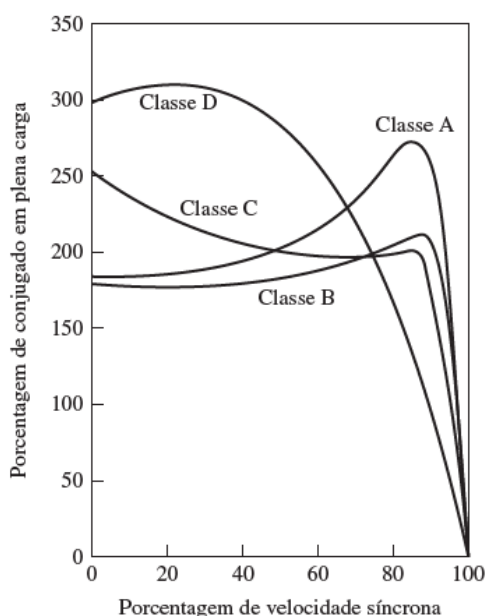


Figura 26- Curvas típicas de torque *versus* velocidade para diversas classes de rotores.

CLASSE DE PROJETO A. Torque de partida normal, corrente de partida normal

CLASSE DE PROJETO B. Torque de partida normal, corrente de partida baixa

CLASSE DE PROJETO C. Torque de partida elevado, corrente de partida baixa

CLASSE DE PROJETO D. Torque de partida elevado, escorregamento elevado

4 CAPÍTULO 4- ACIONAMENTO E ENSAIOS DO MIT

4.1 Acionamento de estado sólido para motores de indução

A desvantagem de acionamento para controle da variação de velocidade de antigamente era a necessidade de gerador dedicado ou de um conversor mecânico de frequência. Entretanto, a alteração da frequência de linha por meio de acionamentos de estado sólido (inversor de frequência) tornou-se o método preferido para controle de velocidade das máquinas assíncronas. Observe que esse método pode ser usado com qualquer motor de indução, diferentemente da técnica de mudança de polos que requer um motor com enrolamentos de estator especiais.

A Figura 27 mostra um inversor de frequência que será utilizado no projeto. O acionamento é muito flexível: sua entrada pode ser monofásica ou trifásica, 50 ou 60 Hz e para

qualquer valor de tensão entre 208 a 380 V. A saída desse acionamento é um conjunto trifásico de tensões cuja frequência pode ser variada de 0 a 120 Hz e cuja tensão pode ser variada desde 0 V até a tensão nominal do motor. O controle da tensão e da frequência de saída é obtido usando técnicas de modulação de largura de pulso (PWM – *Pulse Width Modulation*). Tanto a frequência de saída como a tensão de saída pode ser controlada independentemente por modulação de largura de pulso.

A Figura 30 ilustra o modo pelo qual o acionamento PWM pode controlar a frequência de saída, mantendo constante um valor de tensão eficaz, mantendo uma frequência constante.



Figura 27- Inversor de frequência cfw 500.

A frequência de saída do acionamento pode ser controlada manualmente a partir de um controle montado no gabinete do acionamento, ou então pode ser controlada remotamente por um sinal externo de tensão ou corrente isto permite que um computador ou um controlador de processo externo possa controlar a velocidade do motor de acordo com as necessidades da planta em que ele está instalado.

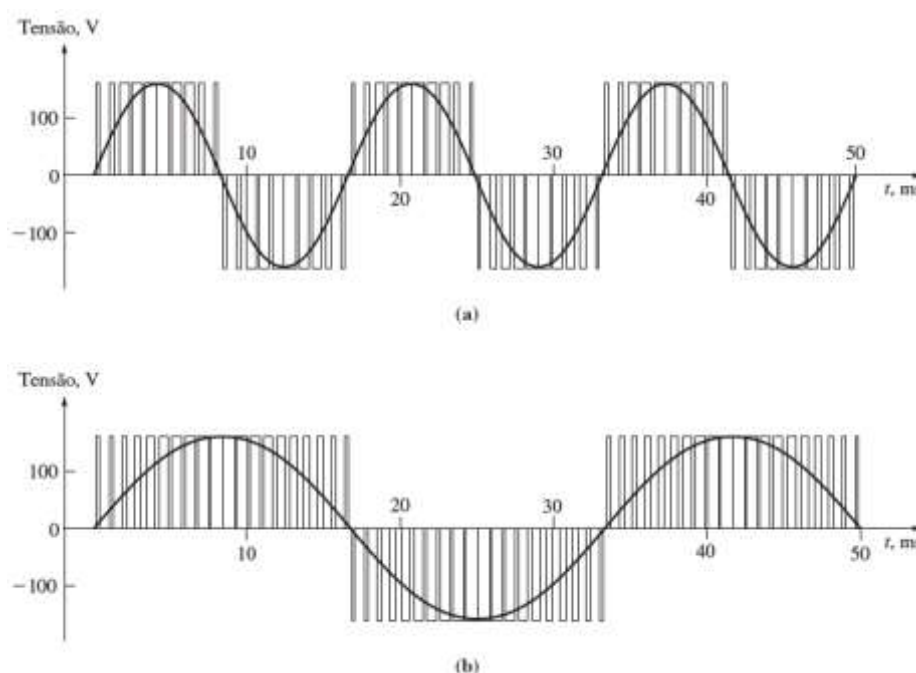


Figura 28-Controle de frequência variável com formas de onda PWM típicas: (a) forma de onda PWM de 60 Hz e 120V (b) forma de onda PWM de 30 Hz e 120 V.

É desejável variar em conjunto e linearmente a frequência e a tensão eficaz de saída. A Figura 28 mostra formas de onda típicas da tensão de saída de uma das fases do acionamento, para o caso em que a frequência e a tensão são variadas simultaneamente de forma linear. A frequência é controlada pela taxa em que a polaridade dos pulsos é chaveada de positiva para negativa e novamente para positiva. O nível da tensão eficaz é controlado pela fração de tempo durante a qual a tensão está ligada.

4.1.1 Uma seleção de padrões de tensão versus frequência

Os tipos de cargas mecânicas que podem ser acopladas a uma máquina assíncrona variam grandemente. Algumas cargas, como as de ventiladores, requerem um torque muito baixo na partida (ou quando estão funcionando com velocidades baixas) e têm torques que crescem com o quadrado da velocidade. Outras cargas podem ser de partida mais difícil, exigindo um torque maior do que o torque nominal de plena carga da máquina, somente para colocar a carga em movimento. Este acionamento oferece uma série de padrões de tensão versus frequência que podem ser selecionados para adequar o torque aplicado pelo motor ao torque requerido pela sua carga. Três desses padrões estão mostrados nas Figuras 28 a 29.

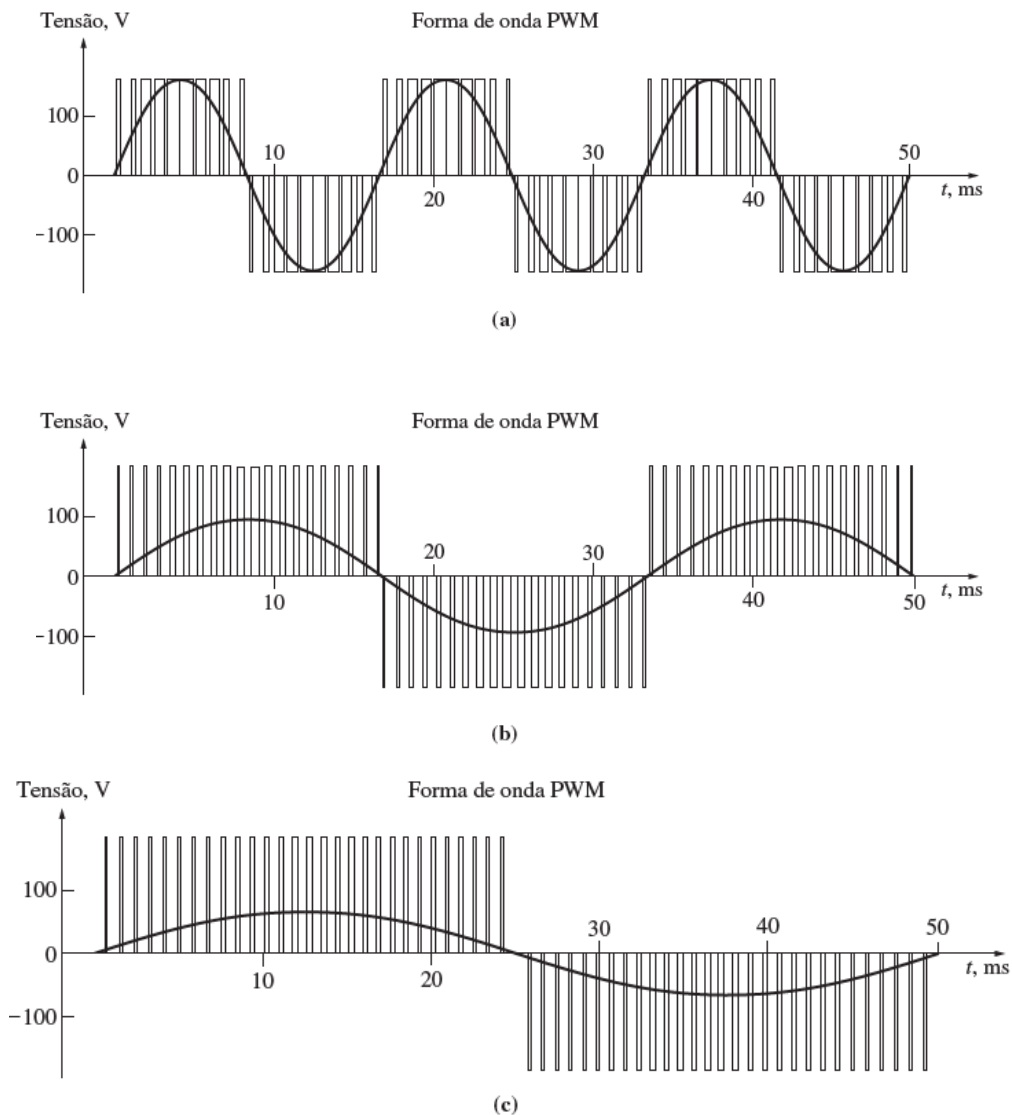


Figura 29- Controle simultâneo de tensão e frequência com uma forma de onda PWM: (a) forma de onda PWM de 60 Hz e 120 V; (b) forma de onda PWM de 30 Hz e 60 V; (c) forma de onda PWM de 20 Hz e 40 V.

A Figura 29a mostra a tensão de saída ajustada para uma frequência de 60 Hz e uma tensão eficaz de 120 V. A Figura 29b mostra a saída ajustada para uma frequência de 30 Hz e uma tensão eficaz de 60 V e a Figura 29c mostra a saída ajustada para uma frequência de 20 Hz e uma tensão eficaz de 40 V. Observe que a tensão de pico de saída do acionamento permanece a mesma em todos os casos.

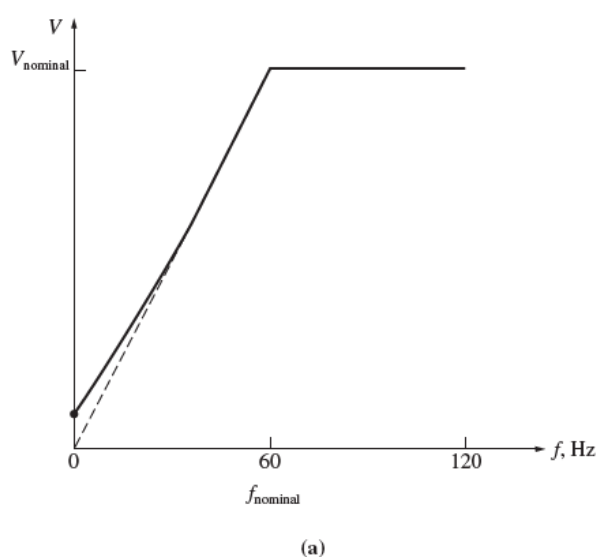


Figura 30- (a) Padrões possíveis de tensão versus frequência para o acionamento de frequência variável de estado sólido para motor de indução: padrão de torque elevado de partida.

A Figura 30a mostra o padrão de tensão versus frequência usado para cargas com torques de partida elevados. Para velocidades inferiores à velocidade base, esse padrão também altera a tensão de saída linearmente com as mudanças na frequência de saída. Entretanto, para frequências abaixo de 30 Hz, a inclinação torna-se menos acentuada. Para qualquer frequência dada abaixo de 30 Hz, a tensão de saída será superior à tensão que seria fornecida com o padrão anterior. Essa tensão mais elevada produzirá um torque maior, mas à custa de uma saturação magnética aumentada e correntes de magnetização maiores. Frequentemente, a saturação aumentada e as correntes maiores podem ser toleradas por períodos curtos necessários para dar partida às cargas pesadas.

4.2 Determinação dos parâmetros do modelo de circuito

O circuito equivalente de uma máquina assíncrona é uma ferramenta utilizada para determinar a resposta da máquina às mudanças de carga. Entretanto, se o modelo é para ser usado com uma máquina real, será necessário determinar quais são os valores dos elementos de circuito que participarão do modelo R_1 , R_2 , X_1 , X_2 e X_M .

Os ensaios devem ser executados sob condições precisamente controladas, porque as resistências variam com a temperatura e a resistência do rotor também varia com a frequência do rotor. Os detalhes exatos de como cada ensaio de motor de indução deve ser realizado para se obter resultados acurados são descritos pela Norma 112 da IEEE.

4.2.1 O ensaio sem carga ou a vazio

O ensaio a vazio (ou sem carga) de uma máquina assíncrona mede as perdas rotacionais da máquina e fornece informação sobre sua corrente de magnetização. O circuito de teste para esse ensaio está mostrado na Figura 31a. Wattímetros, um voltímetro e três amperímetros são conectados a uma máquina assíncrona, que é deixado livre para girar. As perdas por atrito e ventilação são a única carga da máquina. Desse modo, toda a P_{conv} desse motor é consumida por perdas mecânicas e o escorregamento da máquina é muito pequeno (possivelmente tão baixo quanto 0,001 ou menos). O circuito equivalente desse motor está mostrado na Figura 31b. Com seu escorregamento muito pequeno, a resistência correspondente à potência convertida, $R_2(1 - s)/s$, é muitíssimo maior do que a resistência R_2 correspondente às perdas no cobre do rotor e muito maior do que a reatância X_2 do rotor. Nesse caso, o circuito equivalente reduz-se aproximadamente ao último circuito da Figura 32b, no qual o resistor de saída está em paralelo com a reatância de magnetização X_M e as perdas no núcleo R_C .

Nesse motor em condições a vazio, a potência de entrada medida pelos instrumentos deve ser igual às perdas da máquina. As perdas no cobre do rotor são desprezíveis porque a corrente I_2 é extremamente pequena [devido à elevada resistência de carga $R_2(1 - s)/s$]. Portanto, elas podem ser ignoradas. As perdas no cobre do estator são dadas por

$$P_{PCE} = 3I_1^2 R_1 \quad (25)$$

Assim, a potência de entrada deve ser igual a

$$P_{entrada} = P_{PCE} + P_{núcleo} + P_{AeV} + P_{diversas} \quad (58)$$

$$P_{entrada} = 3I_1^2 R_1 + P_{rot}$$

em que P_{rot} são as perdas rotacionais da máquina:

$$P_{rot} = P_{núcleo} + P_{AeV} + P_{diversas} \quad (59)$$

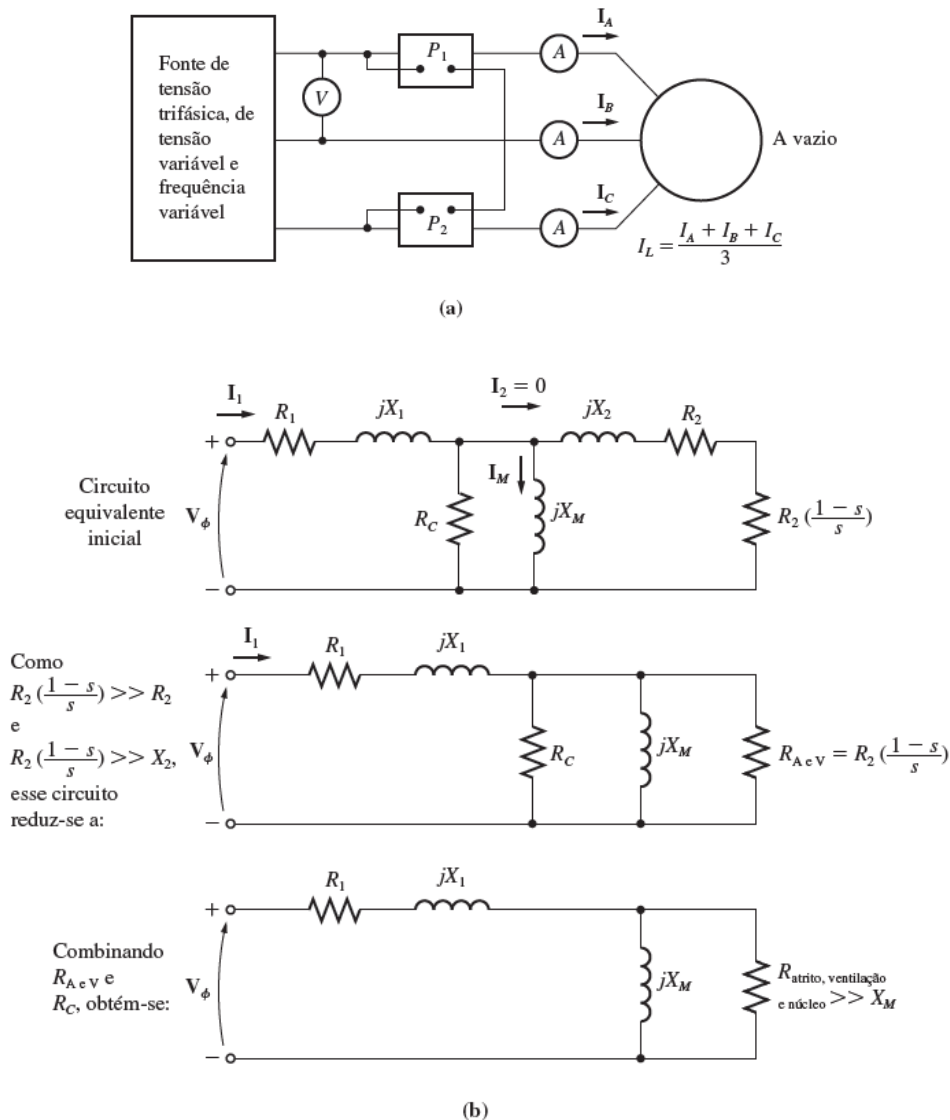


Figura 31- O ensaio a vazio de uma máquina assíncrona: (a) circuito de teste; (b) circuito equivalente resultante da máquina. Observe que, a vazio, a impedância da máquina é basicamente a combinação em série de R_1 , jX_1 e jX_M .

Portanto, conhecendo-se a potência de entrada da máquina, as perdas rotacionais da máquina podem ser determinadas.

O circuito equivalente que descreve o funcionamento da máquina nessas condições contém os resistores R_c e $R_2(1-s)/s$ em paralelo com a reatância de magnetização X_M . Em uma máquina assíncrona, a corrente necessária para estabelecer um campo magnético é bem elevada, devido à alta relutância de seu entreferro. Desse modo, a reatância X_M será muito menor do que as resistências em paralelo com ela e o fator de potência geral de entrada será muito baixo. Com a elevada corrente em atraso, a maior parte da queda de tensão será sobre os componentes indutivos do circuito. A impedância de entrada equivalente é aproximadamente

$$|Z_{eq}| = \frac{V_\phi}{I_{1,vz}} \approx X_1 + X_M \quad (60)$$

e, se X_1 puder ser obtida de algum outro modo, a impedância de magnetização da máquina será conhecida.

4.2.2 O ensaio CC para a resistência de estator

O circuito básico para o ensaio CC está ilustrado na Figura 33. Essa figura mostra uma fonte de tensão CC conectada a dois dos três terminais de uma máquina assíncrona ligado em Y. Para realizar o ensaio, a corrente nos enrolamentos do estator é ajustada para o valor nominal e, em seguida, a tensão entre os terminais é medida. A corrente nos enrolamentos do estator é ajustada para o valor nominal como uma tentativa de aquecer os enrolamentos com a mesma temperatura que eles teriam durante o funcionamento normal (lembre-se de que a resistência de enrolamento é uma função de temperatura).

A corrente na Figura 33 circula através de dois dos enrolamentos, de modo que a resistência total no caminho da corrente é $2R_1$. Portanto,

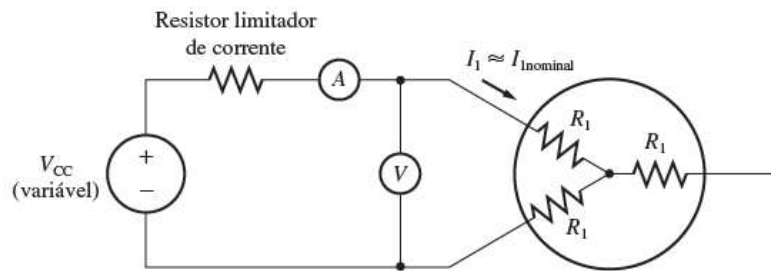


Figura 32- Circuito usado no ensaio CC para resistência.

$$2R_1 = \frac{V_{CC}}{I_{CC}}$$

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{2I_{CC}} \quad (61)$$

Com esse valor de R_1 , as perdas no cobre do estator a vazio podem ser determinadas. As perdas rotacionais podem ser encontradas pela diferença entre a potência de entrada a vazio e as perdas no cobre do estator. O valor de R_1 calculado desse modo não é completamente exato porque ignora o efeito pelicular que ocorre quando uma tensão CA é aplicada aos enrolamentos. Mais detalhes sobre correções de temperatura e efeito pelicular podem ser encontrados na Norma 112 da IEEE.

4.2.3 O ensaio de rotor bloqueado

A resistência, R_2 determina a forma da curva de torque versus velocidade, determinando a velocidade na qual o torque máximo ocorre. Um ensaio padrão denominado ensaio de rotor bloqueado pode ser usado para determinar a resistência total do circuito da máquina. Porém, esse teste encontra apenas a resistência total. Para obter com exatidão a resistência R_2 do rotor, é necessário conhecer R_1 para que ela seja subtraída do total.

O teste que pode ser realizado é denominado ensaio de rotor bloqueado. Esse ensaio corresponde ao ensaio de curto-circuito de um transformador. Nesse ensaio, o rotor é bloqueado ou travado, uma tensão é aplicada ao motor e são medidas a tensão, corrente e potência resultantes.

A Figura 33a mostra as ligações usadas no ensaio de rotor bloqueado. Para executar esse ensaio, uma tensão CA é aplicada ao estator e o fluxo de corrente é ajustado para ser aproximadamente o valor de plena carga. Quando a corrente está em plena carga, a tensão, a corrente e a potência da máquina que estão presentes são medidas.

O circuito equivalente desse ensaio está mostrado na Figura 33b. O rotor não está se movendo, o escorregamento é $s = 1$ e, portanto, a resistência R_2/s é simplesmente igual a R_2 (um valor bem pequeno). Como os valores de R_2 e X_2 são muito baixos, quase toda a corrente de entrada circulará através delas, em vez de fluir através da reatância de magnetização X_M , que é muito maior. Portanto, o circuito nessas condições assemelha-se a uma combinação em série de X_1 , R_1 , X_2 e R_2 .

Entretanto, há um problema com esse ensaio. Uma solução típica é usar uma frequência que é 25% ou menos a frequência nominal. Embora essa solução seja aceitável para rotores de resistência basicamente constante (classes A e D), ela deixa muito a desejar quando se está tentando determinar a resistência normal do rotor para o caso de rotores de resistência variável. Devido a esse e a outros problemas similares, muito cuidado deve ser tomado na realização de medidas nesses ensaios. Depois que a tensão e a frequência do ensaio estiverem ajustadas, a corrente da máquina é ajustada rapidamente até apresentar um valor em torno da corrente nominal.

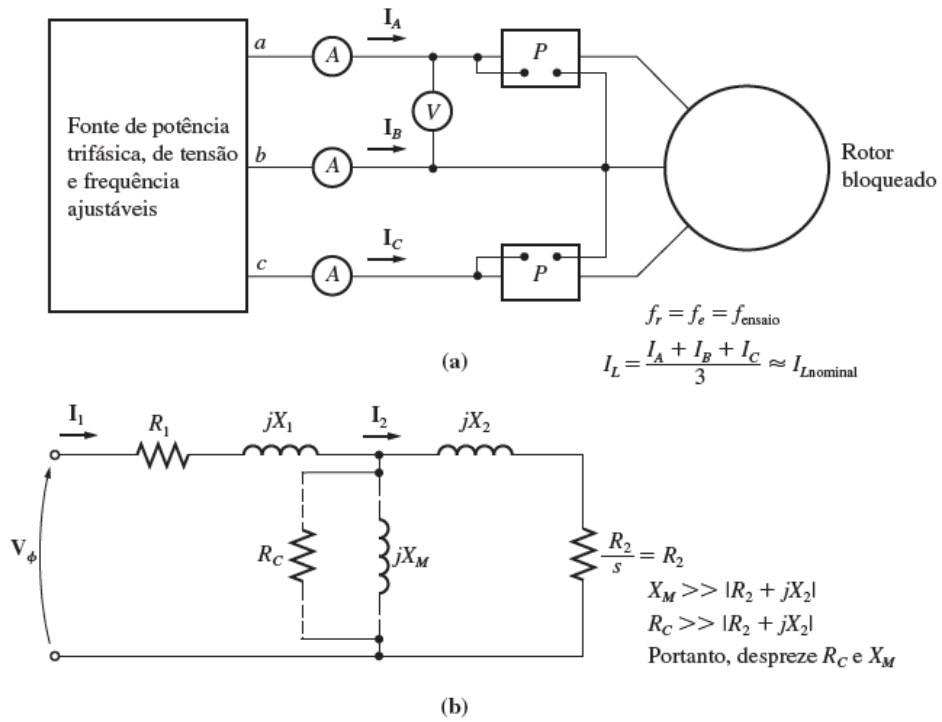


Figura 33- O ensaio de rotor bloqueado para uma máquina assíncrona: (a) circuito de teste; (b) circuito equivalente da máquina.

Em seguida, antes que o rotor possa aquecer demais, a potência, a tensão e a corrente de entrada são medidas. A potência de entrada da máquina é dada por

$$P = \sqrt{3}V_T I_L \cos \theta$$

de modo que o fator de potência do rotor bloqueado pode ser obtido e o ângulo de impedância Θ é igual a $\arccos FP$.

$$FP = \cos \theta = \frac{P_{\text{entrada}}}{\sqrt{3}V_T I_L} \quad (62)$$

O valor da impedância total do circuito da máquina, com o rotor bloqueado (RB), neste momento é

$$|Z_{RB}| = \frac{V_\phi}{I_L} = \frac{V_T}{\sqrt{3}I_L} \quad (63)$$

e o ângulo da impedância total é Θ . Portanto,

$$Z_{RB} = R_{RB} + jX'_{RB}$$

$$= |Z_{RB}| \cos \theta + j |Z_{RB}| \sin \theta \quad (64)$$

	X_1 e X_2 em função de X_{RB}	
Tipo de rotor	X_1	X_2
Rotor bobinado	$0,5 X_{RB}$	$0,5 X_{RB}$
Classe A	$0,5 X_{RB}$	$0,5 X_{RB}$
Classe B	$0,4 X_{RB}$	$0,6 X_{RB}$
Classe C	$0,3 X_{RB}$	$0,7 X_{RB}$
Classe D	$0,5 X_{RB}$	$0,5 X_{RB}$

Figura 34-Regras práticas para dividir a reatância do circuito entre o rotor e o estator.

A Figura 35 resume essa experiência. Na prática normal, não importa realmente de que forma X_{RB} é dividida, porque a reatância aparece como a soma $X_1 + X_2$ em todas as equações de torque

A resistência com o rotor bloqueado R_{RB} é igual a

$$R_{RB} = R_1 + R_2 \quad (65)$$

ao passo que a reatância X'_{RB} com o rotor bloqueado é igual a

$$X'_{RB} = X'_1 + X'_2 \quad (66)$$

em que X'_1 e X'_2 são as reatâncias do estator e do rotor na frequência do ensaio, respectivamente.

A resistência do rotor R_2 pode ser obtida agora de

$$R_2 = R_{RB} - R_1 \quad (67)$$

em que R_1 foi determinada no ensaio CC. A reatância total do rotor referida ao estator também pode ser encontrada. Como a reatância é diretamente proporcional à frequência, a reatância total equivalente, na frequência normal de funcionamento, é dada por

$$X_{RB} = \frac{f_{nominal}}{f_{ensaio}} X'_{RB} = X_1 + X_2 \quad (68)$$

4.3 Ensaios e modelagem matemática do MIT de 3cv:

Para modelagem matemática é necessário um levantamento através de instrumentos de medição, ohmímetro e Analisador de energia AEMC model 8335, com ponteiros devidamente reguladas capazes de medir tensão, corrente e potência.

O MIT rotor gaiola de esquilo simples, representa o motor de tração que será ensaiado, com uma potência de 2200W. Apresenta dois modelos de ligações trifásica com tensões de linha de 220V e 380V. A corrente nominal de 8.18A em 220V ligação delta a qual será utilizada nestes procedimentos.

Para a ligação estrela e 4.74A em 380V ligação estrela, a rotação em regime de 1735 rpm, frequência de 60Hz, fator de serviço de 1.15, corrente de partida de 6,5 vezes a nominal, fator de potência de 0,83, índice de proteção IP55, resistente ao tempo.

Para que fosse possível fazer os ensaios o motor foi ligado em delta através de um variômetro, capaz de regular a tensão trifásica de saída em módulo com uma frequência de 60Hz



Figura 35- Ligação das ponteiros do Analisador de Energia.

4.3.1 Ensaio CC obtenção da resistência de estator R₁:

Primeiramente foram ligados os amperímetros e voltímetros medindo as tensões por fase e correntes por fase ligados em cada uma das três bobinas individualmente, posteriormente através de média encontrar o valor da resistência dividindo o valor da tensão pela corrente, veja tabela 03, para uma melhor análise da resistência também foram medidas as resistências através do ohmímetro, analisando cada fase individualmente, para que o levantamento fosse feito de

maneira mais exata as medições foram feitas com o motor aquecido para fidelizar mais o funcionamento deste. Veja a figura 36



Figura 36- Medição de resistência do estator.

	FASE A	FASE B	FASE C	MÉDIA
TENSÃO [V]	24,2	23,1	24,5	23,93
CORRENTE [A]	8,08	8,02	8,02	8,04

Tabela 03- Ensaio CC

Do ensaio CC, temos:

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} = \frac{24,2V}{(8,08A)} = 2,99\Omega$$

Para uma melhor exatidão no modelo matemático o valor de resistência de rotor será de 2,8Ω.

4.3.2 Ensaio a vazio:

Para este ensaio o motor teve sua ligação em delta que representa a menor tensão com ligação em 220 V, como é uma ligação diferente da disponível no laboratório de 380V, o variavolt foi utilizado nesta etapa de forma que seja regulada a tensão mais próxima da nominal, posteriormente é efetuada a leitura de tensão, corrente e potência ativa, veja as figuras a seguir e a tabela 04.

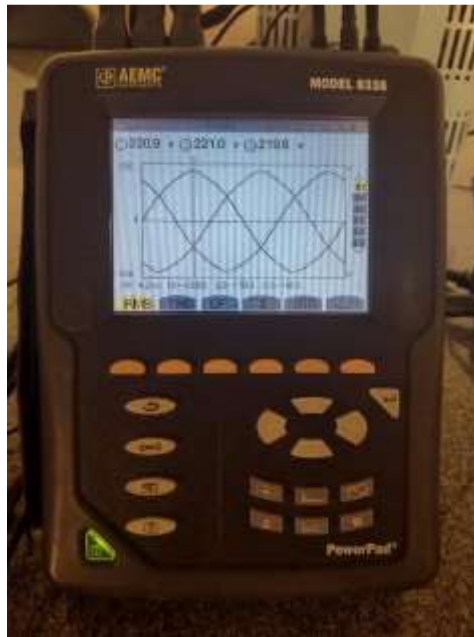


Figura 37- Tensões do ensaio a vazio.



Figura 38- Correntes do ensaio a vazio.



Figura 39- Potência do ensaio a vazio.

	FASE A	FASE B	FASE C	MÉDIA
TENSÃO [V]	220,9	221	219,6	220,50
CORRENTE [A]	3,82	4,16	4,06	4,01
POTÊNCIA [W]	52	54,9	42,4	149,3

Tabela 04- Dados do Ensaio a Vazio.

Do ensaio a vazio, vem

$$I_{L\text{ média}} = 4,01A$$

$$I_{\phi, IZ} = \frac{4,01}{\sqrt{3}} A = 2,32A$$

$$|Z_{vz}| = \frac{220,5V}{2,32A} = 95,04\Omega = X_1 + X_M$$

Quando X_1 é conhecida, X_M pode ser encontrada. As perdas no cobre do estator são

$$P_{PCE} = 3I_1^2 R_1 = 3(2,3A)^2 (2,8\Omega) = 44,44W$$

Portanto, as perdas rotacionais a vazio são

$$P_{rot} = P_{entrada,z} - P_{PCE,vz}$$

$$P_{rot} = 149,3W - 44,4W = 104,9W$$

4.3.3 Ensaio de rotor bloqueado:

Para este ensaio o motor teve sua ligação em delta que representa a menor tensão com ligação em 220 V, como é uma ligação diferente da disponível no laboratório de 380V, o variavolt foi utilizado nesta etapa de forma que seja regulada a tensão, em um valor, que na leitura de corrente se torne mais próxima da nominal, com a frequência de 60Hz, posteriormente é efetuada a leitura de tensão, corrente e potência ativa, veja as figuras a seguir e a tabela 05.

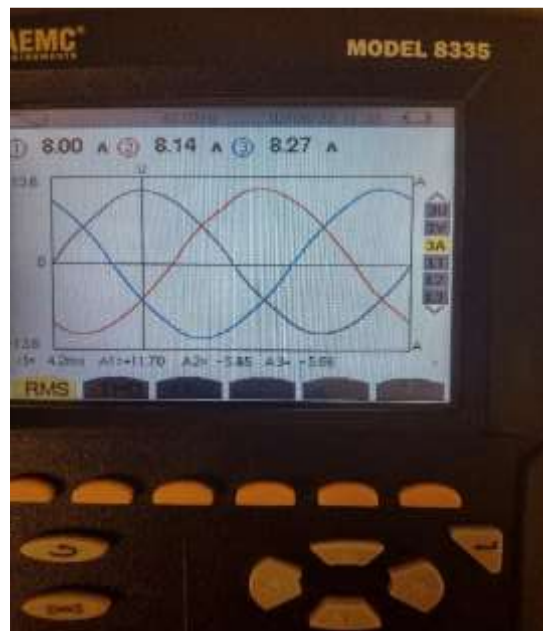


Figura 40- Correntes do Ensaio de Rotor Bloqueado.

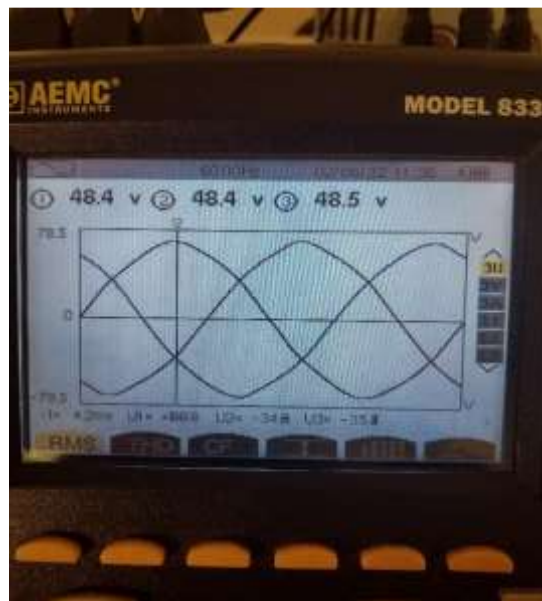


Figura 41- Tensões do Ensaio de Rotor Bloqueado.



Figura 42- Potência Ativa do Ensaio de Rotor Bloqueado.

	FASE A	FASE B	FASE C	MÉDIA
TENSÃO [V]	48,4	48,4	48,5	48,43
CORRENTE [A]	8	8,14	8,27	8,14
POTÊNCIA [W]	116,8	93,4	126,2	336,4

Tabela 05- Dados dos Ensaio de Rotor bloqueado

Do ensaio de rotor bloqueado, temos

$$I_{L\text{ média}} = 8,14A$$

A impedância de rotor bloqueado é

$$|Z_{RB}| = \frac{V_{\phi}}{I_L} = \frac{V_{\phi}\sqrt{3}}{I_L} = \frac{48,43V\sqrt{3}}{(8,14A)} = 10,34\Omega$$

e o ângulo de impedância θ é

$$\theta = \frac{P_{\text{entrada}}}{\sqrt{3}V_T I_L}$$

$$\theta = \frac{336,4W}{\sqrt{3}(48,43V)(8,14A)}$$

$$\theta = 0,4926 = 60,486^\circ$$

Portanto, $R_{RB} = 10,34 \cos 60,486^\circ = 5,094\Omega = R_1 + R_2$. Como $R_1 = 2,8\Omega$, então R_2 deve ser $2,3\Omega$. A reatância em 60 Hz é

$$X'_{RB} = 10,34 \sin 60,486^\circ = 9\Omega$$

A reatância equivalente em 60 Hz é

$$X_{RB} = \frac{f_{ensaio}}{f_{nominal}} X'_{RB} = \left(\frac{60Hz}{60Hz}\right) 9\Omega = 9\Omega$$

Nas máquinas assíncronas da classe N, assume-se que essa reatância é dividida igualmente entre o rotor e o estator, de modo que

$$X_1 = 0,68X_2$$

$$X_1 + X_2 = 9$$

$$X_1 = 0,68(9 - X_1)$$

$$X_1 = 3,64\Omega$$

$$X_2 = 5,35\Omega$$

$$X_M = |Z_{VZ}| - X_1 = 90,04\Omega - 3,64\Omega = 86,36\Omega$$

Os dados levantados nos ensaios são:

$$R_1=2,8\Omega \quad R_2=2,3\Omega \quad X_1=3,64\Omega \quad X_2=5,35\Omega \quad X_M=86,36\Omega$$

4.4 Determinação de parâmetros a partir dos ensaios método 2.

Os parâmetros de circuito equivalente, necessários para o cálculo do desempenho de um motor de indução polifásico submetido a uma carga, podem ser obtidos dos resultados de um ensaio a vazio, de um ensaio de rotor bloqueado e das medidas das resistências CC dos enrolamentos do estator.

4.4.1 Ensaio a vazio

Em geral, esse ensaio é executado em frequência nominal e com tensões polifásicas equilibradas aplicadas aos terminais do estator. Depois de o motor terminal ter funcionado por

um tempo suficiente para que os mancais se lubrifiquem apropriadamente, as leituras são executadas na tensão nominal.

$V_{1,vz}$ = A tensão de fase 220,5 [V]

$I_{1,vz}$ = A corrente de linha 4,01 [A]

P_{vz} = A potência elétrica polifásica total de entrada 149,3 [W]

A corrente de fase a vazio = 2,32A

$$P_{rot} = P_{VZ} - 3I_{VZ}^2 R_1 = 149,3 - 3 \cdot 2,30^2 \cdot 2,8 = 104,8W$$

$$Q_{VZ} = \sqrt{(3V_{VZ}I_{VZ})^2 - P_{VZ}^2} = \sqrt{(3 \cdot 220,05 \cdot 2,32)^2 - 149,3^2} = 1527,4 \text{ Var}$$

$$X_{VZ} = \frac{Q_{VZ}}{3 \cdot I_{VZ}^2} = \frac{1527,4}{3 \cdot 2,32^2} = 94,59\Omega$$

4.4.2 Do ensaio de rotor bloqueado

Como no caso do ensaio em curto-circuito de um transformador, o *ensaio de rotor bloqueado* ou *travado* de um motor de indução fornece informações sobre as impedâncias de dispersão. O rotor é bloqueado, de modo que não possa girar (sendo o escorregamento, portanto, igual à unidade), e tensões polifásicas equilibradas são aplicadas aos terminais do estator. Vamos assumir que as seguintes medidas foram obtidas em um ensaio de rotor bloqueado:

$V_{1,bl}$ = A tensão de fase 48,43 [V]

$I_{1,bl}$ = A corrente de linha 8,14 [A]

P_{bl} = A potência elétrica polifásica total de entrada 336,4 [W]

f_{bl} = A frequência do ensaio de rotor bloqueado 60 [Hz]

A corrente de fase rotor bloqueado = 4,7A

$$Q_{RB} = \sqrt{(3V_{RB}I_{RB})^2 - P_{RB}^2} = \sqrt{(3 \cdot 48,34 \cdot 4,7)^2 - 336,4^2} = 594,25 \text{ Var}$$

$$X_{RB} = \left(\frac{f_e}{f_{rb}} \right) \cdot \frac{Q_{RB}}{3 \cdot I_{RB}^2} = 1 \cdot \frac{594,25}{3 \cdot 4,7^2} = 8,967\Omega$$

Como o motor é de classe N temos a relação entre $X_1=0,68X_2$

$$k^2 X_2^2 + (X_{RB}(1 - K) - X_{VZ}(1 + K))X_2 + X_{RB}X_{VZ} = 0$$

$$0,68^2 X_2^2 + (8,97(1 - 0,68) - 94,59(1 + 0,68))X_2 + 94,59 \cdot 8,97 = 0$$

$$0,46X_2^2 + (2,87 - 158,91)X_2 + 848,47 = 0$$

$$0,46X_2^2 - 156,04X_2 + 848,47 = 0$$

$$X_{21} = 5,53\Omega \quad X_{22} = 333,69$$

Como o valor de X_2 é menor que o valor de X_m podemos considerar que $X_2=5,53\Omega$, encontrando o valor de X_1

$$X_1 = 0,68X_2 = 0,68 \cdot 5,53 = 3,76\Omega$$

Encontrando o valor de reatância de magnetização X_m

$$X_M = X_{VZ} - X_1 = 94,59 - 3,76 = 90,83\Omega$$

Resistência de rotor bloqueado

$$R_{RB} = \frac{P_{RB}}{3 \cdot I_{RB}^2} = \frac{336,4}{3 \cdot 4,7^2} = 5,076\Omega$$

Encontrando o valor de resistência de rotor R_2

$$R_2 = (R_{RB} - R_1) \left(\frac{X_2 - X_M}{X_M} \right)^2$$

$$R_2 = (5,076 - 2,8) \left(\frac{5,53 - 90,83}{90,83} \right)^2 = 2,56\Omega$$

Os valores encontrados nos ensaios do método 2

$$R_1=2,8\Omega \quad R_2=2,56\Omega \quad X_1=3,76\Omega \quad X_2=5,53\Omega \quad X_M=90,82\Omega$$

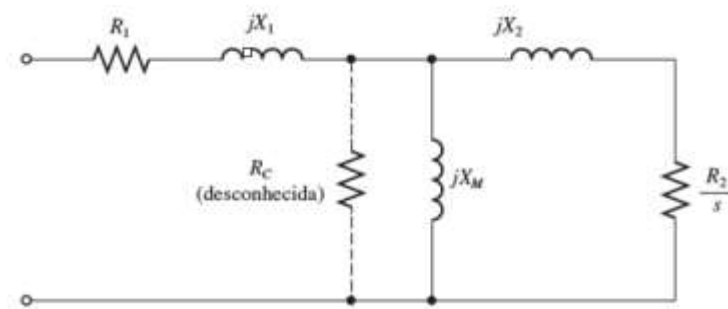


Figura 43- Exemplo Circuito equivalente por fase da máquina de 3 CV.

4.5 Extração de informações

Na execução desta etapa com a plataforma já completamente montada e em operação, caracterizada pela operação das plantas MIT, com o objetivo de formar uma base de dados, a qual será compilada para a extração de informações como eficiência da planta, qualidade da resposta

dinâmica, curva de torque versus velocidade, torque de partida, tensão e corrente específicos do acionamento.



Figura 44-Placa de informações do motor de tração de 3CV.

o MIT rotor gaiola de esquilo simples, representa o motor de tração que será ensaiado, com uma potência de 2200W, com dois modelos de ligações trifásica com tensões de linha de 220V e 380V, a corrente nominal de 8.18A em 220V ligação delta a qual será utilizada nestes procedimentos, e 4.74A em 380V ligação estrela, rotação em regime de 1735 rpm, frequência de 60Hz, fator de serviço de 1.15, corrente de partida de 6,5 vezes a nominal, fator de potência de 0,83, índice de proteção IP55, possui os seguintes parâmetros .

$$R_1 = 2,8\Omega \quad R_2 = 2,3\Omega \quad X_1 = 3,64\Omega \quad X_2 = 5,35\Omega \quad X_M = 86,36\Omega$$

4.5.1 Para esse circuito equivalente, os equivalentes thévenin

$$V_{TH} \approx V_\phi \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right) = 127 \left(\frac{86,36}{3,64 + 86,36} \right) = 121,86V \quad (41b)$$

$$R_{TH} \approx R_1 \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2 = 2,8 \left(\frac{86,36}{3,64 + 86,36} \right)^2 = 2,578\Omega \quad (44)$$

$$X_{TH} \approx X_1 = 3,64\Omega \quad (45)$$

$$s_{\max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} = \frac{2,3}{\sqrt{2,578^2 + (3,64 + 5,35)^2}} = 0,2459 = 24,59\% \quad (53)$$

O torque máximo desse motor é dado por

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{TH}^2}{2\omega_{sinc} \left[R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \right]} \quad (54)$$

$$\tau_{ind} = \frac{3(121,86)^2}{2(188,5 \text{ rad/s}) \left[2,578\Omega + \sqrt{(2,587\Omega)^2 + (3,64\Omega + 5,35\Omega)^2} \right]} = 9,89 \text{ N.m}$$

$$P_{conv}^{m\acute{a}x} = \tau_{ind} \cdot \omega_m = 9,89 \cdot 188,5 = 1865,28 \text{ W} \quad (35)$$

A característica de torque *versus* velocidade desse motor com a resistência de rotor original e também com a resistência de rotor dobrada serve como parâmetro de comparação para os dados levantados nos ensaios feitos anteriormente. As características de conjugado *versus* velocidade resultantes estão mostradas na Figura 45 e 46. Observe que os valores do conjugado de pico e do conjugado de partida nas curvas estão de acordo com os cálculos das partes dos ensaios e cálculos anteriores. Observe também que o conjugado de partida do motor cresceu quando R_2 foi aumentado.

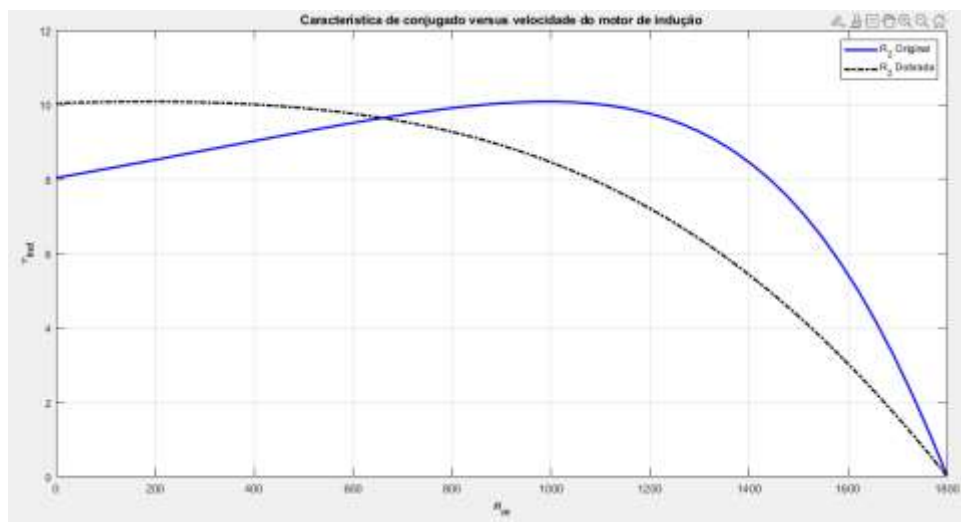


Figura 45- Característica torque versus velocidade método 1.

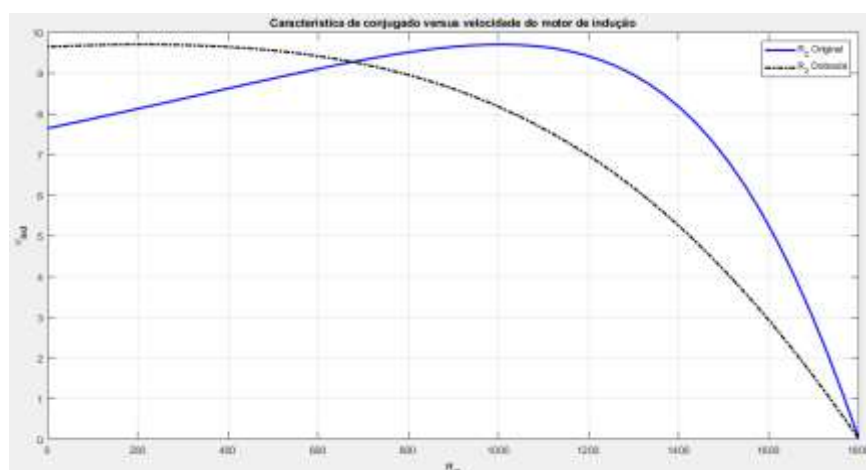


Figura 46- Característica torque versus velocidade método 2.

Os métodos de ensaios para levantamento de parâmetros de resistência e reatâncias dos MIT são aproximados, estes valores encontrados foram valores próximos na figura 38 e 39 estão os gráficos com os parâmetros encontrados nos dois ensaios, podemos observar que o torque máximo se aproxima do valor de placa do MIT de 3 CV, mas com relação ao valor de rotação este em seu valor de pico está em um valor menor do que o valor nominal de funcionamento do motor.

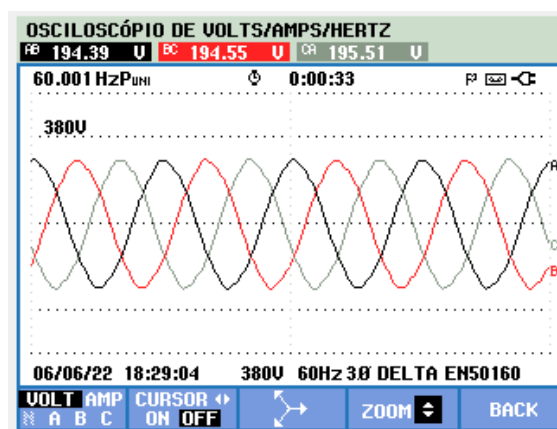


Figura 47- Conjunto de tensões do motor ligado em delta em plena carga.

Para a conferência dos valores de placa o motor foi ligado ao motor de freio magnético de 10CV que é acionado por um inversor de frequência, e o motor de 3CV ligado em sua menor tensão modelo delta, observando a figura 47 o valor de tensão se aproxima 220V com um valor um pouco menor, isto se deve ao fato do motor esta em plena carga sua tensão tem um valor menor de aproximadamente 194V. Na figura 48 podemos observar as correntes que se aproxima do valor nominal para plena carga que é para ligação em delta de 8.18A que mostra conformidade com os dados de placa.

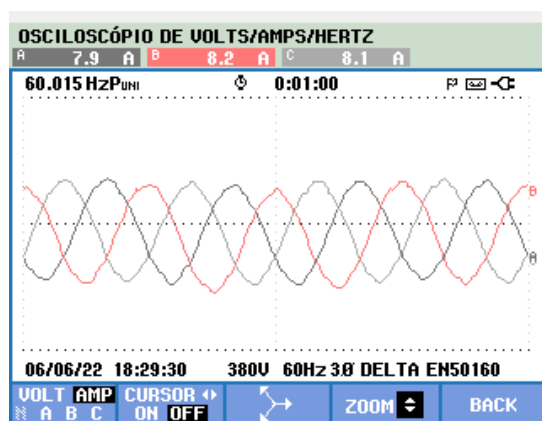


Figura 48-Conjunto de correntes do motor ligado em delta em plena carga.

4.5.2 Ensaios na plataforma, visando os estudos em variadas rotações

Para melhor análise do motor de tração, foi ligado ao freio magnético controlado por inversor de frequência para analisar problemas advindos da região de enfraquecimento de campo submetendo o motor de tração a velocidades variadas, utilizando as novas instalações do laboratório, para as leituras de tensão e corrente foi ligado o analisador de energia AEMC modelo 8335, para a leitura de velocidade em [rpm] o tacômetro Minipa MTD 2244B.



Figura 49-Ligações e acoplamento do motor de 3CV ao motor de 10CV

A figura 49 mostra o esquema de ligação do freio magnético de MIT controlado por meio do inversor de frequência com ligação em 380V de tensão de linha, com três fios, primeiramente foi feita a instalação mecânica fazendo as regulagens de altura e distância, posicionando os eixos alinhados, posteriormente verificou-se o aperto dos parafusos que fixam os motores e o acoplamento, na ligação o motor foi submetido a uma tensão variável através de um varivolt, a intenção de usar o varivolt é alcançar a tensão de linha trifásica de 220V com frequência de 60Hz, com o motor de 3CV de tração ligado em delta. As ponteiros de sensores foram devidamente instaladas junto ao conjunto de ligação do motor e devidamente isoladas.



Figura 50-Medição da rotação Ensaio de carga nominal.

Com os motores e sensores devidamente instalados o primeiro ensaio consistiu em um funcionamento do motor com rotação próxima a nominal de 1735 rpm com mostra na figura 50 a velocidade de ensaio foi de 1797 rpm, para esta rotação o motor deveria apresentar valores próximos aos valores nominais de placa com o valor de corrente um pouco mais elevado pois o motor está submetido a uma rotação mais elevada.



Figura 51-Medição da tensão Ensaio de carga nominal.

Para a regulação de tensão com o varivolt o motor já estava a rotação próxima a nominal o valor foi regulado aumentando o valor de tensão de linha até que se aproximasse do valor nominal de 220V. Ao chegar ao valor de tensão adequado fez a medição das correntes de linha conforme a figura 52, as leituras de corrente se aproximaram do valor nominal como esperado, com um valor de 9,25A em média veja figura 52, lembrando que o motor deve ser usado levando em consideração de serviço com fator de multiplicação de 1.15 ou 15%, ou seja para esta rotação o motor esta em um modo correto de utilização segundo seus valores de placa.



Figura 52-Medição da Corrente no Ensaio de carga nominal.

Para utilização do MIT no estado de enfraquecimento de campo, deve ressaltar a necessidade de um inversor de frequência com controle escalar, mantendo os valores nominais de tensão e corrente e controle vetorial, variando o valor da frequência de acionamento, controlando diretamente a velocidade através da frequência. Com este tipo de acionamento irá evitar a danificação dos enrolamentos devido ao sobreaquecimento dos condutores.

Os métodos convencionais de controle levam ao aumento inadequado da corrente ou da tensão, pois o valor da frequência da onda senoidal se mantém fixado em 60Hz, como a intenção de controle é um controle eficiente da velocidade, se tratando do MIT o melhor controle é feito sobre o parâmetro de frequência, pois assim o motor manterá os valores de torque como visto na seção 3.6.

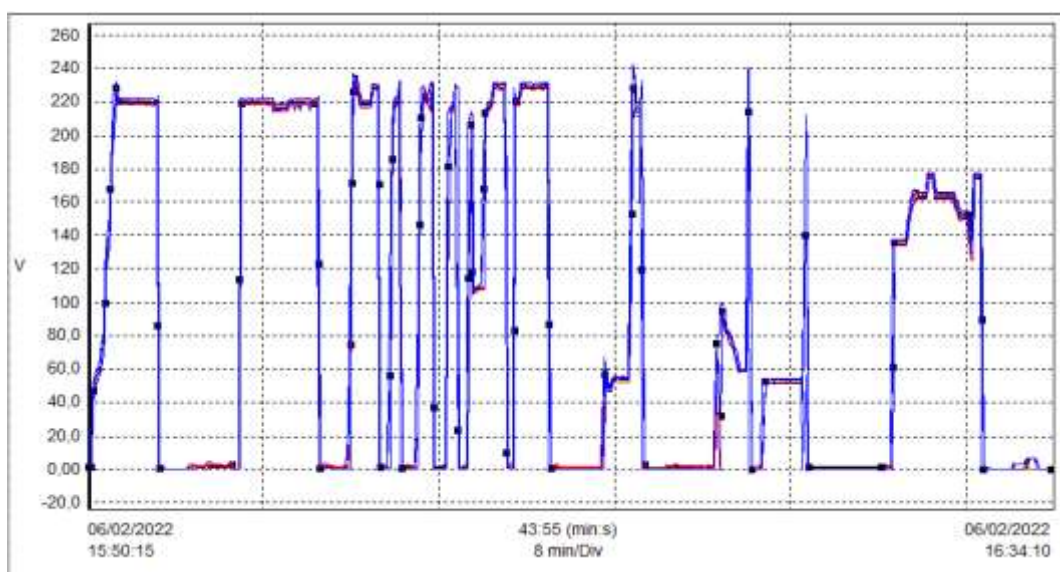


Figura 58-Medição da Tensão Ensaio de enfraquecimento de campo.

A figura 58, mostra toda a gravação dos valores de tensão advindos do analisador de energia AEMC modelo 8335 nos ensaios visando a análise do campo magnético. As divisões no eixo horizontal estão divididas em partes de 8 minutos, os 24 minutos iniciais representam os ensaios a 1797rpm, observe que os valores de tensão foram aumentados de modo que chegassem ao valor nominal de acionamento de 220V. Para verificar as leituras da corrente foram feitas sete operações, sendo que duas delas foram partindo com motor em plena carga.

Na figura 59, tem os valores de leitura de corrente com as mesmas divisões de leitura de tensão sendo que nos primeiros 24 minutos as leituras de correntes são valores próximos a 8,1A, pois o motor está funcionando próximo ao valor nominal de tensão e rotação o que comprova os valores de placa do MIT.

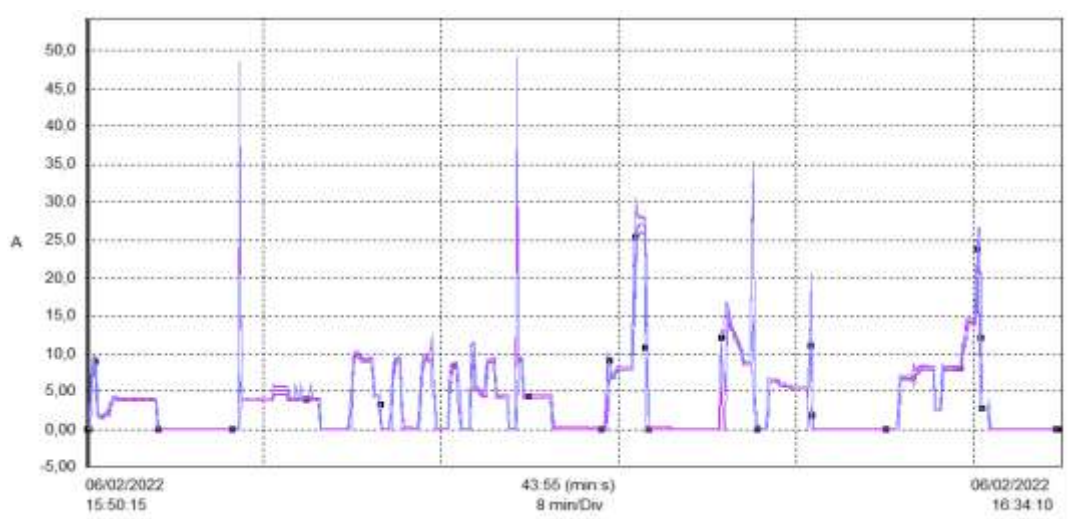


Figura 59-Medição da Corrente Ensaio de enfraquecimento de campo.

Na figura 60 em vermelho estão os valores de Potência, os valores para potência possuem as mesmas divisões do eixo horizontal da corrente e da tensão. Nos primeiros 24 minutos os valores de potência se aproximam aos 2200W que apresentam uma coerência com os valores nominais de placa do MIT de tração,

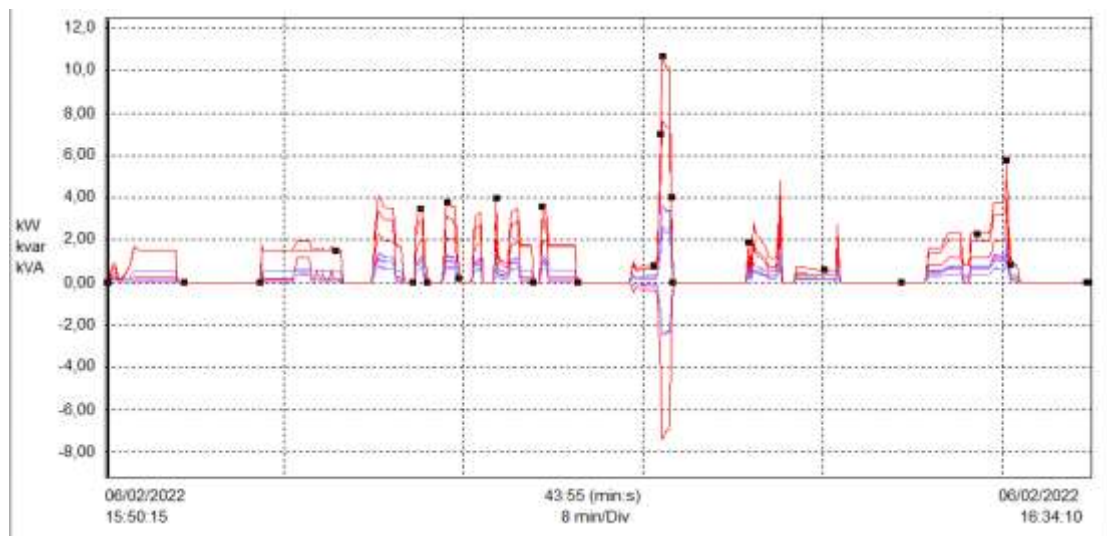


Figura 60-Medição da Potência Ensaio de enfraquecimento de campo.

5 CAPÍTULO 5- CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Os MITs são motores com as mais variadas aplicabilidades no setor da indústria, neste projeto podemos observar que para o acionamento de frequência constante, esta aplicabilidade se torna mais limitada, principalmente nas regiões de enfraquecimento de campo que são observadas em rotações acima da rotação síncrona, os valores de corrente se elevam acima dos limites aceitáveis de funcionamento do motor. Isto ocorre devido a demanda de potência que com tensão e frequência fixas ocasiona o aumento da corrente.

Podemos observar no funcionamento do freio magnético que com o aumento da rotação acima da rotação nominal para um valor fixo de tensão a corrente aumenta, e quando diminui a rotação para um valor abaixo da velocidade nominal do motor de tração também ocorre um aumento da corrente, quando o valor de rotação freio magnético está no valor nominal do motor de tração o mesmo apresenta estar a vazio com uma corrente de aproximadamente 50% da corrente nominal que é um valor de 4,5A, que se assemelha com valor encontrado no ensaio a vazio do MIT de tração.

Apesar do sistema de acionamento do MIT já ser bastante consolidado, foram analisados os problemas advindos da operação na região de enfraquecimento de campo, e acionamento com frequência de chaveamento constante. Com o desenvolvimento de novos modelos de acionamento através de inversores de frequência possibilita um uso melhor do MIT pois possibilita um melhor controle da velocidade e do torque aplicado ao eixo dos motores fixando tensão e programando o inversor para uma sobrecarga permissível de 15% acima do valor de corrente, variando o valor da frequência de acordo com a demanda de torque e velocidade, se comparado com motores mais modernos como os MRVs o MIT apresenta uma desvantagem em relação ao peso potência.

O desempenho do sistema de tração elétrica com o MRV será avaliado tomando-se como base o sistema MIT posteriormente em outro projeto, assim espera-se contribuir numa análise comparativa a qual possa estabelecer uma relação custo-benefício para os respectivos sistemas. É importante ressaltar que a instalação da plataforma experimental no Instituto Federal de Goiás Campus Itumbiara abrirá o leque para outras contribuições científicas futuras e também a inserção desta instituição no campo de pesquisa em controle de máquinas elétricas

6 REFERÊNCIAS

- [1] Martins, M. P. (2004) Estudo e Implementação de Uma Técnica de Controle Aplicada ao Paralelismo de Um Inversor PWM Senoidal com a Rede Elétrica, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Orientador: Ernane Antônio Alves Coelho, Uberlândia, 2004.
- [2] Paiva, Élcio Precioso de (2006); Uma Proposta do Controle de Paralelismo de Inversores com a Rede Elétrica Utilizando-se a Técnica de Realimentação de Fase; Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2006.
- [3] Paiva, Élcio Precioso de; Vieira Júnior, João Batista; Freitas, Luiz Carlos de; Farias, Valdeir José; Coelho, Ernane Antônio Alves (2009); An Improved Power Controller For A Single Phase Grid Connected Inverter With Root Locus Analysis. *Eletrônica de Potência* ISSN 1414-8862, v. 14, p. 17-23, 2009.
- [4] Coelho, E. A. A. ; Técnicas de Controle Aplicadas ao Paralelismo de Inversores, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Dezembro, 2000.
- [5] Coelho, E. A. A., Cortizo, P. C., and Garcia, P. F. D.; Small-signal stability for Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2009, San Jose, California. *Anais do ECCE-IEEE*, 2009.
- [6] Hwang, G. R., (2002). Modelagem da máquina a relutância chaveada incluindo a saturação, Dissertação, Universidade Federal de Uberlândia.
- [7] Mueller, M. A. (2005). Design and performance of a 20 kW, 100 rpm, switched reluctance generator for a direct drive wind energy converter, *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, May 2005, pp. 56-63.
- [8] Sawata, Tadashi (2001). The switched reluctance generator, *Electronic Control of Switched Reluctance Machines*, Newness Power Engineering Series, Ed. T. J. E. Miller, Oxford, pp. 227-251.
- [9] SILVEIRA, A. W. F. V. ; ANDRADE, D. A. ; FLEURI, Augusto A ; Gomes, L. C. ; BISSOCHI JR, C. A. ; DIAS, R. J. . Voltage control in starter/generator SRM based systems. In: *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2009, San Jose - CA. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. New York : IEEE, 2009. p. 2460-2465.
- [10] SILVEIRA, A. W. F. V. ; ANDRADE, D. A. ; BERNADELLI, V. R. ; CARVALHO, D. P. ; CARVALHO, W. J. ; Gomes, L. C. . Estudo do comportamento da MRV operando como motor/gerador. In: *VI Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica*, 2008, Uberlândia. *Anais da VI Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica*. Uberlândia : VI CEEL, 2008. v. 01-CD.
- [11] FLEURY, A. W. ; ANDRADE, D. A. ; TAVARES, T. S. ; GOMES, L. C. . A Comparative Study Between Three Philosophies of Stator Flux Estimation for Induction Motor Drives. In: *International Electric Machines and Drives Conference - IEMDC'07*, 2007, Antalya. *IEMDC'07*, 2007. v. CD-ROM.
- [12] SILVEIRA, A. W. F. V. ; ANDRADE, D. A. ; SILVEIRA, A. F. V. ; Gomes, L.C. ; BISSOCHI JUNIOR, C. A. . Control of the SRM Operating as a Motor/Generator. In: *IEEE*

International Symposium on Industrial Electronics ISIE, 2009, Seoul Olympic Parktel. IEEE - ISIE 2009, 2009. p. 1558-1563.

[13] SILVEIRA, A. W. F. V. ; ANDRADE, D. A. ; SILVEIRA, A. F. V. ; BISSOCHI JUNIOR, C. A. ; Gomes. L.C. ; DIAS, R. J. . Estudo de técnicas de controle de tensão na carga aplicadas a um motor/gerador a relutância variável. In: VII Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, 2009, Uberlândia. Anais do VII CEEL, 2009.

[14] SILVEIRA, A. W. F. V. ; ANDRADE, D. A. ; Gomes. L.C. ; BISSOCHI JUNIOR, C. A. ; SILVEIRA, A. F. V. ; DIAS, R. J. . Voltage Control in Starter/Generator SRM Based Systems. In: IEEE Energy

[15] BERNADELLI, V. R. ; ANDRADE, D. A. ; SILVEIRA, A. W. F. V. ; GOMES, L. C. ; CARVALHO, W. J. ; CARVALHO, D. P. ; BISSOCHI JR, C. A. . Proposta de Estratégia para Melhoria do Perfil de Conjugado de Motores a Relutância Variável. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2008, Juiz de Fora. Anais do XVII Congresso Brasileiro de Automática. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2008. v. 01.

[16] Chapman, Stephen J. Fundamentos de máquinas elétricas [recurso eletrônico] / Stephen J. Chapman ; tradução: Anatólio Laschuk. – 5. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre : AMGH, 2013. Pg 309 a 311.

[17] Umans, Stephen D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley [recurso eletrônico] / Stephen D. Umans ; tradução: Anatólio Laschuk. – 7. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre: AMGH, 2014.

[18] Chapman, Stephen J. Fundamentos de máquinas elétricas [recurso eletrônico] / Stephen J. Chapman ; tradução: Anatólio Laschuk. – 5. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre : AMGH, 2013. Pg 338.

Anexo I- Matlab conjugado versus velocidade

```
% M-file: torque_speed_curve.m
% M-file para criar um gráfico da curva de conjugado versus velocidade
% (torque-speed curve) do motor de indução do Exemplo 6-5.
% Primeiro, inicialize os valores necessários ao programa.
r1 = 2,8; % Resistência do estator
x1 = 1.106; % Reatância do estator
r2 = 0.332; % Resistência do rotor
x2 = 0.464; % Reatância do rotor
xm = 26.3; % Reatância do ramo de magnetização
v_phase = 120; % Tensão de fase
n_sync = 1800; % Velocidade síncrona (rpm)

w_sync = 188.5; % Velocidade síncrona (rad/s)
% Calcule a tensão e a impedância de Thévenin com as Equações
% 6-41a e 6-43.
v_th = v_phase * (xm / sqrt(r1^2 + (x1 + xm)^2)) ;
z_th = ((j*xm) * (r1 + j*x1)) / (r1 + j*(x1 + xm));
r_th = real(z_th);
x_th = imag(z_th);
% Agora, calcule a característica de conjugado X velocidade para diversos
% escorregamentos entre 0 e 1. Observe que o primeiro valor de escorregamento
% é ajustado para 0,001 em vez de exatamente 0 para evitar problemas de
% divisão por zero.
s = (0:1:50) / 50; % Escorregamento
s(1) = 0.001;
nm = (1 - s) * n_sync; % Velocidade mecânica
% Calcule o conjugado para a resistência de rotor original
for ii = 1:51
    t_ind1(ii) = (3 * v_th^2 * r2 / s(ii)) / ...
        (w_sync * ((r_th + r2/s(ii))^2 + (x_th + x2)^2)) ;
end
% Calcule o conjugado para a resistência de rotor dobrada
for ii = 1:51
    t_ind2(ii) = (3 * v_th^2 * (2*r2) / s(ii)) / ...
        (w_sync * ((r_th + (2*r2)/s(ii))^2 + (x_th + x2)^2)) ;
end
% Plote a curva de conjugado X velocidade
plot(nm,t_ind1,'Color','b','LineWidth',2.0);
hold on;
plot(nm,t_ind2,'Color','k','LineWidth',2.0,'LineStyle','-');
xlabel('\bf\itn_{m}');
ylabel('\bf\tau_{ind}');
title ('\bfCaracterística de conjugado versus velocidade do motor de indução');
legend ('R_{2} Original','R_{2} Dobrada');
grid on;
hold off;
```