

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**PLATAFORMA PARA ENSAIOS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS E
SIMULAÇÃO DE CARGAS MECÂNICAS: ACIONAMENTO, OPERAÇÃO E
MONITORAMENTO COM AUXÍLIO DE FONTE PROGRAMÁVEL**

CÁSSIO ALVES DE OLIVEIRA

OUTUBRO

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**PLATAFORMA PARA ENSAIOS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS E
SIMULAÇÃO DE CARGAS MECÂNICAS: ACIONAMENTO, OPERAÇÃO E
MONITORAMENTO COM AUXÍLIO DE FONTE PROGRAMÁVEL**

Dissertação apresentada por **Cássio Alves de Oliveira** à
Universidade Federal de Uberlândia para a **obtenção do título**
de Mestre em Engenharia Elétrica em 11/10/2018 na
presença da banca examinadora, composta por:

Prof. Luciano Coutinho Gomes, Dr. (UFU) – Orientador
Prof. Augusto W. F. V. Silveira, Dr. (UFU) – Co-orientador
Prof. Hélder de Paula, Dr. (UFU)
Prof. Marcos Antônio Arantes de Freitas, Dr. (IFG)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

O48p
2018

Oliveira, Cássio Alves de, 1978-
Plataforma para ensaios de motores de indução trifásicos e simulação de cargas mecânicas [recurso eletrônico] : acionamento, operação e monitoramento com auxílio de fonte programável / Cássio Alves de Oliveira. - 2018.

Orientador: Luciano Coutinho Gomes.

Coorientador: Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1228>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia elétrica. 2. Motores elétricos de indução. 3. Motores elétricos de indução - Normas. I. Gomes, Luciano Coutinho, 1972- (Orient.). II. Silveira, Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da, 1981- (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDU: 621.3

Maria Salete de Freitas Pinheiro - CRB6/1262

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**PLATAFORMA PARA ENSAIOS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS E
SIMULAÇÃO DE CARGAS MECÂNICAS: ACIONAMENTO, OPERAÇÃO E
MONITORAMENTO COM AUXÍLIO DE FONTE PROGRAMÁVEL**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR CÁSSIO ALVES DE OLIVEIRA À
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCIANO COUTINHO GOMES, Dr.

Orientador

JOSÉ RUBENS MACEDO JÚNIOR, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-graduação *stricto sensu* em Engenharia Elétrica da UFU

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho à minha mãe, Clonice de Oliveira,
pelo apoio incondicional, pela contribuição com meu
crescimento pessoal e profissional, pelo carinho e
compreensão.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes pela oportunidade, pelo apoio, pelos ensinamentos e, sobretudo, pela paciência durante a orientação para a execução do projeto.

Ao Prof. Dr. Darizon Alves de Andrade pela confiança e pelos ensinamentos nas disciplinas da pós-graduação.

Ao Prof. Dr. Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira pela confiança e por apresentar-me e integrar-me à equipe do Laboratório de Acionamentos Elétricos (LAcE).

Aos amigos Vinícius Marcos Pinheiro e Vítor Henrique Pereira de Melo, que tiveram participação importante durante a realização do trabalho.

A toda a equipe do Laboratório de Acionamentos Elétricos, em especial aos amigos Josemar Alves dos Santos Júnior, Wanberton Gabriel de Souza e Marcos José de Moraes Filho pelo suporte em diversos momentos em que surgiram dificuldades.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro para a realização do trabalho.

As familiares e amigos pelo apoio, incentivo e paciência.

Por fim, a todos que estiveram direta ou indiretamente envolvidos na realização deste trabalho.

“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 5383-1:2002 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A plataforma possui base ajustável e resistente, permitindo que sejam estudados motores de até 5 cv, 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, normas técnicas, ensaios, carga mecânica.

ABSTRACT

This work contributes to the implementation and structuring of a tests bench with three-phase induction motors, observing the recommendations of NBR 5383-1:2002 standard of the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT). The platform has resistant and adjustable base, allowing to be studied motors until 5 cv, 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, technical standards, tests, mechanical load.

Sumário

Lista de figuras.....	xiii
Lista de tabelas.....	xvi
Lista de abreviaturas e símbolos.....	xviii
Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1 – Motores elétricos: perspectiva histórica	1
1.2 – Normas Técnicas	2
1.3 – Objetivos do trabalho	3
1.4 – Contextualização e justificativa	4
Capítulo 2 – O Motor de Indução Trifásico.....	8
2.1 – Aspectos construtivos.....	8
2.2 – Princípio de funcionamento	10
2.3 – Característica de partida	11
2.4 – Circuito equivalente	13
2.5 – Fluxo de potência e perdas	13
2.6 – Especificações nominais	16
2.6.1 – Classificação térmica.....	17
2.6.1.1 – Classes de isolamento.....	17
2.6.1.2 – Medição da elevação de temperatura do enrolamento	18
2.6.2 – Regime de serviço	19
2.6.3 – Fator de serviço	20
Capítulo 3 – Elementos da plataforma de ensaios.....	21
3.1 – Bancada de ensaios.....	21
3.2 – Máquina de corrente contínua	22

3.3 – Conversor CC-CC classe E	25
3.4 – Transdutor de conjugado	28
3.5 – Fonte Programável	29
Capítulo 4 – Metodologia utilizada e resultados experimentais.....	33
4.1 – Objetivos da norma NBR 5383-1:2002	33
4.2 – Generalidades	33
4.3 – Classificação dos ensaios	34
4.4 – Operação da plataforma experimental.....	36
4.5 – Metodologia de ensaios e resultados experimentais.....	37
4.5.1 – Ensaio para determinação da resistência do enrolamento do estator.....	37
4.5.1.1 – Método da tensão e corrente (queda de tensão).....	38
4.5.1.2 Método alternativo: medição direta.....	40
4.5.2 – Ensaio térmico.....	42
4.5.2.1 – Procedimentos gerais e resultados.....	42
4.5.3 – Ensaio com rotor bloqueado.....	45
4.5.4 – Ensaio em vazio	49
4.5.4.1 – Realização do ensaio	50
4.5.4.2 – Análise das perdas em vazio	52
4.5.4.3 – Determinação dos parâmetros do ramo magnetizante.....	54
4.5.5 – Ensaio para determinação do escorregamento	56
4.5.6 – Ensaio para determinação do rendimento	58
4.5.6.1 – Determinação do conjugado para cada ponto de carga	63
4.5.7 – Ensaio para determinação do fator de potência	64
4.5.8 – Outros ensaios	66
4.5.8.1 – Ensaio com inserção de harmônicos de tensão.....	66
4.5.8.2 – Ensaio com inserção de afundamento de tensão	73

4.6 – Análise das curvas de desempenho do motor de indução trifásico	77
Capítulo 5 – Considerações finais.....	81
5.1 – Conclusões	81
5.2 – Propostas para trabalhos futuros	82
Apêndice A – Relatório dos ensaios realizados com o motor de indução trifásico.....	83
Apêndice B – Tolerâncias estabelecidas em norma para grandezas constantes nas características nominais de motores de indução trifásicos.....	85
Apêndice C – Identificação das partes principais e especificações elétricas do motor de indução trifásico W21 da WEG.....	87
Apêndice D – Código-fonte em MATLAB ® para obtenção das curvas de performance do motor de indução trifásico.....	89
Referências bibliográficas.....	91

Lista de figuras

Figura 1.1 – Composição setorial do consumo de energia elétrica no Brasil no ano de 2016 ...	4
Figura 2.1 – O motor de indução trifásico.....	8
Figura 2.2 – Estrutura típica do estator de um motor de indução trifásico.....	9
Figura 2.3 – Rotor bobinado de um motor de indução (Chapman, 2013).....	9
Figura 2.4 – Rotor em gaiola de esquilo.....	10
Figura 2.5 – Curva característica de conjugado <i>versus</i> velocidade para motor de indução trifásico de categoria N.	12
Figura 2.6 – Circuito equivalente monofásico de um motor de indução trifásico.....	13
Figura 2.7 – Diagrama de fluxo de potência.	15
Figura 2.8 – Placa de identificação de um motor de indução trifásico (SELEMEC, 2018)....	16
Figura 3.1 – Desenho da base estrutural da bancada.....	21
Figura 3.2 – Painel de comando da bancada.	22
Figura 3.3 – Representação esquemática de uma MCC com excitação independente.....	24
Figura 3.4 – Diagrama em blocos de uma MCC com excitação independente.....	24
Figura 3.5 – Topologia de um conversor CC-CC classe E.....	26
Figura 3.6 – Regiões de acionamento da MCC.....	27
Figura 3.7 – Módulo conversor CC-CC SEMIKRON (Marins, 2014).	28
Figura 3.8 – Placa geradora de sinal PWM (Marins, 2014).	28
Figura 3.9 – Transdutor de conjugado T22 da HBM.	29
Figura 3.10 – Fonte programável CSW11100 (destaque para o display do painel frontal).	30
Figura 3.11 – Interface principal do software da fonte programável.	31
Figura 3.12 – Interface de leitura de dados.	31
Figura 3.13 – Dados de leitura armazenados em arquivo de texto.....	32

Figura 4.1 – Foto da plataforma experimental.	36
Figura 4.2 – Esquema de ligações para o método da tensão e corrente.	39
Figura 4.3 – Esquema de medição para o método alternativo de determinação da resistência do enrolamento.	41
Figura 4.4 – Circuito equivalente monofásico de um motor de indução: condição de rotor bloqueado.	45
Figura 4.5 – Forma de onda da tensão trifásica aplicada ao MIT para o ensaio com rotor bloqueado: (a) Tensão de fase obtida através do software da fonte programável; (b) Tensão de linha obtida através do osciloscópio digital.	46
Figura 4.6 – Forma de onda da corrente do MIT durante o ensaio com rotor bloqueado: (a) Corrente de linha obtida através do software da fonte programável; (b) Corrente em cada fase do motor obtida através do osciloscópio digital.	47
Figura 4.7 – Forma de onda da tensão trifásica aplicada ao MIT para o ensaio em vazio: (a) Tensão de fase obtida através do software da fonte programável; (b) Tensão de linha obtida através do osciloscópio digital.	51
Figura 4.8 – Forma de onda da corrente do MIT durante o ensaio em vazio: (a) Corrente de linha obtida através do software da fonte programável; (b) Corrente em cada fase do motor obtida através do osciloscópio digital.	52
Figura 4.9 – Circuito equivalente monofásico de um motor de indução: condição a vazio....	54
Figura 4.10 – Triângulo de potência.	64
Figura 4.11 – Interface de geração de forma de onda com harmônicos.	69
Figura 4.12 – Ensaio com inserção de harmônicos: (a) Tensão de linha; (b) Espectro de harmônicos da fase A.	70
Figura 4.13 – Ensaio com inserção de harmônicos: (a) Corrente de linha; (b) Espectro de harmônicos da fase A.	71

Figura 4.14 – Percentual de harmônicos na corrente do MIT: (a) Fase A; (b) Fase B; (c) Fase C.....	72
Figura 4.15 – Ensaio com inserção de harmônicos: forma de onda do conjugado do MIT.....	73
Figura 4.16 – Interface para edição de transientes.....	75
Figura 4.17 – Ensaio de afundamento temporário de tensão: (a) Tensão de linha; (b) Corrente de linha; (c) Conjugado.....	76
Figura 4.18 – Curva característica de conjugado <i>versus</i> velocidade.....	78
Figura 4.19 – Curva característica de potência <i>versus</i> velocidade.....	78
Figura 4.20 – Curva de corrente <i>versus</i> velocidade.....	79
Figura 4.21 – Curva de fator de potência <i>versus</i> velocidade.....	79
Figura 4.22 – Curva de rendimento <i>versus</i> velocidade.	80
Figura C.1 – Vista em corte longitudinal com identificação das partes principais de um MIT (WEG, 2017).	87

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Classificação das perdas em um motor de indução trifásico.	14
Tabela 2.2 – Composição da temperatura em função da classe de isolamento (WEG, 2017).	18
Tabela 2.3 – Regimes de serviço.	19
Tabela 3.1 – Principais configurações da MCC.	25
Tabela 3.2 – Características básicas do conversor CC-CC.	27
Tabela 3.3 – Principais características da fonte programável.	30
Tabela 4.1 – Ensaios para verificação de desempenho de motores de indução.	35
Tabela 4.2 – Principais características do MIT sob ensaio.	37
Tabela 4.3 – Resultados do ensaio para determinação da resistência do enrolamento: método da tensão e corrente.	40
Tabela 4.4 – Resultados do método alternativo para obtenção da resistência do enrolamento.	41
Tabela 4.5 – Intervalo de tempo dentro do qual a leitura inicial da resistência deve ser adotada como medida de temperatura (ABNT, 2008).	43
Tabela 4.6 – Resultados obtidos após a realização do ensaio térmico.	44
Tabela 4.7 – Leituras obtidas durante o ensaio com rotor bloqueado.	46
Tabela 4.8 – Distribuição de reatâncias de dispersão em motores de indução.	49
Tabela 4.9 – Leituras obtidas durante o ensaio em vazio.	52
Tabela 4.10 – Leituras obtidas para obtenção das perdas por atrito e ventilação.	53
Tabela 4.11 – Detalhamento das perdas em vazio.	54
Tabela 4.12 – Resultados do ensaio para determinação do escorregamento.	58
Tabela 4.13 – Escorregamento corrigido para a temperatura especificada.	58

Tabela 4.14 – Métodos utilizados para a determinação do rendimento em motores de indução trifásicos.	59
Tabela 4.15 – Valores assumidos de perda suplementar em motores de indução trifásicos.	60
Tabela 4.16 – Resultados do ensaio em carga para determinação do rendimento.	61
Tabela 4.17 – Relação das perdas internas para cada ponto de carga.	62
Tabela 4.18 – Determinação do rendimento percentual para cada ponto de carga.	63
Tabela 4.19 – Determinação conjugado para cada ponto de carga.	64
Tabela 4.20 – Resultados do ensaio para determinação do fator de potência.	65
Tabela 4.21 – Valores eficazes de harmônicos de tensão.....	68
Tabela 4.22 – Medições efetuadas durante o ensaio com inserção de harmônicos de tensão..	69
Tabela 4.23 – Leitura e conversão dos valores de velocidade e conjugado.	72
Tabela 4.24 – Classificação das variações de tensão de curta duração (ANEEL, 2018).	74
Tabela 4.25 – Medições efetuadas durante o ensaio de afundamento temporário de tensão.	75
Tabela B.1 – Tolerâncias.	85
Tabela B.2 – Comparação entre os limites de tolerância e os valores de ensaio.....	86
Tabela C.1 – Especificações elétricas do motor de indução trifásico W21 da WEG.....	88

Lista de abreviaturas e símbolos

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
b	Coeficiente de atrito viscoso
C	Conjugado
CC	Corrente contínua
C_{\max}	Conjugado máximo
C_n	Conjugado nominal
$\cos \varphi_{bl}$	Fator de potência com rotor bloqueado
$\cos \varphi_0$	Fator de potência em vazio
C_p	Conjugado de partida
cv	Cavalo-vapor
DHI _I	Distorção harmônica individual de corrente
DHI _V	Distorção harmônica individual de tensão
DHT _I	Distorção harmônica total de corrente
DHT _V	Distorção harmônica total de tensão
E_g	Força contra eletromotriz de armadura
f	Frequência de alimentação
FEELT	Faculdade de Engenharia Elétrica
f_r	Frequência das correntes induzidas no rotor
GPIB	<i>General Purpose Interface Bus</i>
I_a	Corrente de armadura
I_{bl}	Corrente com rotor bloqueado
I_c	Corrente que circula através da resistência do ramo magnetizante
I_e	Corrente de ensaio
I_f	Corrente de campo
I_{f_f}	Corrente na frequência fundamental
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> (Transistor Bipolar de Porta Isolada)
I_h	Corrente harmônica individual de ordem h
I_m	Corrente que circula através da reatância do ramo magnetizante
I_n	Corrente nominal

I_0	Corrente de linha em vazio
I_1	Corrente do estator
I_2	Corrente do rotor
I_ϕ	Corrente de magnetização
J	Momento de inércia
k	Constante
La	Indutância de armadura
LAcE	Laboratório de Acionamentos Elétricos
L_f	Indutância de campo
MCC	Máquina de corrente contínua
MIT	Motor de indução trifásico
n	Velocidade mecânica
NBR	Norma Brasileira
n_s	Velocidade síncrona
p	Número de polos
P	Potência ativa
P_{av}	Perdas por atrito e ventilação
P_{entrada}	Potência elétrica de entrada
P_n	Potência nominal
$P_{\text{núcleo}}$	Perdas no núcleo
P_{perdas}	Somatória das perdas internas
PRODIST	Procedimentos de Distribuição da Agência Nacional de Energia Elétrica
$P_{\text{saída}}$	Potência mecânica de saída
P_{sup}	Perda suplementar
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
P_0	Potência de entrada em vazio
Q	Potência reativa
R_a	Resistência de armadura
R_c	Resistência de perdas no núcleo
R_f	Resistência de campo
R_1	Resistência do estator
R_2	Resistência do rotor
s	Escorregamento, variável da Transformada de Laplace

S	Potência aparente
$\sin \varphi_{bl}$	Seno do ângulo do fator de potência com rotor bloqueado
T	Conjugado
t_{amb}	Temperatura ambiente
t_e	Temperatura especificada
T_w	Conjugado resistente
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
USB	<i>Universal Serial Bus</i> (Porta Universal)
V_{bl}	Tensão com rotor bloqueado
V_f	Tensão nos terminais do enrolamento de campo
V_f	Tensão na frequência fundamental
V_h	Tensão harmônica individual de ordem h
V_t	Tensão nos terminais da armadura
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração
V_1	Tensão nominal de entrada
V_2	Tensão sobre o ramo magnetizante
X_{bl}	Reatância com rotor bloqueado
X_m	Reatância de magnetização
X_1	Reatância de dispersão do estator
X_2	Reatância de dispersão do rotor
Z_{bl}	Impedância com rotor bloqueado
Z_1	Impedância do estator
Δt	Elevação de temperatura
Δt_e	Elevação de temperatura no ensaio
Δt_n	Elevação de temperatura à carga nominal
η	Rendimento
φ	Ângulo do fator de potência
\emptyset	Fluxo de entreferro
ω	Velocidade angular mecânica

Capítulo 1 – Introdução

1.1 – Motores elétricos: perspectiva histórica

Quando os primeiros motores elétricos surgiram, diversos pesquisadores trabalhavam separadamente em busca de um objetivo comum: a criação de um dispositivo que, alimentado por energia elétrica, pudesse gerar energia mecânica. Tantos foram aqueles que contribuíram para a estruturação do motor (como ele é conhecido atualmente) que não há consenso a respeito de um inventor para essa máquina.

O que se sabe ao certo é que, a partir da descoberta do eletromagnetismo pelo dinamarquês Hans Christian Oersted, por volta de 1820, o campo para as pesquisas que desenvolveriam os motores elétricos estava aberto. O princípio de funcionamento dos motores é baseado na interação de um campo magnético com correntes elétricas, que fazem um rotor girar em torno de um estator, que se mantém estático. Foi a partir da descoberta do físico dinamarquês e de outros pesquisadores que se percebeu que eletricidade e magnetismo estavam intimamente ligados.

Em 1831, Michael Faraday descobriu a indução eletromagnética e criou um gerador de corrente que, utilizando um imã em forma de ferradura, fez girar um disco de cobre. Nessa década, surgiram as primeiras máquinas elementares, mas o motor elétrico só apareceria anos mais tarde. Em 1866, o inventor alemão Ernst Werner von Siemens criou um dínamo que funcionava tanto como gerador de eletricidade quanto como motor de corrente contínua, que foi considerado como sendo o primeiro motor da história.

No final do século XIX, a corrente contínua, que até então era a predominante, perdeu lugar para a corrente alternada, que se firmou enquanto sistema de fornecimento de energia. Nessa época, pesquisadores conseguiram desenvolver um sistema de transmissão de energia a distâncias maiores do que as conseguidas antes com a energia contínua, além de terem viabilizado a utilização de tensões mais elevadas nas transmissões. Por consequência, diversos equipamentos passaram a ser criados para o tipo de fornecimento alternado de corrente. Nesse período, foram feitas novas descobertas com relação à invenção do motor.

Mikhail Dolivo-Dobrovolsky foi o primeiro a desenvolver um modelo finalizado de motor de corrente alternada. Em 1889, o russo registrou a patente de um motor trifásico com potência de 80 W e rendimento de 80%. Dois anos após o registro da patente, Dolivo-

Dobrovolsky iniciou a primeira fabricação em série de motores trifásicos assíncronos nas potências de 0,4 kW a 7,5 kW, contribuindo assim para o início da utilização das máquinas elétricas na indústria (Cunha, 2009).

Atualmente, os motores elétricos são essenciais nos processos industriais, uma vez que movimentam todo tipo de máquinas e equipamentos. Estima-se que, no mundo, existam mais de 300 milhões de motores, que consomem cerca de 7 400 Terawatt-hora (TWh), o equivalente a aproximadamente 40% da produção mundial de energia elétrica (WEG, 2017). O motor de indução trifásico (MIT) é considerado o principal equipamento de transformação de energia elétrica em energia mecânica motriz (Godoy et al, 2016) e diversos motivos o tornam uma escolha viável: é uma máquina robusta, de baixo custo, fácil manutenção, elevada eficiência (quando comparado a um motor de corrente contínua, por exemplo) e adaptável a diferentes situações de carga.

1.2 – Normas Técnicas

Segundo a definição internacional, uma norma é um “documento estabelecido por consenso e aprovado por um organismo reconhecido, que fornece, para uso comum e repetitivo, regras, diretrizes ou características para atividades ou seus resultados, visando à obtenção de um grau ótimo de ordenação em um dado contexto”. A esta definição pode-se acrescentar a recomendação de que “convém que as normas sejam baseadas em resultados consolidados da ciência, tecnologia e da experiência acumulada, visando à otimização de benefícios para a comunidade”.

Em outras palavras, as normas técnicas fornecem especificações de classe mundial para produtos, serviços e sistemas, com o propósito de garantir qualidade, segurança e eficiência. Uma norma é, por princípio, de uso voluntário, mas quase sempre é utilizada por representar o consenso sobre o estado da arte de determinado assunto, obtido entre especialistas das partes interessadas.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é responsável pela elaboração das Normas Brasileiras (ABNT NBR), elaboradas por seus Comitês Brasileiros (ABNT/CB), Organismos de Normalização Setorial (ABNT/ONS) e Comissões de Estudo Especiais (ABNT/CEE).

Entidade privada e sem fins lucrativos, a ABNT é membro fundador da *International Organization for Standardization* (Organização Internacional de Normalização – ISO), da

Comisión Panamericana de Normas Técnicas (Comissão Pan-Americana de Normas Técnicas – Copant) e da *Asociación Mercosur de Normalización* (Associação Mercosul de Normalização – AMN). Desde a sua fundação, em 1940, é também membro da *International Electrotechnical Commission* (Comissão Eletrotécnica Internacional – IEC) (ABNT, 2018).

A norma que prescreve ensaios aplicáveis para a determinação das características de desempenho de motores de indução é a NBR 5383, que é dividida em duas partes:

- Parte 1: Motores de indução trifásicos – Ensaios;
- Parte 2: Motores de indução monofásicos – Ensaios.

Para verificação de conformidade, ou seja, dos requisitos básicos a serem atendidos pelos motores de indução trifásicos, existe a NBR 17094-1, intitulada “Máquinas elétricas girantes – Motores de Indução – Parte 1: Trifásicos”.

Procedimentos e normas devem ser seguidos para garantir o bom funcionamento dos motores e a segurança do pessoal envolvido na operação, evitando possíveis danos pessoais e/ou materiais.

1.3 – Objetivos do trabalho

Este trabalho fundamenta-se na implementação de uma plataforma para ensaios de motores de indução trifásicos e de cargas mecânicas.

Os ensaios com motores de indução objetivam atender às prescrições da norma NBR 5383-1:2002 através do desenvolvimento de uma metodologia que ofereça procedimentos padronizados. Entretanto, o trabalho também apresenta ensaios em condições não previstas na referida norma técnica.

Quando se estuda o acionamento de um motor de indução, por vezes se fazem necessários ensaios de simulação de carga para observar o funcionamento em situações próximas àquelas encontradas em aplicações reais. Uma carga mecânica requer determinada potência e o motor de indução deve se adequar ao perfil de carga, sem comprometer significativamente o seu desempenho.

A plataforma de ensaios permite realizar medições de tensões e correntes, velocidade, conjugado, potência, entre outras, assegurando precisão e confiabilidade, além de garantir segurança de pessoas e equipamentos durante a realização dos testes.

1.4 – Contextualização e justificativa

O setor industrial é responsável pelo consumo de boa parcela da energia produzida no país (Silva, 2012). Segundo o relatório final do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2017, a produção industrial, o transporte de cargas e a mobilidade de pessoas foram responsáveis por aproximadamente 65% do consumo nacional de energia em 2016 (BEN, 2017), conforme ilustra a Figura 1.1.

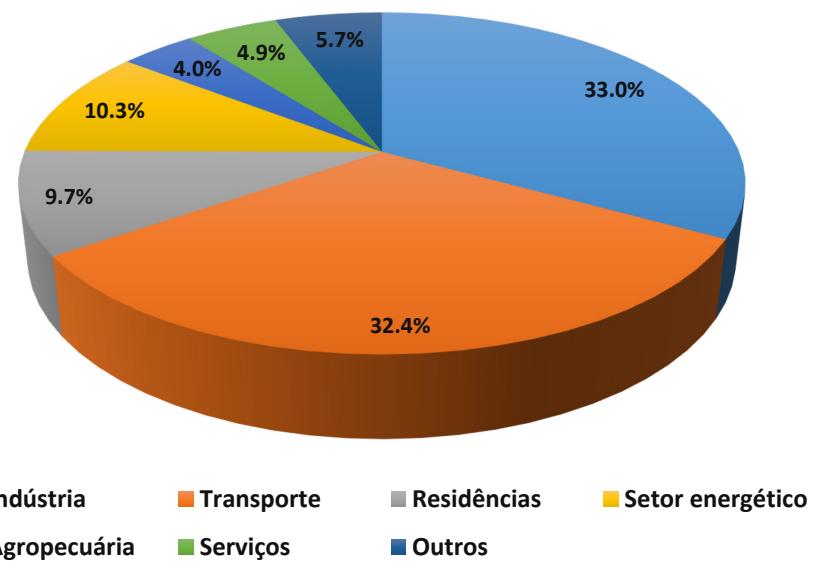


Figura 1.1 – Composição setorial do consumo de energia elétrica no Brasil no ano de 2016.

O motor de indução trifásico é utilizado em diversos setores industriais, sendo o principal elemento de conversão de energia elétrica em energia mecânica motriz. Sua popularidade se deve ao seu baixo custo e robustez (Goedtel, 2003).

Os motores elétricos de indução trifásicos são os equipamentos de uso final responsáveis por processar a maior parcela de energia elétrica. Mesmo sendo máquinas intrinsecamente eficientes, constituem-se como um grande potencial de conservação de energia, seja pela grande quantidade de motores instalados, seja pela aplicação ineficiente dos mesmos (MME, 2017).

Os motores de indução trifásicos adotam um simples, mas inteligente e eficiente sistema de conversão eletromecânica de energia. No MIT com rotor em gaiola de esquilo, o qual constitui a vasta maioria das máquinas de indução, o rotor é inacessível. Contatos móveis, tais

como o comutador e as escovas das máquinas de corrente contínua ou anéis deslizantes e as escovas nos motores e geradores síncronos não são necessários. Este arranjo eleva consideravelmente a confiabilidade dos motores de indução e elimina o risco de centelhas, permitindo que motores desse tipo sejam utilizados com segurança em ambientes agressivos, como em áreas contendo atmosfera potencialmente explosiva. Este robusto rotor pode girar em elevadas rotações e suportar grandes sobrecargas mecânicas e elétricas (Bulgarelli, 2006).

Os motores elétricos de indução possuem o rendimento influenciado por vários fatores. O superdimensionamento provoca aumento no percentual de perdas em relação ao valor nominal, o que determina uma queda no rendimento (Silva, 2012). Alinhamento inadequado de eixo e reparos executados de forma incorreta também podem alterar o valor do rendimento (Silva, 2012). Distorção harmônica e afundamentos de tensão são outros fatores que influenciam diretamente no rendimento dessas máquinas.

A necessidade crescente de busca por processos mais econômicos, com utilização racional e eficiente da energia elétrica, tem implicado na realização de estudos detalhados para a otimização dos processos industriais (Silva, 2007). As indústrias têm se esforçado para otimizar o tempo de operação dos processos produtivos e a identificação e correção de problemas elétricos e mecânicos associados às máquinas de indução são fundamentais para a elevação dos níveis de confiabilidade do sistema e para o aumento da capacidade operacional.

Em processos industriais, todos os aspectos de produção necessitam serem analisados de forma a possibilitar a produção com qualidade, segurança e a custos desejados. Os custos de investimento e de consumo de energia podem ser otimizados pela coordenação apropriada entre o motor e a carga acionada, uma vez que a menor potência possível para o motor deve ser especificada, de forma a operar no valor de eficiência mais alto possível, o que não ocorre, por exemplo, se o motor estiver superdimensionado. A seleção e a aplicação adequada dos dispositivos de proteção do motor contribuem para minimizar os custos operacionais da indústria (Bulgarelli, 2006).

Os custos de manutenção podem ser mantidos em valores mínimos pela detecção antecipada de índices que possam levar a ocorrência de falhas em motores. Nestes casos, podem ser executados serviços de manutenção com menores custos, quando comparados aos elevados custos de manutenções corretivas, onde normalmente são exigidos reparos ou substituições de equipamentos ou componentes danificados (Bulgarelli, 2006).

Os parâmetros elétricos e mecânicos das máquinas de indução podem se desviar daqueles contidos nas placas de identificação e nos manuais de fabricantes. Portanto, existe a

necessidade de se monitorar esses parâmetros periodicamente e adequar o sistema às especificações da máquina (Izhar, Ali e Nazir, 2017).

Motores que já foram rebobinados pelo menos uma vez não possuem mais as características elétricas e mecânicas originais. Tais máquinas podem ter sua eficiência comprometida, vida útil menor e gasto energético excessivo. A realização de ensaios laboratoriais é recomendada para que suas grandezas elétricas e mecânicas sejam verificadas (Rezende e Bispo, 2015).

O uso de motores eficientes pode reduzir as perdas de carga, já que menor eficiência leva a custos operacionais mais elevados. Dessa forma, testes precisos e confiáveis de motores são essenciais. Para se medir com precisão a eficiência do motor, é necessário calcular as perdas e verificar parâmetros de projeto como, por exemplo, corrente, tensão, potência, velocidade etc. (Izhar, Ali e Nazir, 2017).

O teste de motor elétrico no laboratório é essencial para a verificação do desempenho e das especificações do fabricante antes da instalação. Procedimentos de testes para máquinas de indução foram desenvolvidos ao longo dos anos e documentados em normas técnicas. Nas últimas décadas, os avanços na medição digital, o rápido processamento, os controladores e técnicas de medição mais precisas trouxeram grandes melhorias aos procedimentos de teste de motores (Ugale e Chavhan, 2016).

Dentro desse contexto, este trabalho propõe a implementação de uma plataforma para ensaios de motores de indução trifásicos acoplados a cargas mecânicas para efetuar a medição e o monitoramento de parâmetros elétricos e mecânicos e analisar o seu desempenho em situações próximas àquelas encontradas em aplicações reais. Os ensaios seguem as recomendações da norma NBR 5383-1:2002 e podem fornecer informações a respeito do desempenho da máquina, indicar melhorias nas instalações e estabelecer melhor eficiência na aplicação.

A correta seleção de um motor elétrico para determinada aplicação é fator determinante no custo de sua operação. O emprego de um motor de potência insuficiente pode levar a um funcionamento inadequado do sistema a ele acoplado, resultando em baixa produtividade ou em avarias na máquina, com redução de sua vida útil (Silva, 2015). Por outro lado, e conforme já foi mencionado, o motor com potência nominal acima da necessária, além de um custo inicial maior, resultará em uma operação com baixo rendimento.

1.5 – Apresentação do conteúdo do trabalho

O trabalho foi dividido em cinco capítulos, que abordam desde o surgimento dos primeiros motores elétricos, passando por uma descrição do princípio de funcionamento do motor de indução trifásico, até a metodologia utilizada para a realização dos ensaios e a apresentação dos resultados experimentais.

O capítulo 1 revela o surgimento dos primeiros motores elétricos, aborda a importância das normas técnicas, os objetivos do trabalho, a contextualização e a apresentação do conteúdo.

No capítulo 2 são apresentadas as especificidades dos motores de indução trifásicos: os aspectos construtivos, o princípio de funcionamento, a representação do circuito equivalente, fluxo de potência, equações características etc.

O capítulo 3 trata dos principais elementos da plataforma experimental: a bancada de ensaios, a máquina de corrente contínua e o conversor para o seu acionamento, o transdutor de torque e a fonte programável para acionamento do motor de indução trifásico.

O capítulo 4 salienta os objetivos da norma NBR 5383-1:2002, identifica e descreve os ensaios realizados, revela os procedimentos para operar a plataforma experimental, apresenta e analisa os resultados obtidos, além de mostrar as curvas de performance do motor de indução ensaiado.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões a respeito dos estudos efetuados, salientando a viabilidade da plataforma experimental para ensaios com motores de indução trifásicos, além de sugestões para trabalhos futuros.

Foram anexados ao final do trabalho um relatório com os resultados dos ensaios realizados com o motor de indução trifásico (Apêndice A), um comparativo entre ensaios realizados para obtenção de algumas grandezas e as tolerâncias estabelecidas em norma para essas grandezas (Apêndice B), as especificações elétricas e a vista das partes principais do motor ensaiado (Apêndice C) e o código-fonte para obtenção das curvas de desempenho do motor ensaiado (Apêndice D).

Capítulo 2 – O Motor de Indução Trifásico

2.1 – Aspectos construtivos

O funcionamento dos motores elétricos está associado à interação de forças de origem eletromagnética entre uma parte fixa, o estator da máquina, e uma parte móvel, chamada de rotor. A modalidade de motores elétricos mais comumente utilizada é a de motores de indução trifásicos, uma vez que são máquinas relativamente baratas e altamente confiáveis. A Figura 2.1 apresenta um motor de indução trifásico.

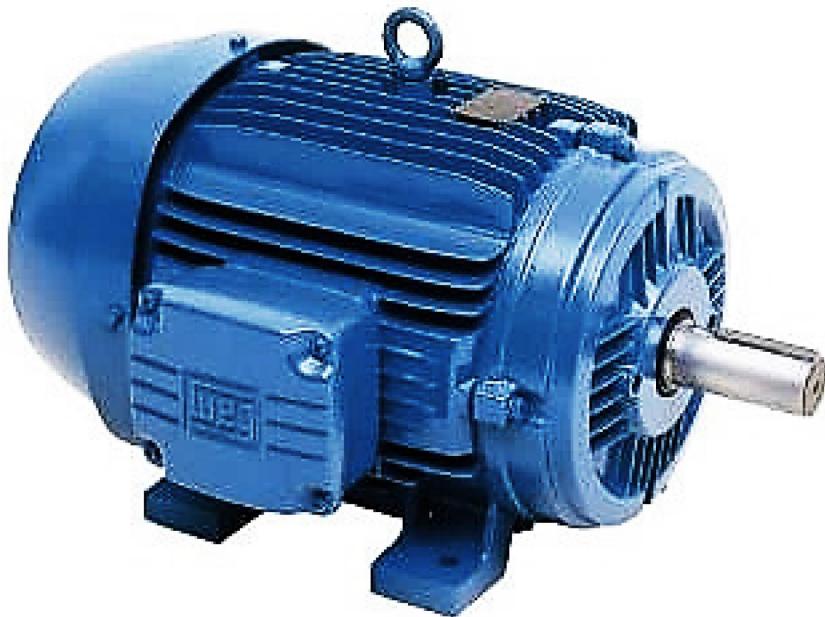


Figura 2.1 – O motor de indução trifásico.

O estator de um MIT (Figura 2.2) é estruturado utilizando-se um material ferromagnético laminado e com ranhuras para armazenar o enrolamento. As lâminas são isoladas para minimizar os efeitos das correntes parasitas e o enrolamento é trifásico, formado por três bobinas deslocadas, entre si, por 120° . A parte móvel do motor de indução pode ser do tipo rotor bobinado ou do tipo gaiola de esquilo.

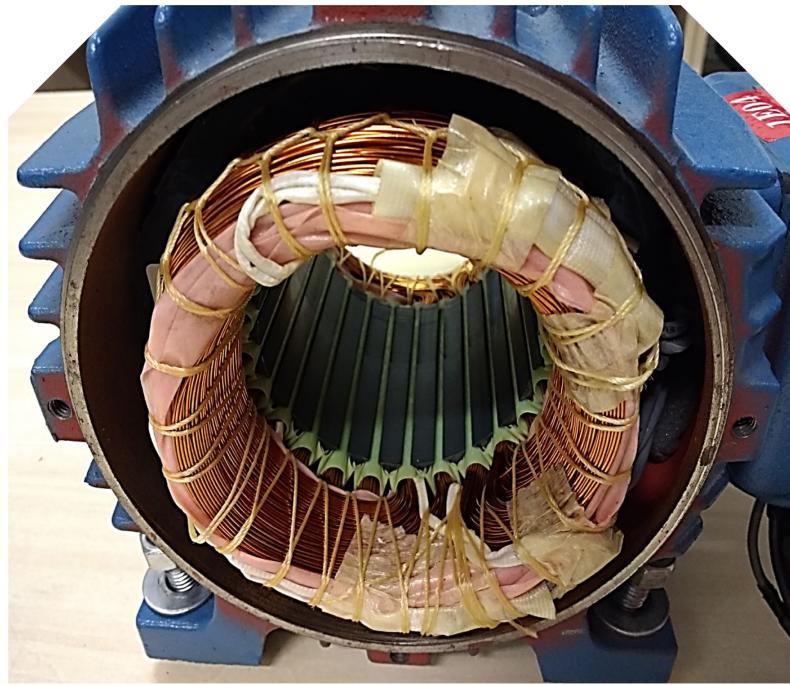


Figura 2.2 – Estrutura típica do estator de um motor de indução trifásico.

Um rotor bobinado possui um conjunto completo de enrolamentos trifásicos que são similares aos enrolamentos do estator. As terminações das três fases dos enrolamentos são conectadas a anéis deslizantes no eixo do rotor. Os enrolamentos do rotor são colocados em curto-círcuito por meio de escovas que se apoiam nos anéis deslizantes. As correntes que circulam no rotor podem ser acessadas por meio das escovas e resistências externas podem ser inseridas no circuito para modificar a característica de conjugado *versus* velocidade do motor (Chapman, 2013). Os motores de indução de rotor bobinado são utilizados apenas em aplicações específicas, pois exigem mais manutenção devido ao desgaste associado às escovas e aos anéis deslizantes, além do fato de serem mais caros. Um rotor bobinado é mostrado na Figura 2.3.

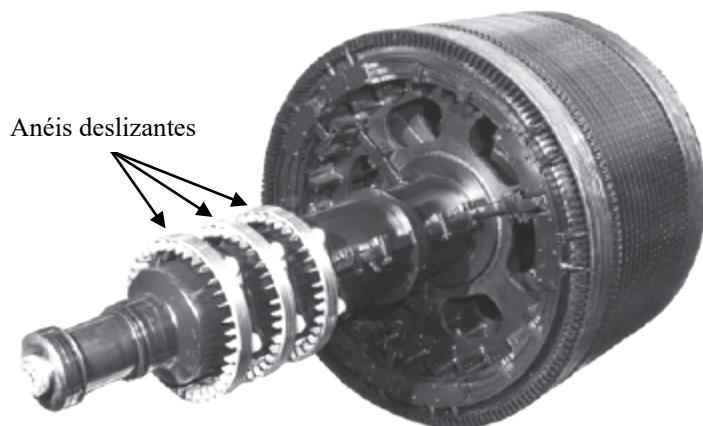


Figura 2.3 – Rotor bobinado de um motor de indução (Chapman, 2013).

O rotor em gaiola de esquilo contém uma série de barras condutoras que estão encaixadas em ranhuras no ferro do rotor e colocadas em curto-círcuito por anéis condutores em ambas as extremidades. É o tipo de rotor mais utilizado na fabricação de máquinas de indução por possuir vantagens notáveis, como a simplicidade e a robustez na sua construção. A Figura 2.4 apresenta a forma típica de um rotor em gaiola.



Figura 2.4 – Rotor em gaiola de esquilo.

2.2 – Princípio de funcionamento

Na condição de que correntes trifásicas equilibradas percorram as bobinas do estator de um motor de indução trifásico, ocorrerá a formação de um campo magnético girante, de velocidade e amplitude constantes. O campo girante do estator “corta” os condutores do rotor, induzindo correntes que reagem com o campo para produzir um conjugado eletromagnético. O sentido desse conjugado é sempre fazer com que o rotor gire na mesma direção do campo do estator, tentando se alinhar com este.

A velocidade de rotação do campo magnético girante é denominada velocidade síncrona, e pode ser descrita de seguinte forma:

$$n_s = \frac{120}{p} \cdot f \quad (2.1)$$

Onde:

n_s – Velocidade síncrona (rpm).

f – Frequência de alimentação (Hz).

p – Número de polos da máquina.

O rotor do MIT tenta se alinhar com o campo do estator e a velocidade aumenta até que seja produzida a corrente necessária para vencer o conjugado resistente. Se não houver carga conectada no eixo, esse conjugado consiste principalmente em perdas por atrito (Del Toro, 1999). Uma vez que a corrente do rotor é produzida por indução, existe uma diferença de velocidade entre o campo do estator e o rotor. Essa diferença de velocidade é chamada de escorregamento e pode ser expressa em porcentagem da velocidade síncrona:

$$s\% = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \quad (2.2)$$

Onde:

s – Escorregamento.

n_s – Velocidade síncrona (rpm).

n – Velocidade de rotação do rotor ou velocidade mecânica (rpm).

A frequência das correntes induzidas no rotor está diretamente relacionada com a velocidade relativa entre o campo do estator e o rotor e é usualmente chamada de frequência de escorregamento (f_r), sendo escrita como

$$f_r = s \cdot f \quad (2.3)$$

O motor de indução trifásico pode ser então analisado de forma generalizada como um transformador, onde existe transformação de potência elétrica entre o estator e o rotor, ocorrendo modificação de frequência e o aparecimento de uma potência mecânica (Umans, 2014).

2.3 – Característica de partida

Em motores de indução, a característica de partida (condição em que a máquina passa do estado de repouso para a velocidade de regime permanente) pode ser descrita pela curva do

conjugado em função da velocidade. O conjugado pode ser definido também como o momento de uma força associado ao movimento de rotação de um determinado corpo.

O conhecimento da característica de partida de um MIT permite determinar a velocidade com a qual um motor aciona uma determinada carga, bastando, para isso, colocar em interseção a sua respectiva curva característica e a característica de conjugado (de reação) por velocidade da carga.

A norma NBR 17094-1:2008 apresenta características de partida aplicáveis a cinco categorias de motores de indução trifásicos, cada uma adequada a um tipo de carga: N, H, D, NY e HY. A Figura 2.5 mostra a representação típica da característica de partida de um motor de indução trifásico da categoria N, que é a categoria do MIT analisado no presente trabalho.

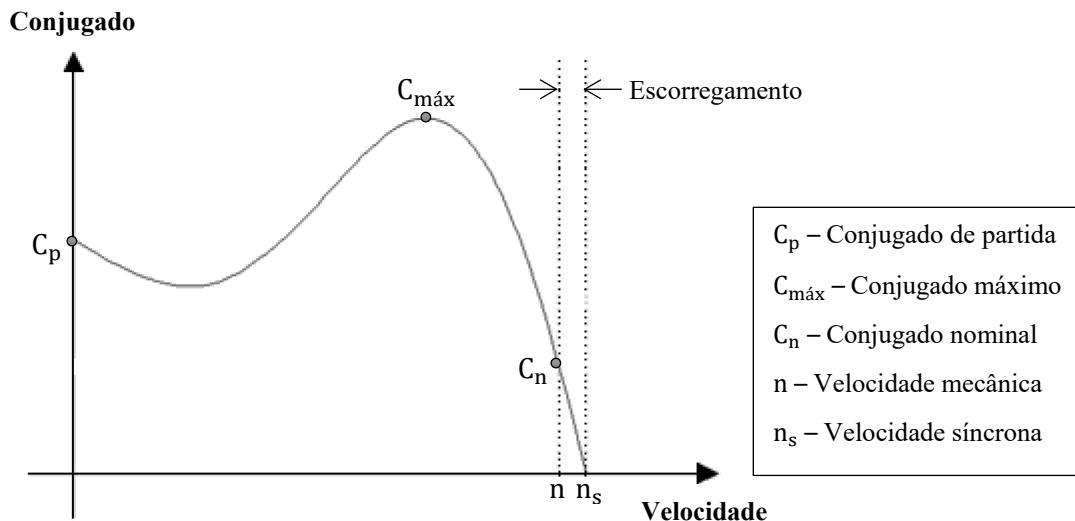


Figura 2.5 – Curva característica de conjugado *versus* velocidade para motor de indução trifásico de categoria N.

O motor de indução possui conjugado igual a zero na velocidade síncrona. À medida que a carga vai aumentando, a velocidade do motor diminui gradativamente, até atingir o valor nominal. Caso a carga exija um conjugado maior do que a especificação nominal (C_n) do motor, este irá encontrar-se em situação de sobrecarga.

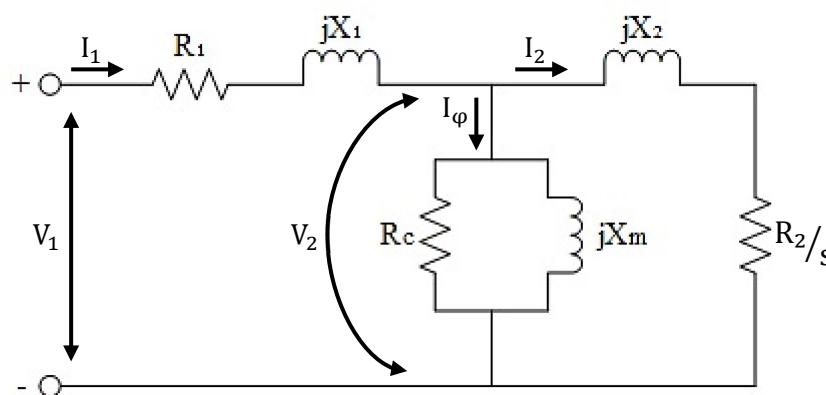
O conjugado de partida deve ser o mais elevado possível, para que o rotor consiga vencer a inércia inicial da carga e possa acelerar rapidamente, principalmente em partidas com tensão reduzida.

O conjugado máximo também deve ser elevado, uma vez que a máquina deve manter o seu desempenho no caso de eventuais picos de carga ou quando ocorrerem quedas momentâneas de tensão.

2.4 – Circuito equivalente

O motor de indução é chamado de máquina de excitação simples, uma vez que a potência é fornecida apenas ao circuito de estator. Portanto, o circuito equivalente de um MIT pode ser obtido empregando-se a teoria de transformadores e introduzindo as modificações necessárias para considerar o fato de que o circuito do rotor opera em frequência diferente daquela do estator em função da diferença de velocidade entre o rotor e o campo magnético produzido no estator.

Todos os parâmetros do circuito equivalente são expressos por fase, independentemente do tipo de ligação (estrela ou delta), partindo do pressuposto de que o enrolamento é simétrico e a máquina é alimentada com tensões trifásicas equilibradas. A determinação dos valores dos parâmetros do circuito equivalente pode ser feita através de um ensaio em vazio, de um ensaio com rotor bloqueado e das medições das resistências CC dos enrolamentos do estator. O circuito equivalente monofásico de um MIT é mostrado na Figura 2.6.



R_1 – Resistência efetiva do estator
 X_1 – Reatância de dispersão do estator
 R_c – Resistência de perdas no núcleo
 X_m – Reatância de magnetização
 R_2 – Resistência do rotor
 X_2 – Reatância de dispersão do rotor
 s – Escorregamento

Figura 2.6 – Circuito equivalente monofásico de um motor de indução trifásico.

2.5 – Fluxo de potência e perdas

O estator do MIT recebe da rede elétrica a potência de entrada, que será convertida em potência mecânica de saída, que é a potência fornecida ao eixo da máquina. Se toda a potência de entrada fosse transferida ao eixo, a eficiência da transformação seria de 100%. Porém, em qualquer sistema de transformação, parte da energia é dissipada, o que implica em perda de potência. As perdas definem o rendimento da máquina e influenciam de forma significativa em seu funcionamento.

O rendimento (ou eficiência) de um motor de indução trifásico pode ser definido como sendo a relação entre a potência mecânica de saída e a potência elétrica de entrada, conforme mostrado na equação 2.3:

$$\eta_{\%} = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \cdot 100 \quad (2.3)$$

Em um motor de indução, as perdas internas são separadas em fixas e variáveis, sendo que estas últimas dependem do percentual de carga no eixo da máquina. A Tabela 2.1 apresenta as perdas típicas que ocorrem no MIT e resume as principais causas que as provocam.

As primeiras perdas encontradas em uma máquina de indução são as perdas nos enrolamentos do estator. Ainda no estator, certa quantidade de potência é perdida no ciclo de histerese e em função da circulação de correntes parasitas. A potência remanescente é transferida ao rotor da máquina através do entreferro. Após a transferência, parte da potência é eliminada nos condutores do rotor e o restante é convertido da forma elétrica para a forma mecânica. Por fim, as perdas por atrito e ventilação e as perdas suplementares são subtraídas e a potência restante é a potência de saída do motor. A Figura 2.7 mostra o fluxo de potência através do MIT.

Tabela 2.1 – Classificação das perdas em um motor de indução trifásico.

Tipo	Perda	Descrição
Fixas	Perdas no núcleo	Perdas que ocorrem nos volumes magnéticos do estator e do rotor em virtude de fenômenos de histerese e de correntes parasitas.
	Perdas mecânicas	Perdas correspondentes ao atrito nos mancais ou nos rolamentos e à resistência do ar à movimentação do rotor.
Variáveis	Perdas por efeito Joule no estator	Perdas que ocorrem em função da circulação de correntes nos condutores dos enrolamentos do estator.
	Perdas por efeito Joule no rotor	Perdas que ocorrem em função da circulação de correntes nos condutores do rotor.
	Perdas suplementares	Perdas que levam em consideração fenômenos tais como a distribuição não uniforme dos enrolamentos, imperfeições nas ranhuras do estator e do rotor e perdas ocorridas em função do campo magnético de dispersão.

As perdas no núcleo de um MIT são parcialmente provenientes do circuito do estator e parcialmente do circuito do rotor. Como o motor de indução funciona normalmente com uma velocidade próxima da velocidade síncrona, o movimento relativo dos campos magnéticos sobre a superfície do rotor é muito lento e as perdas no núcleo do rotor são muito pequenas se comparadas com as perdas no núcleo do estator (Chapman, 2013).

Quanto maior a velocidade de um motor de indução, maiores serão as perdas mecânicas e as perdas suplementares. Em contrapartida, menores serão as perdas no núcleo. Algumas vezes, essas três categorias de perdas são combinadas (na literatura) e denominadas perdas rotacionais.

Atualmente, motores de indução de alto rendimento são produzidos e diversas técnicas são utilizadas para aumentar a eficiência desses motores em comparação com os motores tradicionais. A colocação de maior quantidade de aço e de cobre na construção do estator, o aumento do comprimento dos núcleos do estator e do rotor e o cuidado para a formação de um entreferro uniforme são algumas das estratégias que permitem a redução das perdas e, consequentemente, a elevação da eficiência.

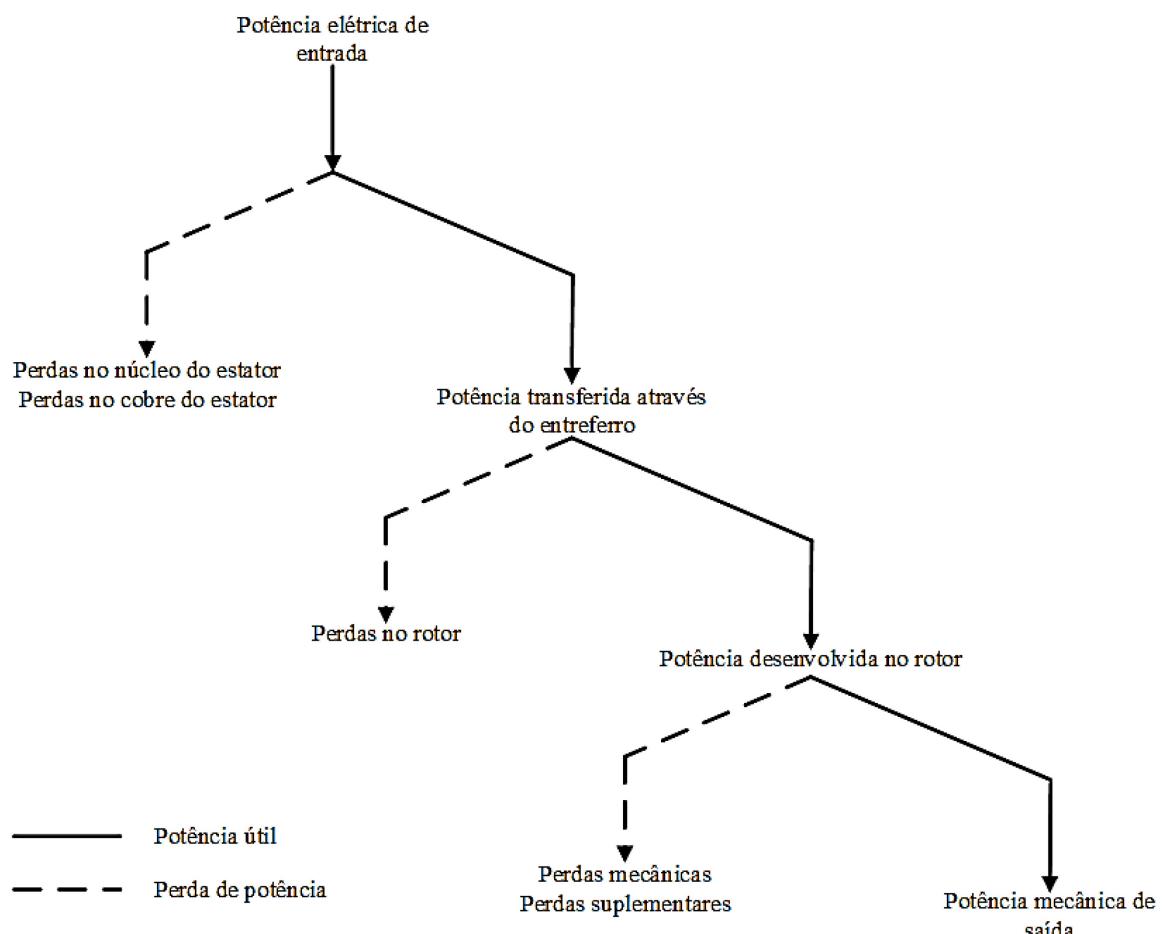


Figura 2.7 – Diagrama de fluxo de potência.

2.6 – Especificações nominais

Os motores de indução trifásicos possuem uma placa de identificação que indica os valores para os quais o motor foi projetado para operar. Isso não significa que o motor esteja impedido de operar fora dos valores especificados. No entanto, quando isso ocorre, o motor pode se encontrar em uma situação de sobrecarga ou pode estar superdimensionado.

O conhecimento dos dados de placa é importante para determinar a aplicação e para a verificação das condições de funcionamento das máquinas elétricas. No Brasil, os dados de placa seguem as recomendações da NBR 17094-1 e as informações mais importantes presentes nas placas de identificação são:

- Potência de saída;
- Tensão;
- Corrente;
- Fator de potência;
- Velocidade ou rotação;
- Rendimento;
- Esquema de ligação.

Uma placa de identificação é mostrada na Figura 2.8. A placa de identificação apresenta também informações relevantes que levam em consideração o ambiente em que a máquina será instalada e o comportamento da carga a ser acionada. Entre estas informações estão a classificação térmica, o regime de serviço e o fator de serviço, que recebem destaque neste trabalho por conta da sua relevância na realização dos ensaios.

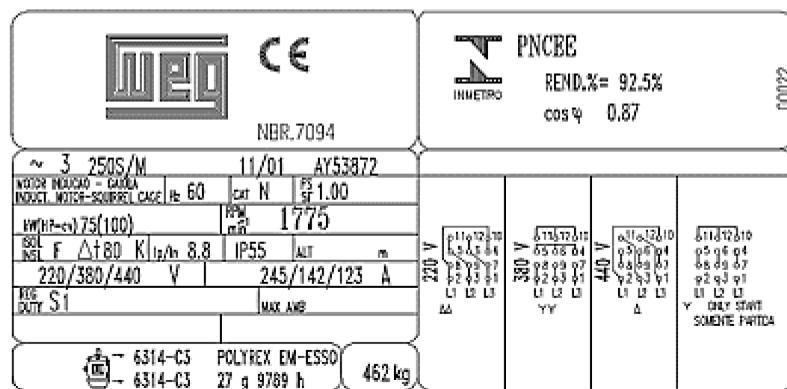


Figura 2.8 – Placa de identificação de um motor de indução trifásico (SELEMEC, 2018).

2.6.1 – Classificação térmica

A classificação térmica aparece na placa de identificação com a nomenclatura ISOL para indicar a máxima temperatura suportada pelos isolantes, de acordo com a classe. Sendo o motor de indução uma máquina robusta e de construção simples, a sua vida útil depende quase que exclusivamente da vida útil da isolação dos enrolamentos. Um aumento de 8 a 10 graus acima da classe térmica na temperatura da isolação pode reduzir a vida útil do bobinado pela metade (WEG, 2017).

A durabilidade da isolação de um dispositivo eletromecânico é afetada por fatores tais como temperatura, esforços elétricos e mecânicos, vibração, atmosfera agressiva, umidade, entre outros.

Como a temperatura é frequentemente o fator predominante para o envelhecimento do material isolante e do sistema de isolação, estabelecer certas classificações térmicas se torna necessário. Especifica-se, então, que em um dispositivo eletromecânico a classe térmica representa a temperatura máxima que o equipamento pode atingir no seu ponto mais quente, ao operar com carga nominal.

A potência útil fornecida no eixo pelo motor é menor do que a potência que a máquina absorve da rede elétrica. Essa diferença entre as potências representa as perdas internas, que são transformadas em calor, o qual aquece o enrolamento e deve ser dissipado para fora do motor, para evitar elevação excessiva de temperatura.

O calor gerado pelas perdas no interior da máquina precisa ser dispersado para o ar ambiente através da superfície externa da carcaça. Em motores fechados, essa dispersão normalmente é auxiliada por um ventilador colocado no próprio eixo do motor. Um sistema de ventilação bem projetado, além de incluir um ventilador eficiente, capaz de movimentar grande volume de ar, deve direcionar esse ar de modo a “varrer” toda a superfície da carcaça, que é onde se dá a troca de calor (WEG, 2017).

2.6.1.1 – *Classes de isolamento*

O limite de temperatura de um equipamento eletromecânico depende do material utilizado. Para fins de normalização, os materiais isolantes e os sistemas de isolamento (cada um formado pela combinação de vários materiais), são agrupados em classes de isolamento, cada qual definida pelo respectivo limite de temperatura.

A Tabela 2.2 apresenta composição de temperatura admissível, de acordo com as classes de isolamento utilizadas em máquinas elétricas e os respectivos limites de temperatura.

Tabela 2.2 – Composição da temperatura em função da classe de isolamento (WEG, 2017).

Classe de isolamento	A	E	B	F	H
Temperatura ambiente	40 °C				
Elevação de temperatura (Δt)	60 °C	75 °C	80 °C	105 °C	125 °C
Diferença entre o ponto mais quente e a temperatura média	5 °C	5 °C	10 °C	10 °C	15 °C
Total (temperatura do ponto mais quente)	105 °C	120 °C	130 °C	155 °C	180 °C

A temperatura do ponto mais quente do enrolamento deve ser mantida abaixo do limite da classe. A temperatura total é igual à soma da temperatura ambiente com a elevação de temperatura mais a diferença existente entre a temperatura média do enrolamento e a temperatura do ponto mais quente. Esta última fica limitada, com base na norma, de acordo com as seguintes considerações:

- A temperatura ambiente será, no máximo, 40 °C e acima desse valor as condições de trabalho serão consideradas especiais;
- A diferença entre a temperatura média e a temperatura do ponto mais quente não varia muito de motor para motor e o seu valor estipulado em norma, com base na experiência prática, é de 5 °C para as classes A e E, e de 10 °C para as classes B, F e H.

2.6.1.2 – *Medição da elevação de temperatura do enrolamento*

Medir a elevação de temperatura do enrolamento de um motor não é um trabalho tão simples. Se forem utilizados termômetros ou termopares, não haverá como afirmar se a temperatura indicada corresponde à do ponto mais quente, uma vez que esta varia de um ponto a outro no interior da máquina.

Um método considerado preciso e confiável para se determinar essa temperatura é através da variação da resistência ôhmica, que dispõe da propriedade dos condutores de variar a sua resistência, segundo uma lei conhecida. A elevação de temperatura pelo método da resistência pode ser calculada por meio da seguinte expressão:

$$\Delta t = t_2 - t_a = \frac{R_b - R_a}{R_a} \cdot (k + t_1) + t_1 - t_a \quad (2.4)$$

Onde:

Δt – Elevação de temperatura.

t_1 – Temperatura do enrolamento antes do ensaio.

t_2 – Temperatura do enrolamento no final do ensaio.

t_a – Temperatura do meio refrigerante no final do ensaio.

R_a – Resistência do enrolamento antes do ensaio.

R_b – Resistência do enrolamento no final do ensaio.

k – Igual a 234,5 para cobre eletrolítico com 100% de condutividade.

2.6.2 – Regime de serviço

O regime de serviço define o tipo de regime no qual o motor irá trabalhar, de acordo com o comportamento da carga acionada. A NBR 17094-1:2008 estabelece 10 tipos de regime de serviço, designados pelas siglas S1 a S10, conforme mostra a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Regimes de serviço.

Regime tipo	Característica
S1	Regime contínuo
S2	Regime de tempo limitado
S3	Regime intermitente periódico
S4	Regime intermitente periódico com partidas
S5	Regime intermitente periódico com frenagem elétrica
S6	Regime de funcionamento contínuo e periódico com carga intermitente
S7	Regime de funcionamento contínuo e periódico com frenagem elétrica
S8	Regime de funcionamento contínuo e periódico com mudanças correspondentes de carga e de velocidade
S9	Regime com variações não periódicas de carga e de velocidade
S10	Regime com cargas e velocidades constantes distintas

As cargas mecânicas que os motores elétricos acionam não são necessariamente constantes durante todo o tempo de operação. Os motores podem sofrer diferentes solicitações da carga, como partidas e/ou reversões de velocidade e frenagens.

Imprecisões de carga podem provocar elevação de temperatura acima daquela permitida pelo motor, bem como produzir esforços mecânicos danosos. Dessa forma, é de grande importância o conhecimento do regime de serviço, uma vez que através dele é possível especificar o motor mais adequado à aplicação.

2.6.3 – Fator de serviço

O fator de serviço é um multiplicador que, aplicado à potência nominal indica a carga suportável que pode ser aplicada continuamente sob condições especificadas. Em outras palavras, trata-se de uma reserva de potência que permite que o motor suporte melhor o funcionamento em condições desfavoráveis.

Não se deve confundir o fator de serviço com capacidade de sobrecarga contínua, uma vez que a sua utilização nesse regime pode reduzir em até 50% a vida útil da isolação, comparado à condição de carga nominal.

Capítulo 3 – Elementos da plataforma de ensaios

3.1 – Bancada de ensaios

A plataforma experimental foi desenvolvida de forma a viabilizar a análise do desempenho de motores de indução trifásicos acionando cargas mecânicas. Com a finalidade de facilitar a manipulação de todos os equipamentos necessários à realização do trabalho, toda a planta foi acomodada em uma bancada projetada para esse estudo. A bancada conta com os principais dispositivos de proteção contra eventuais falhas que possam ocorrer durante a realização dos ensaios.

A base estrutural metálica da bancada foi idealizada para ensaios de motores com potências de até 5 cv com diversos tipos de carcaças, uma vez que ela permite o ajuste de posicionamento do motor sob teste de acordo com o seu tamanho. A base possui chapas de aço carbono com espessura de meia polegada, cuja finalidade é reduzir a vibração do sistema quando em funcionamento.

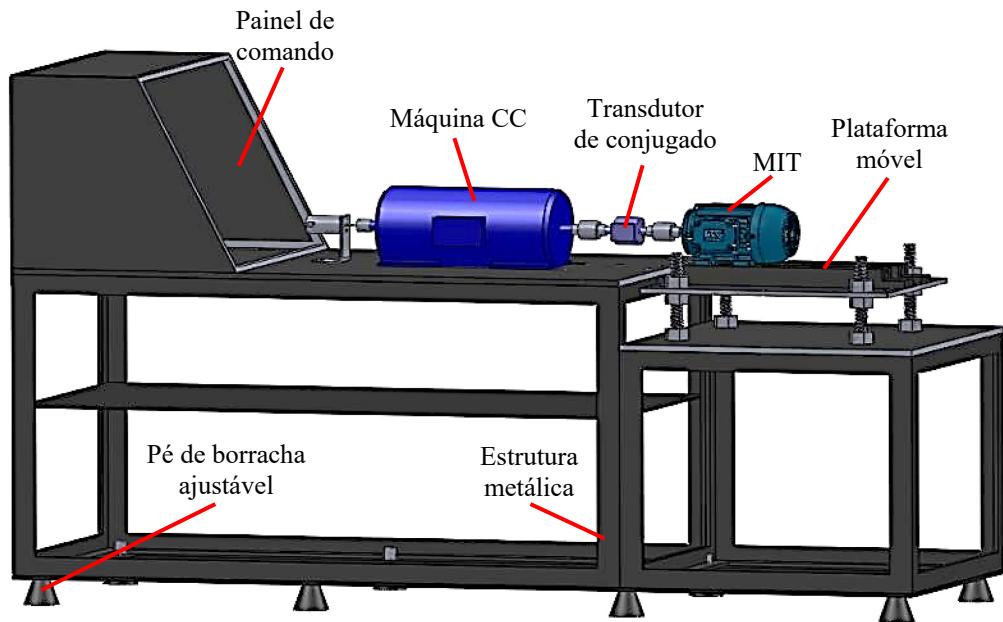


Figura 3.1 – Desenho da base estrutural da bancada.

A bancada permite a conexão dos eixos das máquinas com diferentes alturas por meio de uma plataforma móvel regulada, onde a máquina sob teste estará afixada. A estrutura possui

pés de borracha ajustáveis para um melhor alinhamento com o piso, de forma a compensar pequenos desníveis.

O projeto da bancada de testes foi desenvolvido através do *software* SolidWorks. A Figura 3.1 apresenta esse desenho, além de alguns dos principais componentes que integram a plataforma experimental.

O painel de comando da bancada de ensaios foi desenvolvido levando-se em consideração a segurança para o usuário. Ele conta com botões de emergência que podem ser utilizados em uma eventual necessidade, desligando totalmente a bancada da rede elétrica. A disposição dos elementos no painel da bancada foi elaborada de forma didática, para que o usuário encontre com facilidade as informações necessárias no momento dos ensaios (Oliveira, 2015). A Figura 3.2 apresenta o painel de comando da bancada.

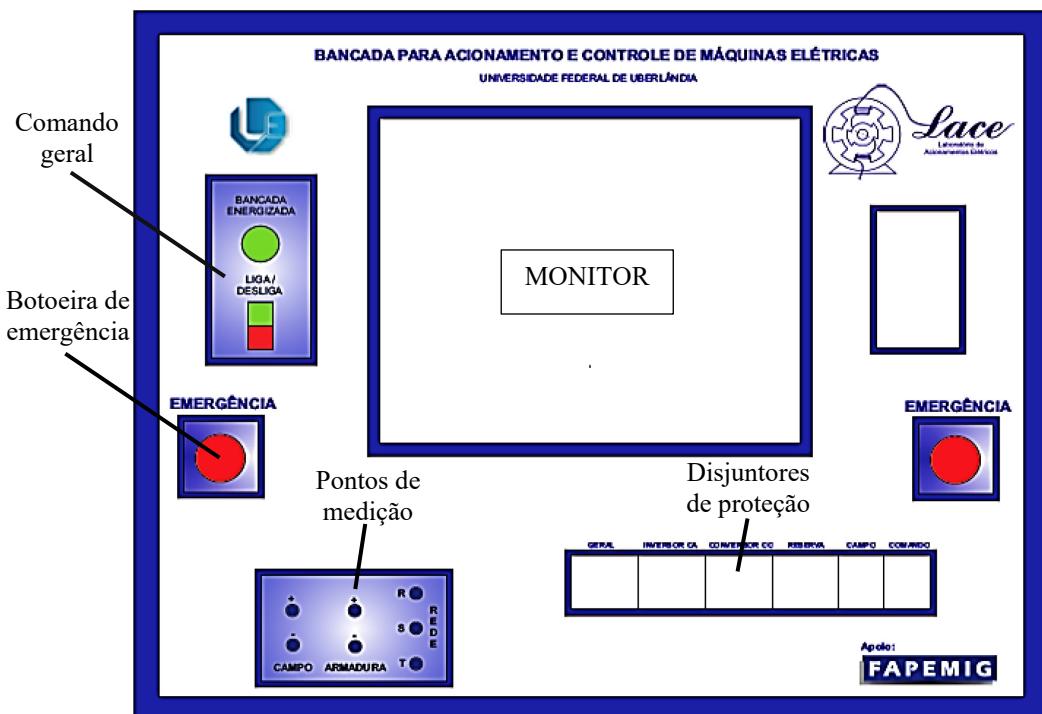


Figura 3.2 – Painel de comando da bancada.

3.2 – Máquina de corrente contínua

As máquinas de corrente contínua (MCC) caracterizam-se por sua versatilidade. Por meio das diversas combinações, elas podem apresentar uma ampla variedade de características de tensão *versus* corrente ou de conjugado *versus* velocidade para operações dinâmicas e em

regime permanente. Devido à facilidade com que podem ser controlados, sistemas de máquinas CC têm sido utilizados com frequência em aplicações que exigem ampla faixa de velocidades ou controle preciso do conjugado do motor.

Recentemente, a tecnologia de estado sólido que é utilizada nos acionamentos em corrente alternada desenvolveu-se o suficiente para que esses sistemas estejam substituindo as máquinas CC em aplicações quase que exclusivamente relacionadas a estas. Entretanto, a flexibilidade das máquinas CC, associada à simplicidade de seus sistemas de acionamento, irá assegurar o seu uso continuado em uma ampla variedade de aplicações (Umans, 2014).

O enrolamento de campo da MCC pode ser conectado de diferentes maneiras em relação ao enrolamento de armadura e cada configuração possui vantagens e desvantagens. Os sistemas de excitação podem ser:

- Em série: as correntes de campo e de armadura são iguais;
- Em paralelo: a tensão de campo e a tensão de terminal de armadura são iguais;
- Composta: utiliza conexão série e conexão paralela;
- Independente: os enrolamentos de campo e de armadura possuem alimentação separada.

A configuração em série foi, historicamente, a mais utilizada devido ao seu alto conjugado de partida. Com a evolução dos conversores eletrônicos de potência, a configuração independente tem sido empregada devido à maior facilidade na implementação de estratégias de controle (Pomilio, 2014).

A Figura 3.3 mostra o diagrama esquemático de um motor de corrente contínua com excitação independente, mostrando tanto suas variáveis elétricas quanto mecânicas. No circuito de armadura estão representados a tensão nos terminais da armadura (V_t), a corrente de armadura (I_a), a resistência de armadura (R_a), a indutância de armadura (L_a) e a força contra eletromotriz de armadura (E_g). Já no circuito de campo estão expressas: a tensão nos terminais do enrolamento de campo (V_f), a corrente de campo (I_f), a resistência (R_f) e a indutância de campo (L_f).

Ainda na Figura 3.3, estão representadas as variáveis mecânicas, para indicar que o eixo do motor gira na velocidade angular ω produzindo um conjugado T sobre uma inércia J , que produz um conjugado de oposição ao movimento T_w , sujeito a um atrito viscoso b .

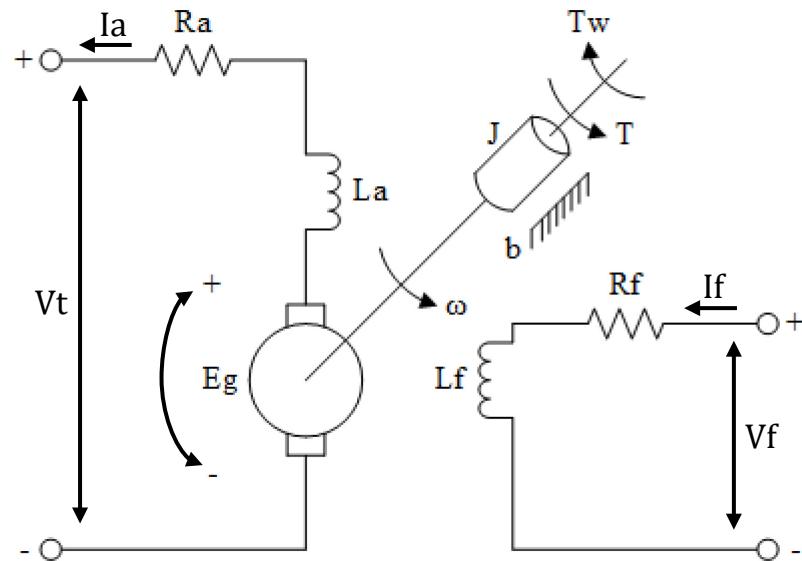


Figura 3.3 – Representação esquemática de uma MCC com excitação independente.

O acionamento da máquina de corrente contínua em processos industriais é feito usualmente por meio do controle da tensão nos terminais da armadura, uma vez que essa estratégia permite ajustes relativamente rápidos, além de possibilitar o controle do conjugado através do controle da corrente de armadura.

Considerando-se o fluxo constante e utilizando as equações estáticas e dinâmicas da máquina e a transformada de Laplace é possível encontrar o diagrama de blocos que representa uma MCC de excitação independente, conforme demonstrado na Figura 3.4.

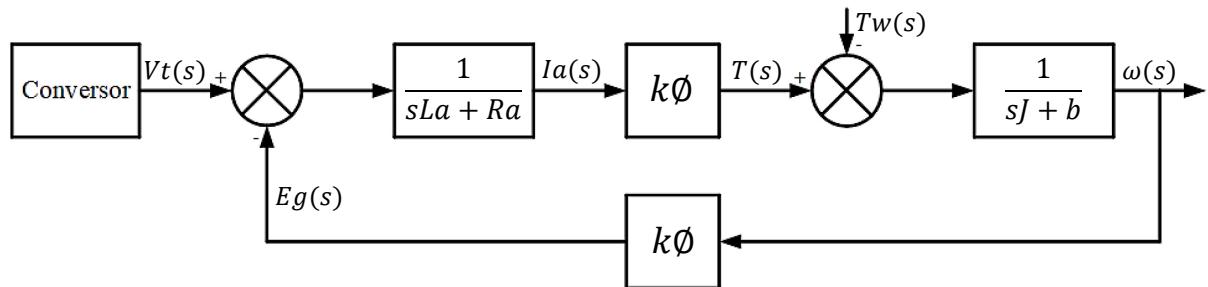


Figura 3.4 – Diagrama em blocos de uma MCC com excitação independente.

A análise do diagrama de blocos da Figura 3.4 permite concluir que a corrente de armadura da MCC de excitação independente pode ser expressa da seguinte forma:

$$Ia(s) = \frac{Vt(s) - k\emptyset\omega(s)}{sLa + Ra} \quad (3.1)$$

Onde:

k – Constante determinada pelas características construtivas da máquina.

\emptyset – Fluxo de entreferro.

A Equação 3.1 revela que a corrente de armadura é dependente do valor da tensão aplicada nos terminais de armadura e também do valor da velocidade no eixo da máquina. Para uma dada velocidade, o controle de corrente pode ser feito através de um conversor conectado aos terminais de armadura.

Os acionamentos de corrente contínua, compostos por conversores e motor, possuem excelentes propriedades técnicas de comando e regulação, garantindo regulagem precisa de velocidade, aceleração constante e ampla sob qualquer condição de carga, aceleração e/ou desaceleração controlada e conjugado constante com controle pela armadura (WEG, 2016).

A máquina de corrente contínua que integra a plataforma de ensaios será utilizada como carga mecânica para o motor de indução trifásico, funcionando, dessa forma, como um gerador que fornece corrente para um banco de resistências. As principais configurações da MCC estão colocadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Principais configurações da MCC.

Fabricante	LAVILL
Potência	3,3 kW (4,5 cv)
Velocidade	3600 rpm
Tensão de campo	180 V
Tensão de armadura	180 V
Corrente de armadura	20,4 A
Regime de serviço	S1

3.3 – Conversor CC-CC classe E

O conversor CC-CC classe E opera nos quatro quadrantes do plano conjugado *versus* velocidade e a sua topologia está representada na Figura 3.5. A operação em quatro quadrantes permite aceleração e frenagem nos dois sentidos de rotação da máquina.

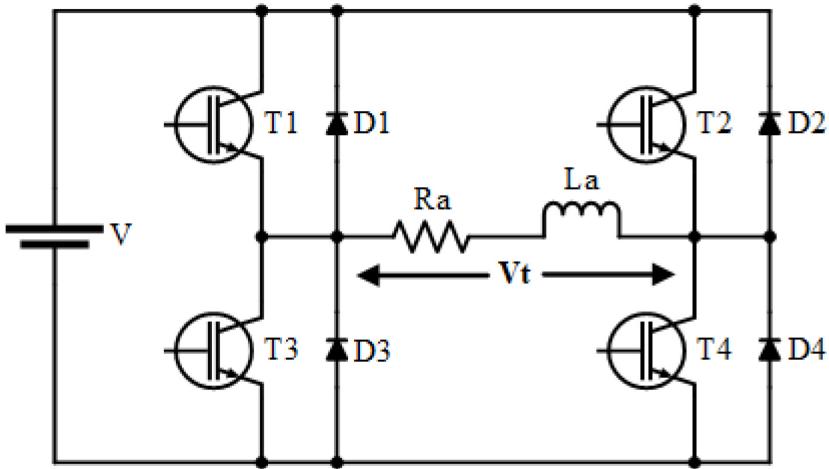


Figura 3.5 – Topologia de um conversor CC-CC classe E.

O par de transistores T1-T4 ou o par T2-T3 será acionado simultaneamente. Quando um par é desligado, a continuidade da corrente se dá pela condução dos diodos em antiparalelo com o outro par, fazendo com que a tensão sobre os terminais da MCC se inverta. O retorno de energia para a fonte se dá pela absorção da energia acumulada na indutância de armadura e não pela diminuição da energia presente na massa girante acoplada ao eixo da máquina (Pomilio, 2014).

O acionamento no primeiro e segundo quadrantes é feito quando se aplica sinal de comando simultâneo a T1 e T4, com T2 e T3 desligados. De forma equivalente, a operação no terceiro e quarto quadrantes se dá quando um sinal de comando é aplicado a T2 e T3, deixando T1 e T4 desligados. A Figura 3.6 mostra as regiões de acionamento da MCC.

As características básicas do conversor CC-CC utilizado na plataforma experimental para controle da MCC são apresentadas na Tabela 3.2. Cada braço do conversor é composto por quatro chaves semicondutoras, que são IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), com o propósito de reduzir a corrente que circula através das mesmas. O conversor possui, então, o dobro de chaves em relação à topologia apresentada na Figura 3.5. O módulo (Figura 3.7) do conversor contém ainda o circuito *driver* para disparo das chaves, um sistema de dissipação de calor com aletas metálicas e um *cooler* para refrigeração.

A modulação por largura de pulso (*PWM – Pulse Width Modulation*) é a estratégia utilizada para o chaveamento do conversor. Assim, a tensão média é alterada de acordo com o intervalo de tempo no qual as chaves permanecem ligadas.

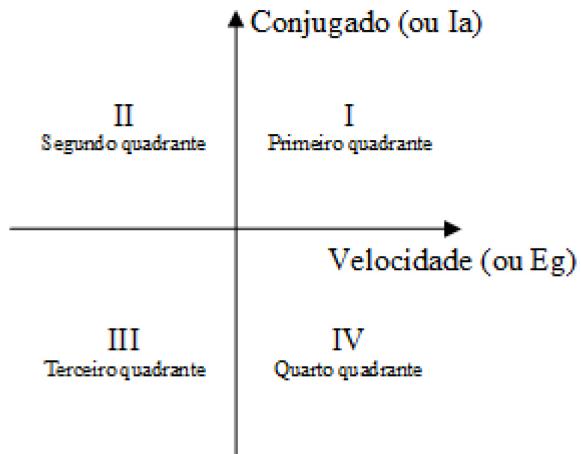


Figura 3.6 – Regiões de açãoamento da MCC.

O sentido de rotação da máquina de corrente contínua será determinado de acordo com quais chaves semicondutoras serão acionadas. Esta seleção é feita por meio do circuito integrado multiplexador CD4053, que envia o sinal PWM para chaveamento de acordo com o sentido selecionado.

Tabela 3.2 – Características básicas do conversor CC-CC.

Fabricante	SEMIKRON
Modelo	SKS 40F B2CI 06 V6
Corrente de saída – I_{rms}	40 A
Tensão de saída – $V_{out}(V_{dc})$	240 V (310 V)
Frequência de chaveamento	20 kHz

O sinal PWM será obtido através do circuito integrado SG3524 no qual, através de um arranjo com resistores e capacitores em seus pinos, a frequência poderá ser ajustada e a largura de pulso alterada de acordo com uma tensão de referência (Marins, 2014). A placa de circuitos contendo o SG3524 e o CD4053 é mostrada na Figura 3.8.



Figura 3.7 – Módulo conversor CC-CC SEMIKRON (Marins, 2014).

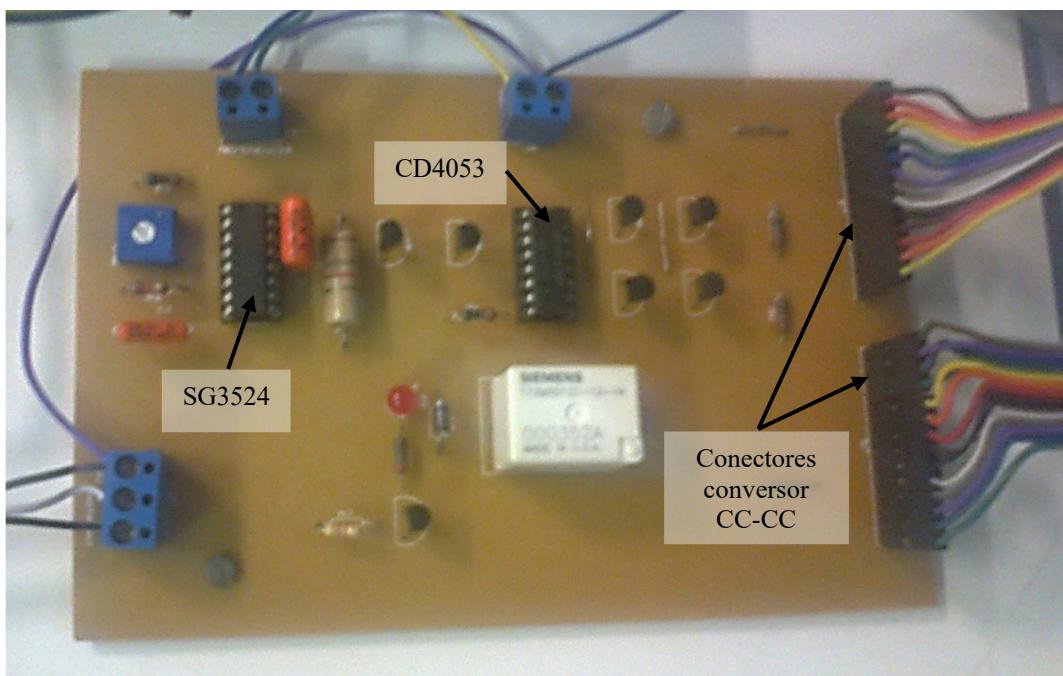


Figura 3.8 – Placa geradora de sinal PWM (Marins, 2014).

3.4 – Transdutor de conjugado

O transdutor de conjugado utilizado é o modelo T22 da Figura 3.9, do fabricante HBM. Esse transdutor é capaz de medir conjugado dinâmico e estático, possui fundo de escala de até 50 N.m (positivo ou negativo) e produz na saída um sinal de tensão CC de -5 V a $+5\text{ V}$, proporcional ao conjugado. O conjugado médio é calculado utilizando-se a seguinte equação:

$$C_{médio} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_c \cdot c_i \quad (3.2)$$

Onde:

K_c – Fator de escala para o conjugado.

c_i – Valor instantâneo do conjugado para a amostragem i .



Figura 3.9 – Transdutor de conjugado T22 da HBM.

3.5 – Fonte Programável

A fonte programável que integra a plataforma experimental (Figura 3.10) é desenvolvida pela AMETEK Programmable Power, indústria localizada em San Diego, Califórnia. É um equipamento de alta eficiência que fornece uma saída precisa, com baixa distorção. O modelo CSW5550 da marca California Instruments permite conexão em paralelo com até oito módulos do mesmo modelo para aumentar a potência de saída. O dispositivo possui ainda as interfaces remotas GPIB, RS232 e USB. As principais características da fonte programável são apresentadas na Tabela 3.3.



Figura 3.10 – Fonte programável CSW11100 (destaque para o display do painel frontal).

A programação da fonte pode ser feita através do teclado do painel frontal ou por meio de um *software*. Neste último caso, o fabricante fornece duas opções de interface para o sistema operacional Windows. A programação via *software* oferece as vantagens do armazenamento das configurações e dos dados de leitura em arquivos. A Figura 3.11 apresenta a interface principal da fonte programável.

Tabela 3.3 – Principais características da fonte programável.

Fabricante	AMETEK Programmable Power
Marca	California Instruments
Modelo	CSW11100
Tensão de saída (CA ou CC)	0-156 V _{rms} (FN) / 0-312 V _{rms} (FN)
Corrente de saída	32,16 A (por fase)
Frequência de saída	CC, 40-5000 Hz

A leitura de dados é mostrada no *display* do painel frontal da fonte programável ou também por meio da tela do *software*, conforme mostra a Figura 3.12. Além disso, a fonte

programável dispõe de opções para armazenar os dados em arquivo de texto (Figura 3.13) com possibilidade de configuração do tempo para atualização desses dados.

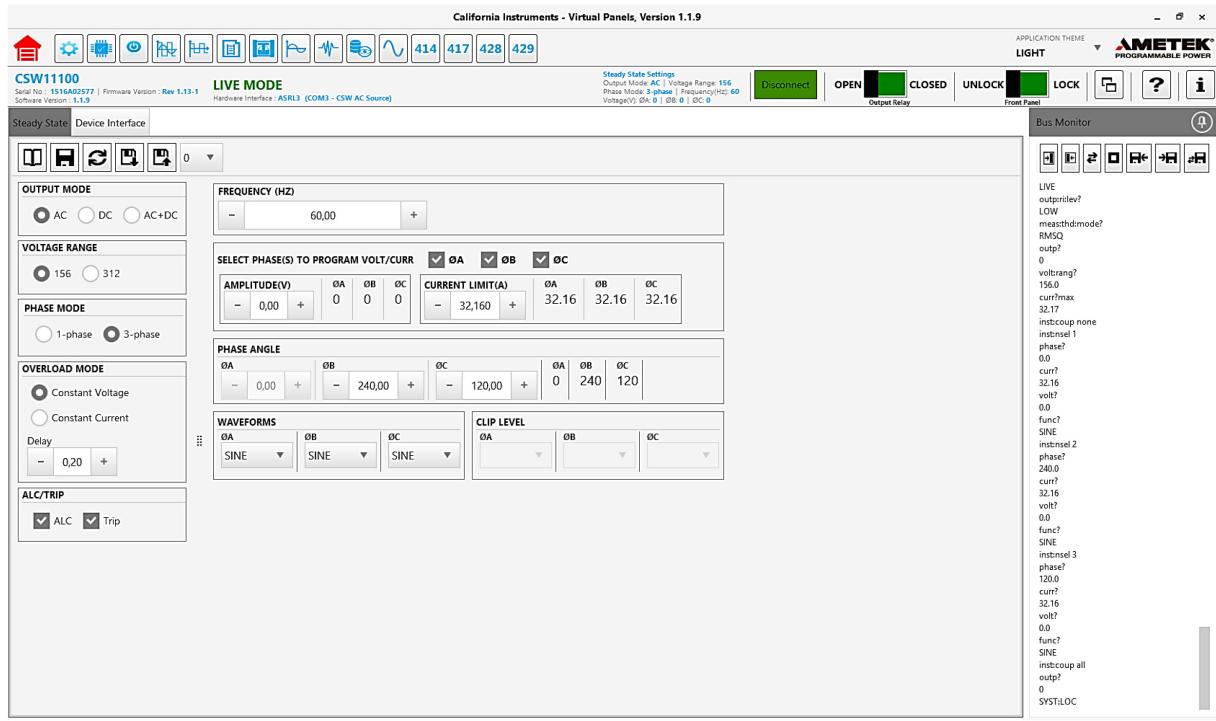


Figura 3.11 – Interface principal do *software* da fonte programável.

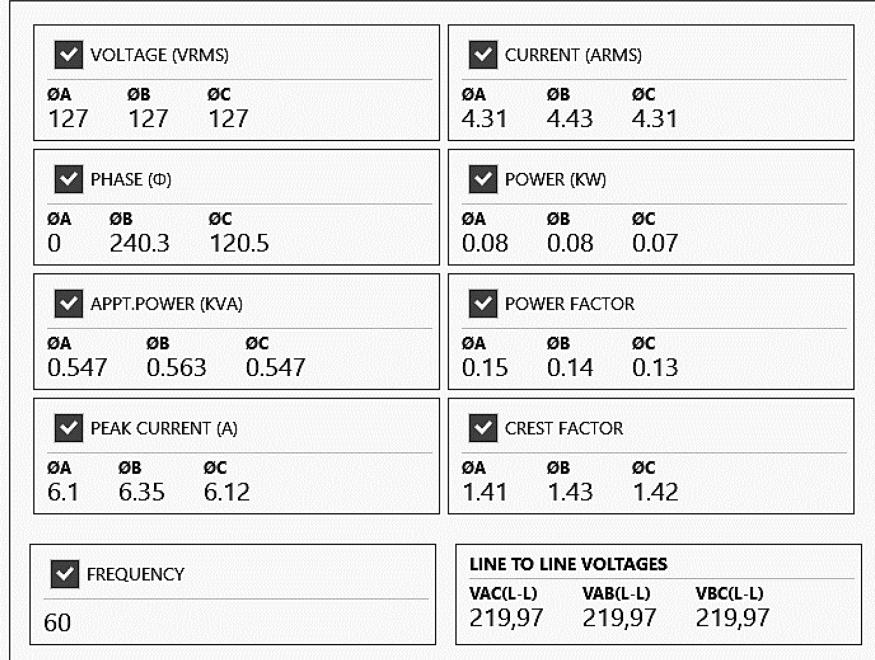


Figura 3.12 – Interface de leitura de dados.

Pav - Bloco de notas

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

Date : 01/19/2018 15:16:51 , Frequency(Hz) : 60

Measurement Type	ØA	ØB	ØC
Voltage (Vrms)	29.99	29.98	29.99
Current (Arms)	1.27	1.29	1.26
Current (Adc)	0	0	0
Phase (Ø)	0	240.3	120.5
Power (kW)	0.03	0.03	0.03
Appt. Power (kVA)	0.038	0.039	0.038
Power Factor	0.7	0.69	0.69
Peak Current (A)	1.82	1.86	1.82
Crest Factor	1.43	1.44	1.44

Figura 3.13 – Dados de leitura armazenados em arquivo de texto.

Capítulo 4 – Metodologia utilizada e resultados experimentais

4.1 – Objetivos da norma NBR 5383-1:2002

A norma NBR 5383-1:2002 foi elaborada pela Comissão de Estudo de Motores de Indução do Comitê Brasileiro de Eletricidade com o objetivo de estabelecer os ensaios aplicáveis para a determinação das características de funcionamento de motores de indução trifásicos e verificação de sua consonância com a NBR 17094-1:2008.

Os ensaios não prescritos na NBR 5383-1:2002 poderão ser executados por intermédio de convenções firmadas entre as partes envolvidas (fabricante e comprador) para satisfazer necessidades específicas de aplicação ou pesquisa.

A norma NBR 5383-1:2002 não se aplica a motores de indução para veículos de tração (ABNT, 2002).

4.2 – Generalidades

Os ensaios devem ser realizados em motores com bom estado de conservação, e todos os dispositivos que não constituem parte integrante do motor devem ser colocados fora de operação, à exceção de acordo diferente.

Para a realização de alguns ensaios, métodos alternativos são definidos, conforme os diferentes tipos e tamanhos de motores e diferentes condições, sendo indicado o método preferencial. Na hipótese de que o ensaio escolhido não seja realizado pelo método preferencial, deverá ser indicado o método utilizado.

Em ensaios com carga, o motor deve ser alinhado adequadamente e fixado firmemente. Para leituras a serem utilizadas nas determinações de desempenho, a elevação de temperatura deve estar entre 50% e 100% da elevação de temperatura nominal. O procedimento habitual do ensaio com carga é efetuar as leituras em ordem decrescente do valor de carga (ABNT, 2002).

Ensaio com rotor bloqueado, com alimentação trifásica, envolvem esforços mecânicos e índices de aquecimento elevados. Dessa forma, é importante assegurar que o motor esteja aproximadamente à temperatura ambiente antes do início do ensaio e que esta não ultrapasse o limite de elevação de temperatura nominal acrescido de 40° C. O meio mecânico de bloqueio

do rotor deve dispor de rigidez adequada para evitar possíveis lesões pessoais e/ou danos materiais.

As medidas de resistências do estator e do rotor devem ser corrigidas para a temperatura ambiente (geralmente 25°C). A correção é efetuada através da equação:

$$R_b = R_a \cdot \frac{t_2 + k}{t_1 + k} \quad (4.1)$$

Onde:

R_b – Resistência do enrolamento, corrigida para uma temperatura especificada (t_2).

t_2 – Temperatura especificada para correção do valor da resistência.

R_a – Resistência do enrolamento obtida no ensaio, à temperatura t_1 .

t_1 – Temperatura do enrolamento por ocasião da medição da resistência.

k – Igual a 234,5 para cobre eletrolítico com 100% de condutividade.

4.3 – Classificação dos ensaios

A Tabela 4.1 enumera os ensaios que podem ser realizados em motores de indução para verificação de seu desempenho e classifica-os, conforme NBR 17094-1:2008, em:

- Ensaios de rotina: são ensaios realizados durante ou após a fabricação, em cada unidade, para verificar se critérios definidos estão sendo atendidos;
- Ensaios de tipo: são ensaios realizados em um ou mais motores fabricados conforme determinado projeto, para comprovar que tal projeto satisfaz especificações estabelecidas;
- Ensaios especiais: são ensaios não considerados como sendo de rotina ou de tipo e que devem ser realizados mediante acordo prévio entre as partes.

Os ensaios classificados como especiais não são objeto de estudo deste trabalho. Dentre os ensaios restantes, serão realizados os descritos nos itens 2, 4, 5, 8, 9, 10, 11 e 12 da Tabela 4.1, sendo que os demais ensaios não foram realizados por conta de indisponibilidade de equipamentos e/ou por não se aplicarem ao motor investigado. O Apêndice A apresenta o relatório com todos os resultados dos ensaios que foram realizados com base na norma NBR 5383-1:2002.

Tabela 4.1 – Ensaios para verificação de desempenho de motores de indução.

Item	Relação dos ensaios Ensaio (de/para)	Classificação do ensaio		
		Rotina	Tipo	Especial
1	Medição da resistência de isolamento	X	X	
2	Medição da resistência elétrica do enrolamento (do estator e do rotor para motores de anéis, a frio)	X	X	
3	Dielétrico	X	X	
4	Em vazio (sob tensão nominal)	X	X	
5	Com rotor bloqueado		X	
6	Medição da tensão secundária	X	X	
7	Partida com levantamento das curvas características conjugado <i>versus</i> velocidade e corrente <i>versus</i> velocidade			X
8	Temperatura		X	
9	Determinação do rendimento a 100%, 75% e 50% da potência nominal		X	
10	Determinação das perdas a 100%, 75% e 50% da potência nominal		X	
11	Determinação do fator de potência a 100%, 75% e 50% da potência nominal		X	
12	Determinação do escorregamento a 100%, 75% e 50% da potência nominal		X	
13	Determinação do conjugado máximo		X	
14	Sobrevelocidade			X
15	Nível de ruído (potência sonora em vazio)			X
16	Tensão no eixo e medição da resistência de isolamento do mancal			X
17	Vibração (valor eficaz máximo da velocidade de vibração em milímetros por segundo)			X
18	Medição da tangente do ângulo de perdas			X

Além dos ensaios descritos, serão efetuados ensaios eventuais com distorção harmônica e afundamento de tensão com o objetivo de verificar o comportamento do MIT operando em condições inadequadas.

4.4 – Operação da plataforma experimental

Para colocar a plataforma experimental em funcionamento, é necessário acionar o disjuntor geral, o disjuntor de comando e o botão LIGA no painel de comando da bancada de ensaios.

O motor de indução trifásico é acionado através da fonte programável e esse procedimento pode ser feito por meio do teclado do painel frontal ou via *software*. A programação da fonte poderá ser ajustada de acordo com o ensaio pretendido.

A carga mecânica é colocada em funcionamento ativando-se o disjuntor CAMPO no painel de comando da bancada para alimentar o circuito de campo da máquina de corrente contínua. O circuito de armadura é conectado ao conversor CC-CC e ao banco de resistências. O módulo do conversor também possui um disjuntor para acionamento. O ajuste de corrente é feito por intermédio de um potenciômetro interligado à placa geradora de PWM mostrada na Figura 3.8.

A plataforma experimental, mostrada na Figura 4.1, está instalada no Laboratório de Acionamentos Elétricos (LAcE) da Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

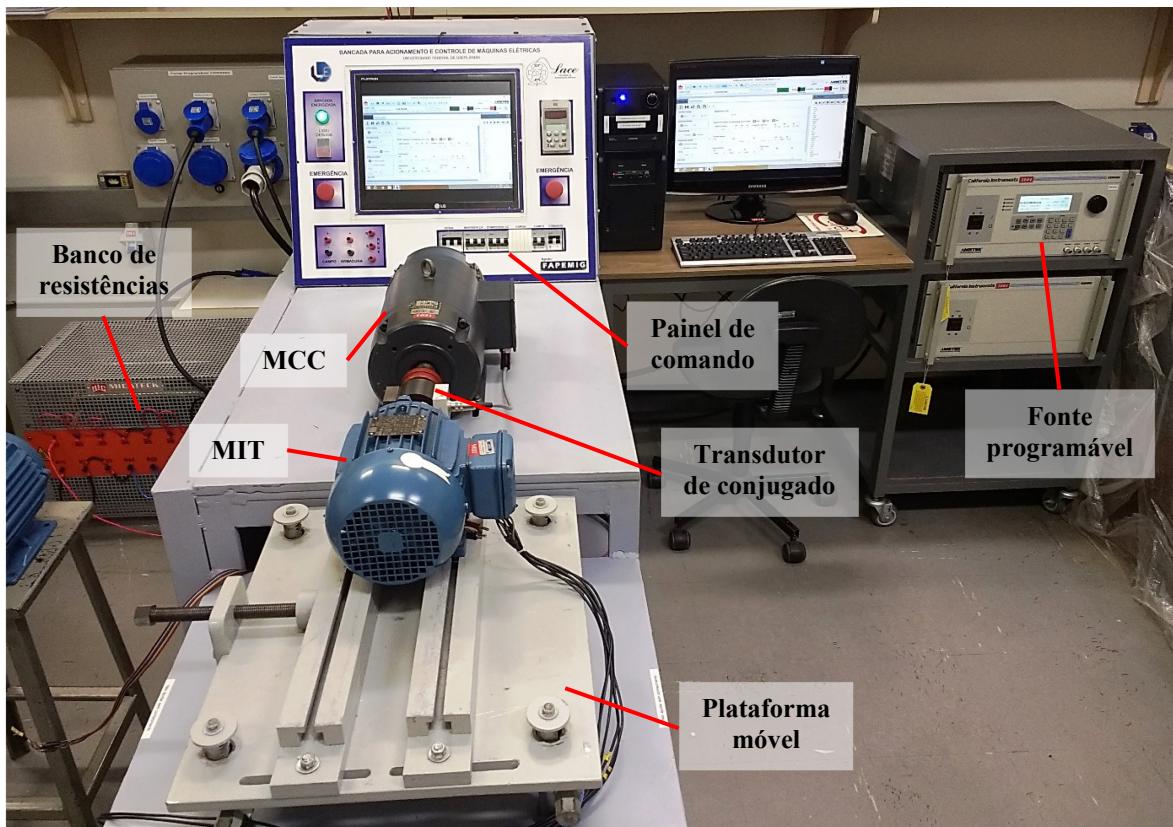


Figura 4.1 – Foto da plataforma experimental.

4.5 – Metodologia de ensaios e resultados experimentais

Após a acomodação de todos os elementos da plataforma experimental e a realização dos primeiros testes de funcionamento, foram iniciados os ensaios e a aquisição dos resultados experimentais.

O objetivo principal é a validação da plataforma implementada, através da verificação do desempenho do motor de indução trifásico a partir de ensaios recomendados pela norma NBR 5383-1:2002, além da demonstração do funcionamento sob carga em situações consideradas inadequadas.

O motor disponível para ensaio é um MIT de 3 cv, com rotor em gaiola, sendo que as principais características dessa máquina são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Principais características do MIT sob ensaio.

Motor de indução trifásico – Rotor em gaiola	
Fabricante	WEG
Potência de saída	2,2 (3,0) kW (cv)
Tensão (Δ/Y)¹	220 / 380 V
Corrente (Δ/Y)	8,39 / 4,86 A
Frequência	60 Hz
Velocidade mecânica	3450 rpm – 2 polos
Rendimento	81,9%
Fator de potência	0,84
Fator de serviço	1,15
Categoria	N
Classe de isolamento	F
Regime de serviço	S1

4.5.1 – Ensaio para determinação da resistência do enrolamento do estator

Os valores de resistência de enrolamento podem fornecer indicações sobre a existência de espiras em curto-circuito e/ou conexões e contatos em más condições. É importante que se faça o acompanhamento desses valores ao longo do tempo de funcionamento e a sua

¹ Para os ensaios realizados com tensão nominal, o MIT foi acionado em 220 V.

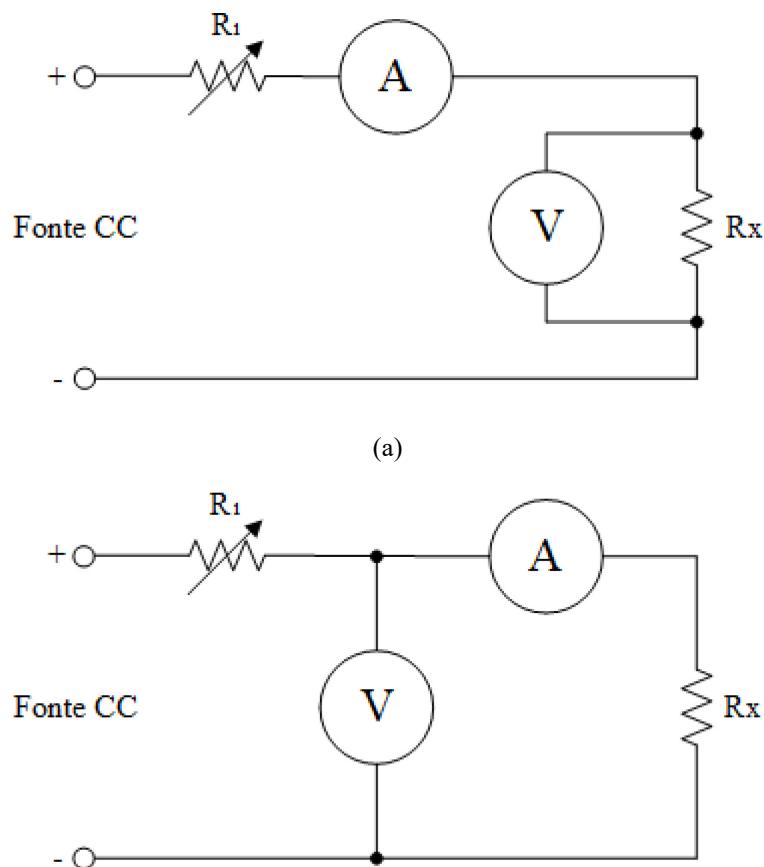
comparação com os valores de fábrica, quando disponíveis, sempre referidos à mesma temperatura.

Os métodos mais comuns para a medição da resistência ôhmica dos enrolamentos são o da tensão e corrente (queda de tensão) e o da ponte (de *Wheatstone* ou de *Kelvin*). A escolha do método em qualquer caso depende do grau de precisão requerido e do esquema de ligações (ABNT, 2002).

Para a realização deste trabalho, foi escolhido o método da tensão e corrente e, para efeito de comparação, será mostrado também um método prático de medição direta, de acordo com o tipo de conexão dos enrolamentos (estrela ou delta).

4.5.1.1 – Método da tensão e corrente (queda de tensão)

Para medir a resistência dos enrolamentos por meio deste método, é utilizado o esquema de ligações da Figura 4.2a (para baixa resistência dos enrolamentos) ou da Figura 4.2b (para alta resistência dos enrolamentos), onde R_1 é um resistor limitador de corrente, colocado quando necessário.



(b)

Figura 4.2 – Esquema de ligações para o método da tensão e corrente.

O procedimento de medição consiste em aplicar uma tensão CC aos terminais do enrolamento, de forma que a corrente que circule não seja superior a 15% do valor nominal do enrolamento, considerando o tempo máximo de 1 minuto, para evitar a elevação de temperatura durante o ensaio. Posteriormente, são efetuadas as leituras de corrente e tensão e, através da lei de Ohm, a resistência é calculada por uma das seguintes equações:

$$R_X = \frac{V}{I - V/R_V} \quad (4.2)$$

$$R_X = \frac{V - I \cdot R_A}{I} \quad (4.3)$$

Onde:

R_X – Resistência do enrolamento sob ensaio.

V – Tensão aplicada ao enrolamento.

I – Corrente do enrolamento.

R_V – Resistência interna do voltímetro².

R_A – Resistência interna do amperímetro³.

A Equação 4.2 se aplica ao esquema da Figura 4.2a, enquanto que a Equação 4.3 deve ser utilizada no esquema da Figura 4.2b.

A NBR 5383-1:2002 recomenda entre três e cinco leituras para este ensaio, adotando-se a média aritmética obtida. A temperatura no início e no final do ensaio também deve ser registrada.

Os resultados do ensaio realizado são apresentados na Tabela 4.2. As tensões, geradas através da fonte programável, foram medidas diretamente nos terminais dos enrolamentos de cada fase. A leitura de corrente foi efetuada por meio do *software* da fonte e, para o cálculo da resistência, foi utilizada a Equação 4.2, desconsiderando-se o valor da resistência interna do voltímetro.

² Dependendo da precisão desejada, o valor de R_V pode ser desprezado.

³ Dependendo da precisão desejada, o valor de R_A pode ser desprezado.

Admitindo-se que, para este ensaio, a temperatura não sofre variação significativa, uma vez que as medições são adquiridas de forma rápida, foi colocado um termopar no interior da máquina para efetuar esse monitoramento. A correção para a temperatura ambiente de 25°C foi realizada aplicando-se a Equação 4.1.

Tabela 4.3 – Resultados do ensaio para determinação da resistência do enrolamento: método da tensão e corrente.

	Tensão (V)	Corrente (A)	Resistência (Ω)	Temperatura (°C)	Resistência corrigida para 25°C (Ω)
Fase A	3,76	1,72	2,186	25	2,186
	6,60	3,02	2,185	27	2,168
	9,18	4,14	2,217	27	2,200
Fase B	4,06	1,86	2,183	28	2,158
	6,63	3,02	2,195	28	2,170
	9,19	4,16	2,209	29	2,175
Fase C	4,41	1,97	2,227	30	2,185
	6,62	2,97	2,229	32	2,170
	9,18	4,07	2,256	36	2,164
Resistência média a 25°C (Ω)					2,175

4.5.1.2 Método alternativo: medição direta

Este método consiste em medir a resistência diretamente nos terminais do motor, que pode estar conectado em estrela ou em delta. Considerando que o enrolamento trifásico é simétrico, avalia-se que os valores de resistência serão muito próximos. Dessa forma, não é necessário desfazer o esquema de ligação da máquina, bastando conectar o ohmímetro nos terminais disponíveis, conforme indicado na Figura 4.3, medir a resistência equivalente e calcular a resistência do enrolamento estatórico utilizando uma das seguintes equações:

$$R = \frac{3}{2} \cdot R_{medido} \quad (4.4)$$

$$R = \frac{R_{medido}}{2} \quad (4.5)$$

Onde:

R – Resistência do enrolamento sob ensaio.

R_{medido} – Resistência do circuito equivalente entre os terminais AB, BC ou CA do motor.

A Equação 4.4 é utilizada para o circuito da Figura 4.3a, enquanto que a Equação 4.5 deve ser utilizada para o circuito da Figura 4.3b.

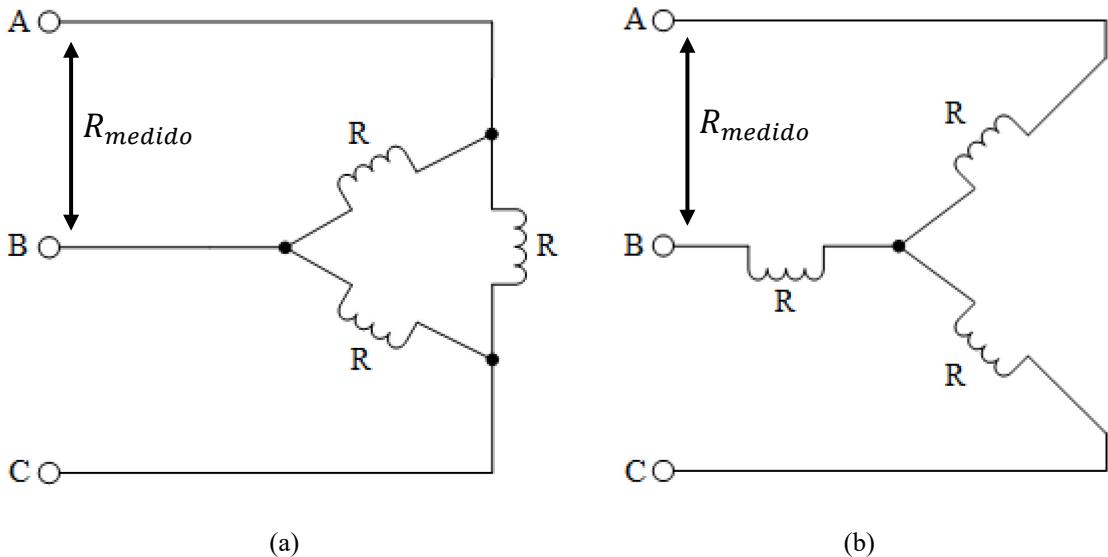


Figura 4.3 – Esquema de medição para o método alternativo de determinação da resistência do enrolamento.

No ensaio realizado, foram efetuadas três medições, entre os terminais AB, BC e CA com o motor ligado em estrela (Figura 4.3b), calculada a média aritmética (à temperatura ambiente de 25°C) e, em seguida, aplicou-se a Equação 4.5 para a obtenção da resistência do enrolamento. Os resultados são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Resultados do método alternativo para obtenção da resistência do enrolamento.

Terminais	$R_{medido}(\Omega)$	Média aritmética	Resistência do enrolamento (Ω)
AB	4,4	4,4	2,2
BC	4,4		
CA	4,4		

O valor da resistência obtido através deste método é cerca de 1,15% maior do que o adquirido por intermédio do método da tensão e corrente. A NBR 5383-1:2002 recomenda que,

em caso de discordâncias maiores que 2%, deve ser pesquisada a existência de anormalidades tais como curto em espiras, número incorreto de espiras, dimensões incorretas dos condutores, conexões e contatos em condições inadequadas.

4.5.2 – Ensaio térmico

O ensaio térmico é realizado para indicar a elevação de temperatura de determinadas partes do motor, quando em funcionamento sob condição de carga especificada. A NBR 5383-1:2002 traz algumas ponderações a respeito da realização desse ensaio:

- O motor deve ser protegido de correntes de ar provenientes de polias, correias e outras máquinas. Correntes de ar pequenas podem causar grandes divergências nos resultados do ensaio térmico;
- Condições que resultem em rápida mudança de temperatura do ar ambiente devem ser consideradas insatisfatórias para ensaios térmicos;
- Espaço suficiente entre motores é necessário para permitir livre circulação de ar.

A determinação das temperaturas dos enrolamentos e de outras partes do motor pode ser efetuada por um dos seguintes métodos descritos na NBR 5383-1:2002:

- Método termométrico;
- Método dos detectores de temperatura embutidos;
- Método da variação da resistência;
- Método dos detectores de temperatura local.

Em geral, segundo consta na NBR 17094-1:2008, deve ser utilizado o método de variação da resistência para a realização do ensaio térmico. Esse método consiste em medir a resistência entre quaisquer dois terminais de linha (se possível, diretamente nos terminais do motor) para os quais um valor de referência tenha sido medido a uma temperatura conhecida.

4.5.2.1 – Procedimentos gerais e resultados

Para executar o ensaio térmico, o motor deve ser colocado em carga e as especificações fator de serviço e regime de serviço devem ser observadas, uma vez que existem recomendações normativas particulares para essas especificações.

O motor utilizado no estudo possui fator de serviço 1,15 e deve ser ensaiado à carga com esse fator de serviço para verificar se ele atende aos limites de elevação de temperatura da

classe térmica.

Quando a temperatura de funcionamento é a da carga com fator de serviço ao invés da carga nominal, a elevação de temperatura pela variação da resistência à carga nominal pode ser obtida variando-se a temperatura com o quadrado das correntes (ABNT, 2002):

$$\Delta t_n = \Delta t_e \cdot \left(\frac{I_n}{I_e} \right)^2 \quad (4.6)$$

Onde:

Δt_n – Elevação de temperatura à carga nominal.

Δt_e – Elevação de temperatura no ensaio.

I_n – Corrente nominal.

I_e – Corrente de ensaio.

O regime de serviço do motor sob ensaio é do tipo contínuo (S1) e, para estes motores, o ensaio de elevação de temperatura deve continuar até que seja atingido o equilíbrio térmico ou, em outras palavras, até que não haja variação de temperatura maior que 1 Kelvin entre duas leituras sucessivas de 30 minutos.

Observadas as condições de fator de serviço e regime de serviço, a medição de resistência é feita após a parada do motor. Esse procedimento deve ser cuidadosamente planejado, pois é necessário que o motor pare rapidamente a fim de se obterem leituras com rapidez suficiente para garantir dados confiáveis. A Tabela 4.5 indica o intervalo de tempo no qual a leitura da resistência pode ser adotada como medida de temperatura.

Tabela 4.5 – Intervalo de tempo dentro do qual a leitura inicial da resistência deve ser adotada como medida de temperatura (ABNT, 2008).

Potência nominal – P_n (kW)	Intervalo de tempo após desligamento da energia (s)
$P_n \leq 50$	30
$50 < P_n < 200$	90
$200 < P_n < 5000$	120
$5000 < P_n$	Mediante acordo

Outras recomendações não prescritas na Tabela 4.5 a respeito de intervalo de tempo para leitura da resistência constam na NBR 5383-1:2002. Precauções devem ser adotadas para

proporcionar medições precisas de resistência, pois um pequeno erro na medição pode provocar um erro significativo na determinação da temperatura.

Os resultados do ensaio efetuado no motor em estudo são apresentados na Tabela 4.6. Como o motor ensaiado possui rotor em gaiola, o ensaio se limita à medição apenas da resistência do enrolamento do estator.

Tabela 4.6 – Resultados obtidos após a realização do ensaio térmico.

Intervalo de tempo após o desligamento da energia (s)	< 30
Corrente nominal (dado de placa) – I_n (A)	8,39
Corrente de ensaio (média) – I_e (A)	9,616
Resistência medida após a parada do motor (Ω)	3,3
Elevação de temperatura no ensaio – Δt_e ($^{\circ}$C)	134,224
Elevação de temperatura à carga nominal – Δt_n ($^{\circ}$C)	102,180

A medição da resistência foi efetuada em um intervalo de tempo menor que 30 segundos após o desligamento de energia, conforme prescrito na Tabela 4.5 para motores com potência menor que 50 kW.

O valor de Δt_e foi obtido a partir da Equação 2.4, onde R_b é o valor da resistência apresentado na Tabela 4.6 e R_a é o valor da resistência obtido no ensaio para determinação da resistência do enrolamento do estator (método da tensão e corrente) à temperatura ambiente de 25°C, que será o valor de t_1 . O fluido refrigerante é o ar ambiente e, portanto, o valor de t_a , que também seria de 25°C, não se faz necessário na equação. Dessa forma, substituindo os valores na Equação 2.4, obtém-se:

$$\Delta t_e = \frac{3,3 - 2,175}{2,175} \cdot (234,5 + 25) = 134,224 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

O valor de Δt_n foi obtido da Equação 4.6, com os valores de I_n e I_e retirados da Tabela 4.6:

$$\Delta t_n = 134,224 \cdot \left(\frac{8,39}{9,616} \right)^2 = 102,180 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

A partir do valor obtido de elevação de temperatura à carga nominal (Δt_n) é possível verificar que, de acordo com as classes de isolamento apresentadas na Tabela 2.2, o motor atende

ao limite de elevação de temperatura da classe F, conforme consta nas suas especificações nominais (Tabela 4.2).

4.5.3 – Ensaio com rotor bloqueado

O ensaio com rotor bloqueado fornece informações sobre a resistência do rotor e sobre as reatâncias de dispersão. Nesse ensaio, a velocidade do motor é nula e o escorregamento tende à unidade. Dessa forma, o circuito equivalente da Figura 2.6 é convertido no circuito mostrado na Figura 4.4.

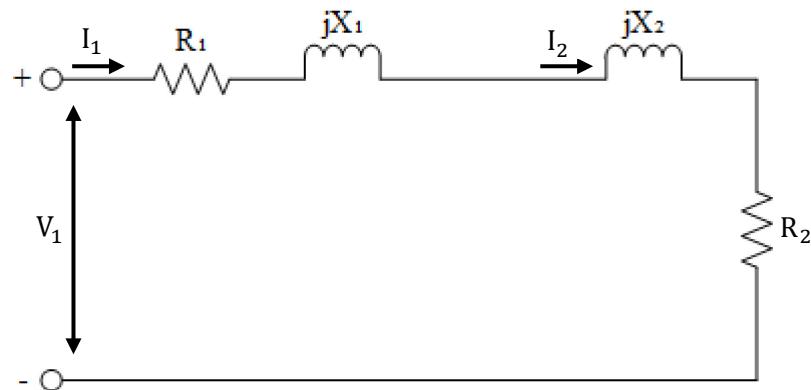


Figura 4.4 – Circuito equivalente monofásico de um motor de indução: condição de rotor bloqueado.

Para a realização desse ensaio, o rotor do MIT é travado, conforme orientações indicadas no item 4.2, e tensões trifásicas equilibradas são aplicadas aos terminais do estator. Se o interesse for nas características nominais de funcionamento, o ensaio deverá ser executado com tensão reduzida, da qual resulta aproximadamente a corrente nominal. Em alguns casos, mede-se também o conjugado de rotor bloqueado (Umans, 2014).

A Tabela 4.7 apresenta as leituras dos valores eficazes de tensão e corrente, da potência de entrada, do fator de potência e da temperatura durante a realização do ensaio com rotor bloqueado.

O ensaio foi realizado com auxílio da fonte programável. O rotor foi bloqueado com auxílio de um torno e o valor da tensão foi aumentado gradativamente até o ponto de obtenção do valor aproximado da corrente nominal. A temperatura foi monitorada com o auxílio de um termopar colocado no interior da máquina. A Figura 4.5 mostra as formas de onda da tensão trifásica aplicada, obtidas por meio do *software* da fonte programável e também através da tela do osciloscópio digital. A Figura 4.6 apresenta as formas de onda das correntes.

Tabela 4.7 – Leituras obtidas durante o ensaio com rotor bloqueado.

	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência de entrada (kW)	Fator de potência ($\cos \varphi$)	Temperatura (°C)
Fase A	43,3	8,39	0,10	0,49	36
Fase B	43,3	8,59	0,11	0,50	
Fase C	43,3	8,58	0,10	0,48	
Média	43,3	8,52	0,103	0,49	

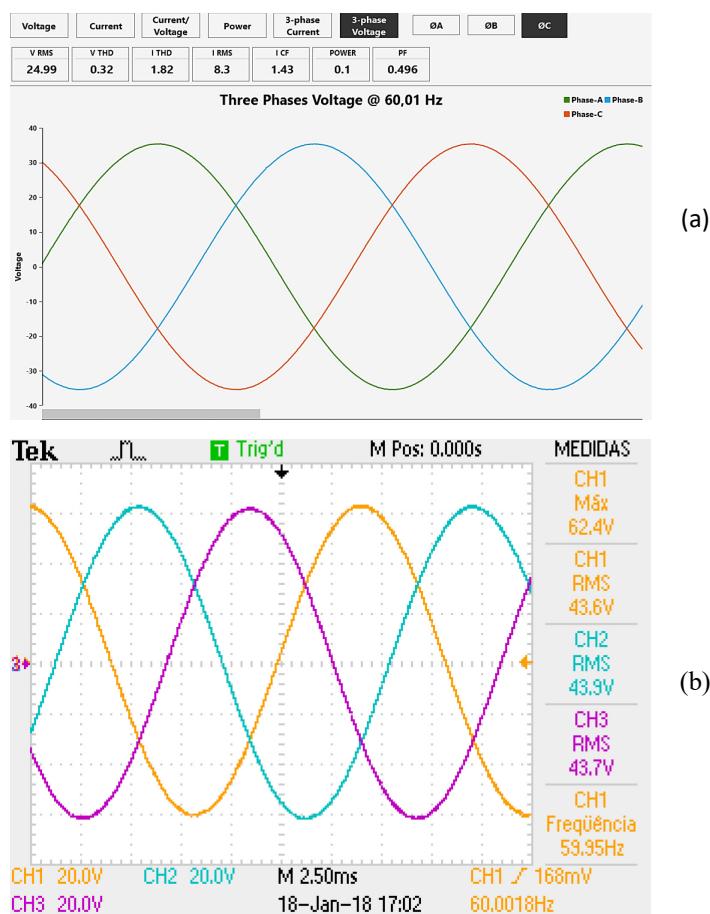
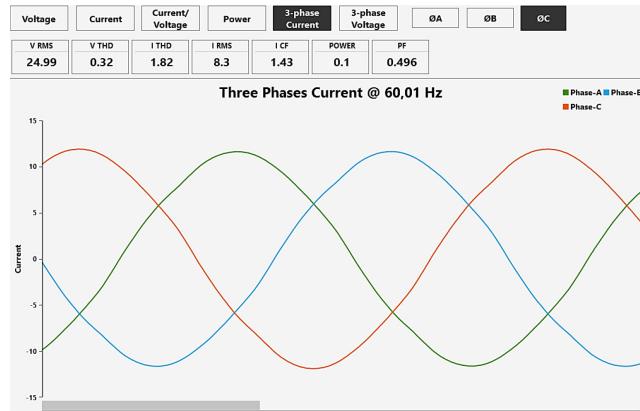
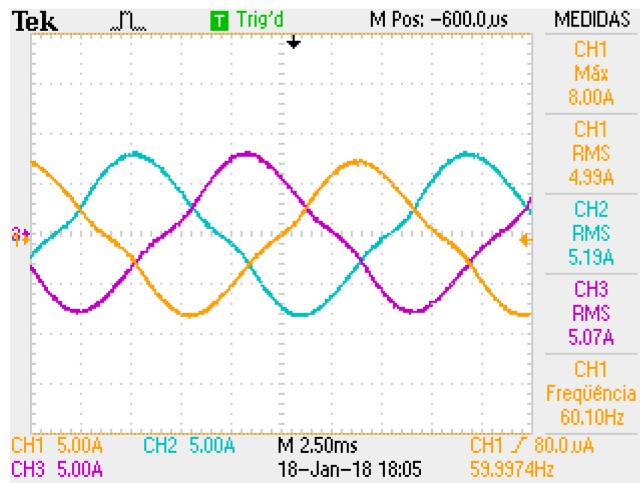


Figura 4.5 – Forma de onda da tensão trifásica aplicada ao MIT para o ensaio com rotor bloqueado: (a) Tensão de fase obtida através do software da fonte programável; (b) Tensão de linha obtida através do osciloscópio digital.



(a)



(b)

Figura 4.6 – Forma de onda da corrente do MIT durante o ensaio com rotor bloqueado: (a) Corrente de linha obtida através do *software* da fonte programável; (b) Corrente em cada fase do motor obtida através do osciloscópio digital.

Para determinar as reatâncias de dispersão e a resistência do rotor do circuito equivalente da Figura 4.4, são utilizadas as seguintes equações:

$$Z_{bl} = \frac{V_{bl}}{I_{bl}} \quad (4.7)$$

$$R_2 = Z_{bl} \cdot \cos \varphi_{bl} - R_1 \quad (4.8)$$

$$X_{bl} = Z_{bl} \cdot \sin \varphi_{bl} \quad (4.9)$$

$$X_{bl} = X_1 + X_2 \quad (4.10)$$

Onde:

Z_{bl} – Impedância com rotor bloqueado.

V_{bl} – Tensão com rotor bloqueado.

I_{bl} – Corrente com rotor bloqueado.

R_2 – Resistência do rotor na temperatura do ensaio com rotor bloqueado.

R_1 – Resistência dos enrolamentos do estator na temperatura do ensaio com rotor bloqueado.

$\cos \varphi_{bl}$ – Fator de potência com rotor bloqueado.

X_{bl} – Reatância com rotor bloqueado.

Substituindo na Equação 4.7 os valores contidos na Tabela 4.7, a impedância com rotor bloqueado pode ser calculada:

$$Z_{bl} = \frac{43,3}{8,52 / \sqrt{3}} = 8,803 \Omega$$

Para calcular a resistência do rotor, utiliza-se a Equação 4.8, colocando os valores indicados na Tabela 4.7 e aplicando a Equação 4.1 para corrigir o valor de R_1 para a temperatura do ensaio com rotor bloqueado:

$$R_{236^\circ C} = 8,803 \cdot 0,49 - 2,175 \cdot \frac{36 + 234,5}{25 + 234,5} = 2,046 \Omega$$

O valor da resistência do rotor deve ser corrigido para a temperatura ambiente ($25^\circ C$), conforme orientações sugeridas no item 4.2, empregando a Equação 4.1:

$$R_{225^\circ C} = 2,046 \cdot \frac{25 + 234,5}{36 + 234,5} = 1,963 \Omega$$

A reatância com rotor bloqueado é calculada através da Equação 4.9, sendo φ_{bl} o ângulo cujo cosseno é mostrado na Tabela 4.7 (adotando-se o valor da média aritmética):

$$X_{bl} = 8,803 \cdot \sin(60,659) = 7,674 \Omega$$

O cálculo das reatâncias de dispersão X_1 e X_2 serão efetuados a partir da Equação 4.10, pois não é possível realizar uma medida através da qual esses valores possam ser determinados

de forma única. Felizmente, o desempenho do motor é pouco afetado pelo modo de distribuição da reatância de dispersão total entre o estator e o rotor (Umans, 2014). A NBR 5383-1:2002 recomenda a distribuição mostrada na Tabela 4.8 para as categorias determinadas. Se a categoria do motor for desconhecida, costuma-se assumir que X_1 e X_2 são iguais (Umans, 2014).

Tabela 4.8 – Distribuição de reatâncias de dispersão em motores de indução.

Fração (X_1/X_2)	Categoria
0,78	D e motores de rotor bobinado
0,68	N
0,58	H

Aplicando os dados da Tabela 4.8 para motores da categoria N, que é a mesma do motor em estudo, tem-se

$$X_1 = 0,68 \cdot X_2$$

substituindo na Equação 4.10,

$$X_{bl} = X_1 + X_2 \therefore 7,674 = 0,68 \cdot X_2 + X_2$$

$$X_2 = 4,568 \Omega$$

e, portanto,

$$X_1 = 0,68 \cdot 4,568 = 3,106 \Omega$$

4.5.4 – Ensaio em vazio

O ensaio em vazio de um motor de indução trifásico fornece informações em relação à corrente de magnetização e às perdas em vazio. Esse ensaio é executado sem carga acoplada ao eixo e, geralmente, sob frequência nominal e com tensões polifásicas equilibradas aplicadas aos terminais do estator.

No ensaio em vazio, a leitura da corrente em vazio e do fator de potência permite conhecer os parâmetros do ramo magnetizante do circuito equivalente do MIT, mostrado na Figura 2.6. A leitura da potência de entrada representa o total da perda em vazio, que é composta pela soma da perda I^2R no estator, das perdas por atrito, por ventilação e perdas no núcleo.

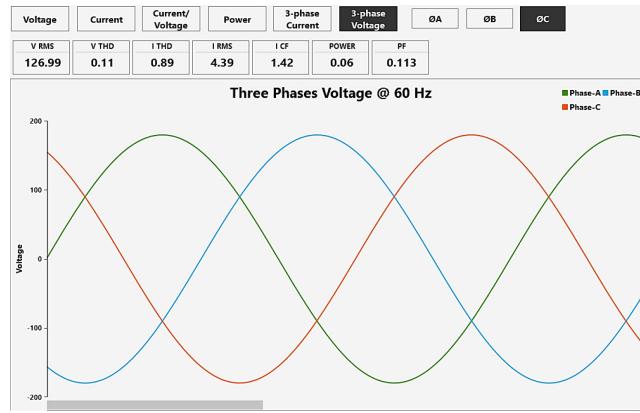
De acordo com a NBR 5383-1:2002, para assegurar que valores corretos de perda por atrito sejam obtidos, é necessário que o motor seja operado até que a potência de entrada tenha se estabilizado, pois no caso de mancais lubrificados a graxa, a estabilização não ocorre enquanto houver excesso de graxa no caminho das partes móveis. Desse modo, a estabilização pode ser considerada alcançada quando a potência de entrada não variar mais do que 3% entre duas leituras sucessivas à mesma tensão, em intervalos de 30 minutos.

Subtraindo-se a perda I^2R no estator da potência de entrada, o resultado é a soma das perdas a vazio restantes (atraito, ventilação e núcleo). Para separar a perda no núcleo da perda por atrito e ventilação deve ser realizada a leitura de tensão, corrente e potência, quando a tensão é variada desde 125% da tensão nominal até o ponto onde a redução da tensão ocasionar o aumento da corrente (ABNT, 2002).

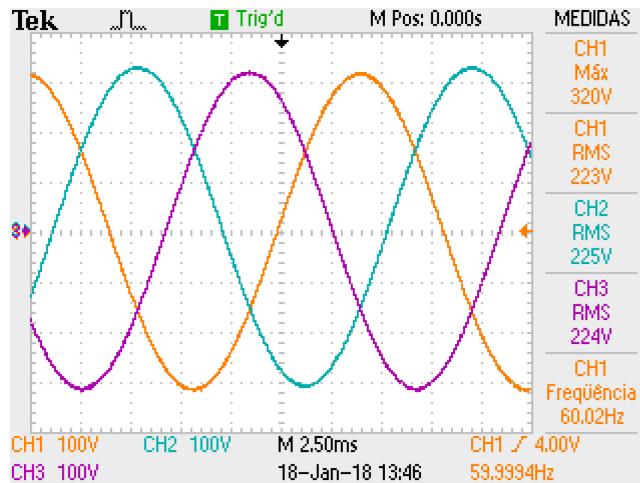
4.5.4.1 – Realização do ensaio

O ensaio foi realizado com auxílio da fonte programável e de um osciloscópio digital. O motor foi colocado em movimento sob tensão e frequência nominais e o valor da potência de entrada foi monitorado.

As leituras foram efetuadas somente após a estabilização da potência de entrada, conforme recomenda a NBR 5383-1:2002. A Figura 4.7 apresenta as formas de onda da tensão trifásica aplicada ao MIT, visualizadas através do *software* da fonte programável e também por meio da tela do osciloscópio digital. Elas evidenciam a forma como geralmente é realizado o ensaio em vazio: aplicação de tensão trifásica equilibrada e frequência nominal. A Figura 4.8 mostra as formas de onda das correntes e a Tabela 4.9 apresenta as leituras dos valores eficazes de tensão e corrente, da potência de entrada, do fator de potência e da temperatura obtidos durante a realização do ensaio.



(a)



(b)

Figura 4.7 – Forma de onda da tensão trifásica aplicada ao MIT para o ensaio em vazio: (a) Tensão de fase obtida através do software da fonte programável; (b) Tensão de linha obtida através do osciloscópio digital.



(a)

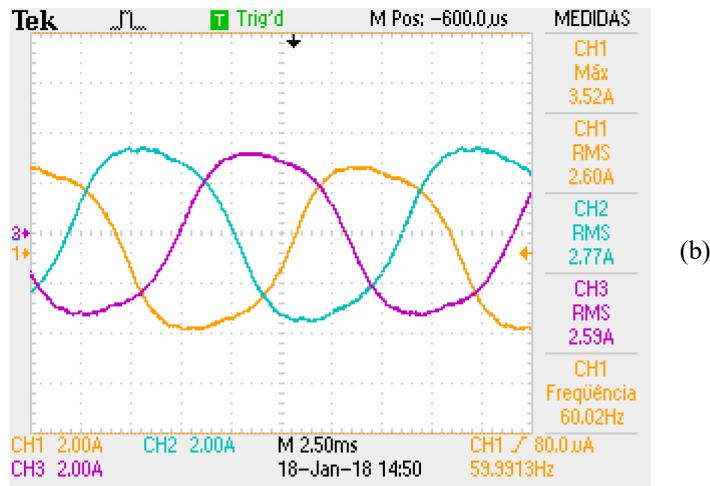


Figura 4.8 – Forma de onda da corrente do MIT durante o ensaio em vazio: (a) Corrente de linha obtida através do *software* da fonte programável; (b) Corrente em cada fase do motor obtida através do osciloscópio digital.

Tabela 4.9 – Leituras obtidas durante o ensaio em vazio.

	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência de entrada (kW)	Fator de potência ($\cos \varphi$)	Temperatura (°C)
Fase A	219,97	4,31	0,08	0,15	48
Fase B	219,97	4,43	0,08	0,14	
Fase C	219,97	4,31	0,07	0,13	
Média	219,97	4,35	-	0,14	

A Tabela 4.9 apresenta o valor das perdas em vazio por fase. O valor total dessas perdas pode ser obtido efetuando-se a soma das leituras da potência de entrada de cada fase.

4.5.4.2 – Análise das perdas em vazio

Conforme já foi colocado, no ensaio em vazio, a potência de entrada representa a perda total em vazio, que integra a perda I^2R no estator, as perdas por atrito, por ventilação e as perdas no núcleo. Escrevendo matematicamente, tem-se:

$$P_0 = 3 \cdot I_0^2 \cdot R_1 + P_{av} + P_{núcleo} \quad (4.11)$$

Onde:

P_0 – Potência trifásica de entrada.

I_0 – Corrente de linha em vazio.

R_1 – Resistência do enrolamento do estator, corrigida para a temperatura do ensaio.

P_{av} – Perdas por atrito e ventilação.

$P_{núcleo}$ – Perdas no núcleo.

A potência de P_0 é obtida somando-se as leituras de potência de entrada de cada fase mostradas na Tabela 4.9:

$$P_0 = 0,08 \cdot 10^3 + 0,08 \cdot 10^3 + 0,07 \cdot 10^3 = 230 \text{ W}$$

Para determinar a perda no estator, é necessário corrigir o valor de R_1 para a temperatura do ensaio em vazio (48°C) utilizando a Equação 4.1. O valor de I_0 é a média aritmética das correntes de linha. Substituindo os valores, a perda no estator é determinada da seguinte maneira:

$$3 \cdot \left(\frac{4,35}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot 2,175 \cdot \frac{48 + 234,5}{25 + 234,5} = 44,804 \text{ W}$$

As perdas por atrito e ventilação são quantificadas variando-se a tensão desde 125% do valor nominal até o ponto no qual a diminuição da tensão provocar elevação de corrente. Dessa forma, a tensão de alimentação foi elevada até 275 V e, em seguida, reduzida gradativamente até o momento em que se constatou a elevação da corrente. A leitura de potência nesse ponto representa a perda por atrito e ventilação. Os resultados são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Leituras obtidas para obtenção das perdas por atrito e ventilação.

	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência de entrada (kW)
Fase A	51,94	1,27	0,03
Fase B	51,94	1,29	0,03
Fase C	51,93	1,26	0,03
Total – P_{av} (kW)			0,09

A partir das informações encontradas na Tabela 4.10, é possível constatar que as perdas por atrito e ventilação somam 90 W. As perdas no núcleo podem agora ser determinadas manipulando a Equação 4.11 para calcular $P_{\text{núcleo}}$:

$$P_{\text{núcleo}} = P_0 - (3 \cdot I_0^2 \cdot R_1 + P_{\text{av}}) = 230 - (44,804 + 90) = 95,196 \text{ W}$$

A Tabela 4.11 apresenta as perdas a vazio:

Tabela 4.11 – Detalhamento das perdas em vazio.

Perda I^2R no estator (W)	44,804
Perda por atrito e ventilação – P_{av} (W)	90
Perda no núcleo – $P_{\text{núcleo}}$ (W)	95,196
Total: Perdas em vazio – P_0 (W)	230

4.5.4.3 – Determinação dos parâmetros do ramo magnetizante

No ensaio em vazio, a velocidade do motor é muito próxima da velocidade síncrona, ou seja, o escorregamento tende a zero. Dessa forma, o valor de R_2/s no circuito equivalente da Figura 2.6 tenderá a infinito e o circuito equivalente correspondente é mostrado na Figura 4.9, com o circuito do rotor em aberto.

A análise do circuito equivalente da Figura 4.9 permite determinar os parâmetros do ramo magnetizante (R_c e X_m). Nesse circuito, as correntes I_1 e I_ϕ possuem o mesmo valor e são iguais a I_0 . Essa corrente se divide em I_c e I_m que são, respectivamente, as correntes que circulam por R_c e X_m .

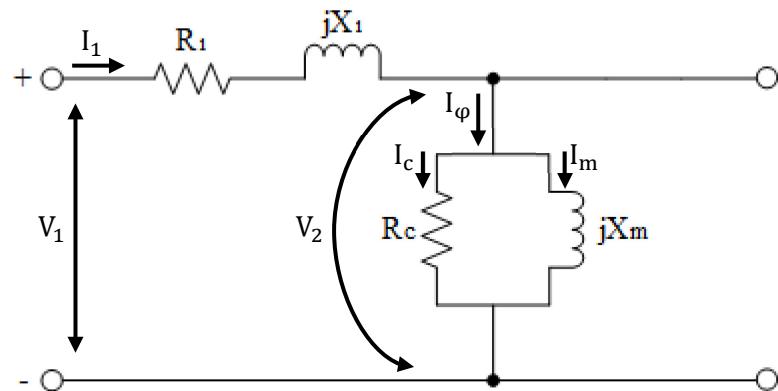


Figura 4.9 – Circuito equivalente monofásico de um motor de indução: condição a vazio.

As correntes I_c e I_m podem se determinadas a partir das seguintes equações:

$$I_c = I_0 \cdot \cos \varphi_0 \quad (4.12)$$

$$I_m = I_0 \cdot \sin \varphi_0 \quad (4.13)$$

Onde:

$\cos \varphi_0$ – Fator de potência em vazio.

A tensão V_2 sobre o ramo magnetizante é dada por:

$$V_2 = V_1 - Z_1 \cdot I_1 = V_1 - \left(\sqrt{R_1^2 + X_1^2} \right) \cdot I_1 \quad (4.14)$$

Na Equação 4.14, V_1 corresponde ao valor da tensão nominal aplicada ao motor na realização do ensaio em vazio, R_1 é o valor da resistência do enrolamento do estator corrigida para a temperatura do ensaio, X_1 representa a reatância de dispersão obtida no ensaio com rotor bloqueado e I_1 corresponde ao valor da corrente em vazio (I_0).

Adotando as Equações 4.12 e 4.13 e colocando os valores da Tabela 4.9, as correntes I_c e I_m podem ser calculadas:

$$I_c = \frac{4,35}{\sqrt{3}} \cdot 0,14 = 352 \text{ mA}$$

$$I_m = \frac{4,35}{\sqrt{3}} \cdot \sin(81,952) = 2,487 \text{ A}$$

Para efetuar o cálculo da tensão V_2 , é necessário inicialmente converter o valor de R_1 para a temperatura do ensaio em vazio

$$R_{148^\circ C} = 2,175 \cdot \frac{48 + 234,5}{25 + 234,5} = 2,368 \Omega$$

Agora, a tensão V_2 pode ser calculada aplicando-se a Equação 4.14, onde X_1 é a reatância de dispersão obtida no ensaio de rotor bloqueado

$$V_2 = 219,97 - \left(\sqrt{2,368^2 + 3,106^2} \right) \cdot \frac{4,35}{\sqrt{3}} = 210,161 \text{ V}$$

De posse dos valores das correntes I_c e I_m e da tensão sobre o ramo magnetizante, basta aplicar a Lei de Ohm para determinar os parâmetros R_c e X_m :

$$R_c = \frac{210,161}{352 \cdot 10^{-3}} = 597,048 \Omega$$

$$X_m = \frac{210,161}{2,487} = 84,504 \Omega$$

4.5.5 – Ensaio para determinação do escorregamento

Conforme já foi reportado no item 2.2, o escorregamento é a diferença entre a velocidade síncrona (velocidade do campo magnético girante) e a velocidade mecânica do motor, e pode ser calculado pela Equação 2.2.

O ensaio para determinação do escorregamento é feito conforme indicado na Tabela 4.1, para 100%, 75% e 50% da potência nominal.

Segundo a NBR 5383-1:2002, para a determinação do escorregamento, tacômetros ou contadores de rotações analógicos não são razoavelmente precisos. Dessa forma, recomenda-se que as leituras sejam efetuadas por meio de tacômetros digitais ou estroboscópios. Este último, quando utilizado, deve ter frequência de alimentação igual à da fonte de alimentação do motor.

O escorregamento deve ser corrigido para a temperatura especificada do estator pela equação:

$$s_b = s_a \cdot \frac{t_2 + k}{t_1 + k} \quad (4.15)$$

Onde:

s_b – Escorregamento corrigido para a temperatura especificada do estator (t_2).

t_2 – Temperatura especificada para correção do escorregamento.

s_a – Escorregamento determinado na temperatura do enrolamento do estator (t_1).

t_1 – Temperatura do enrolamento do estator medida durante o ensaio com carga.

k – Igual a 234,5 para cobre eletrolítico com 100% de condutividade.

A temperatura especificada é a temperatura medida pela variação da resistência a partir de um ensaio térmico, acrescida da temperatura ambiente. Assim,

$$t_e = \Delta t_n + t_{amb} \quad (4.16)$$

Onde:

t_e – Temperatura especificada.

Δt_n – Elevação de temperatura à carga nominal.

t_{amb} – Temperatura ambiente.

Antes de realizar o ensaio para a determinação do escorregamento, é necessário conhecer a velocidade síncrona do motor em estudo. Colocando as informações de número de polos e de frequência de alimentação da Tabela 4.2 na Equação 2.1 tem-se

$$n_s = \frac{120 \cdot 60}{2} = 3600 \text{ rpm}$$

O próximo passo é operar a plataforma experimental, conforme descrito no item 4.4, alimentando o MIT através da fonte programável e acionando a carga mecânica. A leitura da velocidade mecânica foi feita com a utilização de um tacômetro digital e a temperatura medida através do método de variação da resistência (conforme item 4.5.2).

O percentual de carga no eixo do MIT foi determinado através do valor da média aritmética das três correntes de linha e o escorregamento foi calculado por meio da Equação 2.2. A Tabela 4.12 apresenta os resultados e o Apêndice B revela o limite de tolerância admissível, de acordo com a NBR 17094-1:2008, para o escorregamento com carga nominal.

Conforme já foi exposto anteriormente, o valor do escorregamento deve ser corrigido para a temperatura especificada. Essa temperatura é aquela obtida durante a realização do ensaio térmico, somada à temperatura ambiente de 25°C. Logo, aplicando a Equação 4.16,

$$t_e = 102,180 + 25 = 127,180^\circ C$$

Tabela 4.12 – Resultados do ensaio para determinação do escorregamento.

Carga (%)	Corrente de linha (A)	Velocidade mecânica (rpm)	Escorregamento (%)	Temperatura ao final do ensaio (°C)
100	8,738	3432	4,667	141,328
75	6,613	3508	2,556	105,534
50	4,908	3564	1	69,741

Os valores de escorregamento corrigidos empregando a Equação 4.15 são mostrados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Escorregamento corrigido para a temperatura especificada.

Carga (%)	Escorregamento corrigido (%)
100	4,491
75	2,719
50	1,189

4.5.6 – Ensaio para determinação do rendimento

O rendimento, definido em 2.5, é a relação entre a potência de saída e a potência de entrada. A potência de saída é igual à potência de entrada menos as perdas. Consequentemente, se duas dessas três variáveis (potência de saída, potência de entrada ou perdas) forem conhecidas, será possível manipular a Equação 2.3 para determinar o rendimento da seguinte forma:

$$\eta_{\%} = \frac{P_{\text{entrada}} - P_{\text{perdas}}}{P_{\text{entrada}}} \cdot 100 \quad (4.17)$$

$$\eta_{\%} = \frac{P_{\text{saída}}}{P_{\text{saída}} + P_{\text{perdas}}} \cdot 100 \quad (4.18)$$

Onde:

P_{perdas} – Representa o somatório das perdas internas.

Segundo consta na NBR 5383-1:2002, o rendimento deve ser determinado para tensão e frequência nominais, a não ser quando especificado de forma diferente e qualquer um dos métodos identificados na Tabela 4.14, assim como suas variações, podem ser utilizados. Em geral, ainda segundo recomendação da referida norma, motores de indução de gaiola, trifásicos, horizontais, com potência nominal entre 1 e 250 cv, devem ser preferencialmente ensaiados pelo método 2.

Para o ensaio de determinação do rendimento, devem ser obtidas leituras para quatro pontos de carga, aproximadamente em 25%, 50%, 75% e 100% da carga nominal, e dois pontos de carga adequadamente escolhidos acima de 100%, mas não excedendo 150% da carga nominal. A carga do motor deve ser colocada em ordem decrescente, ou seja, começando pelo maior ponto e diminuindo continuamente até o menor ponto de carga.

Em virtude de limitações da plataforma experimental, foi escolhido para ensaio do motor em estudo o método 5 de determinação do rendimento, com cinco pontos de carga aproximadamente igualmente espaçados: 140%, 125%, 100%, 75% e 50%.

Tabela 4.14 – Métodos utilizados para a determinação do rendimento em motores de indução trifásicos.

Método	Descrição
1	Medição direta da potência de entrada e de saída
2	Ensaio dinamométrico com medição indireta das perdas suplementares e medição direta das perdas no estator (I^2R), no núcleo, no rotor (I^2R) e por atrito e ventilação
3	Motores duplicados com segregação de perdas e medição indireta das perdas suplementares
4	Medição da potência elétrica em carga com segregação de perdas e medição direta das perdas suplementares
5	Medição da potência elétrica em carga com segregação de perdas e valor assumido das perdas suplementares
6	Círculo equivalente com a medição direta das perdas suplementares
7	Círculo equivalente com valor assumido das perdas suplementares
8	Círculo equivalente calibrado por um ponto de carga do método 3
9	Círculo equivalente calibrado por um ponto de carga do método 4
10	Círculo equivalente calibrado por um ponto de carga do método 5

O método 5 consiste na medição da potência de entrada, sendo que a potência de saída é obtida subtraindo-se as perdas totais da potência de entrada. As perdas totais representam o somatório das perdas I^2R no estator e no rotor corrigidas para a temperatura especificada para a correção da resistência, das perdas no núcleo, das perdas por atrito e ventilação e das perdas suplementares.

A perda suplementar, quando não for medida, deve ter seu valor à carga nominal assumido como sendo o valor mostrado na Tabela 4.15. Para outro ponto que não seja o de carga nominal, deve-se admitir que a perda suplementar é proporcional à corrente do rotor ao quadrado:

$$P_{sup} = P'_{sup} \cdot \left(\frac{I_2}{I'_2} \right)^2 \quad (4.19)$$

Onde:

P_{sup} – Valor da perda suplementar para um ponto de carga diferente do nominal.

P'_{sup} – Valor da perda suplementar correspondente ao valor da corrente I'_2 .

I_2 – Corrente do rotor apropriada ao ponto de carga para o qual a perda suplementar é para ser determinada.

I'_2 – Valor da corrente do rotor correspondente à carga nominal.

Tabela 4.15 – Valores assumidos de perda suplementar em motores de indução trifásicos.

Potência nominal do motor		Perda suplementar (porcentagem da potência de saída nominal)
kW	cv	
0,75 - 90	1 - 125	1,8
91 - 375	126 - 500	1,5
376 – 1 839	501 – 2 499	1,2
1 840 e acima	2 500 e acima	0,9

Os procedimentos para a realização do ensaio para determinação do rendimento são os seguintes:

- Fazer um ensaio em vazio;
- Fazer um ensaio em carga. Para obter os dados necessários é preciso acoplar o motor a um sistema de carga variável. Para cada um dos pontos de carga, medir

a potência de entrada, a corrente de linha, a tensão aplicada, a velocidade, a temperatura ambiente e a resistência ou a temperatura do enrolamento do estator;

- Determinar a perda I^2R no estator;
- Determinar a perda I^2R no rotor;
- Determinar a perda no núcleo;
- Determinar a perda por atrito e ventilação;
- Calcular a corrente do rotor correspondente a cada ponto de carga;
- Calcular a perda suplementar para cada ponto de carga;
- Determinar o rendimento para cada ponto de carga.

O ensaio em vazio é descrito no item 4.5.4. A realização desse ensaio determina a perda no núcleo e a perda por atrito e ventilação, que são classificadas como perdas fixas, conforme especificado na Tabela 2.1.

Para realizar o ensaio com carga, deve-se operar a plataforma experimental conforme descrito no item 4.4, alimentando o MIT através da fonte programável. A corrente de armadura da MCC deve ser ajustada para obter o percentual de carga desejado. A leitura de velocidade é feita com a utilização de um tacômetro digital. A Tabela 4.16 apresenta os resultados do ensaio com carga.

Tabela 4.16 – Resultados do ensaio em carga para determinação do rendimento.

	Carga percentual				
	140%	125%	100%	75%	50%
Potência de entrada (kW)	3,803	3,442	2,732	1,803	0,853
Corrente de linha (A)	11,356	10,530	8,738	6,613	4,908
Tensão de linha (A)	219,95	219,95	219,95	219,95	219,95
Velocidade (rpm)	3275	3340	3432	3508	3564
Temperatura ambiente (°C)	25	25	25	25	25
Resistência do estator (Ω)	3,75	3,45	3,15	2,85	2,55

As perdas I^2R no estator são calculadas conforme 4.5.4.2 para cada ponto de carga, utilizando os valores da corrente de linha e da resistência do estator que constam na Tabela 4.16.

Para determinar as perdas I^2R no rotor é necessário inicialmente calcular o escorregamento para cada ponto de carga, empregando os valores de velocidade da Tabela 4.16 na Equação 2.2. As perdas no rotor são definidas da seguinte forma:

$$perda I^2 \cdot R \text{ no rotor} = (P_{\text{entrada}} - perda I^2 \cdot R \text{ no estator} - P_{\text{núcleo}}) \cdot s \quad (4.20)$$

Antes de efetuar o cálculo da perda suplementar, é preciso conhecer o valor da corrente do rotor para cada ponto de carga, que pode ser determinada pela equação:

$$I_2 = \sqrt{I^2 - I_0^2} \quad (4.21)$$

Onde:

I_2 – Corrente do rotor.

I – Corrente de linha do estator apropriada para a qual a perda suplementar está sendo determinada.

I_0 – Corrente do estator em vazio.

O próximo passo para a determinação da perda suplementar é utilizar a Tabela 4.15 para encontrar o seu valor à carga nominal, e a Equação 4.19 para obter os valores para os demais pontos de carga.

Os valores de todas as perdas internas do MIT, calculados para todos os pontos de carga ensaiados, são mostrados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Relação das perdas internas para cada ponto de carga.

	Carga percentual				
	140%	125%	100%	75%	50%
Perda I^2R no estator (W)	483,595	382,539	240,511	124,636	61,426
Perda no núcleo (W)	95,196	95,196	95,196	95,196	95,196
Perda I^2R no rotor (W)	291,074	214,086	111,827	40,459	6,964
Perda por atrito e ventilação (W)	90	90	90	90	90
Perda suplementar (W)	84,654	70,749	44,186	19,090	3,975
Total (W)	1044,519	852,570	581,720	369,381	257,561

Com os valores de perdas disponíveis, a Equação 4.17 pode ser utilizada para o cálculo do rendimento. O resultado é apresentado na Tabela 4.18.

O Apêndice B revela o limite de tolerância admissível, de acordo com a NBR 17094-1:2008, para o rendimento com carga nominal.

Tabela 4.18 – Determinação do rendimento percentual para cada ponto de carga.

	Carga percentual				
	140%	125%	100%	75%	50%
Potência de entrada (W)	3803	3442	2732	1803	853
Perdas totais (W)	1044,519	852,570	581,720	369,381	257,561
Potência de saída (W): $P_{\text{entrada}} - P_{\text{perdas}}$	2758,481	2589,43	2150,28	1433,619	595,439
Rendimento ($\eta\%$)	72,534%	75,230%	78,707%	79,513%	69,805%

4.5.6.1 – Determinação do conjugado para cada ponto de carga

O conjugado para cada ponto de carga do ensaio para determinação do rendimento pode ser calculado utilizando os valores de potência de saída da Tabela 4.18 na expressão:

$$P_{\text{saída}} = C \cdot \omega \therefore C = \frac{P_{\text{saída}}}{\omega} \quad (4.22)$$

Onde:

$P_{\text{saída}}$ – Potência mecânica de saída (W).

C – Conjugado (N · m).

ω – Velocidade angular mecânica (rad/s).

A velocidade angular mecânica é obtida convertendo-se os valores de velocidade da Tabela 4.16 em rotações por minuto, utilizando a equação:

$$\omega = n \cdot \frac{2\pi}{60} \quad (4.23)$$

Onde:

n – Velocidade em rotações por minuto.

A Tabela 4.19 apresenta os valores convertidos de velocidade e o conjugado calculado para cada ponto de carga.

Tabela 4.19 – Determinação conjugado para cada ponto de carga.

	Carga percentual				
	140%	125%	100%	75%	50%
Potência de saída (W)	2758,481	2589,43	2150,28	1433,619	595,439
Velocidade (rad/s)	342,957	349,764	359,398	367,357	373,221
Conjugado (N · m)	8,043	7,403	5,983	3,902	1,595

4.5.7 – Ensaio para determinação do fator de potência

Um motor de indução trifásico não consome apenas a potência ativa que será convertida em trabalho mecânico. Ele também consome uma parcela de potência reativa, necessária para magnetização, mas que não produz trabalho. A soma vetorial das potências ativa e reativa resultam na potência aparente. O fator de potência, indicado por $\cos \varphi$, determina qual parcela da potência aparente é potência real.

As potências ativa, reativa e aparente podem ser representadas por um triângulo retângulo, também chamado de triângulo de potência, conforme mostrado na Figura 4.10.

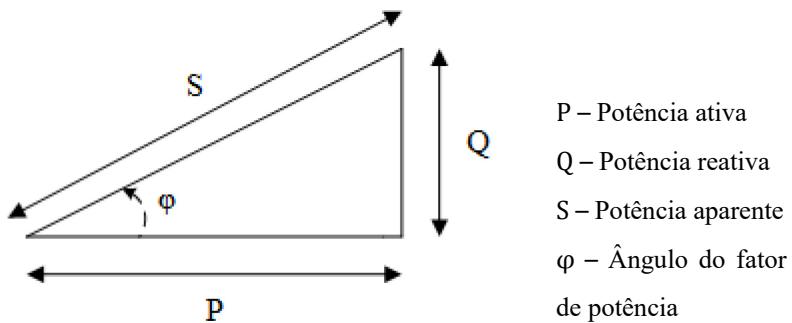


Figura 4.10 – Triângulo de potência.

Tanto a potência real, quanto a reativa ou a aparente podem ser expressas em termos de tensão e corrente. Dessa forma, é possível deduzir que o ângulo φ representa o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente. Assim, para motores trifásicos, o fator de potência pode ser obtido pela equação:

$$\cos \varphi = \frac{P_{\text{entrada}}}{\sqrt{3} \cdot V \cdot I} \quad (4.24)$$

Onde:

P_{entrada} – Potência ativa trifásica de entrada.

V – Tensão entre fases.

I – Corrente de linha.

É comum expressar o fator de potência como um decimal ou como uma porcentagem.

Um fator de potência de 0,8 significa que o equipamento utiliza 80% da potência aparente de entrada.

Tradicionalmente, a obtenção do fator de potência é feita através de um ensaio com dois wattímetros monofásicos e a equação a seguir é utilizada para o cálculo:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + 3 \cdot \left(\frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2}\right)^2}} \quad (4.25)$$

Onde:

P_1 – Indica a maior leitura.

P_2 – Indica a menor leitura.

O fator de potência também pode ser determinado com a utilização de um wattímetro trifásico ou ainda por meio do circuito equivalente do MIT.

Para o trabalho em questão, o ensaio foi realizado operando a plataforma experimental, conforme item 4.4, sendo a leitura do fator de potência feita diretamente através do painel da fonte programável. Foram efetuadas leituras para três pontos de carga e os resultados são apresentados na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 – Resultados do ensaio para determinação do fator de potência.

Carga (%)	Corrente de linha (A)	Fator de potência			
		Fase A	Fase B	Fase C	Média
100	8,738	0,86	0,86	0,87	0,863
75	6,613	0,82	0,81	0,82	0,817
50	4,908	0,47	0,43	0,47	0,457

O limite de tolerância admissível, de acordo com a NBR 17094-1:2008, para o fator de potência com carga nominal é apresentado no Apêndice B.

4.5.8 – Outros ensaios

Além dos ensaios recomendados pela NBR 5383-1:2002, foram realizados ensaios para verificar o desempenho do motor em condições atípicas e também para evidenciar outros recursos da fonte programável.

4.5.8.1 – *Ensaio com inserção de harmônicos de tensão*

A palavra “harmônico” foi definida originalmente em acústica, significando a vibração de um fio ou de uma coluna de ar, com frequência múltipla e diferente da fundamental, provocando uma distorção na qualidade do som resultante. Fenômenos semelhantes ocorrem na Engenharia Elétrica, onde deformações nas formas de onda das tensões e correntes são registradas. Assim, os fundamentos físicos e matemáticos utilizados naquela área da Física podem ser aplicados às questões elétricas (Garcia).

A presença de harmônicos nos sistemas de potência deve ser vista como indesejável, pois ocasiona gastos financeiros desnecessários para concessionárias e usuários. Os harmônicos, de maneira geral, são responsáveis por perdas ôhmicas, por solicitações anormais de isolamento e pela má operação de equipamentos (Garcia).

A caracterização da presença de harmônicos pode ser feita através do tratamento individual ou total. A *distorção harmônica individual* é definida pela relação entre a amplitude harmônica de ordem h e a sua correspondente na frequência fundamental:

$$DHI_V = \frac{V_h}{V_f} \quad (4.26)$$

$$DHI_I = \frac{I_h}{I_f} \quad (4.27)$$

Onde:

DHI_V – Distorção harmônica individual de tensão.

V_h – Tensão harmônica individual de ordem h .

V_f – Tensão na frequência fundamental.

DHI_I – Distorção harmônica individual de corrente.

I_h – Corrente harmônica individual de ordem h.

I_f – Corrente na frequência fundamental.

A distorção harmônica total representa a ação conjunta de todas as frequências harmônicas presentes nos sinais de tensão ou de corrente, expressa por uma composição quadrática das distorções individuais:

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_f} \cdot 100 \quad (4.28)$$

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_f} \cdot 100 \quad (4.29)$$

Onde:

DHT_V – Distorção harmônica total de tensão.

DHT_I – Distorção harmônica total de corrente.

Em motores de indução trifásicos, a presença de conteúdo harmônico na tensão de alimentação provoca a elevação das perdas no cobre e no ferro. A elevação das perdas no ferro é consequência de maiores níveis de correntes parasitas nas chapas do rotor e do estator e da geração de calor adicional no ferro da máquina (Isoni). As perdas no cobre também são consideráveis, por conta de variações na resistência do enrolamento e do aumento da corrente eficaz total. O acréscimo de perdas é refletido na diminuição da eficiência (rendimento) e da vida útil da máquina.

Outra variável que sofre influência em motores de indução quando alimentados por sistemas com tensões e correntes com harmônicos é o conjugado. Algumas componentes harmônicas, ou pares de componentes (por exemplo, 5^a e 7^a produzindo uma resultante de 6^a harmônica), podem estimular oscilações mecânicas devido a uma potencial excitação de ressonâncias mecânicas (Efeitos e causas de harmônicas no sistema de energia elétrica).

Os ensaios efetuados na plataforma experimental com inserção de harmônicos de tensão trazem como objetivo principal a verificação experimental da elevação das perdas totais no MIT. A fonte programável foi configurada para inserir uma DHT_V de 10% e o motor foi acionado com carga nominal. A Figura 4.11 apresenta a tela do *software* da fonte programável para geração de forma de onda com harmônicos. A Tabela 4.21 mostra os valores eficazes dos harmônicos inseridos na forma de onda da tensão.

Tabela 4.21 – Valores eficazes de harmônicos de tensão.

Ordem harmônica	Percentual	Valor eficaz
Fundamental	100%	220 V
5	8%	17,6 V
7	5%	11 V
11	3%	6,6 V
13	1%	2,2 V
17	1%	2,2 V

Inserindo os valores de harmônicos da Tabela 4.21 na Equação 4.28 é possível comprovar a DHT_V de 10%:

$$DHT_V = \frac{\sqrt{17,6^2 + 11^2 + 6,6^2 + 2,2^2 + 2,2^2}}{220} \cdot 100 = 10\%$$

As medições realizadas durante o ensaio são apresentadas na Tabela 4.22. É possível verificar que uma distorção harmônica total de tensão de 10% promove uma distorção harmônica total na corrente em torno de 15%.

A Figura 4.12a mostra a forma de onda da tensão de linha, enquanto que a Figura 4.12b mostra o espectro de harmônicos da fase A. A Figura 4.13 apresenta esses mesmos resultados para a corrente. As imagens foram obtidas por meio de um osciloscópio digital.

Comparando os espectros de harmônicos das Figuras 4.12b e 4.13b é possível verificar que houve um aumento expressivo no harmônico de quinta ordem para a corrente. A Figura 4.14 apresenta os percentuais de harmônicos ímpares de corrente até a décima sétima ordem para cada fase. Os dados foram adquiridos através do osciloscópio digital e os gráficos foram gerados utilizando o Microsoft Excel.

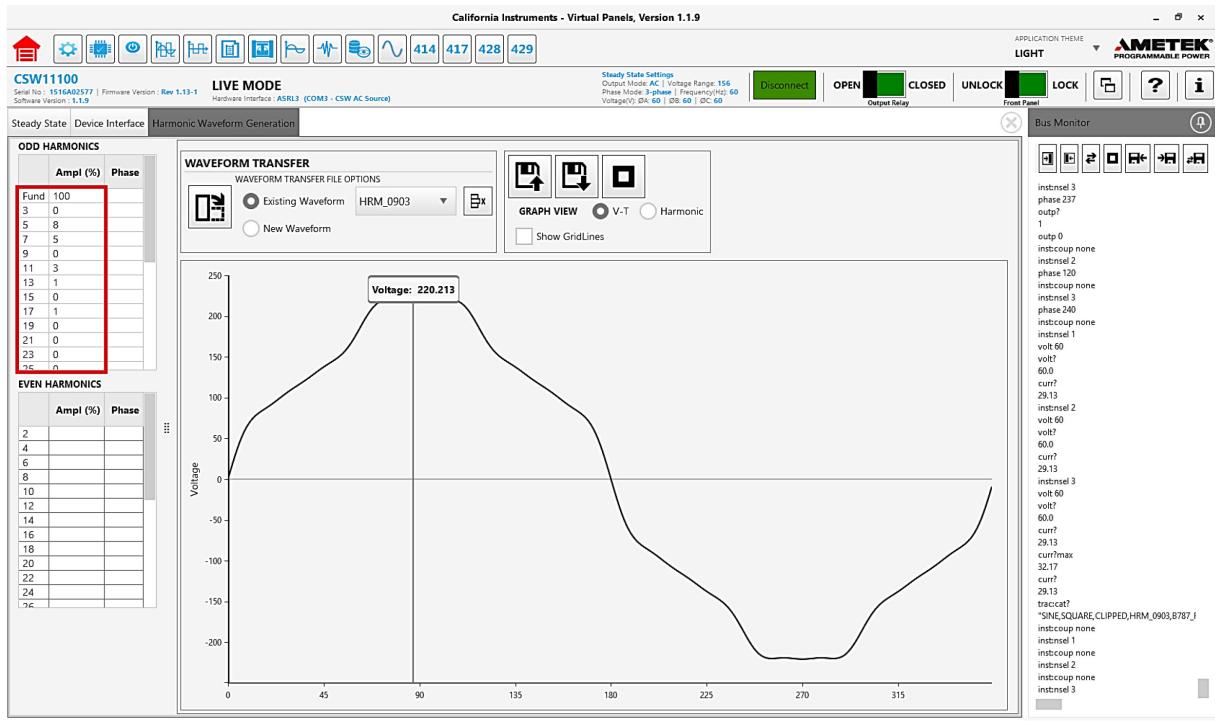
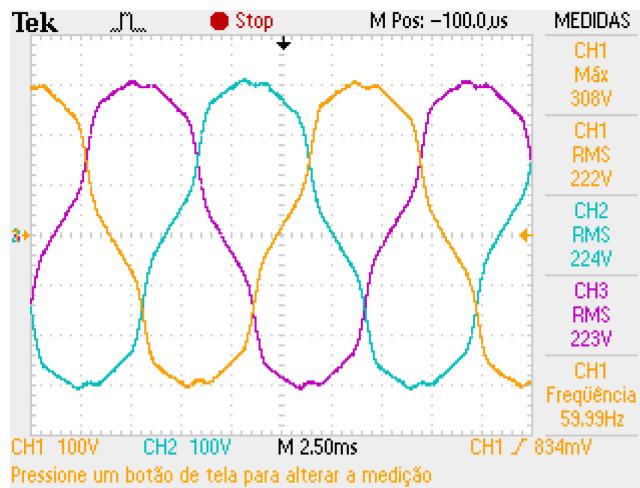


Figura 4.11 – Interface de geração de forma de onda com harmônicos.

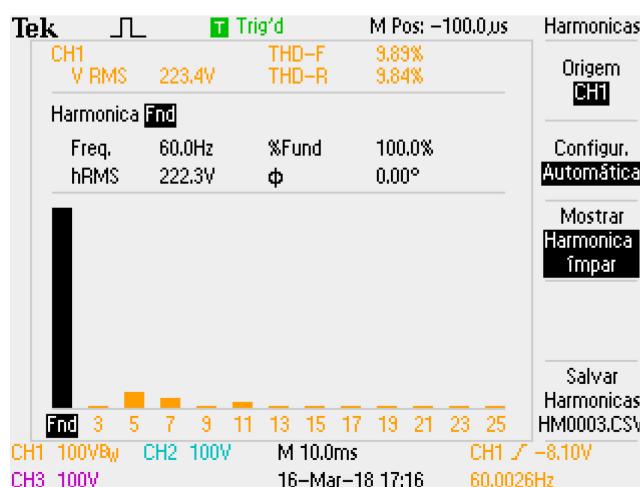
As perdas internas podem ser determinadas por meio do cálculo do rendimento, conhecendo-se a potência de entrada e a potência mecânica de saída. A potência trifásica de entrada é a soma dos valores de potência de cada fase da Tabela 4.22. A potência mecânica de saída pode ser obtida através da Equação 4.22.

Tabela 4.22 – Medições efetuadas durante o ensaio com inserção de harmônicos de tensão.

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensão (V)	220	220	220
Corrente (A)	8,004	8,211	8,318
Potência (kW)	0,804	0,815	0,844
Fator de potência	0,79	0,78	0,80
DHT_V (%)	9,91	9,91	9,91
DHT_I (%)	15,62	15,39	15,23

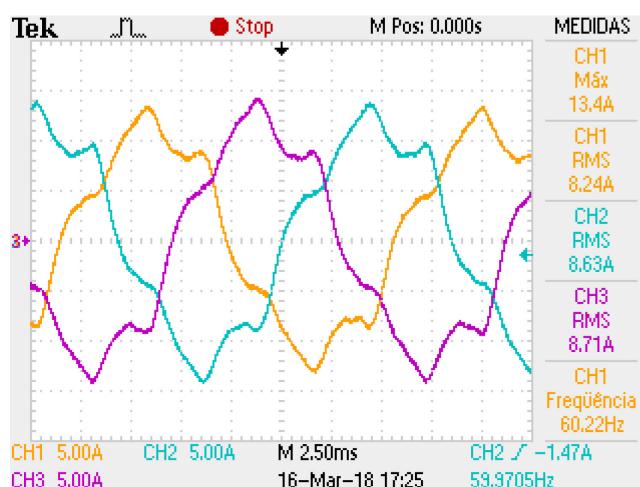


(a)

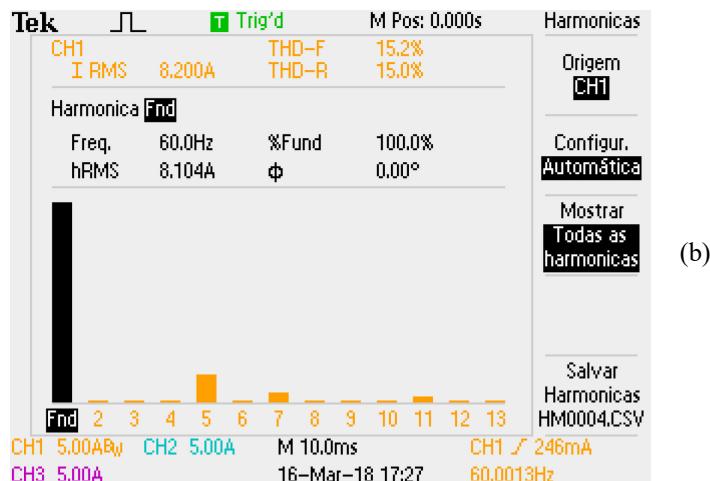


(b)

Figura 4.12 – Ensaio com inserção de harmônicos: (a) Tensão de linha; (b) Espectro de harmônicos da fase A.



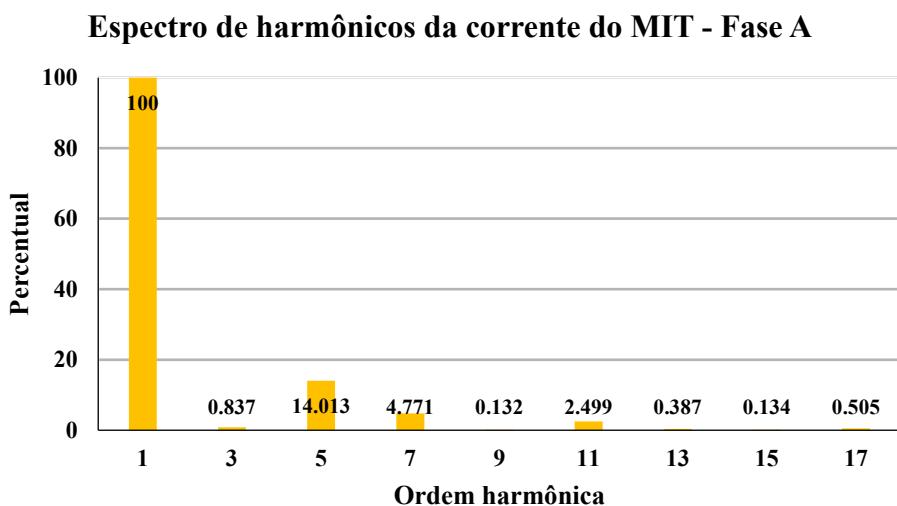
(a)



(b)

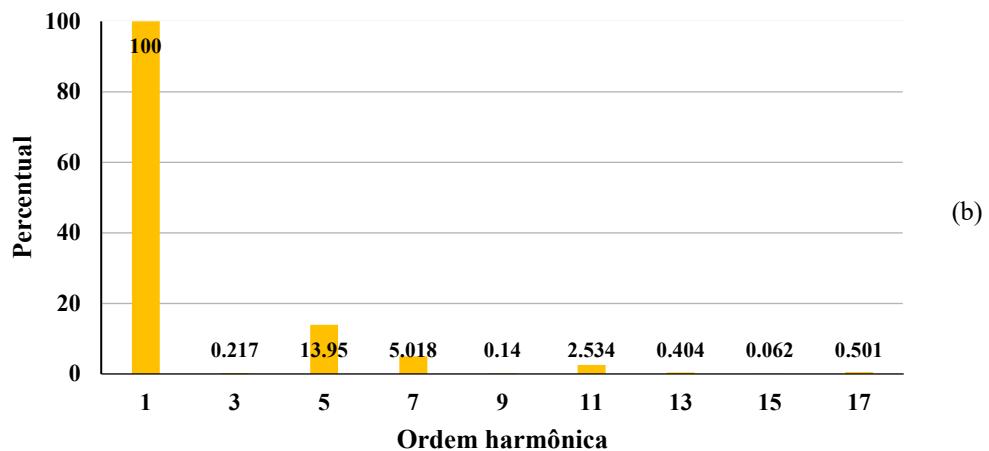
Figura 4.13 – Ensaio com inserção de harmônicos: (a) Corrente de linha; (b) Espectro de harmônicos da fase A.

Para este ensaio, os valores da velocidade e do conjugado foram adquiridos, respectivamente, por meio de um tacômetro digital e de um transdutor de conjugado. O tacômetro digital efetua a leitura em rotações por minuto (rpm) e esse valor deve ser convertido para radianos por segundo para o cálculo da potência de saída. Já o valor de conjugado é obtido em forma de tensão e deve ser descontado um valor de 347 mV correspondente ao *offset* gerado pela *junction box* do equipamento. Como o transdutor possui fundo de escala de 50 N · m, cada milivolt lido corresponde a 1 N · m. Os resultados das leituras e conversões são apresentados na Tabela 4.23 e a Figura 4.15 apresenta o conjugado instantâneo, obtido através do osciloscópio digital. A ondulação que aparece na forma de onda é um problema que ainda não foi diagnosticado (a suspeita é de que a causa seja vibração mecânica).



(a)

Espectro de harmônicos da corrente do MIT - Fase B



Espectro de harmônicos da corrente do MIT - Fase C

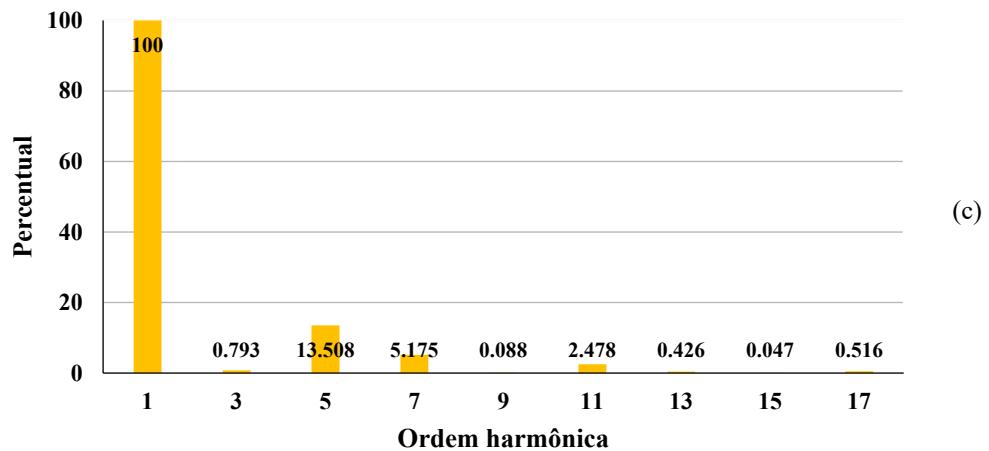


Figura 4.14 – Percentual de harmônicos na corrente do MIT: (a) Fase A; (b) Fase B; (c) Fase C.

Tabela 4.23 – Leitura e conversão dos valores de velocidade e conjugado.

	Leitura	Conversão
Velocidade	3454 rpm	361,702 rad/s
Conjugado	406 mV	4,06 N · m

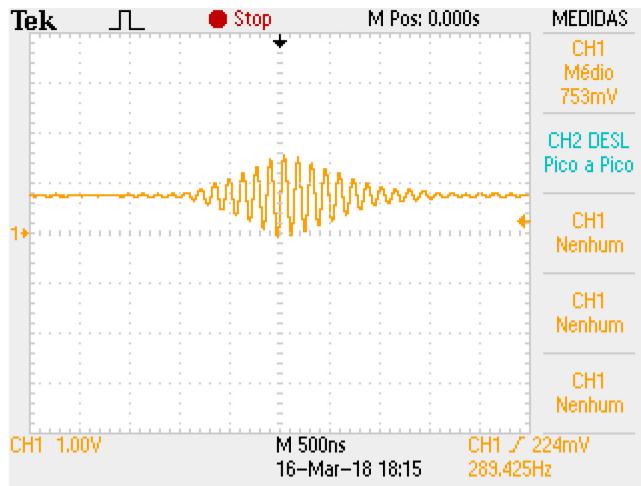


Figura 4.15 – Ensaio com inserção de harmônicos: forma de onda do conjugado do MIT.

Inserido os valores convertidos da Tabela 4.22 na Equação 4.22, tem-se:

$$P_{saída} = 4,06 \cdot 361,702 = 1468,51 \text{ W}$$

O rendimento pode ser calculado empregando a Equação 2.3:

$$\eta_{\%} = \frac{1468,51}{2363} \cdot 100 = 59,623\%$$

Esse valor obtido, se comparado àquele do ensaio para determinação do rendimento do item 4.5.6 (Tabela 4.18) para o mesmo percentual de carga, apresenta redução considerável (quase 25% menor), o que comprova que a presença de harmônicos eleva significativamente as perdas internas em máquinas de indução, comprometendo o seu desempenho.

4.5.8.2 – Ensaio com inserção de afundamento de tensão

No contexto do módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição da Agência Nacional de Energia Elétrica (PRODIST/Aneel), o afundamento de tensão faz parte do fenômeno definido como variação de tensão de curta duração (VTCD), que é um desvio significativo na amplitude do valor eficaz da tensão, durante um período de tempo inferior a três minutos. As variações de tensão de curta duração são classificadas de acordo com a Tabela 4.24.

Tabela 4.24 – Classificação das variações de tensão de curta duração (ANEEL, 2018).

Classificação	Denominação	Duração da variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p. u. ⁴
	Afundamento Momentâneo de Tensão	superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p. u.
	Elevação Momentânea de Tensão	superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p. u.
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p. u.
	Afundamento Temporário de Tensão	superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p. u.
	Elevação Temporária de Tensão	superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p. u.

A importância das análises e das medições dos afundamentos de tensão está relacionada à continuidade de operação de plantas industriais ou de prédios comerciais e dos equipamentos instalados, uma vez que determinadas cargas possuem restrita tolerância em relação à tensão de alimentação (Starosta, 2012).

Os efeitos dos afundamentos de tensão observados em máquinas de indução são os seguintes: perda de velocidade durante o afundamento e picos de conjugado nos instantes inicial e final da queda de tensão, além de elevação da corrente (Llerena, 2006).

Para este ensaio, a fonte programável foi configurada para gerar um afundamento temporário de tensão com duração de três minutos. O MIT foi acionado com carga nominal e, após um tempo de funcionamento, a tensão caiu para um valor em torno de 0,75 p. u. (equivalente a 165 V). Os efeitos causados foram elevação de corrente e redução de conjugado

⁴ p. u.: Grandeza em por unidade, uma fração decimal do valor base.

e velocidade. A Figura 4.16 apresenta a interface da fonte programável para edição de transientes.

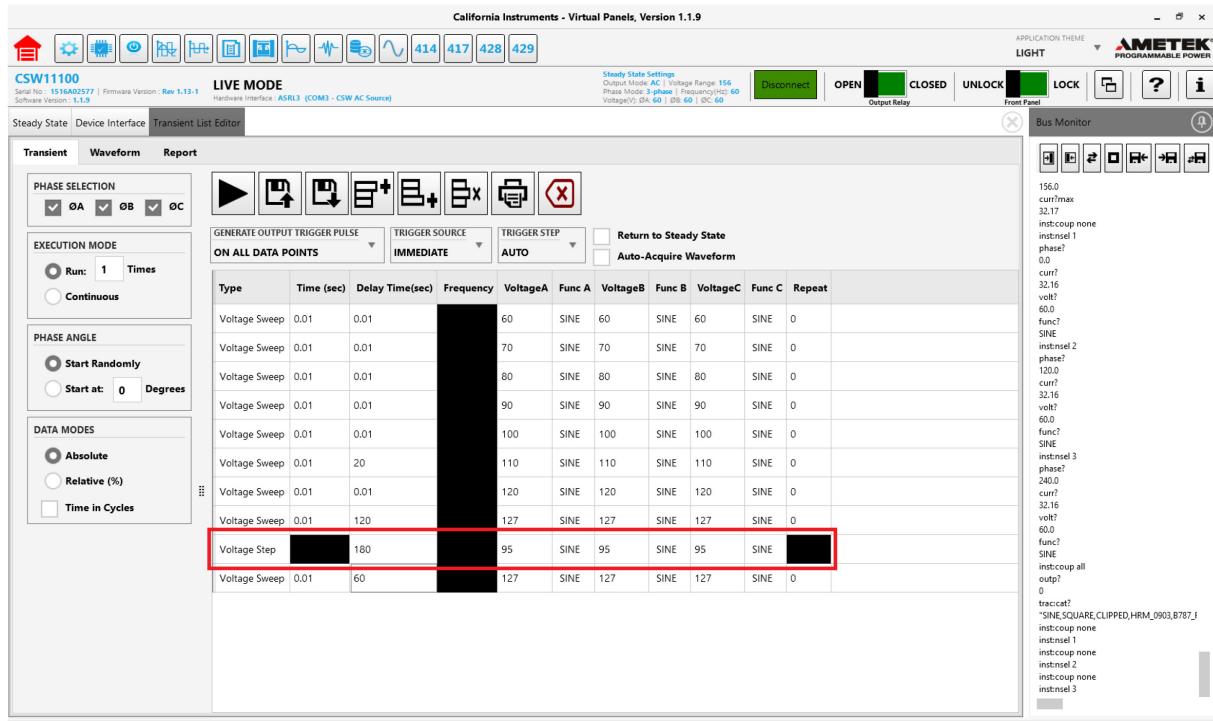


Figura 4.16 – Interface para edição de transientes.

A Tabela 4.25 apresenta as medições efetuadas no momento em que ocorreu o afundamento de tensão.

Tabela 4.25 – Medições efetuadas durante o ensaio de afundamento temporário de tensão.

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensão (V)	164,55	164,55	164,55
Corrente (A)	9,503	9,700	9,800
Potência (kW)	0,806	0,822	0,835
Fator de potência	0,90	0,93	0,93
Velocidade (rpm)	3300		
Conjugado (N · m)	4,17		

A Figura 4.17 traz as formas de onda de tensão, corrente e conjugado adquiridas durante o ensaio de afundamento de tensão.

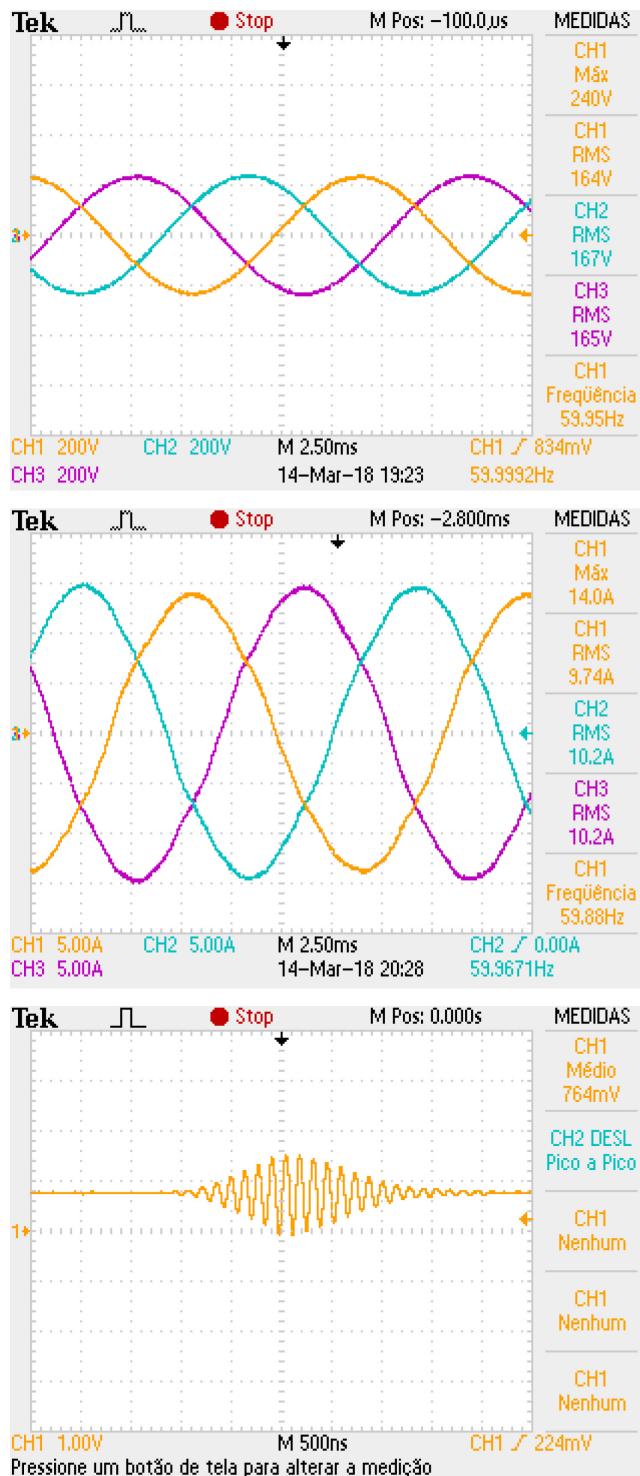


Figura 4.17 – Ensaio de afundamento temporário de tensão: (a) Tensão de linha; (b) Corrente de linha; (c) Conjugado.

Os valores de corrente apresentados na Tabela 4.24 se aproximam daqueles estabelecidos nas especificações nominais para o fator de serviço, ou seja, o motor consegue suportar essa corrente de duração limitada. Entretanto, vale lembrar que na condição de

afundamento ocorre redução de velocidade e de conjugado, o que prejudica o desempenho da máquina.

A potência de saída e o rendimento da máquina durante o afundamento momentâneo podem ser calculados utilizando o valor de velocidade convertido para radianos por segundo na Equação 4.22 e soma dos valores de potência de entrada de cada fase na Equação 2.3:

$$P_{saída} = 4,17 \cdot 345,575 = 1441,048 \text{ W}$$

$$\eta\% = \frac{1441,048}{2463} \cdot 100 = 58,501\%$$

4.6 – Análise das curvas de desempenho do motor de indução trifásico

Os ensaios realizados de acordo com a norma NBR 5383-1:2002 e a obtenção dos parâmetros do circuito equivalente do MIT permitem efetuar a análise do desempenho do motor de indução trifásico a partir das suas variáveis elétricas de entrada (corrente e fator de potência) e das variáveis mecânicas de saída (conjugado, potência e velocidade).

Considerando a tensão de alimentação fixa, é possível efetuar simulações computacionais, inserindo os parâmetros do circuito equivalente monofásico, além de outros dados, como as perdas fixas, para obter as curvas de desempenho do motor de indução.

Para este trabalho, as simulações foram feitas com auxílio do *software* MATLAB ®, uma ferramenta muito útil para análise de dados, elaboração de algoritmos, criação de modelos matemáticos, entre outras aplicações. O código fonte utilizado é mostrado no Apêndice D.

A primeira característica estudada é a de conjugado *versus* velocidade, apresentada na Figura 4.18. Essa curva pode ser comparada àquela mostrada na Figura 2.5, onde é possível verificar o conjugado de partida, o conjugado máximo, além do conjugado nominal. O conjugado de partida acima do nominal indica que o motor tem condições de partir com carga acoplada. A relação entre o conjugado máximo e o nominal indica o quanto aproximadamente pode ser retirado do motor, além da potência nominal, em aplicações de curto espaço de tempo.

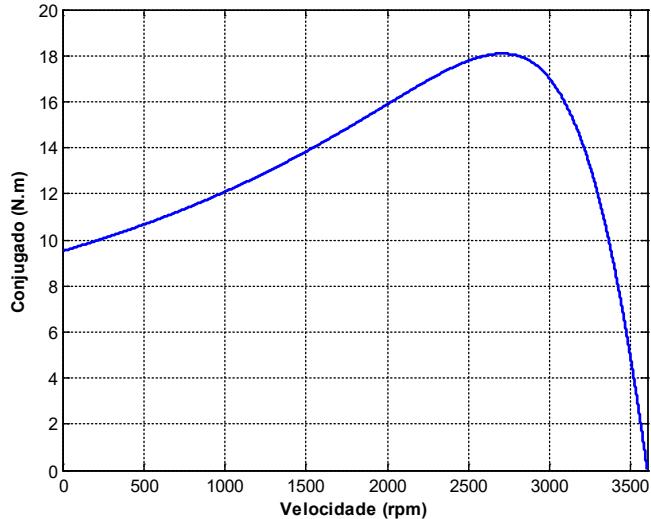


Figura 4.18 – Curva característica de conjugado *versus* velocidade.

A Figura 4.19 apresenta a curva de potência *versus* velocidade. É possível verificar que a velocidade na qual ocorre a potência máxima é diferente daquela onde ocorre o conjugado máximo na Figura 4.18, o que faz todo o sentido, uma vez que essas variáveis não se relacionam por meio de uma constante.

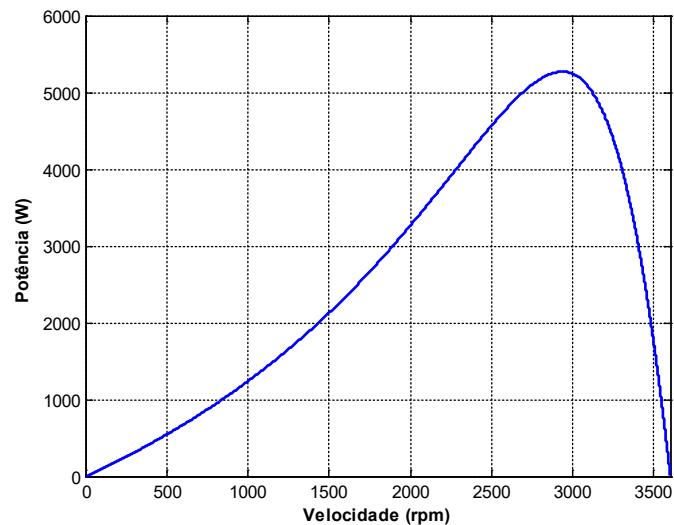


Figura 4.19 – Curva característica de potência *versus* velocidade.

A curva de corrente (de estator e de rotor) em função da velocidade é mostrada na Figura 4.20. O alto valor da corrente de partida e a demora em sua redução é uma característica notável em motores de indução trifásicos. Tempos de partida relativamente elevados e partidas

frequentes têm como consequência aumento de perdas por efeito Joule, além de elevação de temperatura.

É importante ressaltar que a carga mecânica não exerce influência sobre o valor da corrente de partida. A influência da carga é sobre o tempo de duração da corrente de partida, sendo este tempo tanto maior quanto mais “pesada” for a carga para o motor.

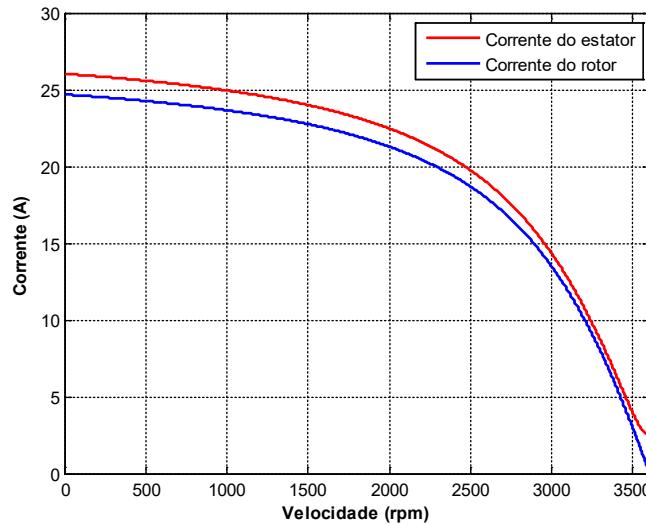


Figura 4.20 – Curva de corrente *versus* velocidade.

A característica do fator de potência é apresentada na Figura 4.21. Na partida, o fator de potência é baixo, porém ele aumenta com a velocidade e, nas proximidades da velocidade síncrona (motor em vazio), o seu valor é extremamente baixo.

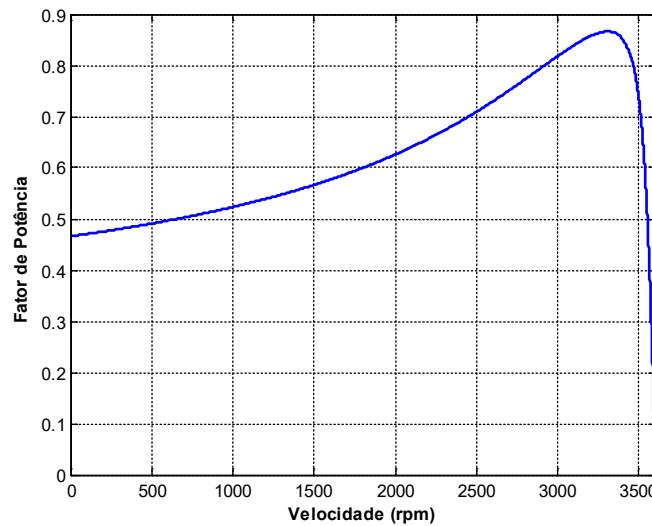


Figura 4.21 – Curva de fator de potência *versus* velocidade.

Baixos valores de fator de potência podem ocorrer também quando o motor é superdimensionado. Nesse caso, a potência da carga mecânica é bem menor do que o valor da potência nominal do MIT e, portanto, o motor trabalha mais próximo da velocidade síncrona.

A última curva mostrada é a do rendimento, na Figura 4.22. O valor máximo do rendimento ocorre próximo da velocidade nominal, porém pode ser que essa faixa se estenda desde a velocidade nominal até aquela associada a 75% da plena carga.

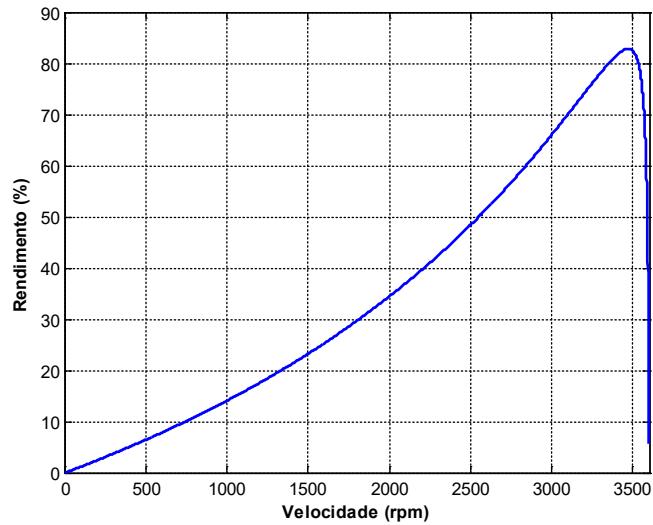


Figura 4.22 – Curva de rendimento *versus* velocidade.

Capítulo 5 – Considerações finais

5.1 – Conclusões

A plataforma experimental implementada contribui de forma continuada para ensaios com motores de indução trifásicos com potência de até 5 cv. A reprodução do seu funcionamento em situações próximas àquelas encontradas em aplicações reais, adequando o motor ao perfil de carga, permite efetuar a análise completa do seu desempenho.

O cumprimento das recomendações contidas nas normas técnicas do segmento de máquinas elétricas garante qualidade, segurança e eficiência para os diversos sistemas. O consenso sobre a utilização das normas assegura o bom funcionamento dos motores e a segurança de pessoas e equipamentos, buscando minimizar ou evitar possíveis avarias.

Os resultados verificados a partir dos ensaios realizados com base na norma NBR 5383-1:2002 aproximam-se, em sua maioria, dos valores nominais da máquina ensaiada, o que sustenta a viabilidade da implementação da plataforma experimental, contribuindo para a realização de estudos de acionamento, eficiência energética e qualidade de energia e possibilitando recomendações de melhorias nas instalações para melhor atender às aplicações.

O ensaio com inserção de harmônicos de tensão e o ensaio com inserção de afundamento de tensão atestam a versatilidade da plataforma para a investigação do funcionamento de motores de indução trifásicos em condições de suprimento não ideal.

A plataforma experimental desenvolvida pode ser utilizada para ensaios de motores novos, reboninados ou ainda os que já estão sendo utilizados por algum tempo nas instalações industriais. A garantia de motores eficientes em processos industriais reduz significativamente as perdas de carga e contribui para minimizar os custos operacionais, uma vez que a correta seleção do motor elétrico para determinada aplicação é fator determinante no custo de sua operação.

5.2 – Propostas para trabalhos futuros

Com base nos estudos realizados, e considerando que aperfeiçoamentos podem ser efetuados para tornar mais prática a operação da plataforma de ensaios, as sugestões para trabalhos futuros passam por:

- Melhoria da comunicação entre a fonte programável e o computador, com a possibilidade de utilização de um protocolo de comunicação específico;
- Criação de uma interface (sistema supervisório) para gerenciamento dos ensaios, com o monitoramento das principais leituras, cálculo dos resultados e a possibilidade de geração de um relatório de ensaios, com indicações a respeito da eficiência dos motores de indução trifásicos;
- Estudos para levantamento da curva real de conjugado *versus* velocidade e da curva de magnetização;
- Ensaios para determinação do momento de inércia e do coeficiente de atrito viscoso;
- Ensaios com aplicação de degrau de carga;
- Ensaios com aplicação de desequilíbrio de tensão;
- Estudo comparativo com motores de fabricantes diferentes;
- Estudo de eficiência entre motores da linha padrão e motores de alto rendimento.

Apêndice A – Relatório dos ensaios realizados com o motor de indução trifásico

Dados de placa e/ou de catálogo do motor:

Motor de indução – Rotor em gaiola – Categoria N		
Fabricante: WEG	Fabricação: 07/11/2008	Nº série: 1003425323
Carcaça: 90S	Nº fases: 3	kW (cv): 2,2 (3,0)
rpm: 3450	Regime de serviço: S1	Fator de serviço: 1,15
Temperatura ambiente (máx.): 40°C	Classe de isolamento: F	Frequência: 60 Hz
Tensão: 220/380 V	Corrente: 8,39/4,86 A	I_p/I_n : 6,7

Conjugado			Rendimento (%)			Fator de Potência		
C_n (N · m)	C_p/C_n	$C_{máx}/C_n$	Percentual de carga			Percentual de carga		
			50%	75%	100%	50%	75%	100%
6,08	3,0	3,0	78,5	80,0	81,9	0,66	0,77	0,84

Relatório de ensaios:

Resistência média a frio do enrolamento do estator entre terminais: 2,175 Ω em 25°C							
Temperatura especificada: 127,180°C							
Perda suplementar nominal: 39,6 W							
Item	Descrição		Carga				
			140%	125%	100%	75%	50%
1	Temperatura ambiente (°C)		25	25	25	25	25
2	Temperatura do enrolamento ao final do ensaio para determinação do rendimento (°C)		212,914	177,121	141,328	105,534	69,741
3	Frequência (Hz)		60	60	60	60	60
4	Velocidade mecânica (rpm)		3275	3340	3432	3508	3564
5	Escorregamento (%)		9,028	7,222	4,667	2,556	1
6	Tensão de linha (V)		219,97	219,97	219,97	219,97	219,97
7	Corrente de linha (A)		11,356	10,530	8,738	6,613	4,908
8	Potência de entrada (W)		3803	3442	2732	1803	853
9	Perdas I^2R no estator (W)		483,595	382,539	240,511	124,636	61,426
10	Perdas no núcleo (W)		95,136	95,136	95,136	95,136	95,136

11	Potência através do entreferro (W)	3224,209	2964,265	2396,293	1583,168	696,378
12	Perdas I^2R no rotor (W)	291,074	214,086	111,827	40,459	6,964
13	Perdas por atrito e ventilação (W)	90	90	90	90	90
14	Corrente do rotor (A)	10,490	9,589	7,578	4,981	2,273
15	Perdas suplementares (W)	84,654	70,749	44,186	19,090	3,975
16	Perdas totais (W)	1044,519	852,570	581,720	369,381	257,561
17	Potência de saída (W)	2758,481	2589,430	2150,280	1433,619	595,439
18	Potência de saída (cv)	3,75	3,52	2,92	1,95	0,81
19	Rendimento (%)	72,534	75,230	78,707	79,513	69,805
20	Fator de potência	-	-	0,863	0,817	0,457
21	Conjugado (N · m)	8,043	7,403	5,983	3,902	1,595

Observações:

1) Foram observadas divergências entre as informações de catálogo e de placa para o conjugado de partida da máquina em estudo, conforme mostra a tabela abaixo:

Parâmetro	Catálogo	Placa
Conjugado de partida (C_p/C_n)	3,0	1,59 ⁵

2) No ensaio realizado para a determinação do rendimento, o valor de rendimento obtido para carga a 50% do valor nominal diferiu em mais de 10% em relação ao valor de catálogo.

3) No ensaio realizado para a determinação do fator de potência, o valor obtido para carga a 50% do valor nominal diferiu em mais de 30% em relação ao valor encontrado no catálogo.

⁵ Valor adquirido observando-se a curva de conjugado *versus* velocidade no item 4.6.

Apêndice B – Tolerâncias estabelecidas em norma para grandezas constantes nas características nominais de motores de indução trifásicos

A norma NBR 17094-1:2008 estipula níveis de tolerância para determinadas grandezas que constam nas especificações nominais de motores de indução trifásicos. A Tabela B.1 apresenta os valores de tolerância incluídos na norma para rendimento, fator de potência e escorregamento.

Tabela B.1 – Tolerâncias.

Grandeza	Tolerância (p. u.)
Rendimento	$+$ sem limite $\eta \geq 0,851$ $\eta < 0,851$
Fator de potência ($\cos \phi$)	$- \frac{1}{6} \cdot (1 - \cos \phi)$ mínimo 0,02 máximo 0,07
Escorregamento (a plena carga e à temperatura de funcionamento) de	
a) Motores de potência igual ou superior a 1 kW	$\pm 20\%$ do escorregamento garantido
b) Motores de potência inferior a 1 kW	$\pm 30\%$ do escorregamento garantido

A partir das informações contidas na Tabela B.1 é possível avaliar se os valores obtidos nos ensaios realizados estão dentro da tolerância admitida em norma para o motor ensaiado. A Tabela B.2 mostra essa análise.

Tabela B.2 – Comparação entre os limites de tolerância e os valores de ensaio.

Grandezas	Tolerância (p. u.)	Dado de ensaio (p. u.)	Comparação
Rendimento	Limite inferior: $0,15 \cdot (1 - 0,819) = 0,0275$ $0,819 - 0,0275 = 0,7915$	0,78707	0,00443 abaixo do limite inferior
Fator de potência	Limite inferior: $\frac{1}{6} \cdot (1 - 0,84) \approx 0,0267$ Valor adotado: 0,02	0,863	0,023 acima do valor nominal
Escorregamento	$\pm 20\%$ do escorregamento garantido	0,04167	12% acima do valor garantido

Apêndice C – Identificação das partes principais e especificações elétricas do motor de indução trifásico W21 da WEG

Na era das máquinas modernas, os motores elétricos são o combustível da inovação. Desempenhando um importante papel na sociedade, o motor elétrico precisa ser identificado e suas características exigem determinados cuidados, dentre os quais os de armazenagem, instalação e manutenção.

Motores com determinadas especialidades podem ser fornecidos com documentos específicos (desenhos, esquema de ligação, curvas características etc.). Estes documentos, juntamente com o manual de instruções, que contém orientações sobre instalação, operação e manutenção, devem ser avaliados criteriosamente antes de manusear o motor, garantindo o bom funcionamento da máquina e a segurança do pessoal envolvido na manutenção.

Conhecer e identificar as partes de um motor de indução trifásico é de fundamental importância para estabelecer condições de funcionamento, ligações, ambiente de instalação e emprego de ferramentas adequadas para manuseio e manutenção. A Figura C.1 apresenta uma vista em corte longitudinal de um MIT com a identificação das suas partes principais.

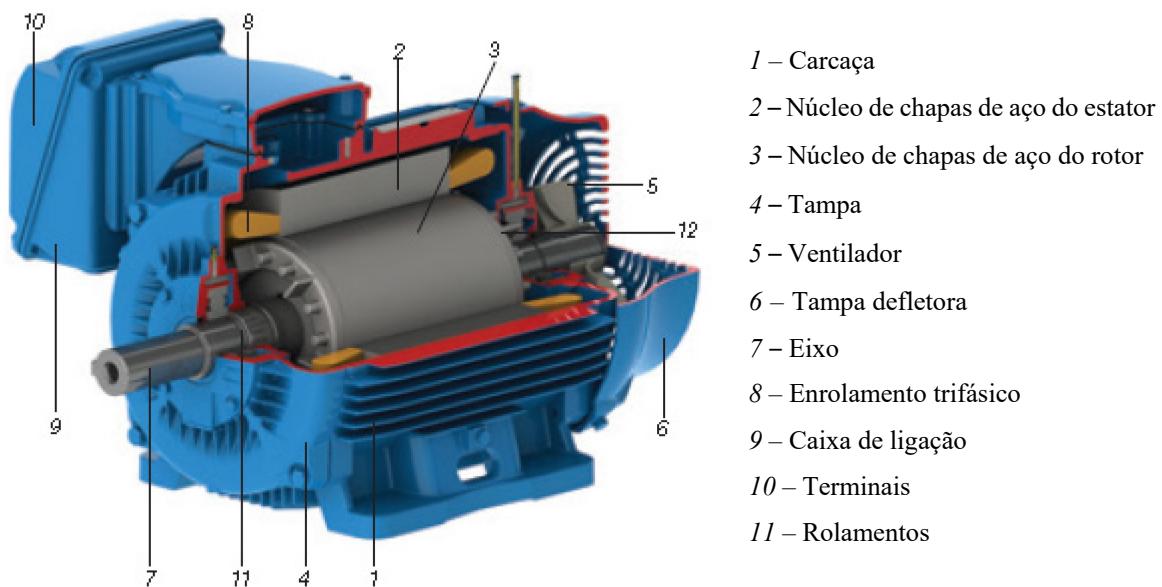


Figura C.1 – Vista em corte longitudinal com identificação das partes principais de um MIT (WEG, 2017).

Para a correta especificação dos motores elétricos, é necessário consultar o catálogo do fabricante para selecionar a máquina que possui as características de potência mais adequadas à sua função.

O motor trifásico W21 da WEG pode ser utilizado para acionar bombas, ventiladores, moinhos, talhas, compressores, entre outras aplicações. A Tabela C.1 apresenta as especificações elétricas de catálogo do motor utilizado no presente trabalho.

Tabela C.1 – Especificações elétricas do motor de indução trifásico W21 da WEG.

Potência cv kW	Carcasa	rpm	Corrente nominal em 220V (A)	Corrente com rotor bloqueado I _b /I _n	Conjugado nominal C _n (Kgfm)	Conjugado com rotor bloqueado C _b /C _n	Conjugado máximo C _{max} /C _n	Rendimento η, %		Fator de potência Cos φ		Fator de serviço FS	Momento de inércia J (Kg m ²)	Tempo máx. com rotor bloqueado (s) aquecimento	Nível médio de pressão sonora db (A)	Peso aprox. (kg)			
								50	75	100	50	75							
2 Pólos - 60 Hz																			
0,16	0,12	63	3400	0,74	4,2	0,03	2,5	2,8	45,0	54,0	58,5	0,51	0,61	0,73	1,15	0,0001	10	98	6,3
0,25	0,18	63	3370	1,00	4,3	0,05	2,4	2,6	52,0	68,0	62,0	0,53	0,65	0,76	1,15	0,00012	9	98	6,5
0,33	0,25	63	3340	1,32	4,0	0,07	2,2	2,4	53,0	60,0	63,0	0,54	0,68	0,79	1,15	0,00013	8	98	6,8
0,5	0,37	63	3340	1,86	4,3	0,11	2,4	2,4	59,0	65,0	66,0	0,54	0,69	0,79	1,15	0,00019	7	98	7,4
0,75	0,55	71	3370	2,48	5,1	0,16	2,4	2,6	64,0	68,5	70,0	0,64	0,77	0,85	1,15	0,00034	8	60	9,6
1	0,75	71	3425	3,00	7,2	0,21	3,5	3,6	73,5	77,0	77,1	0,68	0,78	0,85	1,15	0,00052	9	60	10,3
1,5	1,1	80	3395	4,42	7,0	0,32	3,5	3,1	76,0	78,2	78,6	0,65	0,76	0,83	1,15	0,00074	11	62	13,1
2	1,5	80	3370	5,64	6,9	0,42	3,4	3,0	80,8	81,3	81,2	0,69	0,80	0,86	1,15	0,00085	9	62	14,6
3	2,2	90S	3450	8,39	6,7	0,62	3,0	3,0	80,0	81,9	81,9	0,66	0,77	0,84	1,15	0,00205	5	68	18,2
3	2,2	90L	3450	8,39	6,7	0,62	3,0	3,0	80,0	81,9	81,9	0,66	0,77	0,84	1,15	0,00205	5	68	19,4
4	3	90L	3450	11,4	7,6	0,83	3,3	3,6	83,2	84,5	84,0	0,65	0,76	0,82	1,15	0,00266	4	68	22,8
5	3,7	100L	3485	13,0	8,5	1,03	3,2	4,0	82,0	84,8	85,6	0,75	0,82	0,87	1,15	0,00561	8	71	32,1
6	4,5	112M	3465	16,9	7,0	1,24	2,5	3,2	84,0	85,1	86,5	0,70	0,81	0,86	1,15	0,0065	13	69	38,3
7,5	5,5	112M	3500	19,1	8,0	1,53	2,6	3,4	85,1	86,7	86,7	0,72	0,80	0,87	1,15	0,00842	11	69	41,0
10	7,5	132S	3580	25,4	8,0	2,03	2,7	3,3	85,2	87,3	87,9	0,75	0,85	0,98	1,15	0,02248	16	72	61,5
12,5	9,2	132M	3520	31,2	7,5	2,54	2,4	3,0	87,0	87,8	88,0	0,77	0,84	0,98	1,15	0,0215	13	72	67,0
15	11	132M	3620	37,0	8,2	3,05	2,6	3,3	87,0	88,7	88,7	0,75	0,84	0,98	1,15	0,02804	7	72	71,2
20	15	160M	3595	50,3	7,2	4,05	2,8	3,0	88,0	89,0	89,0	0,78	0,85	0,98	1,15	0,04706	12	75	106,0
25	18,5	160M	3625	61,0	8,0	5,08	2,4	2,8	89,5	90,4	90,4	0,78	0,85	0,98	1,15	0,05295	12	75	116,9
30	22	180L	3580	72,1	8,5	6,08	2,5	3,0	90,2	91,0	91,0	0,78	0,88	0,98	1,15	0,06471	11	75	130,5
40	30	200M	3650	97,6	6,5	8,07	2,7	2,7	90,5	91,7	91,7	0,80	0,86	0,98	1,15	0,17048	15	81	201,8
50	37	200L	3655	120	7,5	10,07	3,0	2,9	91,0	92,2	92,2	0,81	0,88	0,98	1,15	0,2065	23	81	239,3
60	45	225S/M	3660	142	8,0	12,07	2,6	3,0	90,0	92,0	92,5	0,81	0,87	0,90	1,00	0,34083	21	85	356,8
75	55	225S/M	3680	173	8,0	15,08	2,6	3,0	91,0	92,6	92,8	0,81	0,88	0,90	1,00	0,44846	16	85	559,8
100	75	250S/M	3660	231	8,2	20,11	3,0	3,3	92,5	93,5	93,6	0,82	0,88	0,91	1,00	0,50227	13	85	445,1
125	90	280S/M	3575	286	8,2	25,03	2,8	3,0	92,0	98,2	98,7	0,80	0,88	1,00	1,00	1,27083	30	88	689,7
150	110	280S/M	3570	344	7,8	30,08	2,5	2,7	91,5	98,2	93,6	0,82	0,86	0,90	1,00	1,27083	23	88	693,9
175	132	315S/M	3570	409	7,9	35,10	2,5	2,6	91,5	98,5	94,0	0,88	0,88	0,90	1,00	1,41204	15	89	751,7
200	150	315S/M	3575	464	7,8	40,06	2,6	2,8	92,8	98,8	94,2	0,84	0,88	0,90	1,00	1,64738	19	89	842,3
250	185	315S/M	3575	572	8,5	50,07	2,8	3,0	92,5	94,0	94,8	0,88	0,88	0,90	1,00	2,11806	18	89	990
300	220	355WL	3580	658	7,2	60,00	1,7	2,5	92,5	94,0	94,3	0,88	0,91	0,93	1,00	4,36666	70	85	1512
350	260	355WL	3580	777	7,6	70,00	2,3	2,4	92,9	94,1	94,4	0,89	0,92	0,98	1,00	5,17105	60	85	1642

Apêndice D – Código-fonte em MATLAB ® para obtenção das curvas de performance do motor de indução trifásico

%CÓDIGO PARA OBTENÇÃO DAS CURVAS DE DESEMPENHO DO MIT

```
clc
clear

%Parâmetros do MIT
V1 = 220;
polos = 2;
freq = 60;
R1 = 2.175;
X1 = 3.106;
Rc = 597.048;
Xm = 84.504;
R2 = 1.963;
X2 = 4.568;

%Perdas fixas
Pnucleo = 95.196; %Perdas no núcleo
Pav = 90; %Perdas por atrito e ventilação

%Cálculo da velocidade
ns = (120*freq)/polos;
omega = (ns*2*pi)/60;

%Equivalente de Thévenin do MIT
Zth = ((R1+j*X1)*j*Xm)/(R1+j*(X1+Xm));
Vth = abs((V1*j*Xm)/(R1+j*(X1+Xm)));

%Laço do escorregamento
for n = 1:5000
    s(n) = n/5000; %Escorregamento
    rpm(n) = (1-s(n))*ns;
    Z2(n) = (R2/s(n))+j*X2; %Impedância do rotor
    Z2eq(n) = (j*Xm*Z2(n))/(j*Xm+Z2(n));
    Zt(n) = R1+j*X1+Z2eq(n); %Impedância equivalente do MIT
    I1(n) = abs(V1/(Zt(n))); %Corrente do estator
    I2(n) = abs(Vth/(Zth+Z2(n))); %Corrente do rotor
    Tmec(n) = 3*I2(n)^2*R2/(s(n)*omega); %Conjugado eletromecânico
    Pj1(n) = 3*I1(n)^2*R1; %Perda por efeito Joule no estator
    %Potência transferida através do entreferro
    Pef(n) = 3*I2(n)^2*R2/(s(n));
    Pj2(n) = s(n)*Pef(n); %Perda por efeito Joule no rotor
    Pmec(n) = Pef(n)-Pj2(n); %Potência mecânica desenvolvida
    Psup(n) = (1.8/100)*Pmec(n); %Perdas suplementares
    Psaida(n) = Pmec(n)-Psup(n); %Potência de saída
    %Potência de entrada
    Pent(n) = Psaida(n)+(Pj1(n)+Pnucleo+Pav+Pj2(n)+Psup(n));
    rend(n) = (Psaida(n)/Pent(n))*100; %Rendimento
    fp(n) = real(Zt(n))/abs(Zt(n)); %Fator de potência
end
%Fim do laço do escorregamento
```

```

%Gráficos
plot(rpm,I1,'r','linewidth',2);
hold
plot(rpm, I2,'linewidth',2);
grid
xlabel('Velocidade (rpm)', 'FontWeight', 'bold')
ylabel('Corrente (A)', 'FontWeight', 'bold')
xlim([0 3600])
legend('Corrente do estator','Corrente do rotor');

figure
plot(rpm,Tmec,'linewidth',2);
grid
xlabel('Velocidade (rpm)', 'FontWeight', 'bold')
ylabel('Conjugado (N.m)', 'FontWeight', 'bold')
xlim([0 3600])

figure
plot(rpm,Psaida,'linewidth',2);
grid
xlabel('Velocidade (rpm)', 'FontWeight', 'bold')
ylabel('Potência (W)', 'FontWeight', 'bold')
xlim([0 3600])

figure
plot(rpm,rend,'linewidth',2);
grid
xlabel('Velocidade (rpm)', 'FontWeight', 'bold')
ylabel('Rendimento (%)', 'FontWeight', 'bold')
xlim([0 3600])

figure
plot(rpm,fp,'linewidth',2);
grid
xlabel('Velocidade (rpm)', 'FontWeight', 'bold')
ylabel('Fator de Potência', 'FontWeight', 'bold')
xlim([0 3600])

```

Referências bibliográficas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2002). NBR 5383-1:2002: Máquinas elétricas girantes – Parte 1: Motores de indução trifásicos – Ensaios. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008). NBR 17094-1:2008: Máquinas elétricas girantes – Motores de Indução – Parte 1: Trifásicos. Rio de Janeiro.

ABNT (2018). Conheça a ABNT. [online] Disponível em: <http://www.abnt.org.br/abnt/conheca-a-abnt> [Acesso em 07/04/2018].

ANEEL, (2018). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. [pdf] Disponível em: http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8_Revis%C3%A3o_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9 [Acesso em 30/05/2018].

Araújo, (2015). Desenvolvimento de um Sistema de Diagnóstico de Falhas em Motores Elétricos de Indução. Dissertação de Mestrado. Universidade de Nova Lisboa.

BEN, (2017). EPE, 2017. Ministério de Minas e Energia. [online] Rio de Janeiro: Balanço Energético Nacional 2017 – Ano base 2016, p. 30. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf [Acesso em 02/04/2018].

Bulgarelli, R. (2006). Proteção Térmica de Motores de Indução Trifásicos Industriais. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/D.3.2006.tde-01122006-134918>

Chapman, S. J. (2013). Fundamentos de Máquinas Elétricas. 5 ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda.

Cunha, L. (2009). Radiografia – Motores Elétricos: movendo o mundo. [online] Portal: O Setor Elétrico. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/radiografia-motores-eletricos-movendo-o-mundo/> [Acesso em 07/04/2018].

Del Toro, V. (1999). Fundamentos de Máquinas Elétricas. Rio de Janeiro: LTC.

Efeitos e causas de harmônicas no sistema de energia elétrica. [online] Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/htmlfile/harmo/fpcap4/cap4.html> [Acesso em 30/05/2018].

Garcia, F. R (n. d.). Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência. [pdf] Disponível em: http://www.iesa.com.br/institucional/pdf/pdf_reativa/ap_harmonicosSEPCap.pdf [Acesso em 29/05/2018].

Godoy, W. F.; Silva, I. N.; Goedtel, A.; Palácios, R. H. C. e Lopes, T. D. (2016). Application of intelligent tools to detect and classify broken rotor bars in three-phase induction motors fed by an inverter. IET Electric Power Applications, Vol. 10, No. 5, p. 430-439. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2015.0469>

Goedtel, A. (2003). Estimativa de Conjunto de Carga Aplicado em Eixos de Motores de Indução Trifásicos através de Redes Neurais Artificiais. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista.

Gussow, Milton (2009). Eletricidade Básica. Porto Alegre: Bookman.

Isoni, M. (n. d.). A moderna eficientização energética e seus possíveis efeitos sobre o desempenho operacional de equipamentos e instalações elétricas: Distorções harmônicas – Uma revisão de conceitos gerais. [pdf] Disponível em: http://www.engeparc.com.br/cariboo_files/4-Harmonicas.pdf [Acesso em 29/05/2018].

Izhar, T.; Ali, M. e Nazir, A. (2017). Development of a Motor Test Bench to Measure Electrical/Mechanical Parameters. 2017 International Conference on Energy Conservation and Efficiency, p. 22-23.

<https://doi.org/10.1109/ECE.2017.8248830>

Krishnan, R. (2001). Electric motor drives: modeling, analysis and control. New Jersey: Prentice Hall.

Llerena, M. T. M. (2006). Estimativa do Comportamento de Máquinas Assíncronas Sujetas a Afundamentos de Tensão. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Marins, V. P. (2014). Projeto de um Sistema de Emulação de Cargas Mecânicas Industriais. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Uberlândia.

MathWorks (2018). MATLAB. [online] Disponível em: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html> [Acesso em 29/05/2018].

MME, (2017). MME abre consulta pública sobre eficiência de Motores Elétricos Trifásicos. [online] Disponível em: http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_returnToFullPageURL=%2F&_101_assetEntryId=4436237&_101_type=content&_101_urlTitle=mme-abre-consulta-publica-sobre-eficiencia-de-motores-eletricos-trifasicos&redirect=http%3A%2F%2Fwww.mme.gov.br%2Fweb%2Fguest%2Fpagina-inicial%3Fp_p_id%3D3%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dmaximized%26p_p_mode%3Dview%26_3_groupId%3D0%26_3_keywords%3Dmotores%26_3_struts_action%3D%252Fsearch%252Fsearch%26_3_redirect%3D%252F&inheritRedirect=true [Acesso em 02/04/2018].

Oliveira, C. A. (2015). Estudo do Desempenho do Motor de Indução Trifásico Acionado a Velocidade Variável com Utilização de Técnicas Digitais. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Uberlândia.

Oliveira, J. E. A. (2011). Modelagem de um motor de indução trifásico operando com tensões desequilibradas por meio de redes neurais artificiais. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista.

Pomilio, J. A. (2014). Eletrônica de Potência. [online] DSCE/FEEC – UNICAMP. Disponível em: <http://vm1-devel.fee.unicamp.br/feec/node/493> [Acesso em 30/04/2018].

Rashid, M. H. (1999). Eletrônica de Potência – Circuitos, Dispositivos e Aplicações. São Paulo: MAKRON Books.

Rezende, P. H. O. e Bispo, D. (2015). Análise Econômica em Motores de Indução Trifásicos. Revista Horizonte Científico, Vol. 9, No. 1.

Schneider (2003). Workshop – Instalações Elétricas de Baixa Tensão: Qualidade de Energia – Harmônicas. [pdf] Disponível em: <https://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/harmon.pdf> [Acesso em 29/05/2018].

SELEMEC (2018). Ligação de motores. [online] Disponível em: <http://www.selemeccom.br/Liga%C3%A7%C3%A3o-de-Motor/> [Acesso em 24/04/2018].

Silva, F. S. (2015). Bancada de simulação de cargas mecânicas para motor de indução trifásico acionado por conversor de frequência. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia.

Silva, S. F. (2007). Identificação de Torque de Carga em Motores de Indução usando Abordagem Baseada em Sistemas Fuzzy. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.

<https://doi.org/10.11606/D.18.2007.tde-03092007-092234>

Silva, V. P. (2012). Análise Comparativa do Desempenho do Motor de Indução Trifásico de Alto Rendimento e Linha Padrão em Condições de Alimentação Ideal e não Ideal. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia.

Starosta, J. (2012). Afundamento de tensão (ou SAG) – Parte 1. [online] Portal: O Setor Elétrico. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/afundamento-de-tensao-ou-sag-parte-i/> [Acesso em 29/05/2018].

Ugale, R. T. e Chavhan, K. B. (2016). Automated Test Bench for an Induction Motor using LabVIEW. 2016 IEEE – International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES).

Ugale, R. T. e Chavhan, K. B. (2016). Web-based Automated Electric Machine Test-bench with Data Acquisition and Remote Control. 2016 IEEE – International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES).

<https://doi.org/10.1109/PEDES.2016.7914511>

Umans, S. D. (2014). Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7 ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda.

WEG (2016). Motores de Corrente Contínua. [online] Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h19/h74/WEG-motores-de-corrente-continua-50005370-catalogo-portugues-br.pdf> [Acesso em 01/05/2018].

WEG (2017). Cartilha WEG – Gestão Eficiente da Energia Elétrica: Motores Elétricos, Inversores de Frequência e Geração Solar. [online] Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cartilha-weg-uso-eficiente-da-energia-eletrica-50030292-catalogo-portugues-br.pdf> [Acesso em 07/04/2018].

WEG (2017). Motores Elétricos – Guia de Especificação. [online] Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf> [Acesso em 24/04/2018].