

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS FLORIANÓPOLIS - CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA  
ENGENHARIA ELÉTRICA

Leonardo Estevo Martins

**ESTRUTURAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE ENSAIO PARA MOTORES DE  
INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

Florianópolis

2020

Leonardo Estevo Martins

**ESTRUTURAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE ENSAIO PARA MOTORES DE  
INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Coorientador: Carlos Alexandre Correa Wengerkievicz, M. Sc.

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Martins, Leonardo Estevo  
ESTRUTURAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE ENSAIO PARA MOTORES DE  
INDUÇÃO TRIFÁSICOS / Leonardo Estevo Martins ; orientador,  
Nelson Jhoe Batistela, coorientador, Carlos Alexandre  
Correa Wengerkievicz, 2020.  
83 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Motor de indução trifásico.  
3. Procedimentos de ensaios de rendimento. I. Batistela,  
Nelson Jhoe. II. Wengerkievicz, Carlos Alexandre Correa.  
III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em  
Engenharia Elétrica. IV. Título.

Leonardo Estevo Martins

## ESTRUTURAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE ENSAIO PARA MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora.

Florianópolis, 09 de dezembro de 2020.



Documento assinado digitalmente  
Jean Viane Leite  
Data: 11/12/2020 18:59:11-0300  
CPF: 002.474.609-80

---

Prof. Jean Viane Leite, Dr.

Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica



Documento assinado digitalmente  
Nelson Jhoe Batistela  
Data: 11/12/2020 18:04:28-0300  
CPF: 504.529.539-04

---

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

**Banca Examinadora:**



Documento assinado digitalmente  
Patrick Kuo Peng  
Data: 11/12/2020 18:42:42-0300  
CPF: 002.520.029-48

---

Prof. Patrick Kuo Peng, Dr.

Avaliador

Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente  
Carlos Alexandre Correa Wengerkiewicz  
Data: 11/12/2020 17:56:21-0300  
CPF: 058.892.149-18

---

Eng. Carlos Alexandre Correa Wengerkiewicz, M.Sc

Avaliador

Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente  
Luis Otavio Steffenmunsberg Grillo  
Data: 11/12/2020 16:26:43-0300  
CPF: 833.860.500-00

---

Eng. Eletric. Luis Otavio Steffenmunsberg Grillo, M.Sc.

Avaliador

Universidade Federal de Santa Catarina

## **AGRADECIMENTOS**

Mais do que tudo, agradeço imensamente à minha família, que me apoiou e incentivou durante toda graduação. Sem vocês, tudo isso não teria sido possível.

Agradeço aos meus amigos, que acompanharam minha jornada durante a graduação e estavam ao meu lado nos momentos bons e ruins.

Agradeço também à tantas outras oportunidades que me foram dadas durante a graduação. Monitorias, empresa júnior, PET, equipe de competição, laboratório, cada uma dessas experiências me trouxe muitos momentos inesquecíveis e ajudou a formar o engenheiro que serei.

Agradeço ao meu co-orientador Carlos e orientador Jhoe pela oportunidade concedida de realizar este projeto e todo o suporte dado durante as iterações do trabalho. Trabalhar com vocês foi um prazer e um privilégio. Espero um dia poder retribuir a confiança depositada em mim.

## RESUMO

As características operacionais de motores de indução podem ser determinadas experimentalmente através da realização de ensaios em laboratório. Existem diversas normas que padronizam esses ensaios e, dentre elas, a IEEE 112 foi a escolhida como principal referência. O objetivo proposto para este trabalho foi de estruturar e documentar procedimentos de ensaio para a bancada de ensaios presente no Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos da UFSC de acordo com o referencial normativo escolhido. Este trabalho poderá ser utilizado como manual de utilização da bancada. Os resultados obtidos nos testes realizados demonstram a validade do procedimento de ensaio.

**Palavras-chave:** Motor de indução. Bancada de ensaio. IEEE 112.

## **ABSTRACT**

The performance and characteristics of an induction motor can be determined experimentally through laboratory tests. There are many standards that cover these tests, among them, the IEEE 112 was chosen as the main reference. The proposed objective for this work was to structure and document the procedures for the test bench installed at the Electrical Machines and Drives Laboratory of the Department of Electrical Engineering at UFSC accordingly to the chosen referential. This work can be used as a user's manual for the test bench. The test results obtained support the validation of this procedure.

**Keywords:** Induction Motor. Test Bench. IEEE 112.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Bancada de ensaios de Motores de Indução Trifásicos .....                            | 16 |
| Figura 2 - Estrutura típica de um estator de um MIT .....                                       | 18 |
| Figura 3 - Estrutura típica de um rotor do tipo bobinado.....                                   | 19 |
| Figura 4 - Estrutura típica de um rotor do tipo gaiola de esquilo.....                          | 19 |
| Figura 5 - Circuito equivalente por fase do MIT.....  | 21 |
| Figura 6 - Fluxo de potência num motor de indução trifásico .....                               | 22 |
| Figura 7 - Ordem de ensaios de acordo com o método B .....                                      | 26 |
| Figura 8 - Gráfico de ensaio em vazio para determinação das perdas pro atrito e ventilação..... | 29 |
| Figura 9 - Gráfico de perdas suplementares por torque corrigido ao quadrado .....               | 30 |
| Figura 10 - Bancada de testes para motores de indução.....                                      | 33 |
| Figura 11 - Varivolt Trifásico .....  | 35 |
| Figura 12 - Fonte eletrônica trifásica Supplier FCATH3000.....                                  | 35 |
| Figura 13 - Analisador de potência Yokogawa WT500.....  | 36 |
| Figura 14 - Representação do esquemático de ligação 3P3W (3V3A).....                            | 37 |
| Figura 15 - Transformador de Corrente Braspel BCS 03 50:5 A.....                                | 38 |
| Figura 16 - Transdutor de torque HBM T40B .....   | 39 |
| Figura 17 - Amplificador HBM MX460 .....  | 39 |
| Figura 18 - Sistema para medição de torque e velocidade para motores de até 2 cv .              | 40 |
| Figura 19 - Sensor Magnético Dynapar Series 54Z .....   | 40 |
| Figura 20 - Indicador de velocidade.....  | 40 |
| Figura 21 - Célula de carga AEPH type S.....  | 41 |
| Figura 22 - Indicador de pesagem Alfa 3107C .....   | 41 |
| Figura 23 - Multímetro Agilent 34410A .....   | 42 |
| Figura 24 - Fonte DC Keysight E3632A.....   | 42 |
| Figura 25 - Medição de resistência a quatro fios.....   | 43 |
| Figura 26 - Esquema básico do sistema de comutação. ....  | 43 |
| Figura 27 - Data logger Yokogawa GP10 .....   | 44 |
| Figura 28 - Tela inicial do instrumento Virtual.....  | 45 |
| Figura 29 - Aba Elétrica do VI.....   | 45 |
| Figura 30 - Aba Mecânica do VI.....   | 46 |



|   |    |
|---|----|
| Figura 31 - Aba Tabela de grandezas do VI.....  | 47 |
| Figura 32 - Aba Resistências do VI - Multímetro .....   | 48 |
| Figura 33 - Aba Resistências do VI – Fonte DC.....  | 48 |
| Figura 34 - Visão geral do procedimento de ensaio .....   | 50 |
| Figura 35 - Montagem inicial.....   | 51 |
| Figura 36 - Diagrama de ligação do bloco de terminais.....  | 51 |
| Figura 37 - Acoplamento do eixo.....  | 52 |
| Figura 38 - Aba analisador de energia do VI .....   | 53 |
| Figura 39 - Aba multímetro do VI.....   | 54 |
| Figura 40 - Abas Fonte DC e Célula de carga do VI .....   | 54 |
| Figura 41 - Janela para inicialização do amplificador HBM.....  | 55 |
| Figura 42 - Controle do comutador .....   | 56 |
| Figura 43 - Fluxograma detalhado para medição de resistência com o multímetro... 57   |    |
| Figura 44 - Fluxograma detalhado para medição de resistência com a fonte DC..... 57   |    |
| Figura 45 - Configurações de (a) Tensão e frequência, (b) Tipo de rampa e (c) Tempo de rampa para ensaio utilizando a fonte eletrônica Supplier FCATH3000..... 58 |    |
| Figura 46 - Fluxograma detalhado para procedimento de partida com a fonte eletrônica. .... 60   |    |
| Figura 47 - Fluxograma detalhado para procedimento de partida com varivolt. .... 60   |    |
| Figura 48 - Fluxograma detalhado para ensaio térmico. .... 61   |    |
| Figura 49 - Botão para controle de corrente de quadratura..... 62   |    |
| Figura 50 - Interface do inversor de frequência. .... 62  |    |
| Figura 51 - Fluxograma detalhado para ensaio com carga..... 63  |    |
| Figura 52 - Fluxograma detalhado para ensaio a vazio..... 64  |    |
| Figura 53 - Fluxograma detalhado para procedimento de parada utilizando varivolt. .... 65   |    |
| Figura 54 - Fluxograma detalhado para procedimento de parada utilizando a fonte eletrônica. .... 65   |    |
| Figura 55 - Aba Clipboard da Planilha de ensaios .....  | 66 |
| Figura 56 - Perdas suplementares do motor 1. .... 68  |    |
| Figura 57 - Curvas de rendimento do motor 1. .... 68  |    |
| Figura 58 - Distribuição das perdas por nível de carregamento do motor 1. .... 69   |    |
| Figura 59 - Perdas suplementares do motor tipo D..... 70  |    |

|   |    |
|---|----|
| Figura 60 - Curvas de rendimento do motor tipo D .....                              | 70 |
| Figura 61 - Distribuição das perdas por nível de carregamento do motor tipo D ..... | 71 |
| Figura 62 - Curva de rendimento dos ensaios de repetibilidade .....                 | 72 |
| Figura 63 - Perdas totais por nível de carregamento .....                           | 73 |
| Figura 64 - Desvio das perdas em relação à média .....                              | 73 |
| Figura 65 - Diagrama para ensaio de motor monofásico .....                          | 77 |
| Figura 66 - Chave de calibração .....   | 79 |
| Figura 67 - Peso de calibração .....  | 80 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1 - Métodos da norma IEEE 112 .....                                       | 25 |
| Quadro 2 - Limites estabelecidos pela norma IEEE 112 para condições de ensaio... | 46 |
| Quadro 3 - Parâmetros de ajuste para calibração do indicador de pesagem .....    | 79 |

## **LISTA DE TABELAS**

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Tempo máximo para efetuação de medidas de resistência após o desligamento.... | 56 |
| Tabela 2 - Motores utilizados para os ensaios .....                                      | 67 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MIT - Motor de Indução Trifásico

GRUCAD - Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos

LABMAQ - Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

NBR - Norma Brasileira

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

IEC - *International Electrotechnical Commission*

NEMA - *National Electrical Manufacturers Association*

TC - Transformador de Corrente

VI - *Virtual Instrument*

DC - *Direct current*

THD - *Total Harmonic Distortion*

TCC - Trabalho de Conclusão de Curso

## LISTA DE SÍMBOLOS

$f$  - Frequência de alimentação, em hertz

$p$  - Número de polos da máquina

$N_s$  - Velocidade síncrona, em rotações por minuto

$N$  - Velocidade do eixo, em rotações por minuto

$s$  - Escorregamento, por unidade

$\omega_s$  - Velocidade angular síncrona, em radianos por segundo

$\omega_r$  - Velocidade angular mecânica, em radianos por segundo

$I_1$  - Corrente de fase na entrada, em amperes

$I_L$  - Corrente de linha na entrada, em amperes

$V_1$  - Tensão de fase na entrada, em volts

$V_L$  - Tensão de linha na entrada, em volts

$E_1$  - Módulo da tensão no ramo de excitação, em volts

$R_1$  - Resistência do enrolamento do estator, em ohms

$X_1$  - Reatância de dispersão do estator, em ohms

$R_2$  - Resistência do enrolamento do rotor, em ohms

$X_2$  - Reatância de dispersão do rotor, em ohms

$R_c$  - Resistência que representa as perdas no ferro, em ohms

$X_m$  - Reatância de magnetização, em ohms

$\eta$  - Rendimento

$P_{out}$  - Potência de saída, em watts

$P_{in}$  - Potência de entrada, em watts

$\cos\varphi$  - fator de deslocamento

$P_{j1}$  - Perdas por efeito joule nos condutores do estator, em watts

$P_{j2}$  - Perdas por efeito joule nos condutores do rotor, em watts

$P_{ag}$  - Potência transferida pelo entreferro, em watts

$T_{ag}$  - Torque eletromagnético interno, ou torque no entreferro, em newton-metros

$P_c$  - Perdas no ferro, em watts

$P_{conv}$  - Potência convertida, em watts

$P_{fw}$  - Perdas por atrito e ventilação, em watts

$P_{sll}$  - Perdas suplementares, em watts

$R_b$  - Resistência elétrica genérica antes da correção de temperatura, em ohms

$R_a$  - Resistência elétrica genérica após correção de temperatura, em ohms

$t_a$  - Temperatura para a qual se deseja corrigir a resistência, em graus Celsius

$t_b$  - Temperatura em que se conhece o valor de uma resistência, em graus Celsius

$k_1$  - Constante de correção de resistência por temperatura, em graus Celsius

$FP$  - Fator de potência

$R^2$  - Coeficiente de determinação

## SUMÁRIO

|              |   |           |
|--------------|---|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                   | <b>15</b> |
| 1.1          | OBJETIVOS .....                           | 17        |
| <b>1.1.1</b> | <b>OBJETIVO GERAL .....</b>               | <b>17</b> |
| <b>1.1.2</b> | <b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>         | <b>17</b> |
| <b>2</b>     | <b>O MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO.....</b>  | <b>18</b> |
| 2.1          | ASPECTOS CONSTRUTIVOS .....               | 18        |
| 2.2          | PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO.....           | 19        |
| 2.3          | CIRCUITO EQUIVALENTE .....                | 20        |
| 2.4          | PERDAS E RENDIMENTO .....                 | 21        |
| <b>3</b>     | <b>REFERÊNCIAS NORMATIVAS.....</b>        | <b>24</b> |
| 3.1          | IEEE STANDARD 112.....                    | 24        |
| 3.2          | O MÉTODO B.....                           | 25        |
| <b>3.2.1</b> | <b>MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA A FRIO.....</b> | <b>26</b> |
| <b>3.2.2</b> | <b>ENSAIO TÉRMICO .....</b>               | <b>26</b> |
| <b>3.2.3</b> | <b>ENSAIO DE CARGA.....</b>               | <b>27</b> |
| <b>3.2.4</b> | <b>ENSAIO A VAZIO .....</b>               | <b>27</b> |
| <b>3.2.5</b> | <b>CÁLCULOS DAS PERDAS .....</b>          | <b>28</b> |
| <b>3.2.6</b> | <b>CORREÇÕES.....</b>                     | <b>31</b> |
| <b>3.2.7</b> | <b>RESULTADOS DO ENSAIO.....</b>          | <b>32</b> |
| <b>4</b>     | <b>BANCADA DE ENSAIOS .....</b>           | <b>33</b> |
| 4.1          | ALIMENTAÇÃO .....                         | 34        |
| 4.2          | MEDIÇÃO DE GRANDEZAS ELÉTRICAS .....      | 35        |
| 4.3          | DINAMÔMETROS.....                         | 38        |
| 4.4          | MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DO ESTATOR.....    | 42        |
| <b>4.4.1</b> | <b>MEDIÇÃO A QUATRO FIOS.....</b>         | <b>42</b> |
| <b>4.4.2</b> | <b>COMUTADOR .....</b>                    | <b>43</b> |



|          |                                     |           |
|----------|-------------------------------------|-----------|
| 4.5      | MONITORAMENTO DE TEMPERATURA.....   | 44        |
| 4.6      | INSTRUMENTO VIRTUAL .....           | 44        |
| <b>5</b> | <b>PROCEDIMENTO DE ENSAIO .....</b> | <b>50</b> |
| 5.1      | PREPARAÇÃO DO ENSAIO .....          | 50        |
| 5.2      | MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA.....         | 55        |
| 5.3      | PROCEDIMENTO DE PARTIDA .....       | 57        |
| 5.4      | ENSAIO TÉRMICO.....                 | 60        |
| 5.5      | ENSAIO COM CARGA .....              | 61        |
| 5.6      | ENSAIO EM VAZIO .....               | 63        |
| 5.7      | PROCEDIMENTO DE PARADA .....        | 64        |
| 5.8      | RELATÓRIO DE ENSAIO.....            | 65        |
| <b>6</b> | <b>RESULTADOS .....</b>             | <b>67</b> |
| 6.1      | ENSAIO DE REPETIBILIDADE .....      | 71        |
| <b>7</b> | <b>CONCLUSÃO.....</b>               | <b>75</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O motor de indução trifásico (MIT) é uma máquina elétrica cuja função é converter energia elétrica em energia mecânica. O MIT é composto principalmente por um estator, que é a parte fixa que recebe a alimentação em seus terminais, e um rotor, que é a parte girante que contém o eixo o qual aciona uma carga mecânica.

Amplamente utilizados na indústria para acionar compressores, bombas, ventiladores e esteiras rolantes, os MITs representam cerca de 68% do consumo bruto de energia deste setor no Brasil (SAUER et al., 2015). Como principais vantagens, esses motores apresentam alta robustez e baixo custo de manutenção aliados a um alto rendimento energético se comparados aos motores de combustão.

Devido a sua grande importância na economia do país, estes motores recebem atenção especial de empresas, centros de pesquisa e universidades no desenvolvimento de estudos de eficiência energética. Atualmente, uma linha de pesquisa em andamento no GRUCAD – Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos visa desenvolver métodos para estimação da eficiência energética destes motores em operação. A pesquisa demanda não apenas o estudo teórico, mas também o estudo prático e a obtenção de dados durante ensaios experimentais para comparação de resultados.

Para realizar esses ensaios, foi adquirida uma bancada de ensaios (Figura 1) especificada em parceria com a WEG Equipamentos Elétricos e instalada no Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos do Departamento de Engenharia Elétrica da UFSC. A bancada permite testar motores com alimentação em até 380 V e com potência de até 20 cv.

Figura 1 – Bancada de ensaios de Motores de Indução Trifásicos.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

A eficiência energética de uma máquina depende das perdas energéticas produzidas durante sua operação, isto é, a parcela da potência consumida que não é efetivamente convertida em potência útil. As perdas de uma máquina de indução são características relativamente difíceis de serem medidas por representarem uma porcentagem pequena dos valores de potência medidos e, portanto, exigem cuidado e precisão para serem determinadas corretamente. O emprego de métodos normatizados para a adequação dos procedimentos de ensaio é importante para a redução de incertezas. Uma das normas mais importantes neste campo é a IEEE Standard 112, que é utilizada como principal referência normativa na academia por sua abrangência.

Devido à grande quantidade de equipamentos e instrumentos, bem como a complexidade da operação da bancada, existe a necessidade de adequar e documentar os procedimentos de operação, que hoje dependem do grau de especialização do operador. Com a elaboração deste trabalho, busca-se evitar acidentes por operação inadequada da bancada, além de controlar as fontes de incerteza inseridas pelo operador.

Na seção 2, apresenta-se um referencial teórico sobre o motor de indução trifásico. As referências normativas são discutidas na seção 3, com uma atenção especial ao método B da IEEE 112. Em seguida, nas seções 4 e 5, são apresentados os instrumentos utilizados na bancada e os procedimentos para a realização de ensaios. Alguns resultados de testes feitos utilizando-se os procedimentos de ensaio são discutidos na seção 6. Fechando com uma conclusão geral sobre o trabalho na seção 7.

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo projeto PD-0403-0034/2013, intitulado “Avaliação em campo de rendimento de motores de indução trifásicos”, desenvolvido no âmbito do Programa de P&D da Tractebel Energia regulamentado pela ANEEL.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é estruturar e documentar os procedimentos de ensaios para determinação de rendimento na bancada de ensaios de motores de indução trifásicos.

### 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar teoria de motores de indução trifásicos (MITs);
- Estudar normas para ensaios de MITs: NBR17094-3 e IEEE112;
- Participar da realização de ensaios;
- Listar e descrever os componentes da bancada;
- Descrever os procedimentos para realização de ensaios normatizados da bancada;
- Realizar ensaios para validar os procedimentos.

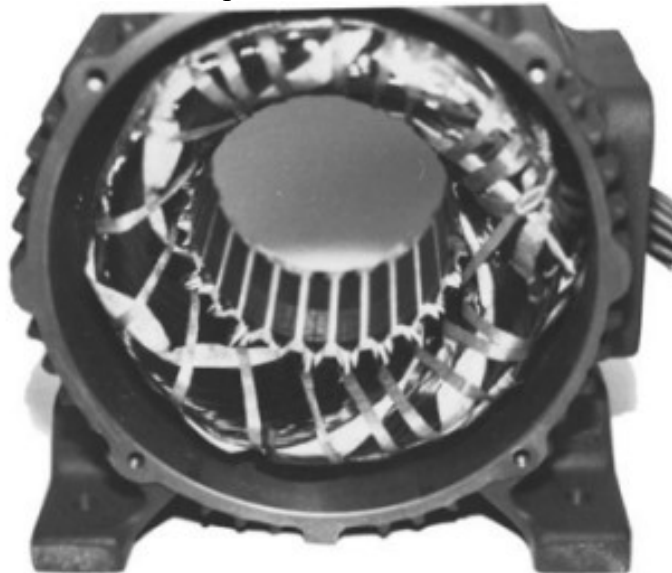
## 2 O MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

### 2.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

A configuração básica de um MIT consiste em duas partes principais, um estator (Figura 2), que é a parte fixa, e um rotor, que é a parte girante que contém o eixo o qual aciona a carga mecânica. As duas partes são concêntricas e o espaço entre seus núcleos magnéticos é chamado de entreferro.

O estator de um MIT é composto por finas chapas de aço em formato de anel com ranhuras internas para alojar os enrolamentos. O rotor possui lâminas de aço também em formato de anel, porém com uma circunferência menor e pode ser do tipo bobinado (Figura 3) ou gaiola de esquilo (Figura 4). O rotor bobinado possui um conjunto de enrolamentos trifásicos similares aos do estator e suas terminações podem ser acessadas através de anéis coletores no eixo do rotor. O rotor do tipo gaiola de esquilo possui barras condutoras encaixadas nas suas ranhuras e interconectadas através de anéis de curto-circuito em ambas as extremidades.

Figura 2 – Estrutura típica de um estator de um MIT.



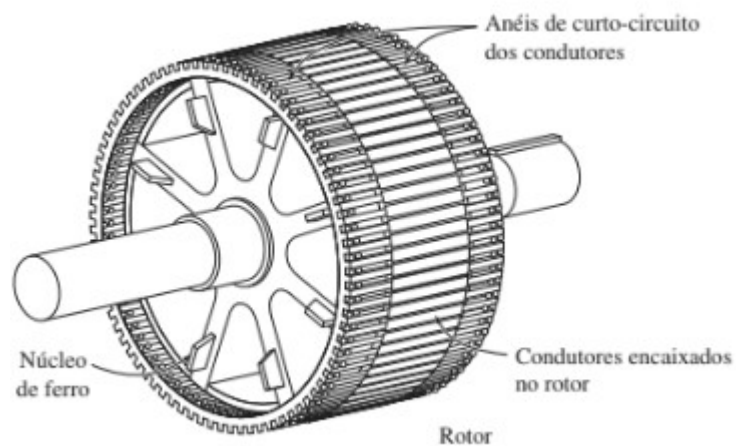
Fonte: Chapman. (2013)

Figura 3 – Estrutura típica de um rotor do tipo bobinado.



Fonte: Chapman. (2013)

Figura 4 – Estrutura típica de um rotor do tipo gaiola de esquilo.



Fonte: Chapman. (2013)

## 2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO

O motor de indução trifásico é uma máquina elétrica de corrente alternada. Quando é aplicado um conjunto trifásico equilibrado de tensões no seu estator, um conjunto trifásico de correntes é gerado, criando um campo magnético girante no entreferro. A velocidade de rotação do fluxo magnético em rotações por minuto, denominada velocidade síncrona ( $N_s$ ), é dada por (2.1), onde  $f$  é a frequência de alimentação em hertz e  $p$  é o número de polos da máquina.

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

A variação do fluxo no rotor induz correntes nas suas barras, e a interação entre esta corrente e o fluxo magnético no entreferro produz um conjugado induzido, fazendo com que o rotor gire. A variação do fluxo, a corrente induzida no rotor e, por consequência, o torque dependem do movimento relativo do rotor em relação ao campo magnético girante do estator, que é indicado por uma grandeza denominada escorregamento. Definido como a diferença normalizada entre a velocidade síncrona ( $N_s$ ) e a velocidade do eixo ( $N$ ), o escorregamento ( $s$ ) é calculado conforme (2.2).

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} (x 100\%) \quad (2.2)$$

Essa equação também pode ser expressa em termos das velocidades angulares síncrona ( $\omega_s$ ) e mecânica ( $\omega_r$ ) em radianos por segundo, conforme (2.3) e (2.4).

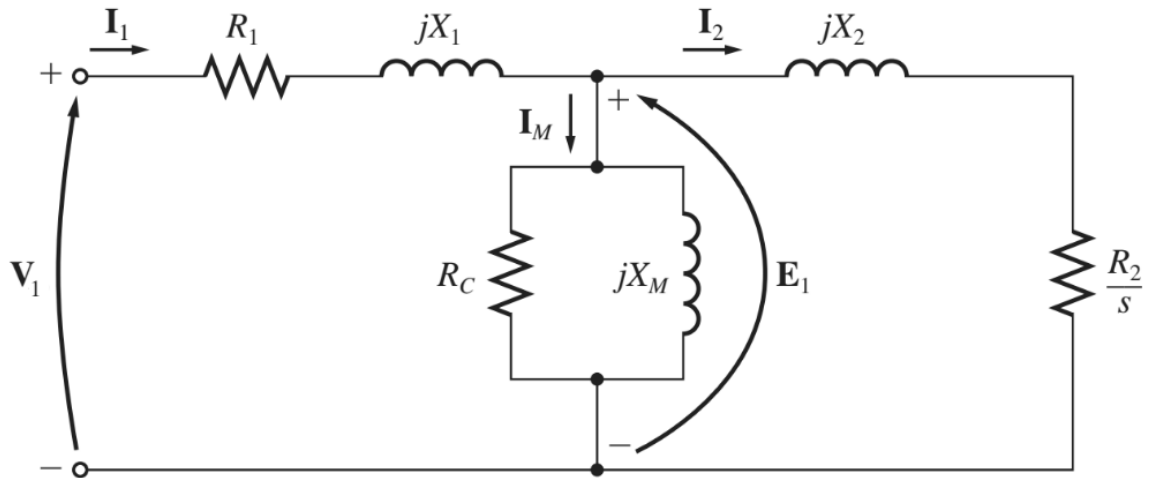
$$\omega_s = 4\pi \frac{f}{p} \quad (2.3)$$

$$\omega_r = (1 - s)\omega_s \quad (2.4)$$

### 2.3 CIRCUITO EQUIVALENTE

O funcionamento do motor em regime permanente é usualmente modelado empregando o circuito equivalente por fase, cuja representação pode variar de acordo com a aplicação desejada. O modelo por fase do motor de indução utilizado pela norma IEEE 112 é apresentado na Figura 5 e é caracterizado pelos seguintes parâmetros:  $I_1$  e  $V_1$  são a corrente e a tensão de fase na entrada;  $R_1$  e  $X_1$  representam, respectivamente, a resistência e a reatância de dispersão do enrolamento do estator;  $R_2$  e  $X_2$ , a resistência e a reatância de dispersão do rotor referido ao estator;  $R_c$ , as perdas energéticas no núcleo magnético;  $X_m$ , a reatância de magnetização; e  $E_1$  é a tensão sobre o ramo de excitação. Todos os parâmetros são referidos ao estator. Por último,  $s$  é o escorregamento do rotor por unidade.

Figura 5 - Circuito equivalente por fase do MIT.



Fonte: Chapman. (2013)

Com o circuito equivalente, é possível estimar de forma simples as correntes, potências e perdas no motor em função do escorregamento, que reflete o efeito da carga no eixo da máquina.

#### 2.4 PERDAS E RENDIMENTO

O rendimento ( $\eta$ ) de um motor de indução trifásico é definido pela razão da potência de saída ( $P_{out}$ ) e de entrada ( $P_{in}$ ), conforme (2.5).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.5)$$

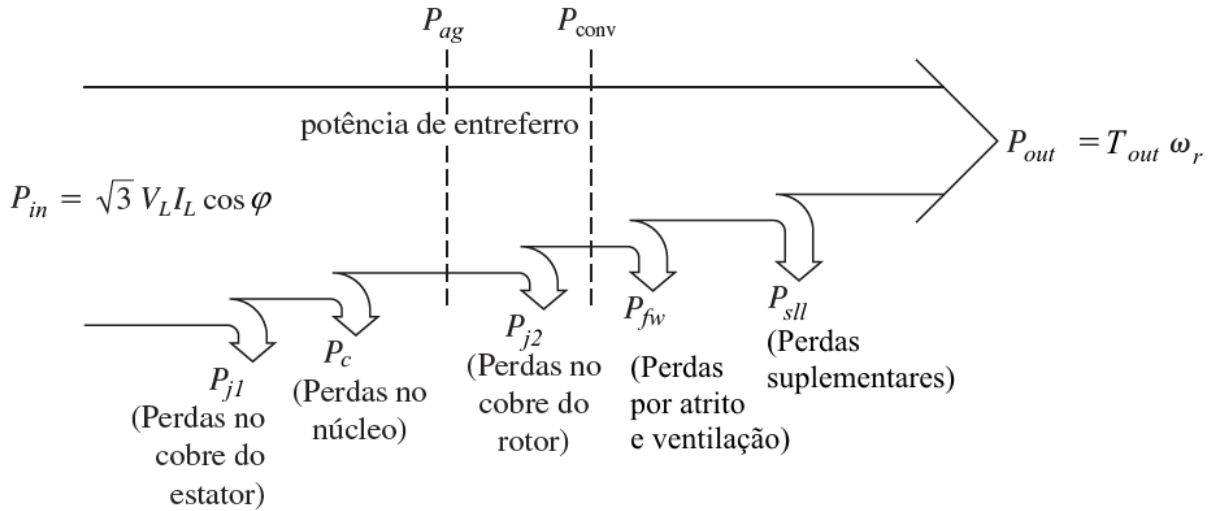
A potência de entrada é proporcional à tensão de linha ( $V_L$ ) e à corrente de linha ( $I_L$ ) que alimentam o motor, sendo calculada através de (2.6), em que  $\cos\varphi$  é o fator de deslocamento, igual ao fator de potência para formas de onda senoidais.

$$P_{in} = 3 V_L I_L \cos\varphi = \sqrt{3} V_L I_L \cos\varphi \quad (2.6)$$

A potência de entrada é convertida em potência útil entregue à carga e em perdas energéticas, conforme ilustrado na Figura 6.



Figura 6 - Fluxo de potência num motor de indução trifásico.



Fonte: Chapman. (2013)

Estas perdas costumam ser divididas em quatro tipos:

- Perdas por efeito joule nos condutores do estator ( $P_{j1}$ ) e do rotor ( $P_{j2}$ ), proporcionais ao quadrado das respectivas correntes, calculadas conforme (2.7) e (2.8), respectivamente. A perda no rotor também pode ser calculada em função da potência transferida pelo entreferro ( $P_{ag}$ ), a qual é definida por (2.9).

$$P_{j1} = 3R_1 I_1^2 \quad (2.7)$$

$$P_{j2} = 3R_2 I_2^2 = sP_{ag} \quad (2.8)$$

$$P_{ag} = \frac{3R_2 I_2^2}{s} = T_{ag} \omega_s = P_{in} - P_{j1} - P_c \quad (2.9)$$

- Perdas no ferro devido à histerese magnética e às correntes parasitas induzidas no núcleo do motor ( $P_c$ ), que dependem da frequência de alimentação e da densidade de fluxo magnético, são consideradas praticamente constantes na região normal de operação sob tensão e frequência de alimentação constantes e podem ser calculadas através de (2.10);

$$P_c = \frac{3E_1^2}{R_c} \quad (2.10)$$

- Perdas mecânicas causadas pelo atrito nos mancais e rolamentos e pelo sistema de ventilação do motor ( $P_{fw}$ ). Estas perdas não são representadas no circuito equivalente e devem ser subtraídas da potência convertida, definida por (2.11). São determinadas através do ensaio em vazio e também são consideradas

constantes na região normal de operação, pois dependem principalmente da velocidade de rotação;

$$P_{conv} = 3 \frac{(1-s)}{s} R_2 I_2^2 = P_{ag} - P_{j2} \quad (2.11)$$

- Perdas suplementares ( $P_{sll}$ ), que são perdas adicionais devido às imperfeições da máquina, fluxos dispersos, harmônicas espaciais de força magnetomotriz, variação de permeância no entreferro, entre outros fatores (SCHWARZ, 1964), e são de difícil modelagem. Também não são representadas no circuito equivalente e podem ser definidas como a parcela das perdas totais não contabilizada nos demais tipos, conforme (2.12). Na região normal de operação, são proporcionais ao quadrado do torque, do escorregamento ou da corrente do rotor.

$$P_{sll} = (P_{in} - P_{out}) - (P_{j1} + P_{j2} + P_c + P_{fw}) \quad (2.12)$$

A potência mecânica útil, também conhecida como potência de saída ( $P_{out}$ ), é definida pelo produto da velocidade angular ( $\omega_r$ ) pelo torque ( $T_{out}$ ) no eixo, conforme (2.13), que corresponde à diferença entre a potência de entrada e as perdas

$$P_{out} = T_{out} \omega_r = P_{in} - P_{j1} - P_{j2} - P_c - P_{fw} - P_{sll} \quad (2.13)$$

Para a determinação experimental destas perdas em laboratório, empregam-se métodos normatizados como os apresentados na seção seguinte.

### 3 REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Normalização é um conjunto de critérios para simplificar e padronizar processos e garantir um resultado confiável e que atenda às necessidades das partes interessadas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2020). Através destes critérios são criadas as normas, que são documentos técnicos que contém informações que garantem as características desejáveis de serviços e produtos, como qualidade, eficiência, segurança e intercambialidade.

As principais normas sobre ensaios em motores de indução trifásicos adotadas internacionalmente são a IEC60034-2, criada em 2007 substituindo a antiga norma IEC 34-2 e utilizada na maioria dos países da comunidade europeia, e a IEEE Standard 112, criada em 1964 e com uma versão publicada em 2018, que é referência das normas utilizadas no Brasil e nos Estados Unidos (NBR 17094-3 e NEMA MG-1, respectivamente). A norma IEEE 112 se destaca por ser um conjunto completo e preciso de testes aplicáveis a uma ampla faixa de tipos e tamanhos de motores de indução e pelo fato de contar com correções em função da temperatura ambiente e do ponto de operação da máquina. Por ser uma importante referência normativa no âmbito acadêmico, esta norma é tomada como base para este trabalho.

#### 3.1 IEEE STANDARD 112

Introduzida em 1964, a norma IEEE 112 descreve procedimentos de testes básicos para avaliar o desempenho de motores ou geradores de indução polifásicos. Com revisão mais recente em 2018, a norma fornece instruções atualizadas para condução e documentação dos testes aplicáveis à realidade atual da instrumentação disponível no mercado. No que diz respeito à determinação de rendimento, a norma contém um total de 5 métodos diferentes e 6 variações, cobrindo uma grande variedade de motores de indução disponíveis no mercado. Os métodos são sumarizados no Quadro 1.

Quadro 1 – Métodos da norma IEEE 112.

| Método    | Descrição   |
|-----------|---|
| A         | Medição de potência de entrada e saída  |
| B         | Medição de potência de entrada e saída com segregação de perdas                                   |
| B1        | Idem ao B, com elevação de temperatura assumida com base na classe térmica                        |
| C         | Máquinas duplicadas com segregação de perdas  |
| E         | Medições elétricas em carga com segregação de perdas  |
| E1        | Idem ao E, com perdas suplementares assumidas   |
| F         | Método do circuito equivalente  |
| F1        | Idem ao F, com perdas suplementares assumidas   |
| C/F e E/F | Idem ao F, com calibração do circuito empregando ponto de carga do método C ou E, respectivamente |
| E1/F1     | Idem ao F1, com calibração do circuito empregando ponto de carga do método E1                     |

Fonte: Adaptado de IEEE Power Engineering Society. (2018)

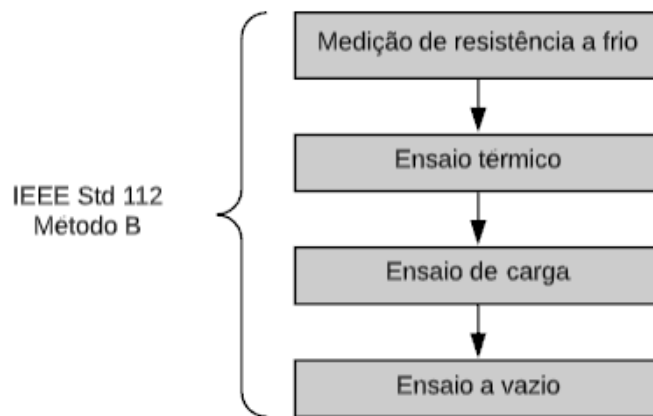
A norma recomenda que o uso do método A se restrinja apenas a máquinas com potência inferior a 1 kW. Já o método B é utilizado para uma ampla faixa de potência (1-300 kW), sendo dispensado apenas para casos onde a forma construtiva ou medição de torque no eixo impossibilitem o teste. Para potências acima de 300 kW admite-se o uso de outros métodos, sendo o F mais comum na academia visto que a instrumentação necessária é mais simples dado que não é necessário medir o torque no eixo. Os parâmetros do circuito equivalente são determinados com base nos dados dos ensaios em vazio e ensaio de impedância empregando cálculos iterativos.

### 3.2 O MÉTODO B

O método B é aplicável à grande maioria dos MIT utilizados na indústria, sendo este então escolhido como padrão para os ensaios feitos na bancada disponível na UFSC. Ele compreende a determinação do rendimento do motor com base na potência de entrada e saída com segregação das perdas em vários componentes, sendo as perdas suplementares definidas como a diferença entre as perdas totais e as perdas convencionais, dadas pela soma das perdas no cobre do estator e do rotor, das perdas no núcleo e das perdas por atrito e ventilação.

O método B consiste nos ensaios de medição de resistência, ensaio térmico, ensaio em carga e ensaio em vazio, conforme ilustrado na Figura 7. Os ensaios devem ser realizados na ordem especificada, porém não é necessário que eles sejam realizados imediatamente um após o outro, desde que a temperatura do motor permaneça controlada próxima da sua temperatura normal de funcionamento.

Figura 7 – Ordem de ensaios de acordo com o método B.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

### 3.2.1 MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA A FRIO

Com a máquina desligada e na temperatura ambiente, devem-se medir as resistências entre os terminais 1-2, 2-3 e 3-1 do motor e a temperatura ambiente no local.

A instrumentação utilizada para esse tipo de teste deve ter sido devidamente calibrada em até 12 meses e possuir erro não superior a 0,2% do seu fundo de escala.

Pode-se realizar a medição da resistência com um ohmímetro ou uma fonte de tensão DC juntamente com um amperímetro e um voltímetro. A temperatura ambiente pode ser medida através de um termômetro ou um termopar posicionado de forma a não ser influenciados por outras fontes de calor ou correntes de ar. Para mais detalhes, pode-se consultar a norma IEEE 118, que trata especificamente da medição de resistência.

### 3.2.2 ENSAIO TÉRMICO

A determinação do rendimento do motor deve ser realizada em suas condições nominais, visto que a mudança de temperatura com o aquecimento dos enrolamentos altera algumas características do motor que devem ser levadas em conta. No ensaio térmico, impõe-

se carga nominal ao eixo da máquina até que a mesma atinja um equilíbrio térmico em relação à temperatura ambiente do local de ensaio. O critério de parada leva em consideração a variação de temperatura dos enrolamentos em relação à temperatura ambiente e é alcançado quando essa variação é inferior a 1°C num intervalo de 30 minutos.

Ao fim do ensaio, deve-se medir a resistência dos enrolamentos novamente. A variação de temperatura pode ser calculada através de (3.1) em que  $R_b$  e  $R_a$  são as resistências elétricas medidas depois e antes do aquecimento, respectivamente,  $t_a$  é a temperatura ambiente durante a medição de resistência a frio e  $t_b$  é a temperatura dos enrolamentos após o aquecimento, em graus Celsius. A constante  $k_1$  depende do material do condutor, sendo 234,5 para cobre e 225 para alumínio.

$$t_b = \frac{R_b}{R_a}(t_a + k_1) - k_1 \quad (3.1)$$

A temperatura especificada do motor é definida como a elevação da temperatura dos enrolamentos mais 25°C.

### 3.2.3 ENSAIO DE CARGA

No ensaio de carga, são impostas ao eixo diferentes porcentagens da potência nominal do motor. Devem ser escolhidos quatro pontos igualmente espaçados entre 25% e 100% e mais dois pontos acima de 100%, não excedendo um limite de 150%. Também é realizada uma medição com o dinamômetro desligado, porém acoplado ao motor em teste, para corrigir eventuais influências parasitas do dinamômetro. A variação de temperatura durante o ensaio não pode ser maior de 10°C em relação à maior temperatura lida durante o ensaio térmico.

Devem ser medidas: potência ativa total, corrente eficaz de linha, tensão eficaz de linha, frequência, velocidade (ou escorregamento), torque, temperatura ou resistência dos enrolamentos do estator e temperatura ambiente para cada ponto de carga. A ordem de carregamentos impostos deve ser decrescente.

### 3.2.4 ENSAIO A VAZIO

Este ensaio consiste na operação do motor com frequência nominal e patamares decrescentes de tensão, mas sem carga no eixo, ou seja, desacoplado. Devem ser medidos no

mínimo três valores de tensão entre 125% e 75% da tensão nominal, sendo um desses pontos próximos de 100%, e mais três pontos entre 50% e 20% ou até que a diminuição do valor da tensão de alimentação represente um aumento da corrente terminal.

### 3.2.5 CÁLCULOS DAS PERDAS

Os cálculos para obtenção dos resultados devem ser feitos de acordo com os formulários B e B2 presentes no anexo A.

#### 3.2.5.1 PERDAS POR EFEITO JOULE NO ESTATOR

As perdas por efeito joule no estator  $P_{j1}$  nos pontos medidos podem ser obtidas através de (3.2).

$$P_{j1} = 1,5I_1^2R = 3I_1^2R_1 \quad (3.2)$$

Nesta equação utilizam-se os seguintes símbolos:

- $P_{j1}$  é a perda no enrolamento do estator, em watts;
- $I_1$  é a corrente de linha na entrada, em amperes;
- $R_1$  é a resistência do estator, em ohms, corrigida de acordo com a temperatura;
- $R$  é a resistência entre quaisquer dois terminais do motor, em ohms, corrigida de acordo com a temperatura.

A correção das resistências do enrolamento deve ser feita para cada ponto de ensaio seguindo a variação de temperatura registrada, de acordo com (3.3).

$$R_b = \frac{R_a(t_b + k_1)}{t_a + k_1} \quad (3.3)$$

Nesta equação utilizam-se os seguintes símbolos:

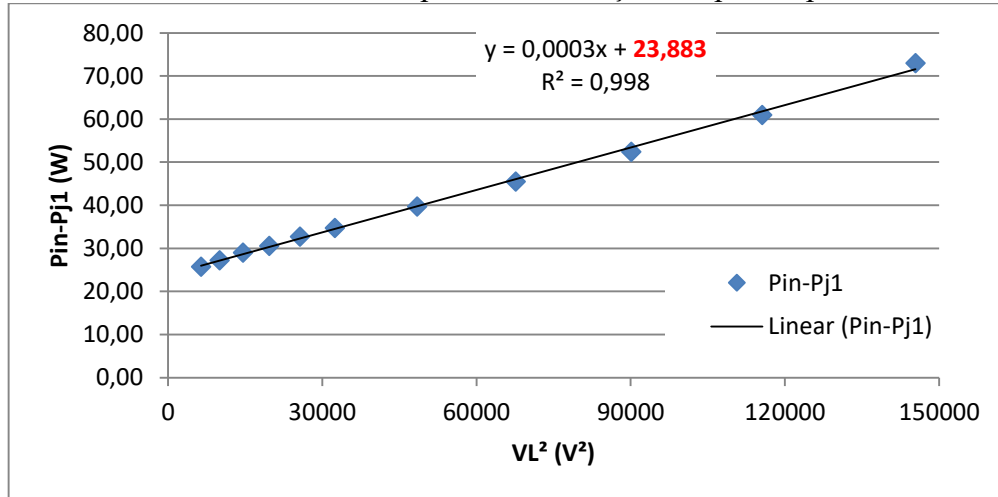
- $R_b$  é a resistência corrigida para a temperatura desejada, em ohms;
- $R_a$  é o valor medido da resistência, na temperatura  $t_a$ , em ohms;
- $t_a$  é a temperatura do enrolamento quando  $R_a$  foi medido, em graus Celsius;
- $t_b$  é a temperatura especificada, em graus Celsius;
- $k_1$  é uma constante igual a 234,5 para cobre e 225 para alumínio.

#### 3.2.5.2 PERDAS POR ATRITO E VENTILAÇÃO

Com os resultados do ensaio a vazio, podem-se obter as perdas por atrito e ventilação ( $P_{fv}$ ) subtraindo-se a perda no enrolamento do estator  $P_{j1}$  da potência de entrada  $P_{in}$  em watts e plotando o resultado para cada ponto medido em relação à tensão ao quadrado, estendendo a

curva até cortar o eixo y. O ponto de intersecção representa a perda por atrito e ventilação. Como exemplo, pode-se ver o gráfico da Figura 8.

Figura 8 – Gráfico de ensaio em vazio para determinação das perdas por atrito e ventilação.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

### 3.2.5.3 PERDAS NO FERRO

Pode-se obter a perda no ferro  $P_c$  para cada ponto do ensaio em vazio subtraindo-se as perdas por atrito e ventilação  $P_{fv}$  da potência de entrada menos a perda no cobre do estator  $P_{in} - P_{j1}$ . É feita então uma regressão linear em função do quadrado do valor da tensão sobre o ramo de excitação  $E_l$ , obtido para cada ponto através de (3.4), para se calcularem posteriormente as perdas no ferro para cada ponto do ensaio de carga com a equação (2.10).

$$E_1 = \sqrt{\left[ V_1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_1 \times R_1 \times FP \right]^2 + \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_1 \times R_1 \times \sqrt{1 - FP^2} \right]^2} \quad (3.4)$$

Em (3.4),  $E_l$  é o módulo da tensão no ramo de excitação, em volts,  $V_1$  é o módulo da tensão de linha na entrada, em volts,  $I_1$  é o módulo da corrente de linha, em amperes,  $R_1$  é a resistência do estator corrigida para a temperatura do ensaio, em ohms, e  $FP$  é o fator de potência.

### 3.2.5.4 PERDAS POR EFEITO JOULE NO ROTOR

As perdas por efeito joule no rotor  $P_{j2}$  podem ser obtidas através de (3.5).



$$P_{j2} = (P_{in} - P_{j1} - P_c) \times s \quad (3.5)$$

Nesta equação utilizam-se os seguintes símbolos:

- $P_{j2}$  é a perda por efeito joule no rotor, em watts;
- $P_{in}$  é a potência de entrada, em watts;
- $P_{j1}$  é a perda por efeito joule no estator, em watts;
- $P_c$  é a perda no ferro, em watts;
- $s$  é o escorregamento, em p.u.

### 3.2.5.5 PERDAS SUPLEMENTARES

As perdas suplementares  $P_{sll}$  são estimadas de forma indireta para cada ponto do ensaio de carga conforme (3.6).

$$P_{sll} = P_{in} - P_{out} - P_{j1} - P_c - P_{j2} - P_{fw} \quad (3.6)$$

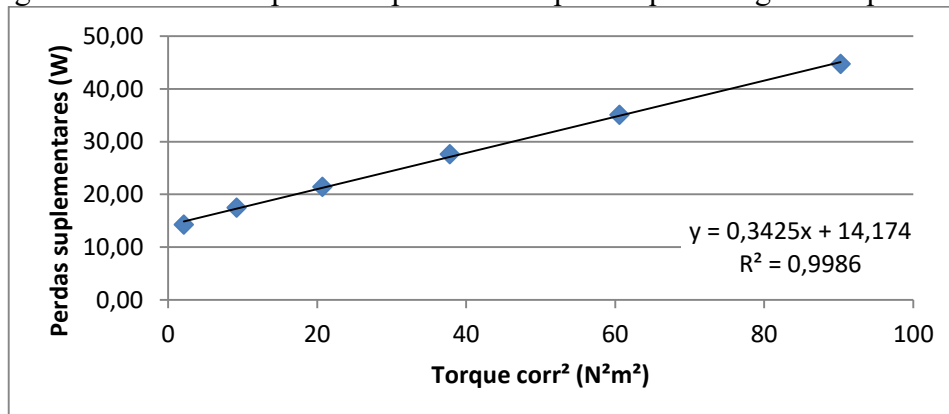
Em seguida é necessário ajustar a curva de perdas suplementares em função do torque ao quadrado. Este ajuste é feito através de uma regressão linear da forma descrita em (3.7) e representado através da Figura 9.

$$P_{sll} = AT^2 + B \quad (3.7)$$

Nesta equação utilizam-se os seguintes símbolos:

- $P_{sll}$  é a perda suplementar, em watts;
- $T$  é o torque, em Newton.metro;
- $A$  é o coeficiente angular da reta obtida na regressão;
- $B$  é o coeficiente linear da reta obtida na regressão;

Figura 9 – Gráfico de perdas suplementares por torque corrigido ao quadrado.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

A regressão deve ter um fator de determinação superior a 0,9 e coeficiente angular positivo. Caso estes critérios não sejam atendidos, o pior ponto deve ser desconsiderado. Se mesmo assim os critérios não forem atendidos, isto indica problemas na instrumentação ou/ nas leituras, tornando o ensaio insatisfatório.

### 3.2.6 CORREÇÕES

Algumas correções são necessárias para ajustar os resultados obtidos para a condição normal de operação e temperatura especificada no ensaio térmico.

#### 3.2.6.1 PERDAS POR EFEITO JOULE NO ESTATOR

O valor corrigido de perdas por efeito joule no estator é calculado de acordo com (3.2) usando-se uma média dos valores de resistência do estator corrigidos para a temperatura especificada no ensaio térmico utilizando (3.3).

#### 3.2.6.2 PERDAS POR EFEITO JOULE NO ROTOR

O valor corrigido das perdas por efeito joule no rotor é calculado de acordo com (3.5) utilizando-se um valor de escorregamento corrigido para a temperatura especificada no ensaio térmico de acordo com (3.8).

$$s_s = \frac{s(t_b + k_1)}{t_a + k_1} \quad (3.8)$$

Nesta equação utilizam-se os seguintes símbolos:

- $s_s$  é o escorregamento corrigido para a temperatura especificada, em p.u.;
- $s$  é o valor medido do escorregamento, na temperatura  $t_a$ , em p.u.;
- $t_a$  é a temperatura do enrolamento quando  $s$  foi medido, em graus Celsius;
- $t_b$  é a temperatura especificada, em graus Celsius;
- $k_1$  é uma constante igual a 234,5 para condutores do rotor em cobre e 225 para alumínio.

#### 3.2.6.3 PERDAS SUPLEMENTARES

Para a correção das perdas suplementares é necessário fazer com que a reta calculada em (3.4) passe pela origem, mantendo a sua inclinação. Logo, o valor corrigido das perdas suplementares pode ser calculado de acordo com (3.9).

$$P_{sll} = AT^2 \quad (3.9)$$

#### 3.2.6.4 TOTAL DE PERDAS

O valor total das perdas  $P_t$  é calculado somando-se os valores das perdas por atrito e ventilação  $P_{fv}$ , das perdas no ferro  $P_c$  e dos valores corrigidos das perdas suplementares  $P_{sll}$  e das perdas por efeito joule no estator e no rotor  $P_{j1}$  e  $P_{j2}$ .

#### 3.2.6.5 CORREÇÃO DA POTÊNCIA MECÂNICA NO EIXO

O valor corrigido de potência mecânica no eixo é definido como a diferença entre a potência de entrada  $P_{in}$  e o total de perdas  $P_t$ .

### 3.2.7 RESULTADOS DO ENSAIO

O rendimento  $\eta$  do MIT é então calculado de acordo com a equação (3.10).

$$\eta = \frac{P_{in} - P_t}{P_{in}} \quad (3.10)$$

O fator de potência  $FP$  do MIT é calculado de acordo com a equação (3.11).

$$FP = \frac{P_{in}}{3V_1I_1} \quad (3.11)$$

Nesta equação utilizam-se os seguintes símbolos:

- $FP$  é o fator de potência;
- $P_{in}$  é a potência de entrada alimentando o motor, em watts;
- $V_1$  é a tensão de fase na entrada do motor, em volts;
- $I_1$  é a corrente na entrada do motor, em amperes.

A norma define requisitos mínimos para a instrumentação utilizada nestes ensaios. Na seção a seguir, serão apresentados os instrumentos e equipamentos que compõem a bancada de ensaios instalada na UFSC.

#### 4 BANCADA DE ENSAIOS

A bancada de testes (Figura 10) foi especificada em parceria com a WEG Equipamentos Elétricos e instalada no Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos do Departamento de Engenharia Elétrica da UFSC para a realização de estudos sobre rendimento de motores de indução, com capacidade para testar motores de até 20 cv alimentados em até 380 V.

A bancada possui sistemas para a alimentação do motor, para medição das grandezas elétricas e mecânicas e para o controle da carga imposta ao eixo. A alimentação do motor em teste é feita através de um varivolt trifásico ou de uma fonte eletrônica Supplier FCATH3000 de 30 kVA. A carga mecânica no eixo do motor em teste pode ser proporcionada de duas maneiras, conforme a potência do motor em teste: i) por um motor de indução WEG de 30 cv em oposição controlado por um inversor para operar como gerador, cuja potência gerada é dissipada num banco de resistores; ii) por um freio eletromagnético, para motores com potência inferior a 2 cv. Para realizar as medições de torque e velocidade do eixo, é utilizado um transdutor de torque HBM T40B. A medição de grandezas elétricas como tensão, corrente e potência são feitas por um analisador de potência Yokogawa WT500. Para medir a resistência dos enrolamentos do estator é utilizado um multímetro Agilent 34410A ou uma fonte de tensão CC de precisão Keysight E3632A, conforme a disponibilidade. Para armazenar as informações de temperatura, são utilizados dois termopares conectados a um *Datalogger* Yokogawa GP10, um para acompanhar a temperatura ambiente e outro posicionado entre o pacote e a carcaça do motor.

Figura 10 - Bancada de testes para motores de indução.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Esta seção descreve detalhadamente os equipamentos e instrumentos usados e o seu modo de utilização. Buscou-se levantar as informações necessárias para a preparação e operação dos equipamentos nos ensaios de motores de indução trifásicos de forma a capacitar um novo operador. As instruções detalhadas para realização dos ensaios são descritas posteriormente na seção 5. É importante lembrar também que a bancada aceita a realização de ensaios em motores monofásicos desde que algumas modificações sejam feitas, conforme é explicado no apêndice A.

#### 4.1 ALIMENTAÇÃO

Existem duas formas diferentes de alimentar o motor em teste: através de um varivolt trifásico (Figura 11) ou de uma fonte eletrônica Supplier FCATH300 (Figura 12). Em geral, devido à robustez e simplicidade, os ensaios são realizados utilizando o varivolt para a partida do motor, comutando-se em seguida a sua alimentação para a rede trifásica do laboratório que possui transformador para uso próprio. A manobra é realizada com o auxílio de um circuito de comando contido no painel ilustrado na Figura 11.

A fonte pode ser utilizada em ensaios em que se deseje melhor estabilidade de tensão e de frequência, desde que se tomem os devidos cuidados e se tenha atenção aos procedimentos. Por não ser regenerativa, a fonte pode ser danificada caso o fluxo de potência seja invertido, o que poderia ocorrer em casos de desligamento com rampa V/F, por exemplo. A fonte possibilita a alimentação do motor com tensão entre 0 e 380 V de linha e 220 V de fase, corrente trifásica de até 45 A ou 135 A no modo monofásico, frequência fundamental entre 15 e 500 Hz e potência de 30 kVA. Também possibilita o acionamento do motor por rampa de tensão e frequência (rampa V e V/F). Por ser programável, permite a geração de formas de ondas desbalanceadas, com definição de harmônicas e distúrbios como *sags* e *swells*. Por último, possui comunicação serial e *software* de comunicação remota que possibilita importar formas de onda arbitrárias.

Figura 11 - Varivolt Trifásico.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Figura 12 – Fonte eletrônica trifásica Supplier FCATH3000.



Fonte: SUPPLIER Indústria e Comércio de Eletro-Eletrônicos Ltda (2020)

#### 4.2 MEDIÇÃO DE GRANDEZAS ELÉTRICAS

As medições de grandezas elétricas de alimentação (tensão, corrente, potência e frequência) são realizadas com um analisador de potência Yokogawa WT500 (Figura 13).

Figura 13 – Analisador de potência Yokogawa WT500.



Fonte: Yokogawa Electric Corporation. (2020)

Dependendo da preferência do operador, o equipamento pode ser controlado a partir de um instrumento virtual ou manualmente com os dados gravados diretamente em um *pen drive*. No modo manual as informações podem aparecer na tela em forma de valores numéricos, formas de onda, fasores, linhas de tendência ou no domínio da frequência.

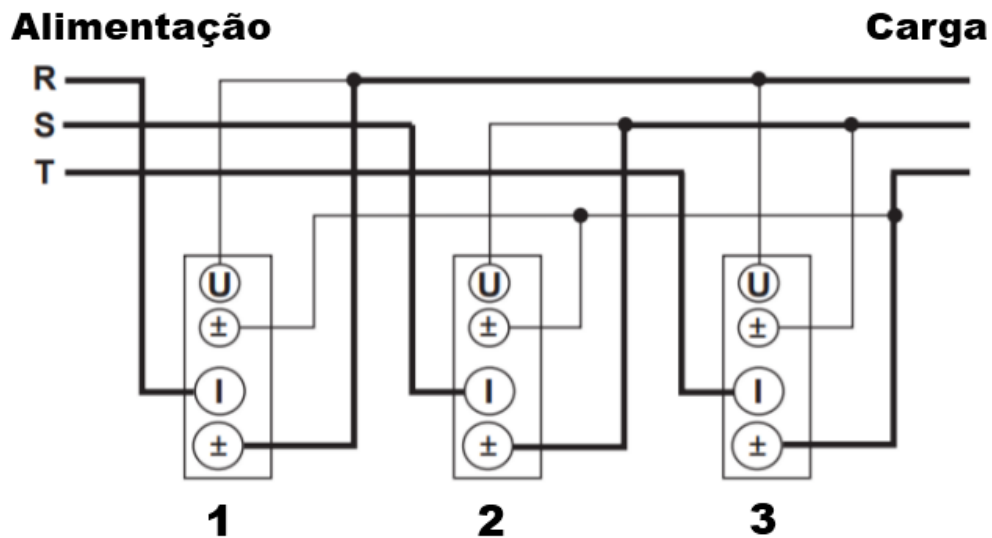
Contando com três entradas para medição de tensão e três para corrente, podem ser utilizados cinco modos de conexão diferentes, de acordo com a natureza da carga:

- 1P2W: monofásica, sistema com dois fios;
- 1P3W: monofásica, sistema com três fios;
- 3P3W: trifásica, sistema com três fios;
- 3P4W: trifásica, sistema com quatro fios;
- 3P3W<sup>1</sup> (3V3A): trifásica, sistema com três fios, pelo método de três tensões e três correntes.

O modo de conexão do modo 3P3W (3V3A), recomendado para a realização de ensaios com motores trifásicos, pode ser visto na Figura 14.

<sup>1</sup> O modo de ligação 3P3W (3V3A) utiliza medição de tensão e corrente independentes.

Figura 14 - Representação do esquemático de ligação 3P3W (3V3A).



Fonte: Yokogawa Electric Corporation. (2020)

A sonda de tensão é conectada diretamente nos terminais do motor e as sondas de corrente passam por 3 transformadores de corrente (TC) instalados na bancada. Inicialmente, as medições de corrente eram feitas através de um transdutor de corrente do tipo alicate, que, no entanto, inseriam significativas incertezas no cálculo de rendimento. A utilização de TCs foi a solução encontrada para reduzir a incerteza e ao mesmo tempo proteger o instrumento contra correntes de partida e surtos. Visto que a bancada é projetada para operar motores de até 20 cv, ela precisa suportar correntes nominais de até 30 A em média e correntes de partida que chegam a ser até 7 vezes a corrente nominal (WEG, 2019). Foram empregados três TCs Braspel BCS 03, exibidos na Figura 15, com as seguintes características:

- Classe de medição;
- Relação de transformação 50:5 A;
- Incerteza de 0,3 % para carga padrão de 12,5 VA;
- Fator térmico 2.



Figura 15 – Transformador de Corrente Braspel BCS 03 50:5 A.



Fonte: Brasformer Produtos Elétricos Ltda. (2020)

Em pesquisas anteriores no Grucad, os TCs foram submetidos a ensaios para aferição de suas características. Suas relações de transformação foram determinadas como 9,976:1, 9,975:1 e 9,974:1.

#### 4.3 DINAMÔMETROS

A medição de grandezas mecânicas como torque e velocidade é feita através de dois sistemas, que podem ser utilizados dependendo da potência e tamanho do motor sendo analisado.

O primeiro sistema consiste em um motor de indução de 30 cv, sem ventilação, operando como gerador controlado por inversor de frequência e acoplado a um transdutor HBM T40B (Figura 16). O transdutor tem acoplamentos do tipo flange e se encontra entre o eixo da máquina em teste e o eixo do motor de 30 cv. A velocidade do eixo é medida por um encoder magnético de 72 polos com 1024 pulsos por rotação incorporado ao mesmo equipamento. O transdutor é conectado a um amplificador MX460 (Figura 17) que exporta as formas de onda de torque e de velocidade através de um cabo Ethernet para o programa em LabVIEW executado em um notebook.

Este sistema é utilizado para motores de 2 a 20 cv e é chamado de dinamômetro 1.

Figura 16 – Transdutor de torque HBM T40B.



Fonte: HBM. (2019)

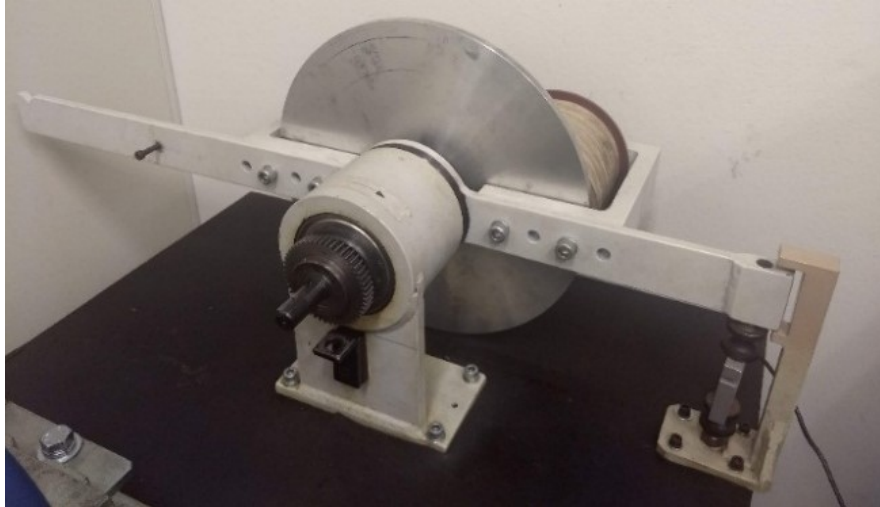
Figura 17 – Amplificador HBM MX460.



Fonte: HBM. (2019)

Para motores menores, de até 2 cv, outro sistema consiste em um freio eletromagnético com disco de Foucault (Figura 18). O disco de alumínio é solidário ao eixo da máquina em teste, bem como a uma roda dentada juntamente a um sensor magnético do tipo *pick-up* Dynapar Series 54Z (Figura 19) usados para medir rotações de 0 à 20 kHz. Os dados obtidos podem ser visualizados através do indicador visual (Figura 20) presente na bancada ou enviados ao amplificador MX460 para visualização pelo VI.

Figura 18 – Sistema para medição de torque e velocidade para motores de até 2 cv



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Figura 19 – Sensor Magnético Dynapar Series 54Z.



Fonte: Dynapar. (2019)

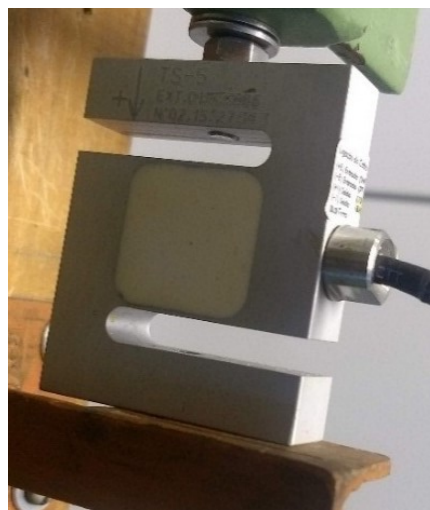
Figura 20 - Indicador de velocidade.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2019)

Um braço mecânico, com eixo de rotação concêntrico ao do disco, suporta as bobinas de campo e pressiona uma célula de carga AEPH type S (Figura 21) com capacidade de até 5 kg. Por fim, essa pesagem é transmitida a um indicador de pesagem Alfa 3107C (Figura 22), que pode ser acessado pelo instrumento virtual através de um cabo RS232. Este sistema é chamado de dinamômetro 2. A calibração do indicador de pesagem é recomendável no início dos ensaios com o dinamômetro 2 e os procedimentos para a sua realização encontram-se no apêndice B.

Figura 21 – Célula de carga AEPH type S.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2019)

Figura 22 – Indicador de pesagem Alfa 3107C.

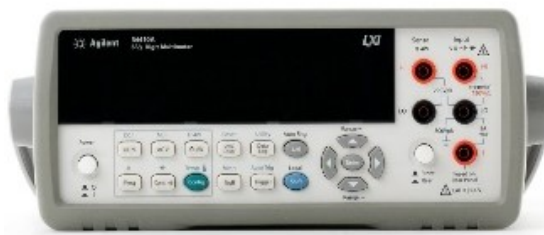


Fonte: Alfa Instrumentos. (2019)

#### 4.4 MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DO ESTATOR

A medição da resistência dos enrolamentos do estator é feita com um multímetro Agilent 34410A (Figura 23) ou – se este não estiver disponível – com uma fonte DC Keysight E3632A (Figura 24). Esta medição é feita não só no início do ensaio como também diversas outras vezes para determinar a variação de temperatura dos enrolamentos. Ambos equipamentos podem ser operados manualmente ou através do instrumento virtual descrito na seção 4.6.

Figura 23 – Multímetro Agilent 34410A.



Fonte: Agilent. (2019)

Figura 24 - Fonte DC Keysight E3632A.



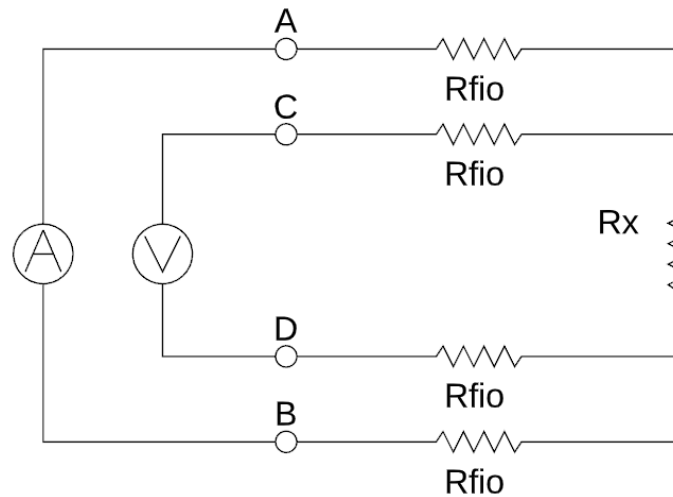
Fonte: Keysight. (2019)

##### 4.4.1 MEDIÇÃO A QUATRO FIOS

A medição de resistência é feita através de terminais de corrente e tensão independentes, o que possibilita a realização de uma medição a quatro fios, conforme Figura 25, que aumenta a precisão do resultado, cancelando a resistência dos cabos ( $R_{fio}$ ). A resistência medida pode ser calculada através da medição de tensão nos terminais CD e de corrente nos terminais AB através de (4.1).

$$R_x = \frac{V_{CD}}{I_{AB}} \quad (4.1)$$

Figura 25 – Medição de resistência a quatro fios.

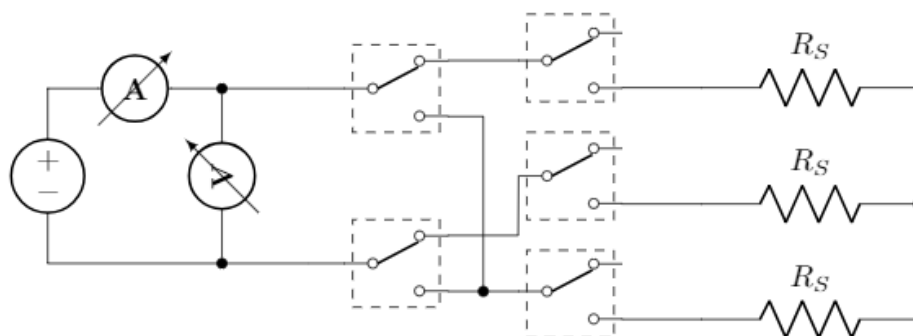


Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

#### 4.4.2 COMUTADOR

Para agilizar o processo de medição de resistência elétrica, foi desenvolvido um dispositivo que faz o chaveamento das entradas e muda as conexões conforme a Figura 26. Este comutador foi desenvolvido no próprio GRUCAD e mais detalhes sobre o seu desenvolvimento podem ser encontrados em AURICH et al. (2018).

Figura 26 – Esquema básico do sistema de comutação.

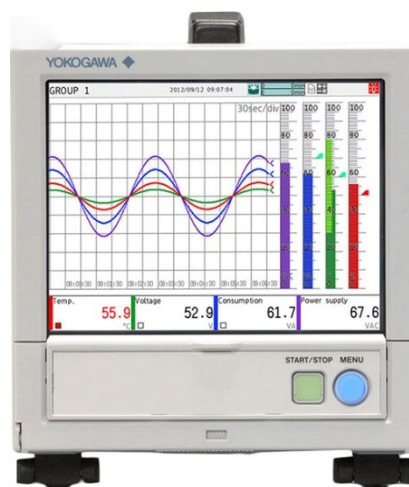


Fonte: Aurich et al. (2018)

#### 4.5 MONITORAMENTO DE TEMPERATURA

O monitoramento da variação da temperatura do motor é feita através de dois termopares conectados a um *datalogger* Yokogawa GP10 (Figura 27). O primeiro é posicionado entre a carcaça e o pacote do motor, passando por dentro da caixa de ligação, e o segundo é posicionado de forma a medir a temperatura ambiente. A aquisição é feita em intervalos de 30 segundos e ao fim do ensaio os dados podem ser exportados através de um cartão SD para o computador.

Figura 27 – Data logger Yokogawa GP10.



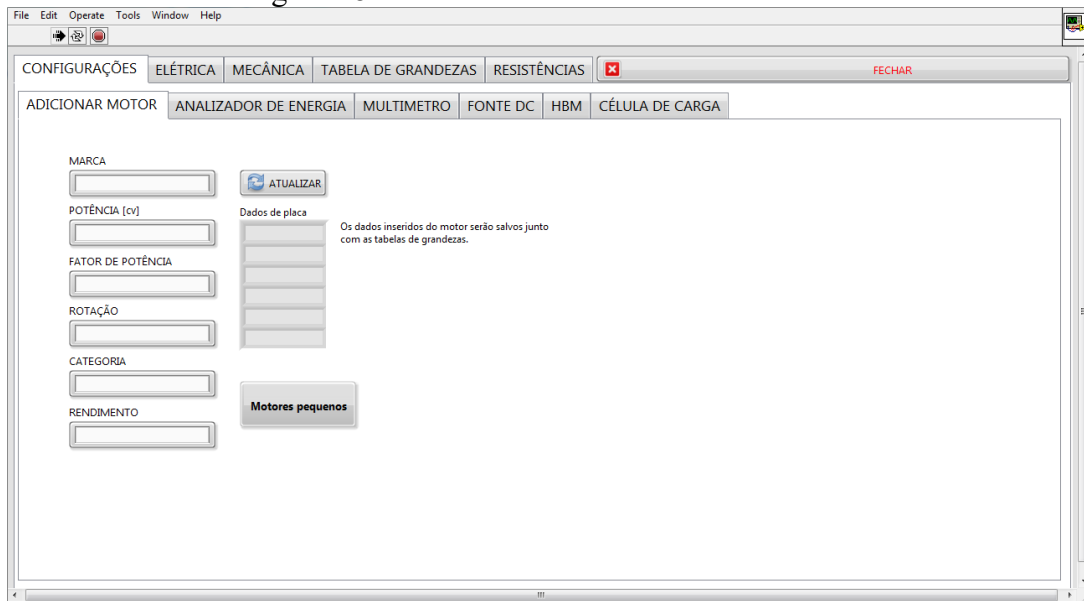
Fonte: Yokogawa Electric Corporation. (2019)

#### 4.6 INSTRUMENTO VIRTUAL

Um instrumento virtual (VI) foi desenvolvido em LabVIEW® (da National Instruments) por estudantes de graduação no GRUCAD para agregar a comunicação dos instrumentos de medição em uma interface visual. O VI faz parte de uma iniciativa para automatizar os processos, aumentar a velocidade de aquisição dos dados e mitigar fontes de incerteza. O desenvolvimento do VI e sua operação detalhada são descritos por Brescovitt (2020).

Após realizada a configuração inicial (Figura 28), pode-se monitorar os instrumentos conectados ao instrumento virtual através das abas Elétrica e Mecânica (Figura 29 e Figura 30). Nelas pode-se fazer o acompanhamento das medições feitas pelo analisador de energia e pelo sensor de torque.

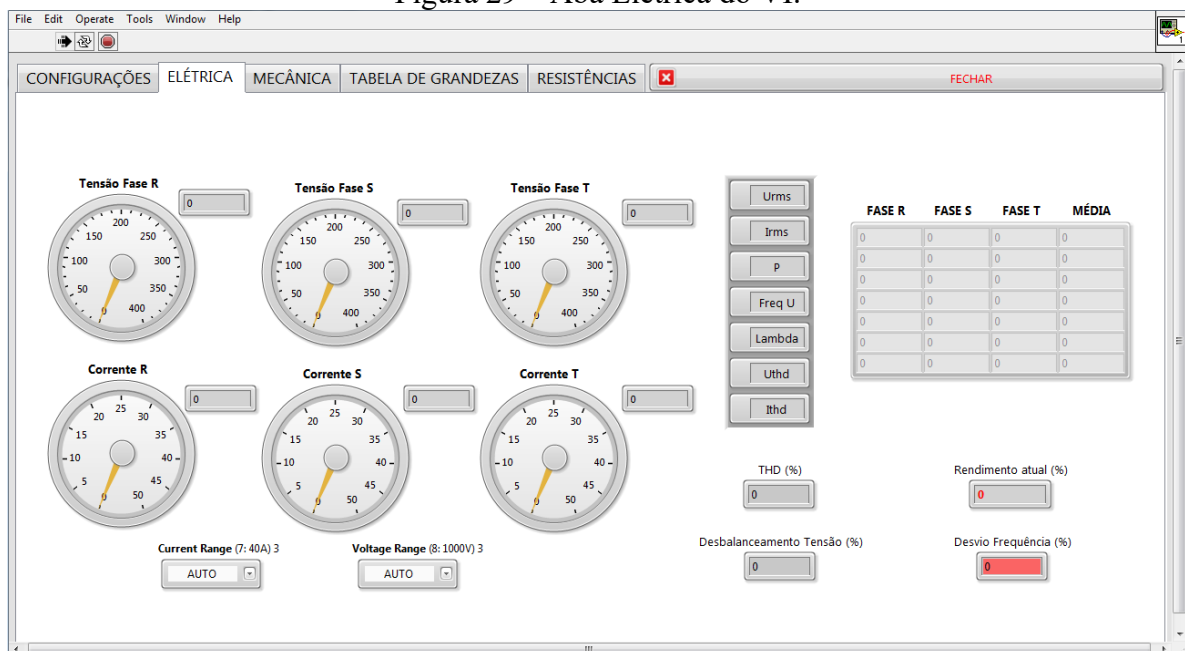
Figura 28 – Tela inicial do Instrumento Virtual.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

A aba Elétrica mostra os dados de tensão e corrente em cada fase assim como indicadores de desbalanceamento de tensão, desvio de frequência e distorção harmônica total (THD). Estes indicadores representam a qualidade das condições de ensaio e devem atender as condições da norma IEEE 112, conforme apresentado no Quadro 2. Já a aba Mecânica mostra os dados de torque e rotação do eixo do motor em teste.

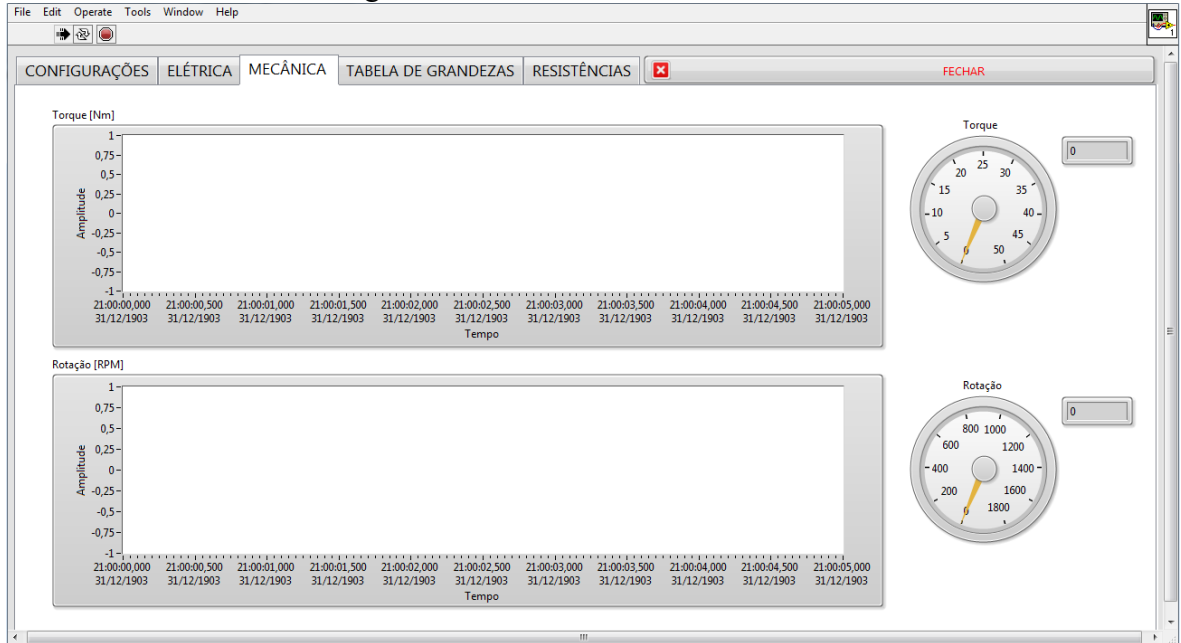
Figura 29 – Aba Elétrica do VI.





Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Figura 30 – Aba Mecânica do VI.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Quadro 2 – Limites estabelecidos pela norma IEEE 112 para condições de ensaio

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Desbalanceamento de tensão | O desvio do valor eficaz de qualquer fase em relação à média das três fases não pode ser superior a 0,5%. |
| Desvio de frequência       | A frequência da tensão de alimentação deve estar entre $\pm 0,1\%$ do valor nominal para o motor.         |
| THD                        | No máximo 5% em relação à componente fundamental.   |

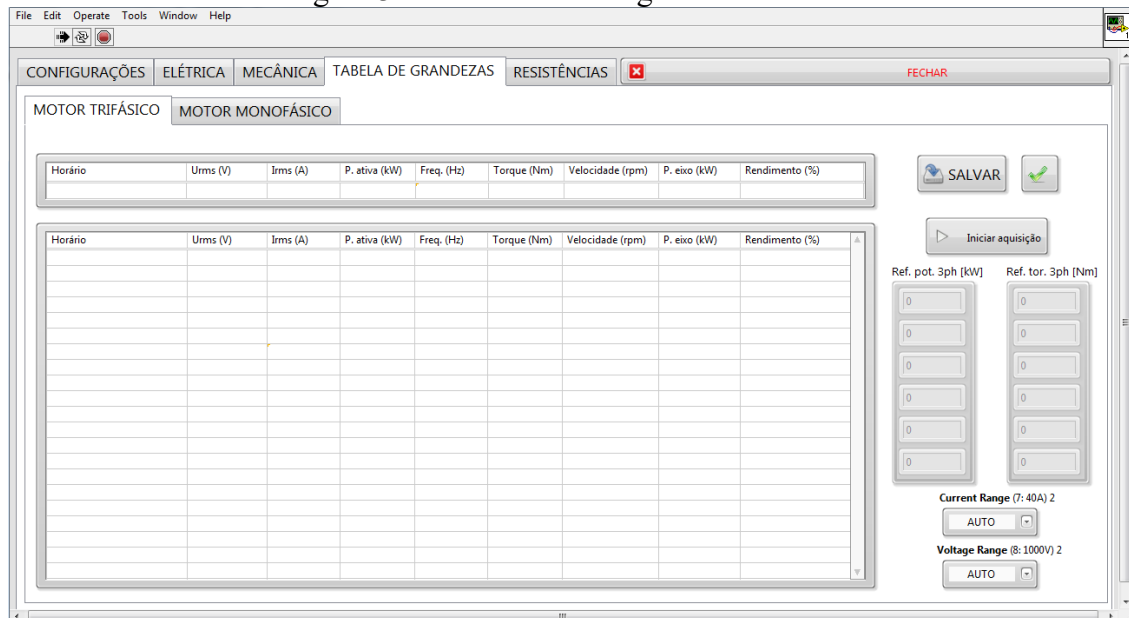
Fonte: Adaptado de IEEE Power Engineering Society. (2018)

A aba “Tabela de grandezas” (Figura 31) resume as medições elétricas e mecânicas essenciais do ensaio, isto é, tensões e correntes de linha, potência ativa, frequência, torque e velocidade, e é utilizada para fazer o armazenamento dos dados dos instrumentos. O programa foi desenvolvido de modo a permitir também o ensaio de motores monofásicos, com informações diferentes exibidas nesse caso.

Os valores médios das grandezas a cada segundo durante o ensaio são exibidos na tabela superior e, quando desejado, podem ser salvos pela ativação do botão “SALVAR”. Os

controles das escalas de tensão e de corrente presentes nesta aba permitem a rápida alteração desses valores, de forma a utilizar a menor escala possível a fim de reduzir as incertezas de medição.

Figura 31 – Aba Tabela de grandezas do VI.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Durante a realização do ensaio de carga, conforme apresentado da seção 3.2.3, é preciso submeter o motor a diferentes pontos de carregamento. Os dois campos nomeados “Ref. pot 3ph (kW)” e “Ref. tor 3ph (Nm)” na Figura 31 servem para auxiliar o operador, apresentando valores de referência de potência e torque para seis pontos distribuídos igualmente dentro dessa faixa de potência, contendo os extremos e o ponto de 100% de carga.

A aba Resistências é utilizada para medir as resistências elétricas dos enrolamentos do estator. Essa medição pode ser feita com o multímetro (Figura 32) ou com a fonte DC (Figura 39). Para ambos os casos, há um campo de comentário para que se possa incluir observações sobre a medição realizada como, por exemplo, “a frio” ou “pós ensaios térmico”. O controle RESET OVP possibilita a reativação da fonte após uma atuação da proteção contra sobretensão.

Figura 32 – Aba Resistências do VI – Multímetro.

Salvar Resistência Resistência Comentário

salvar 0,0000

| Data/Horário | Resistência (Ohm) | Comentário |
|--------------|-------------------|------------|
|              |                   |            |
|              |                   |            |
|              |                   |            |
|              |                   |            |
|              |                   |            |
|              |                   |            |
|              |                   |            |
|              |                   |            |
|              |                   |            |
|              |                   |            |
|              |                   |            |
|              |                   |            |
|              |                   |            |
|              |                   |            |
|              |                   |            |
|              |                   |            |
|              |                   |            |
|              |                   |            |
|              |                   |            |
|              |                   |            |
|              |                   |            |
|              |                   |            |

Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Figura 33 – Aba Resistências do VI – Fonte DC.

Actual Voltage Actual Current Comentário 2

0,000 0,000

| Data/Horário | Tensão [V] | Corrente [A] | Comentário |
|--------------|------------|--------------|------------|
|              |            |              |            |
|              |            |              |            |
|              |            |              |            |
|              |            |              |            |
|              |            |              |            |
|              |            |              |            |
|              |            |              |            |
|              |            |              |            |
|              |            |              |            |
|              |            |              |            |
|              |            |              |            |
|              |            |              |            |
|              |            |              |            |
|              |            |              |            |
|              |            |              |            |
|              |            |              |            |
|              |            |              |            |
|              |            |              |            |
|              |            |              |            |
|              |            |              |            |
|              |            |              |            |
|              |            |              |            |
|              |            |              |            |

Tensão 10,000 Corrente 2,000

Enable Output OFF

SALVAR

RESET OVP

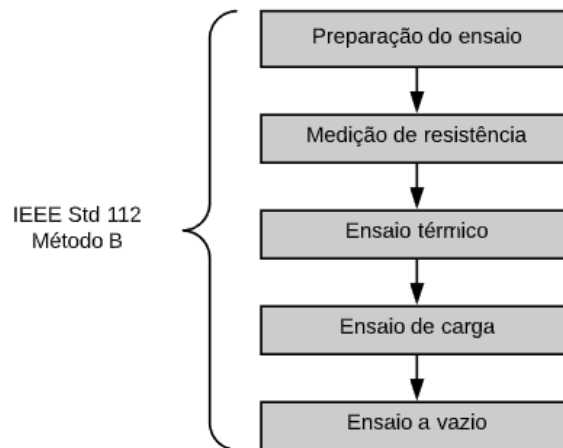
Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Nesta seção foram descritos os componentes da bancada. A seção seguinte descreve os procedimentos para realização dos ensaios segundo o método B da IEEE Std. 112 empregando estes equipamentos.

## 5 PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Esta seção dedica-se à estruturação e documentação de procedimentos de ensaios para determinação de rendimento de motores de indução trifásicos conforme o método B da norma IEEE 112 para a bancada de ensaios disponível no LABMAQ. Esta é a principal contribuição deste trabalho. A Figura 34 mostra uma visão geral dos procedimentos de ensaio.

Figura 34 - Visão geral do procedimento de ensaio.

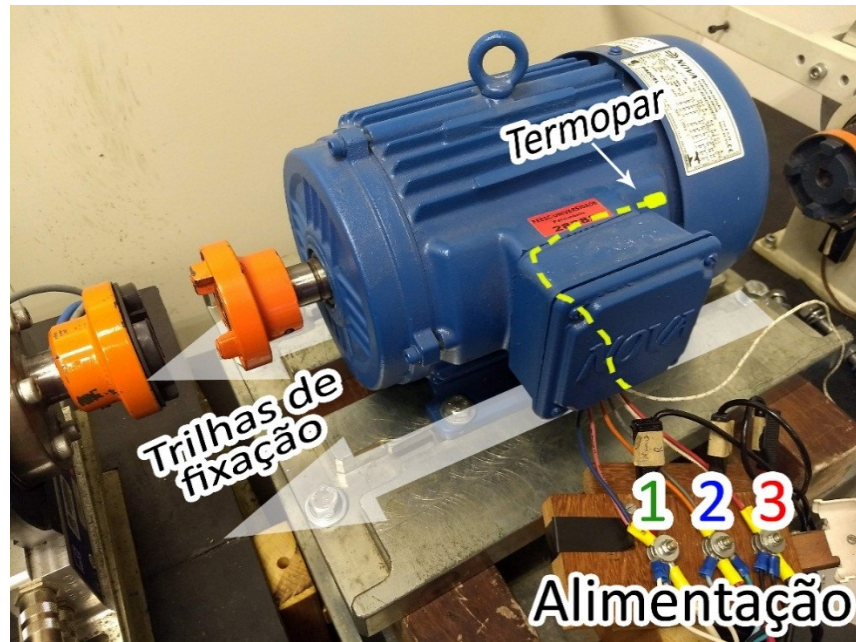


Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

### 5.1 PREPARAÇÃO DO ENSAIO

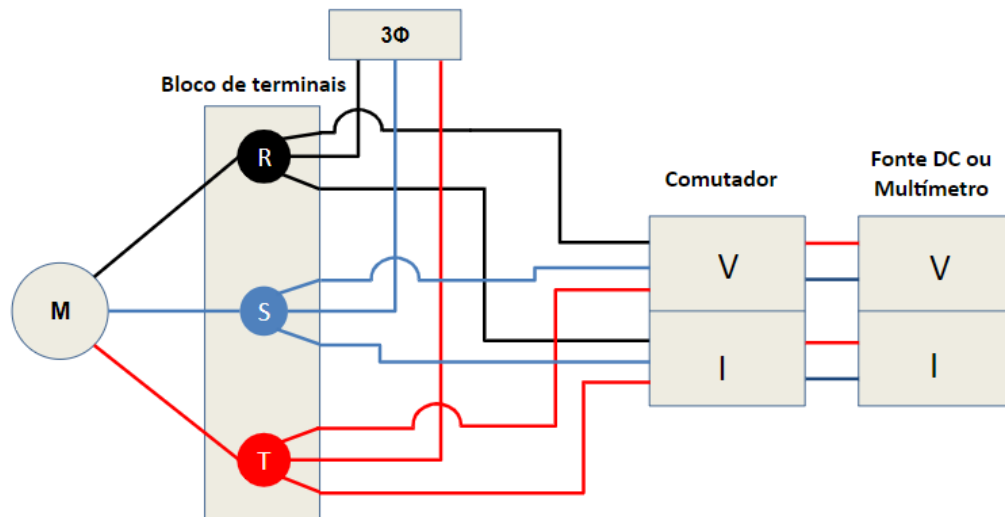
Inicialmente, é necessário instalar o termopar entre a carcaça e o pacote do motor passando pela caixa de ligação. Em seguida, conectam-se os terminais do motor na alimentação empregando o bloco de terminais com parafusos exibido na Figura 35. A posição das sondas de tensão no bloco de terminais deve seguir a indicação conforme as suas etiquetas. O diagrama de ligação é apresentado na Figura 36.

Figura 35 - Montagem inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Figura 36 – Diagrama de ligação do bloco de terminais.

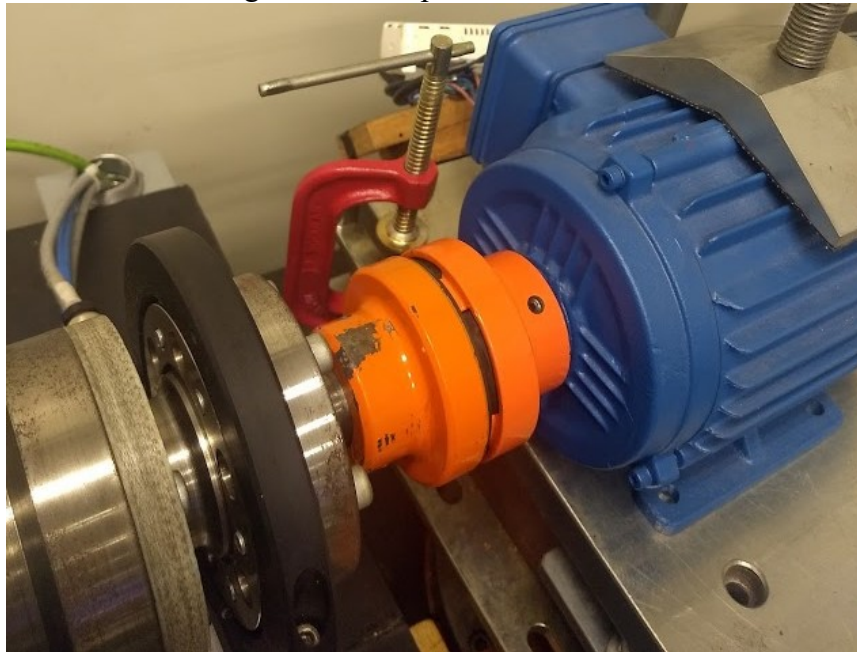


Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Posicionam-se as duas trilhas de fixação alinhadas com a furação da base do motor para garantir o alinhamento do eixo horizontal. Para motores muito pequenos ou que não possuam pés, pode-se utilizar o acessório de fixação por compressão mostrado na Figura 37. Após instalar o acoplamento de garra ao eixo, ajusta-se a altura da plataforma de suporte do

motor pelo painel de comando instalado na lateral da bancada. Por fim, acopla-se o motor ao dinamômetro e apertam-se os parafusos de fixação do motor, sendo uma boa prática deixar uma pequena “folga” de aproximadamente 1 cm entre as partes do acoplamento.

Figura 37 - Acoplamento do eixo.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Após a montagem inicial, deve-se verificar as conexões elétricas da alimentação, conforme o esquema apresentado na Figura 36 e preparar o instrumento virtual para a aquisição, inicializando seus equipamentos.

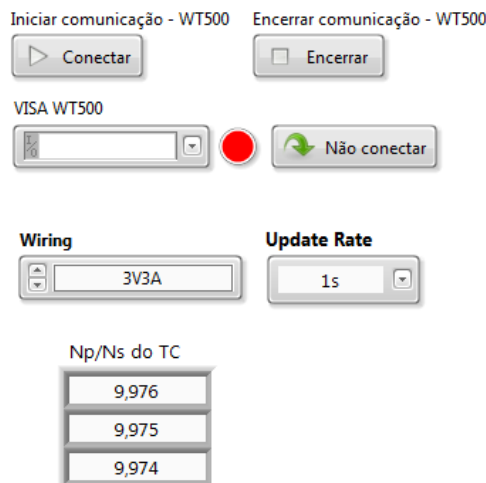
Ao abrir-se o programa, na parte de configurações (Figura 28), o programa pede para entrar com os dados do motor a ser ensaiado (marca, potência, fator de potência, rotação, categoria e rendimento), e o botão “motores pequenos” permite a escolha entre motores com potência superior a 5cv (grande) ou inferior a 5cv (pequeno), que define o dinamômetro a ser usado. Após inseridos os dados de placa do motor e escolhido seu tipo ao clicar em “Atualizar” os dados são carregados no programa.

Cada instrumento da bancada possui a sua aba de conexão onde são inseridos os parâmetros para iniciar a comunicação com o programa. Uma vez que a conexão for estabelecida corretamente, um indicador ao lado do botão se torna verde. Caso determinado instrumento não seja utilizado para o ensaio, basta clicar em “Não conectar”. As configurações específicas de cada instrumento devem ser alteradas apenas em casos especiais,

visto que os campos já estão predefinidos para o caso padrão de ensaios em motores trifásicos.

A aba “Analisador de energia” (Figura 38) reúne as configurações personalizáveis do analisador de energia. A comunicação com o instrumento é iniciada com a ativação do botão “Conectar” seguida da seleção do seu endereço no menu VISA WT500.

Figura 38 – Aba analisador de energia do VI.



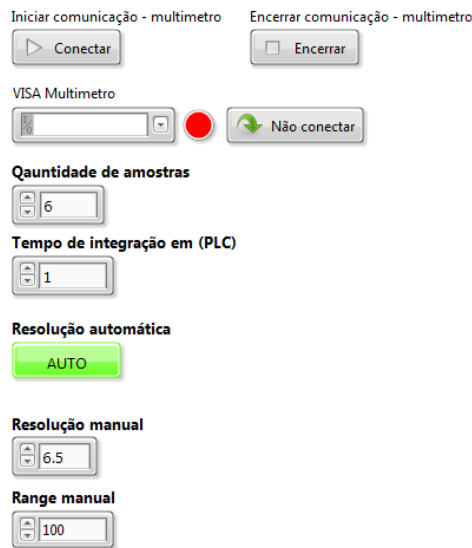
Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

A aba “Multímetro” (Figura 39) reúne as configurações personalizáveis do multímetro. O procedimento de comunicação é o mesmo do analisador de potência, inserindo-se o endereço no campo VISA Multímetro e iniciando a comunicação.

Os campos “Quantidade de amostras” e “Tempo de integração” estão relacionados a aquisição de dados e são definidas desta forma por padrão sugerido pelo fabricante. Os campos “Resolução manual” e “Range manual” estão relacionados à exibição dos dados e normalmente não precisam ser alterados por utilizar o modo AUTO na maior parte do tempo.



Figura 39 – Aba multímetro do VI.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Para a configuração das abas “Fonte DC” e “Célula de carga” não é necessária nenhuma configuração específica, apenas que sejam inicializados da mesma forma que os instrumentos anteriores, inserindo-se o endereço do instrumento no campo VISA e iniciando a comunicação.

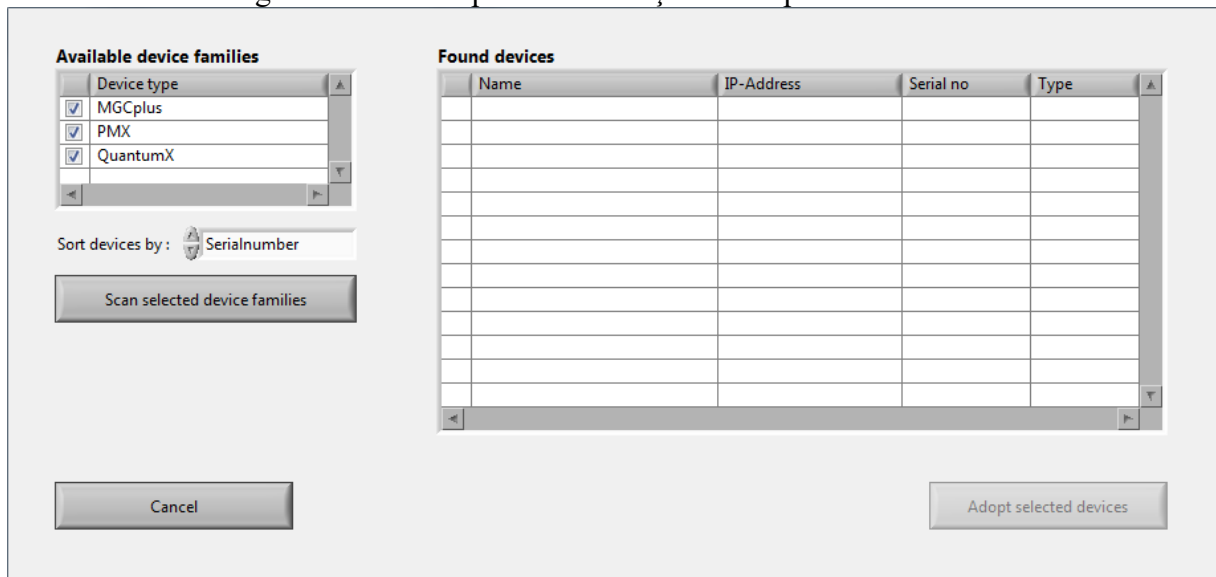
Figura 40 – Abas Fonte DC e Célula de carga do VI.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Por último, na HBM, que se refere ao módulo MX460 ligado via interface Ethernet, um procedimento de conexão diferente é necessário. Primeiramente, deve-se clicar em “Conectar” e então uma janela “ScanAndSelectDevices.vi” (Figura 41) aparece. Clicando em “Scan selected device families” deve aparecer uma opção na área “Found devices”. Uma vez selecionado o módulo de aquisição, é preciso acionar o botão “Adopt selected devices”, assim a conexão é estabelecida.

Figura 41 – Janela para inicialização do amplificador HBM.



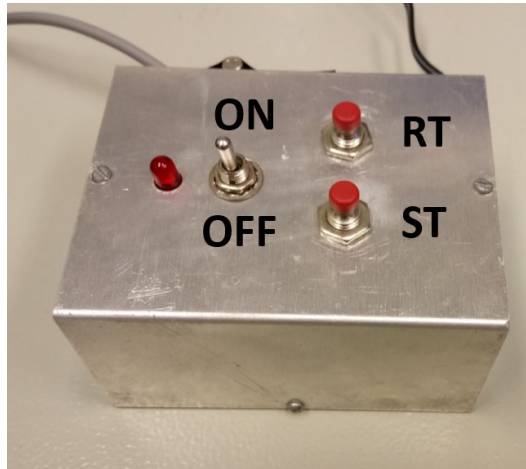
Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

## 5.2 MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA

As medições de resistência são feitas no início do procedimento e também antes e depois de cada ensaio para determinar a temperatura média dos enrolamentos, sempre com o motor desligado e com o eixo parado.

Para a medição inicial, com a botoeira de acionamento do motor desligada e o comutador ligado, realiza-se o comando de medição de resistência pelo VI. O processo deve ser repetido outras duas vezes enquanto se pressiona cada um dos botões vermelhos do comutador, para medir a resistência entre todos os terminais (Figura 42). É imprescindível realizar este procedimento antes de qualquer acionamento do motor e registrar a temperatura ambiente de forma manual. Ao fim, deve-se desligar o comutador antes que o motor seja acionado.

Figura 42 – Controle do comutador.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

As medições de resistência após cada ensaio devem ser feitas o mais rápido possível, respeitando o tempo limite estipulado pela norma conforme a Tabela 1, acompanhadas pelo registro da temperatura ambiente.

Tabela 1 – Tempo máximo para efetuação de medidas de resistência após o desligamento.

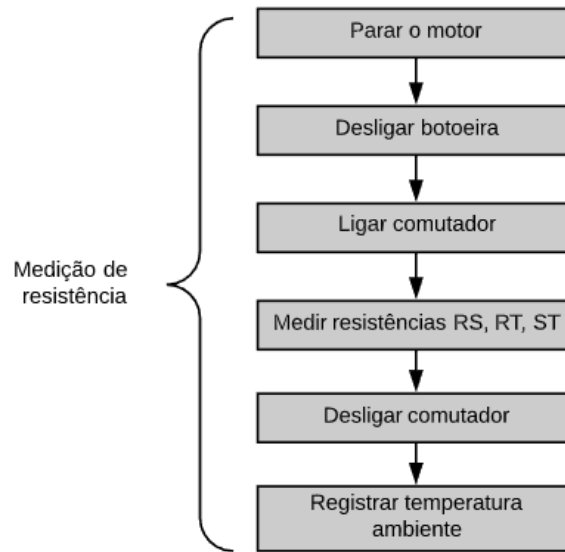
| Potência          |                   | Tempo após o desligamento<br>da alimentação (s) |
|-------------------|-------------------|---|
| kVA               | kW                |   |
| $\leq 50$         | $\leq 38$         | 30  |
| $50 < P \leq 200$ | $38 < P \leq 150$ | 90  |
| $> 200$           | $> 150$           | 120   |

Fonte: IEEE Standard 112. (2018)

Para a medição de resistência, podem ser usados dois instrumentos diferentes, como exposto na seção anterior. Como padrão, utiliza-se o multímetro para este procedimento, porém caso o mesmo não esteja disponível, a fonte DC pode ser utilizada no lugar.

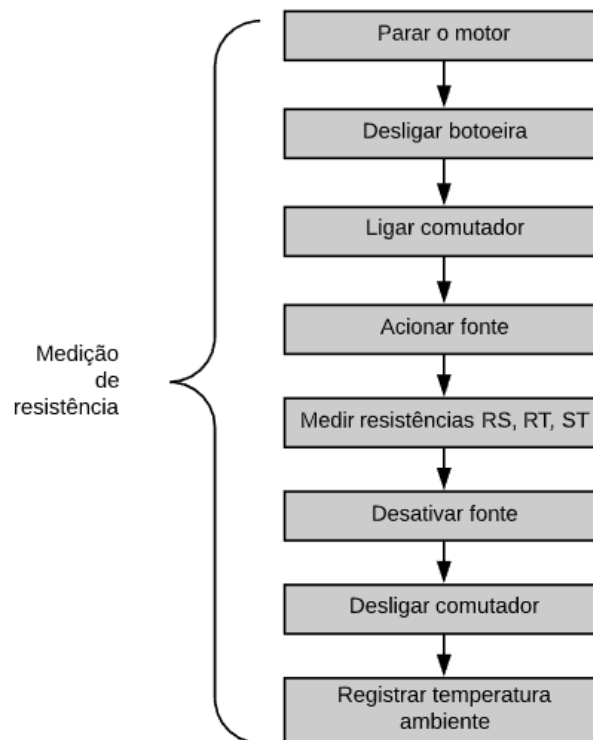
Os procedimentos para a medição de resistência podem ser visualizados nos fluxogramas na Figura 43 e Figura 44. Para realizar as medições pelo VI, é necessário que o botão “Iniciar aquisição/Adquirindo” esteja desativado.

Figura 43 – Fluxograma detalhado para medição de resistência com o multímetro.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Figura 44 – Fluxograma detalhado para medição de resistência com a fonte DC.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

### 5.3 PROCEDIMENTO DE PARTIDA

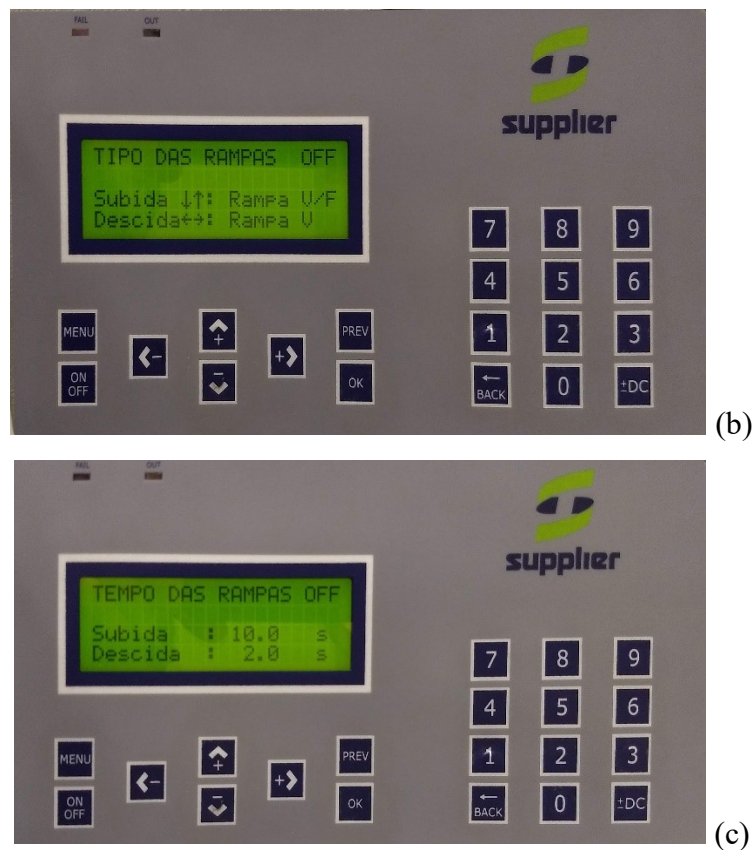
Antes de partir o motor pela primeira vez, é necessário realizar as medições de resistência a frio e de temperatura ambiente, verificar se o instrumento virtual está

comunicando corretamente e que os dados do motor foram inseridos corretamente no instrumento virtual. O controle “Iniciar aquisição/Adquirindo” deve estar ativado. Em seguida, deve-se certificar que todos os cabos estão devidamente conectados e apertados, que não existam folgas nos parafusos, que os equipamentos de medição estão ligados e que o potenciômetro de torque do dinamômetro está zerado. É importante prestar atenção na corrente de partida do motor para que a mesma não ultrapasse até 2 vezes o valor nominal ou 50 A (o que for menor) para garantir a integridade dos transformadores de corrente.

Conforme exposto na seção 4, existem duas formas de alimentar o motor em teste: através da fonte eletrônica ou do varivolt trifásico. Para ensaios utilizando a fonte eletrônica, é necessário primeiramente verificar as configurações de partida. Como padrão, recomendam-se as seguintes configurações: Rampa V/F para subida; Rampa V para descida; Tempo de subida 10 s; Tempo de descida 2 s. As configurações são ilustradas na Figura 45 (a), (b) e (c) respectivamente. A rampa de descida nunca pode ser V/F pois o retificador da fonte não regenera energia para a rede e isso pode danificar a fonte durante a desaceleração do motor.

Figura 45 – Configurações de (a) Tensão e frequência, (b) Tipo de rampa e (c) Tempo de rampa para ensaio utilizando a fonte eletrônica Supplier FCATH3000.



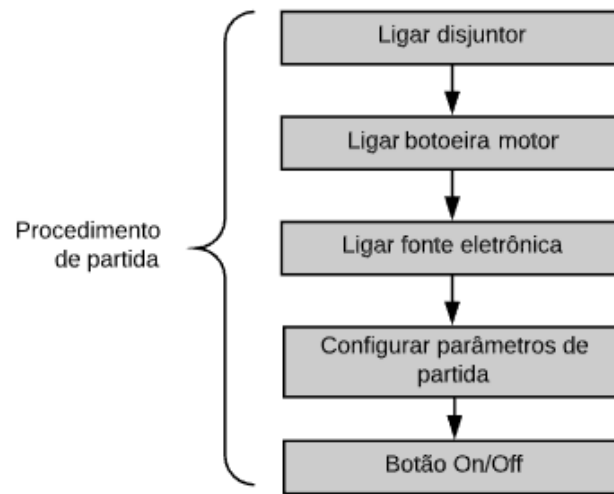


Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Para ensaios utilizando o varivolt trifásico, é necessário apenas tomar cuidado para zerar a tensão antes de apertar o botão Partida. Depois, deve-se aumentar a tensão lentamente até atingir 220 V (fase) e então pressionar o botão Rede para conectar o motor diretamente na rede.

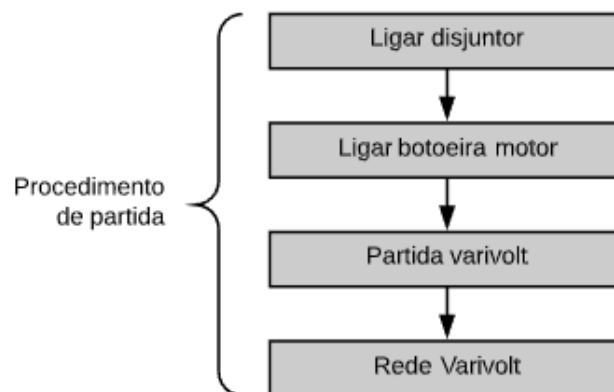
Os procedimentos de partida acima descritos podem ser visualizados nas Figura 46 e Figura 47.

Figura 46 – Fluxograma detalhado para procedimento de partida com a fonte eletrônica.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Figura 47 – Fluxograma detalhado para procedimento de partida com varivolt.



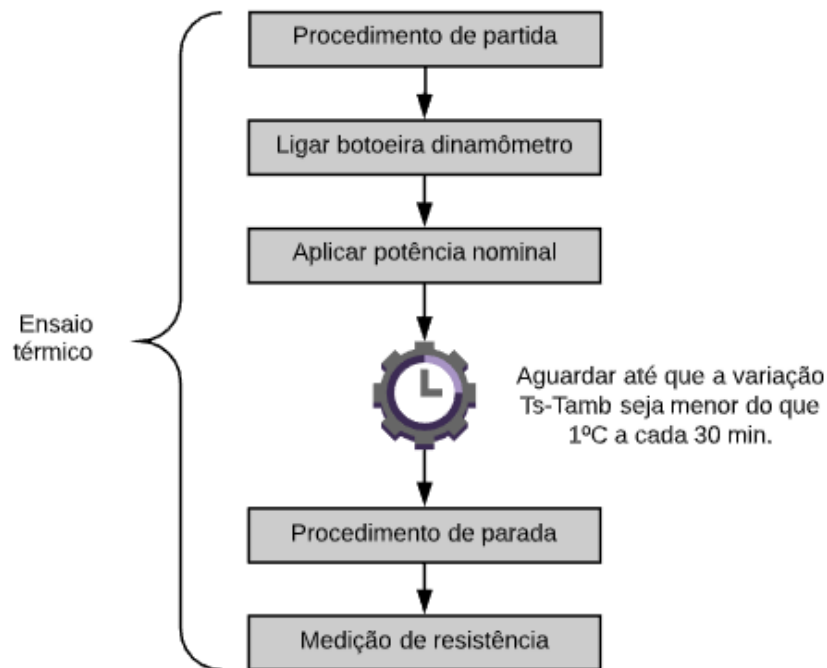
Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

#### 5.4 ENSAIO TÉRMICO

O objetivo principal do ensaio térmico é determinar a temperatura de operação do motor em condição nominal para realizar as devidas correções do valor da resistência elétrica dos enrolamentos.

Como citado anteriormente, as resistências são medidas antes da partida do motor com a máquina à temperatura ambiente. Em seguida, o motor opera com carga nominal até que a diferença entre a temperatura do motor e a temperatura ambiente varie menos que 1°C a cada 30 minutos. O motor é parado e a resistência dos enrolamentos é novamente medida. O procedimento para o ensaio térmico pode ser visualizado através do fluxograma na Figura 48.

Figura 48 - Fluxograma detalhado para ensaio térmico.



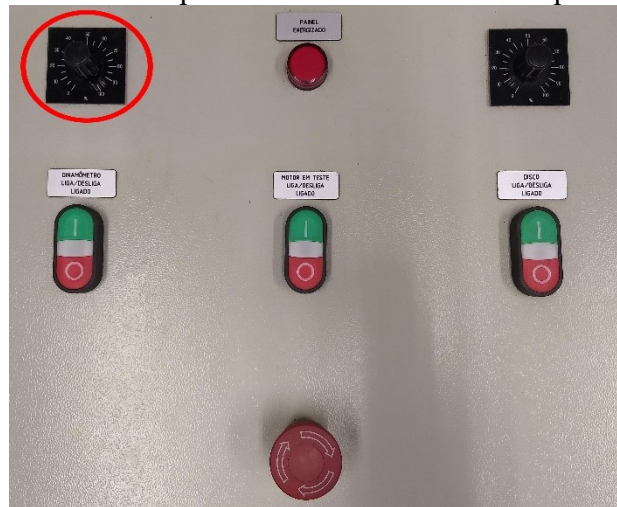
Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

## 5.5 ENSAIO COM CARGA

No ensaio com carga, 6 níveis de carregamento diferentes são aplicados, sendo esses normalmente 150%, 125%, 100%, 75%, 50% e 25% da potência nominal, nesta ordem. Logo após também é feita (se possível) uma medida com o dinamômetro desligado, para fins de calibração dos resultados. O controle da carga imposta no eixo é feito através de um potenciômetro (Figura 49) que define a limitação da corrente de quadratura da máquina que opera como gerador. Excepcionalmente, pode-se impor a velocidade de rotação mudando-se a referência de velocidade do dinamômetro na interface homem-máquina (Figura 50), mantendo o limite de torque alto.



Figura 49 - Botão para controle de corrente de quadratura.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Figura 50 – Interface do inversor de frequência.

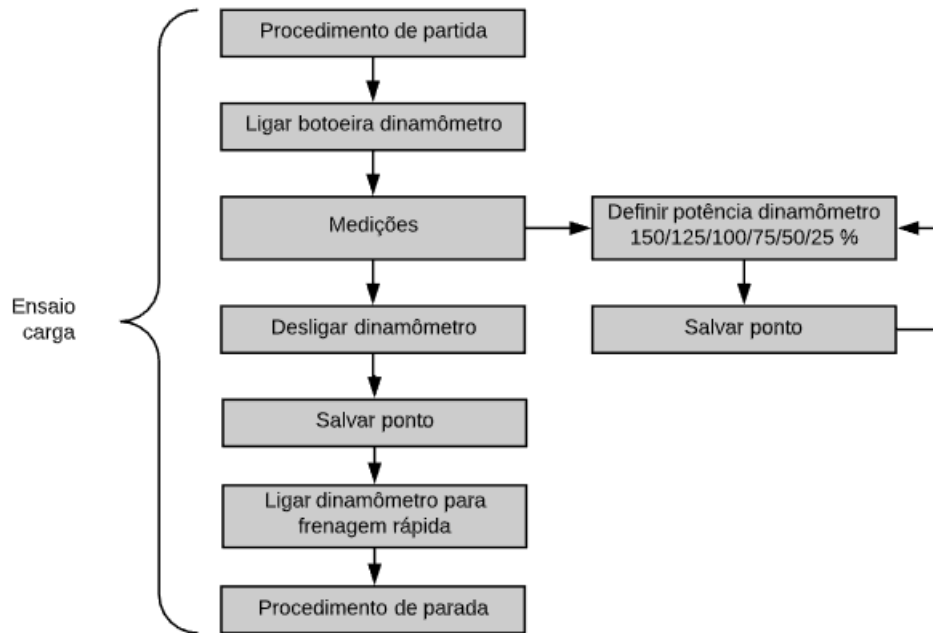


Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Medem-se a tensão, a corrente, a potência, a frequência, o torque e a velocidade do eixo, além da temperatura ambiente. Isso pode ser feito na aba “Tabela de grandezas” do VI desenvolvido para a bancada, conforme ilustrado na Figura 31. É importante que o ensaio seja feito rapidamente, minimizando a variação da temperatura. Por fim, com a máquina parada, uma nova medição da resistência é feita para que o valor médio entre a inicial e a final (ambos com a máquina quente) seja calculado.

O procedimento para o ensaio com carga pode ser visualizado através do fluxograma na Figura 51.

Figura 51 - Fluxograma detalhado para ensaio com carga.



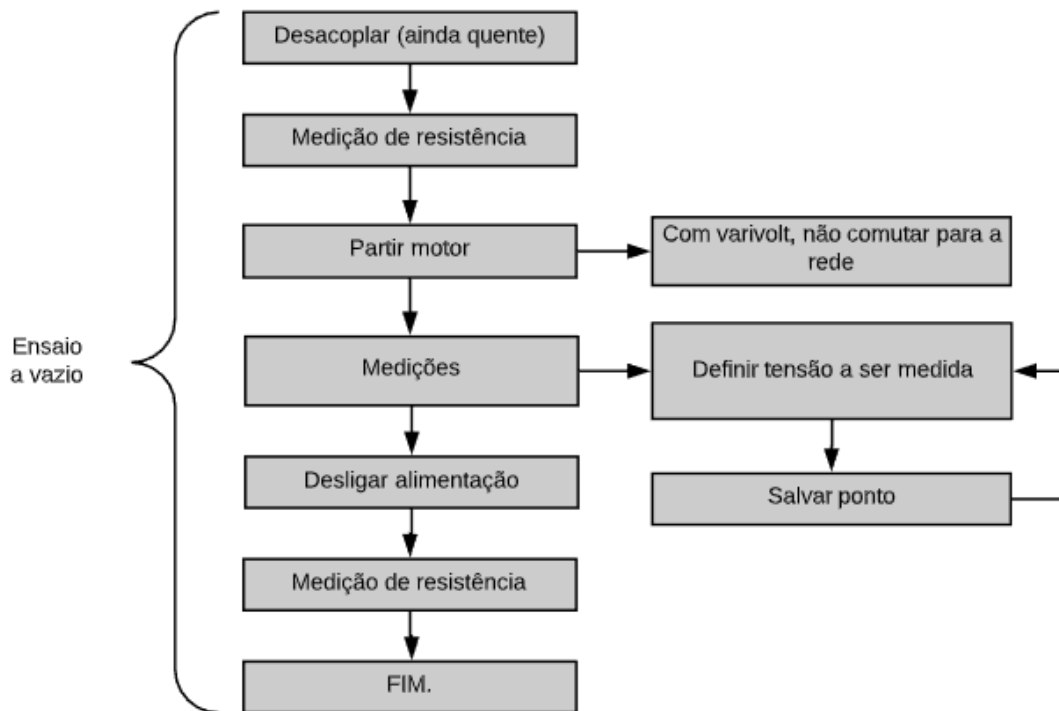
Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

## 5.6 ENSAIO EM VAZIO

No ensaio em vazio, o motor tem sua carga desacoplada e tem sua tensão de alimentação gradualmente reduzida até que seja observável um incremento de corrente. Segundo a norma, devem ser feitos pelo menos 3 medições entre 125% e 75% da tensão nominal, sendo um deles o mais próximo possível de 100% e mais 3 medições entre 50 e 20% da tensão nominal. Medem-se, em cada ponto, a tensão, a corrente e a potência ativa. No VI, o registro das medições é feito da mesma forma que no ensaio de carga.

O procedimento para o ensaio em vazio pode ser visualizado através do fluxograma na Figura 52.

Figura 52 - Fluxograma detalhado para ensaio a vazio.

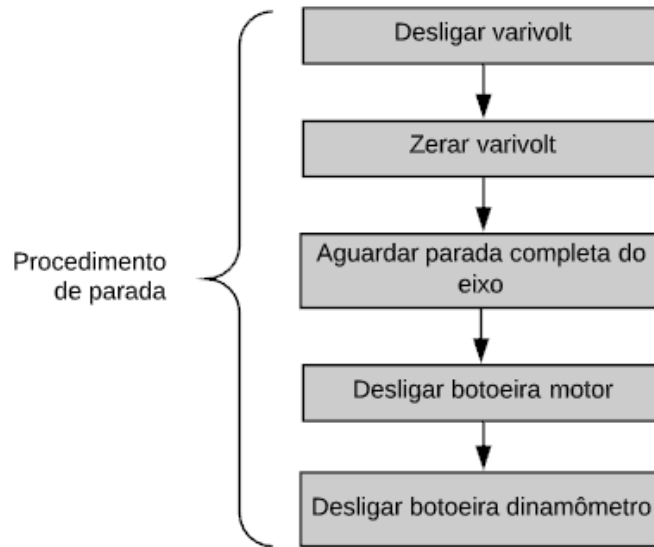


Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

## 5.7 PROCEDIMENTO DE PARADA

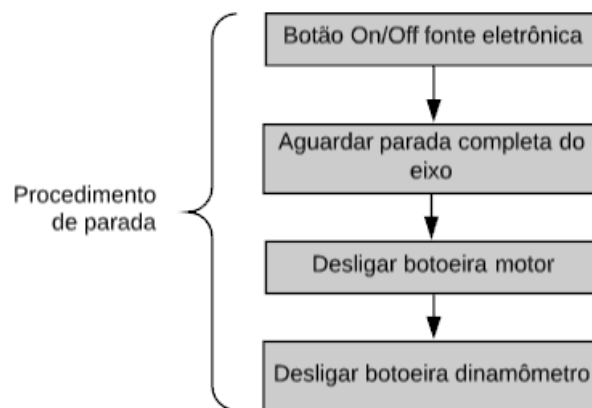
Ao final de cada ensaio é necessário respeitar a ordem do procedimento de parada para garantir a segurança do operador e evitar danos aos equipamentos. O procedimento depende do tipo de alimentação utilizado: a Figura 53 demonstra o caso com alimentação utilizando o varivolt, e a Figura 54, utilizando a fonte eletrônica.

Figura 53 – Fluxograma detalhado para procedimento de parada utilizando varivolt.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Figura 54 – Fluxograma detalhado para procedimento de parada utilizando a fonte eletrônica.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

## 5.8 RELATÓRIO DE ENSAIO

Um relatório de ensaio padronizado foi desenvolvido na forma de uma planilha em Excel durante a realização deste TCC. A planilha foi desenvolvida de forma a receber os dados das tabelas do VI, executar os cálculos do método B da IEEE Std. 112 e traçar curvas de rendimento e perdas em função do carregamento. Os cálculos são realizados de acordo com a fundamentação teórica apresentada na seção 2 e com a norma IEEE 112 apresentada na seção 3. Um relatório exemplo é disponibilizado no apêndice C.

Finalizados os procedimentos de ensaio, os resultados da tabela de grandezas do instrumento virtual (botão Export > Export data to clipboard) devem ser inseridos na aba

clipboard da planilha “Resultados – IEEE 112 método B”. São necessários os dados dos ensaios de carga e a vazio, assim como as medições de resistência de cada etapa e a temperatura ambiente, conforme a Figura 55.

Figura 55 – Aba Clipboard da Planilha de ensaios.

| Ensaio     |         |          |          |               |            |             |            |              |            |
|------------|---------|----------|----------|---------------|------------|-------------|------------|--------------|------------|
| Referencia | Horário | Urms (V) | Irms (A) | P. Ativa (kW) | Freq. (Hz) | Torque (Nm) | Vel. (rpm) | P. eixo (kW) | $\eta$ (%) |
| 0          |         |          |          |               |            |             |            |              |            |
| 0          |         |          |          |               |            |             |            |              |            |
| 0          |         |          |          |               |            |             |            |              |            |
| 0          |         |          |          |               |            |             |            |              |            |
| 0          |         |          |          |               |            |             |            |              |            |
| 0          |         |          |          |               |            |             |            |              |            |
| 40         |         |          |          |               |            |             |            |              |            |
| 0          |         |          |          |               |            |             |            |              |            |
| -40        |         |          |          |               |            |             |            |              |            |
| -80        |         |          |          |               |            |             |            |              |            |
| -120       |         |          |          |               |            |             |            |              |            |
| -160       |         |          |          |               |            |             |            |              |            |
| -200       |         |          |          |               |            |             |            |              |            |
| -220       |         |          |          |               |            |             |            |              |            |
| -240       |         |          |          |               |            |             |            |              |            |
| -260       |         |          |          |               |            |             |            |              |            |
| -280       |         |          |          |               |            |             |            |              |            |
| -300       |         |          |          |               |            |             |            |              |            |
| -320       |         |          |          |               |            |             |            |              |            |
| -340       |         |          |          |               |            |             |            |              |            |
| -360       |         |          |          |               |            |             |            |              |            |

| Resistências |        |          |
|--------------|--------|----------|
| Horário      | Tensão | Corrente |
|              |        | 2 RS     |
|              |        | 2 RT     |
|              |        | 2 ST     |
|              |        | 2 RS     |
|              |        | 2 RT     |
|              |        | 2 ST     |
|              |        | 2 RS     |
|              |        | 2 RT     |
|              |        | 2 ST     |
|              |        | 2 RS     |
|              |        | 2 RT     |
|              |        | 2 ST     |
|              |        | 2 RS     |
|              |        | 2 RT     |
|              |        | 2 ST     |

|           |    |                           |
|-----------|----|---------------------------|
| Tamb (°C) | 25 | A frio                    |
| Tamb (°C) | 25 | Ensaio térmico            |
| Tamb (°C) | 25 | Ensaio com carga (final)  |
| Tamb (°C) | 25 | Ensaio em vazio (inicial) |
| Tamb (°C) | 25 | Ensaio em vazio (final)   |

Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Com isto, finaliza-se o procedimento de ensaio. A seção seguinte apresenta exemplos de sua aplicação.

## 6 RESULTADOS

Para aplicar os procedimentos de ensaio e testar a nova metodologia, foi realizada uma série de ensaios com diferentes tipos de motores a fim avaliar os resultados obtidos e a validade dos procedimentos. Foram realizados um total de cinco ensaios, todos de acordo com os procedimentos descritos na seção 5 e obedecendo as recomendações da norma IEEE 112. Foram utilizados cinco motores diferentes, conforme Tabela 2. Os ensaios foram supervisionados por alunos de pós-graduação e feitos em duplas para maior agilidade e segurança.

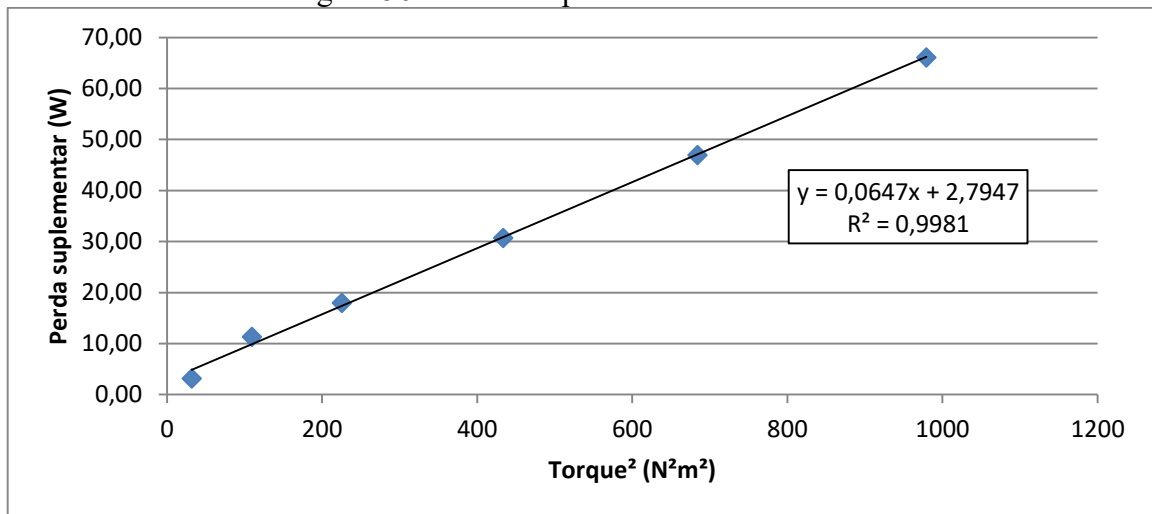
Tabela 2 – Motores utilizados para os ensaios.

| <b>Motor</b> | <b>Tipo</b> | <b>Potência</b> | <b>Polos</b> | <b>Fabricante</b> |
|--------------|-------------|-----------------|--------------|-------------------|
| <b>1</b>     | N           | 5 cv            | 4            | A                 |
| <b>2</b>     | N           | 7,5 cv          | 6            | A                 |
| <b>3</b>     | N           | 15 cv           | 4            | A                 |
| <b>4</b>     | H           | 5 cv            | 4            | B                 |
| <b>5</b>     | D           | 5 cv            | 4            | B                 |

A regressão linear das perdas suplementares foi usada como referência para avaliar a qualidade dos ensaios. Um coeficiente linear próximo a zero indica que as perdas em vazio foram medidas satisfatoriamente e que o desvio sistemático é pequeno. Já o coeficiente de determinação  $R^2$  maior que 0,9 indica que os requisitos da norma foram satisfeitos, e valores próximos da unidade demonstram uma boa medição das perdas joule e suplementares.

Primeiramente testaram-se os motores do tipo N, começando-se pelo de 5 cv e 4 polos da fabricante A. Os resultados dos ensaios mostram um gráfico de perdas suplementares (Figura 56) com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e coeficiente angular da tendência do gráfico ambos atendendo aos requisitos mínimos da norma ( $R^2 > 0,9$  e Coeficiente angular  $> 0$ ). As perdas suplementares corrigidas são depois calculadas desconsiderando-se o coeficiente linear da reta.

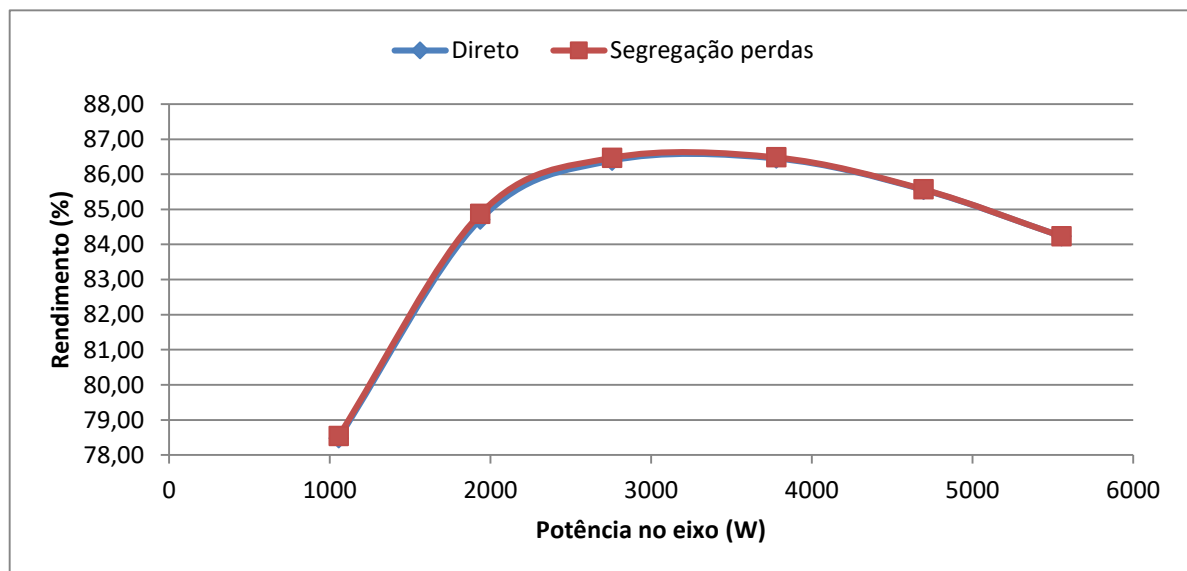
Figura 56 - Perdas suplementares do motor 1.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Para avaliação dos resultados, compara-se então o rendimento do motor obtido de forma direta e através da segregação de perdas (subtraindo-se todas as perdas calculadas da potência de entrada). Obteve-se então para este ensaio duas curvas bastante similares, conforme pode ser observado na Figura 57. A proximidade destas curvas mostra a precisão com que foi possível separar os diferentes tipos de perdas do motor.

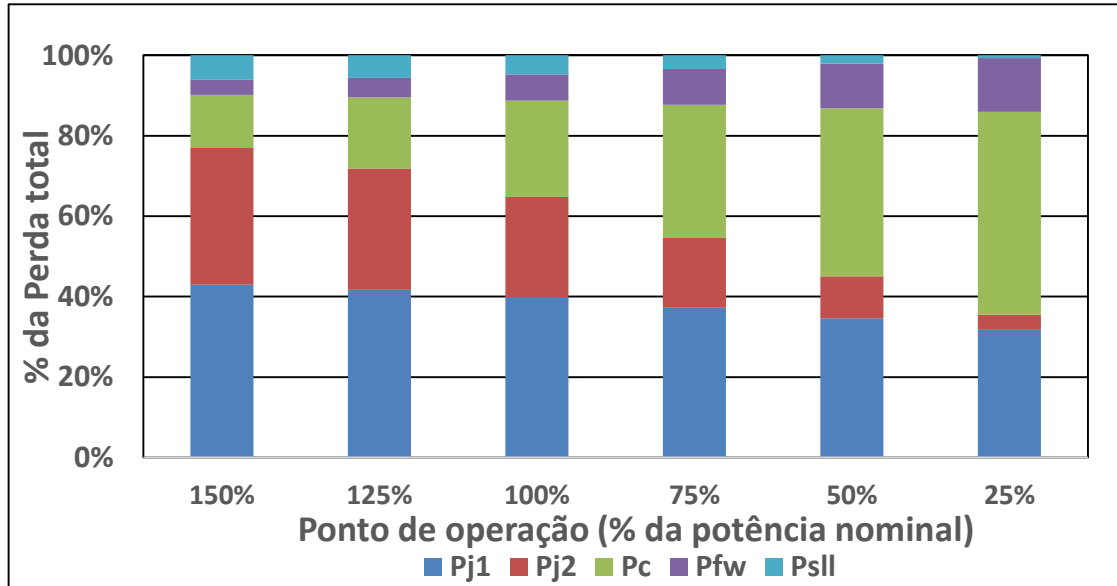
Figura 57 – Curvas de rendimento do motor 1.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Por fim, obteve-se então a distribuição das mesmas para cada carregamento (Figura 58).

Figura 58 – Distribuição das perdas por nível de carregamento do motor 1.



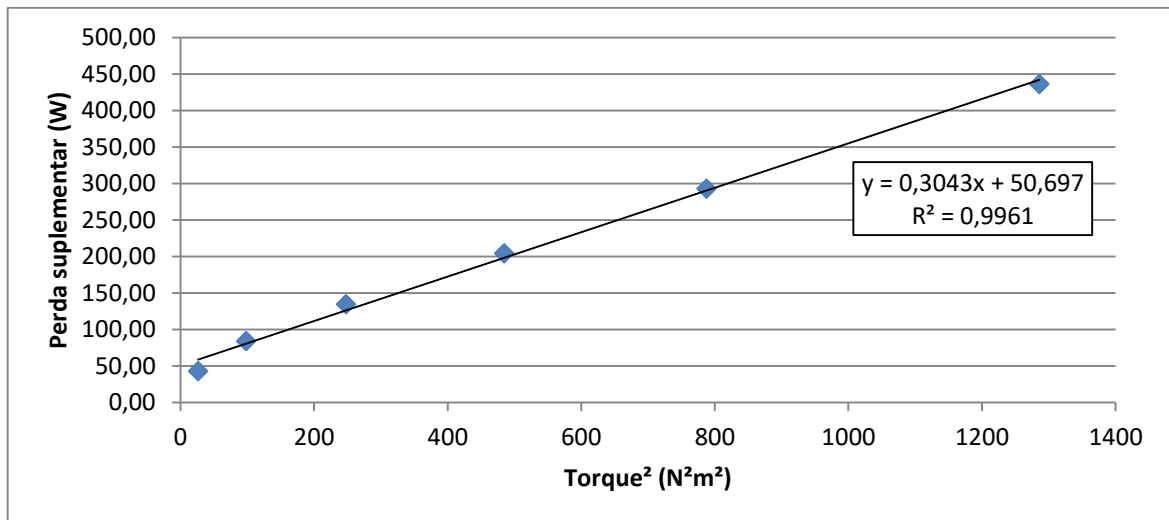
Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Os resultados obtidos para os outros motores da tabela se mostraram bastante semelhantes ao do motor já apresentado, exceto o motor do tipo D. Segundo a norma brasileira NBR17094-1, existem 3 categorias de motores conforme as suas curvas de torque por velocidade (N, H e D). A diferença construtiva dessas categorias se dá principalmente pelo formato e posição das barras de curto circuito do rotor, alterando a resistência de enrolamento e a reatância de dispersão que influenciam no torque e escorregamento do motor. Os motores do tipo D, diferentemente dos anteriores possuem um alto escorregamento em potência nominal e um alto conjugado de partida.

Os resultados dos ensaios mostram um gráfico de perdas suplementares (Figura 59) com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e coeficiente angular da tendência do gráfico ambos atendendo aos requisitos mínimos da norma ( $R^2 > 0,9$  e Coeficiente angular  $> 0$ ).



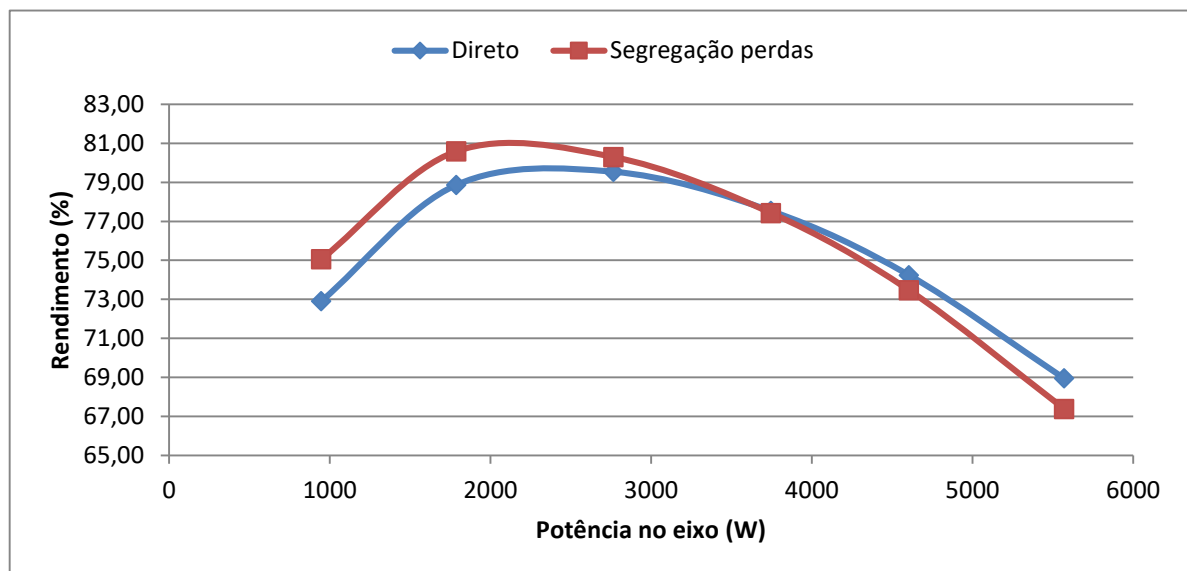
Figura 59 - Perdas suplementares do motor tipo D.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Diferentemente do primeiro motor, podemos observar na Figura 60 que desta vez houve uma diferença considerável entre os valores de rendimento calculados de forma direta e por segregação de perdas, chegando a uma diferença de até 2% no ponto de menor carregamento

Figura 60 - Curvas de rendimento do motor tipo D.



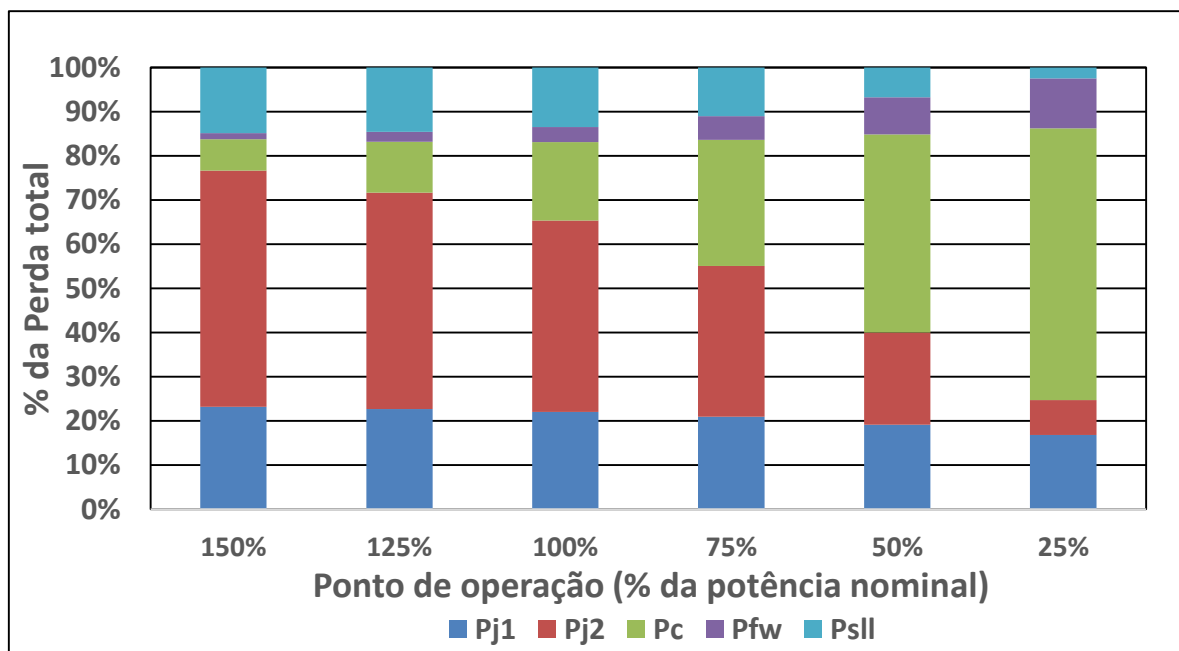
Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Diferentemente do primeiro motor, desta vez houve uma diferença considerável entre os valores de rendimento calculados de forma direta e por segregação de perdas, chegando a

uma diferença de até 2% no ponto de menor carregamento. Isto se reflete no coeficiente linear relativamente elevado (50,7 W) resultante da regressão linear das perdas suplementares, indicando que pode haver algum desvio nos valores medidos de perdas no ferro e por atrito e ventilação. Esse resultado ocorreu apenas no motor de tipo D e foi confirmado numa repetição do ensaio. A investigação deste fenômeno poderá ser feita em estudos futuros.

A distribuição das perdas desse motor em função do nível de carregamento é ilustrada na Figura 61.

Figura 61 - Distribuição das perdas por nível de carregamento do motor tipo D.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Nota-se que a perda no ferro representa uma porção pequena do total de perdas da máquina quando operando em potência nominal (cerca de 20%). No entanto, caso seja mal dimensionada e opere com muita sobra de potência (digamos 50% da potência nominal), estas perdas começam a representar uma porcentagem maior, que impacta no rendimento.

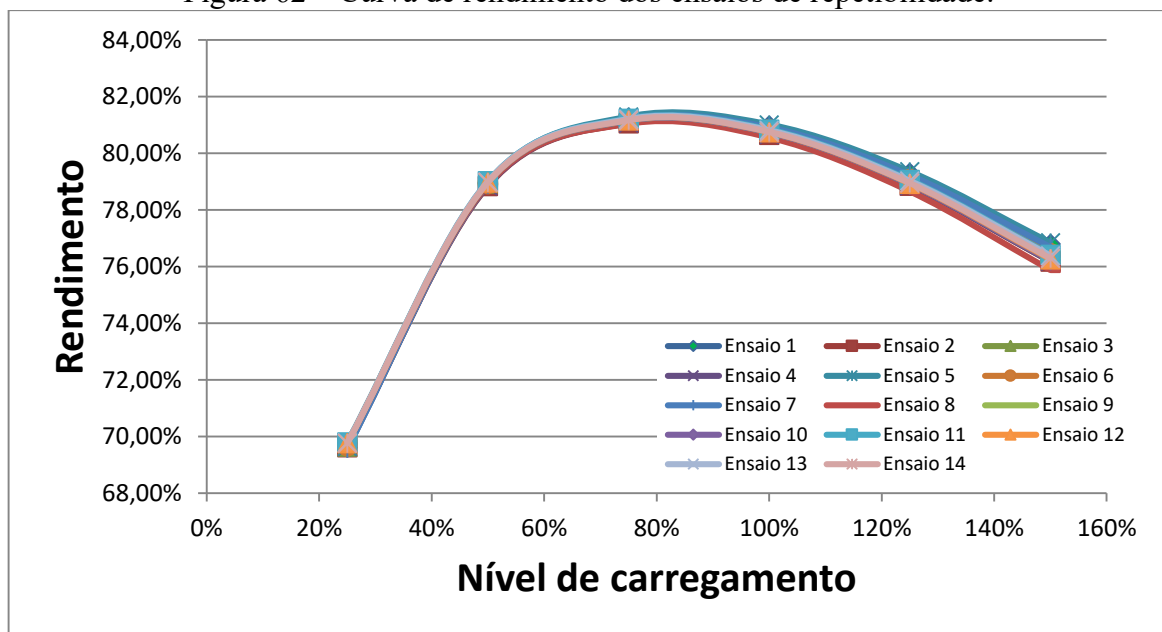
## 6.1 ENSAIO DE REPETIBILIDADE

Além dos ensaios cujos resultados foram apresentados anteriormente, uma segunda bateria de ensaios foi realizada com o objetivo de avaliar a repetibilidade do procedimento estabelecido neste trabalho.

O motor utilizado no teste foi um motor de 1,5 cv tipo N e 4 polos. Foram realizados 14 testes revezados entre 2 operadores. Foram aplicadas correções de potência e temperatura para os mesmos níveis através de interpolação.

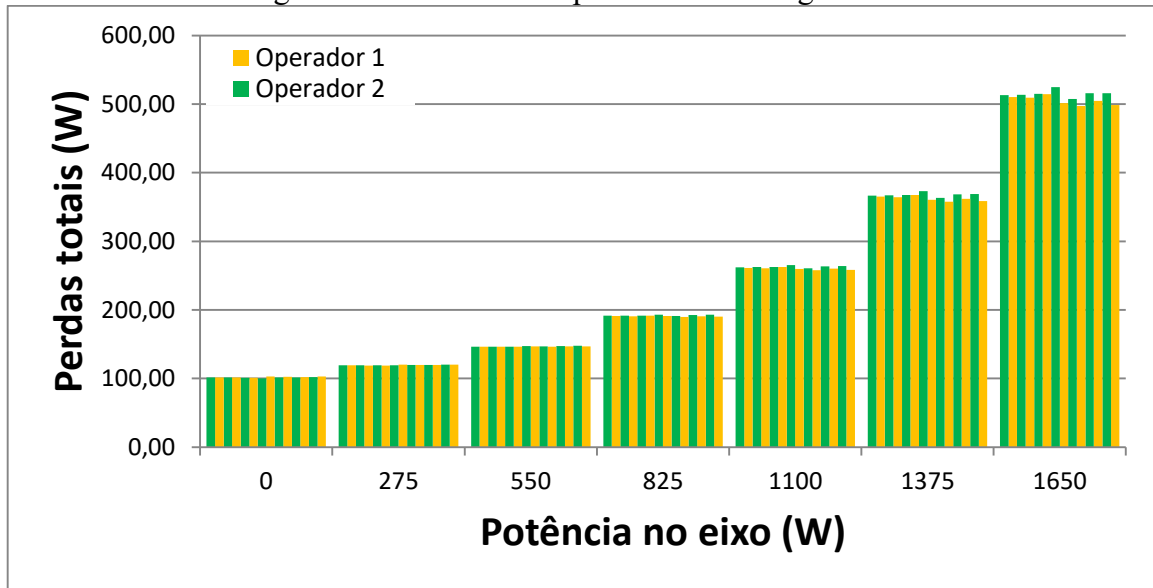
Pode-se perceber pela curva de rendimento dos ensaios (Figura 62) que os resultados foram bastante semelhantes, variando um pouco apenas em carregamentos muito altos. O gráfico de perdas totais por nível de carregamento (Figura 63) reafirma esta constatação e mostra um certo padrão de variabilidade que depende do operador do ensaio.

Figura 62 – Curva de rendimento dos ensaios de repetibilidade.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

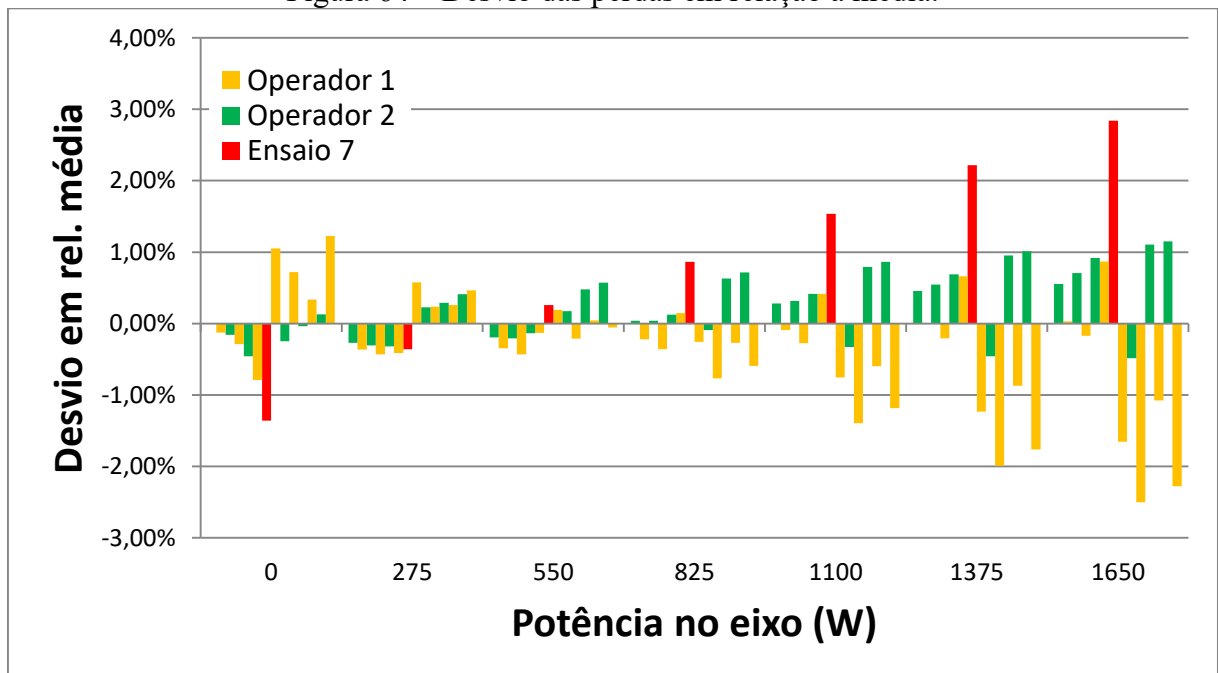
Figura 63 – Perdas totais por nível de carregamento.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

Para ser possível analisar melhor as variações de cada ensaio, calculou-se então o desvio percentual em relação à média (Figura 64). Nota-se então que por mais que haja uma variação nos resultados ocasionada pela mudança de operador do ensaio, a variação não excede muito os 2%, exceto no ensaio 7, onde a montagem do experimento sofreu influência externa de um outro participante.

Figura 64 – Desvio das perdas em relação à média.



Fonte: Elaborado pelo auto. (2020)



## 7 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi realizada a padronização e documentação dos procedimentos de ensaio na bancada da UFSC de acordo com o método B da norma IEEE 112. Apresentaram-se também os principais aspectos teóricos sobre o motor de indução e uma revisão das principais normas sobre ensaios em motores de indução trifásicos.

A principal contribuição deste trabalho foi a documentação de uma série de conhecimentos tácitos desenvolvidos desde que a bancada foi instalada. Isto permitirá que novos operadores realizem ensaios com segurança e obtenham uma maior qualidade de resultados.

Seria possível fazer uma padronização mais detalhada, porém notou-se que certas peculiaridades de cada ensaio necessitavam de atenção individual e especificações demasiadas tornavam-se uma inconveniência para a realização do ensaio.

Os resultados dos ensaios se mostraram coerentes e repetíveis, indicando que o procedimento é válido e que o objetivo do trabalho foi atingido. Além disso, os ensaios realizados também possibilitaram a publicação de um artigo na conferência MOMAG 2020 intitulado “Comparação e Métodos Para Determinação De Rendimento Em Motores De Indução Trifásicos”.

Como perspectivas futuras, com a realização de um grande número de ensaios, espera-se que seja possível a criação de um banco de dados. Além disso, a integração da medição de temperatura ao instrumento virtual possibilitará a aquisição síncrona da temperatura para cada ponto de ensaio, facilitando ainda mais o procedimento já existente. Também se sugere a investigação dos desvios observados, com o motor de tipo D, entre os valores de perdas determinadas diretamente e por segregação.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Normalização**. Disponível em: <<http://www.abnt.org.br/normalizacao/o-que-e/o-que-e>>. Acesso em: 17 jan. 2020.

AURICH, D. G. et al. Upgrade of test bench for three-phase induction motors Part 2 : Virtual instrument for power measurement. n. c, p. 949–952, 2018.

BRESCOVITT, A. H. **Desenvolvimento de software para integração de instrumentos e aquisição de dados em bancada de testes de motores de indução**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. **IEEE 112: Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators**, 2018.

SAUER, I. L. et al. A comparative assessment of Brazilian electric motors performance with minimum efficiency standards. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 308–318, 2015.

SCHWARZ, K. K. Survey of basic stray losses in squirrel-cage induction motors. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, v. 111, n. 9, p. 1565, 1964.

WEG. **Motor Elétrico Trifásico W22**. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h89/hfa/WEG-w22-motor-trifasico-50025536-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso em: 17 jan. 2020.

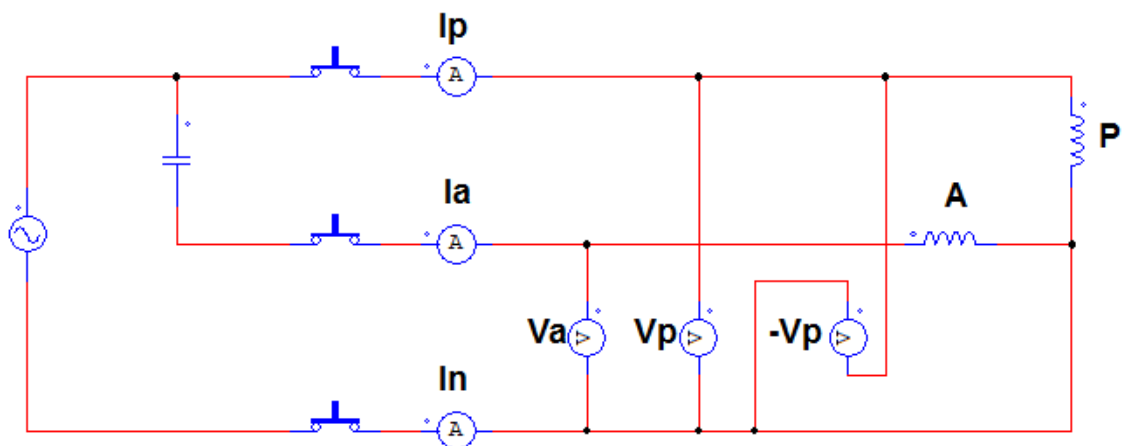
## APÊNDICE A – Adaptações necessárias para ensaios de motores monofásicos

A bancada MIT pode ser utilizada para ensaiar motores monofásicos também, porém, para isso, deve-se realizar algumas adaptações no ensaio e modo de conexão de alguns instrumentos.

A determinação do rendimento em motores de indução monofásica é feita segundo a norma IEEE 114 que é semelhante ao método A da norma IEEE 112, ou seja, através da relação entre a potência de saída e da potência de entrada com as devidas correções de temperatura e escorregamento.

Para realização do ensaio, deve-se montar os equipamentos conforme a Figura 65. Mede-se a corrente de entrada no enrolamento principal, no enrolamento auxiliar e no neutro. Os canais de tensão medem a diferença de potencial entre a entrada dos enrolamentos (principal e auxiliar) e o neutro, um último canal mede o inverso da tensão para calcular a potência total positiva, uma vez que a corrente do neutro medida é negativa.

Figura 65 – Diagrama para ensaio de motor monofásico.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2020)

A bancada possui contatores que isolam o circuito da alimentação para medir a resistência do enrolamento, portanto, no caso de motores de capacitor permanente, é possível medir a resistência de cada um sem precisar se preocupar com a influência do capacitor.

### 1. Temperatura de ensaio



Segundo a norma, todas as características do motor devem ser calculadas utilizando uma referência de 25 °C de temperatura ambiente. No entanto, os testes não devem ser executados em temperatura menor de 10°C ou maior que 40°C.

## **2. Procedimento de ensaio**

Primeiramente são medidas as resistências do motor em temperatura ambiente. O motor é então carregado com carga nominal e até atingir uma estabilidade térmica. Da mesma forma como no ensaio térmico do método B da IEEE 112, a temperatura especificada é definida como a variação de temperatura dos enrolamentos somada a uma temperatura ambiente de referência igual a 25°C.

## **3. Ensaio com carga**

O ensaio com carga deve ser feito impondo 6 pontos de carga entre 150% e 25% em ordem decrescente. Este ensaio deve ser feito com variação da temperatura entre 50% e 100% da temperatura com carga nominal.

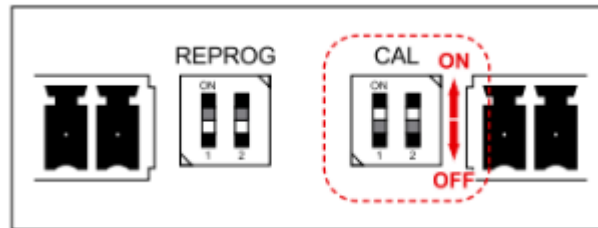
## **4. Ensaio em vazio**

Por último é realizado um ensaio em vazio do motor para determinação de perdas mecânicas. O procedimento de ensaio é o mesmo apresentado na seção 5.6.

## APÊNDICE B – CALIBRAÇÃO DO INDICADOR DE PESAGEM

A calibração do indicador de pesagem é recomendável no início dos ensaios com o dinamômetro 2. Para iniciar o processo, a chave de calibração deve estar acionada, conforme a Figura 66.

Figura 66 – Chave de calibração.



Fonte: Alfa Instrumentos (2019)

Há cinco parâmetros ajustáveis para calibração e cada um possui uma sigla diferente. O Quadro 3 apresenta a descrição de cada sigla seguida do valor padrão utilizado para a calibragem.

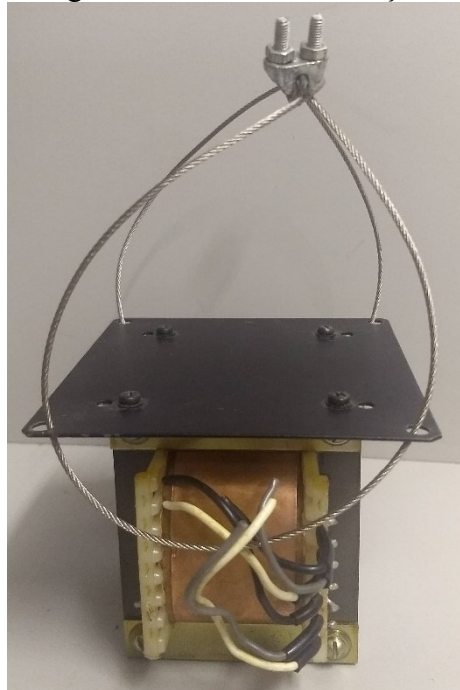
Quadro 3 - Parâmetros de ajuste para calibração do indicador de pesagem

| Sigla  | Descrição                                | Padrão      |
|--------|--|-------------|
| CAD    | Casas decimais                           | 3           |
| DEG    | Incremento do dígito menos significativo | 1           |
| CAPAC  | Capacidade máxima da célula de carga     | 5000 [g]    |
| PECAL  | Peso de calibração                       | 2150,19 [g] |
| UNIDAD | Unidade de peso                          | g           |

Fonte: Alfa Instrumentos (2019)

Como pode ser visto na Figura 18, a célula de carga é posicionada numa ponta de uma alavanca a 0,3 m do eixo que é utilizado como ponto de apoio. A outra extremidade desta alavanca, que possui uma ranhura para pendurar o peso de calibração, fica a aproximadamente 0,5 m. O manual recomenda a calibração com um peso entre 70% e 100% da capacidade máxima da célula de carga, portanto deve-se utilizar algo que tenha entre 2100g e 3000g. Historicamente, tem sido utilizado o transformador sucateado da Figura 67 que pesa 2150,19g. O mesmo já possui as alças e dimensões que cabem no espaço disponível abaixo da alavanca.

Figura 67 - Peso de calibração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

O próximo passo é programar o indicador para reconhecer a condição da balança sem peso (SPESO) e com peso (CPESO). Uma vez selecionada a opção de captura da condição da balança sem peso, no mostrador aparecerá a mensagem “- - - - -” piscando de modo intermitente. O tempo máximo para validação do peso é de 1 minuto. Se o valor for medido corretamente, no mostrador aparecerá a mensagem “SPESO”.

O processo para captura da condição com peso é similar, a única diferença é que se deve garantir que o peso está corretamente preso e estabilizado para a realização da medida. Se o peso referente à balança com peso de calibração for medido corretamente, no mostrador aparecerá a mensagem “CPESO”.

## APÊNDICE C – Relatório de ensaio



**UNIVERSIDADE FEDERAL  
DE SANTA CATARINA**



### Relatório de ensaio - Determinação de rendimento e segregação de perdas

|          |  |
|----------|--|
| Data     | 25/01/2019   |
| Operador | Leonardo Estevo Martins                                      |
| Contato  | <a href="mailto:leoestevo@gmail.com">leoestevo@gmail.com</a> |

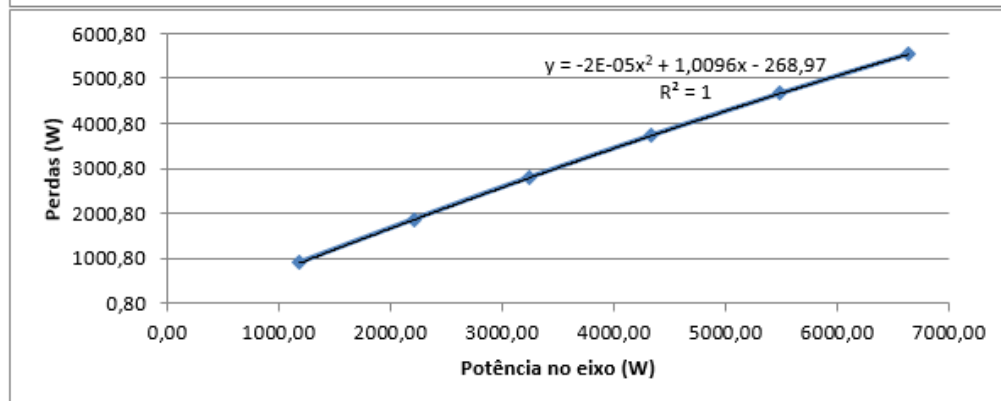
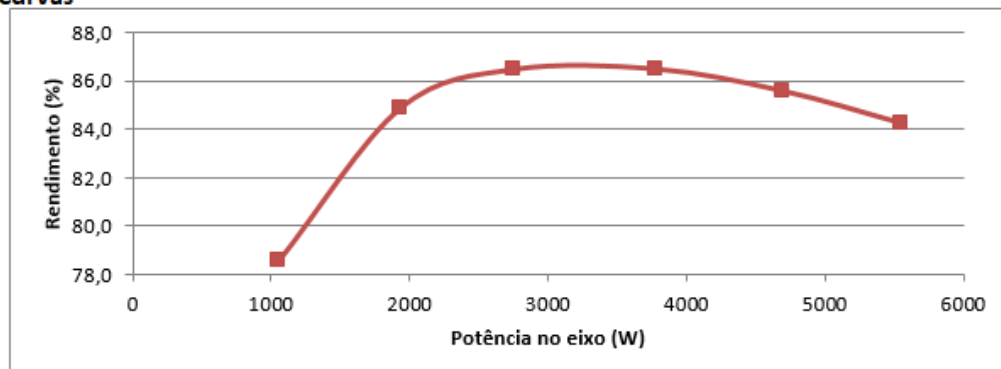
#### Dados da máquina

| Identificação | MIT N 5cv 3 |                 |      |
|---------------|-------------|-----------------|------|
| Potência (kW) | 11          | Tensão (V)      | 380  |
| Corrente (A)  | 21,8        | Frequência (Hz) | 60   |
| Rotação (rpm) | 1760        | Cos fi          | 0,83 |
| Polos         | 4           |                 |      |

#### Resumo

|                         |          |          |          |          |          |         |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|
| Carga (%)               | 149,6    | 126,1    | 100,8    | 75,4     | 50,3     | 24,4    |
| Potência de entrada (W) | 6629,00  | 5490,00  | 4339,00  | 3239,00  | 2207,20  | 1190,10 |
| Potência de saída (W)   | 5535,31  | 4664,83  | 3731,13  | 2788,94  | 1860,61  | 904,08  |
| Perdas (W)              | 1093,69  | 825,17   | 607,87   | 450,06   | 346,59   | 286,02  |
| Incerteza (W)           |          |          |          |          |          |         |
| Rendimento (%)          | 83,50144 | 84,96962 | 85,99047 | 86,10489 | 84,29738 | 75,9668 |
| Incerteza (%)           |          |          |          |          |          |         |

#### Curvas



### Configuração do experimento



Medição de grandezas de alimentação: Analisador Yokogawa WT500 com 3 TCs 50:5 A  
 Medição de grandezas mecânicas: Transdutor HBM T40B, MX460 e software em Labview  
 Medição de resistência do estator: Fonte DC Keysight E3632A, a 4 fios, com comutador a reles  
 Medição de temperatura: Data logger Yokogawa GP10 com termopar entre carcaça e pacote  
 Alimentação do motor: Partida com varivolt trifásico, regime permanente diretamente da rede

### Ensaio - Padrão

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| x | Medição de resistência a frio |
| x | Ensaio térmico                |
|   | Ensaio de rotor travado       |
| x | Ensaio com carga              |
| x | Ensaio a vazio                |

### Ensaio - Específicos

|  |  |
|--|--|
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |



**UNIVERSIDADE FEDERAL  
DE SANTA CATARINA**



**GRUCAD**  
Grupo de Concepção e Análise de  
Dispositivos Eletromagnéticos

### Medição de resistências a frio

| Resistência inicial |       |    |
|---------------------|-------|----|
| R (ohm)             | 1,864 | RS |
|                     | 1,804 | RT |
|                     | 1,847 | ST |

|           |    |
|-----------|----|
| Tamb (°C) | 25 |
|-----------|----|

|            |       |
|------------|-------|
| k(estator) | 234,5 |
| k(rotor)   | 225   |

|           |        |
|-----------|--------|
| R1 (Ω)    | 0,919  |
| R1 @25 °C | 0,9191 |

### Ensaio térmico

| Resistência inicial |       |    |
|---------------------|-------|----|
| R (ohm)             | 2,218 | RS |
|                     | 2,208 | RT |
|                     | 2,204 | ST |

|             |          |
|-------------|----------|
| Tamb (°C)   | 27       |
| Tfinal (°C) | 79,87379 |
| ΔT (°C)     | 52,87379 |
| Ts (°C)     | 77,87379 |

|             |       |
|-------------|-------|
| R1final (Ω) | 1,105 |
|-------------|-------|

## Ensaio de carga

| Ponto               | 150%     | 125%     | 100%     | 75%      | 50%      | 25%      | 0%       |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Ref. Potência (kW)  | 16,500   | 13,750   | 11,000   | 8,250    | 5,500    | 2,750    | 0,000    |
| Horário             | 14:42:49 | 14:43:12 | 14:43:32 | 14:43:53 | 14:44:15 | 14:44:40 | 14:44:48 |
| Tensão (V)          | 383,27   | 384,24   | 384,82   | 385,38   | 385,93   | 386,21   | 386,54   |
| Corrente (A)        | 11,61    | 9,978    | 8,434    | 6,962    | 6,012    | 5,259    | 4,939    |
| Potência ativa (kW) | 6,595    | 5,488    | 4,372    | 3,191    | 2,286    | 1,345    | 0,6047   |
| Frequência (Hz)     | 60,013   | 59,985   | 59,997   | 59,985   | 59,983   | 60,019   | 60,003   |
| T. enrolamento (°C) | 77,7     | 77,7     | 77,7     | 77,7     | 77,7     | 77,7     | 77,7     |
| Torque (Nm)         | 31,28217 | 26,14384 | 20,80258 | 15,00223 | 10,44741 | 5,638903 | 1,783239 |
| Velocidade (rpm)    | 1694,908 | 1714,03  | 1733,769 | 1753,038 | 1767,596 | 1783,219 | 1793,942 |

| Resistência final |       |    |
|-------------------|-------|----|
| R (ohm)           | 2,197 | RS |
|                   | 2,202 | RT |
|                   | 2,192 | ST |

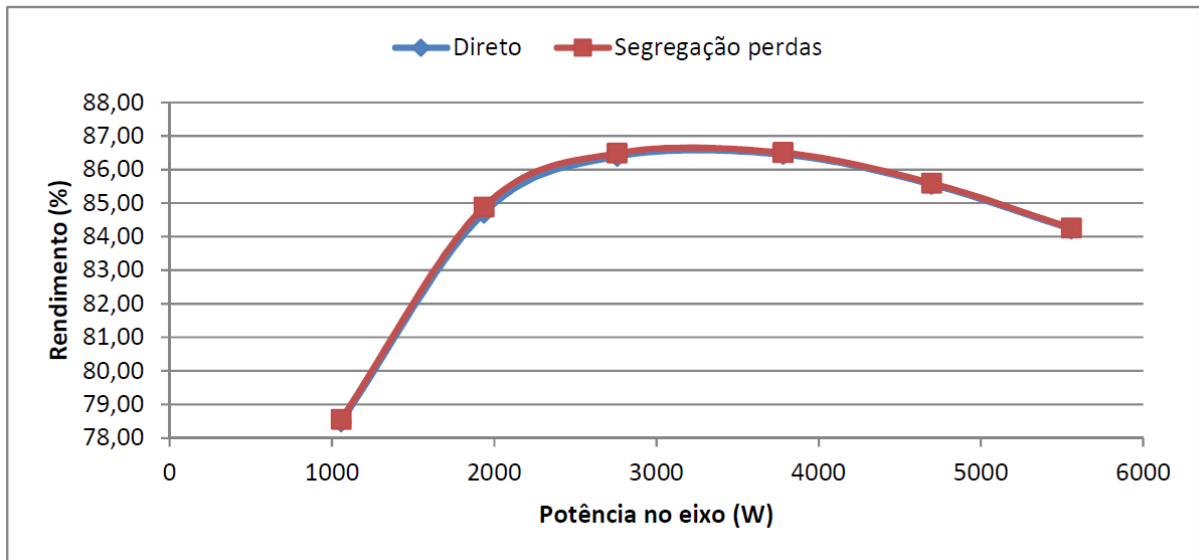
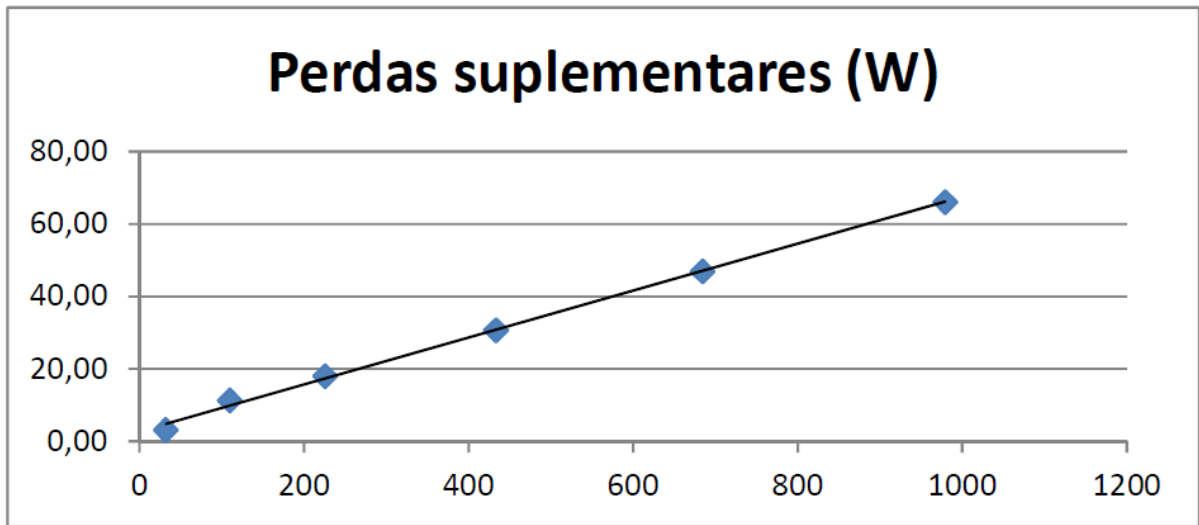
|                |          |
|----------------|----------|
| R1 (ohm)       | 1,098333 |
| T final °C     | 75,61062 |
| T amb final    | 27       |
| Elev. Temp     | 48,61062 |
| Varição (ohms) | -0,00658 |

## Cálculos

|   |          |          |          |          |          |          |          |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| T ambiente (°C)   | 27       | 27       | 27       | 27       | 27       | 27       | 27       |
| T enrolamento (°C)  | 77,74    | 77,74    | 77,74    | 77,74    | 77,74    | 77,74    | 77,74    |
| Frequência (Hz)   | 60,013   | 59,985   | 59,997   | 59,985   | 59,983   | 60,019   | 60,003   |
| Vel. Síncrona (rpm)                                       | 1800,39  | 1799,55  | 1799,91  | 1799,55  | 1799,49  | 1800,57  | 1800,09  |
| Velocidade (rpm)  | 1694,91  | 1714,03  | 1733,77  | 1753,04  | 1767,60  | 1783,22  | 1793,94  |
| Escorregamento (rpm)                                      | 105,48   | 85,52    | 66,14    | 46,51    | 31,89    | 17,35    | 6,15     |
| Escorregamento (pu)                                       | 0,05859  | 0,04752  | 0,03675  | 0,02585  | 0,01772  | 0,00964  | 0,00342  |
| Tensão de linha (V)                                       | 383,27   | 384,24   | 384,82   | 385,38   | 385,93   | 386,21   | 386,54   |
| Corrente (A)  | 11,61    | 9,98     | 8,43     | 6,96     | 6,01     | 5,26     | 4,94     |
| Potência ativa (W)  | 6595,00  | 5488,00  | 4372,00  | 3191,00  | 2286,00  | 1345,00  | 604,70   |
| FP  | 0,86     | 0,83     | 0,78     | 0,69     | 0,57     | 0,38     | 0,18     |
| Tensão no núcleo do estator (V)                           | 373,86   | 376,43   | 378,61   | 380,86   | 382,71   | 384,33   | 385,71   |
| Perdas no ferro (W)                                       | 137,95   | 139,85   | 141,48   | 143,16   | 144,55   | 145,78   | 146,83   |
| Perdas I <sup>2</sup> Rs (W)                              | 445,47   | 329,03   | 235,08   | 160,19   | 119,45   | 91,40    | 80,62    |
| Pot. Entreferro (W)                                       | 6011,58  | 5019,11  | 3995,44  | 2887,65  | 2022,00  | 1107,82  | 377,25   |
| Perdas I <sup>2</sup> Rr (W)                              | 352,21   | 238,52   | 146,82   | 74,64    | 35,84    | 10,68    | 1,29     |
| Perdas Atrito e Vent. (W)                                 | 38,44    | 38,44    | 38,44    | 38,44    | 38,44    | 38,44    | 38,44    |
| Perdas convencionais (W)                                  | 974,08   | 745,86   | 561,83   | 416,43   | 338,29   | 286,30   | 267,18   |
| Torque (Nm)   | 31,28217 | 26,14384 | 20,80258 | 15,00223 | 10,44741 | 5,638903 | 1,783239 |
| Correção dinâm. (Nm)                                      | 0,01335  | 0,01335  | 0,01335  | 0,01335  | 0,01335  | 0,01335  | 0,01335  |
| Torque corrigido (Nm)                                     | 31,29552 | 26,15719 | 20,81593 | 15,01558 | 10,46076 | 5,652253 | 1,796589 |
| Torque corr <sup>2</sup> (N <sup>2</sup> m <sup>2</sup> ) | 979,4097 | 684,1984 | 433,3031 | 225,4675 | 109,4274 | 31,94796 | 3,22773  |
| Pot. Eixo (W)   | 5554,825 | 4695,172 | 3779,455 | 2756,611 | 1936,369 | 1055,525 | 337,5196 |
| Perda total aparente (W)                                  | 1040,18  | 792,83   | 592,55   | 434,39   | 349,63   | 289,48   | 267,18   |
| Rendimento direto (%)                                     | 84,23    | 85,55    | 86,45    | 86,39    | 84,71    | 78,48    | 55,82    |
| Perdas suplementares (W)                                  | 66,10    | 46,97    | 30,72    | 17,96    | 11,34    | 3,17     | 0,00     |

|                                    |          |           |          |                |          |            |
|------------------------------------|----------|-----------|----------|----------------|----------|------------|
| Coef. Angular                      | 0,064739 | C. linear | 2,794723 | R <sup>2</sup> | 0,998086 | Ponto exc. |
| Perdas I <sup>2</sup> Rs em ts (W) | 445,66   | 329,17    | 235,18   | 160,25         | 119,50   | 91,44      |
| Pot. Entreferro corr. (W)          | 6011,39  | 5018,97   | 3995,34  | 2887,58        | 2021,95  | 1107,78    |
| Escorregamento corr. (pu)          | 0,058614 | 0,047544  | 0,036763 | 0,025858       | 0,017732 | 0,00964    |
| Velocidade corrigida (rpm)         | 1694,862 | 1713,993  | 1733,74  | 1753,018       | 1767,582 | 1783,212   |
| Perdas I <sup>2</sup> Rr em ts (W) | 352,352  | 238,6209  | 146,8804 | 74,66606       | 35,85259 | 10,67938   |
| P. sup. corrigidas (W)             | 63,4064  | 44,2946   | 28,05178 | 14,59663       | 7,084266 | 2,068292   |
| P. totais corrigidas (W)           | 1037,81  | 790,39    | 590,04   | 431,12         | 345,44   | 288,41     |
| Pot. Eixo corr. (W)                | 5557,19  | 4697,61   | 3781,96  | 2759,88        | 1940,56  | 1056,59    |
| Rendimento (%)                     | 84,3     | 85,6      | 86,5     | 86,5           | 84,9     | 78,6       |
| Fator de potência (%)              | 85,6     | 82,6      | 77,8     | 68,7           | 56,9     | 38,2       |





### Ensaio em vazio

| Resistência inicial |       |    |
|---------------------|-------|----|
| R (ohm)             | 2,192 | RS |
|                     | 2,183 | RT |
|                     | 2,186 | ST |

|            |       |
|------------|-------|
| R1 (ohm)   | 1,093 |
| T final °C | 74    |
| Elev. Temp | 49    |

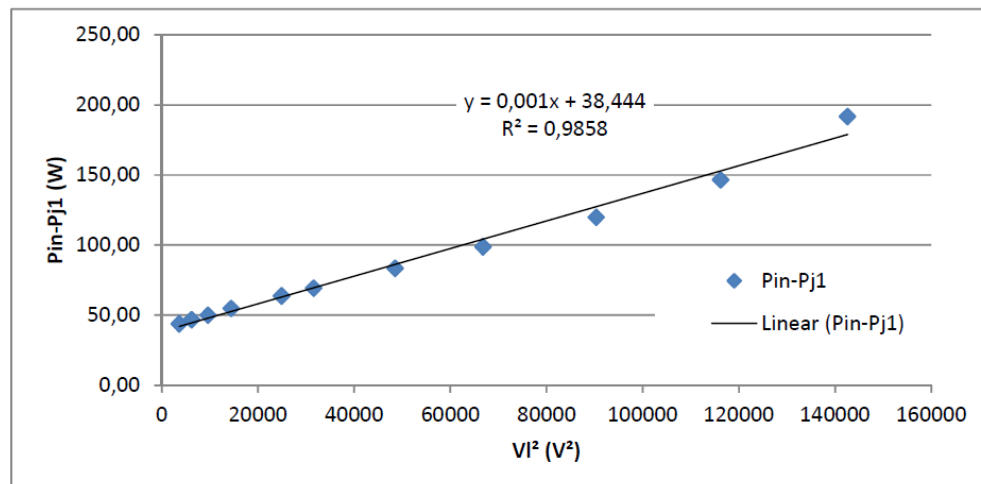
| Vref | VI (V) | II (A) | Pin (W) | V <sup>2</sup> | Pin-Pj1 | Pfe (W) | FP   | Vcore (V) |
|------|--------|--------|---------|----------------|---------|---------|------|-----------|
| 420  | 415,69 | 6,215  | 414     | 172798,2       | 288,75  | 250,31  | 0,09 | 415,1869  |
| 380  | 377,69 | 4,591  | 260,2   | 142649,7       | 191,85  | 153,41  | 0,09 | 377,3382  |
| 340  | 340,93 | 3,614  | 189     | 116233,3       | 146,65  | 108,20  | 0,09 | 340,644   |
| 300  | 300,6  | 2,953  | 148,2   | 90360,36       | 119,92  | 81,48   | 0,10 | 300,3434  |
| 260  | 258,51 | 2,4552 | 118,5   | 66827,42       | 98,95   | 60,51   | 0,11 | 258,2697  |
| 220  | 220,41 | 2,0536 | 97,2    | 48580,57       | 83,52   | 45,08   | 0,12 | 220,1774  |
| 180  | 177,77 | 1,6425 | 78,1    | 31602,17       | 69,35   | 30,91   | 0,15 | 177,5365  |
| 160  | 158,02 | 1,4607 | 70,8    | 24970,32       | 63,88   | 25,44   | 0,18 | 157,7809  |
| 120  | 120,36 | 1,1308 | 59,1    | 14486,53       | 54,95   | 16,51   | 0,25 | 120,096   |
| 100  | 98,27  | 0,9599 | 53,1    | 9656,993       | 50,11   | 11,67   | 0,33 | 97,97836  |
| 80   | 79,05  | 0,8338 | 49,2    | 6248,903       | 46,95   | 8,50    | 0,43 | 78,71296  |
| 60   | 60,48  | 0,7663 | 45,9    | 3657,83        | 44,00   | 5,55    | 0,57 | 60,06804  |
| 40   | 46,7   | 0,8003 | 44,2    | 2180,89        | 42,12   | 3,68    | 0,68 | 46,18588  |
| 20   | 30,54  | 1,2366 | 44,15   | 932,6916       | 39,19   | 0,75    | 0,67 | 29,7622   |

|           |          |           |          |                |          |
|-----------|----------|-----------|----------|----------------|----------|
| coef. Ang | 0,000987 | coef. Lin | 0,040039 | R <sup>2</sup> | 0,985784 |
|-----------|----------|-----------|----------|----------------|----------|

| Resistência final |       |    |
|-------------------|-------|----|
| R (ohm)           | 2,137 | RS |
|                   | 2,136 | RT |
|                   | 2,138 | ST |

|            |       |
|------------|-------|
| R1 (ohm)   | 1,068 |
| T final °C | 67    |
| Elev. Temp | 42    |

|   |        |
|---|--------|
| Perdas por atrito e ventilação (W)          | 38,44  |
| Perdas no ferro nas condições do ensaio (W) | 153,41 |
| Perdas no ferro na tensão nominal (W)       | 155,29 |



## ANEXO A – Formulário B e B2

IEEE Std 112-2017  
IEEE Standard for Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators

### 9.4 Form B—Method B

Type \_\_\_\_\_ Design \_\_\_\_\_ Frame \_\_\_\_\_ Rating \_\_\_\_\_ Phase \_\_\_\_\_  
 Frequency \_\_\_\_\_ Volts \_\_\_\_\_ Synchronous r/min \_\_\_\_\_ Serial no. \_\_\_\_\_  
 Temperature rise in °C \_\_\_\_\_ Time rating \_\_\_\_\_ Model no. \_\_\_\_\_

|   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Cold stator winding resistance between terminals _____ Ohms @ _____ °C  |   |   |   |   |   |   |
| Rated load temperature test stator winding resistance between terminals _____ Ohms @ _____ °C in _____ °C ambient |   |   |   |   |   |   |
| Rated load temperature test stator temperature rise _____ °C  |   |   |   |   |   |   |
| Total stator temperature, $t_s$ , _____ °C in a 25 °C ambient   |   |   |   |   |   |   |
|   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Description (motoring)(generating)  |   |   |   |   |   |   |
| Ambient temperature, in °C  |   |   |   |   |   |   |
| Stator winding temperature, $t_s$ , in °C   |   |   |   |   |   |   |
| Frequency, in Hz  |   |   |   |   |   |   |
| Synchronous speed, in r/min   |   |   |   |   |   |   |
| Speed, in r/min   |   |   |   |   |   |   |
| Slip speed, in r/min  |   |   |   |   |   |   |
| Slip in p.u.  |   |   |   |   |   |   |
| Line-to-line voltage, in V  |   |   |   |   |   |   |
| Line current, in A  |   |   |   |   |   |   |
| Stator power, in W  |   |   |   |   |   |   |
| Stator core voltage, $V_{core}$   |   |   |   |   |   |   |
| Core loss, in W   |   |   |   |   |   |   |
| Stator $I^2R$ loss, in W, at $t_s$  |   |   |   |   |   |   |
| Power across air gap, in W  |   |   |   |   |   |   |
| Rotor $I^2R$ loss, in W   |   |   |   |   |   |   |
| Friction and windage loss, in W   |   |   |   |   |   |   |
| Total conventional loss, in W   |   |   |   |   |   |   |
| Torque, in N·m  |   |   |   |   |   |   |
| Dynamometer correction, in Nm   |   |   |   |   |   |   |
| Corrected torque, in Nm   |   |   |   |   |   |   |
| Shaft power, in W   |   |   |   |   |   |   |
| Apparent total loss, in W   |   |   |   |   |   |   |
| Stray-load loss, in W   |   |   |   |   |   |   |
| Intercept _____ Slope _____ Correlation factor _____ Point deleted _____  |   |   |   |   |   |   |
| Stator $I^2R$ loss, in W, at $t_s$  |   |   |   |   |   |   |
| Corrected power across air gap, in W  |   |   |   |   |   |   |
| Corrected slip, in p.u.   |   |   |   |   |   |   |
| Corrected speed, in r/min   |   |   |   |   |   |   |
| Rotor $I^2R$ loss, in W, at $t_s$   |   |   |   |   |   |   |
| Corrected stray-load loss, in W   |   |   |   |   |   |   |
| Corrected total loss, in W  |   |   |   |   |   |   |
| Corrected shaft power, in W   |   |   |   |   |   |   |
| Efficiency, in %  |   |   |   |   |   |   |
| Power factor, in %  |   |   |   |   |   |   |

The summary of characteristics shall be presented as with Form A in 9.2. For additional guidance, see 9.1.2.

IEEE Std 112-2017  
IEEE Standard for Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators

### 9.5 Form B2—Method B calculations

| Cold stator winding resistance between terminals ___(1) <sup>a</sup> ___ Ohms @ ___(2)___ °C from 6.4.2.2   |   |   |
|---|---|---|
| Hot stator winding resistance between terminals ___(3)___ Ohms @ ___(4) <sup>b</sup> ___ °C in ___(5)___ °C ambient from 6.4.2.3  |   |   |
| Rated load temp. test stator temperature rise ___(6)___ °C, (6) = (4) – (5)   |   | (4) = {[ (3) / (1) ] × [k <sub>1</sub> + (2)]} – k <sub>1</sub>                                   |
| Total stator temperature, t <sub>s</sub> , ___(7)___ °C in a 25 °C ambient, (7) = (6) + (25)  |   | If (6) and (7) are from duplicate, (3), (4), and (5) are N/A                                      |
| Item  | Description (Motoring)(Generating)                    | Source or calculation   |
| 8   | Ambient temperature, in °C                            | From each test point, from 6.4.2.4  |
| 9   | Stator winding temperature, t <sub>s</sub> , in °C    | From each point, adjusted per 6.4.3.4   |
| 10  | Frequency, in Hz                                      | From each test point, from 6.4.2.4  |
| 10a   | Number of poles                                       | From motor nameplate or data sheet  |
| 11  | Synchronous speed, in r/min                           | = 120 × (10)/(10a)  |
| 12  | Speed, in r/min                                       | = (11) – (13) <sup>c</sup>  |
| 13  | Slip speed, in r/min                                  | = (11) – (12) <sup>c</sup>  |
| 14  | Slip in p.u.  | = (13)/(11)   |
| 15  | Line-to-line voltage, in V                            | From each test point, from 6.4.2.4  |
| 16  | Line current, in A                                    | From each test point, from 6.4.2.4  |
| 17  | Stator power, in W                                    | From each test point, from 6.4.2.4  |
| 18  | Stator core voltage, V <sub>core</sub>                | From 6.4.3.3  |
| 19  | Core loss, in W                                       | From 6.4.3.3  |
| 20  | Stator I <sup>2</sup> R loss, in W                    | = 1.5 × (16) <sup>2</sup> × R, adjust R see 6.4.3.4 <sup>b</sup>                                  |
| 21  | Power across air gap, in W                            | = (17) – (19) – (20) for motor<br>= (17) + (19) + (20) for generator                              |
| 22  | Rotor I <sup>2</sup> R loss, in W                     | = (21) × (14)   |
| 23  | Friction and windage loss, in W                       | From 5.6.5  |
| 24  | Total conventional loss, in W                         | = (19) + (20) + (22) + (23)   |
| 25  | Torque, in N·m  | From each test point, from 6.4.2.4  |
| 26  | Dynamometer correction, in N·m                        | From test per 5.7.2.3, if needed  |
| 27  | Corrected torque, in N·m                              | = (25) + (26) for motor<br>= (25) – (26) for generator  |
| 28  | Shaft power, in W                                     | = (27) × (12)/9.549   |
| 29  | Apparent Total Loss, in W                             | = (17) – (28) for a motor<br>= (28) – (17) for a generator  |
| 30  | Stray-load loss, in W                                 | = (29) – (24)   |
| Intercept ___(31)___ Slope ___(32)___ Correlation factor ___(33)___ Point deleted ___(34)___<br>(31), (32), (33), and (34) from the linear regression analysis of (30) and (27) entries as described in 6.4.3.8 |   |   |
| 35  | Stator I <sup>2</sup> R loss, in W, at t <sub>s</sub> | = 1.5 × (16) <sup>2</sup> × (3) × {[k <sub>1</sub> + (7)]/[k <sub>1</sub> + (4)]} <sup>c, d</sup> |
| 36  | Corrected power across air gap, in W                  | = (17) – (19) – (35) for motor<br>= (17) + (19) + (35) for generator                              |
| 37  | Corrected slip, in p.u.                               | = (14) × [k <sub>1</sub> + (7)]/[k <sub>1</sub> + (9)] <sup>b</sup>                               |
| 38  | Corrected speed, in r/min                             | = (11) × [1.00 – (37)]  |
| 39  | Rotor I <sup>2</sup> R loss, in W, at t <sub>s</sub>  | = (37) × (36)   |
| 40  | Corrected stray-load loss, in W                       | = (32) × (27) <sup>2</sup>  |
| 41  | Corrected total loss, in W                            | = (19) + (23) + (35) + (39) + (40)  |
| 42  | Corrected shaft power, in W                           | = (17) – (41) for motor<br>= (17) + (41) for generator  |
| 43  | Efficiency, in %                                      | = 100 × (42)/(17) for a motor<br>= 100 × (17)/(42) for a generator                                |
| 44  | Power factor, in %                                    | = 100 × (17)/[1.732 × (15) × (16)]  |

<sup>a</sup> Numbers in parentheses refer to item numbers.

<sup>b</sup> In (4), (20), (35), and (37), select k<sub>1</sub> based on conductor material.

<sup>c</sup> Enter the measured speed or measured slip speed for each test point on the proper line and use the formula provided to calculate the other parameter.

<sup>d</sup> For t<sub>s</sub> from a duplicate machine use (35) = 1.5 × (16)<sup>2</sup> × (1) × {[k<sub>1</sub> + (7)]/[k<sub>1</sub> + (2)]}