

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Guilherme Hosoda Souza Reis

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE MONTE CARLO PARA ESTIMAÇÃO DE  
INCERTEZAS DE MEDIÇÃO EM ENSAIOS DE RENDIMENTO DE  
MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

FLORIANÓPOLIS

2022

Guilherme Hosoda Souza Reis

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE MONTE CARLO PARA ESTIMAÇÃO DE  
INCERTEZAS DE MEDIÇÃO EM ENSAIOS DE RENDIMENTO DE  
MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Universidade Federal de Santa Catarina, como  
requisito necessário para obtenção do grau de  
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Carlos Alexandre Corrêa  
Wengerkievich, Dr.

Coorientador: Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Florianópolis, abril de 2022

Guilherme Hosoda Souza Reis

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE MONTE CARLO PARA ESTIMAÇÃO DE  
INCERTEZAS DE MEDIÇÃO EM ENSAIOS DE RENDIMENTO DE MOTORES DE  
INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Esta Monografia foi julgada adequada para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, sendo aprovada em sua forma final pela banca examinadora:

---

Prof. Miguel Moreto, Dr.  
Coordenador do Curso de Graduação em  
Engenharia Elétrica

---

Carlos Alexandre Corrêa Wengerkievicz, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.  
Coorientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Walter Pereira Carpes Júnior, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Eng. Eletric. Alexandre Brescovitt  
Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 20 de abril de 2022



## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha família por todo o apoio, confiança e investimento em minha educação, em especial ao meu pai por me apresentar ao curso de Engenharia Elétrica.

À minha noiva, Julia Delmondes, por todo o suporte e companheirismo durante o decorrer do curso de graduação.

Aos amigos, Arthur de Deus, Julia Capistrano, Lucas Fiamonici, Matheus Hohmann e Marcello Ferreira, por toda a discussão sobre as áreas de atuação disponíveis para engenheiros eletricitistas que me motivaram seguir a linha de pesquisa de máquinas elétricas.

Agradeço também as pessoas incríveis que conheci por meio das oportunidades que me foram dadas ao decorrer da graduação. Estágio, centro acadêmico, monitorias, e os laboratórios FotovoltaicaUFSC e Laesp, todas essas experiências me auxiliaram na minha construção profissional.

Finalmente, agradeço aos orientadores Carlos e Jhoe pelas correções, auxílio e compreensão durante a execução deste trabalho.



## RESUMO

Este trabalho tem como foco a estimativa de incertezas de medição associadas ao rendimento de motores de indução trifásicos determinado por segregação de perdas segundo a norma IEEE 112. Uma vez que o rendimento é determinado indiretamente por cálculos não lineares, as incertezas combinadas estimadas pelo uso de modelos analíticos não possuem alta confiabilidade, além de terem equacionamentos complexos. Por conta disto, é necessário utilizar modelos numéricos, com o auxílio de ferramentas digitais. Para sanar esta demanda, é proposto um software, denominado FEIMC (Ferramenta de Estudo de Incertezas de Medição pelo método de Monte Carlo), que realiza simulações massivas do modelo de determinação de rendimento com valores aleatórios de medições gerados segundo as incertezas dos instrumentos de medição. Para torná-lo funcional, foi necessário entender este cenário por meio da análise da bibliografia existente e dos estudos recentes realizados no GRUCAD (Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos). O programa foi desenvolvido na linguagem de programação Python e aplicado no contexto de uma bancada de ensaios disponível no GRUCAD. O trabalho possibilitou a estimação das incertezas associadas ao rendimento de motores testados previamente no grupo de pesquisa e a disponibilização de uma ferramenta que pode ser adaptada a outros procedimentos experimentais.

**Palavras-chave:** Motor de indução trifásico; Incerteza de medição; Método de Monte Carlo; Rendimento; Ensaios.





## ABSTRACT

This work focuses on the estimation of measurement uncertainties associated with the efficiency of three-phase induction motors determined by loss segregation according to the IEEE Standard 112. Since the efficiency is indirectly determined by non-linear equations, the combined uncertainties estimated by the use of analytical models do not have high reliability, beside having complex equations. Because of this, it is necessary to use numerical models, with the help of digital tools. To meet this demand, a software called FEIMC (Tool for the Study of Measurement Uncertainties by the Monte Carlo method) is proposed, which performs massive simulations of the efficiency determination model with random measurement values generated according to the uncertainties of the measurement instruments. To make it functional, it was necessary to understand this scenario through the analysis of the existing bibliography and recent studies carried out at GRUCAD (Group for the Conception and Analysis of Electromagnetic Devices). The program was developed in the Python programming language and applied in the context of a test bench available in GRUCAD. The work made possible to estimate the uncertainties associated with the performance of motors previously tested in the research group and to provide a tool that can be adapted to other experimental procedures.

**Keywords:** Three phase induction motor; Measurement uncertainty; Monte Carlo method; Efficiency; Tests.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Distribuição uniforme entre -5 e 10. . . . .   | 26 |
| Figura 2 – Distribuições Gaussianas para diferentes parâmetros. . . . .                                 | 27 |
| Figura 3 – Distribuição valores de indutância, $N = 1000$ . . . . .                                     | 31 |
| Figura 4 – Distribuições da tensão medida e da indutância calculada, $N = 1000$ . . . . .               | 32 |
| Figura 5 – Distribuições da tensão medida para as populações de $N = 100 / 1.000$<br>/ 100.000. . . . . | 33 |
| Figura 6 – Vista interna de um motor. . . . .   | 35 |
| Figura 7 – Fluxo de potência durante o funcionamento do motor de indução trifásico. . . . .             | 37 |
| Figura 8 – Bancada de ensaios do LabMaq - Mesa de dinamômetro. . . . .                                  | 43 |
| Figura 9 – Bancada de ensaios do LabMaq - Mesa de instrumentação e comando. . . . .                     | 43 |
| Figura 10 – Analisador de energia Yokogawa WT500. . . . .   | 44 |
| Figura 11 – Equipamento HBM T40B. . . . .   | 46 |
| Figura 12 – Equipamento Agilent 34410A. . . . .   | 48 |
| Figura 13 – Equipamento Data Logger Yokogawa GP10. . . . .  | 50 |
| Figura 14 – Fluxograma funcionamento do <i>software</i> . . . . .                                       | 51 |
| Figura 15 – Exemplo de tabela com as medições dos ensaios. . . . .                                      | 53 |
| Figura 16 – Ferramenta de gerenciamento de <i>layout</i> da interface. . . . .                          | 57 |
| Figura 17 – Interface do programa - Aba Configurações . . . . .   | 58 |
| Figura 18 – Interface do programa - Cadastro nova máquina . . . . .                                     | 59 |
| Figura 19 – Interface do programa - Aba Resultados . . . . .  | 60 |
| Figura 20 – Fluxograma de validação dos métodos de cálculo . . . . .                                    | 61 |
| Figura 21 – Validação do Módulo MMC pela soma de distribuições normais. . . . .                         | 62 |
| Figura 22 – Validação do Módulo MMC pela soma de distribuições uniformes. . . . .                       | 63 |
| Figura 23 – Gráfico de violino da potência no eixo pelo rendimento para o motor “A”. . . . .            | 70 |
| Figura 24 – Gráfico de violino da potência no eixo pelo rendimento para o motor “B”. . . . .            | 71 |
| Figura 25 – Gráfico de violino da potência no eixo pelo rendimento para o motor “B”. . . . .            | 71 |



## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Resumo dos parâmetros da medida indireta. . . . .  | 31 |
| Tabela 2 – Métodos da IEEE Standard 112. . . . .  | 38 |
| Tabela 3 – Escalas do analisador de energia Yokogawa WT500. . . . .   | 44 |
| Tabela 4 – Incertezas associadas a medição de tensão do Yokogawa WT500. . . . .                               | 45 |
| Tabela 5 – Incertezas associadas à medição da corrente do Yokogawa WT500. . . . .                             | 45 |
| Tabela 6 – Incertezas associadas à medição da potência do Yokogawa WT500. . . . .                             | 45 |
| Tabela 7 – Incertezas associadas à medição da frequência do Yokogawa WT500. . . . .                           | 46 |
| Tabela 8 – Escalas do transdutor de torque e velocidade HBM T40B. . . . .                                     | 46 |
| Tabela 9 – Incertezas associadas à medição do torque no HBM T40B. . . . .                                     | 47 |
| Tabela 10 – Incertezas associadas à medição de velocidade no HBM T40B. . . . .                                | 47 |
| Tabela 11 – Escalas multímetro Agilent 34410A. . . . .  | 48 |
| Tabela 12 – Incertezas associadas à medição da resistência com o multímetro Agilent<br>34410A. . . . .        | 49 |
| Tabela 13 – Incertezas associadas à medição de temperatura com o Data Logger<br>GP10 Yokogawa. . . . .        | 50 |
| Tabela 14 – Resultado utilizado na validação do módulo de cálculo. . . . .                                    | 62 |
| Tabela 15 – Comparativo tempo de execução dos multi-processos. . . . .  | 64 |
| Tabela 16 – Dados dos motores ensaiados. . . . .  | 65 |
| Tabela 17 – Dados de entrada do ensaio a vazio para o motor “A”. . . . .                                      | 66 |
| Tabela 18 – Parâmetros das perdas de atrito e ventilação para o motor “A”. . . . .                            | 66 |
| Tabela 19 – Dados de entrada do ensaio com carga para o motor “A”. . . . .                                    | 67 |
| Tabela 20 – Parâmetros obtidos das perdas do estator pela utilização do FEIMC<br>para o motor “A”. . . . .    | 67 |
| Tabela 21 – Parâmetros obtidos das perdas no núcleo pela utilização do FEIMC<br>para o motor “A”. . . . .     | 68 |
| Tabela 22 – Parâmetros obtidos das perdas do rotor pela utilização do FEIMC para<br>o motor “A”. . . . .      | 68 |
| Tabela 23 – Parâmetros obtidos das perdas suplementares pela utilização do FEIMC<br>para o motor “A”. . . . . | 69 |
| Tabela 24 – Rendimento obtido pela utilização do FEIMC para o motor “A”. . . . .                              | 69 |
| Tabela 25 – Rendimento obtido pela utilização do FEIMC para o motor “B”. . . . .                              | 72 |
| Tabela 26 – Rendimento obtido pela utilização do FEIMC para o motor “C”. . . . .                              | 72 |



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|         |  |
|---------|--|
| CIPM    | Comitê Internacional de Pesos e Medida                                   |
| FEIMC   | Ferramenta de estudo de incertezas de medição pelo método de Monte Carlo |
| GRUCAD  | Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos            |
| GUM     | Guia para a Expressão de Incerteza de Medição                            |
| IEC     | Comissão Eletrotécnica Internacional                                     |
| IEEE    | Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos                      |
| INMETRO | Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia                 |
| JCGM/WG | Comitê Conjunto para Guias em Metrologia                                 |
| LABMAQ  | Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos                         |
| LAESP   | Laboratório de Acionamentos Elétricos Especiais                          |
| MIT     | Motor de indução trifásico   |
| MMC     | Método de Monte Carlo  |
| NBR     | Norma Brasileira   |
| POO     | Programação Orientada a Objetos  |
| UFSC    | Universidade Federal de Santa Catarina                                   |





## LISTA DE SÍMBOLOS

|           |  |
|-----------|--|
| $a$       | Limite inferior da distribuição uniforme                     |
| $b$       | Limite superior da distribuição uniforme                     |
| $\mu$     | Média ou esperança matemática                                |
| $\sigma$  | Desvio padrão  |
| $w$       | Largura da distribuição uniforme                             |
| $u$       | Incerteza padrão combinada                                   |
| $N$       | Número de indivíduos das populações do método de Monte Carlo |
| $V$       | Tensão, em volts   |
| $V_l$     | Tensão de linha, em volts                                    |
| $I$       | Corrente, em amperes   |
| $I_l$     | Corrente de linha, em amperes                                |
| $f$       | Frequência de alimentação, em hertz                          |
| $L$       | Indutância, em henry   |
| $q$       | Confiança desejada   |
| $p$       | Número de polos do motor de indução trifásico                |
| $N_s$     | Velocidade síncrona do motor, em rotações por minuto         |
| $N$       | Velocidade assíncrona do motor, em rotações por minuto       |
| $s$       | Escorregamento do motor, em p.u.                             |
| $s'$      | Escorregamento corrigido do motor, em p.u.                   |
| $P_{in}$  | Potência de alimentação do motor, em watts                   |
| $T$       | Torque de saída do rotor, em Newton metro                    |
| $P_{out}$ | Potência no eixo do rotor, em watts                          |
| $\eta$    | Rendimento do motor, em p.u.                                 |
| $P_{j1}$  | Perdas no cobre do estator, em watts                         |

|            |  |
|------------|--|
| $P'_{j1}$  | Perdas corrigidas no cobre do estator, em watts        |
| $P_c$      | Perdas no núcleo do motor, em watts                    |
| $P_{j2}$   | Perdas no cobre do rotor, em watts                     |
| $P'_{j2}$  | Perdas corrigidas no cobre do rotor, em watts          |
| $P_{fw}$   | Perdas por atrito e ventilação, em watts               |
| $P_{sll}$  | Perdas suplementares, em watts                         |
| $P'_{sll}$ | Perdas suplementares corrigidas, em watts              |
| $P'_{tot}$ | Perdas totais corrigidas, em watts                     |
| $R$        | Resistência elétrica, em ohms                          |
| $R_{RS}$   | Resistência elétrica entre os terminais R e S, em ohms |
| $R_{RT}$   | Resistência elétrica entre os terminais R e T, em ohms |
| $R_{ST}$   | Resistência elétrica entre os terminais S e T, em ohms |
| $k_1$      | Constante do material                                  |
| $l$        | Valor medido   |
| $e$        | Escala utilizada                                       |
| $t$        | Temperatura, em graus Celsius                          |
| $U_V$      | Incerteza usual da tensão                              |
| $U_{dtV}$  | Incerteza da variação térmica na tensão                |
| $U_{rV}$   | Resolução do analisador da tensão                      |
| $U_I$      | Incerteza usual da corrente                            |
| $U_{dtI}$  | Incerteza da variação térmica da corrente              |
| $U_{rI}$   | Resolução do analisador na corrente                    |
| $UTC$      | Incerteza usual do TC                                  |
| $U_P$      | Incerteza usual da potência                            |
| $U_{dtP}$  | Incerteza da variação térmica na potência              |
| $U_{rP}$   | Resolução do analisador de potência                    |

|               |  |
|---------------|--|
| $U_{fp}$      | Influência do fator de potência                  |
| $U_{\phi TC}$ | Incerteza de phi do TC                           |
| $U_{lf}$      | Incerteza de leitura da frequência               |
| $U_{hT}$      | Incerteza da não linearidade e histerese         |
| $U_{rpT}$     | Repetibilidade                                   |
| $U_{dtT}$     | Incerteza da variação térmica no torque          |
| $U_{t0T}$     | Efeito da temperatura sobre o zero               |
| $U_{sT}$      | Tolerância da sensibilidade                      |
| $U_{rT}$      | Resolução limitada do dinamômetro                |
| $U_{DT}$      | <i>Long term drift over 48h</i>                  |
| $U_{TfT}$     | Tolerância de frequência (MX460)                 |
| $U_{rfv}$     | Resolução da medição de frequência na velocidade |
| $t_{cal}$     | Temperatura de calibração, em graus Celsius      |
| $U_{temp}$    | Incerteza usual de leitura da temperatura        |



# SUMÁRIO

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | INTRODUÇÃO . . . . .  | 23 |
| 1.1   | Objetivo geral . . . . .  | 24 |
| 1.2   | Objetivos específicos . . . . .   | 24 |
| 2     | INCERTEZAS DE MEDIÇÃO E MÉTODO DE MONTE<br>CARLO . . . . .              | 25 |
| 2.1   | Conceitos fundamentais . . . . .  | 25 |
| 2.2   | Distribuições de probabilidade . . . . .                                | 25 |
| 2.2.1 | Distribuição Uniforme . . . . .   | 26 |
| 2.2.2 | Distribuição Gaussiana . . . . .  | 27 |
| 2.3   | Medidas diretas e indiretas . . . . .                                   | 28 |
| 2.4   | Cálculo analítico pelo GUM . . . . .                                    | 29 |
| 2.5   | Método de Monte Carlo . . . . .   | 29 |
| 2.6   | Exemplo de aplicação do MMC . . . . .                                   | 30 |
| 2.7   | Dimensionamento das populações do MMC . . . . .                         | 32 |
| 3     | DETERMINAÇÃO DE RENDIMENTO DE MITS . . . . .                            | 35 |
| 3.1   | Funcionamento . . . . .   | 35 |
| 3.2   | Perdas em MITs . . . . .  | 37 |
| 3.3   | Normas vigentes . . . . .   | 38 |
| 3.4   | Visão geral dos métodos . . . . .                                       | 38 |
| 3.5   | Método B . . . . .  | 39 |
| 3.5.1 | Medição de resistência a frio . . . . .                                 | 39 |
| 3.5.2 | Ensaio Térmico . . . . .  | 39 |
| 3.5.3 | Ensaio com carga . . . . .  | 40 |
| 3.5.4 | Ensaio a vazio . . . . .  | 40 |
| 3.5.5 | Determinação das perdas . . . . .                                       | 41 |
| 3.5.6 | Correções . . . . .   | 42 |
| 3.6   | Bancada de ensaio . . . . .   | 43 |
| 3.6.1 | Yokogawa WT500 . . . . .  | 44 |
| 3.6.2 | HBM T40B . . . . .  | 46 |
| 3.6.3 | Agilent 34410A . . . . .  | 47 |
| 3.6.4 | Data Logger Yokogawa GP10 . . . . .                                     | 49 |
| 4     | DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA PARA ESTIMA-<br>ÇÃO DE INCERTEZAS . . . . . | 51 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.1   | Estrutura . . . . .   | 51 |
| 4.2   | Módulos . . . . .   | 54 |
| 4.2.1 | Módulo de Cálculo . . . . .                                       | 54 |
| 4.2.2 | Módulo MMC . . . . .  | 55 |
| 4.3   | Interface . . . . .   | 56 |
| 4.3.1 | Aba Configurações . . . . .                                       | 58 |
| 4.3.2 | Aba Resultados . . . . .  | 60 |
| 4.4   | Validação . . . . .   | 61 |
| 4.4.1 | Validação I - Módulo de Cálculo . . . . .                         | 61 |
| 4.4.2 | Validação II - Módulo MMC . . . . .                               | 62 |
| 4.5   | Aceleração do FEIMC . . . . .                                     | 63 |
| 5     | RESULTADOS . . . . .  | 65 |
| 5.1   | Descrição dos Motores . . . . .                                   | 65 |
| 5.2   | Análise do motor “A” . . . . .                                    | 65 |
| 5.3   | Análise dos motores “B” e “C” . . . . .                           | 70 |
| 6     | CONCLUSÃO . . . . .   | 73 |
|       | REFERÊNCIAS . . . . .   | 75 |
|       | APÊNDICES . . . . .   | 77 |
|       | APÊNDICE A – CÓDIGO EXEMPLO DO MÉTODO DE<br>MONTE CARLO . . . . . | 79 |
|       | ANEXOS . . . . .  | 81 |
|       | ANEXO A – FORMULÁRIO B2 - IEEE 112 . . . . .                      | 83 |

# 1 INTRODUÇÃO

O motor de indução trifásico (MIT) foi idealizado inicialmente por Nikola Tesla [1] com a finalidade de converter energia elétrica em mecânica. O motor é composto por um estator, que é a parte estacionária, e um rotor, que é a parte rotativa. No estator é instalado um conjunto de enrolamentos que, quando energizados por uma fonte trifásica, proporcionam a criação de um campo magnético girante no entreferro. Este campo gera correntes induzidas no rotor, que por sua vez proporcionam a criação de um conjugado mecânico responsável pela rotação do eixo.

Os MITs são empregados em grande parte dos processos industriais e correspondem a aproximadamente 68% do consumo energético deste setor [2]. Por isso, é desejável a utilização de motores com alta eficiência energética a fim de reduzir os custos de operação. O nível de eficiência energética, também denominado rendimento, é informado nas placas de identificação dos motores e deve atingir patamares mínimos definidos pela portaria interministerial 553/2005 [3].

A determinação do rendimento dos MITs é feita por ensaios descritos nas normas IEEE Standard 112 [4], NBR 17094-3 [5], IEC 60034-2-1 [6], entre outras. Como em qualquer processo experimental, os resultados estão sujeitos a incertezas de medição que devem ser levadas em conta para garantir que o rendimento satisfaça os níveis mínimos exigidos.

O estudo das incertezas pode ser feito pelos métodos apresentados no *Guide of the expression of Uncertainty of Measurement* (GUM) [7]. O guia, desenvolvido pelo Comitê Conjunto para Guias em Metrologia (JCGM/WG 1) que abrange órgãos como a IEC e a ISO, norteia os trabalhos relacionados a medidas diretas e indiretas e apresenta métodos para a determinação e expressão de incertezas.

Uma das ferramentas propostas pelo GUM é o Método de Monte Carlo - MMC, que é um método numérico que consiste em gerar grandes conjuntos de dados de entrada segundo distribuições de probabilidades pré-estabelecidas para observar a distribuição dos dados de saída do sistema. Este método é recomendado pelo GUM para a determinação de incertezas de medidas indiretas relativamente complexas.

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um programa baseado no Método de Monte Carlo para a estimação de incertezas associadas a determinação do rendimento de MITs. O programa é aplicado no contexto de uma bancada de ensaio de MITs disponível no Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos (LabMaq) do Departamento de Engenharia Elétrica da UFSC. A bancada é apresentada nos trabalhos de [8], [9] e [10], desenvolvidos no Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos

(GRUCAD).

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um programa computacional, baseado no Método de Monte Carlo, para estimar as incertezas de medição associadas à determinação do rendimento de MITs em ensaios normatizados.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são listados a seguir.

- Estudar trabalhos associados ao tema;
- Estudar os métodos de determinação de rendimento definidos nas normas IEEE Standard 112 [4], NBR 17094-3 [5] e IEC 60034-2-1 [6];
- Analisar os equipamentos presentes na bancada de ensaio;
- Desenvolver o modelo computacional pelo método de Monte Carlo;
- Validar o modelo implementado;
- Realizar ensaios em motores de indução trifásicos;
- Aplicar a ferramenta desenvolvida e analisar os resultados obtidos;
- Documentar os resultados.



## 2 INCERTEZAS DE MEDIÇÃO E MÉTODO DE MONTE CARLO

Nessa seção são apresentados os fundamentos teóricos sobre as incertezas de medição. Tomou-se como base a 1ª edição Brasileira do *Guide to the expression of Uncertainty in Measurement* - GUM [7], publicada em 2008 pelo INMETRO. O GUM foi proposto em 1977 pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas - CIPM como forma de padronizar internacionalmente os resultados das incertezas de medição, juntamente com a proposta de servir como Guia completo a respeito da declaração de incertezas.

### 2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Processos de medição podem ser definidos como procedimentos experimentais para determinar o valor momentâneo de um mensurando como um múltiplo ou fração de uma unidade padronizada [11]. Esta determinação se dá por meio de sistemas de medição, que naturalmente estão sujeitos a imprecisões. A diferença entre o valor verdadeiro do mensurando e o valor indicado pelo sistema de medição é denominada de erro de medição [7].

Os erros podem ser divididos em três tipos: grosseiro, sistemático e aleatório. O primeiro ocorre de maneira geral por descuidos, ou falta de conhecimento do operador, por exemplo ao registrar incorretamente uma medida. Já o erro sistemático consiste em um desvio que tende a ser constante, caso mantidas as condições do sistema, e portanto pode ser estimado e compensado. O erro aleatório ocorre por eventos não controlados de origem aleatória, não sendo possível prever nem compensar seu valor. Seu efeito tende a reduzir pela realização de múltiplas medições.

Ainda que não seja possível prever o valor do erro aleatório, pode-se caracterizá-lo por uma função de distribuição de probabilidade. A incerteza de medição é um parâmetro que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando e quantifica a dúvida acerca do resultado da medição.

### 2.2 DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE

No contexto da Estatística, é possível expressar a chance de obtenção de determinado valor de uma variável aleatória por uma função de densidade de probabilidade. As distribuições de probabilidade usuais são a Gaussiana e a uniforme.

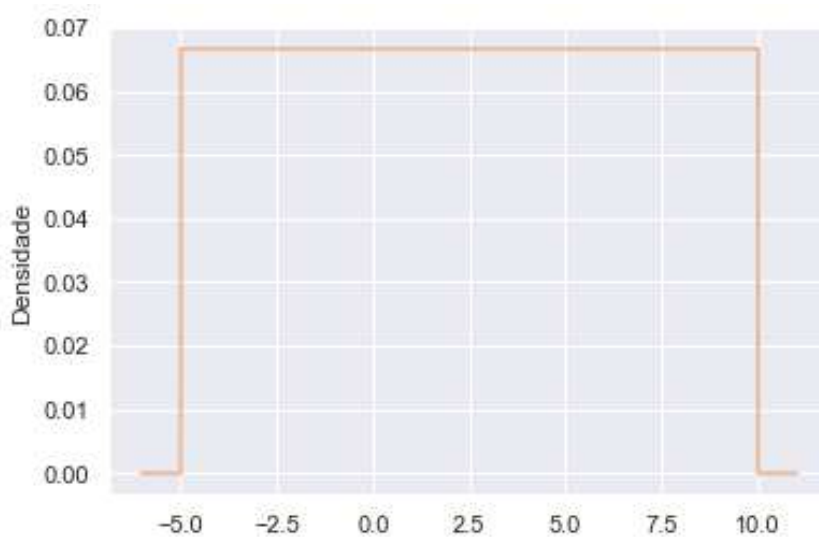
### 2.2.1 Distribuição Uniforme

Uma distribuição é uniforme quando cada evento possível possui a mesma probabilidade de ocorrer [11]. Por exemplo, quando se joga um dado, não viciado, a probabilidade de ocorrência de cada uma das seis faces é a mesma. A função que descreve a distribuição uniforme é dada por:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{1}{b-a}, & a \leq x < b \\ 0, & x \geq b \end{cases} \quad (2.1)$$

A **Figura 1** apresenta uma distribuição uniforme onde  $a = -5$  e  $b = 10$ .

Figura 1 – Distribuição uniforme entre -5 e 10.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Outra forma utilizada para a descrição da distribuição uniforme é por meio dos parâmetros  $\mu$  e  $w$ , conforme (2.2) e (2.3), que expressam respectivamente a média e a largura da distribuição.

$$\mu = \frac{b + a}{2} \quad (2.2)$$

$$w = b - a \quad (2.3)$$

A área acumulada sob o gráfico representa a probabilidade de um evento ocorrer entre um dado intervalo  $(x_1, x_2)$ . A função para o cálculo desta área para a distribuição uniforme no intervalo  $(-\infty, x]$  é representada por (2.4).

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases} \quad (2.4)$$

Isto quer dizer que os possíveis valores da variável aleatória estão limitados pelo intervalo  $[a, b]$ .

### 2.2.2 Distribuição Gaussiana

A distribuição Gaussiana, também conhecida como normal, é definida pela **Equação 2.5**. Ela é comumente usada para modelar fenômenos naturais, influenciados por diversos fatores aleatórios.

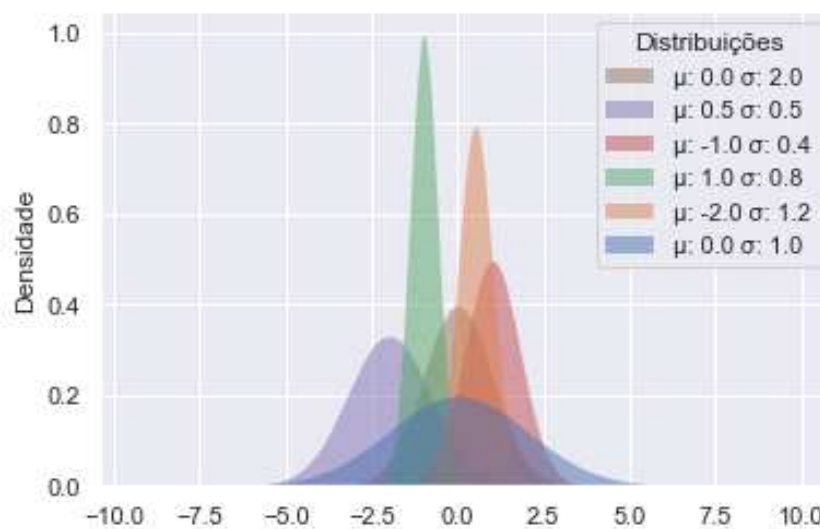
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.5)$$

Esta distribuição é caracterizada por dois parâmetros:

- $\mu$  - Média ou esperança matemática;
- $\sigma$  - Desvio padrão.

A **Figura 2** representa as distribuições obtidas para diferentes valores dos parâmetros  $\mu$  e  $\sigma$ .

Figura 2 – Distribuições Gaussianas para diferentes parâmetros.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

É possível somar duas distribuições normais independentes, onde a média resultante ( $\mu_{res}$ ) e o desvio padrão ( $\sigma_{res}$ ) são dados, respectivamente, por (2.6) e (2.7).

$$\mu_{res} = \mu_1 + \mu_2 \quad (2.6)$$

$$\sigma_{res} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (2.7)$$

A distribuição normal com média nula e desvio padrão unitário também pode ser chamada de distribuição normal padrão. Ela é descrita por (2.8), uma versão simplificada de (2.5).

$$\varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}z^2} \quad (2.8)$$

Pode-se converter qualquer distribuição gaussiana para uma normal padrão mudando seu sistemas de coordenadas por (2.9).

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (2.9)$$

A distribuição normal padrão possui as seguintes características:

- A área sob o gráfico no intervalo de  $(-\infty, \infty)$  é igual a 1;
- A área entre o intervalo  $(-\infty, 0]$  corresponde a 0,5;
- A probabilidade da variável aleatória assumir um valor dentro do intervalo  $(-\sigma, \sigma)$  é de 68,2%;
- Para os intervalos de  $(-2\sigma, 2\sigma)$  e  $(-3\sigma, 3\sigma)$  as probabilidades do evento são de, respectivamente, 95,44% e 99,73%.

Se conhecido o desvio padrão de uma distribuição com características normal é possível estimar os limites dos intervalos em que a a probabilidade de ocorrência seja de  $p$ .

## 2.3 MEDIDAS DIRETAS E INDIRETAS

As medidas podem ser diretas ou indiretas. Uma medida é direta quando o valor indicado pelo sistema de medição se encontra na própria unidade do mensurando [11]. Exemplos de medida direta são:

- Distância entre dois pontos medida com uma trena;
- Intervalo de tempo entre dois eventos medidos por um cronômetro.

As medidas indiretas são definidas por uma relação matemática em função de uma ou mais medidas diretas. Alguns exemplos de medida indireta são:

- Resistência elétrica obtida indiretamente pela medição da corrente e tensão elétrica;
- Perímetro de uma circunferência pela medição de seu diâmetro.

A incerteza das medidas indiretas pode ser obtida pela relação entre as incertezas associadas às medidas diretas.

## 2.4 CÁLCULO ANALÍTICO PELO GUM

Uma das maneiras de se obter a incerteza de uma medida indireta é apresentada no GUM [7]. A incerteza para uma medida indireta definida por  $f$  em função de entradas não correlacionadas  $x_i$  pode ser representada pela equação (2.10), em que  $u(x_i)$  é a incerteza padrão combinada para a entrada  $i$ .

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (2.10)$$

Para sistemas onde as entradas são fortemente correlacionadas acrescenta-se um novo termo na equação (2.10), de forma a obter uma nova equação apresentada em (2.11).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (2.11)$$

A partir destas equações pode-se obter as incertezas associadas a medidas indiretas definidas por somas, multiplicações e outras operações matemáticas entre medidas diretas.

Entretanto o próprio GUM indica que essa abordagem analítica pode ser inadequada para sistemas não-lineares ou de alta complexidade. Para estes sistemas recomenda-se a aplicação de outros métodos, entre eles o método de Monte Carlo utilizado neste trabalho.

## 2.5 MÉTODO DE MONTE CARLO

O Método de Monte Carlo - MMC, é um método numérico usado no estudo de propagação de incertezas. Sua aplicação é recomendada pelo suplemento 1 do GUM [12] para todos os tipos de sistema, especialmente os não-lineares.

Para um determinado modelo representado por (2.12) definido por  $m$  entradas, a aplicação do MMC consiste em gerar populações de tamanho  $N$  para cada entrada do sistema, com base em distribuições de probabilidade pré-definidas. Desta forma, obtêm-se

$N$  valores  $Y_i$ , conforme a equação (2.13), onde  $X_{i,k}$  representa o  $i$ -ésimo indivíduo da população de  $X_k$ , sendo  $0 \leq i < N$  e  $1 \leq k \leq m$ .

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m) \quad (2.12)$$

$$Y_i = f(X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,m}) \quad (2.13)$$

O valor de  $N$  deve ser suficientemente grande para fornecer uma discretização adequada da distribuição. Recentemente o avanço da computação proporcionou a popularização do MMC, tendo em vista a geração de grandes populações com baixo tempo de execução. Entretanto sua data de surgimento é tida como 1949 pelo artigo intitulado *The Monte Carlo Method* [13].

## 2.6 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MMC

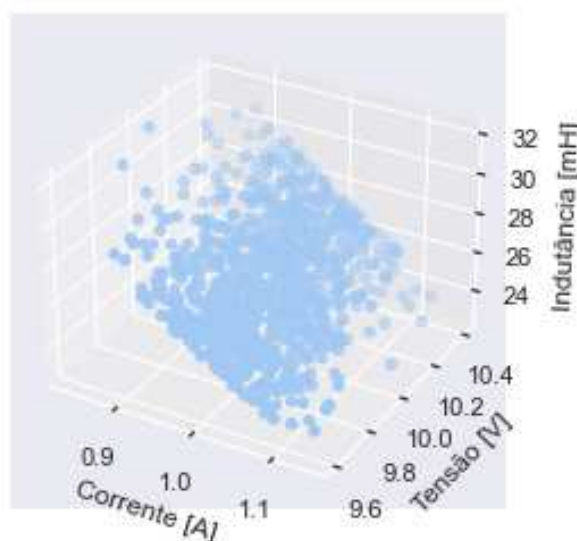
Esta seção tem como objetivo apresentar um exemplo da aplicação do método de Monte Carlo para a determinação da incerteza resultante da medição indireta da indutância. A medição é feita através do modelo (2.14), onde as entradas  $V$ ,  $I$  e  $f$  representam, respectivamente, a tensão, corrente e frequência medidas. O valor da indutância  $L$  é a saída do sistema.

$$L = f(V, I, f) = \frac{V}{I \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \quad (2.14)$$

As seguintes considerações foram feitas:

1. A corrente é descrita por uma distribuição do tipo normal com  $\mu = 1\text{A}$  e  $\sigma = 0,05\text{A}$ ;
2. A tensão é descrita por uma distribuição do tipo retangular centrada em  $10\text{V}$  com variação de  $\pm 0,4\text{V}$ ;
3. A frequência é constante em  $60\text{Hz}$  (para possibilitar a demonstração dos resultados).

Aplicando o método de Monte Carlo com  $N = 1000$  na equação (2.14) obtemos a população apresentada na **Figura 3**.

Figura 3 – Distribuição valores de indutância,  $N = 1000$ .

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

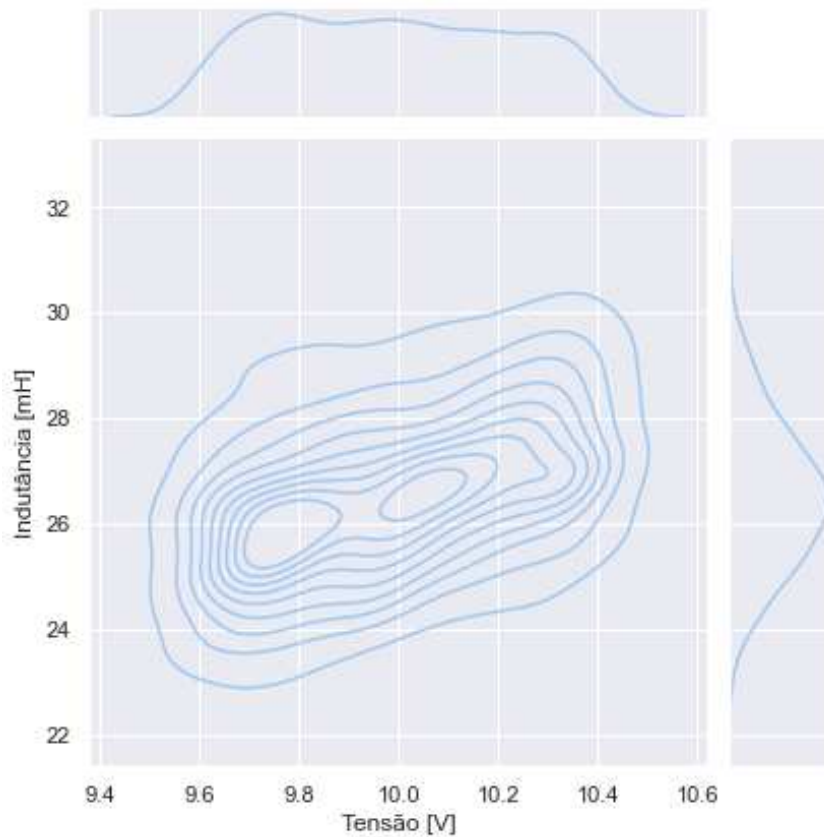
A partir dos valores obtidos também é possível determinar os parâmetros das distribuições da medida indireta da indutância, conforme **Tabela 1**:

Tabela 1 – Resumo dos parâmetros da medida indireta.

| Grandeza        | Média   | Desvio Padrão | Mediana | Máximo  | Mínimo  |
|-----------------|---------|---------------|---------|---------|---------|
| Corrente (A)    | 1,0010  | 0,0486        | 1,0018  | 1,1438  | 0,8332  |
| Tensão (V)      | 9,9906  | 0,2327        | 9,9835  | 10,4000 | 9,6003  |
| Frequência (Hz) | 60,0000 | 0,0000        | 60,0000 | 60,0000 | 60,0000 |
| Indutância (mH) | 26,5382 | 1,4524        | 26,4646 | 31,9096 | 22,7808 |

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

A **Figura 4** mostra de forma mais detalhada a distribuição dos valores de medição da tensão e do resultado da indutância, onde as curvas de nível indicam a densidade dos indivíduos.

Figura 4 – Distribuições da tensão medida e da indutância calculada,  $N = 1000$ .

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

As **Figuras 3 e 4** juntamente com a **Tabela 1** fornecem uma abordagem mais detalhada do sistema. No **Apêndice A** encontra-se o código utilizado para a determinação dos parâmetros da aplicação do modelo representado em (2.14).

É possível notar na **Figura 4** que mesmo tendo-se definido a distribuição da tensão como retangular o seu gráfico de distribuição de densidade não apresentou este comportamento nos intervalos aproximados de (9,6; 9,7) e (10,3; 10,4). Este comportamento se deve ao tamanho das populações usadas na aplicação do método numérico de Monte Carlo. O correto dimensionamento deste valor encontra-se na seção seguinte.

## 2.7 DIMENSIONAMENTO DAS POPULAÇÕES DO MMC

A determinação do tamanho das populações geradas para a aplicação do método de Monte Carlo traz impactos significativos nos seus resultados. Pequenas populações reduzem a confiabilidade dos resultados obtidos, enquanto grandes populações podem aumentar desnecessariamente o custo computacional.

Conforme apresentado em [12] não é possível determinar de forma direta o tamanho ideal da população do MMC, entretanto são apresentados três meios para obter-se uma



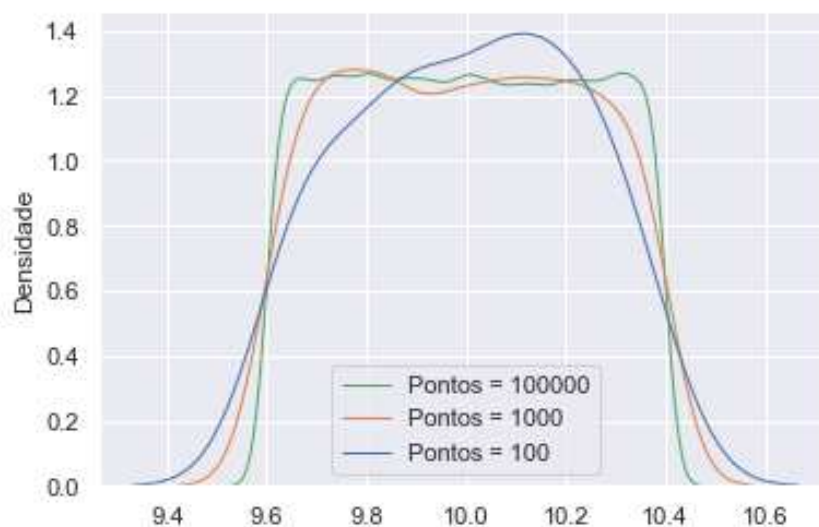
estimativa deste valor.

O primeiro meio considera que o valor mínimo da população deve corresponder a cerca de 1.000 vezes o valor obtido por  $1/(1 - q)$ , onde  $q$  é a confiabilidade desejada com valores no intervalo de 0 até 1. Já o segundo método atribui uma confiabilidade de 95% em até dois dígitos significativos para uma população de 100.000 indivíduos.

O tamanho da população também pode ser estimado de forma iterativa, onde seu valor é incrementado com base na observação de populações menores até que a variação entre a observação anterior e a atual satisfaça uma tolerância desejada.

A **Figura 5** apresenta a distribuição para diversos tamanhos de população para a tensão de entrada no exemplo anterior.

Figura 5 – Distribuições da tensão medida para as populações de  $N = 100 / 1.000 / 100.000$ .



Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Observa-se que maiores populações do método de Monte Carlo reduzem a variação da densidade da curva no intervalo  $[a, b]$  usado na geração dos valores aleatórios. Também é possível notar que o módulo do gradiente nos pontos  $a$  e  $b$  tende a aumentar conforme a população é incrementada.



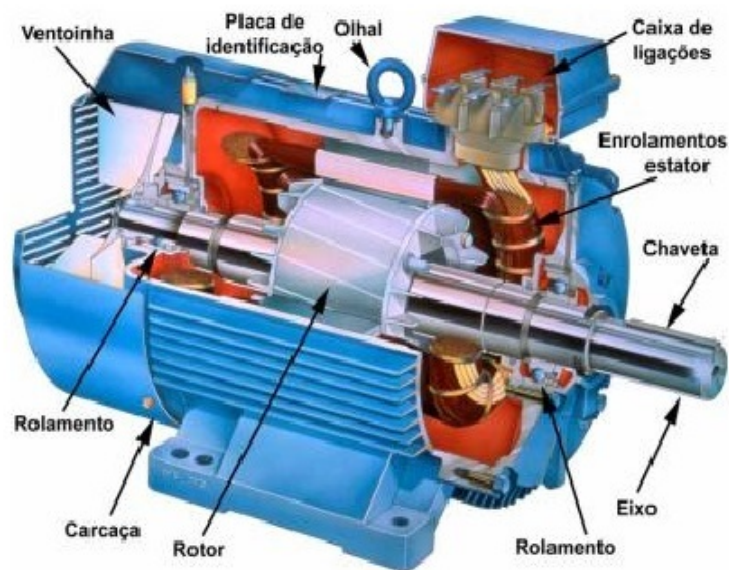
### 3 DETERMINAÇÃO DE RENDIMENTO DE MITS

O motor de indução trifásico é uma máquina elétrica rotativa que tem como função converter energia elétrica em energia mecânica. Neste capítulo é apresentado o seu princípio de funcionamento e as perdas energéticas que ocorrem em sua operação.

#### 3.1 FUNCIONAMENTO

O motor de indução trifásico é composto por um estator e por um rotor, ambos posicionados de forma concêntrica e separados por um espaço reduzido de ar ou material não magnético chamado de entreferro. Estas partes são ilustradas na **Figura 6**.

Figura 6 – Vista interna de um motor.



Fonte: Retirado de [14].

O estator do MIT possui um conjunto de enrolamentos distribuídos espacialmente de forma que um campo magnético girante é criado no entreferro quando o motor é alimentado por um sistema trifásico balanceado. A construção destes enrolamentos determina o número de polos do campo girante ( $p$ ). A determinação da velocidade síncrona do motor ( $N_s$ ), em rotações por minuto (RPM), é feita pela relação da frequência ( $f$ ) com o número de polos da máquina conforme (3.1).

$$N_s = \frac{120}{p} f \quad (3.1)$$

A construção do rotor pode ser feita principalmente de duas formas. A primeira, chamada de rotor do tipo gaiola, consiste em um conjunto de barras de material condutor, geralmente alumínio, curto circuitadas por meio de anéis em suas extremidades. A segunda, chamada de rotor do tipo bobinado, possui um conjunto de enrolamentos, semelhante ao estator, que podem ser acessados por meio de anéis coletores. Esta aplicação possibilita a instalação de resistências em série com os enrolamentos do rotor, proporcionando diferentes características na sua partida.

A diferença entre a velocidade do campo girante e do rotor faz com que sejam induzidas forças eletromotrizes (*fem*) nos enrolamentos do rotor conforme a lei de Faraday-Neumann-Lenz [15]. A *fem* gera corrente elétrica que por sua vez interage com o campo magnético girante e produz conjugado no eixo do motor.

O conjugado produzido faz com que o rotor gire a uma velocidade ( $N$ ) que, em regime permanente, tem valor inferior à velocidade síncrona. A diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor, normalizada pela velocidade síncrona, é chamada de escorregamento ( $s$ ) e é calculada por (3.2).

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (3.2)$$

A potência de entrada de um MIT alimentado por uma rede trifásica balanceada de frequência  $f$ , tensão de linha  $V_l$  e corrente de linha  $I_l$  é dada por (3.3), onde  $\cos\phi$  representa o fator de deslocamento entre a tensão e a corrente.

$$P_{in} = \sqrt{3}V_l I_l \cos\phi \quad (3.3)$$

A potência de saída dos motores é determinada pelo produto entre o torque ( $T$ ) e a velocidade do eixo (3.4). O termo  $2\pi/60$  é aplicado para que a potência seja dada em watts.

$$P_{out} = \frac{2\pi}{60} \cdot T \cdot N \quad (3.4)$$

O rendimento ( $\eta$ ) é descrito pela razão entre a potência de saída ( $P_{out}$ ) pela potência de entrada ( $P_{in}$ ), conforme (3.5). O rendimento também pode ser reescrito em função das perdas totais do sistema ( $P_{tot}$ ) conforme (3.6).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (3.5)$$

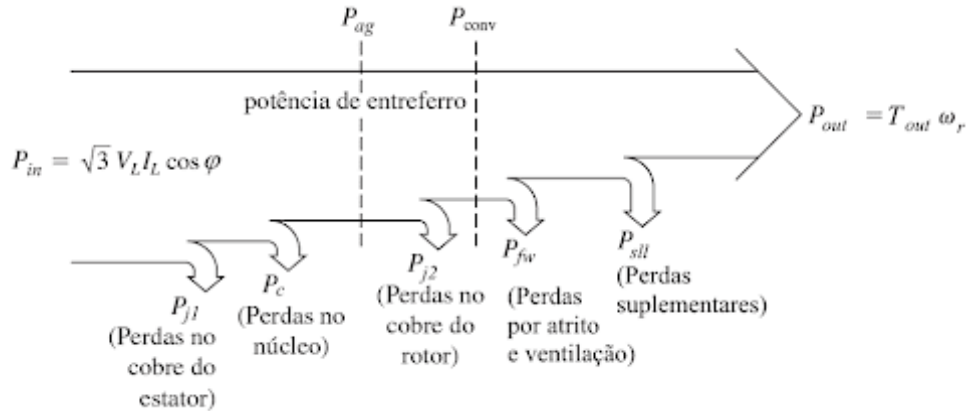
$$\eta = \frac{P_{in} - P_{tot}}{P_{in}} \quad (3.6)$$

A composição das perdas totais do sistema é descrita na próxima seção.

## 3.2 PERDAS EM MITs

As perdas geradas durante o funcionamento dos MITs podem ser segregadas conforme o fluxo de potência apresentado na **Figura 7**.

Figura 7 – Fluxo de potência durante o funcionamento do motor de indução trifásico.



Fonte: Retirado de [9].

As perdas podem ser descritas em cinco principais tipos:

- Perdas no cobre do estator ( $P_{j1}$ ): São ocasionadas pelo efeito joule proveniente da passagem de corrente nos condutores do estator;
- Perdas no ferro ou núcleo ( $P_c$ ): Ocorrem devido à histerese magnética e às correntes parasitas induzidas nos núcleos magnéticos do estator e do rotor, entre outros fenômenos;
- Perdas no cobre do rotor ( $P_{j2}$ ): De forma similar às perdas no cobre do estator, são ocasionadas pelo efeito joule proveniente da passagem da corrente induzida nos condutores do rotor;
- Perdas por atrito e ventilação ( $P_{fw}$ ): Englobam a potência dissipada pelo atrito das partes móveis e pelo sistema de refrigeração do motor que geralmente fica acoplado ao eixo do MIT;
- Perdas suplementares ( $P_{sl}$ ): São compostas pelo conjunto das demais perdas que não são possíveis segregarem, podem ser causadas por imperfeições na máquina, fluxos dispersos, entre outros fatores.

A soma das perdas segregadas representa as perdas totais do sistema, em (3.7).

$$P_{tot} = P_{j1} + P_c + P_{j2} + P_{fw} + P_{sl} \quad (3.7)$$

A determinação dos valores das perdas para cada ponto de operação dos MITs pode ser feita por ensaios descritos em normas, que são apresentadas a seguir.

### 3.3 NORMAS VIGENTES

Os métodos para determinação do rendimento dos motores de indução trifásicos por meio de ensaios são abordados em diversas normas internacionais, como a IEC 60034-2-1:2014 [6] e a IEEE Standard 112 [4]. No Brasil a norma vigente relacionada ao tema é a NBR 17094-3 [5] que utilizou a norma da IEEE como referência para a sua criação. Os ensaios descritos nestas normas são muito semelhantes entre si e se diferenciam apenas por detalhes.

Para a realização deste trabalho utilizou-se como principal referência a IEEE Standard 112 por ser a norma internacional de mais fácil acesso e por ter sido utilizada no desenvolvimento da norma brasileira.

### 3.4 VISÃO GERAL DOS MÉTODOS

A norma IEEE Standard 112 foi publicada inicialmente em 2004 e sua versão mais atual foi divulgada em 2017. Ela abrange 11 métodos para a determinação do rendimento de motores de indução, sumarizados na **Tabela 2**.

Tabela 2 – Métodos da IEEE Standard 112.

| Método | Definição   |
|--------|---|
| A      | Medição da entrada e da saída   |
| B      | Medição da entrada e da saída, e segregação de perdas   |
| B1     | Idem método B com temperatura assumida  |
| C      | Máquinas duplicadas com medição indireta da segregação de perdas  |
| E      | Medição elétrica com carga com medição direta das perdas suplementares  |
| E1     | Medição elétrica com carga e perdas suplementares assumidas   |
| F      | Determinação por circuito equivalente com perdas suplementares medidas  |
| F1     | Determinação por circuito equivalente com perdas suplementares assumidas  |
| C/F    | Determinação por circuito equivalente com calibração de circuito aplicando o método C                                   |
| E/F    | Determinação por circuito equivalente com calibração de circuito aplicando o método E                                   |
| E1/F1  | Determinação por circuito equivalente e perdas suplementares assumidas com calibração de circuito aplicando o método E1 |

Fonte: Adaptado de [4].

A norma recomenda a aplicação dos métodos B e B1 sempre que possível. Já o método A é limitado para máquinas de até 1 cv (0,75kW). Para motores de potência superior a 300kW, ou quando não for possível utilizar o método B por limitações das instalações de teste, admitem-se os demais métodos. Por estes motivos os desenvolvimentos neste trabalho consideram apenas o método B.

## 3.5 MÉTODO B

No método B, o rendimento é determinado para diferentes condições de carregamento com base na medição da potência de entrada e nas perdas totais do MIT. A perda total é calculada pela soma das cinco parcelas de perdas: Perdas por atrito e ventilação, perdas por efeito joule no rotor e no estator, perda no núcleo, e as perdas suplementares.

Para a determinação das perdas é necessária a execução de quatro ensaios: Medição de resistência a frio, ensaio térmico, ensaio com carga e ensaio a vazio.

Por meio dos valores obtidos nestes ensaios é calculado o rendimento do MIT. A norma IEEE 112 oferece o formulário presente no **Anexo A** para auxiliar na realização dos cálculos para a determinação do rendimento através do método B.

Vale notar que os ensaios devem ser feitos seguindo a ordem apresentada abaixo. Não é obrigatório que os ensaios sejam feitos instantaneamente após o término do anterior, entretanto a temperatura da máquina durante os ensaios com carga e a vazio pode variar no máximo 10 °C daquela medida no ensaio térmico.

Os ensaios são sumarizados a seguir.

### 3.5.1 Medição de resistência a frio

A medição de resistência a frio deve ser feita com o MIT a temperatura ambiente. Pode ser feita com uma fonte de tensão DC, um amperímetro e um voltímetro, ou apenas pelo ohmímetro. A leitura deverá contemplar a combinação de dois a dois das fases, ou seja,  $R_R-R_S$ ,  $R_R-R_T$  e  $R_T-R_S$ . Também deve ser medida a temperatura ambiente.

### 3.5.2 Ensaio Térmico

O ensaio térmico deve ser feito a fim de identificar a temperatura de operação do MIT sob carga nominal. Neste ensaio o motor opera com tensão, frequência e carregamento nominal até que se observe uma variação térmica menor que 1°C no intervalo de 30 minutos. A temperatura dos enrolamentos é determinada no final do ensaio com base na variação da resistência do enrolamento do estator. A temperatura especificada, definida como a elevação de temperatura somada à temperatura ambiente padrão de 25°C, é utilizada na correção das resistências elétricas dos enrolamentos nos demais ensaios.

### 3.5.3 Ensaio com carga

No ensaio com carga, o MIT é acoplado a um dinamômetro e opera em ao menos seis pontos de carga diferentes: Quatro pontos igualmente espaçados no intervalo entre 25% e 100% do carregamento nominal, e mais dois pontos entre 100% e 150%. A imposição é dada de forma decrescente. Em cada ponto são medidas as seguintes grandezas:

- Tensão eficaz de linha;
- corrente eficaz de linha;
- potência ativa total;
- frequência;
- velocidade;
- torque;
- temperatura ambiente;
- temperatura ou resistência dos enrolamentos do estator.

Recomenda-se realizar o ensaio em um curto intervalo de tempo para diminuir o efeito da variação térmica nos valores obtidos.

### 3.5.4 Ensaio a vazio

O ensaio a vazio consiste na operação do motor sem carga alimentado em frequência nominal e em níveis decrescentes de tensão. Em cada ponto são medidos:

- Tensão eficaz de linha;
- Corrente eficaz de linha;
- Potência ativa total;
- Temperatura dos enrolamentos.

Os níveis de tensão aplicados devem seguir a seguinte recomendação:

1. Três ou mais valores no intervalo de 75% e 125% da tensão nominal com um ponto próximo de 100%;
2. Três ou mais valores entre 25% e 50% ou até que a diminuição da tensão de alimentação ocasione o aumento da corrente.



### 3.5.5 Determinação das perdas

Em qualquer ponto de medição, as perdas por efeito joule no estator ( $P_{j1}$ ) são obtidas por (3.8), onde  $I_l$  é a corrente eficaz de linha e  $R_1$  é a resistência do enrolamento do estator por fase na temperatura do ensaio.

$$P_{j1} = 3.I_l^2.R_1 \quad (3.8)$$

As correções da resistência em função da temperatura podem ser realizadas com a equação (3.9), em que  $R_a$  é a resistência para uma temperatura  $t_a$ ,  $R_b$  é a resistência a uma temperatura  $t_b$  e  $k_1$  é a constante térmica do material que tem o valor de 234,5 para o cobre e 225 para o alumínio.

$$R_b = R_a \frac{k_1 + t_b}{k_1 + t_a} \quad (3.9)$$

As perdas por atrito e ventilação ( $P_{fw}$ ) são determinadas a partir dos valores do ensaio a vazio. É realizada uma regressão linear, onde o eixo X corresponde ao quadrado da tensão de linha ( $V_l^2$ ) e o eixo Y corresponde a  $P_{in} - P_{j1}$ . O ponto que a reta intercepta o eixo Y da regressão, denominado de coeficiente linear, corresponde a  $P_{fw}$ .

As perdas no ferro em cada ponto do ensaio a vazio são calculadas por:

$$P_c = P_{in} - P_{j1} - P_{fw} \quad (3.10)$$

O valor das perdas no ferro em cada ponto do ensaio com carga são calculados levando em conta a tensão interna da máquina ( $V_c$ ) em cada ponto, que pode ser obtida por (3.11), e a relação observada no ensaio a vazio entre  $P_c$  e a tensão terminal.

$$V_c = \sqrt{\left(V_l - \frac{\sqrt{3}}{2}.I_l.R_1.\cos\phi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}.I_l.R_1.\sqrt{1 - \cos^2\phi}\right)^2} \quad (3.11)$$

As perdas por efeito joule no rotor ( $P_{j2}$ ) são obtidas para cada ponto do ensaio em carga por:

$$P_{j2} = s.(P_{in} - P_{j1} - P_c) \quad (3.12)$$

As perdas suplementares ( $P_{sl}$ ) são obtidas, preliminarmente, de forma indireta por (3.13) para cada ponto do ensaio com carga.

$$P_{sl} = P_{in} - \frac{2.\pi}{60}.T.N - P_{j1} - P_{j2} - P_c - P_{fw} \quad (3.13)$$

O valor suavizado das perdas suplementares é obtido por regressão linear dos valores preliminares em função do torque ao quadrado ( $T^2$ ), conforme (3.14).

$$P'_{sl} = T^2 A \quad (3.14)$$

O coeficiente A apresentado na equação acima corresponde ao coeficiente angular da reta obtida pela regressão linear.

Caso o fator de determinação  $R^2$  da regressão linear for inferior a 0,9 ou o coeficiente angular for negativo, o pior ponto deve ser desconsiderado e a regressão linear deve ser refeita. Se mesmo com a alteração os critérios ainda não forem satisfeitos, o ensaio deve ser refeito.

### 3.5.6 Correções

Para a apresentação dos resultados, os valores das perdas joule devem ser corrigidos para a temperatura especificada do motor.

A perda joule do estator corrigida ( $P'_{j1}$ ) é obtida por (3.15) pela normalização de  $R_1$  para a temperatura especificada, através da aplicação da equação (3.9) apresentada anteriormente.

$$P'_{j1} = 3.I_t^2.R_b \quad (3.15)$$

Para a correção das perdas joule no rotor calcula-se o escorregamento corrigido ( $s'$ ) por (3.16). A velocidade do rotor corrigida ( $N'$ ) para o novo valor do escorregamento pela equação (3.17).

$$s' = s \cdot \frac{k_1 + t_b}{k_1 + t_a} \quad (3.16)$$

$$N' = N_s(1 - s') \quad (3.17)$$

Desta forma obtêm-se as perdas joule no rotor corrigidas ( $P'_{j2}$ ) por:

$$P'_{j2} = s' \cdot (P_{in} - P'_{j1} - P_c) \quad (3.18)$$

As perdas totais corrigidas do motor ( $P'_{tot}$ ) na temperatura especificada são calculadas por (3.19). O rendimento do motor para os pontos de operação do ensaio com carga são calculados segundo (3.20).

$$P'_{tot} = P'_{j1} + P'_{j2} + P_{fw} + P_c + P'_{sl} \quad (3.19)$$

$$\eta = \frac{P_{in} - P'_{tot}}{P_{in}} \quad (3.20)$$

### 3.6 BANCADA DE ENSAIO

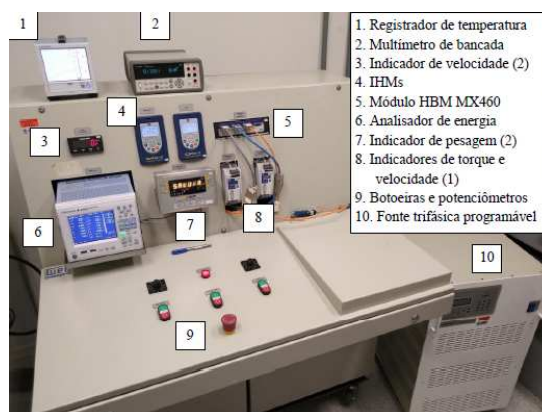
No contexto do trabalho, utilizou-se de uma bancada de ensaios, ilustrada nas **Figuras 8 e 9**, disponível no Laboratório de Máquinas e Acionamentos (LabMaq) da UFSC para a realização dos ensaios de rendimento dos MITs. Esta seção tem como objetivo principal apresentar os equipamentos da bancada e as suas respectivas incertezas de medição. A apresentação detalhada da bancada e a explicação do seu funcionamento pode ser encontrada em [8], [9] e [10].

Figura 8 – Bancada de ensaios do LabMaq - Mesa de dinamômetro.



Fonte: Retirado de [9].

Figura 9 – Bancada de ensaios do LabMaq - Mesa de instrumentação e comando.



Fonte: Retirado de [9].

Na bancada utiliza-se o analisador de energia Yokogawa WT500 para a medição da corrente, tensão, potência e frequência. O torque e a velocidade do motor são medidos pelo

transdutor de torque HBM T40B. Para a resistência utiliza-se do multímetro de bancada Agilent 34410A e para a temperatura o *Data Logger* Yokogawa GP10 com termopares.

Para cada equipamento da bancada obtiveram-se suas incertezas a partir da documentação dos fabricantes. Estas informações são valores típicos para os equipamentos que não são provenientes de um certificado de calibração. Estes valores muitas vezes são dados como valor máximo, desta forma, quando não informado o tipo de distribuição, assume-se a distribuição como uniforme. Uma descrição breve dos equipamentos é apresentada nas subseções a seguir.

### 3.6.1 Yokogawa WT500

O analisador de energia utilizado na bancada de ensaio é fabricado pela Yokogawa sob o modelo WT500 e é apresentado na **Figura 10**. Ele oferece a medição das grandezas elétricas de tensão, corrente, potência, frequência, entre outras.

Figura 10 – Analisador de energia Yokogawa WT500.



Fonte: Retirado de [16].

As escalas disponíveis no equipamento são mostradas na **Tabela 3**.

Tabela 3 – Escalas do analisador de energia Yokogawa WT500.

| Grandeza   | Escalas                               |
|------------|---------------------------------------|
| Tensão     | 15/30/60/100/150/300/600/1000 V       |
| Corrente   | 0,5/1/2/5/10/20/40 A                  |
| Potência   | 2×escala da tensão×escala da corrente |
| Frequência | DC/0,5 Hz até 100 kHz                 |

As incertezas associadas à medição da tensão elétrica são apresentadas na **Tabela 4**. Considera-se a temperatura medida representada por  $t$ , o valor medido  $l$  e a escala utilizada sendo  $e$ . As equações relacionadas à temperatura ambiente assumem o valor zero para o intervalo entre 18 e 28 °C.

Tabela 4 – Incertezas associadas a medição de tensão do Yokogawa WT500.

| Fonte de Incerteza            | Equação                           | Distribuição |
|-------------------------------|-----------------------------------|--------------|
| Incerteza usual da tensão     | $U_V = (l + e).0,1\%$             | Uniforme     |
| Incerteza da variação térmica | $U_{dtV} = ( t - 23  - 5).0,03\%$ | Uniforme     |
| Resolução do analisador       | $U_{rV} = e/(2 \times 60.000)$    | Uniforme     |

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

O cálculo das incertezas associadas à corrente elétrica pode ser visto na **Tabela 5**. Para a utilização do equipamento, conecta-se um transformador de corrente em série, desta forma a incerteza do TC também deve ser considerada.

Tabela 5 – Incertezas associadas à medição da corrente do Yokogawa WT500.

| Fonte de Incerteza            | Equação                           | Distribuição |
|-------------------------------|-----------------------------------|--------------|
| Incerteza usual da corrente   | $U_I = (l + e).0,1\%$             | Uniforme     |
| Incerteza da variação térmica | $U_{dtI} = ( t - 23  - 5).0,03\%$ | Uniforme     |
| Resolução do analisador       | $U_{rI} = e/(2.60000)$            | Uniforme     |
| Incerteza usual do TC         | $U_{TC} = l.0,07\%$               | Uniforme     |

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

As incertezas associadas a potência elétrica são apresentadas na **Figura 6**, onde  $\phi$  representa o ângulo resultante entre o vetor da tensão e da corrente.

Tabela 6 – Incertezas associadas à medição da potência do Yokogawa WT500.

| Fonte de Incerteza              | Equação                           | Distribuição |
|---------------------------------|-----------------------------------|--------------|
| Incerteza usual da potência     | $U_P = (l + e).0,1\%$             | Uniforme     |
| Incerteza da variação térmica   | $U_{dtP} = ( t - 23  - 5).0,03\%$ | Uniforme     |
| Resolução do analisador         | $U_{rP} = e/(2.60000)$            | Uniforme     |
| Influência do Fator de Potência | Eq. (3.21)                        | Uniforme     |
| Incerteza de $\phi$ do TC       | $U_{\phi TC} = 0,06^\circ$        | Uniforme     |
| Incerteza usual do TC           | $U_{TC} = l.0,07\%$               | Uniforme     |

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

$$U_{fp} = l.[0,001 + 0,001 \cdot \frac{e \cdot \cos(\phi)}{l} + 0,002 \cdot \tan(\phi)] \quad (3.21)$$

A frequência elétrica possui apenas uma fonte de incerteza para o analisador de energia, conforme apresentado na **Tabela 7**.

Tabela 7 – Incertezas associadas à medição da frequência do Yokogawa WT500.

| Fonte de Incerteza   | Equação            | Distribuição |
|----------------------|--------------------|--------------|
| Incerteza de Leitura | $U_{lf} = l.0,6\%$ | Uniforme     |

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Os valores referentes ao analisador de energia foram retirados da ficha de dados [16].

### 3.6.2 HBM T40B

O transdutor de torque modelo T40B da fabricante HBM realiza as medições de torque e velocidade rotacional na bancada de ensaio [17]. O medidor é apresentado na **Figura 11**.

Figura 11 – Equipamento HBM T40B.



Fonte: Retidado de [17].

As escalas disponíveis no aparelho são listadas na **Tabela 8**.

Tabela 8 – Escalas do transdutor de torque e velocidade HBM T40B.

| Grandeza   | Escalas   |
|------------|---|
| Torque     | 50 / 100 / 200 / 500 / 1.000 / 2.000 / 3.000 / 5.000 / 10.000 N.m |
| Velocidade | Ajustada automaticamente em rpm                                   |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para a determinação das incertezas associadas à medição do torque, utiliza-se as equações apresentadas na **Tabela 9**.

Tabela 9 – Incertezas associadas à medição do torque no HBM T40B.

| Fonte de Incerteza                 | Equação                         | Distribuição |
|------------------------------------|---------------------------------|--------------|
| Não linearidade e histerese        | Eq. (3.22)                      | Uniforme     |
| Repetibilidade                     | $U_{rpT} = 1.0, 03\%$           | Normal       |
| Incerteza da variação térmica      | $U_{dtT} = 1.0, 05\%$           | Uniforme     |
| Efeito da temperatura sobre o zero | $U_{t0T} = 1.0, 05\%$           | Uniforme     |
| Tolerância da sensibilidade        | $U_{sT} = 1.0, 10\%$            | Uniforme     |
| Resolução limitada                 | $U_{rT} = 5.10^{-5} \text{N m}$ | Uniforme     |
| <i>Long term drift over 48h</i>    | $U_{DT} = 1.0, 03\%$            | Uniforme     |
| Tolerância de frequência (MX460)   | $U_{TfT} = 1.0, 01\%$           | Uniforme     |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

$$U_{hT} = \begin{cases} 1.0, 01\%, & 0 \leq l \leq 40 \text{N m} \\ 1.0, 02\%, & l > 40 \text{N m} \end{cases} \quad (3.22)$$

O cálculo das incertezas associadas à velocidade são apresentados na **Tabela 10**. Onde  $N_{pp}$  representa a velocidade máxima medida.

Tabela 10 – Incertezas associadas à medição de velocidade no HBM T40B.

| Fonte de Incerteza                 | Equação                            | Distribuição |
|------------------------------------|------------------------------------|--------------|
| Resolução da medição de frequência | $U_{rfv} = 0, 02. \pi \text{ rpm}$ | Uniforme     |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

### 3.6.3 Agilent 34410A

O multímetro de bancada fabricado pela Agilent sob o modelo 34410A, apresentado na **Figura 12**, é utilizado para a medição da resistência elétrica na bancada de ensaio [18].

Figura 12 – Equipamento Agilent 34410A.



Fonte: Retidado de [18].

As escalas disponíveis são:

Tabela 11 – Escalas multímetro Agilent 34410A.

| Grandeza    | Escalas  |
|-------------|--|
| Resistência | $100 \times 10^i$ ( $0 \leq i \leq 7$ ) [ $\Omega$ ] |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O equipamento possui as incertezas associadas à medição de resistência representadas na **Tabela 12**. O efeito da temperatura deve ser considerado apenas nos intervalos  $[0; t_{cal} - 5)$  e  $(t_{cal} + 5; 55]$ , onde  $t_{cal}$  é a temperatura de calibração do equipamento.



Tabela 12 – Incertezas associadas à medição da resistência com o multímetro Agilent 34410A.

| Intervalo                       | Incerteza da resistência [ $\Omega$ ] | *Efeito da temperatura [ $\Omega$ ]                              |
|---------------------------------|---------------------------------------|--|
| [0; 100 $\Omega$ )              | $l.0,010\% + e.0,004\%$               | $( t - t_{cal}  - 5)$<br>$\times$<br>$(l.0,0006\% + e.0,0005\%)$ |
| [100 $\Omega$ ; 1k $\Omega$ )   | $l.0,010\% + e.0,001\%$               | $( t - t_{cal}  - 5)$<br>$\times$<br>$(l.0,0006\% + e.0,0001\%)$ |
| [1k $\Omega$ ; 10k $\Omega$ )   | $l.0,010\% + e.0,001\%$               | $( t - t_{cal}  - 5)$<br>$\times$<br>$(l.0,0006\% + e.0,0001\%)$ |
| [10k $\Omega$ ; 100k $\Omega$ ) | $l.0,010\% + e.0,001\%$               | $( t - t_{cal}  - 5)$<br>$\times$<br>$(l.0,0006\% + e.0,0001\%)$ |
| [100k $\Omega$ ; 1M $\Omega$ )  | $l.0,012\% + e.0,001\%$               | $( t - t_{cal}  - 5)$<br>$\times$<br>$(l.0,0010\% + e.0,0002\%)$ |
| [1M $\Omega$ ; 10M $\Omega$ )   | $l.0,04\% + e.0,001\%$                | $( t - t_{cal}  - 5)$<br>$\times$<br>$(l.0,0030\% + e.0,0004\%)$ |
| [10M $\Omega$ ; 100M $\Omega$ ) | $l.0,80\% + e.0,001\%$                | $( t - t_{cal}  - 5)$<br>$\times$<br>$(l.0,1000\% + e.0,0001\%)$ |
| [100M $\Omega$ ; 1G $\Omega$ )  | $l.8,00\% + e.0,001\%$                | $( t - t_{cal}  - 5)$<br>$\times$<br>$(l.1,000\% + e.0,0001\%)$  |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

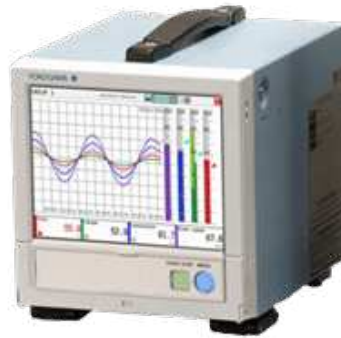
A distribuição de todas as incertezas associadas ao multímetro são consideradas do tipo uniforme.

### 3.6.4 Data Logger Yokogawa GP10

O *Data Logger* modelo GP10 da Yokogawa, apresentado na **Figura 13** é utilizado na bancada juntamente com termopares para a medição da temperatura.

A incerteza associada ao equipamento estão apresentadas na **Tabela 13**. Salienta-se que o valor obtido apenas é válido para temperaturas entre 0 °C e 200 °C, conforme [19].

Figura 13 – Equipamento Data Logger Yokogawa GP10.



Fonte: Retidado de [19].

Tabela 13 – Incertezas associadas à medição de temperatura com o Data Logger GP10 Yokogawa.

| <b>Incerteza</b>           | <b>Equação</b>            | <b>Distribuição</b> |
|----------------------------|---------------------------|---------------------|
| Incerteza usual de leitura | $U_{temp} = 0.2^{\circ}C$ | Uniforme            |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

No capítulo seguinte estas informações são usadas no programa para a estimação de incertezas de medidas indiretas pelo método de Monte Carlo.

## 4 DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA PARA ESTIMAÇÃO DE INCERTEZAS

O presente trabalho de conclusão de curso teve como principal objetivo o desenvolvimento de um *software* para análise da propagação de incertezas através do MMC.

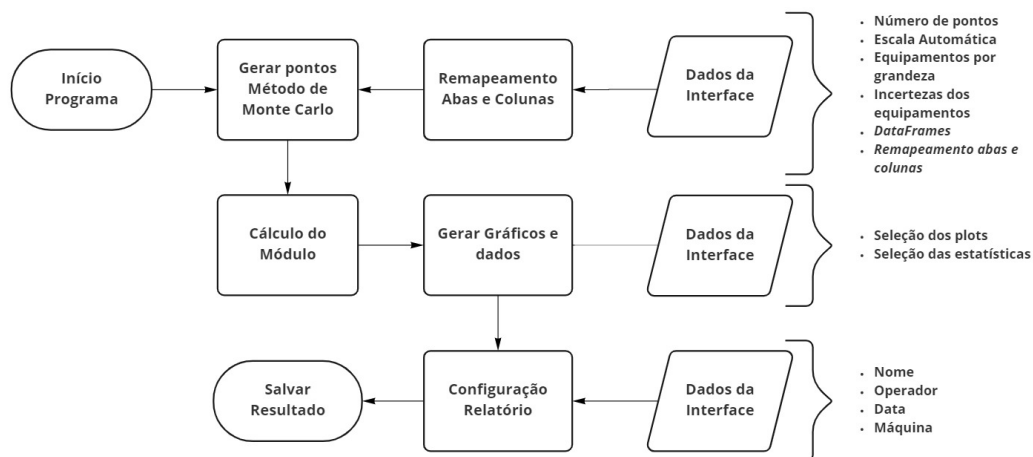
O programa intitulado FEIMC (Ferramenta de Estudo de Incertezas de Medição pelo Método de Monte Carlo), disponibilizado via GitHub [20]. Foi desenvolvido para obter a distribuição da medida indireta do rendimento de MITs, bem como os principais parâmetros através da aplicação do método de Monte Carlo pela aplicação dos equacionamentos apresentados decorrer do trabalho. A implementação contou com três princípios:

- Modularidade - Facilitar a alteração do código para que novas funções sejam adicionadas sem grandes alterações;
- Legibilidade - Manter um padrão de declaração de variáveis, funções e atributos de forma que outras pessoas, mesmo sem conhecimento prévio de programação, consigam acompanhar o fluxo do programa;
- Interface - Possibilitar a execução do programa através de um arquivo executável.

### 4.1 ESTRUTURA

O programa foi desenvolvido inteiramente pela aplicação da linguagem de programação *Python*. Seu planejamento se deu pela criação do fluxograma ilustrado na **Figura 14**.

Figura 14 – Fluxograma funcionamento do *software*.



miro

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

As etapas presentes no fluxograma são listadas a seguir:

1. Início do programa;
2. Recebimento dos dados da interface:
  - Número de indivíduos do método de Monte Carlo;
  - Booleano que indica se a escala dos equipamentos foi informada ou se deve-se calcular a menor escala possível para os valores;
  - Relação dos equipamentos usados na medição das grandezas;
  - Valores booleanos que determinam se as incertezas relacionadas a cada tipo de grandeza devem ser consideradas na simulação;
  - Tabelas com os valores do ensaio;
  - Relação entre os nomes das abas e colunas presente na tabela de dados pelo nomes utilizados no processo de equacionamento.
3. Remapeamento das abas e colunas presentes na tabela de dados através dos valores informados pela interface;
4. Geração da população de prováveis valores para cada célula da tabela com base nas incertezas associadas ao equipamento selecionado para cada grandeza;
5. Execução dos cálculos relacionados ao método B para cada conjunto de pontos gerados pelo método de Monte Carlo;
6. Construção dos gráficos e cálculo dos principais parâmetros estatísticos, selecionados pela interface, com base nos resultados obtidos;
7. Configuração do relatório através do resultado do item anterior e demais dados da interface;
8. Obtenção dos resultados e finalização do programa.

Tendo o fluxograma para o desenvolvimento traçado, decidiu-se subdividir o código do programa em dois arquivos contendo as características gráficas do projeto e quatro arquivos utilizados na execução do programa. A lista abaixo apresenta um resumo dos arquivos desenvolvidos e suas respectivas funções:

- `interface.py` - O arquivo contém o esquema e o dimensionamento dos itens da interface principal do projeto;
- `interface_cadastrar.py` - É responsável pela interface auxiliar utilizada no cadastro de novos motores de indução trifásicos;

- mmc.py - Desenvolvido pela criação de classes referentes as grandezas de estudo e contém os equipamentos cadastrados que podem ser usados pelo programa principal;
- funcoes.py - Contém as funções necessárias para a aplicação do método B e demais módulos de cálculo que podem ser implementados futuramente;
- FEIMC.py - Responsável pela configuração dos equipamentos usados no ensaio e por selecionar as funções necessárias para a aplicação da classe de cálculo selecionada;
- \_\_main\_\_.py - Agrupa as funcionalidades de todos os demais arquivos.

O sistema desenvolvido tem como entrada principal um arquivo XLSX com os dados para o método agrupados em abas no formato de tabela, conforme exemplo ilustrado na **Figura 15**.

Figura 15 – Exemplo de tabela com as medições dos ensaios.

|    | B      | C        | D        | F | G | H | I |
|----|--------|----------|----------|---|---|---|---|
| 1  | Tensao | Corrente | Potencia |   |   |   |   |
| 2  | 400,29 | 4,77     | 215,0    |   |   |   |   |
| 3  | 380,14 | 4,27     | 183,0    |   |   |   |   |
| 4  | 340,48 | 3,57     | 142,0    |   |   |   |   |
| 5  | 299,84 | 3,06     | 113,0    |   |   |   |   |
| 6  | 260,70 | 2,62     | 92,0     |   |   |   |   |
| 7  | 220,42 | 2,19     | 73,0     |   |   |   |   |
| 8  | 180,88 | 1,79     | 59,0     |   |   |   |   |
| 9  | 160,22 | 1,59     | 51,0     |   |   |   |   |
| 10 | 139,22 | 1,38     | 46,0     |   |   |   |   |
| 11 | 118,76 | 1,19     | 40,0     |   |   |   |   |
| 12 | 99,27  | 1,01     | 37,0     |   |   |   |   |
| 13 | 79,56  | 0,85     | 33,0     |   |   |   |   |
| 14 | 59,92  | 0,72     | 31,0     |   |   |   |   |

Ensaio a Vazio ▾ Ensaio com Carga ▾ Resistencias ▾

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

A saída do FEIMC é dividida em três arquivos: O primeiro em formato PDF conta com os parâmetros de saída (média, moda, mediana, máximo, mínimo, entre outros), conforme selecionado na interface, juntamente de detalhes da máquina ensaiada e dados pertinentes ao ensaio em forma de relatório. O segundo arquivo contém os dados presentes no relatório em forma de tabela XLSX. Por fim o terceiro é um arquivo ZIP com todos os *Plots* selecionados em formato SVG.

## 4.2 MÓDULOS

Para o cumprimento do requisito de Modularidade, o programa contém dois módulos. O primeiro chamado de módulo de cálculo está presente no arquivo “funcoes.py”. O segundo intitulado de módulo MMC foi construído em “mmc.py”.

### 4.2.1 Módulo de Cálculo

A necessidade da criação do módulo de cálculo surgiu como solução para a modularidade do projeto. Desta forma é possível utilizar a estrutura do *software* para diferentes aplicações. O módulo foi desenvolvido no modelo de programação orientada a objetos - POO.

Um objeto ou classe em POO pode ser composto por métodos e atributos. O primeiro consiste em ações que a classe pode executar. Já os atributos consistem nas propriedades da classe.

Optou-se por esta abordagem pois a utilização dos objetos possibilita a utilização da propriedade de herança. A herança consiste em definir uma classe como pai (*parent*) e uma nova classe que será sua filha (*Child*). Esta herdará todos os métodos e atributos declarados na classe pai. Assim aproveita-se códigos já escritos em outros objetos. É permitido criar várias classes filhas para uma mesma classe pai. A classe filha pode por sua vez ser classe pai de outras classes.

Para manipular os dados estruturados em formato de tabela provenientes de planilhas utilizou-se de objetos, denominados *DataFrames*, presentes na biblioteca *Pandas* [21].

O desenvolvimento do módulo de cálculo referente ao método B da IEEE 112 deu-se inicialmente pela criação de um objeto denominado de “IEEE112”. Este é composto por três métodos, sendo eles:

- `ensaio_resistencia` - Recebe um *DataFrame* com os dados de resistência e de temperatura para cada ensaio realizado;
- `ensaio_carga` - Recebe um *DataFrame* com os dados do ensaio de carga e retorna os valores da velocidade síncrona e assíncrona, escorregamento e a potência de saída;
- `ensaio_vazio` - Recebe um *DataFrame* com os dados do ensaio a vazio e retorna os valores das perdas por atrito e ventilação, tensão e potência no núcleo e o fator de potência.

O módulo “IEEE112” foi designado como pai do objeto “IEEEMetodoB”, este por sua vez possui todos os métodos apresentados acima e mais dois métodos:

- rendimento - Recebe como entrada os dados do ensaio térmico, com carga e vazio e retorna o *DataFrame* com as perdas segregadas, escorregamento, e o rendimento, conforme método B;
- calculo - É responsável por executar o método “rendimento” para todos os indivíduos das populações geradas pelo módulo MMC. Retorna um conjunto de  $N$  *DataFrames* com o resultado do método B aplicado o MMC;

Optou-se por esta estrutura pois, caso queira-se adicionar os métodos restantes presentes na IEEE 112, basta criar um novo método na classe “IEEE112” com o novo ensaio e, feito isso, criar um objeto para o respectivo método, conforme o modelo aplicado no método B.

### 4.2.2 Módulo MMC

A implementação do módulo MMC consiste em caracterizar as incertezas presentes nos equipamentos apresentados na **Seção 3.6**. Da mesma forma que o desenvolvimento do módulo de cálculo, o módulo MMC utilizou as características das classes. Inicialmente construiu-se a classe “Equipamento” como base para as demais.

A classe “Equipamento” possui apenas o método construtor (`__init__`) com as entradas listadas abaixo:

1. *DataFrame* - Tabela com os valores de entrada para a implementação do MMC;
2. Equipamentos - Lista no formato “chave: valor” onde as chaves são as grandezas do sistema e os valores são os equipamentos utilizados;
3. Configuração Escalas - Valor Booleano que indica se foram inseridas na tabela as colunas com as escalas utilizadas.

Para cada grandeza do sistema criou-se uma classe filha da classe “Equipamento” que herda o método construtor. As classes implementadas estão listadas a seguir:

- “Corrente”;
- “Tensao”;
- “Potencia”;
- “Frequencia”;
- “Resistencia”;

- “Torque”;
- “Velocidade”;
- “Temperatura”.

Cada classe possui um método interno para cada equipamento cadastrado. Neles foram cadastradas as incertezas obtidas nas fichas de dado dos fabricantes e descritos na **Seção 3.6**. O atributo “resultado” presente em todas as classes retorna uma lista de tamanho  $N$  aplicado às incertezas do equipamento em cada célula do *DataFrame*.

Ao término da implementação do método de Monte Carlo tem-se como resultado  $N$  *DataFrames* para cada tabela de entrada do sistema. Estes por sua vez são enviados como parâmetros de entrada no método de cálculo, conforme apresentado anteriormente.

Desta forma o resultado final do programa será uma distribuição de possíveis valores, onde é possível obter diversos parâmetros como seu desvio-padrão, média, moda, mediana, máximo, mínimo, entre outros. Estas informações obtidas geram uma diferente abordagem para o estudo de MITs.

Novos equipamentos que futuramente sejam adquiridos devem ser cadastrados dentro da sua respectiva classe para utilização. A implementação de novas grandezas ao programa deve ser feita com a criação de uma nova classe para a respectiva grandeza e o cadastro dos respectivos equipamentos.

### 4.3 INTERFACE

Decidiu-se implementar uma interface ao programa dado a dificuldade da utilização do programa via Prompt de Comando. Para a construção da interface do FEIMC efetuou-se um levantamento de todos os dados de entrada do usuário que são necessários para a execução do programa. Estes dados são listados a seguir divididos em categorias:

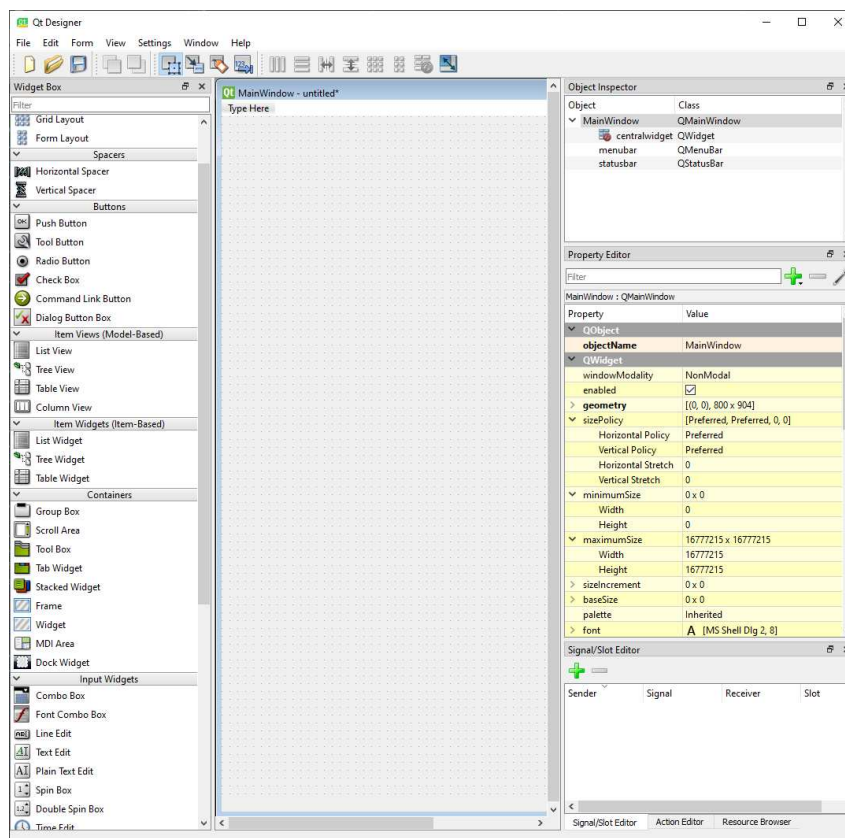
1. Configurações gerais
  - Nome do operador
  - Máquina
  - Data
  - Método de cálculo
  - Arquivo com dados das medições
2. Configuração Monte Carlo
  - Lista com equipamentos usados no ensaio



- Número de pontos da simulação
  - Identificar as incertezas que serão avaliadas por grandeza
  - Configuração de escala
3. Relatório
- Tipos de gráficos
  - Tipos de dados
4. Opção para o remapeamento das colunas e abas na tabela para os utilizados nos cálculos do programa

O layout foi desenvolvido com o auxílio da ferramenta *Designer*, ilustrada na **Figura 16**. A ferramenta possui um sistema de gerenciamento de *widgets* por meio de ícones interativos. O arquivo de interface possui formato UI e pode ser convertido para *Python* por meio da biblioteca *PyQt6* [22].

Figura 16 – Ferramenta de gerenciamento de *layout* da interface.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

A interface principal do sistema é dividida em duas abas: Configurações e Resultados, que são descritos a seguir.

### 4.3.1 Aba Configurações

A aba configurações, ilustrada na **Figura 17**, também pode ser subdividida em três partes. A primeira chamada de geral abrange as entradas listadas como configurações gerais, bem como o tamanho das populações do MMC e a configuração de escalas dos medidores. Nela também encontram-se os botões para selecionar o módulo de cálculo, executar a simulação e o cadastro de novas máquinas.

Figura 17 – Interface do programa - Aba Configurações

The screenshot shows the 'FEIMC' software interface. At the top, there is a menu bar with 'Arquivo' and a window title bar with 'FEIMC'. Below the menu bar, there are two logos: 'FEIMC' (Ferramenta de Estudo de Incertezas de Medição pelo Método de Monte Carlo) and 'GRUCAD' (Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos). The main area is divided into three sections: 'Configurações' (selected) and 'Resultados'. The 'Configurações' section is further divided into three columns: 'Geral', 'Grandezas', and 'Atribuir Abas'. The 'Geral' column contains fields for 'Operador', 'Data' (10/03/2022), 'Arquivo', 'Máquina' (MIT NOVA 5 cv 2), 'Ensaio' (Ensaio), and 'Pontos Monte Carlo' (1000). The 'Grandezas' column has checkboxes for 'Corrente', 'Tensão', 'Potência', 'Frequência', 'Resistência', 'Torque', 'RPM', and 'Temperatura', each with a dropdown menu. The 'Atribuir Abas' section has two sub-sections: 'Atribuir Abas' with 'Abas Ensaio' and 'Abas Excel' tabs, and 'Atribuir Colunas' with 'Colunas Ensaio' and 'Colunas Excel' tabs. At the bottom, there is a footer with the text 'Trabalho de Conclusão de Curso 2021-2' and 'Guilherme Hosoda Souza Reis' next to the UFSC logo.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

O botão “Adicionar Nova” é responsável por abrir uma segunda interface, apresentada na **Figura 18**, onde devem ser introduzidos os dados do novo MIT a ser cadastrado. Após o preenchimento completo dos dados o banco de dados é atualizado e a máquina poderá ser utilizada em outros ensaios.

Figura 18 – Interface do programa - Cadastro nova máquina

| Modelo            |       |
|-------------------|-------|
| Fabricante        |       |
| Categoria         | N     |
| Material Estator  | Cobre |
| Material Rotor    | Cobre |
| Potência (kW)     |       |
| Tensão (V)        |       |
| Corrente (A)      |       |
| Frequência (Hz)   |       |
| Rotação (RPM)     |       |
| Cos(phi)          |       |
| Polos             |       |
| Rendimento [100%] |       |
| Outros            |       |

Cadastrar

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

A segunda parte das configurações é dividida por grandezas, onde cada uma é composta pelo conjunto dos seguintes itens:

- Lista com os equipamentos disponíveis para a respectiva medição;
- Botão de seleção para considerar a incerteza de medição na respectiva grandeza.

As listas com os equipamentos utilizados são enviados para o módulo MMC e caso os respectivos botões estejam ativos o módulo utilizará das distribuições de probabilidade para a geração dos valores. Caso contrário, o valor informado via planilha com os dados será repetido para todos os indivíduos da população.

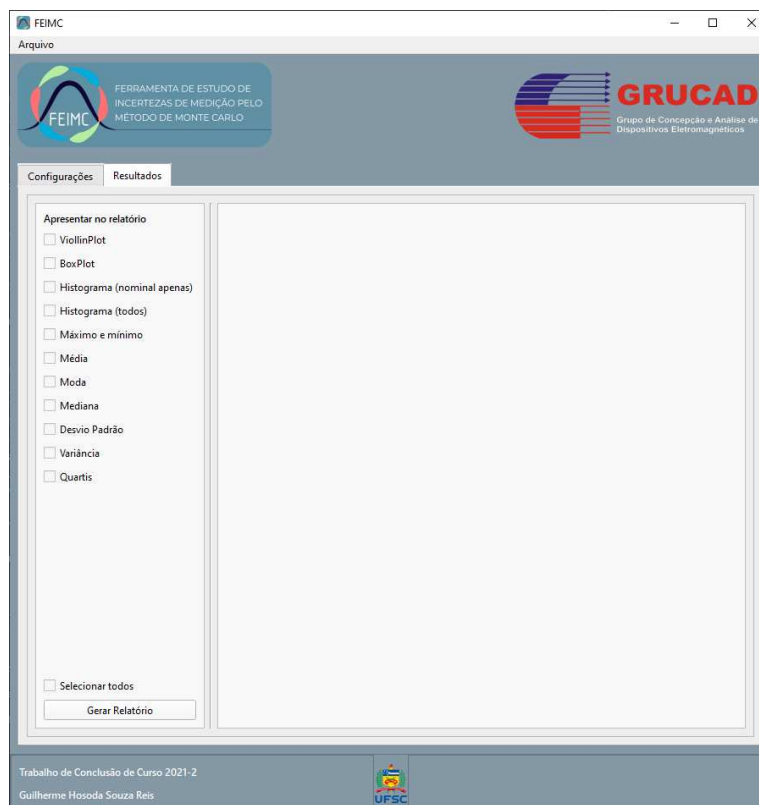
Por fim, a última parte consiste em um setor para efetuar a atribuição das abas e colunas da planilha de dados com os nomes utilizados no cálculo do programa. Esta etapa foi desenvolvida com a finalidade de apresentar ao usuário o nome das variáveis usadas no decorrer do programa, desta forma, caso o nome presente na tabela de entrada seja diferente é possível efetuar a correção. Após a execução da simulação os resultados podem ser vistos na aba resultados.

### 4.3.2 Aba Resultados

A aba resultados é composta por um conjunto de botões de seleção, conforme **Figura 19**, utilizados para selecionar os parâmetros ou gráficos a serem exibidos no relatório. As opções de exibição são:

- Parâmetros:
  - Média;
  - Mediana;
  - Máximo e mínimo;
  - Desvio padrão;
  - Quartis.
- Tipos de gráficos:
  - Histograma (para todos os valores ou apenas para os valores na condição nominal);
  - *BoxPlot*;
  - Violino.

Figura 19 – Interface do programa - Aba Resultados



Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

No canto direito da aba também é possível observar uma prévia do relatório antes de exportar os resultados.

## 4.4 VALIDAÇÃO

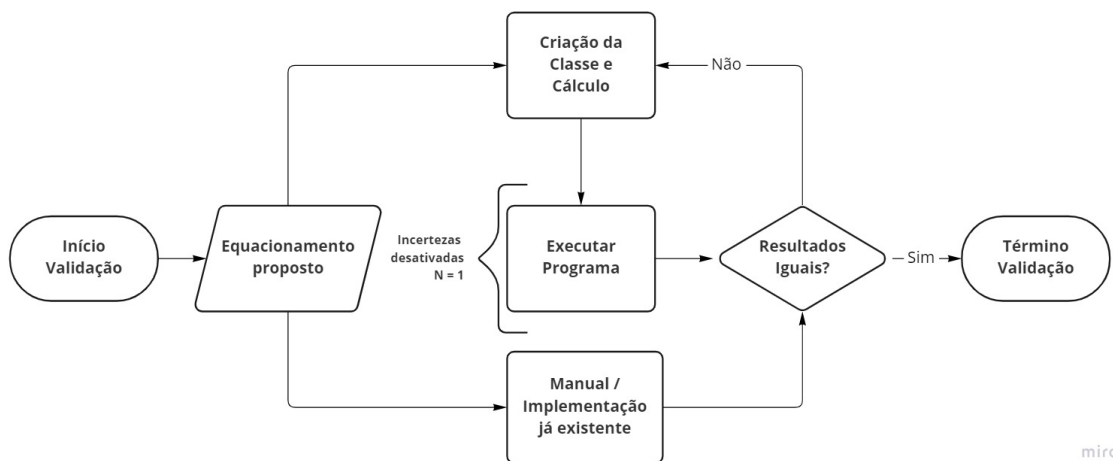
Dada a estrutura utilizada no desenvolvimento do FEIMC, sua validação ocorreu em duas etapas, sendo elas referentes aos módulos de cálculo e a estrutura de geração do Método de Monte Carlo.

### 4.4.1 Validação I - Módulo de Cálculo

A metodologia aplicada para a validação dos módulos de cálculo consiste na comparação de resultados finais do equacionamento proposto por dois meios: O equacionamento manual (ou por meio de planilhas já existentes) e o resultado obtido pelo programa através da nova classe.

O programa foi configurado com as incertezas das grandezas desativadas, e com o número de pontos de simulação  $N = 1$ . A **Figura 20** ilustra as etapas apresentadas para a validação.

Figura 20 – Fluxograma de validação dos métodos de cálculo



A validação deve ser feita para cada novo método de cálculo criado. Recomenda-se efetuar a metodologia proposta, se possível, com no mínimo duas máquinas distintas.

Na **Tabela 14** é apresentado o resultado obtido para a validação do módulo de cálculo referente à norma IEEE 112, que indicam a validade do programa para realizar os cálculos do método B.

Tabela 14 – Resultado utilizado na validação do módulo de cálculo.

| Ponto de operação | 149%   | 128%   | 98%    | 76%    | 52%    | 25%    |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Programa          | 85,017 | 86,545 | 88,051 | 88,532 | 87,798 | 81,808 |
| Planilha          | 85,016 | 86,545 | 88,051 | 88,532 | 87,800 | 81,808 |
| Varição           | 0,001  | 0,000  | 0,000  | 0,000  | -0,002 | 0,000  |

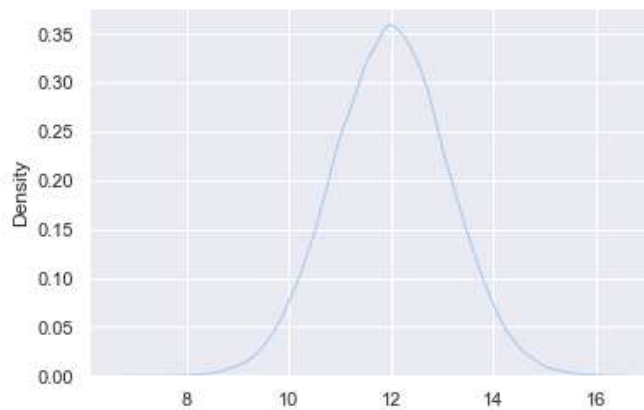
Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

#### 4.4.2 Validação II - Módulo MMC

A validação do módulo MMC foi feita em duas etapas. Na primeira observou-se o comportamento do programa para o caso da soma de duas distribuições normais. As distribuições escolhidas para a validação possuem os parâmetros  $\mu_1 = 10$ ,  $\mu_2 = 2$ ,  $\sigma_1 = 0,5$  e  $\sigma_2 = 1$ .

A aplicação do módulo MMC para os parâmetros informados resultou na distribuição de probabilidade apresentada na **Figura 21** com média  $\mu = 11,9998$  e desvio padrão  $\sigma = 1,1148$ .

Figura 21 – Validação do Módulo MMC pela soma de distribuições normais.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

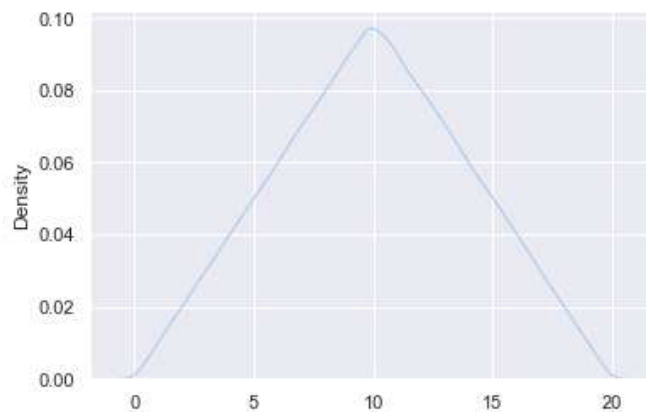
Já a média calculada analiticamente, para o caso ilustrado, também pode ser determinada pela soma das médias das distribuições, conforme apresentado em (2.6). O desvio padrão resultante se dá pela raiz da soma dos quadrados dos desvios padrões, conforme mostrado anteriormente em (2.7). Desta forma, para este caso, a média  $\mu_{res} = 12$  e o desvio padrão  $\sigma_{res} = 1,118$ .

Conforme as duas formas de análise obtiveram resultados satisfatoriamente similares, pode-se considerar que a primeira parte da validação do módulo MMC está validada.

A segunda parte consistiu na soma de duas distribuições uniformes com mesmos parâmetros  $a = 0$  e  $b = 10$ . Pela propriedade da soma de duas distribuições retangulares, o resultado de saída deve ser uma distribuição triangular.

A **Figura 22** demonstra que o resultado de saída esperado foi obtido pela aplicação do programa.

Figura 22 – Validação do Módulo MMC pela soma de distribuições uniformes.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Com os resultados obtidos pelas duas parcelas da validação II, juntamente com a validação I o programa foi considerado validado.

## 4.5 ACELERAÇÃO DO FEIMC

Conforme mencionado na **Seção 2.5** o aumento da utilização do MMC somente foi possível pelo avanço da computação. Foi necessário acelerar o programa para deixar o processo mais dinâmico.

Os processadores mais recentes possuem múltiplos núcleos para a execução de comandos. Um núcleo pode possuir um ou mais *Threads*, que podem ser considerados como núcleos virtuais. A utilização de vários núcleos permitem realizar instruções de forma paralela, otimizando o tempo de execução de programas. Entretanto a linguagem de programação *Python*, utilizada no projeto, trabalha nativamente com a utilização de apenas um *Thread* do processador.

Para contornar esta situação o *Python* em sua versão 3.2. disponibilizou a possibilidade de destinar tarefas para outros *Threads*. Entretanto esta forma possui um bloqueio que, mesmo com múltiplos *Threads* sendo executados, apenas um único trabalha por vez.

Na versão 3.5 foram implementados os múltiplos processos, em que a execução ativa do programa abre um conjunto de novos processos do *Python* e estes podem utilizar os *Threads* de forma livre.

Esta função de multi-processos foi aplicada em duas partes do programa, sendo elas:

- Equacionamento dos modelos de cálculo - Tendo em vista que são executados  $N$  vezes o modelo de cálculo, dividiu-se estes para  $I$  processos, onde cada processo novo recebe  $N/I$  *DataFrames* para equacionar;
- Criação das populações do MMC - No processo de criação dos modelos do MMC as colunas são divididas entre os processos.

Como resultado desta otimização, obtiveram-se os tempos de execução apresentados na **Tabela 15** com a sua aplicação para diferentes números de multi-processos em paralelo com as populações do método de Monte Carlo de tamanho  $N = 100.000$ .

Tabela 15 – Comparativo tempo de execução dos multi-processos.

| Processos               | 1     | 2     | 4     | 8     | 16    | 32    |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tempo de execução (min) | 92,40 | 71,20 | 34,67 | 29,27 | 31,90 | 32,72 |

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

O computador utilizado no estudo possui processador Intel Core i-5 7400 com 4 núcleos e 4 *Threads* operando a uma frequência de 3,00 GHz, e um conjunto de duas memórias RAM, em *Dual Channel*, de 8 GB cada operando a 2.133 MHz.

Nota-se que o aumento dos processos em paralelo não implicam necessariamente na redução do tempo de execução. Isto se deve ao custo computacional para iniciar um novo processo e a quantidade de núcleos do processador. Para o computador utilizado no teste o programa demonstrou uma melhor velocidade de execução com oito processos em paralelo.

Após a finalização do programa e a execução de suas validações, iniciaram-se estudos para a demonstração da utilização do FEIMC, mostrados no próximo capítulo.



## 5 RESULTADOS

O presente capítulo tem como finalidade apresentar os resultados obtidos pela aplicação do FEIMC no estudo de rendimento de motores, conforme IEEE 112 Método B.

### 5.1 DESCRIÇÃO DOS MOTORES

Para a aplicação da ferramenta foram selecionados três motores com características distintas conforme apresentado na **Tabela 16**.

Tabela 16 – Dados dos motores ensaiados.

| <b>Motor</b>           | <b>A</b> | <b>B</b> | <b>C</b> |
|------------------------|----------|----------|----------|
| <b>Fabricante</b>      | X        | Y        | X        |
| <b>Categoria</b>       | H        | N        | N        |
| <b>Potência [cv]</b>   | 5        | 7,5      | 15       |
| <b>Polos</b>           | 4        | 6        | 4        |
| <b>Tensão [V]</b>      | 380      | 380      | 380      |
| <b>Corrente [A]</b>    | 7,89     | 12,6     | 21,8     |
| <b>Frequência [Hz]</b> | 60       | 60       | 60       |
| <b>Rotação [rpm]</b>   | 1730     | 1160     | 1760     |
| <i>Cosφ</i>            | 0,8      | 0,78     | 0,83     |

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Optou-se por estes motores pois já foram realizados ensaios prévios. Os valores das perdas e dos rendimentos para os motores listados, entre outros, são apresentados em [9].

### 5.2 ANÁLISE DO MOTOR “A”

A aplicação do método de Monte Carlo no estudo do rendimento do motor A pelo método B da IEEE 112 se deu com as seguintes considerações: População do MMC  $N = 100.000$ , escalas definidas de forma automática pela seleção da menor que satisfaça o valor medido, e os equipamentos usados foram os apresentados neste documento.

No ensaio de medição de resistência a frio foi medida uma resistência por fase de  $R_{RS} = 1,720\Omega$ ,  $R_{RT} = 1,716\Omega$  e  $R_{ST} = 1,719\Omega$ . No ensaio a vazio, foram medidos os valores apresentados na **Tabela 17**.

Tabela 17 – Dados de entrada do ensaio a vazio para o motor “A”.

| $V_l$ (V) | $I_l$ (A) | $P_{in}$ (W) |
|-----------|-----------|--------------|
| 400,29    | 4,77      | 215          |
| 380,14    | 4,27      | 183          |
| 340,48    | 3,57      | 142          |
| 299,84    | 3,06      | 113          |
| 260,70    | 2,62      | 92           |
| 220,42    | 2,19      | 73           |
| 180,88    | 1,79      | 59           |
| 160,22    | 1,59      | 51           |
| 139,22    | 1,38      | 46           |
| 118,76    | 1,19      | 40           |
| 99,27     | 1,01      | 37           |
| 79,56     | 0,85      | 33           |
| 59,92     | 0,72      | 31           |

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Os dados da medição de resistência a frio e do ensaio a vazio são utilizados pelo programa para determinar os parâmetros associados as perdas por atrito e ventilação para o motor analisado. Na **Tabela 18**, além da média e do desvio padrão, também são apresentados o intervalo de confiança de 95% e a incerteza combinada. Os limites do intervalo são localizados onde a incerteza acumulada representa, respectivamente, 2,5% e 97,5%. A incerteza combinada é dada pela distância entre os limites do intervalo e a média.

Tabela 18 – Parâmetros das perdas de atrito e ventilação para o motor “A”.

| Média (W) | Desvio Padrão (W) | Intervalo de confiança de 95% | Incerteza combinada (W) |
|-----------|-------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 26,29     | 0,09              | (26,12; 26,46)                | 0,17                    |

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Pode-se observar que as perdas por atrito e ventilação possuem uma esperança de 26,29 e um intervalo de confiança (95%) aproximado de 0,6%. Este valor foi utilizado

para a continuação dos cálculos necessários para a determinação do rendimento no motor selecionado, juntamente com os valores do ensaio com carga listados na **Tabela 19**.

Tabela 19 – Dados de entrada do ensaio com carga para o motor “A”.

| $V_l$ (V) | $I_l$ (A) | $P_{in}$ (W) | $f$ (Hz) | $t$ (°C) | $T$ (N.m) | $N$ (rpm) |
|-----------|-----------|--------------|----------|----------|-----------|-----------|
| 383,92    | 11,59     | 6487         | 60,02    | 74       | 31,07     | 1688,27   |
| 384,62    | 9,99      | 5460         | 60,03    | 74       | 26,28     | 1708,73   |
| 385,22    | 8,06      | 4141         | 60,01    | 74       | 19,96     | 1732,56   |
| 385,86    | 6,81      | 3202         | 60,00    | 74       | 15,33     | 1749,28   |
| 386,29    | 5,67      | 2222         | 60,00    | 74       | 10,39     | 1766,02   |
| 387,27    | 4,76      | 1146         | 60,01    | 74       | 4,87      | 1784,36   |
| 387,56    | 4,47      | 548          | 59,99    | 74       | 1,79      | 1793,23   |

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

A partir das populações representadas pelos parâmetros apresentados nas **Tabelas 17 e 19**, juntamente com a medição da resistência por fase, foram obtidas, com a aplicação do programa, as perdas no estator, no núcleo, no rotor e suplementares mostradas, respectivamente, nas **Tabelas 20, 21, 22 e 23** que apresentam a média, desvio padrão, intervalo de confiança de 95% e a incerteza combinada dos resultados para os pontos de operação do motor.

Tabela 20 – Parâmetros obtidos das perdas do estator pela utilização do FEIMC para o motor “A”.

| Ponto de operação            | 148%             | 127%             | 98%              | 76%              | 53%             | 25%            |
|------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|
| Média (W)                    | 410,07           | 304,69           | 198,33           | 141,58           | 98,15           | 69,17          |
| Desvio padrão (W)            | 27,43            | 20,37            | 13,26            | 9,47             | 6,56            | 4,63           |
| Intervalo de confiança (95%) | (356,99; 463,34) | (265,39; 344,22) | (172,74; 224,07) | (123,31; 159,95) | (85,50; 110,88) | (60,25; 78,16) |
| Incerteza combinada (W)      | 53,27            | 39,53            | 25,74            | 18,37            | 12,73           | 8,99           |

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Pela **Tabela 20** percebe-se o aumento de potência no eixo do motor também induz um aumento nas as incertezas e médias das perdas por efeito joule no estator. A relação entre a média e a incerteza combinada permaneceu próxima dos 13% para todos os pontos de operação.

Tabela 21 – Parâmetros obtidos das perdas no núcleo pela utilização do FEIMC para o motor “A”.

| <b>Ponto de operação</b>     | <b>148%</b>    | <b>127%</b>    | <b>98%</b>      | <b>76%</b>      | <b>53%</b>      | <b>25%</b>      |
|------------------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Média (W)                    | 92,59          | 94,32          | 96,40           | 98,01           | 99,58           | 101,58          |
| Desvio padrão (W)            | 2,36           | 2,39           | 2,42            | 2,45            | 2,48            | 2,52            |
| Intervalo de confiança (95%) | (87,97; 97,19) | (89,66; 98,97) | (91,68; 101,11) | (93,22; 102,76) | (94,73; 104,40) | (96,64; 106,50) |
| Incerteza combinada (W)      | 4,60           | 4,65           | 4,71            | 4,75            | 4,82            | 4,92            |

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Os valores médios dos indivíduos usados na simulação do método de Monte Carlo para a determinação das perdas no núcleo do motor tiveram uma baixa redução conforme a potência no eixo do motor aumentava. Se considerarmos os intervalos de confiança dos pontos de operação, podemos dizer que o valor esperado permaneceu quase que constante.

Tabela 22 – Parâmetros obtidos das perdas do rotor pela utilização do FEIMC para o motor “A”.

| <b>Ponto de operação</b>     | <b>148%</b>      | <b>127%</b>      | <b>98%</b>       | <b>76%</b>      | <b>53%</b>     | <b>25%</b>    |
|------------------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|---------------|
| Média (W)                    | 377,18           | 262,10           | 145,86           | 84,36           | 38,67          | 8,70          |
| Desvio padrão (W)            | 19,67            | 16,83            | 12,91            | 10,10           | 6,98           | 3,39          |
| Intervalo de confiança (95%) | (344,61; 409,63) | (234,14; 289,56) | (124,53; 167,12) | (67,74; 100,93) | (27,15; 50,04) | (3,10; 14,25) |
| Incerteza combinada (W)      | 32,45            | 27,46            | 21,26            | 16,57           | 11,37          | 5,55          |

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Pela análise dos valores informados na **Tabela 22** é possível observar que as incertezas associadas às perdas no rotor, assim como as perdas no estator, são crescentes com o aumento da carga, já a razão entre a média e a incerteza combinada apresentou comportamento decrescente.

Tabela 23 – Parâmetros obtidos das perdas suplementares pela utilização do FEIMC para o motor “A”.

| <b>Ponto de operação</b>     | <b>148%</b>    | <b>127%</b>    | <b>98%</b>     | <b>76%</b>    | <b>53%</b>    | <b>25%</b>   |
|------------------------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|--------------|
| Média (W)                    | 115,74         | 82,86          | 48,26          | 28,64         | 13,25         | 2,97         |
| Desvio padrão (W)            | 68,59          | 49,38          | 31,92          | 21,12         | 12,02         | 6,14         |
| Intervalo de confiança (95%) | (0,01; 247,18) | (0,01; 175,14) | (0,01; 103,23) | (0,01; 62,07) | (0,01; 28,73) | (0,01; 6,41) |
| Incerteza combinada (W)      | 131,44         | 92,28          | 54,97          | 33,43         | 15,48         | 3,44         |

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Observa-se que o limite inferior do intervalo de confiança foi 0,01 em todas as perdas suplementares. Não tendo sido encontrada nenhuma falha na modelagem do programa, avalia-se que este resultado se deve à sensibilidade das perdas suplementares com relação aos erros de medição, já que, como analisado em [9], estas perdas correspondem a uma pequena parcela das grandezas medidas. Com isto, a regressão linear que resulta no valor suavizado das perdas suplementares pode ser demasiadamente afetada em simulações com alto grau de erro aleatório.

Com as perdas e suas respectivas incertezas calculadas, obtiveram-se o rendimento médio, desvio padrão e o intervalo de confiança de 95% do motor apresentados na **Tabela 24**.

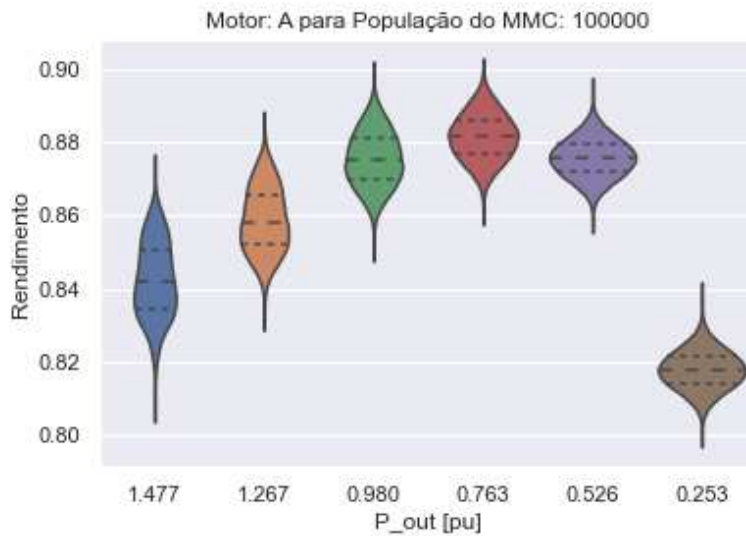
Tabela 24 – Rendimento obtido pela utilização do FEIMC para o motor “A”.

| <b>Ponto de operação</b>     | <b>148%</b>    | <b>127%</b>    | <b>98%</b>     | <b>76%</b>     | <b>53%</b>     | <b>25%</b>     |
|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Média (%)                    | 84,25          | 85,89          | 87,56          | 88,17          | 87,58          | 81,79          |
| Desvio padrão (%)            | 1,06           | 0,90           | 0,76           | 0,65           | 0,53           | 0,53           |
| Intervalo de confiança (95%) | (82,31; 86,22) | (84,30; 87,61) | (86,16; 89,02) | (86,94; 89,41) | (86,56; 88,62) | (80,76; 82,82) |
| Incerteza combinada (%)      | 1,97           | 1,72           | 1,46           | 1,24           | 1,04           | 1,03           |

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Para ilustrar os valores, optou-se pelo uso da representação gráfica do tipo violino, que permite a visualização dos histogramas e quartis para cada ponto do ensaio em um único gráfico, conforme mostra a **Figura 23**.

Figura 23 – Gráfico de violino da potência no eixo pelo rendimento para o motor “A”.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Pelos gráfico e tabela dos rendimentos é possível observar que o intervalo de confiança (95%) para os pontos de operação possui um comportamento crescente e não ultrapassou o limite de 3%, mesmo com a elevada incerteza associada às perdas suplementares. Também pode-se verificar que o desvio padrão tende a aumentar quanto maior a potência de saída do motor. Os gráficos de distribuição para a potência de saída menores que 0,8 p.u apresentam uma morfologia similar ao de uma distribuição do tipo normal. Após este ponto a distância entre o limite inferior do intervalo de confiança com relação à média tende a diminuir enquanto a distância para o limite superior tende a aumentar.

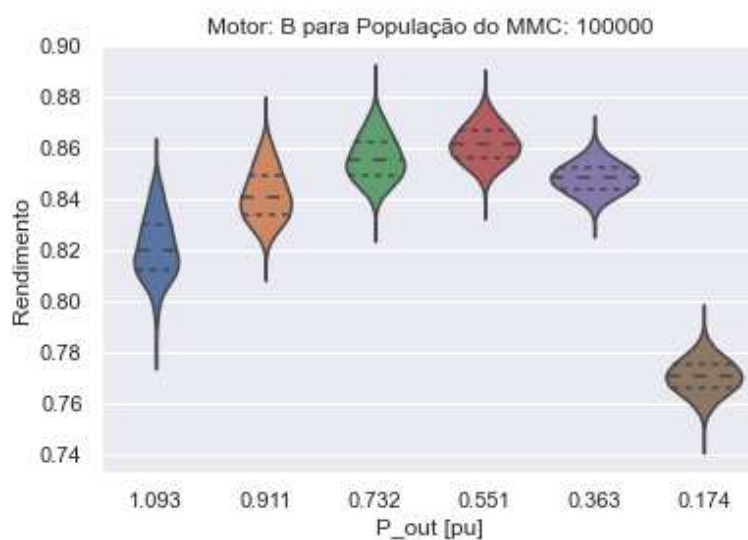
Finalizado o estudo do motor “A” pela aplicação do método de Monte Carlo, iniciou-se uma análise breve dos motores “B” e “C”.

### 5.3 ANÁLISE DOS MOTORES “B” E “C”

O estudo dos motores “B” e “C” foram feitos com os mesmos parâmetros iniciais usados no programa para o motor “A”.

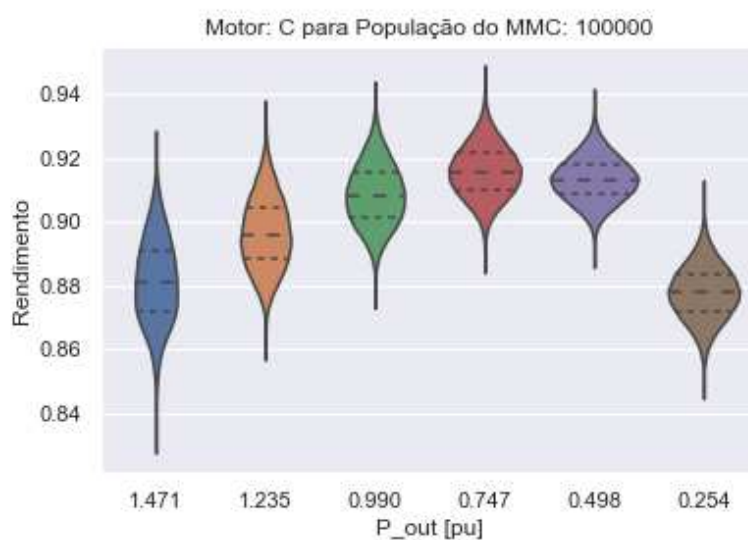
Os gráficos de distribuição das populações resultantes do programa são apresentados, para os motores “B” e “C” respectivamente, nas **Figuras 24 e 25**.

Figura 24 – Gráfico de violino da potência no eixo pelo rendimento para o motor “B”.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Figura 25 – Gráfico de violino da potência no eixo pelo rendimento para o motor “B”.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

As **Tabelas 25 e 26** mostram os valores de rendimento para os pontos de operação ensaiados, na devida ordem, para os motores “B” e “C”.

Tabela 25 – Rendimento obtido pela utilização do FEIMC para o motor “B”.

| <b>Ponto de operação</b>     | <b>109%</b>    | <b>91%</b>     | <b>73%</b>     | <b>55%</b>     | <b>36%</b>     | <b>17%</b>     |
|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Média                        | 82,10          | 84,17          | 85,59          | 86,14          | 84,82          | 77,02          |
| Desvio padrão                | 1,27           | 1,05           | 0,91           | 0,76           | 0,62           | 0,71           |
| Intervalo de confiança (95%) | (79,78; 84,67) | (82,36; 86,31) | (83,97; 87,44) | (84,73; 87,66) | (83,64; 86,05) | (75,64; 78,42) |
| Incerteza combinada          | 2,57           | 2,14           | 1,85           | 1,52           | 1,23           | 1,40           |

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Tabela 26 – Rendimento obtido pela utilização do FEIMC para o motor “C”.

| <b>Ponto de operação</b>     | <b>149%</b>    | <b>125%</b>    | <b>100%</b>    | <b>75%</b>     | <b>50%</b>     | <b>26%</b>     |
|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Média                        | 89,50          | 90,78          | 91,80          | 92,36          | 91,97          | 88,42          |
| Desvio padrão                | 1,27           | 1,11           | 0,94           | 0,77           | 0,65           | 0,80           |
| Intervalo de confiança (95%) | (87,13; 91,80) | (88,69; 92,83) | (90,00; 93,53) | (90,56; 93,80) | (90,70; 93,24) | (86,85; 90,00) |
| Incerteza combinada          | 2,30           | 2,05           | 1,73           | 1,44           | 1,27           | 1,58           |

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Nota-se que, assim como o motor “A”, os motores “B” e “C” também apresentaram uma incerteza combinada não superior à 3% do rendimento. As observações sobre o formato da distribuição resultante são igualmente válidas.



## 6 CONCLUSÃO

O objetivo do trabalho foi desenvolver um programa computacional, pela aplicação do método de Monte Carlo, que consiste em um método numérico que gera conjuntos de entradas do sistema com base em suas distribuições de probabilidade, para a estimação das incertezas de medição no estudo do rendimento de motores de indução trifásicos. O rendimento é obtido pela aplicação do método B da IEEE Standard 112 pela segregação das perdas do motor, através da realização de medições da resistência dos enrolamentos na temperatura ambiente e ensaios térmicos, com carga e com o motor operando a vazio. Os ensaios apresentados na norma foram realizados com o auxílio da bancada de ensaios presente no LabMaq.

O programa foi desenvolvido em Python empregando as bibliotecas NumPy, Pandas, PyQt6, entre outras. Sua aplicação se limitou, no escopo deste trabalho, para a aplicação do método B da IEEE 112, entretanto a estruturação do projeto possibilita a implementação de diferentes metodologias de análise. Sua validação se deu em duas partes, cujos critérios são: Comparação entre os resultados obtidos por meio de planilhas ou cálculos manuais com o resultados apresentados pelo programa sem considerar as incertezas dos equipamentos, e a verificação das propriedades de soma para distribuições normais e retangulares.

Efetou-se a estimação das incertezas de medição para três motores, previamente ensaiados na bancada de ensaios, a fim de apresentar o funcionamento do programa. Observou-se que, para a bancada de ensaio usada, as incertezas de rendimento pelo método B da IEEE 112 são de até 3% e as curvas de densidade de probabilidade para cada ponto do ensaio tiveram um comportamento próximo de uma distribuição normal para carregamentos de até 80%. Para valores de carga superiores, a distância entre a média e o limite inferior do intervalo de confiança foi menor que a distância do limite superior para a média. Notou-se que as incertezas associadas às perdas suplementares foram relativamente altas, para os motores.

Durante a etapa de desenvolvimento do projeto perceberam-se oportunidades para aprimoramentos futuros do programa, sendo elas: Determinação da população do Método de Monte Carlo de forma iterativa, comparação entre ensaios de um mesmo motor, aplicação de formas de visualização de dados tridimensionais e desenvolver um modelo para equipamentos (TCs, TPs, sensores, entre outros) conectados entre o objeto de estudo e o equipamento de medição. Trabalhos futuros na mesma linha de estudo poderão abranger a aplicação do programa em outros métodos de ensaios vigentes na norma, o estudo das dispersões dos resultados gerados pelo *software* e a comparação das incertezas obtidas pela aplicação do programa com os valores esperados pela literatura.



## REFERÊNCIAS

- 1 CARLSON, W. B. *Tesla: Inventor of the Electrical Age*. [S.l.]: Princeton University Press, 2015. Illustrated edition.
- 2 WEG. *Índices de Rendimento*. Disponível em: <<https://www.weg.net/institutional/BR/pt/solutions/energy-efficiency/efficiency-index>>. Acesso em: 26 Setembro 2021.
- 3 Ministério de Minas e Energia. *PORTARIA INTERMINISTERIAL N<sup>o</sup> 553*. 2005. Disponível em: <[https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cgiee/arquivos/portarias/portaria\\_interministerial\\_nx\\_553\\_2005.pdf](https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cgiee/arquivos/portarias/portaria_interministerial_nx_553_2005.pdf)>. Acesso em: 04 Abril 2022.
- 4 IEEE. *IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*. [S.l.], 2018. 1-115 p.
- 5 ABNT. *Máquinas elétricas girantes - Parte 3: Motores de indução trifásicos - Métodos de ensaio*. [S.l.], 2014. 1-121 p.
- 6 IEC. *Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)*. [S.l.], 2014. 1-186 p.
- 7 INMETRO. *Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão de incerteza de medição*. [S.l.], 2008.
- 8 MARTINS, L. E. et al. Estruturação de procedimentos de ensaio para motores de indução trifásicos. Florianópolis, SC, 2020.
- 9 WENGERKIEVICZ, C. A. C. et al. Estudo e desenvolvimento de metodologias não-intrusivas para estimação de rendimento de motores de indução trifásicos em operação. 2021.
- 10 BRESOVITT, A. H. *Desenvolvimento de software para integração de instrumentos e aquisição de dados em bancada de testes de motores de indução*. Monografia (TCC) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2020.
- 11 JUNIOR, A. A. G. *Fundamentos de metrologia científica e industrial: Revisada, Atualizada e Ampliada*. [S.l.]: Editora Manole, 2017. 1-480 p.
- 12 JCGM. *Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method*. [S.l.: s.n.], 2008. 1-82 p.
- 13 METROPOLIS, N.; ULAM, S. The monte carlo method. *Journal of the American statistical association*, Taylor & Francis, v. 44, n. 247, p. 335–341, 1949.
- 14 PORTAL\_ELETRICISTA. *Motor Trifásico – O que é, Partidas indiretas x partidas diretas, dicas, passo a passo*. Disponível em: <<https://www.portaleletricista.com.br/motor-trifasico/>>. Acesso em: 06 Abril 2022.
- 15 CHAPMAN, S. J. *ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS*. [S.l.: s.n.], 1985. v. 4th ed. 1551-1558 p.

- 16 YOKOGAWA. *WT500 Mid-Range Power Analyzer*. Disponível em: <<https://tmi.yokogawa.com/br/solutions/products/power-analyzers/wt500-power-analyzer/#Documentos-e-Downloads>>. Acesso em: 05 Abril 2022.
- 17 HBM. *Sensor Digital Universal de Torque T40B*. Disponível em: <[https://www.hbm.com/pt/3004/sensor-de-torque-universal-t40b-para-bancos-de-ensaios/?gclid=CjwKCAjw0a-SBhBkEiwApljU0kVYxlpChx93A5\\_urNKbFTyeI6Mkixs\\_xdUSHdIZ7nG4wz8W1oAArxCfFwQAvD\\_BwE&product\\_type\\_no=Transdutor%20Universal%20de%20torque](https://www.hbm.com/pt/3004/sensor-de-torque-universal-t40b-para-bancos-de-ensaios/?gclid=CjwKCAjw0a-SBhBkEiwApljU0kVYxlpChx93A5_urNKbFTyeI6Mkixs_xdUSHdIZ7nG4wz8W1oAArxCfFwQAvD_BwE&product_type_no=Transdutor%20Universal%20de%20torque)>. Acesso em: 05 Abril 2022.
- 18 TECHNOLOGIES, K. *Keysight Technologies - 34410A and 34411A Multimeters*. Disponível em: <<https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-01326/data-sheets/5989-3738.pdf>>. Acesso em: 05 Abril 2022.
- 19 YOKOGAWA. *Touch Screen GP10/GP20*. Disponível em: <<https://www.yokogawa.com/solutions/products-platforms/data-acquisition/data-logger/touch-screen-gp10-gp20/#Details>>. Acesso em: 05 Abril 2022.
- 20 HOSODA, G. *Ferramenta de estudo de incertezas de medição pelo método de Monte Carlo*. Disponível em: <<https://github.com/GHosoda/FEIMC>>. Acesso em: 04 Abril 2022.
- 21 PANDAS. *pandas documentation*. Disponível em: <<https://pandas.pydata.org/docs/>>. Acesso em: 06 Abril 2022.
- 22 QT. *Qt for Python*. Disponível em: <<https://doc.qt.io/qtforpython/>>. Acesso em: 06 Abril 2022.

## Apêndices



## APÊNDICE A – CÓDIGO EXEMPLO DO MÉTODO DE MONTE CARLO

```
import numpy as np

#Gera as populacoes das grandezas
def mmc(V, dV, I, sI, f, p = 1000):
    I = np.random.normal(loc = I, scale = sI, size = p)
    V = np.random.uniform(low = V - dV, high = V+dV, size = p)
    f = np.ones(p)*f
    L = V/(2*np.pi*I*f)*1000
    return [I, V, f, L]

#Calcula os parametros listados para cada grandeza
def parametros(vetor):
    dici = {'Media': vetor.mean(), 'Desvio_Padrao': vetor.std(),
           'Mediana': np.median(vetor), 'Maximo': vetor.max(),
           'Minimo': vetor.min()}
    return dici

#Inicio do programa
vetores = mmc(V = 10, dV = 0.4, I = 1, sI = 0.05, f = 60)
vetores = [parametros(vetor) for vetor in vetores]
```





## Anexos



# ANEXO A – FORMULÁRIO B2 - IEEE 112

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 <u>(1)<sup>a</sup></u> Ohms @ <u>(2)</u> °C from 6.4.2.2                         |   |  |
|---|---|--|
| Hot stator winding resistance between terminals <u>(3)</u> Ohms @ <u>(4)<sup>b</sup></u> °C in <u>(5)</u> °C ambient from 6.4.2.3 |   |  |
| Rated load temp. test stator temperature rise <u>(6)</u> °C, (6) = (4) – (5)  |   | (4) = $\{[(3)/(1)] \times [k_1 + (2)]\} - k_1$                                   |
| Total stator temperature, $t_s$ , <u>(7)</u> °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, $t_s$ , 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               | $= 120 \times (10)/(10a)$  |
| 12  | Speed, in r/min                           | $= (11) - (13)^c$  |
| 13  | Slip speed, in r/min                      | $= (11) - (12)^c$  |
| 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, $V_{core}$           | From 6.4.3.3   |
| 19  | Core loss, in W                           | From 6.4.3.3   |
| 20  | Stator $I^2R$ loss, in W                  | $= 1.5 \times (16)^2 \times R$ , 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 $I^2R$ loss, in W                   | $= (21) \times (14)$   |
| 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                         | $= (27) \times (12)/9.549$   |
| 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 <u>(31)</u> Slope <u>(32)</u> Correlation factor <u>(33)</u> Point deleted <u>(34)</u>                                  |   |  |
| (31), (32), (33), and (34) from the linear regression analysis of (30) and (27) entries as described in 6.4.3.8                   |   |  |
| 35  | Stator $I^2R$ loss, in W, at $t_s$        | $= 1.5 \times (16)^2 \times (3) \times \{[k_1 + (7)]/[k_1 + (4)]\}^{c,d}$        |
| 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.                   | $= (14) \times [k_1 + (7)]/[k_1 + (9)]^b$  |
| 38  | Corrected speed, in r/min                 | $= (11) \times [1.00 - (37)]$  |
| 39  | Rotor $I^2R$ loss, in W, at $t_s$         | $= (37) \times (36)$   |
| 40  | Corrected stray-load loss, in W           | $= (32) \times (27)^2$   |
| 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 %                          | $= 100 \times (42)/(17)$ for a motor<br>$= 100 \times (17)/(42)$ for a generator |
| 44  | Power factor, in %                        | $= 100 \times (17)/[1.732 \times (15) \times (16)]$                              |

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

<sup>b</sup> In (4), (20), (35), and (37), select  $k_1$  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  $t_s$  from a duplicate machine use  $(35) = 1.5 \times (16)^2 \times (1) \times \{[k_1 + (7)]/[k_1 + (2)]\}$