

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE ENERGIA**

**TABATA PENALVA LUQUE OLIVEIRA**

**ANÁLISE DOS HARMÔNICOS EM UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO COM  
O ANALISADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA**

**DOURADOS, 2025**



**TABATA PENALVA LUQUE OLIVEIRA**

**ANÁLISE DOS HARMÔNICOS EM UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO COM  
O ANALISADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Faculdade de Engenharia da Universidade  
Federal da Grande Dourados, como requisito  
parcial para obtenção do título de Engenheiro  
de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Gerson Bessa Gibelli

**DOURADOS, 2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

O48a Oliveira, Tábata Penalva Luque

Análise dos Harmônicos em um Motor de Indução Trifásico com o Analisador de Qualidade de Energia [recurso eletrônico] / Tábata Penalva Luque Oliveira. -- 2026.

Arquivo em formato pdf.

Orientador: Gerson Bessa Gibelli.

TCC (Graduação em Engenharia de Energia)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2025.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:

<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Motor de Indução Trifásico. 2. Harmônicos. 3. Qualidade de Energia. 4. Distorção Harmônica Total (DHT). I. Gibelli, Gerson Bessa. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

TABATA PENALVA LUQUE OLIVEIRA

**ANÁLISE DOS HARMÔNICOS EM UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO COM O  
ANALISADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA**

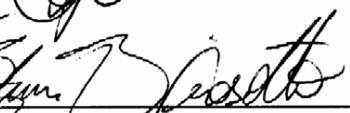
Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal da Grande Dourados, na área de concentração 3.04.04.05-3 Máquinas Elétricas e Dispositivos de Potência, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de Energia.

**BANCA EXAMINADORA**

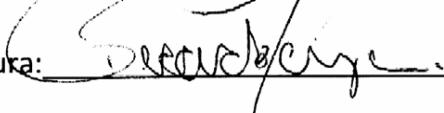
Orientador: Gerson Bessa Gibelli

Assinatura: 

Membro: Etienne Biasotto

Assinatura: 

Membro: Ricardo Camparim

Assinatura: 

**DOURADOS-MS**

**05 DE DEZEMBRO DE 2025**



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela força e sabedoria concedidas ao longo desta caminhada.

Agradeço profundamente à minha família por todo apoio, paciência e incentivo durante essa jornada. Em especial, sou grata por todo o suporte que recebi nos momentos mais desafiadores, principalmente com os cuidados com meu filho pequeno, o que me permitiu seguir firme nos estudos e alcançar esta conquista.

Aos meus pais, Eugenio e Benni, que sempre se dedicaram incansavelmente para me oferecer uma educação de qualidade desde a infância — base fundamental para que eu pudesse chegar até aqui. Aos meus irmãos, Samanta e Diego, pela presença constante, companheirismo e por estarem ao meu lado nos momentos difíceis com palavras de força e gestos de carinho.

Ao meu marido, Willian, que enfrentou sua própria trajetória acadêmica enquanto conciliava trabalho e responsabilidades familiares, meu mais sincero reconhecimento. Sua dedicação em buscar melhores condições para nossa família, mesmo diante do cansaço e da rotina intensa, foi essencial para que eu também pudesse seguir em frente. Obrigada por ser meu parceiro, por me motivar e por compartilhar comigo cada passo dessa jornada.

E, com todo o amor do mundo, agradeço e dedico este trabalho ao meu filho, Octávio Luiz, que mesmo tão pequeno, com apenas 5 anos, me ensinou sobre força, paciência e motivação. Sua existência é a minha maior inspiração, e é por você que lutei, dia após dia, para chegar até aqui. Que este seja apenas o começo de um futuro cheio de orgulho para nós dois.

Aos amigos que fiz ao longo do curso, meu sincero agradecimento pela parceria, trocas de conhecimento, apoio nos trabalhos, provas e nas inúmeras conversas que tornaram essa jornada mais leve e significativa. Cada momento compartilhado contribuiu para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

Aos amigos de fora do curso, que mesmo não estando diretamente envolvidos nessa etapa, demonstraram carinho, compreensão e incentivo nos momentos em que precisei me ausentar ou priorizar os estudos. Obrigada por continuarem ao meu lado, mesmo nos períodos mais difíceis.

Aos meus professores, por todo conhecimento compartilhado, pela dedicação, paciência e pela forma que conduziram o processo de ensino ao longo do curso. Cada aula, orientação e conselho foi essencial para minha formação acadêmica e profissional. Agradeço especialmente àqueles que, com entusiasmo e compromisso, foram inspiração e motivação para seguir em frente, mesmo diante dos desafios. Em especial, agradeço ao meu orientador, professor Dr.

Gerson Bessa Gibelli, pela orientação atenciosa, pelos valiosos ensinamentos e pela confiança depositada ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço, de forma geral, a todos que, de alguma maneira, contribuíram para minha trajetória até aqui e para a construção do conhecimento que levo comigo.

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento de um Motor de Indução Trifásico (MIT) utilizando uma fonte alimentadora para partida e um analisador de qualidade de energia para monitoramento da corrente e da tensão elétrica. Os dados obtidos foram comparados com as características de desempenho fornecidas no catálogo do MIT. O foco principal da análise foi identificar a presença de harmônicos nas correntes e tensões quando diferentes cargas foram aplicadas ao eixo do MIT, avaliando suas implicações na qualidade da energia e o desempenho do sistema. Os resultados foram analisados com base nos limites estabelecidos pelas normas IEEE Std 519-2022 e IEC 61000-3-2, que tratam da distorção harmônica em tensão e corrente.

**Palavras-chave:** Motor de Indução Trifásico, Harmônicos, Qualidade de Energia, Distorção Harmônica Total (DHT), Normas IEEE e IEC.



## ABSTRACT

This study aims to analyze the behavior of a Three-Phase Induction Motor (TPIM) using a power supply for the starting process and a power quality analyzer to monitor electrical current and voltage. The obtained data were compared with the performance characteristics provided in the motor catalog. The main focus of the analysis was to identify the presence of harmonics in the currents and voltages when different loads were applied to the motor shaft, evaluating their implications for power quality and system performance. The results were analyzed based on the limits established by the IEEE Std 519-2022 and IEC 61000-3-2 standards, which address harmonic distortion in voltage and current.

**Keywords:** Three-Phase Induction Motor, Harmonics, Power Quality, Total Harmonic Distortion (THD), IEEE and IEC standards.



## **Lista de Ilustrações**

Figura 1 – Motor de Indução Trifásico .....	21
Figura 2 – Curva CBEMA .....	27
Figura 3 – Ondas deformadas e sua componentes harmônicas .....	30
Figura 4 – Soma das Correntes harmônicas de ordem 3 no neutro .....	34
Figura 5 – Bancada Experimental LAMAE .....	35
Figura 6 – Fonte de Alimentação Trifásica .....	36
Figura 7 – Controlador de Torque e Rotação .....	36
Figura 8 – Motor de Indução Trifásico .....	37
Figura 9 – Dados de Placa do Motor de Indução Trifásico (MIT) .....	37
Figura 10 – Analisador de Qualidade de Energia .....	38
Figura 11 – Multímetro Alicate .....	38
Figura 12 – Termômetro Digital .....	39
Figura 13 – Características de Desempenho do Motor Elétrico de Indução Rotor de Gaiola em Vazio .....	40
Figura 14 – Características de Desempenho do Motor Elétrico de Indução Rotor de Gaiola com 50% de carga .....	40
Figura 15 – Características de Desempenho do Motor Elétrico de Indução Rotor de Gaiola com 75% de carga .....	41
Figura 16 – Características de Desempenho do Motor Elétrico de Indução Rotor de Gaiola com 100% de carga .....	41
Figura 17 – Gráfico do perfil da tensão da Fase L1 com 0% de Carga .....	43
Figura 18 – Gráfico do perfil da tensão da Fase L1 com 50% de Carga .....	44
Figura 19 – Gráfico do perfil da tensão da Fase L1 com 75% de Carga .....	44
Figura 20 – Gráfico do perfil da tensão da Fase L1 com 100% de Carga .....	45
Figura 21 – Gráfico do perfil da tensão da Fase L2 com 0% de Carga .....	46
Figura 22 – Gráfico do perfil da tensão da Fase L2 com 50% de Carga .....	46
Figura 23 – Gráfico do perfil da tensão da Fase L2 com 75% de Carga .....	47
Figura 24 – Gráfico do perfil da tensão da Fase L2 com 100% de Carga .....	48
Figura 25 – Gráfico do perfil da tensão da Fase L3 com 0% de Carga .....	48
Figura 26 – Gráfico do perfil da tensão da Fase L3 com 50% de Carga .....	49
Figura 27 – Gráfico do perfil da tensão da Fase L3 com 75% de Carga .....	50
Figura 28 – Gráfico do perfil da tensão da Fase L3 com 100% de Carga .....	50

Figura 29 – Gráfico do perfil da corrente da Fase L1 com 0% de Carga .....	52
Figura 30 – Gráfico do perfil da corrente da Fase L1 com 50% de Carga .....	53
Figura 31 – Gráfico do perfil da corrente da Fase L1 com 75% de Carga .....	54
Figura 32 – Gráfico do perfil da corrente da Fase L1 com 100% de Carga .....	55
Figura 33 – Gráfico do perfil da corrente da Fase L2 com 0% de Carga .....	55
Figura 34 – Gráfico do perfil da corrente da Fase L2 com 50% de Carga .....	56
Figura 35 – Gráfico do perfil da corrente da Fase L2 com 75% de Carga .....	57
Figura 36 – Gráfico do perfil da corrente da Fase L2 com 100% de Carga .....	57
Figura 37 – Gráfico do perfil da corrente da Fase L3 com 0% de Carga .....	58
Figura 38 – Gráfico do perfil da corrente da Fase L3 com 50% de Carga .....	59
Figura 39 – Gráfico do perfil da corrente da Fase L3 com 75% de Carga .....	59
Figura 40 – Gráfico do perfil da corrente da Fase L3 com 100% de Carga .....	60
Figura 41 – Gráfico das Harmônicas em Relação à Tensão .....	66
Figura 42 – Gráfico das Harmônicas em Relação à Corrente .....	68

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1 – Valores para os Sinais 1, 5 e T referente a Figura 2 .....	30
Tabela 2 – Níveis de Tensão .....	33
Tabela 3 – Limites para as harmônicas de corrente .....	33
Tabela 4 – Valores de tensão e corrente de acordo com as Características de Desempenho do Motor .....	42
Tabela 5 – Dados de Tensão, Corrente e Rotação .....	42
Tabela 6 – Valores das Harmônicas em Relação à Tensão .....	66
Tabela 7 – Valores das Harmônicas em Relação à Corrente .....	68



## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANSI – American National Standards Institute

CA – Corrente Alternada

CBEMA – Computer and Business Equipment Manufacturers Association

DHT – Distorção Harmônica Total

$DHT_f$  – Distorção Harmônica Total em Relação a Componente Fundamental

$DHT_r$  – Distorção Harmônica Total em Relação ao Sinal Total

IEC – International Electrotechnical Commission

IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrotécnicos

LAMAE – Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos

MIT – Motor de Indução Trifásico

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

QEE – Qualidade da Energia Elétrica

S – Escorregamento

$n_1$  – Velocidade de Rotação do Motor

n – Velocidade Síncrona

N – Rotação por Minuto

F – Frequência da Rede Elétrica

$\rho$  – Número de Pares de Polos do Motor

$I_{\max}(R, S, T)$  – Corrente Máxima entre as Fases R, S e T

$I_{\text{média}}$  – Corrente Média das Fases R, S e T

$U_{\max}(R, S, T)$  – Tensão Máxima entre as Fases R, S e T

$U_{\text{média}}$  – Tensão Média das Fases R, S e T

$I_{\text{rms}}$  – Valor Eficaz da Corrente

$U_{\text{rms}}$  – Valor Eficaz da Tensão

FP – Fator de Potência

P – Potência Ativa

S – Potência Aparente

FC – Fator de Crista

$I_{\text{pico}}$  – Valor Pico da Corrente

K – Fator de Desclassificação de Transformadores

$S_{\max}$  – Máxima Potência Fornecida

$i_n$  – Valor Eficaz da Corrente Harmônica de Ordem  $h$

$h$  – Ordem da Harmônica

L1 – Fase 1

L2 – Fase 2

L3 – Fase 3

## Sumário

1	INTRODUÇÃO .....	21
1.1.	OBJETIVO .....	23
1.2.	JUSTIFICATIVA .....	23
1.3.	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	25
2.1.	PRODIST .....	25
2.2.	PERTURBAÇÕES ELÉTRICAS.....	25
2.2.1	Perturbações na Amplitude da Tensão .....	26
2.2.2	Perturbações na Frequência do Sinal.....	27
2.2.3	Desequilíbrios de Tensão ou Corrente em Sistemas Trifásicos .....	27
2.2.4	Perturbações na Forma de Onda do Sinal (Harmônicas).....	28
2.3.	HARMÔNICAS .....	28
2.3.1	Limites de harmônicos segundo normas nacionais e internacionais .....	32
2.3.2	Harmônicas <i>Triplen</i> e Sistemas Trifásicos .....	34
3	METODOLOGIA .....	35
3.1.	BANCADA EXPERIMENTAL .....	35
3.2.	CURVA CARACTERÍSTICA DO MOTOR .....	39
3.3.	ENSAIOS DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO – MIT .....	42
3.3.1	Tensão no Motor.....	43
3.3.2	Análise da Corrente do Motor .....	52
4	RESULTADO E DISCUSSÕES .....	65
4.1.	ANÁLISE DAS HARMÔNICAS EM RELAÇÃO À TENSÃO .....	65
4.2.	ANÁLISE DAS HARMÔNICAS EM RELAÇÃO À CORRENTE .....	67
5	CONCLUSÃO .....	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	73



## 1 INTRODUÇÃO

O Motor de Indução Trifásico (MIT) é uma máquina que possui dois campos magnéticos girantes, é conhecido também como motor de Corrente Alternada (CA), ou motor assíncrono trifásico. É composto por duas partes que funcionam simultaneamente: o rotor, que é o elemento móvel do motor e o estator, que é o elemento fixo. O estator conduz e transforma a energia elétrica em mecânica, enquanto isso, o rotor promove movimento de rotação, produzindo, a partir da força dos campos magnéticos, energia. O MIT é formado por três partes principais, como o estator, o rotor, e o entreferro, além de outros elementos, como as bobinas, anéis de cobre e enrolamentos (FITZGERALD *et al.*, 2006). O MIT é apresentado na Figura 1.

*Figura 1 – Motor de Indução Trifásico*



*Fonte: (Voges, 2015).*

O estator é fixo à carcaça de um motor elétrico, conduz o fluxo magnético que se forma no motor, que induz uma corrente elétrica. Sua estrutura é composta por chapas em forma de anel de aço magnético tratado termicamente. Estas chapas abrigam os enrolamentos que geram o campo magnético. O rotor possui dois modelos, os bobinados ou de anéis. É um conjunto de peças que gira ao redor de seu próprio eixo, rotacionando. Pode ser encontrado em máquinas rotativas, como compressores ou turbinas. É composto por chapas de aço magnético e possui rolamentos dispostos de forma longitudinal. O entreferro é o nome dado ao espaço existente entre o estator e o rotor. Esta área de ar anular é onde ocorre a conversão eletromecânica do motor de indução (BARBI, 1985).

Utilizando tensão alternada no estator, o motor de indução produz um campo girante ou campo magnético rotativo que atravessa os condutores do rotor induzido a uma força

eletromotriz que cria seu próprio campo girante, no qual busca se alinhar ao campo girante do estator, fazendo com que o rotor gire constantemente. A velocidade do motor é inversamente proporcional à quantidade de polos, ou seja, quanto maior a quantidade de polos, menor a velocidade do motor. O torque do motor varia de acordo com a intensidade da comunicação entre os campos do estator e do rotor. É importante ressaltar que a velocidade de rotação do rotor é menor que a velocidade de rotação do campo girante do estator, revelando uma situação não sincronizada, ou seja, assíncrona (BARBI, 1985).

A velocidade síncrona possui sincronia com a quantidade de polos e a frequência da rede é dada pela Equação 1. Há um fator chamado escorregamento ou deslizamento, que influencia a frequência da força eletromotriz induzida no rotor. Trata-se da diferença entre a velocidade de rotação do rotor e a velocidade síncrona, apresentada em porcentagem, como se vê na Equação 2.

$$n = n_1 \cdot (1 - S) \quad (1)$$

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (2)$$

Os harmônicos em motores de indução são formas de onda que se propagam além da frequência fundamental da rede elétrica, que podem ser causadas por diversos fatores, como a presença de cargas não lineares na rede elétrica, falhas no isolamento do motor ou problemas na alimentação elétrica. Esses harmônicos podem prejudicar a operação do motor de indução, causando vibrações excessivas, elevação de temperatura e ruído, bem como a diminuição da eficiência energética, além de causar danos ao motor, afetando sua vida útil (RIBEIRO & AGUIAR, 2012).

Em diversos equipamentos industriais, precisa-se obter variação de velocidade nos mecanismos que regulam as ações das máquinas e dispositivos. O uso de sistemas mecânicos de variação ou transformação de movimento ocasionam aumento na manutenção dos sistemas, necessidade de manutenção corretiva e preventiva que demandam de grande tempo da máquina parada, acarretando alto custo de peças e mão de obra, se fazendo necessário criar ferramentas que mudem a velocidade diretamente nos pontos motrizes. Os motores elétricos em geral são construídos para operarem em rotações fixas, que são determinadas pelos fatores construtivo e elétrico. Onde o primeiro se refere a quantidade de polos que um motor possui, já o elétrico, refere-se à frequência elétrica da rede aplicada no motor.

Essa ligação entre a quantidade de polos de um motor elétrico e a frequência aplicada no mesmo, define quantas rotações o motor poderá atingir. Um fator está ligado ao outro, ou seja, se mudada a quantidade de polos de um motor ou sua frequência elétrica, pode-se obter variação de sua rotação. Para definir essa ligação, utiliza-se a seguinte expressão matemática apresentada na Equação 3.

$$N = \frac{F \times 120}{\rho} \quad (3)$$

Onde:

- N representa as rotações por minuto (rpm);
- F representa a frequência da rede elétrica (Hz);
- $\rho$  representa o número de pares de polos do motor.

### 1.1. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo analisar os harmônicos de corrente e tensão de um Motor de Indução Trifásico em diferentes porcentagens de cargas aplicadas ao eixo do motor, utilizando um Analisador de Qualidade de Energia como instrumento principal para aquisição e análise dos dados obtidos, buscando identificar como a presença de harmônicos impactam no desempenho do sistema e na qualidade de energia.

### 1.2. JUSTIFICATIVA

Com o crescente uso de cargas não lineares nos sistemas elétricos, os harmônicos se tornam cada vez mais presentes, sendo uma grande preocupação na qualidade na energia elétrica, pois sua presença pode causar diversos problemas aos equipamentos, como elevação da temperatura, redução da vida útil, perdas elétricas, dentre outras falhas. Por isso, torna-se importante analisar e compreender como os harmônicos impactam no funcionamento dos motores.

### 1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho foi dividido como se mostra a seguir:

- No Capítulo 2 são apresentados o PRODIST, as perturbações elétricas e o objetivo principal do estudo, sendo os harmônicos.

- No Capítulo 3 são apresentados os ensaios e procedimentos para obtenção dos dados de estudo.
- No Capítulo 4, são apresentados os resultados e discussões dos ensaios realizados.
- O Capítulo 5 apresenta a conclusão do trabalho, onde são feitas as análises finais do objeto de estudo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo abordará aspectos gerais da energia elétrica, dando destaque para as perturbações que ocorrem em um sistema de distribuição, enfatizando as harmônicas. Serão discutidas as causas, características e efeitos, se aprofundando nas harmônicas geradas por motores de indução.

### 2.1. PRODIST

O PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica) são documentos elaborados pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), com participação dos agentes de distribuição e outras entidades e associações do setor elétrico nacional, que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2021).

O PRODIST é estruturado em módulos que abrangem desde o planejamento da expansão da rede até os procedimentos de faturamento. Sua aplicação é essencial para assegurar a qualidade e confiabilidade do sistema elétrico brasileiro, definindo as possibilidades, direitos e deveres de todos os agentes do setor (ANEEL, 2021).

Dentre os módulos que compõem este regulamento, o Módulo 8 assume papel relevante no estudo da Qualidade da Energia Elétrica (QEE). Segundo este normativo, as distorções harmônicas são classificadas como fenômenos associados a deformações nas formas de onda de tensão e corrente, resultantes da presença de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental (60 Hz). A presença de tais distorções no fornecimento é um fator crítico para a operação de máquinas elétricas, visto que pode acarretar perdas suplementares, aquecimento excessivo e redução da vida útil dos equipamentos.

### 2.2. PERTURBAÇÕES ELÉTRICAS

Os valores associados aos parâmetros que apontam um sinal de corrente ou tensão em uma instalação elétrica podem ser mudados por diversos fatores, como por exemplo: partida de motores, uso de equipamentos eletrônicos, dentre outros. Sendo assim, pode-se afirmar que houve alteração na qualidade do sinal, ou que a qualidade de energia foi prejudicada (MORENO, 2019).

Podem ser, de acordo com Moreno, produzidos quatro tipos de perturbações elétricas básicas em um sinal de tensão ou corrente em uma instalação elétrica.

### 2.2.1 Perturbações na Amplitude da Tensão

A perturbação de amplitude acontece quando, por um sinal senoidal, são produzidas variações de tensão, como afundamento (*sag*), interrupção, sobretensão, sobretensão transitória, flutuação, cintilação (*flicker*) e subtensão. Onde, o afundamento (*sag*) corresponde a uma brusca diminuição da tensão, seguida de um restabelecimento após um pequeno intervalo de tempo.

A ocorrência de afundamentos e interrupções é frequentemente associada a eventos transitórios no sistema, seja por curto-círcuito, partidas ou comutações de cargas de altas potências. Com esse aumento da corrente, ocorre queda de tensão, que desaparecem quando as proteções atuam ou quando as cargas que partiram atingem seu regime permanente. De acordo com o Módulo 8 do PRODIST, estas variações são classificadas como Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) e devem ser monitoradas, pois desvios severos na amplitude impactam na eficiência do motor.

Fenômenos como sobretensões transitórias e a subtensão prolongada representam riscos significativos à integridade de máquinas elétricas. Enquanto transformadores e motores possuem certa robustez a impulsos de curta duração, a exposição contínua a amplitudes fora dos limites normativos compromete severamente a vida útil do isolamento dos enrolamentos devido ao aquecimento anômalo provocado pelo aumento da corrente em condições de torque constante (DUGAN *et al.*, 2012; ANEEL, 2021).

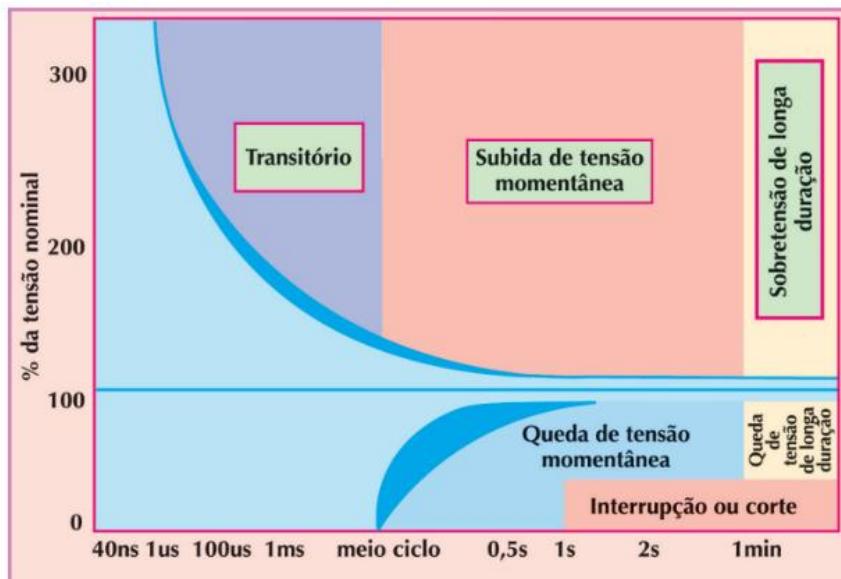
A flutuação de tensão é uma série de variações na amplitude do sinal, periódicas ou aleatórias, cujo efeito mais visível é a variação da luminosidade das lâmpadas. A cintilação ou *flicker*, pode ser percebida através da sensação visual de que a luminosidade está mudando. Quando a flutuação ocorre com uma forte queda de tensão, normalmente chamada de subtensão, os transformadores e máquinas girantes sofrem aquecimentos anormais devido ao aumento da corrente provocada pelas cargas de elevada potência ou torque constantes. Esse efeito pode se agravar em instalações elétricas subdimensionadas.

A Figura 2 mostra a Curva CBEMA, que ilustra o comportamento dos equipamentos eletrônicos a variações na qualidade da energia elétrica, onde no eixo vertical apresenta a porcentagem da tensão nominal, e no eixo horizontal, o tempo de duração da perturbação, dividido em cinco regiões diferentes:

- Transitório: indica rápidas variações e de curta variação;
- Subida de tensão momentânea: mostra breves aumentos na tensão acima do valor nominal;

- Queda de tensão momentânea: apresenta breves diminuições na tensão abaixo do valor nominal;
- Sobretensão de longa duração: indica aumentos prolongados na tensão acima do valor nominal;
- Interrupção ou corte: apresenta ausência de tensão.

**Figura 2 - Curva CBEMA.**



**Fonte:** (MORENO, 2019).

### 2.2.2 Perturbações na Frequência do Sinal

A frequência da rede elétrica é mantida por meio do equilíbrio dinâmico entre a potência ativa disponível no sistema e a carga total consumida. Variações nesse parâmetro impactam a velocidade de sincronismo do campo magnético girante nos motores de indução, afetando o fluxo no entreferro e o desempenho da máquina. O controle da frequência é essencial para estabilidade operativa, dado que desvios fora dos limites normativos podem ocasionar vibrações mecânicas irregulares e sobreaquecimento dos enrolamentos (SAADAT, 2010; DUGAN *et al.*, 2012).

### 2.2.3 Desequilíbrios de Tensão ou Corrente em Sistemas Trifásicos

Os desequilíbrios de corrente acontecem quando a intensidade nas três fases não é a mesma, ocasionando uma corrente diferente de zero no condutor neutro, resultando no sobreaquecimento nos componentes da instalação. Normalmente, em instalações elétricas, o

desequilíbrio máximo de corrente é de 10% (MORENO, 2019). O desequilíbrio de corrente pode ser demonstrado matematicamente, como na Equação 4.

$$DesequilíbrioCorrente(%) = \frac{[I_{max(R,S,T)} - I_{média}]}{I_{média}} \times 100\% \quad (4)$$

Com relação ao desequilíbrio de tensão, a referência normativa nacional é estabelecida pelo Módulo 8 do PRODIST. Este documento define o Fator de Desequilíbrio de Tensão como a razão entre a componente de sequência negativa e a componente de sequência positiva da tensão. De acordo com os padrões de qualidade estabelecidos pela ANEEL para redes de distribuição, o limite máximo aceitável para o desequilíbrio de tensão é de 2%. A observância deste limite é crucial para motores de indução, pois mesmo um baixo percentual de desequilíbrio de tensão pode causar um desequilíbrio de corrente significativamente maior, comprometendo a eficiência energética e o desempenho térmico da máquina (ANEEL, 2021). O desequilíbrio de tensão pode ser expresso matematicamente, como na Equação 5.

$$DesequilíbrioTensão(%) = \frac{[U_{max(R,S,T)} - U_{média}]}{U_{média}} \times 100\% \quad (5)$$

#### 2.2.4 Perturbações na Forma de Onda do Sinal (Harmônicas)

As harmônicas são perturbações na forma de onda senoidal, caracterizadas como componentes de frequências que são múltiplos inteiros da frequência fundamental. De acordo com a IEEE Std 519 (2022), essas distorções são causadas pela presença de cargas não lineares no sistema, que drenam correntes não senoidais, resultando em quedas de tensão harmônicas na impedância da rede. No caso de motores de indução, tais fenômenos induzem fluxos magnéticos adicionais no entreferro que geram torques opostos, vibrações e perdas suplementares por efeito Joule, resultando no envelhecimento precoce do sistema de isolamento (DUGAN *et al.*, 2012; FITZGERALD *et al.*, 2006).

### 2.3. HARMÔNICAS

Harmônicas são componentes sinusoidais de uma tensão ou corrente alternada cuja a frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental do sistema (no Brasil, 60 Hz). A ordem harmônica corresponde ao número de vezes que a frequência da harmônica é maior que

a fundamental. Na rede elétrica, as correntes harmônicas somam com a corrente fundamental, causando distorções na forma de onda original da rede. São causadas por equipamentos que têm carga não linear (transistores, tiristores, diodos, etc.). O aparecimento das harmônicas é avaliado pela Distorção Harmônica Total (DHT), que surgiu a partir da necessidade de se quantificar as harmônicas presentes no sistema. Há três aspectos considerados quando se trata de harmônicas (ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R., 2003):

- É um fenômeno de longa duração;
- Quanto maior a ordem harmônica, menor sua intensidade;
- As harmônicas de ordem ímpar são mais frequentes, de maior intensidade, gerando mais problemas.

A DHT pode ser quantificada de dois modos, com os índices “f” e “r”, que representam, respectivamente, a distorção harmônica em relação à componente fundamental e o grau de distorção harmônica total em relação ao sinal total.

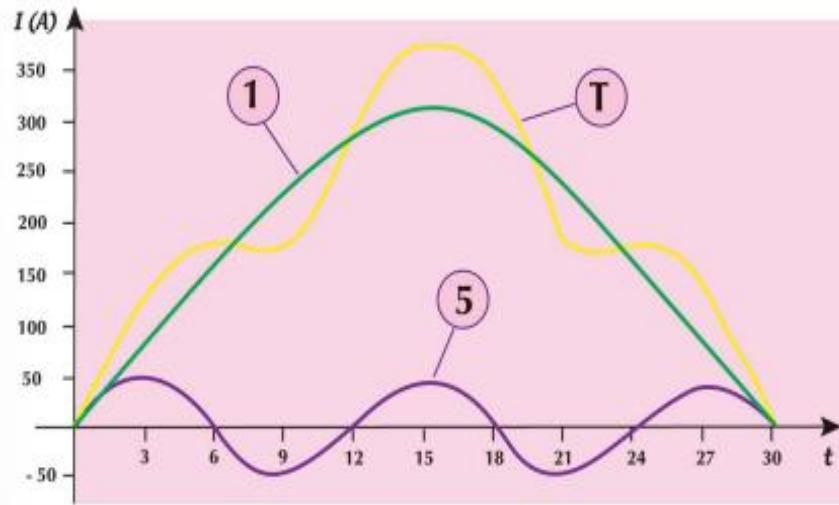
$$DHT_f = \frac{\sqrt{(h_2)^2 + (h_3)^2 + (h_4)^2 + \dots + (h_n)^2}}{h_1} \times 100\% \quad (6)$$

$$DHT_r = \frac{\sqrt{(h_2)^2 + (h_3)^2 + (h_4)^2 + \dots + (h_n)^2}}{\sqrt{(h_1)^2 + (h_2)^2 + (h_3)^2 + (h_4)^2 + \dots + (h_n)^2}} \times 100\% \quad (7)$$

Além da degradação que as componentes harmônicas causam na qualidade da energia elétrica, as harmônicas também podem diminuir a vida útil de transformadores e equipamentos elétricos, além de contribuir para o aumento da temperatura em máquinas rotativas, bem como no aquecimento de condutores, ocasiona interferência eletromagnética em equipamentos de comunicação, entre outros malefícios (ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R., 2003)

A forma de onda de tensão ou corrente em certo ponto da instalação pode ter o aspecto do sinal T mostrado na Figura 3. Observando, pode-se ver que o sinal T é a soma ponto a ponto dos sinais de 1 e 5 formados por senoides perfeitas de amplitudes e frequências distintas, as harmônicas. É possível construir o sinal T a partir dos valores dos sinais 1 e 5 indicados na Tabela 1 (MORENO, 2019).

*Figura 3 - Ondas deformadas e suas componentes harmônicas.*



*Fonte: (MORENO, 2019).*

*Tabela 1 - Valores para os sinais 1, 5 e T referente a Figura 3.*

$t$	Sinal 1 (A)	Sinal 5 (A)	Sinal $T$ (A) = sinal 1 + sinal 5
0	0	0	0
3	90	50	140
6	190	0	190
9	230	-50	180
12	300	0	300
15	310	50	360
18	300	0	300
21	230	-50	180
24	190	0	190
27	90	50	140
30	0	0	0

*Fonte: (MORENO, 2019).*

Determinar o valor eficaz de qualquer sinal é de suma importância para se escolher os componentes de um circuito, como condutores, transformadores, dispositivos de proteção, etc. No caso de ondas de corrente distorcidas, o valor eficaz resultante em um circuito é dado pela Equação 8:

$$I_{rms} = \sqrt{(I_1)^2 + (I_2)^2 + (I_3)^2 + \dots + (I_n)^2} \quad (8)$$

Do mesmo modo, no caso de ondas de tensão distorcidas, o valor eficaz resultante é dado pela Equação 9:

$$U_{rms} = \sqrt{(U_1)^2 + (U_2)^2 + (U_3)^2 + \dots + (U_n)^2} \quad (9)$$

O Fator de Potência (FP) e  $\cos\varphi$  podem ser considerados sinônimos apenas quando não existirem harmônicas no circuito, ou seja, se os sinais forem senoidais puros. O Fator de Potência é a relação entre a Potência Ativa (P) e a Potência Aparente (S) definida para um sinal periódico não senoidal, como se vê na Equação 10.

$$FP = \frac{P(W)}{S(VA)} \quad (10)$$

Do mesmo modo,  $\cos\varphi$  é dado pela razão entre a Potência Ativa (P) e a Potência Aparente (S) definida para cada uma das componentes harmônicas (senoidais), como na Equação 11.

$$\cos\varphi = \frac{P_{hn}(W)}{S_{hn}(VA)} \quad (11)$$

Os circuitos que possuem valores diferentes para essas grandezas, possuem, entre si, uma grande quantidade de harmônicas, tanto de corrente, quanto de tensão.

O Fator de Crista (FC) é definido como o valor absoluto da relação entre o valor de pico e o valor eficaz da forma de onda da corrente (Equação 12). Quando o sinal é perfeitamente senoidal, o valor de FC é igual a  $\sqrt{2}$ .

$$FC = \frac{I_{pico}}{I_{rms}} \quad (12)$$

As subestações são sensíveis às harmônicas de corrente que provocam sobreaquecimento e possíveis falhas nos seus equipamentos. Há dois fatores usuais para se considerar a presença de harmônicas em transformadores, um deles se aplica a transformadores existentes (Equação 13), e o outro se aplica no dimensionamento e seleção de novos transformadores. Estes são chamados de fator de desclassificação de transformadores (K), que

indica quanto deve ser reduzida a sua potência máxima de saída quando é percorrido por harmônicas.

$$K = \frac{I_{pico}}{I_{rms} \cdot \sqrt{2}} = \frac{FC}{\sqrt{2}} \quad (13)$$

A máxima potência fornecida por um transformador existente percorrido por harmônicas é dada pela Equação 14:

$$S_{máx} = \frac{S_{nom}}{K} \quad (14)$$

Já, para transformadores novos, o fator K é uma ponderação das correntes de cargas harmônicas com base em seus efeitos no aquecimento do transformador, de acordo com a norma ANSI/IEEE C57.110. Os métodos de cálculo do fator K, de acordo com a norma IEEE 1100-1992 é dado pela Equação 15:

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{34} (i_h \times h)^2}{\sum_{h=1}^{34} (i_h)^2} \quad (15)$$

Onde:

- $i_h$ : valor eficaz da corrente harmônica de ordem h;
- $h$ : ordem da harmônica.

### 2.3.1 Limites de harmônicos segundo normas nacionais e internacionais

De acordo com os padrões da ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, os limites de harmônicos para faixa abaixo de 69 kV é limitado em 5%, e para tensões acima, é limitado em 3%. A norma IEEE Std 519/2022 estabelece limites para a distorção harmônica total de corrente e tensão em sistemas elétricos, com objetivo de proteger os equipamentos. Os níveis de tensão que a norma recomenda estão representados a seguir na Tabela 2.

**Tabela 2 – Níveis de tensão.**

Faixa de Tensão	Distorção Individual por Harmônico (%)	Distorção Total de Tensão - THDV (%)
$V \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V < 161 \text{ kV}$	1,5	2,0
$V \geq 161 \text{ kV}$	1,0	1,5

*Fonte: (IEEE Std. 519, 2022).*

Os limites de correntes harmônicas que podem ser emitidos por aparelhos que trabalham com uma corrente eficaz menor que 16 A por fase são definidos pela IEC 61000-3-2. A seguir estão apresentadas as classes nas quais os aparelhos são divididos e, na Tabela 3, estão os limites para as harmônicas de corrente para cada classe.

Classe A: Equipamentos com alimentação trifásica equilibrada e todos os demais que não se enquadram nas outras classes.

Classe B: Equipamentos portáteis.

Classe C: Equipamentos para iluminação incluindo dispositivos *dimmer*.

Classe D: Equipamentos contendo uma forma de onda de corrente de entrada “especial” com uma potência ativa de entrada menor que 600W.

**Tabela 3 - Limites para as harmônicas de corrente.**

Ordem da Harmônica (h)	Classe A	Classe B	Classe C (>25W)	Classe D (>10W, <300W)	Classe D
Harmônicas ímpares	Máxima corrente (A)	Máxima corrente (A)	% da Fundamental	(mA/W)	(A)
3	2,3	3,45	30*FP	3,4	2,3
5	1,14	1,71	10	1,9	1,14
7	0,77	1,155	7	1	0,77
9	0,4	0,6	5	0,5	0,4
11	0,33	0,495	3	0,35	0,33
13	0,21	0,315	3	0,296	0,21
15<h<39	0,15*15/h	0,225*15/h	3	3,85/h	2,25/h

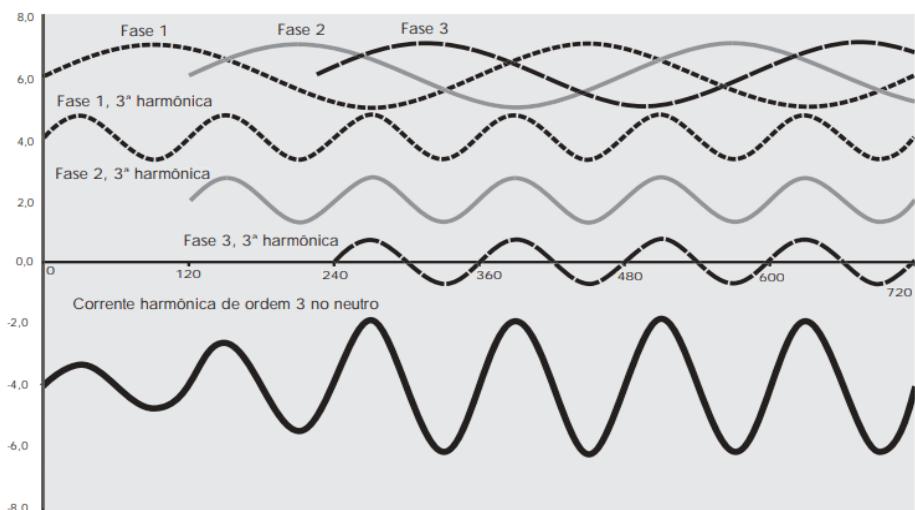
*Fonte: (IEC 61000-3-2, 2018)*

### 2.3.2 Harmônicas Triplen e Sistemas Trifásicos

As harmônicas de Ordem 3 e seus múltiplos ímpares são chamadas de harmônicas triplen e possuem sequência zero ou homopolar. Isso significa que as três fases apresentam componentes harmônicas em fase, ou seja, não possuem defasagem angular entre si.

Diferente da componente fundamental, onde as fases estão defasadas de  $120^\circ$ , as harmônicas de sequência zero possuem o mesmo ângulo de fase. Assim, essas componentes não produzem campo girante e, quando existe condutor neutro, suas correntes se somam nesse condutor. Essa característica pode ser observada na Figura 4, onde as correntes ou tensões harmônicas de 3<sup>a</sup> ordem nas três fases estão alinhadas, resultando em uma corrente significativa no neutro (CHAPMAN, 2002).

**Figura 4 – Soma das Correntes Harmônicas de Ordem 3 no Neutro.**



**Fonte:** (CHAPMAN, 2002).

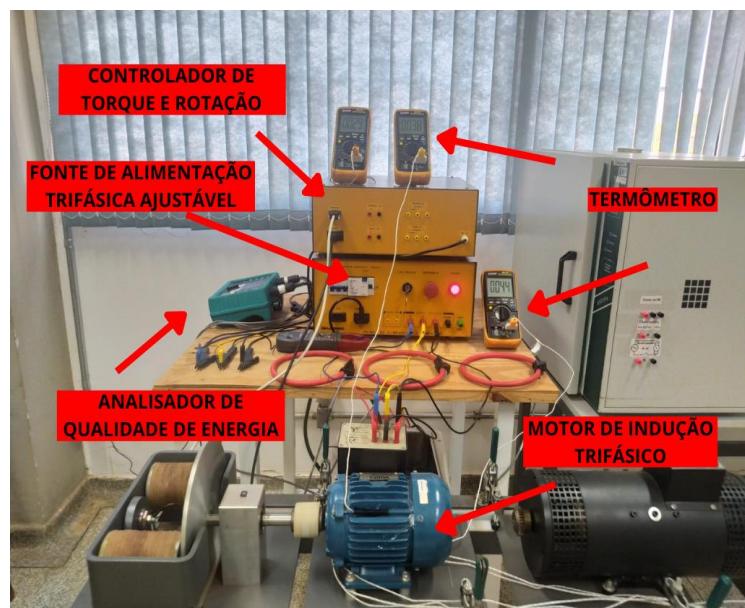
### 3 METODOLOGIA

Neste tópico será apresentado a metodologia usada neste trabalho, mostrando como foram realizados os ensaios com o Motor de Indução Trifásico (MIT) na bancada experimental do Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos (LAMAE).

#### 3.1. BANCADA EXPERIMENTAL

Nesta seção será apresentada a composição da Bancada Experimental para realizar os ensaios com o MIT, como é apresentado na Figura 5.

*Figura 5 – Bancada Experimental do LAMAE.*



*Fonte: Autoria Própria.*

A Bancada Experimental é constituída por uma Fonte de Alimentação Trifásica com tensão entrada/saída de 220 V<sub>CA</sub> e corrente total de 16 A, conforme apresentado na Figura 6.

**Figura 6 – Fonte de Alimentação Trifásica.**



**Fonte: Autoria Própria.**

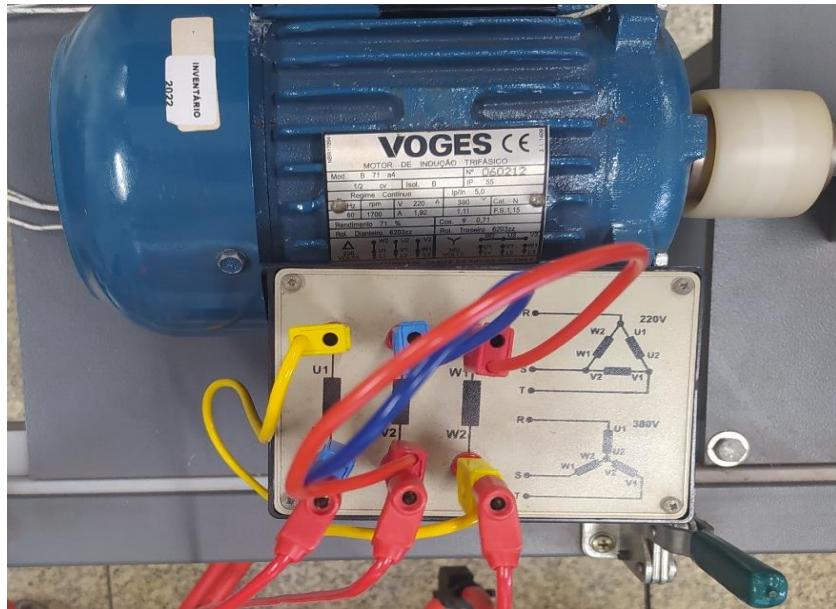
A Fonte de Alimentação Trifásica possui a função de energizar o Controlador de Torque e Rotação (Figura 7) e o Motor de Indução Trifásico (MIT) (Figuras 8 e 9) durante os ensaios.

**Figura 7 – Controlador de Torque e Rotação.**



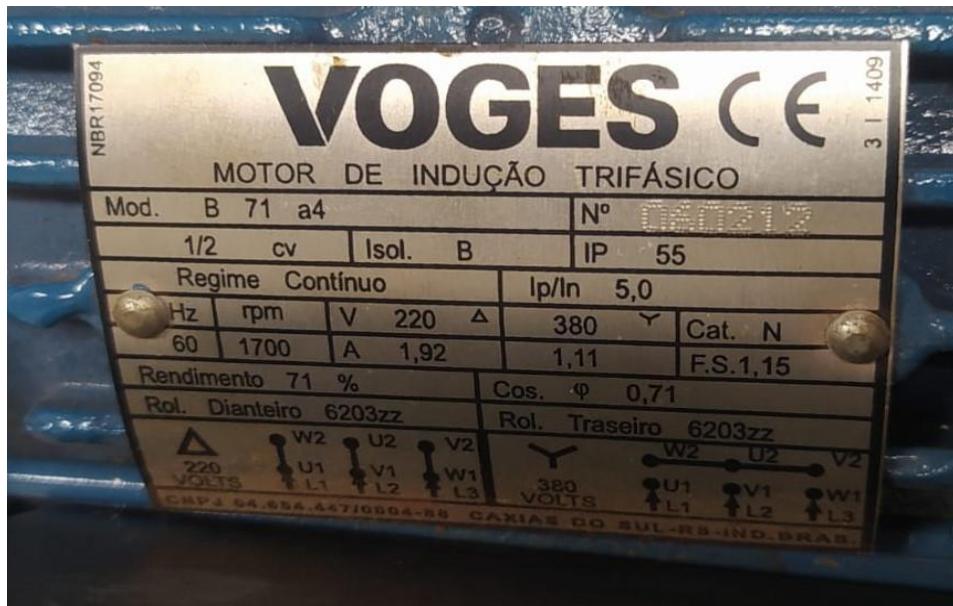
**Fonte: Autoria Própria.**

Figura 8 – Motor de Indução Trifásico (MIT).



Fonte: Autoria Própria.

Figura 9 – Dados de Placa do Motor de Indução Trifásico (MIT).



Fonte: Autoria Própria.

Os sinais das tensões, correntes e temperaturas são registrados pelo Analisador de Qualidade de Energia (Figura 10), Multímetro alicate (Figura 11), e pelo Termômetro Digital (Figura 12).

*Figura 10 – Analisador de Qualidade de Energia.*



*Fonte: Autoria Própria.*

*Figura 11 – Multímetro Alicate*



*Fonte: Autoria Própria.*

**Figura 12 – Termômetro Digital.**



**Fonte: Autoria Própria.**

### 3.2. CURVA CARACTERÍSTICA DO MOTOR

Baseado nas Curvas de Características de Desempenho do fabricante para o Motor de Indução Trifásico (MIT), foram realizados os ensaios de funcionamento conforme a montagem na Bancada Experimental do LAMAE (Figura 5).

A sequência do ensaio do MIT se deu com quatro tipos diferentes de cargas, sendo em: vazio, 50%, 75% e 100% de carga aplicada no eixo do MIT por meio da Bancada Experimental do LAMAE.

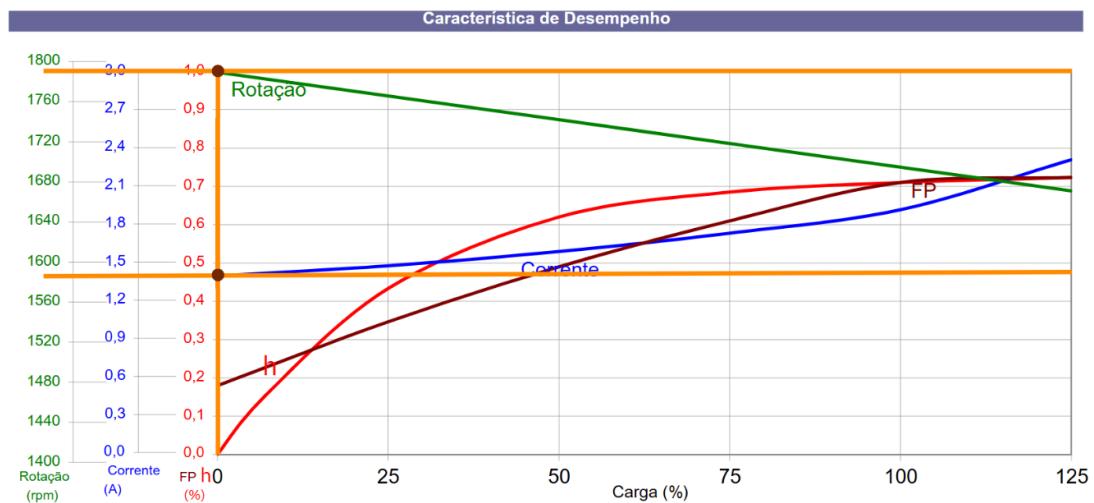
As tensões e correntes de cada fase foram monitoras e registradas pelo Analisador de Qualidade de Energia (MINIPA, 2013) para cada ensaio em cada carga.

Por meio das folhas de dados contendo as características de desempenho do MIT, foi possível fazer os ensaios no motor em laboratório seguindo as curvas.

Para cada carga aplicada no eixo do MIT, o mesmo responde de acordo com suas características de desempenho traçadas pelo fabricante. Para verificar quais as características para determinada carga, deve-se traçar uma reta vertical partindo do eixo da carga até o final do gráfico. Desse modo, as curvas presentes no gráfico, se cruzam com a reta traçada e, nesses pontos, os valores de Rotação, Corrente, Fator de Potência e Eficiência podem ser visualizados para cada carga. No estudo em questão, os parâmetros a serem obtidos são Rotação e Corrente.

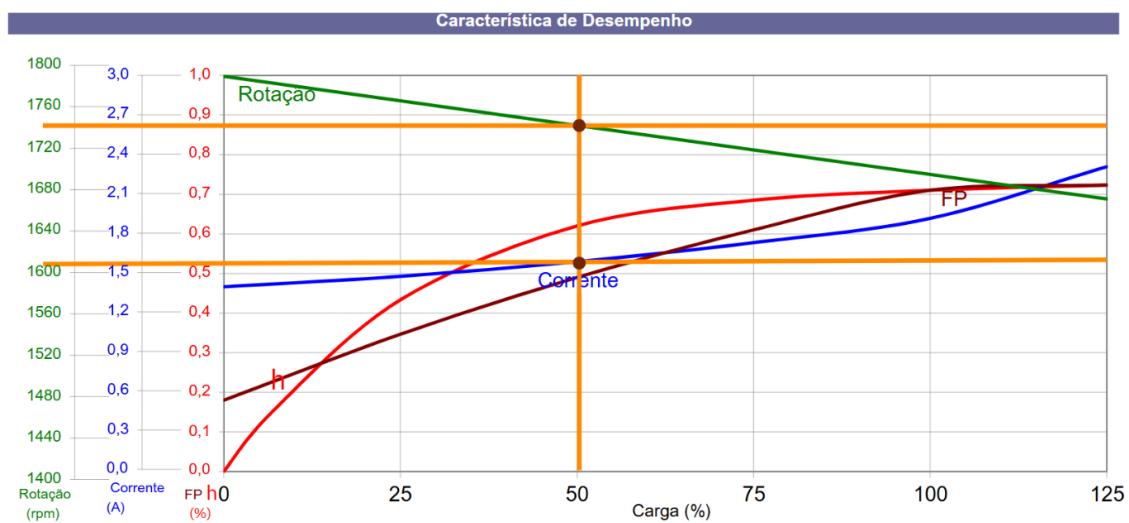
Para a determinação dos parâmetros do motor para cada carga, basta traçar uma reta perpendicular ao eixo horizontal (carga) e, no ponto em que a reta tocar a curva de cada parâmetro, traçar uma reta perpendicular ao eixo vertical (rotação, corrente, fator de potência e eficiência). O modo como cada parâmetro foi obtido, está apresentado nas Figuras 13, 14, 15 e 16 e, o valor encontrado de corrente e rotação estão descritos na Tabela 4.

**Figura 13 – Características de Desempenho do Motor Elétrico de Indução Rotor de Gaiola em Vazio.**



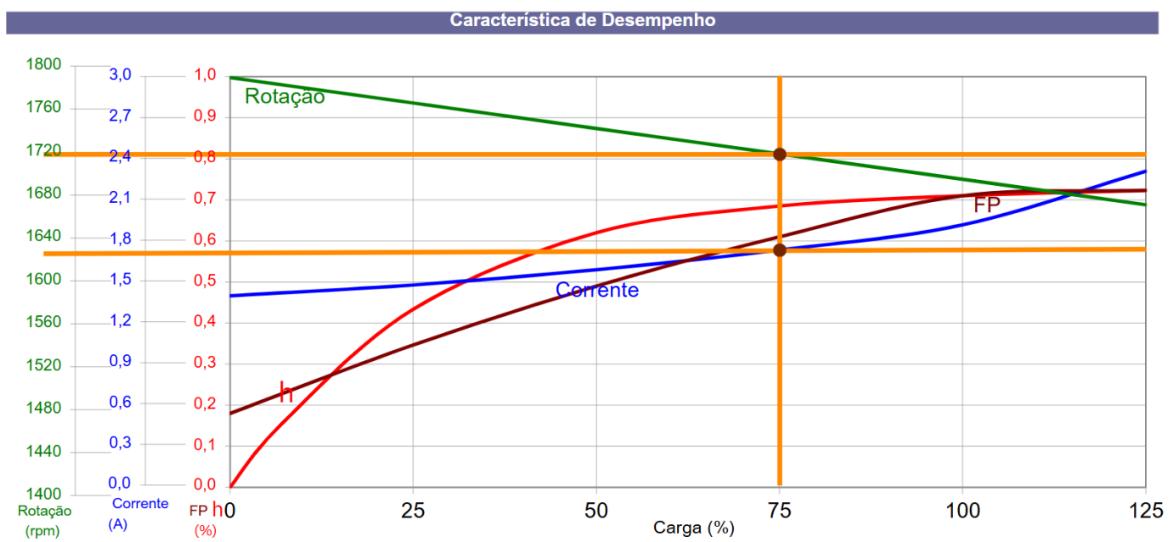
Fonte: (Voges, 2015).

**Figura 14 – Características de Desempenho do Motor Elétrico de Indução Rotor de Gaiola com 50% de carga.**



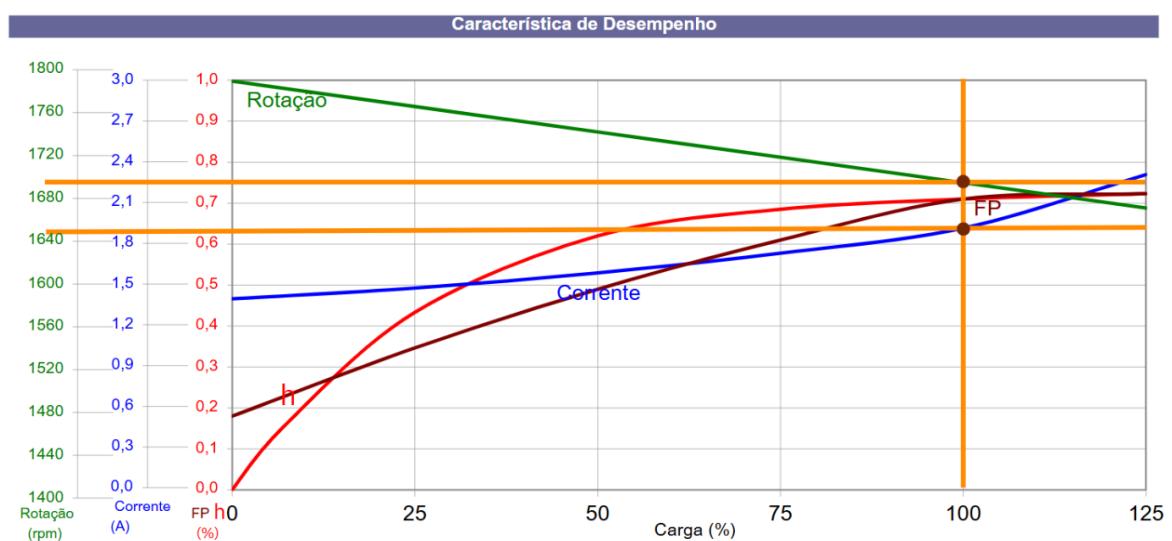
Fonte: (Voges, 2015).

**Figura 15 – Características de Desempenho do Motor Elétrico de Indução Rotor de Gaiola com 75% de carga.**



*Fonte: (Voges, 2015).*

**Figura 16 – Características de Desempenho do Motor Elétrico de Indução Rotor de Gaiola com 100% de carga.**



*Fonte: (Voges, 2015).*

**Tabela 4 – Valores de tensão e corrente de acordo com as Características de Desempenho do Motor.**

	ROTAÇÃO (rpm)	CORRENTE (A)
EM VAZIO	1790	1,4
50%	1740	1,55
75%	1720	1,65
100%	1695	1,9

*Fonte: (Voges, 2015).*

### 3.3. ENSAIOS DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO – MIT

No ensaio realizado, o Motor de Indução Trifásico (MIT) foi conectado com o fechamento triângulo (Figura 8). A fonte foi ligada, alterando a carga inserida no motor através do controlador de torque e rotação. Com o analisador, foi possível registrar os dados de corrente e tensão de acordo com a variação de carga no eixo do MIT. O analisador foi inserido entre as fases, e os dados de corrente e tensão foram coletados para as cargas em vazio, 50%, 75% e 100%. Além do analisador, foi utilizado o multímetro alicate para medir a corrente durante o ensaio, pois os dados obtidos com o analisador são extraídos no final do experimento com o software *PQLogView*. Os dados obtidos com o multímetro alicate estão apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5 – Dados de Corrente e Rotação.**

CARGA	ROTAÇÃO (rpm)	CORRENTE (A)		
		L1	L2	L3
VAZIO	1791	1,4	1,2	1,3
50%	1739	1,6	1,4	1,5
75%	1727	1,7	1,5	1,6
100%	1690	1,9	1,7	1,8

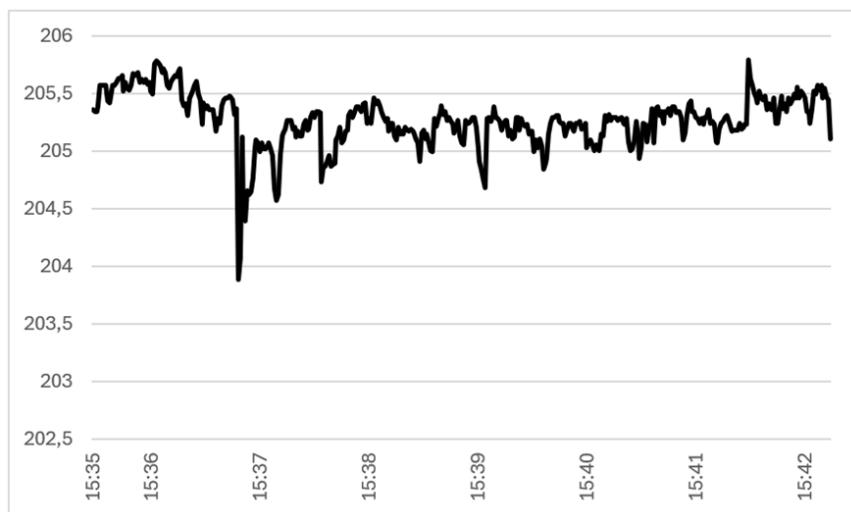
*Fonte: Autoria Própria.*

O analisador de qualidade de energia possui o software *PQLogView*, sendo extraídos os dados de tensão e corrente ao longo do ensaio. Os dados extraídos foram nas três fases, variando a carga quatro vezes, como apresentado a seguir.

### 3.3.1 Tensão no Motor

Na L1, em vazio, de acordo com a Figura 17, a tensão varia de 203,88 V a 205,80 V, porém a média da tensão nesse período analisado, é de 205,27 V. A tensão se mantém estável no início do período analisado, tendo uma queda significativa entre 15:36 e 15:37. Após esse período, a tensão teve uma menor variação da tensão.

**Figura 17 – Gráfico do perfil da tensão da Fase L1 com Carga em Vazio.**



**Fonte: Autoria Própria.**

Com 50% de carga, como na Figura 18, pode-se verificar que há variação de tensão no decorrer do tempo, oscilando entre 203,15 V e 205,26 V, e a média de 204,49 V. Inicialmente a tensão variou de forma menos significativa, entre 204,50 V e 205,26 V. No entanto, em dois momentos distintos, a tensão teve queda brusca, sendo a maior queda às 15:46, atingindo o valor mínimo da tensão, de 203,15 V. Após esse evento, a tensão se recuperou, mas passou a variar entre 204 V e 204,6 V.

*Figura 18 – Gráfico do perfil da tensão da Fase L1 com 50% de Carga.*



*Fonte: Autoria Própria.*

Com 75% de carga, a tensão variou de 203,68 V a 204,87 V, e a média foi 204,22 V. O comportamento da tensão no início, foi relativamente estável, oscilando pouco. Porém, por volta de 15:32, a tensão teve um pico, atingindo o máximo, e permaneceu variando nessa mesma faixa de tensão, como pode ser visto na Figura 19.

*Figura 19 – Gráfico do perfil da tensão da Fase L1 com 75% de Carga.*



*Fonte: Autoria Própria.*

Com 100% de carga, a tensão teve uma variação maior, entre 202,76 V e 205,80 V, e com média de 203,31 V. Em vários momentos, como pode se ver na Figura 20, a tensão tem quedas bruscas, se recuperando em seguida, porém a tensão diminui no decorrer do período.

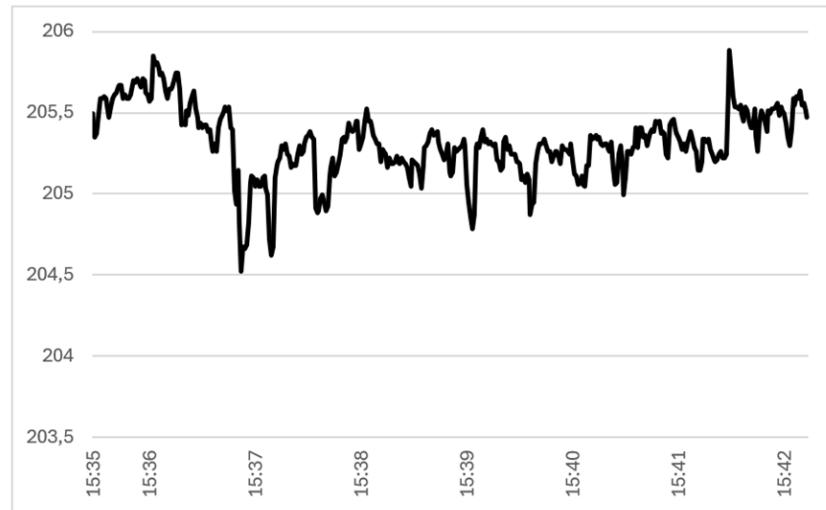
**Figura 20 – Gráfico do perfil da tensão da Fase L1 com 100% de Carga.**



**Fonte: Autoria Própria.**

Na L2, com carga em vazio, a tensão varia de 204,52 V e 205,88 V, e a média de 205,32 V. O comportamento da tensão foi predominantemente estável, sofrendo duas bruscas oscilações, atingindo o mínimo, mas se recuperando em seguida. Mesmo tendo se recuperado das quedas bruscas, a tensão variou em um intervalo maior, como pode ser visto, na Figura 21.

*Figura 21 – Gráfico do perfil da tensão da Fase L2 com Carga em Vazio.*



*Fonte: Autoria Própria.*

Com 50% de carga, a tensão varia entre 203,57 V e 205,29 V, e com média de 204,54 V. É possível notar que nesse período, como visto na Figura 22, a tensão vai diminuído gradativamente, tendo uma queda brusca no meio do caminho, atingindo o mínimo.

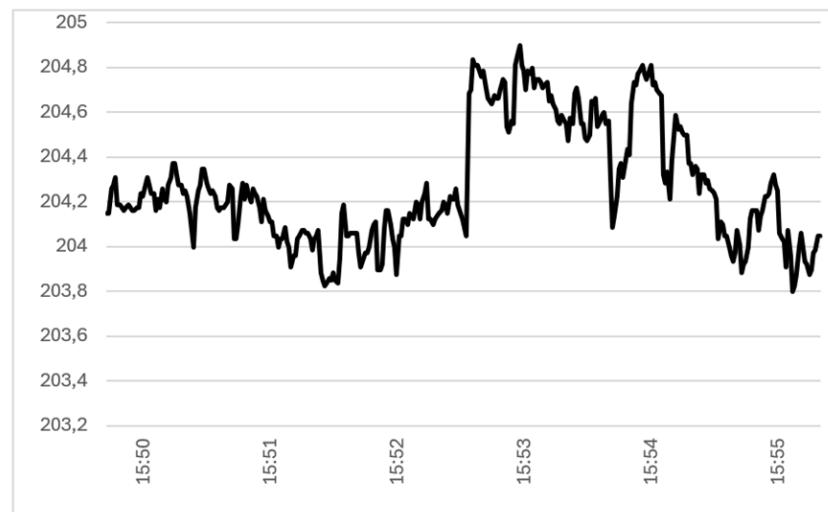
*Figura 22 – Gráfico do perfil da tensão da Fase L2 com 50% de Carga.*



*Fonte: Autoria Própria.*

Com 75% de carga, a tensão varia de 203,79 V a 204,89 V, e média de 204,27 V. O período inicia com a tensão baixa variando pouco, atingindo o mínimo. Porém, no meio do período, tem um pico de tensão, que se mantém na faixa de 204,80 V e 204,89 V até começar a diminuir novamente após 2 minutos. Esse comportamento pode ser visualizado na Figura 23.

**Figura 23 – Gráfico do perfil da tensão da Fase L2 com 75% de Carga.**



**Fonte: Autoria Própria.**

Com 100% de carga, a tensão mínima é de 202,87 V, a máxima é de 205,88 V e a média é 203,368 V. Durante o período, a tensão apresentou uma queda gradual e contínua, não apresentando grandes picos, nem quedas, mas sim um declínio progressivo. Ao final do período, a tensão teve uma leve recuperação, encerrando o período com 203,24 V, como pode ser visto na Figura 24.

*Figura 24 – Gráfico do perfil da tensão da Fase L2 com 100% de Carga.*



*Fonte: Autoria Própria.*

Na L3, com carga em vazio, a média de tensão é de 205,36 V, o mínimo é 204,67 V e o máximo é 205,93 V. No início do intervalo, observou um leve aumento de tensão, seguido de duas quedas mínimas. Em seguida, a tensão se estabilizou até sofrer um pico no final do período, que novamente estabilizou. Como pode ser visto na Figura 25.

*Figura 25 – Gráfico do perfil da tensão da Fase L3 com Carga em Vazio.*



*Fonte: Autoria Própria.*

Com 50% de carga, a tensão variou de 203,63 V a 205,44 V, com média de 204,59 V. A tensão permaneceu com pouca variação até sofrer duas quedas abruptas seguidas, onde na última, atingiu o mínimo de tensão. Após os dois eventos, a tensão se manteve um pouco estável, tendo uma pequena variação entre 204 V e 204,60 V. Esse comportamento pode ser visto na Figura 26.

**Figura 26 – Gráfico do perfil da tensão da Fase L3 com 50% de Carga.**



**Fonte: Autoria Própria.**

Com 75% de carga, a variação foi de 203,83 V a 204,96 V e média de 204,32 V. A tensão se manteve estável variando de 203,90 V a 204,45 V até atingir um pico com 204,80 V e se manter variando na faixa de 204,50 V a 204,96 V, tendo uma queda e, no final do período, a tensão diminuiu, encerrando-o, com 204,10 V, como mostra a Figura 27.

*Figura 27 – Gráfico do perfil da tensão da Fase L3 com 75% de Carga.*



*Fonte: Autoria Própria.*

Com 100% de carga, a tensão variou gradualmente com uma queda contínua, variando de 202,89 V a 205,93 V no decorrer do período. Após atingir o mínimo, a tensão teve um leve aumento e uma pequena variação até finalizar com 203,30 V. O comportamento da tensão nesse período pode ser visto na Figura 28.

*Figura 28 – Gráfico do perfil da tensão da Fase L3 com 100% de Carga.*



*Fonte: Autoria Própria.*

O limite máximo aceitável para o desequilíbrio de tensão é de 2% e pode ser calculado utilizando a tensão máxima entre as fases e a tensão média entre as fases. Como o analisador efetua a medição a cada segundo, foi necessário calcular a média da tensão para cada carga. Os cálculos ser observados a seguir:

Valores coletados com o analisador de qualidade de energia:

- Em Vazio:

$$U_{L1} = 205,27V; U_{L2} = 205,32V; U_{L3} = 204,67V$$

$$U_{max(R,S,T)} = 205,32V; U_{média} = 205,09V$$

$$Desequilíbrio\ Tensão(\%) = \frac{[205,32 - 205,09]}{205,09} \times 100\% = \frac{0,23}{205,09} \times 100\% = 0,11\%$$

- 50% de Carga

$$U_{L1} = 204,49V; U_{L2} = 204,54V; U_{L3} = 204,59V$$

$$U_{max(R,S,T)} = 204,59V; U_{média} = 204,54$$

$$Desequilíbrio\ Tensão(\%) = \frac{[204,59 - 204,54]}{204,54} \times 100\% = \frac{0,05}{204,54} \times 100\% = 0,02\%$$

- 75% de Carga:

$$U_{L1} = 204,22V; U_{L2} = 204,27V; U_{L3} = 204,32V$$

$$U_{max(R,S,T)} = 204,32V; U_{média} = 204,27V$$

$$Desequilíbrio\ Tensão(\%) = \frac{[204,32 - 204,27]}{204,27} \times 100\% = \frac{0,05}{204,27} \times 100\% = 0,02\%$$

- 100% de Carga:

$$U_{L1} = 203,31V; U_{L2} = 205,88V; U_{L3} = 203,41V$$

$$U_{max(R,S,T)} = 205,88V; U_{média} = 204,2V$$

$$Desequilíbrio\,Tensão(\%) = \frac{[205,88 - 204,2]}{204,2} \times 100\% = \frac{1,68}{204,2} \times 100\% = 0,82\%$$

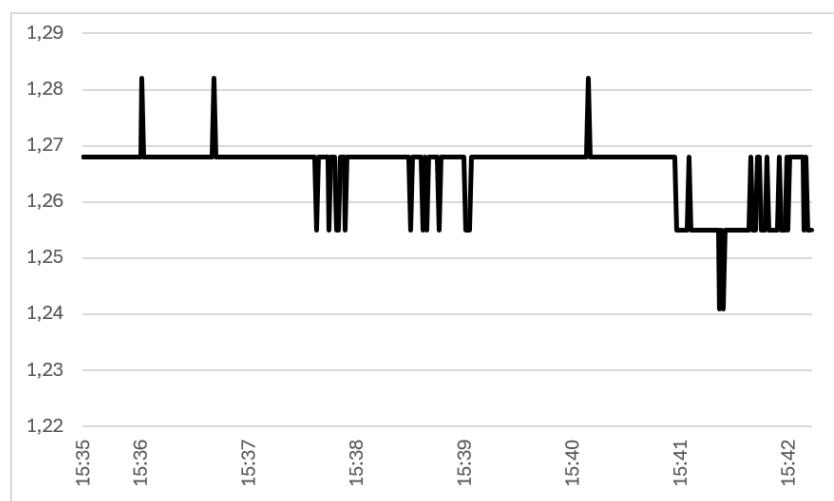
De acordo com o PRODIST (ANEEL, 2021), o valor máximo aceitável de desequilíbrio de tensão em sistemas trifásicos é de 2%. O desequilíbrio de tensão calculado neste estudo não ultrapassa esse limite, indicando que o sistema analisado apresenta níveis de tensão equilibrados e dentro dos padrões recomendados.

### 3.3.2 Análise da Corrente do Motor

Além da tensão, a corrente também foi analisada para cada carga nas três fases, como será visto a seguir.

Na L1, em vazio, a corrente varia entre 1,24 A e 1,28 A, mas a média da corrente no período analisado é de 1,26 A. Diferente da tensão, que varia constantemente, a corrente tem picos e quedas ao decorrer do tempo e, próximo ao final do período, em uma das quedas, a corrente permanece na mesma faixa, mas ainda tendo picos e quedas, como é visto na Figura 29 a seguir.

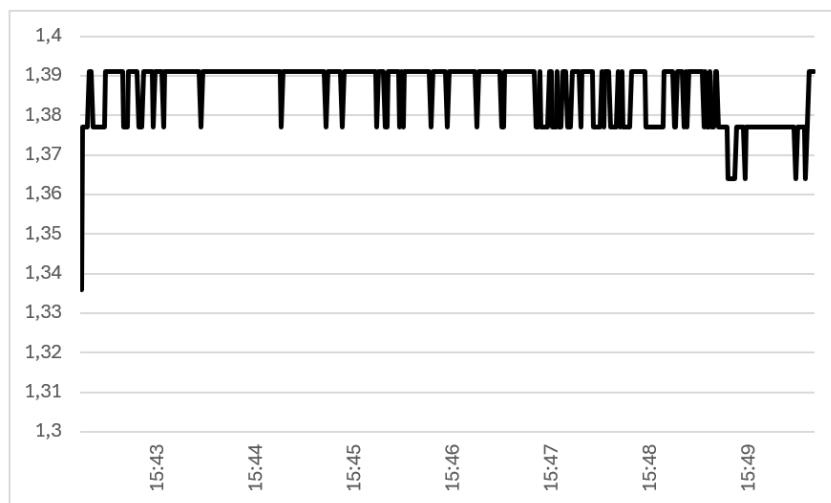
**Figura 29 – Gráfico do perfil da corrente da Fase L1 com Carga em Vazio.**



**Fonte: Autoria Própria**

Na fase L1, ao sujeitar o motor a 50% de carga, observa-se que a corrente aumenta até atingir seu valor máximo de 1,39 A, estabilizando-se em uma faixa de variação entre 1,39 A e 1,37 A. Esse comportamento se mantém por 6 minutos, com a corrente sustentando o valor máximo por grande parte desse intervalo. Próximo ao final do período analisado, a corrente apresenta outra queda, variando de 1,37 A para 1,36 A, mantendo essa variação por 1 minuto, até que ao final do registro, a corrente varia de 1,36 A a 1,39 A, e logo em seguida, haverá alteração da carga, como é visto na Figura 30.

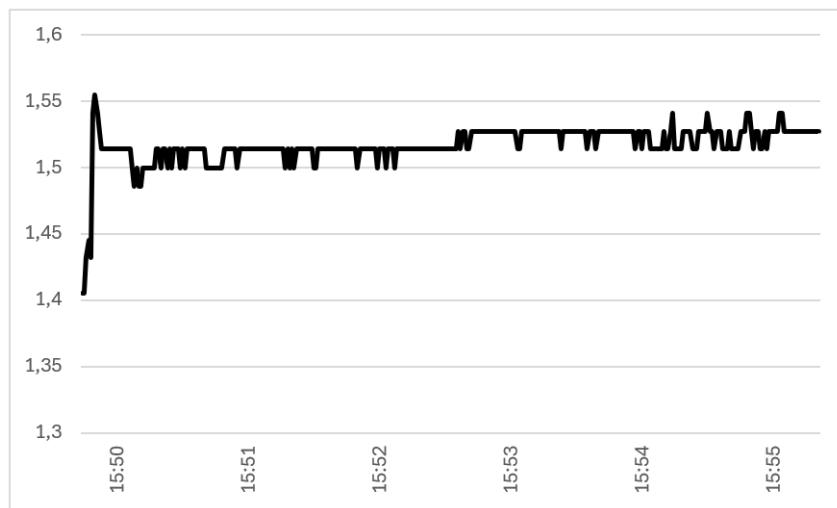
**Figura 30 – Gráfico do perfil da corrente da Fase L1 com 50% de Carga.**



**Fonte: Autoria Própria.**

Na L1, ao ser aplicada a carga de 75%, a corrente parte do último valor registrado sob 50% de carga e atinge o pico de 1,55 A. Em seguida, ocorre uma queda para 1,51 A, estabilizando-se por aproximadamente 2 minutos com variações entre 1,50 A e 1,51 A. Após esse intervalo, a corrente passa a oscilar entre 1,51 A e 1,53 A cerca de 1 minuto. No final do período analisado, observa-se um comportamento mais instável, com oscilações irregulares, encerrando em 1,53 A, conforme apresentado na Figura 31.

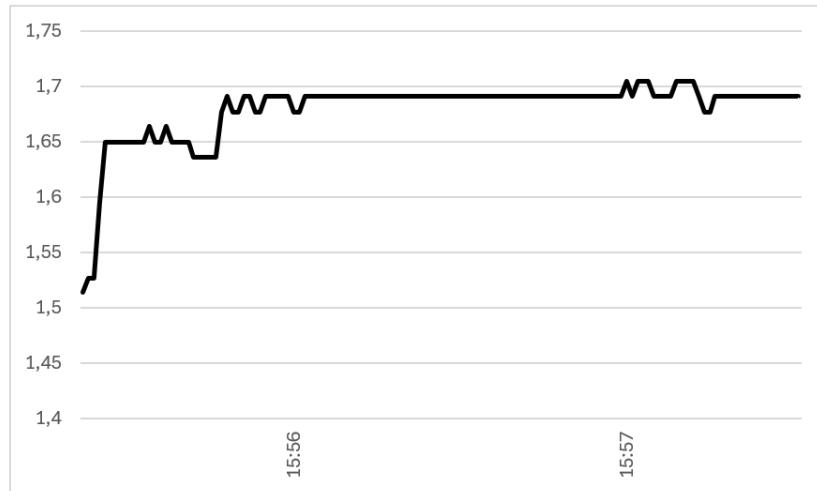
**Figura 31 – Gráfico do perfil da corrente da Fase L1 com 75% de Carga.**



**Fonte: Autoria Própria.**

Na fase L1, aplicando 100% de carga, a corrente apresenta um comportamento diferente em relação às demais cargas. Assim como nos casos anteriores, a corrente parte do último valor registrado na carga anterior, atingindo 1,65 A, e permanece constante por um breve período, até sofrer dois picos sucessivos, e então retorna ao valor inicial. Posteriormente, observa-se uma queda até 1,64 A, seguida de um aumento até 1,68 A. A partir desse ponto, a corrente oscila entre 1,68 A e 1,69 A por três ciclos, até atingir 1,69 A, valor se mantém constante por aproximadamente 1 minuto. Em seguida, a corrente apresenta três picos, atingindo 1,71 A, seguidos de uma queda até 1,68 A. O experimento na L1 se encerra com a corrente estabilizada em 1,69 A, conforme a Figura 32.

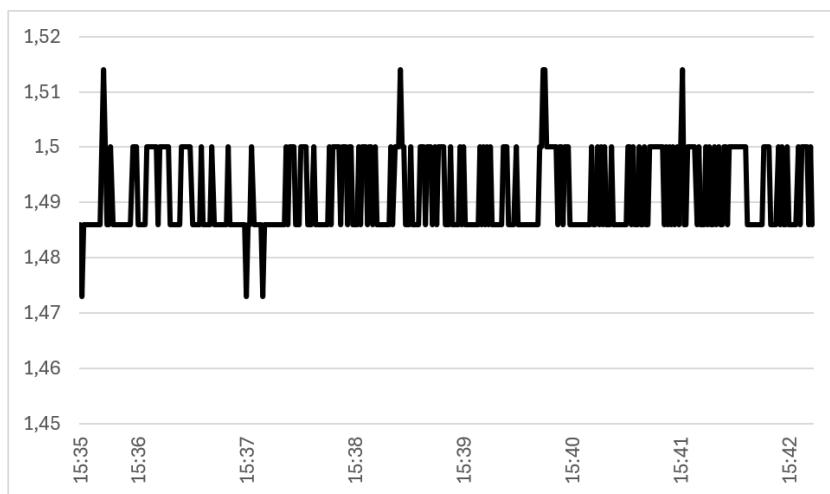
**Figura 32 – Gráfico do perfil da corrente da Fase L1 com 100% de Carga.**



**Fonte: Autoria Própria.**

Na fase L2, sem adicionar carga, a corrente inicia com uma queda de 1,47 A para 1,47 A. Em seguida, inicia uma variação constante entre 1,49 A e 1,50 A, com oscilações regulares. Durante esse período, observam-se picos atingindo 1,51 A e quedas até 1,47 A. Esse comportamento pode ser visto na Figura 33.

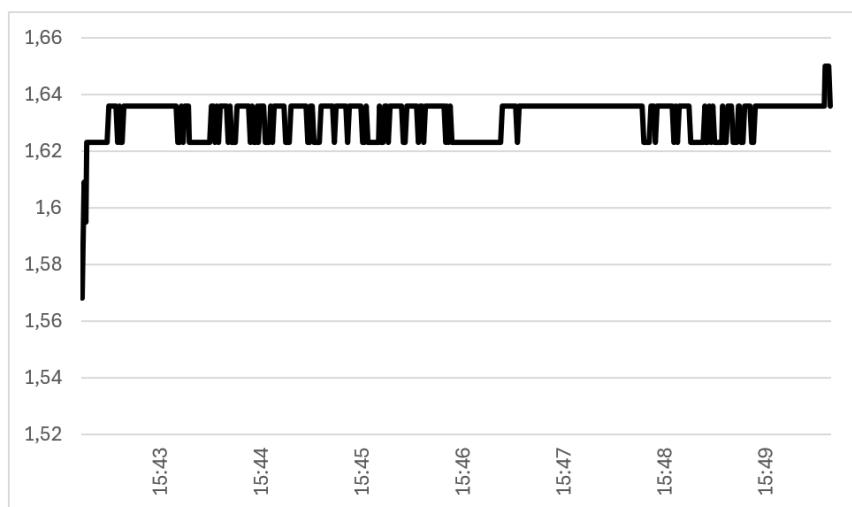
**Figura 33 – Gráfico do perfil da corrente da Fase L2 com 0% de Carga.**



**Fonte: Autoria Própria.**

Na fase L2, com 50 % de carga, a corrente parte do último valor registrado com 0% de carga e atinge 1,62 A. A partir desse momento, a corrente passa a variar entre 1,62 A e 1,64 A por aproximadamente 6 minutos até atingir um pico de 1,65 A. Após o pico, a corrente retorna a 1,64 A, onde se encerra o período analisado, como pode ser visto na Figura 34.

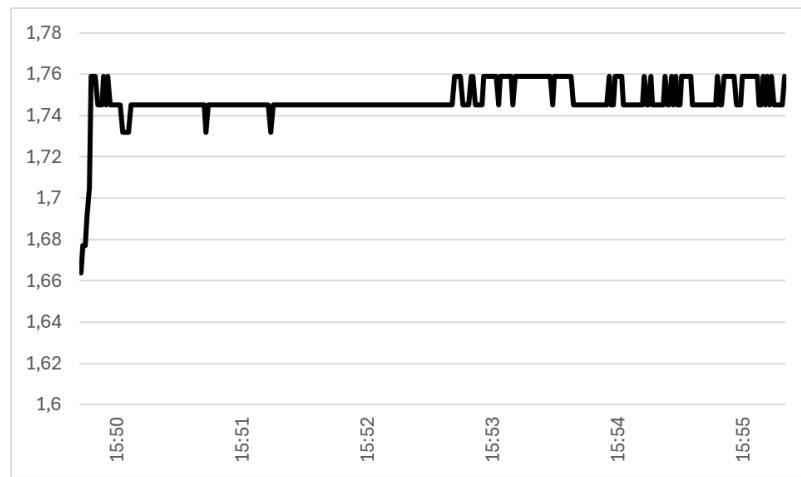
*Figura 34 – Gráfico do perfil da corrente da Fase L2 com 50% de Carga.*



*Fonte: Autoria Própria.*

Na L2, ao ser aplicada a carga de 75%, a corrente parte do último valor registrado sob 50% de carga e atinge o pico de 1,76 A, seguido de uma queda para 1,75 A. Essa variação se repete por mais duas vezes. Em seguida, a corrente se estabiliza em 1,75 A, apresentando três quedas pontuais para 1,73 A com retorno ao valor anterior. A corrente permanece estável em 1,74 A por aproximadamente 2 minutos e, posteriormente, volta a oscilar até atingindo 1,76 A, conforme Figura 35.

*Figura 35 – Gráfico do perfil da corrente da Fase L2 com 75% de Carga.*



*Fonte: Autoria Própria.*

Na L2, com 100% de carga, a corrente parte do último valor registrado na carga anterior e atinge 1,87 A, se mantendo constante até registrar um pico de 1,88 A. Em seguida, a corrente retorna ao valor anterior e, depois atinge 1,89 A. A partir desse ponto, passa a oscilar por cinco ciclos, até alcançar 1,91 A, onde se mantém estável por aproximadamente 1 minuto. No entanto, durante esse intervalo, ocorre uma nova queda, seguida por um pico de 1,92 A. Em seguida, a corrente volta a oscilar entre 1,89 A e 1,91 A, encerrando o ciclo, conforme mostra a Figura 36.

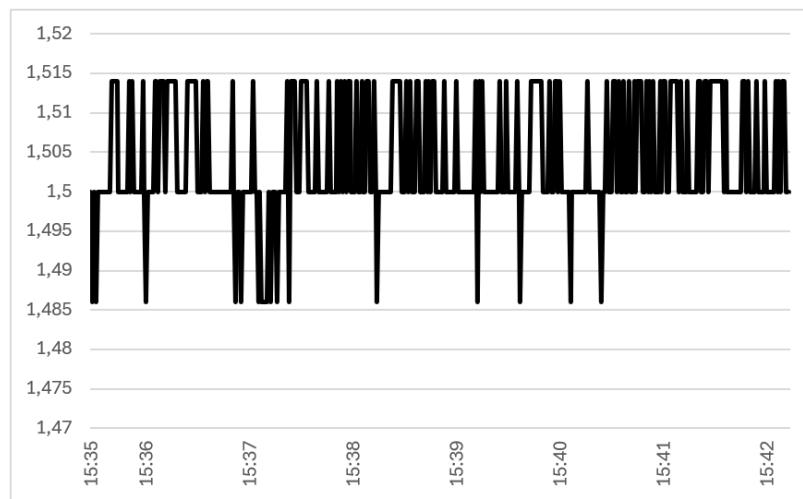
*Figura 36 – Gráfico do perfil da corrente da Fase L2 com 100% de Carga.*



*Fonte: Autoria Própria.*

Na L3, sem acrescentar carga, a corrente inicia com 1,50 A e, ao longo de todo o ciclo, apresenta variações dentro de duas faixas: entre 1,49 A e 1,50 A e entre 1,50 A e 1,51 A. É possível observar que os picos de 1,51 A ocorrem com maior frequência do que as quedas para 1,49 A, como pode ser visto na Figura 37.

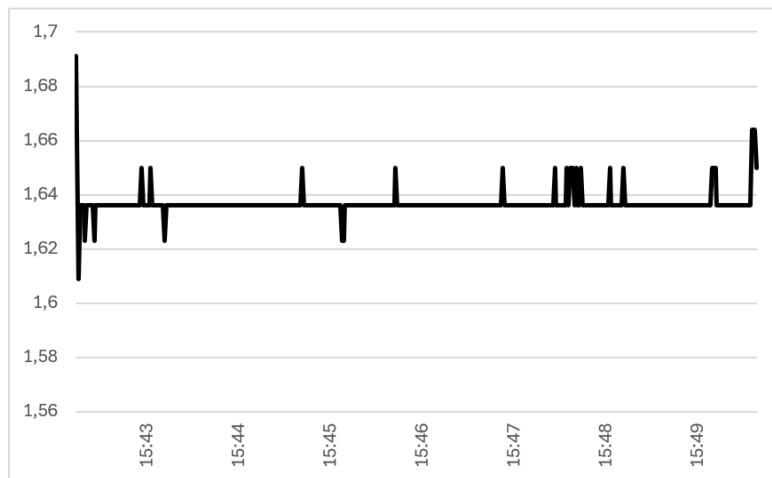
**Figura 37 – Gráfico do perfil da corrente da Fase L3 com Carga em Vazio.**



**Fonte: Autoria Própria.**

Na L3, com 50 % de carga, partindo da carga anterior aplicada, atinge um alto pico de 1,67 A, seguido de uma brusca queda para 1,61 A. Em seguida, a corrente se mantém predominantemente em 1,64 A, mas variando para 1,65 A e para 1,65 A por 7 minutos. Ao final do ciclo, observa-se um pico adicional de 1,66 A. Esse comportamento pode ser visto na Figura 38.

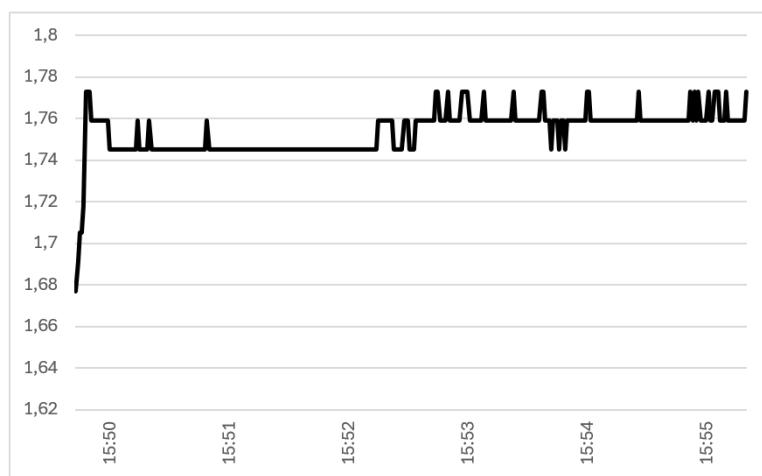
*Figura 38 – Gráfico do perfil da corrente da Fase L3 com 50% de Carga.*



*Fonte: Autoria Própria.*

Na L3, com 75 % de carga, a corrente parte do último valor registrado com a carga anterior e atinge 1,77 A sofrendo uma queda para 1,76 A, onde permanece por um curto período. Em seguida, ocorre nova queda para 1,74 A, valor o qual se mantém constante por aproximadamente 2 minutos, apresentando nesse intervalo, três picos breves de 1,74 A que retornam ao mesmo. A partir desse ponto, a corrente passa a oscilar para cima e para baixo, variando entre 1,74 A e 1,76 A e entre 1,76 A e 1,77 A, como mostra a Figura 39.

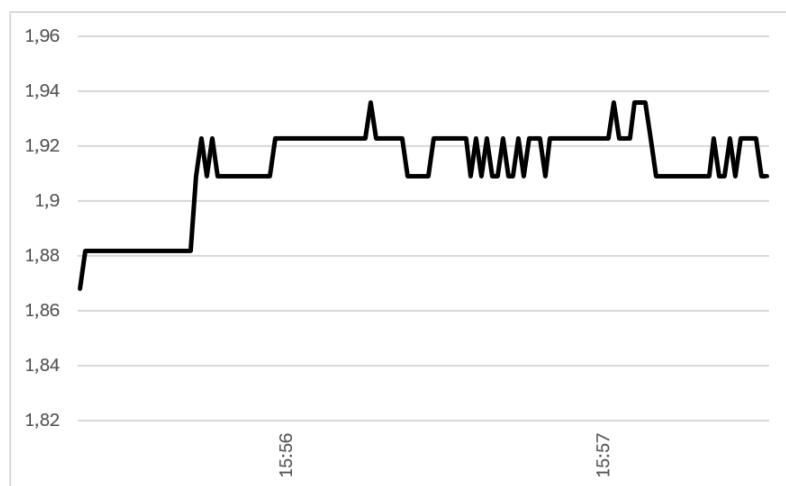
Figura 39 – Gráfico do perfil da corrente da Fase L3 com 75% de Carga.



*Fonte: Autoria Própria.*

Na fase L3, aplicando 100% de carga, a corrente inicia variando até 1,88 A, se mantendo constante por um período até atingir 1,91 A. A partir desse ponto, ocorrem dois picos sucessivos chegando a 1,92 A, seguidos de um retorno breve a 1,91 A, antes de atingir novamente 1,92 A, valor no qual permanece constante por um tempo. Em seguida, a corrente registra um pico de 1,94 A, retornando depois a 1,92 A, e passa a oscilar entre 1,91 A e 1,92 A e entre 1,92 A e 1,94 A. Próximo ao final do ciclo, a corrente variou de 1,94 A para 1,91 A, mantendo-se estável nesse valor até apresentar novos picos de 1,92 A, encerrando assim o ciclo, conforme mostrado na Figura 40.

**Figura 40 – Gráfico do perfil da corrente da Fase L3 com 100% de Carga.**



**Fonte: Autoria Própria.**

Ao comparar os valores de corrente obtidos nos ensaios em bancada com aqueles apresentados na curva de desempenho do motor, observa-se a ocorrência de divergências entre os dados medidos e os valores teóricos. Para facilitar a análise, os resultados são apresentados separadamente, conforme os diferentes níveis de carga aplicados:

### **Carga em Vazio no Motor**

- Correntes medidas:
  - $L1 = 1,266 \text{ A}$
  - $L2 = 1,491 \text{ A}$

- $L3 = 1,504 \text{ A}$
- Valor na curva de desempenho:  $1,4 \text{ A}$
- Observação: A fase L2 apresenta o valor mais próximo do teórico.

### **Carga de 50%**

- Correntes medidas:
  - $L1 = 1,386 \text{ A}$
  - $L2 = 1,632 \text{ A}$
  - $L3 = 1,637 \text{ A}$
- Valor na curva de desempenho:  $1,55 \text{ A}$
- Observação: A fase L2 novamente apresenta o valor mais próximo do esperado.

### **Carga de 75%**

- Correntes medidas:
  - $L1 = 1,516 \text{ A}$
  - $L2 = 1,747 \text{ A}$
  - $L3 = 1,753 \text{ A}$
- Valor na curva de desempenho:  $1,65 \text{ A}$
- Observação: A fase L2 permanece mais próxima do valor teórico.

### **Carga de 100%**

- Correntes medidas:
  - $L1 = 1,678 \text{ A}$
  - $L2 = 1,901 \text{ A}$
  - $L3 = 1,912 \text{ A}$
- Valor na curva de desempenho:  $1,9 \text{ A}$
- Observação: A corrente na fase L2 é praticamente idêntica ao valor teórico.

## Observações Gerais

- Em todas as condições de carga, a fase L2 apresentou valores mais coerentes com os indicados pela curva de desempenho.
- As discrepâncias observadas entre as fases podem indicar:
  - Desequilíbrio de tensão entre as fases;
  - Assimetria no enrolamento do motor;
  - Diferenças de impedância nas linhas;
  - Margem de erro dos instrumentos de medição utilizados.

A análise detalhada desses fatores pode contribuir para um diagnóstico mais preciso do comportamento do motor sob diferentes condições de carga e para a validação do sistema de medição empregado.

De acordo com a Equação 4, o desequilíbrio de corrente máxima é 10%, e pode ser calculado utilizando a corrente máxima entre as fases e a corrente média entre as fases. Como o analisador efetua a medição a cada segundo, foi necessário calcular a média da corrente para cada carga. Os cálculos feitos podem ser observados a seguir:

Valores coletados com o analisador de qualidade de energia:

- Vazio:

$$I_{L1} = 1,26A; I_{L2} = 1,49A; I_{L3} = 1,5A$$

$$I_{max(R,S,T)} = 1,5A; I_{média} = 1,42A$$

$$DesequilíbrioCorrente(%) = \frac{[1,5 - 1,42]}{1,42} \times 100\% = \frac{0,08}{1,42} \times 100\% = 5,63\%$$

- 50% de Carga:

$$I_{L1} = 1,39A; I_{L2} = 1,63A; I_{L3} = 1,64A$$

$$I_{max(R,S,T)} = 1,64A; I_{média} = 1,55A$$

$$DesequilíbrioCorrente(%) = \frac{[1,64 - 1,55]}{1,55} \times 100\% = \frac{0,09}{1,55} \times 100\% = 5,81\%$$

- 75% de Carga:

$$I_{L1} = 1,52A; I_{L2} = 1,75A; I_{L3} = 1,75A$$

$$I_{max(R,S,T)} = 1,75A; I_{média} = 1,67A$$

$$DesequilíbrioCorrente(%) = \frac{[1,75 - 1,67]}{1,67} \times 100\% = \frac{0,08}{1,67} \times 100\% = 4,79\%$$

- 100% de Carga:

$$I_{L1} = 1,68A; I_{L2} = 1,9A; I_{L3} = 1,91A$$

$$I_{max(R,S,T)} = 1,91A; I_{média} = 1,83A$$

$$DesequilíbrioCorrente(%) = \frac{[1,91 - 1,83]}{1,83} \times 100\% = \frac{0,08}{1,83} \times 100\% = 4,37\%$$

De acordo com Moreno (2019), o valor máximo aceitável de desequilíbrio de corrente em sistemas trifásicos é 10%. O desequilíbrio de corrente calculado neste estudo não ultrapassa esse limite, indicando que o sistema analisado apresenta níveis de corrente que, apesar de desequilibradas, estão dentro dos padrões recomendados.



## 4 RESULTADO E DISCUSSÕES

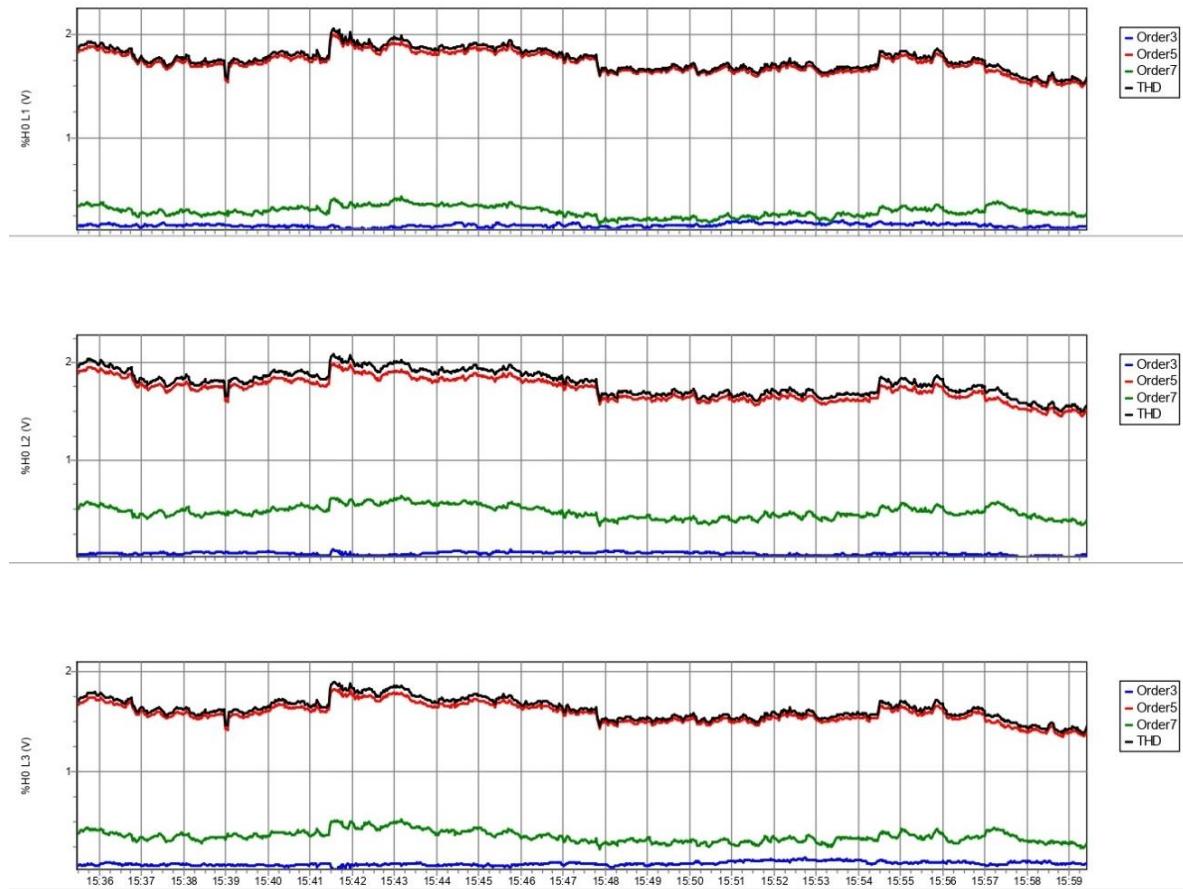
Durante os ensaios o desequilíbrio de tensão calculado foi abaixo de 1%, no qual ao confrontar este resultado com os limites estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2021), verifica-se que o sistema operou em condições adequadas, permanecendo abaixo do limite regulatório de 2% para variações em regime permanente. Do mesmo modo, o desequilíbrio de corrente também se manteve abaixo dos limites estabelecidos, sendo inferior a 5% e o limite é de 10%. A relação entre os dois índices evidencia a sensibilidade da máquina: nota-se que o desequilíbrio de corrente foi superior ao de tensão. De acordo com Dugan *et al.* (2012), essa amplificação ocorre devido à baixa impedância de sequência negativa do motor de indução, o que reforça a necessidade de monitoramento mesmo quando a tensão parece estar dentro dos padrões normativos.

Após a análise da tensão e corrente das fases, analisou-se a ocorrência ou não de harmônicos, variando a carga no mesmo período e utilizando o Analisador de Qualidade de Energia como instrumento para visualizar os harmônicos e a fonte de alimentação trifásica para variar as cargas. Por meio do software *PQLogView*, pode-se gerar gráficos para analisar os harmônicos pelo tempo de estudo. Nos gráficos são mostrados os harmônicos de Ordem 3, Ordem 5, Ordem 7 e Distorção Harmônica Total (DHT), para cada uma das fases, avaliando os harmônicos presentes na tensão e na corrente, separadamente. Os gráficos são dos harmônicos da tensão e corrente da porcentagem em função do período analisado.

### 4.1. ANÁLISE DAS HARMÔNICAS EM RELAÇÃO À TENSÃO

Primeiramente, analisou-se o comportamento das harmônicas no MIT em relação à tensão. O objetivo desta etapa é visualizar, para diferentes níveis de carga, a variação das harmônicas ao longo do período do ensaio. Através do *PQLogView*, foram gerados três gráficos de harmônicas, sendo um para cada fase (L1, L2 e L3), como mostra a Figura 39, onde pode observar o comportamento das harmônicas da DHT, Ordem 3, Ordem 5 e Ordem 7 em porcentagem. Os valores das harmônicas extraídos dos gráficos da Figura 41, estão descritos na Tabela 6, onde para cada carga aplicada ao motor foi feita em determinado horário.

**Figura 41 – Gráfico das Harmônicas em Relação à Tensão.**



*Fonte: (PQLogView, 2025).*

**Tabela 6 – Valores das Harmônicas em Relação à Tensão.**

CARGA	HORÁRIO	FASE	DHT	ORDEM 3	ORDEM 5	ORDEM 7
EM VAZIO	15h40	L1	1,80%	0,15%	1,75%	0,30%
		L2	1,87%	0,05%	1,80%	0,47%
		L3	1,67%	0,05%	1,62%	0,37%
50%	15h46	L1	1,82%	0,17%	1,77%	0,32%
		L2	1,92%	0,05%	1,80%	0,50%
		L3	1,67%	0,05%	1,65%	0,35%
75%	15h55	L1	1,82%	0,17%	1,77%	0,35%
		L2	1,82%	0,05%	1,75%	0,52%
		L3	1,67%	0,07%	1,62%	0,40%
100%	15h57	L1	1,70%	0,15%	1,65%	0,37%
		L2	1,72%	0,05%	1,60%	0,52%
		L3	1,67%	0,10%	1,45%	0,37%

*Fonte: Autoria Própria.*

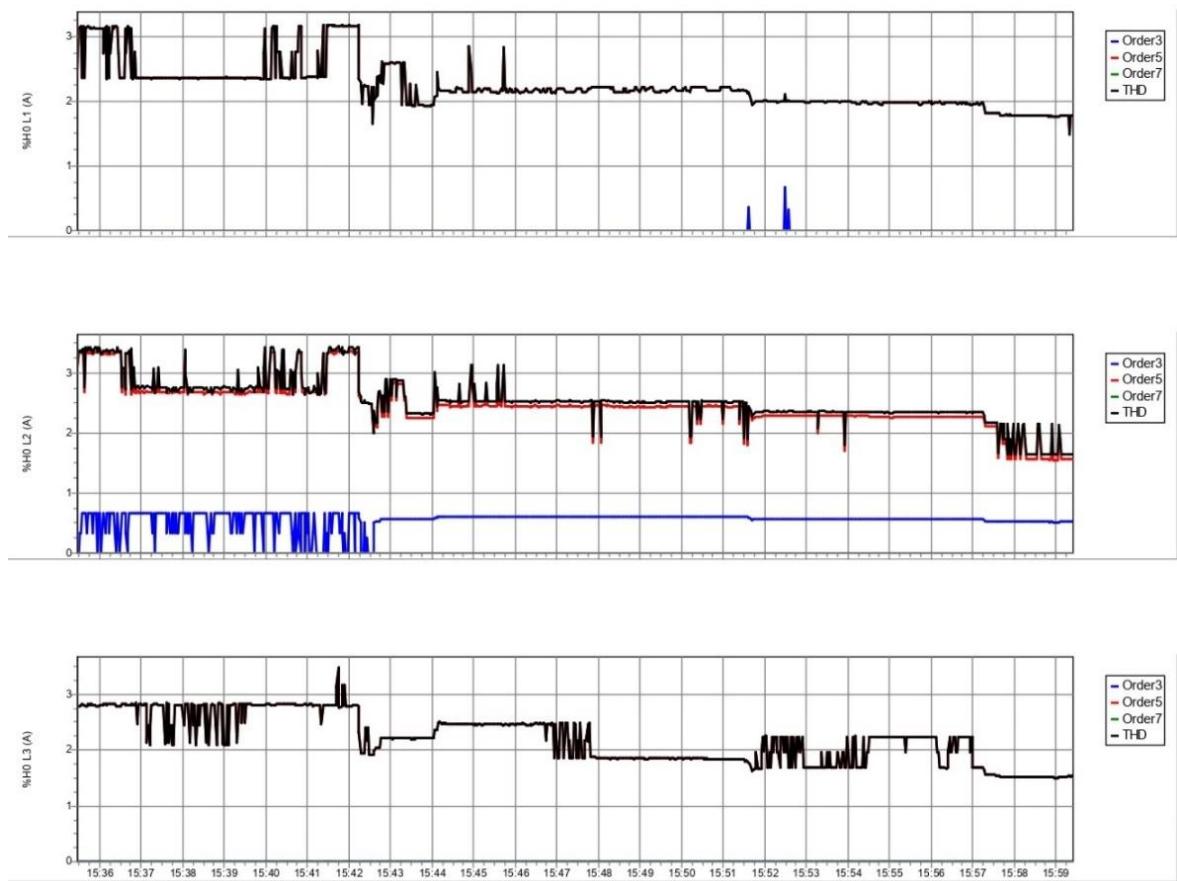
Após analisar os harmônicos para cada carga aplicada, observa-se que, com a mesma quantidade de carga colocada sobre o motor, não há muita variação na porcentagem para cada fase ao longo do tempo. Porém, foi possível analisar que a Ordem 3 apresentou valores inferiores às demais ordens.

Esse comportamento das harmônicas de Ordem 3 é característico em sistemas trifásicos equilibrados, uma vez que as harmônicas de ordem 3 pertencem à sequência zero e, portanto, estão em fase entre as três fases. Desse modo, ao analisar a tensão entre fases, ocorre o cancelamento dessas componentes, resultando em valores reduzidos. Já as harmônicas de ordem 5 e 7, pertencentes às sequências negativas e positivas, respectivamente, não se cancelam e tendem a apresentar maior amplitude.

#### 4.2. ANÁLISE DAS HARMÔNICAS EM RELAÇÃO À CORRENTE

Em seguida, realizou-se a análise das harmônicas em relação à corrente. Assim como foi feito para a tensão, foram gerados três gráficos de harmônicas para cada fase (L1, L2 e L3). A Figura 42 apresenta os gráficos, onde o comportamento das harmônicas é dado em porcentagem. Os valores extraídos dos gráficos estão descritos na Tabela 7.

*Figura 42 – Gráfico das Harmônicas em Relação à Corrente.*



*Fonte: (PQLogView, 2025).*

*Tabela 7 – Valores das Harmônicas em Relação à Corrente.*

CARGA	HORÁRIO	FASE	DHT	ORDEM 3	ORDEM 5
EM VAZIO	15h40	L1	2,37%	-	-
		L2	2,75%	0,65%	2,67%
		L3	2,82%	-	-
50%	15h46	L1	2,15%	-	-
		L2	2,50%	0,60%	2,40%
		L3	2,47%	-	-
75%	15h55	L1	1,97%	-	-
		L2	2,35%	0,57%	2,25%
		L3	2,22%	-	-
100%	15h57	L1	1,82%	-	-
		L2	2,20%	0,52%	2,10%
		L3	1,62%	-	-

*Fonte: Autoria Própria.*

É possível notar que, nos primeiros minutos, a DHT apresentou grandes variações, se estabilizando por três minutos e, em seguida, voltou a variar. Essas variações que puderam ser observadas, variaram entre 2,37% e 3,12%.

Na L2, como na L1, houve muita variação com carga em vazio, ocorrendo ao mesmo tempo. Mas diferente da L1, além de apresentar variações na DHT, também apresentou variações nas ordens 3 e 5, onde na Ordem 5, a variação ocorreu do mesmo modo que a DHT, variando inicialmente de 2,375% a 3,125%, estabilizando e, posteriormente, voltando a variar.

Na 3<sup>a</sup> harmônica, houve muita variação em vazio, iniciando com 0,65% e variando para 0, se mantendo assim até o instante em que foi alterada a carga para 50%. Com 100% de carga, na DHT e na 3<sup>a</sup> harmônica também houve muita variação, de 1,625% para 2,125%.

Na L3, foi possível verificar variações na DHT em quase todas as variações de carga. Em vazio, houve variação de 2,75% para 2,125%. Com 50% de carga, próximo de aumentar a carga, também houve uma variação contínua. Com 75% de carga, do início ao fim houve variação, indo de 1,75% a 2,25% e, por alguns minutos, se manteve em 2,25% até que a carga foi alterada para 100% e houve uma queda para 1,625%, se mantendo até o fim do teste.

Nas medições realizadas das harmônicas de corrente, as harmônicas de 3<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> ordem foram as principais componentes identificadas. A 3<sup>a</sup> harmônica apresentou valores baixos, o que é esperado em sistemas trifásicos equilibrados, uma vez que se trata de harmônica de sequência zero, cujas correntes nas três fases estão em fase, sendo assim, se cancelam. A harmônica de ordem 5 pertencente à sequência negativa, contribui para a distorção de corrente, por isso apresentou valores mais elevados.



## 5 CONCLUSÃO

Após analisar os dados experimentais e a curva de desempenho do motor, é possível notar um padrão na fase L2, que em todos os níveis de carga, apresentou valores de corrente mais próximos aos valores de referência.

A Figura 23 apresenta os gráficos das harmônicas da corrente, enquanto a Figura 24 mostra os valores obtidos. Verificando as duas Figuras apresentadas, é notável que a fase L2 mostra significativamente as ordens 3 e 5. Além disso, foi possível observar a redução da DHT da corrente com o aumento de carga, seguindo o comportamento de acordo com a literatura, pois cargas leves apresentam maior distorção relativa.

Ao avaliar os resultados obtidos em relação à tensão, verificou-se que o desequilíbrio de tensão se manteve dentro dos limites recomendado pela literatura. De acordo Moreno (2019), o desequilíbrio de tensão máximo admitido está entre 2% e 3%, enquanto o valor calculado no estudo se manteve abaixo, indicando que o sistema apresenta boas condições de balanceamento de tensão.

Do mesmo modo, o desequilíbrio de corrente, cujo máximo admitido é 10%, também permaneceu abaixo desse valor, confirmando que o sistema se encontra em condições operacionais satisfatórias, sem grandes influências na eficiência do MIT.

Como observado na Tabela 2, de acordo com a norma IEEE Std 519-2022, para tensões em sistemas de até 69 kV, o limite da DHT é de 5% e, a partir da análise das harmônicas, as leituras da DHT estiveram abaixo de 2%, estando dentro da norma. Portanto, os resultados indicam que o sistema operou dentro dos limites aceitáveis de distorção harmônica, mesmo com a variação de carga. O comportamento está de acordo com a norma e com o esperado para motores de indução trifásicos submetidos a cargas variáveis.

A Tabela 3 apresentou os limites de emissões harmônicas de corrente de acordo com a norma IEC 61000-3-2. A norma apresenta quatro grupos para determinar os limites de harmônicas, no caso do estudo apresentado, o grupo ao qual o motor pertence, é o grupo A, que se trata de equipamentos com alimentação trifásica equilibrada. A norma estabelece para esse grupo a corrente de até 2,3 A na 3<sup>a</sup> ordem e 1,14 A na 5<sup>a</sup> ordem, mas como visto na análise, as correntes harmônicas apresentadas estão bem inferiores aos valores limitados pela norma. A DHT também se manteve abaixo de 3%, estando de acordo com os requisitos da IEC 61000-3-2.

Portanto, analisando os harmônicos presentes no MIT, os valores obtidos estão de acordo com os valores apresentados nas normas, que tratam do monitoramento da qualidade de energia e dos limites de emissão de corrente harmônica.

Propõe-se como trabalho futuro a investigação da relação entre os índices de DHT e a elevação da temperatura operativa do MIT. Sugere-se a utilização de câmeras térmicas para observar como diferentes tipos de harmônicas afetam o MIT. O objetivo é investigar como as harmônicas de sequência negativa gera forças contrárias ao movimento e pontos de calor, e como as harmônicas de sequência zero aumentam o aquecimento nos enrolamentos e no núcleo de ferro do motor. Essa análise ajudará a medir o quanto o calor interfere no isolamento e reduz a vida útil do motor, permitindo avaliar se o uso de filtros para limpar a energia seria vantajoso para economizar eletricidade e proteger o equipamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**: Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica. Revisão 12. Brasília, DF: ANEEL, 2021.

ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. — ***Power System Harmonics***. Editora JOHN WILEY & SONS, LTD. Inglaterra, 2003.

BARBI, IVO. **Teoria Fundamental do Motor de Indução**. Editora UFSC. Santa Catarina, 1985.

CHAPMAN, D. **Harmônicas – Causas e Efeitos**. PROCOBRE – Instituto Brasileiro do Cobre. São Paulo, 2002.

DUGAN, Roger C.; MCGRANAGHAN, Mark F.; SANTOSO, Surya; BEATY, H. Wayne. ***Electrical Power Systems Quality***. 3. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2012.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JUNIOR, Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas**: com introdução à eletrônica de potência. 6. ed.: Bookman, 2006. p. 505.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **IEEE Std 519-2022 – IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**. New York: IEEE, 2022.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC 61000-3-2: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current  $\leq 16\text{ A per phase}$ )**. Geneva: IEC, 2018.

MINIPA DO BRASIL LTDA. **Analizador de Qualidade de Energia Trifásico ET-5060C – Proposta Técnica**. São Paulo: Minipa do Brasil Ltda., 2013.

MORENO, Hilton. **Harmônicas nas instalações elétricas: causas, efeitos e soluções.** PROCOBRE – Instituto Brasileiro do Cobre. São Paulo, 2019.

RIBEIRO, ML. AGUIAR, ML. **Análise dos efeitos dos harmônicos de corrente na vida útil de motores de indução trifásicos.** Revista brasileira de energia, 2012.

SAADAT, Hadi. ***Power System Analysis.* 3. ed.** Milwaukee: PSA Publishing, 2010.

VOGES. **Catálogo de Produtos - Motor Elétrico de Indução, VTOP - 71a - 4 Pólos – 220V,** 2015.