

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**ESTUDO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA OPERANDO COM TENSÕES  
DESEQUILIBRADAS E DISTORCIDAS**

**DHÉBORA SAYONARA DE MORAIS SEVERO**

**MAIO**

**2020**

---

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESTUDO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA OPERANDO COM TENSÕES  
DESEQUILIBRADAS E DISTORCIDAS**

Dissertação apresentada por **Dhébora Sayonara de Moraes Severo** à Universidade Federal de Uberlândia para a **obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica**, realizada em 26/05/2020 pela banca examinadora:

Prof. **Luciano Coutinho Gomes**, Dr. (UFU) – Orientador

Prof. **Darizon Alves de Andrade**, PhD. (UFU) – Coorientador

Prof. **Paulo Henrique Oliveira Rezende**, Dr. (UFU)

Prof. **Rui Vagner Rodrigues da Silva**, PhD. (IFG–Itumbiara)

---

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S498 Severo, Dhébora Sayonara de Moraes, 1990-  
2020 Estudo da máquina de indução trifásica operando com tensões  
desequilibradas e distorcidas [recurso eletrônico] / Dhébora  
Sayonara de Moraes Severo. - 2020.

Orientador: Luciano Coutinho Gomes.  
Coorientador: Darizon Alves de Andrade.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Pós-graduação em Engenharia Elétrica.  
Modo de acesso: Internet.  
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.444>  
Inclui bibliografia.  
Inclui ilustrações.

1. Engenharia elétrica. I. Gomes, Luciano Coutinho, 1972-,  
(Orient.). II. Andrade, Darizon Alves de, 1956-, (Coorient.). III.  
Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em  
Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:  
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESTUDO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA OPERANDO COM TENSÕES  
DESEQUILIBRADAS E DISTORCIDAS**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR DHÉBORA SAYONARA DE MORAIS SEVERO  
À UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA PARA OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

---

**LUCIANO COUTINHO GOMES, Dr.**

Orientador

---

**JOSÉ ROBERTO CAMACHO, Dr.**

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

---



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
 Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 738, PPGEELT.				
Data:	Vinte e seis de maio de dois mil e vinte.	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	12:00
Matrícula do Discente:	11712EEL003				
Nome do Discente:	Dhébora Sayonara de Moraes Severo				
Título do Trabalho:	Estudo da máquina de indução trifásica operando com tensões desequilibradas e distorcidas				
Área de concentração:	Sistemas de energia elétrica				
Linha de pesquisa:	Máquinas e aterramentos elétricos				
Projeto de Pesquisa de vinculação:					

Reuniu-se por meio de Vídeoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Darizon Alves de Andrade - FEELT/UFU; Paulo Henrique Oliveira Rezende - FEELT/UFU; Rui Vagner Rodrigues da Silva - IFG; Luciano Coutinho Gomes - FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Luciano Coutinho Gomes, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Luciano Coutinho Gomes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/05/2020, às 12:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Henrique Oliveira Rezende, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/05/2020, às 12:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **RUI VAGNER RODRIGUES DA SILVA, Usuário Externo**, em 26/05/2020, às 12:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Darizon Alves de Andrade, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/05/2020, às 12:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2032066** e o código CRC **C2E18EC3**.

---

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais, Alismar e Paulinho, que sempre me apoiaram incondicionalmente e nunca mediram esforços para me incentivar e ajudar.*

---

## AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Dr. Luciano Coutinho Gomes, a minha imensa gratidão pela oportunidade, apoio, ensinamentos, compreensão e paciência.

Aos professores Dr. Ernane Antônio Alves Coelho e Dr. Márcio José da Cunha pelos ensinamentos e auxílio nas disciplinas de pós-graduação.

A todos os companheiros do Laboratório de Acionamentos Elétricos (LAcE), especialmente ao Vinícius Marcos Pinheiro, Bruno Lemos Neves e Cássio Alves de Oliveira que tiveram participação importante durante a realização deste trabalho.

A minha família, pelo apoio, incentivo, confiança, principalmente meus pais Alismar e Paulinho, as minhas irmãs Bárbara e Paula e ao meu namorado Túlio que estiveram sempre ao meu lado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro para a realização deste projeto.

De maneira geral agradeço a todos que de alguma maneira contribuíram com a realização desta pesquisa.

---

*“O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia  
após dia.”*

*Robert Collier*

---

## RESUMO

Este trabalho aplica distorções harmônicas e desequilíbrios na tensão de alimentação do motor de indução trifásico afim de analisar o comportamento das tensões e correntes diante de tais cenários, e calcula potências, distorções, fatores de potências para tais simulações no motor a vazio. Esta análise é importante visto que os motores consomem grande parte da energia elétrica gerada e esses são diretamente afetados pela má qualidade da energia. Apresenta-se as definições de desequilíbrios e distorções harmônicas, além dos aspectos normativos que regulamentam os limites aceitáveis para esses distúrbios na rede elétrica. Na sequência demonstra-se o modelo equivalente modificado do MIT diante das situações analisadas e também cita-se os efeitos que este sofre, tais como: aumento de temperatura, diminuição do rendimento e redução de vida útil. Posteriormente analisa-se alguns estudos de cálculo de potências diante de desequilíbrios e distorções harmônicas. Além disso, tem-se a correção dos parâmetros do modelo equivalente do MIT. Por fim, tem-se o detalhamento dos elementos utilizados na bancada de aquisição de dados e os resultados obtidos para cada um dos ensaios.

**Palavras-chave:** Desequilíbrio de tensão, distorção harmônica, qualidade de energia, motor de indução trifásico, potências.

---

## ABSTRACT

This work applies harmonic distortions and voltage unbalances at the supply voltage of three-phase induction motor in order to analyze the behavior of voltages and currents under such scenarios and calculates power, distortions and power factors for these simulations on the motor free of load. This analysis is important because the motors consume a large part of the electric energy generated and these are directly affected by the poor quality of energy. Definitions of voltage unbalances and harmonic distortions are presented, besides to the normative aspects that regulate the acceptable limits for these disturbances on the power grid. In the sequence, the modified equivalent model of three-phase induction motor is presented and the effects that it suffers are mentioned, such as increase in temperature, decrease in performance and reduction of life cycle. Then, some power calculation studies are analyzed under unbalances and harmonic distortions. Besides that, the motor equivalent model parameters are corrected. Finally, details are given of the elements used on the data acquisition bench and the results obtained for each of the tests.

**Keywords:** Voltage unbalance, harmonic distortion, power quality, three-phase induction motor, power.

---

## Lista de figuras

### Capítulo 1

Figura 1.1 - Distribuição do Consumo de energia por setor em 2019. .... 1

### Capítulo 2

Figura 2.1- Diagrama de Tensões de Fase e de Linha para sistemas equilibrados..... 7

Figura 2.2– Diagrama de Tensões de Linha para sistemas desequilibrados. .... 8

Figura 2.3– Composição de onda a partir de suas harmônicas..... 13

### Capítulo 3

Figura 3.1- Circuito Equivalente monofásico modificado do MIT para cada ordem harmônica.  
..... 24

Figura 3.2- Circuito equivalente por fase de sequência positiva..... 25

Figura 3.3- Circuito equivalente por fase de sequência negativa. .... 26

Figura 3.4- Circuito equivalente por fase de sequência zero..... 26

Figura 3.5 - Carregamento do Motor em Função do desequilíbrio de tensão. .... 29

Figura 3.6 - Aumento percentual das perdas em função do desequilíbrio de tensão. .... 31

Figura 3.7 - Redução do carregamento do motor em função de FHV..... 33

### Capítulo 4

Figura 4.1 - Histórico de estudos sobre cálculo de potência na presença de desequilíbrios e harmônicos. .... 39

Figura 4.2 - Tetraedro de potências. .... 41

Figura 4.3 – Teoria dos Componentes Físicos da Corrente. (a) Sistema trifásico de referência; (b) Equivalente em relação a potência ativa P e (c) Carga equivalente em delta..... 44

### Capítulo 5

Figura 5.1 – Circuito equivalente ao motor de indução para harmônico de tensão de sequência positiva. .... 60

Figura 5.2 – Circuito equivalente ao motor de indução para harmônico de tensão de sequência negativa..... 60

---

## Capítulo 6

Figura 6.1 - Diagrama em blocos da plataforma experimental completa.....	70
Figura 6.2 - Fonte programável AMETEK presente no Laboratório. ....	70
Figura 6.3 - Tela do <i>software</i> da fonte programável. ....	71
Figura 6.4 - Motor de Indução Trifásico. ....	72
Figura 6.5 - Circuito elétrico da placa de condicionamento de sinais utilizada. ....	73
Figura 6.6 - Placa de condicionamento de sinais. ....	74
Figura 6.7 - Conjunto de placa de condicionamento de sinais utilizadas na bancada experimental. ....	74
Figura 6.8 - Módulo SCB-68 da NI.....	75
Figura 6.9 - Placa de aquisição de dados da NI modelo 6229.....	76
Figura 6.10 - Montagem final da bancada de aquisição de dados para ensaios. ....	78
Figura 6.11 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio com tensão de alimentação perfeitamente senoidal e sem harmônicos a 60Hz. ....	80
Figura 6.12 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio com tensão de alimentação perfeitamente senoidal e sem harmônicos a 60Hz. ....	80
Figura 6.13 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio com tensão de alimentação perfeitamente senoidal e sem harmônicos a 75Hz. ....	81
Figura 6.14 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio com tensão de alimentação perfeitamente senoidal e sem harmônicos a 75Hz. ....	82
Figura 6.15 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio com tensão de alimentação perfeitamente senoidal e sem harmônicos a 90Hz. ....	83
Figura 6.16 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio com tensão de alimentação perfeitamente senoidal e sem harmônicos a 90Hz. ....	83
Figura 6.17 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e terceiro harmônico a 60Hz. ....	86
Figura 6.18 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e terceiro harmônico a 60Hz. ....	86
Figura 6.19 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e terceiro harmônico a 75Hz. ....	87
Figura 6.20 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e terceiro harmônico a 75Hz. ....	88
Figura 6.21 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e terceiro harmônico a 90Hz. ....	89

---

Figura 6.22 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e terceiro harmônico a 90Hz. ....	89
Figura 6.23 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e quinto harmônico a 60Hz.....	92
Figura 6.24 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e quinto harmônico a 60Hz. ....	92
Figura 6.25 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e quinto harmônico a 75Hz.....	93
Figura 6.26 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e quinto harmônico a 75Hz. ....	94
Figura 6.27– Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e quinto harmônico a 90Hz.....	95
Figura 6.28 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e quinto harmônico a 90Hz. ....	95
Figura 6.29– Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e sétimo harmônico a 60Hz.....	97
Figura 6.30– Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e sétimo harmônico a 60Hz. ....	98
Figura 6.31 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e sétimo harmônico a 75Hz.....	99
Figura 6.32 - Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e sétimo harmônico a 75Hz. ....	99
Figura 6.33- Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e sétimo harmônico a 90Hz.....	100
Figura 6.34 - Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e sétimo harmônico a 90Hz. ....	101
Figura 6.35 - Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e décimo primeiro harmônico a 60Hz.....	103
Figura 6.36 - Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e décimo primeiro harmônico a 60Hz. ....	104
Figura 6.37- Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e décimo primeiro harmônico a 75Hz.....	105
Figura 6.38 - Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e décimo primeiro harmônico a 75Hz. ....	105

---

---

Figura 6.39- Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e décimo primeiro harmônico a 90Hz. ....	106
Figura 6.40 - Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e décimo primeiro harmônico a 90Hz. ....	107
Figura 6.41 - Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e harmônicos ímpares a 60Hz. ....	109
Figura 6.42 - Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e harmônicos ímpares a 60Hz. ....	109
Figura 6.43 - Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e harmônicos ímpares a 75Hz. ....	110
Figura 6.44 - Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e harmônicos ímpares a 75Hz. ....	111
Figura 6.45 - Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e harmônicos ímpares a 90Hz. ....	112
Figura 6.46 - Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e harmônicos ímpares a 90Hz. ....	112
Figura 6.47 – Tela do <i>software</i> da fonte programável para tensões de alimentação do motor com desequilíbrio de amplitude. ....	114
Figura 6.48 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio de desequilíbrio de amplitude. ....	115
Figura 6.49 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio de desequilíbrio de amplitude. ....	116
Figura 6.50 – Tela do <i>software</i> da fonte programável que apresenta os valores aplicados ao MIT de desequilíbrio angular. ....	117
Figura 6.51 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio de desequilíbrio angular. ....	118
Figura 6.52– Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio de desequilíbrio angular. ....	119

---

## Lista de tabelas

### Capítulo 2

Tabela 2.1 - Limites de Distorção da Corrente para Sistemas de Distribuição (120V a 69kV). .....	17
Tabela 2.2 - Limites de distorção da Corrente para Sistemas de Subdistribuição (69001V a 161kV). .....	18
Tabela 2.3 - Limites de distorção de corrente para sistemas de alta tensão (> 169kV) e sistemas de geração e co-geração isolados. .....	18
Tabela 2.4 - Limites de distorção de Tensão. ....	18
Tabela 2.5 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental). ....	21
Tabela 2.6 - Limites para os desequilíbrios de tensão. ....	21

### Capítulo 5

Tabela 5.1 – Sentido de rotação do campo girante do estator e do rotor.....	58
Tabela 5.2– Sinal para escorregamento em função da ordem harmônica. ....	61
Tabela 5.3– Sinal para o cálculo da velocidade relativa.....	66

### Capítulo 6

Tabela 6.1 - Dados da fonte programável. ....	71
Tabela 6.2 - Dados do Motor de Indução trifásico utilizado no ensaio.....	72
Tabela 6.3 - Dados para o ensaio para a fundamental na frequência de 60Hz.....	79
Tabela 6.4 - Dados para o ensaio para a fundamental na frequência de 75Hz.....	81
Tabela 6.5 - Dados para o ensaio para a fundamental na frequência de 90Hz.....	82
Tabela 6.6 - Parâmetros calculados para o ensaio da frequência fundamental. ....	84
Tabela 6.7 - Dados para o ensaio para a fundamental e terceiro harmônico na frequência de 60Hz. ....	85
Tabela 6.8 - Dados para o ensaio para a fundamental e terceiro harmônico na frequência de 75Hz. ....	87
Tabela 6.9 - Dados para o ensaio para a fundamental e terceiro harmônico na frequência de 90Hz. ....	88
Tabela 6.10 - Parâmetros calculados para o ensaio da Fundamental e Terceiro Harmônico. ..	90
Tabela 6.11 - Dados para o ensaio para a fundamental e quinto harmônico na frequência de 60Hz. ....	91

---

Tabela 6.12 - Dados para o ensaio para a fundamental e quinto harmônico na frequência de 75Hz. ....	93
Tabela 6.13 - Dados para o ensaio para a fundamental e quinto harmônico na frequência de 90Hz. ....	94
Tabela 6.14 - Parâmetros calculados para o ensaio da Fundamental e Quinto Harmônico. ....	96
Tabela 6.15 - Dados para o ensaio para a fundamental e sétimo harmônico na frequência de 60Hz. ....	97
Tabela 6.16 - Dados para o ensaio para a fundamental e sétimo harmônico na frequência de 75Hz. ....	98
Tabela 6.17 - Dados para o ensaio para a fundamental e sétimo harmônico na frequência de 90Hz. ....	100
Tabela 6.18 - Parâmetros calculados para o ensaio da Fundamental e Sétimo Harmônico. ...	101
Tabela 6.19 - Dados para o ensaio para a fundamental e décimo primeiro harmônico na frequência de 60Hz. ....	103
Tabela 6.20 - Dados para o ensaio para a fundamental e décimo primeiro harmônico na frequência de 75Hz. ....	104
Tabela 6.21 - Dados para o ensaio para a fundamental e décimo primeiro harmônico na frequência de 90Hz. ....	106
Tabela 6.22 - Parâmetros calculados para o ensaio da Fundamental e Décimo Primeiro Harmônico. ....	107
Tabela 6.23 - Dados para o ensaio para a fundamental e harmônicos ímpares na frequência de 60Hz. ....	108
Tabela 6.24 - Dados para o ensaio para a fundamental e harmônicos ímpares na frequência de 75Hz. ....	110
Tabela 6.25 - Dados para o ensaio para a fundamental e harmônicos ímpares na frequência de 90Hz. ....	111
Tabela 6.26 - Parâmetros calculados para o ensaio da Fundamental e Harmônicos Ímpares	113
Tabela 6.27 - Dados para o ensaio de desequilíbrio de amplitude. ....	115
Tabela 6.28 - Parâmetros calculados para o ensaio de desequilíbrio de amplitude a 60Hz. ...	116
Tabela 6.29 - Dados para o ensaio de desequilíbrio angular. ....	118
Tabela 6.30 - Parâmetros calculados para o ensaio de desequilíbrio de fase a 60Hz. ....	119
Tabela 6.31 - Tabela dos parâmetros calculados para os ensaios a 60Hz. ....	120
Tabela 6.32 - Tabela dos parâmetros calculados para os ensaios a 75Hz. ....	122
Tabela 6.33 - Tabela dos parâmetros calculados para os ensaios a 90Hz. ....	123

---

---

## Lista de abreviaturas e símbolos

Os índices 0, 1 ou 2 representam o componente da sequência a que se refere, zero, positivo e negativo, respectivamente.

BEN	Balanco Energético Nacional
MME	Ministério de Minas e Energia
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
PRODIST	Procedimentos de Distribuição da Agência Nacional de Energia Elétrica
LAcE	Laboratório de Acionamentos Elétricos
MATLAB	MATrix LABoratory.
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
NEMA	National Electrical Manufactures Association
CIGRÉ	Comitê Internacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
$I_{cc}$	Corrente de curto circuito
TDD	Total Demand Distortion
ONS	Operador Nacional do Sistema
DTT%	Distorção Harmônica Total de Tensão
h	Ordem harmônica
$V_h$	Tensão harmônica de ordem h
$V_1$	Tensão da componente fundamental
FD	Fator de desequilíbrio de tensão
$V_-$	Tensão Eficaz de sequência negativa – frequência fundamental
$V_+$	Tensão Eficaz de sequência positiva – frequência fundamental
MIT	Motor de Indução Trifásico
$s_h$	Escorregamento da ordem harmônica h
s	Escorregamento do motor
$\omega_s$	Velocidade síncrona
$R_s$	Resistência do estator
$R_r$	Resistência do rotor

---

$X_s$	Reatância do estator
$X_r$	Reatância do rotor
$R_m$	Resistência de perdas no núcleo
$X_m$	Reatância de magnetização
$I_s$	Corrente do estator
$I_r$	Corrente do rotor
$R_{r1,2}$	Resistência que representa a carga
T	Torque
P	Potência ativa
$\theta$	Ângulo entre a tensão e a corrente
$\omega_m$	Velocidade do eixo da máquina
$V_{deseq}$	Desequilíbrio de tensão em %
C%	Carregamento do motor em %
$\Delta T\%$	Variação percentual de temperatura
$P_{feharm}$	Perdas no núcleo
$P_{jsharm}$	Perdas por efeito joule no enrolamento do estator
f	Frequência
$P_{jrharm}$	Perdas por efeito joule no enrolamento do rotor
$E_m$	Tensão no ramo magnetizante
$I_{rms}$	Corrente eficaz
$P_{cu2}$	Perdas no rotor devido a presença de harmônicos
FHV	Fator harmônico de tensão
$V_k$	Harmônico de tensão em relação a nominal
k	Ordem do harmônico
$P_H$	Perdas harmônicas
$D_F$	Fator de Derating
$Q_B$	Potência reativa de Budeanu
$D_B$	Potência de distorção
S	Potência aparente
Q	Potência reativa
G	Condutância
B	Susceptância
Y	Admitância

---

---

$fp$	Fator de potência
$Q_F$	Potência reativa de Fryze
$i_w$	Corrente não-ativa De Fryze
$i_b$	Corrente adicional de ocupação do sistema elétrico
$P_1$	Potência ativa fundamental
$P_H$	Potência ativa não-fundamental
$S_e$	Potência aparente efetiva
$V_e$	Tensão efetiva
$I_e$	Corrente efetiva
$V_{e1}$	Tensão efetiva da componente fundamental
$I_{e1}$	Corrente efetiva da componente fundamental
$V_{eH}$	Tensão efetiva das componentes harmônicas
$I_{eH}$	Corrente efetiva das componentes harmônicas
$V_1$	Tensão fundamental
$I_1$	Corrente fundamental
$Q_1$	Potência reativa fundamental
$S_1$	Potência aparente fundamental
$S_{e1}$	Potência aparente efetiva fundamental
$S_{eN}$	Potência aparente efetiva não-fundamental
$D_{eI}$	Potência de distorção de corrente
$D_{eV}$	Potência de distorção de tensão
$DTT_e$	Distorção harmônica efetiva de tensão
$DTI_e$	Distorção harmônica efetiva de corrente
$S_{U1}$	Potência aparente fundamental de desbalanço
FDC	Fator de desbalanço de carga
$FP_e$	Fator de potência efetivo
$FP_1$	Fator de potência fundamental
$\dot{V}$	Fasores de tensão
M	Conjugado
n	Velocidade do motor
$n_s$	Velocidade síncrona
$n_r$	Velocidade relativa harmônica

---

---

## Sumário

<b>Lista de figuras</b> .....	x
<b>Lista de tabelas</b> .....	xiv
<b>Lista de abreviaturas e símbolos</b> .....	xvi
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 - Considerações iniciais.....	1
1.2 - Qualidade de Energia.....	2
1.3 - Cálculo de Potencias em Sistemas Desequilibrados e com Distorções Harmônicas .....	4
1.4 – Objetivos do Trabalho.....	4
1.5 – Estrutura da Dissertação.....	5
<b>CAPÍTULO 2 -DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO E DISTORÇÕES HARMÔNICAS</b> .....	7
2.1 – Introdução .....	7
2.2 – Desequilíbrio de Tensão.....	7
2.2.1 – Causas do desequilíbrio.....	9
2.2.2 – Efeitos do desequilíbrio de tensão.....	9
2.2.3 – Métodos de determinação do desequilíbrio .....	10
2.2.3.1 – Método de Componentes Simétricas.....	10
2.2.3.2 – Método de NEMA .....	11
2.2.3.3 – Método do CIGRÉ .....	11
2.2.3.4 – Método do IEEE.....	11
2.3 – Distorção Harmônica.....	12
2.3.1 – Origem das Distorções Harmônicas .....	13
2.3.2- Efeitos das Distorções Harmônicas.....	14
2.4 - Normas.....	16

---

2.4.1 – Norma IEEE .....	16
2.4.2 - Norma ANEEL de qualidade de energia.....	18
2.4.2.1 – Distorções harmônicas .....	19
2.4.2.2 – Desequilíbrio de Tensão.....	21
2.5 – Conclusão .....	21
<b>CAPÍTULO 3 - EFEITO DA TENSÃO DESBALANCEADA E DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS NO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO .....</b>	<b>23</b>
3.1 – Introdução .....	23
3.2 – Circuito Equivalente do Motor de Indução Trifásico.....	23
3.2.1 - Circuitos Equivalentes por Fase do MIT com Desequilíbrio de Tensão.....	25
3.2.2 – Equações.....	26
3.3 – Efeitos .....	28
3.3.1 – Efeitos do desequilíbrio de tensão no motor de indução trifásico.....	29
3.3.2 – Efeitos das distorções no motor de indução trifásico .....	31
3.3.3 – Aquecimento .....	34
3.3.4 – Fator de <i>Derating</i> do Motor de Indução.....	34
3.3.5 – Vibração .....	35
3.3.6 – Cogging e Crawling .....	35
3.4 – Conclusão.....	35
<b>CAPÍTULO 4 - POTÊNCIA ELÉTRICA TRIFÁSICA EM SISTEMAS DESBALANCEADOS NA PRESENÇA DE HARMÔNICAS.....</b>	<b>37</b>
4.1- Introdução .....	37
4.2 – Histórico.....	37
4.3 – Teoria de Potências Propostas.....	38

---

4.3.1 - Definições de Potências Segundo Budeanu .....	40
4.3.2 – Definições de Potências Segundo Fryze .....	42
4.3.3 - Definições propostas por Akagi e Nabae .....	43
4.3.4 - Definições propostas por Czarnecki .....	44
4.3.5 - Definições da Norma IEEE 1459-2010 .....	46
4.3.5.1 - Potência Ativa.....	48
4.3.5.1.1 – Potência Ativa Fundamental .....	48
4.3.5.1.2 – Potência Ativa não Fundamental.....	48
4.3.5.2- Potência aparente efetiva .....	49
4.3.5.2.1 - Carga desbalanceada a quatro fios.....	49
4.3.5.2.2 - Carga desbalanceada a três fios .....	50
4.3.5.3 - Potências fundamentais de sequências positiva, negativa e zero .....	51
4.3.5.4 - Potência aparente efetiva e a relação com os indicadores de distorção .....	52
4.3.5.5 - Potência aparente fundamental de desbalanço.....	54
4.3.5.6 - Fator de Potência.....	55
4.3.5.6.1 – Fator de potência efetivo .....	55
4.3.5.6.2 – Fator de potência de sequência positiva .....	55
4.4 – Conclusão .....	56
<b>CAPÍTULO 5 – ESTUDO DO DESEMPENHO DO MOTOR DE INDUÇÃO EM</b>	
<b>REGIME PERMANENTE ALIMENTADO COM TENSÕES DESEQUILIBRADAS E</b>	
<b>DISTORCIDAS .....</b>	<b>58</b>
5.1- Introdução .....	58
5.2 – Modelo Equivalente do Motor de Indução Trifásico com Tensões Desequilibradas e Distorcidas	
.....	58

---

---

5.2.1 – Correção dos Parâmetros do Circuito Equivalente do MIT em função da Ordem Harmônica .....	60
5.2.1.1 – Ajuste da Resistência do Circuito Equivalente ao Enrolamento do Estator ( $R_s$ ).....	62
5.2.1.2 – Ajuste da Resistência que representa as perdas a vazio ( $R_m$ ) .....	62
5.2.1.3 – Ajuste da Reatância de Dispersão do enrolamento do estator ( $X_s$ ) .....	63
5.2.1.4 – Ajuste da reatância de dispersão do enrolamento do rotor bloqueado ( $X_{rb}$ ).....	63
5.2.1.5 – Ajuste da reatância do ramo de magnetização ( $X_m$ ) .....	64
5.2.2 – Cálculo do Escorregamento correspondente ao conjugado da carga .....	65
5.2.3 – Cálculo da Velocidade Relativa Harmônica e Correção da Resistência do Rotor .....	66
5.2.3.1 – Ajuste da Reatância do Rotor .....	67
5.2.3.2 – Ajuste da Resistência do Rotor .....	67
5.3 – Conclusão .....	68
<b>CAPÍTULO 6 - MONTAGEM DA BANCADA DE AQUISIÇÕES DE DADOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>69</b>
6.1- Introdução .....	69
6.2- Objetivos .....	69
6.3- Bancada de aquisição de dados e ensaios .....	69
6.3.1 – Elementos da bancada .....	70
6.3.2 – Montagem final .....	77
6.4- Resultados experimentais.....	78
6.4.1 – Ensaio 1: Apenas a Fundamental .....	79
6.4.1.1 - Frequência 60Hz .....	79
6.4.1.2 - Frequência 75Hz .....	81
6.4.1.3 - Frequência 90Hz .....	82

---

6.4.2- Ensaio 2: Fundamental e Terceiro Harmônico.....	85
6.4.2.1- Frequência 60Hz .....	85
6.4.2.2 - Frequência 75Hz .....	87
6.4.2.3 - Frequência 90Hz .....	88
6.4.3- Ensaio 3: Fundamental e Quinto Harmônico .....	91
6.4.3.1- Frequência 60Hz .....	91
6.4.3.2 - Frequência 75Hz .....	93
6.4.3.3- Frequência 90Hz .....	94
6.4.4- Ensaio 4: Fundamental e Sétimo Harmônico.....	97
6.4.4.1- Frequência 60Hz .....	97
6.4.4.2- Frequência 75Hz .....	98
6.4.4.3 - Frequência 90Hz .....	100
6.4.5- Ensaio 5: Fundamental e Décimo Primeiro Harmônico .....	102
6.4.5.1- Frequência 60Hz .....	103
6.4.5.2- Frequência 75Hz .....	104
6.4.5.3- Frequência 90Hz .....	106
6.4.6- Ensaio 6: Fundamental e Harmônicos ímpares.....	108
6.4.6.1- Frequência 60Hz .....	108
6.4.6.2- Frequência 75Hz .....	110
6.4.6.3- Frequência 90Hz .....	111
6.4.7- Ensaio 7: Desequilíbrio de Amplitude a 60Hz.....	114
6.4.8- Ensaio 8: Desequilíbrio de Fase a 60Hz .....	117
6.4.9 – Análise Comparativas dos Parâmetros Calculados Para os Ensaios .....	120

---

6.4.9.1 – Análise dos ensaios para a frequência de 60Hz.....	120
6.4.9.2 – Análise dos ensaios para a frequência de 75Hz.....	122
6.4.9.3 – Análise dos ensaios para a frequência de 90Hz.....	123
6.5 – Conclusão .....	124
<b>CAPÍTULO 7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>126</b>
7.1- Conclusões Finais .....	126
7.2- Propostas para trabalhos futuros .....	126
<b>Apêndice A – Tela do <i>software</i> de aquisição de dados .....</b>	<b>128</b>
<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>129</b>

---

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

### 1.1 - Considerações iniciais

Os motores elétricos são essenciais para os processos industriais, sendo que o motor de indução trifásica (MIT) é o principal equipamento utilizado para transformação de energia elétrica em energia mecânica para realizar movimentação de máquinas e equipamentos. A sua robustez, baixo custo, alta eficiência, facilidade de manutenção e utilização em diferentes situações de carga são as razões pelas quais este tipo de motor seja o mais utilizado. Segundo o (BEN, 2019) a energia consumida para suprir a demanda da indústria foi de 37,5% da energia elétrica gerada, conforme observa-se no gráfico apresentado na Figura 1.1. Os motores são responsáveis por 68% deste consumo, de acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME). Dos motores de indução trifásicos, os do tipo gaiola de esquilo são a carga mais utilizada, sendo a mais importante em sistemas industriais.

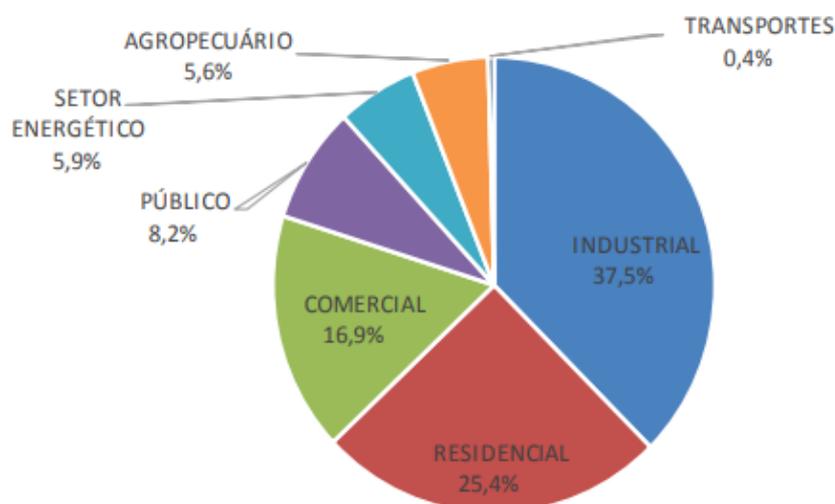


Figura 1.1 - Distribuição do Consumo de energia por setor em 2019.  
Fonte: BEN 2019.

A especificação do motor de indução trifásico é feita para operações em alimentação trifásica senoidal e equilibrada, dessa maneira quando é ligado a uma rede desequilibrada e com distorções harmônicas apresenta efeitos indesejáveis, uma vez que trabalha fora das suas especificações.

---

De acordo com Rezende e Samesima (2012) um dos fatores que mais colabora para o aumento de perdas nos motores trifásicos é a alimentação com desequilíbrio de fases, que geram correntes excessivas no motor que provocam:

- Elevação da temperatura acima dos limites aceitáveis – causa perda nos isolamentos;
- Redução do rendimento;
- Redução do conjugado disponível para a carga, pela existência de componente de campo magnético girante em sentido contrário a da rotação do motor.

Desequilíbrios de 3,5% na tensão de alimentação podem aumentar as perdas do motor em até 20%, devido ao fato de que a tensão desequilibrada em contato com a impedância de sequência negativa gerada, que tem valor muito pequeno, provoca o surgimento de uma corrente elevada. Assim, a tensão da rede deve ser regularmente monitorada e os desequilíbrios devem ser corrigidos.

A presença de distorções harmônicas também afeta o funcionamento dos motores. A existência de harmônicas na alimentação do motor provoca o aumento do aquecimento, consequentemente tem-se maiores perdas reduzindo a eficiência e o torque disponível do motor, além de causar um aumento do ruído do mesmo.

Tanto os órgãos regulamentadores quanto os consumidores têm interesse em monitorar a energia elétrica fornecida, no que se refere ao conhecimento das condições da qualidade da energia e também com relação a qualidade do serviço. Após a criação da ANEEL e demais agências regulamentadoras, tem-se um empenho em definir medidas e procedimentos que garantam os direitos dos consumidores, melhorando a qualidade do serviço e do produto, além de preservar os sistemas elétricos de fornecimento de energia.

## **1.2 - Qualidade de Energia**

Com base na ANEEL, a qualidade da energia elétrica deve ser avaliada através de três grandes aspectos: a qualidade do produto que está relacionada à conformidade da tensão em regime permanente e à ausência de perturbações na forma de onda; a qualidade do serviço no que tange à continuidade da prestação do serviço e a qualidade do atendimento ao consumidor.

A qualidade da energia tem várias definições para descrever o mesmo conjunto de fenômenos que afetam a amplitude e a forma de onda da tensão e corrente. Uma

---

definição é a frequência e severidade dos desvios na amplitude e forma de onda da tensão e da corrente. Outra definição diz que é qualquer problema na tensão, na corrente ou desvio na frequência que resulte em falha ou prejudique a operação dos equipamentos. Uma terceira definição afirma que um sistema elétrico com excelente qualidade da energia elétrica é caracterizado pelo fornecimento de energia em tensão com forma de onda senoidal pura, sem alterações em amplitude e frequência, como se emanasse de uma fonte de potência infinita. (ROCHA, 2016)

Desse modo, uma má qualidade da energia significa que a onda de tensão e/ou de corrente elétrica tem desvios da norma a ponto de prejudicar o funcionamento do equipamento ou causar falhas. Por outro lado, uma instalação elétrica com uma boa qualidade de energia, significa que os desvios da norma são baixos e os equipamentos funcionam perfeitamente.

Os principais distúrbios que afetam a rede elétrica e conseqüentemente a qualidade de energia são os transitórios originados de descargas elétricas ou chaveamento; variações na tensão de curta duração que são provenientes de energização de cargas que requerem altas correntes ou por falha em cabos do sistema; variações de tensão de longa duração que são causadas por saídas de grandes blocos de carga e por perda de fase; desequilíbrios nas correntes ou tensão que são geradas por desequilíbrios no sistema de distribuição de cargas; surtos acima da tensão limite mesmo que por curtos períodos e distorções nas formas de onda.

O uso cada vez mais frequente de técnicas não-lineares de controle (retificação, inversão, chaveamento, etc.) e a utilização de cargas não-lineares (cargas comandadas eletronicamente: televisão, micro-ondas, computadores, periféricos e diversos eletrodomésticos) causam o surgimento de formas de onda distorcidas na rede elétrica. Além do uso crescente de equipamentos de eletrônica de potência que geram inter-harmônicas, distúrbios de tensão e ruídos.

Tanto as concessionárias de energia quanto os consumidores têm interesse em fornecer e receber uma energia isenta de perturbações, ou que sejam em níveis mínimos. A presença de distorções na corrente que não contribuem para a geração de trabalho é altamente indesejável no sistema elétrico.

A ANEEL a partir de 2017 determinou a aplicação de penalidades para as concessionárias de energia que ficam sujeitas a multas se houver violação das condições previstas de qualidade. Surge assim, a necessidade do monitoramento da qualidade de energia, para assegurar ao consumidor que a energia que ele está adquirindo apresenta características adequadas e para a proteção e controle da própria concessionária.

---

O Módulo 8 do PRODIST, que é a norma da ANEEL que trata da qualidade de energia, estipula limites para distorções harmônicas e desequilíbrio de tensão.

Diante desse fato é inevitável encontrar uma maneira de fazer a aferição e equacionamento de tais grandezas diante das situações de desequilíbrios e distorções harmônicas.

### **1.3 - Cálculo de Potencias em Sistemas Desequilibrados e com Distorções Harmônicas**

As definições de potências na presença de distorções harmônicas e desequilíbrio é um tema muito abrangente e complexo. As primeiras pesquisas na área ocorreram em 1927 e com o passar dos anos surgiram diversos outros estudos, porém até a atualidade ainda não existe um consenso de como aferir potências diante de tais situações, uma vez que o entendimento dos conceitos de potência para sistemas desequilibrados não é trivial, e é necessário compreender o comportamento e as interações dos fluxos de energia.

A norma 1459-2010 do IEEE é uma das mais indicadas para o cálculo de potências diante dessas situações, uma vez que separa as componentes de sequências positiva, negativa e zero, possibilitando a compreensão dos fenômenos físicos, bem como a medição e tarifação de potências do processo de fornecimento de energia.

### **1.4 – Objetivos do Trabalho**

Analisar o comportamento de tensões e correntes no motor de indução trifásico sob tensões desequilibradas e/ou a presença de distorções harmônicas na tensão de alimentação, considerando seus aspectos normativos. Deste modo, propõe-se um sistema de aquisição de dados e o desenvolvimento de um *software* que realiza o cálculo de potências, fatores de potência e distorções harmônicas diante de alguns cenários de tensões aplicadas ao motor em vazio, que foram simulados através de uma fonte programável da fabricante AMETEK.

Afim de alcançar o objetivo proposto foram seguidos os seguintes passos:

- Compreender os conceitos de distorções harmônicas e desequilíbrio de tensão, os efeitos causados nos equipamentos e a norma regulamentadora que rege os valores aceitáveis desses distúrbios na rede elétrica;
- Analisar o efeito de distorções harmônicas e desequilíbrios no motor de indução trifásico e apresentar o modelo do motor submetido a condições de desequilíbrio e

- 
- distorções harmônicas;
- Apresentar as teorias utilizadas para cálculos de potências em sistemas desequilibrados e avaliar o método mais indicado;
  - Consolidar os conceitos de potência ativa, aparente, fator de potência e potência reativa para sistemas trifásicos desbalanceados com a presença de harmônicas;
  - Desenvolver um *software* em MATLAB que seja capaz de calcular potência em sistemas submetidos a desequilíbrio e distorções harmônicas;
  - Montar os módulos de aquisição e condicionamento de sinais;
  - Garantir a confiabilidade do sistema de aquisição de dados;
  - Implementar o *software* para leitura e armazenamento de dados no LabVIEW;
  - Efetuar ensaios experimentais e analisar os resultados obtidos;
  - Obter contribuições científicas a partir do trabalho, por meio de publicações em conferências e periódicos;
  - Propor novos estudos a partir do resultado final obtido.

## 1.5 – Estrutura da Dissertação

O trabalho foi dividido em sete capítulos, abordando a importância de motores de indução trifásicos, os efeitos de desequilíbrios e distorções harmônicas, normas da qualidade de energia, modelagem do motor de indução com perdas, equacionamento de potências de sistemas com distorções harmônicas e desequilíbrios de tensão, a metodologia utilizada para realização dos ensaios e a apresentação de resultados experimentais.

O capítulo 1 ressalta o vasto uso do motor de indução trifásico, alguns dos efeitos dos desequilíbrios de tensão e harmônicas no motor de indução trifásico, definições e a importância de uma boa qualidade de energia, a necessidade de equacionar tais efeitos, os objetivos do trabalho, a contextualização e apresentação do conteúdo.

No capítulo 2 são abordadas as definições de desequilíbrios de tensão, distorções harmônicas e os aspectos normativos.

O capítulo 3 apresenta o modelo equivalente e equações do motor de indução trifásico na presença de distorções harmônicas e desequilíbrios e quais são os efeitos de tais distúrbios para o motor de indução trifásico.

---

O capítulo 4 apresenta algumas das propostas de cálculo de potências para sistemas desequilibrados e na presença de distorções harmônicas.

Tem-se no capítulo 5 o estudo do modelo equivalente do motor de indução trifásico e a correção dos parâmetros considerando o desequilíbrio de tensão e as distorções harmônicas.

No capítulo 6 são apresentados os procedimentos experimentais utilizados para a montagem da bancada de aquisição, equipamentos utilizados e os resultados experimentais dos ensaios.

Ao final do trabalho foi anexado uma imagem da tela do programa de aquisição de dados desenvolvido no ambiente LabVIEW.

---

## CAPÍTULO 2 -DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO E DISTORÇÕES HARMÔNICAS

### 2.1 – Introdução

A ampliação do número de cargas não-lineares e sua utilização constitui em uma das maiores preocupações tanto das concessionárias quanto dos consumidores, como também é motivo de constantes problemas para o sistema elétrico.

Segundo Mehl (2002), cargas conhecidas como “Não-lineares” ou “Cargas Elétricas Especiais” provocam distorções de tensão e/ou corrente nas redes elétricas, comprometendo em boa parte dos casos, o perfeito funcionamento do sistema e seus equipamentos.

O presente capítulo visa apresentar as definições de desequilíbrios de tensão e distorções harmônicas de tensão, como são originados e quais são os efeitos da presença desses distúrbios no sistema elétrico e equipamentos. Ao final desse capítulo tem-se os aspectos normativos da ANEEL e IEEE que dita os níveis aceitáveis de desequilíbrios de tensão e distorções harmônicas.

### 2.2 – Desequilíbrio de Tensão

Um sistema trifásico equilibrado é representado através de fasores de mesma magnitude e defasados entre si  $120^\circ$ , conforme a Figura 2.1.

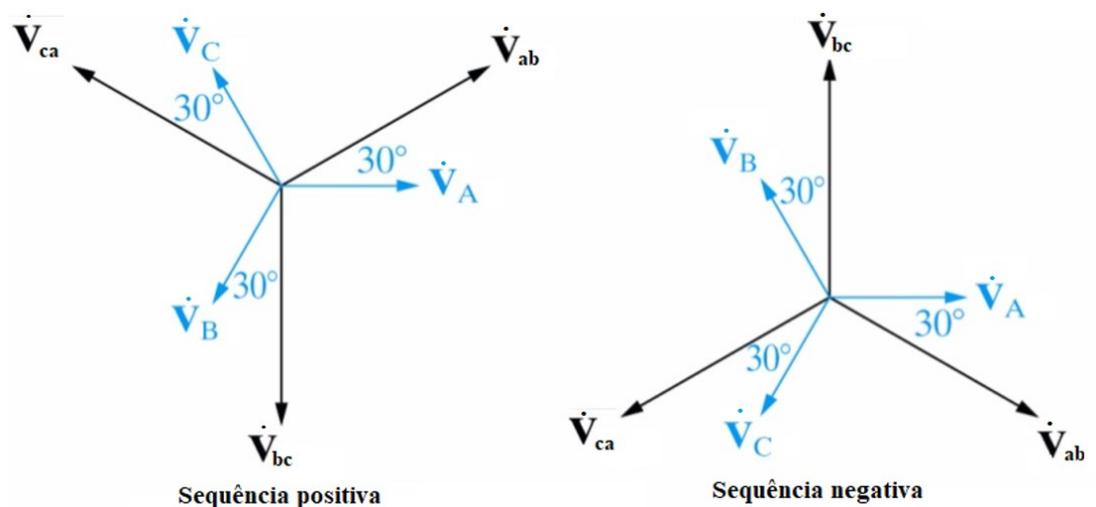


Figura 2.1- Diagrama de Tensões de Fase e de Linha para sistemas equilibrados.

---

Nesta figura observa-se as tensões de fase  $\dot{V}_A$ ,  $\dot{V}_B$  e  $\dot{V}_C$  e as tensões de linha  $\dot{V}_{ab}$ ,  $\dot{V}_{bc}$  e  $\dot{V}_{ca}$ .

As tensões para o sistema equilibrado para a sequência positiva podem ser expressas pelas equações (2.1), (2.2) e (2.3).

$$\dot{V}_A = V \angle 0^\circ \quad (2.1)$$

$$\dot{V}_B = V \angle -120^\circ \quad (2.2)$$

$$\dot{V}_C = V \angle 120^\circ \quad (2.3)$$

Já as tensões para o sistema equilibrado para a sequência negativa são apresentadas nas equações (2.4), (2.5) e (2.6).

$$\dot{V}_A = V \angle 0^\circ \quad (2.4)$$

$$\dot{V}_B = V \angle 120^\circ \quad (2.5)$$

$$\dot{V}_C = V \angle -120^\circ \quad (2.6)$$

Onde:

$\dot{V}_A, \dot{V}_B$  e  $\dot{V}_C$ : são os fasores das tensões [V];

$V$ : valor eficaz de tensão [V].

O desequilíbrio em um sistema elétrico trifásico se trata de uma condição onde as três fases apresentam diferentes valores de tensão em módulo ou defasagem angular entre fases diferentes de  $120^\circ$ , ou mesmo as duas condições simultaneamente, conforme a Figura 2.2.

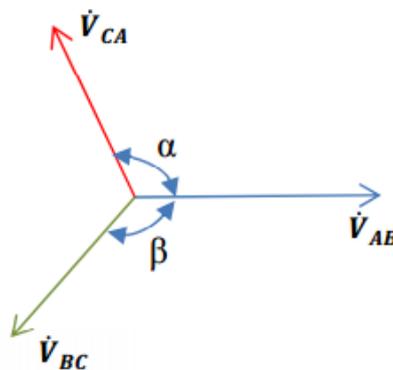


Figura 2.2– Diagrama de Tensões de Linha para sistemas desequilibrados.  
Fonte: LIMA, 2016.

---

O desequilíbrio de tensão baseia-se na teoria de componentes simétricas. A razão entre componentes de sequência negativa ou zero, com a componente de sequência positiva, pode ser usado para especificar a porcentagem de desequilíbrio (GOSBEL et al, 2002).

### **2.2.1 – Causas do desequilíbrio**

A origem dos desequilíbrios provém das cargas monofásicas distribuídas inadequadamente nos sistemas de distribuição, propiciando o surgimento no circuito de tensões de sequência negativa. Este problema é agravado quando consumidores alimentados de forma trifásica possuem uma má distribuição de carga em seus circuitos internos, impondo correntes desequilibradas no circuito da rede. Tensões desequilibradas podem também ser resultado de queima de fusíveis em uma fase de um banco de capacitores trifásicos.

As causas do desequilíbrio de tensão podem incluir também: assimetria nas impedâncias nos enrolamentos do transformador, transposição incompleta de linhas de transmissão, a presença de motor elétricos trifásicos com impedâncias desequilibradas, desigualdade nas impedâncias das linhas de transmissão, sobtensões, sobretensões, afundamentos, níveis divergentes de distorção harmônica nas fases do sistemas elétricos e interrupções, dentre outros fatores (NEVES, 2014).

### **2.2.2 – Efeitos do desequilíbrio de tensão**

Pequenos valores de desequilíbrio de tensão geram grandes fluxos de corrente desbalanceados devido a pequena impedância de sequência negativa na alimentação do motor.

Para Neves (2014) os efeitos dos desequilíbrios no motor de indução são:

- Surgimento de correntes de sequência negativa;
- Aumento das perdas no cobre do estator, perdas no cobre do rotor e perdas no ferro que resultam no aumento da temperatura de operação;
- Sobreaquecimento da máquina, provocando desgaste do isolamento e redução da vida útil;
- Oscilações de conjugado;
- Redução do conjugado médio;
- Redução do rendimento;
- Aumento no tempo de partida do motor;

- 
- Aumento no custo com manutenções.

### 2.2.3 – Métodos de determinação do desequilíbrio

Em Lima (2016) são apresentadas as definições de desequilíbrio de tensão e métodos utilizados pelo NEMA, IEEE e CIGRÉ para equacioná-los.

#### 2.2.3.1 – Método de Componentes Simétricas

Método que caracteriza a rede elétrica desequilibrada através de redes de sequência positiva, negativa e zero.

O fator de desequilíbrio de tensão é definido pela relação entre os módulos da tensão de sequência negativa e sequência positiva, conforme aplica-se a equação (2.7).

$$FD = \frac{V_-}{V_+} 100 \quad (2.7)$$

Onde:

$FD$ : fator de desequilíbrio de tensão [%];

$V_+$ : tensão de sequência positiva (RMS) [V];

$V_-$ : tensão de sequência negativa (RMS) [V].

De acordo com Lima (2016), este método é indicado pelo PRODIST para a determinação do fator de desequilíbrio, sendo necessário os cálculos das componentes de sequência positiva e negativa, dadas pelas equações (2.8) e (2.9), respectivamente.

$$V_+ = \frac{\dot{V}_{ab} + a \cdot \dot{V}_{bc} + a^2 \dot{V}_{ca}}{3} \quad (2.8)$$

$$V_- = \frac{\dot{V}_{ab} + a^2 \dot{V}_{bc} + a \dot{V}_{ca}}{3} \quad (2.9)$$

Onde:

$a$ :  $1 \angle 120^\circ$ ;

$\dot{V}_{ab}, \dot{V}_{bc}, \dot{V}_{ca}$ : fasores das tensões de linha [V].

---

### 2.2.3.2 – Método de NEMA

O NEMA (Associação Nacional de Indústrias Elétricas) define desequilíbrio de tensão como uma taxa de desequilíbrio de tensão de linha que é dada como:

$$FD = \frac{\Delta V}{Vm} \cdot 100 \quad (2.10)$$

Onde:

$\Delta V$ : máximo desvio das tensões de linha em relação ao valor médio [V];

$Vm$ : média aritmética dos módulos das tensões de linha [V].

### 2.2.3.3 – Método do CIGRÉ

O método do CIGRÉ determina o desequilíbrio a partir de grandezas adimensionais correlacionadas às tensões de linha, conforme equações (2.11) e (2.12) (LIMA, 2016).

$$FD = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \cdot 100 \quad (2.11)$$

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (2.12)$$

Onde:

$V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  e  $V_{ca}$ : módulos de tensão de linha [V].

### 2.2.3.4 – Método do IEEE

O IEEE define o desequilíbrio de tensão como a taxa de desequilíbrio de tensão de fase que é:

$$FD = \frac{3(V_{m\acute{a}x} - V_{m\acute{i}n})}{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}} \cdot 100 \quad (2.13)$$

---

Onde:

$V_{m\acute{a}x}$ : maior valor dentre os m\u00f3dulos das tens\u00f5es trif\u00e1sicas de linha [V];

$V_{m\acute{i}n}$ : menor valor dentre os m\u00f3dulos das tens\u00f5es trif\u00e1sicas de linha [V];

$V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  e  $V_{ca}$ : m\u00f3dulo das tens\u00f5es de linha [V].

Analisando os m\u00e9todos apresentados sabe-se que o mais utilizado \u00e9 o m\u00e9todo de componente sim\u00e9tricas, pois a norma da ANEEL de qualidade de energia se baseia neste m\u00e9todo para c\u00e1lculo de desequil\u00edbrio de tens\u00e3o.

### 2.3 – Distor\u00e7\u00e3o Harm\u00f4nica

Segundo a ANEEL a distor\u00e7\u00e3o harm\u00f4nica expressa o grau de desvio da onda em rela\u00e7\u00e3o ao padr\u00e3o ideal, que \u00e9 o senoidal. Na distor\u00e7\u00e3o harm\u00f4nica, as correntes harm\u00f4nicas se somam com a corrente fundamental causando distor\u00e7\u00f5es na forma de onda original da rede.

Com base no Teorema de Fourier toda fun\u00e7\u00e3o per\u00edodica n\u00e3o senoidal pode ser representada sob a forma de uma soma de express\u00f5es (s\u00e9rie) que \u00e9 composta por uma componente cont\u00ednua, uma componente senoidal em frequ\u00eancia fundamental e de uma componente senoidal cujas frequ\u00eancias s\u00e3o m\u00faltiplos inteiros da fundamental compostas por harm\u00f4nicas. (SCHNEIDER, 2003).

Uma onda decomposta atrav\u00e9s da s\u00e9rie de Fourier \u00e9 expressa conforma mostra a equa\u00e7\u00e3o (2.14) para a tens\u00e3o e a (2.15) para a corrente em valores RMS (eficazes).

$$v(t) = V_{cc} + \sqrt{2}V_f \text{sen}(\omega_1 t) + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} V_h \text{sen}(\omega_1 t + \phi_h) \quad (2.14)$$

$$i(t) = I_{cc} + \sqrt{2}I_f \text{sen}(\omega_1 t) + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} I_h \text{sen}(\omega_1 t + \theta_h) \quad (2.15)$$

Onde:

$V_{cc}$  e  $I_{cc}$  s\u00e3o as componentes cont\u00ednuas [V];

$V_f$  e  $I_f$  s\u00e3o os m\u00f3dulos da tens\u00e3o e corrente, respectivamente, na frequ\u00eancia fundamental [V];

$h$  \u00e9 a ordem harm\u00f4nica;

$\omega_1$  \u00e9 a frequ\u00eancia fundamental [rad/s];

---

$V_h$  e  $I_h$  são os módulos da tensão e corrente, respectivamente, na frequência harmônica  $h$  [V];  $\phi_h$  e  $\theta_h$  são os ângulos da tensão e corrente, respectivamente, na frequência harmônica  $h$  [rad].

De acordo com Neves (2014), de posse de várias ondas puramente senoidais e de uma componente DC, resultante da decomposição, pode-se realizar as análises para cada termo da série separadamente. Em seguida, somam-se os efeitos encontrados de acordo com o princípio da superposição de efeitos.

As distorções harmônicas são divididas em harmônicas de sequência positiva, negativa e zero. Considerando  $h$  como a ordem harmônica e  $n$  variando de zero a infinito, tem-se que  $h = 3n+1$  são as harmônicas de sequência positiva;  $h = 3n+2$ , são as harmônicas de sequência negativa e  $h = 3n+3$ , são as harmônicas de sequência zero.

A Figura 2.3, apresenta a composição harmônica de uma onda quadrada. Desse modo observa-se na figura a onda quadrada, em cor preta, e as suas componentes harmônicas, sendo a componente fundamental apresentada em vermelho, a componente de ordem harmônica 3 em cor rosa, já a de quinta ordem em verde e a de ordem 7 em azul.

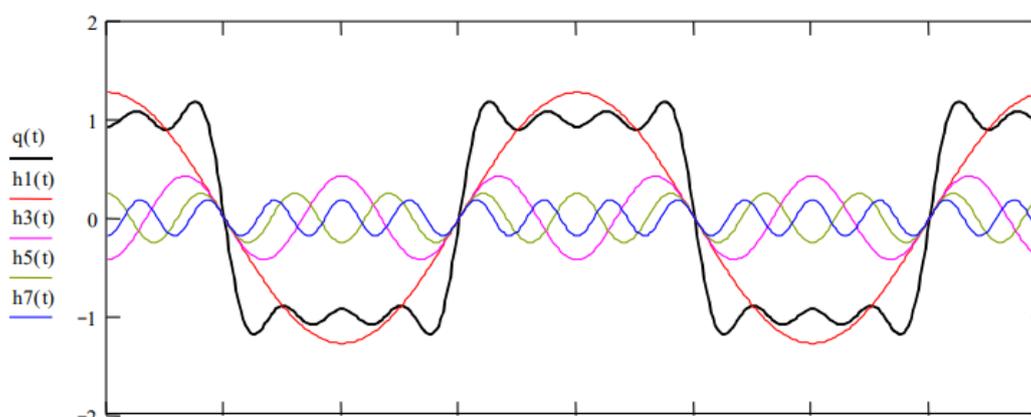


Figura 2.3– Composição de onda a partir de suas harmônicas.

### 2.3.1 – Origem das Distorções Harmônicas

No sistema de energia as harmônicas se originam na corrente elétrica. As harmônicas são geradas pelas cargas não-lineares conectadas a rede. A circulação das correntes harmônicas gera tensões harmônicas através das impedâncias da rede, e então uma deformação da tensão de alimentação. (SCHNEIDER, 2003).

---

Cargas não-lineares são as que possuem tensão e corrente de alimentação de formas diferentes. Tipicamente, as cargas que utilizam eletrônica de potência são não-lineares, como exemplo: equipamentos eletrônicos, compensadores estáticos, conversores, fornos a arco, máquinas de solda, inversores de frequência, computadores e etc.

Além disso, segundo Neves (2014), existem outras causas para o aparecimento das componentes harmônicas na rede, são elas: os transformadores e máquinas rotativas durante condições transitória ou fora de operação normal; corrente de magnetização dos transformadores; reatores saturados para isolar a componente DC quando a carga não requer esta componente; bancos de capacitores para correção de fator de potência, ligados em paralelo com o sistema de distribuição e a presença de indutores em série com as linhas de transmissão. Portanto, a maior causa para as distorções harmônicas é a presença das cargas não lineares.

### **2.3.2- Efeitos das Distorções Harmônicas**

As harmônicas que circulam nas redes deterioram a qualidade da energia e estão diretamente relacionadas com a sequência positiva, negativa ou zero das harmônicas, originando no motor de indução os seguintes efeitos, de acordo com Neves (2014):

- Tendência em frear o motor reduzindo a velocidade;
- Aumento do escorregamento;
- Aumento das perdas no cobre e no ferro, resultando no aumento da temperatura;
- Redução do fator de potência, do conjugado e rendimento;
- Aumento da partida do motor.

Além disso, de acordo com Gosbell e Smith (2002) as distorções harmônicas causam:

- Sobrecarga da rede de distribuição devido ao aumento da corrente eficaz;
- Sobrecarga dos condutores de neutro;
- Sobrecarga, vibrações e envelhecimento dos alternadores, transformadores, motores, ruídos dos transformadores;
- Sobrecarga e envelhecimento dos capacitores de compensação de energia reativa;
- Deformação da tensão de alimentação podem perturbar receptores sensíveis;
- Perturbações das redes de comunicação ou das linhas telefônicas.

---

A sobrecarga da rede obriga a aumentar a potência necessária, e implicam perdas suplementares, e as deformações da corrente provocam disparos intempestivos e a parada das instalações da produção.

No trabalho de Pomílio e Deckmann (2017) é apresentado os efeitos de distorções harmônicas em motores e geradores, transformadores, Cabos de alimentação e Capacitores, conforme apresentado abaixo.

### **Motores e geradores**

Um dos efeitos das harmônicas em máquinas rotativas (indução e síncrona) é o aumento do aquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre. Afeta-se, assim, sua eficiência e o torque disponível. Outro aspecto é a presença de distorções harmônicas no fluxo, produzindo alterações no acionamento, como componentes de torque de sequência negativa que atuam no sentido oposto ao da fundamental. Algumas componentes harmônicas podem produzir oscilações mecânicas em sistemas devido a uma potencial excitação de ressonâncias mecânicas. Além disso, tem-se aumento do ruído audível, quando comparado com alimentação senoidal.

### **Transformadores**

Distorções harmônicas na tensão aumentam as perdas no ferro, enquanto harmônicas na corrente elevam as perdas no cobre. O efeito das reatâncias de dispersão fica ampliado, uma vez que seu valor aumenta com a frequência. Tem-se ainda uma maior influência das capacitâncias parasitas (entre espiras e entre enrolamento) que podem realizar acoplamentos não desejados e, eventualmente, produzir ressonâncias no próprio dispositivo.

### **Cabos de alimentação**

Em razão do efeito pelicular, que restringe a seção condutora para componentes de frequência elevada, os cabos de alimentação têm um aumento de perdas devido às harmônicas de corrente. Caso os cabos sejam longos e os sistemas conectados excitem as ressonâncias da linha de transmissão, podem aparecer elevadas sobretensões ao longo da linha, podendo danificar o cabo.

### **Capacitores**

Possibilidade da ocorrência de ressonâncias (excitadas pelas harmônicas) podendo produzir níveis excessivos de corrente e/ou de tensão. Além disso, como a reatância capacitiva

---

diminui com a frequência, tem-se um aumento nas correntes relativas às harmônicas presentes na tensão.

### **Equipamentos eletrônicos**

Caso as harmônicas penetrem na alimentação do equipamento por meio de acoplamentos indutivos e capacitivos, eles podem também alterar o bom funcionamento do aparelho.

O grau com que harmônicas podem ser toleradas em um sistema alimentado depende da susceptibilidade da carga ou da fonte de potência. Os equipamentos menos sensíveis, geralmente, são os de aquecimento, que possuem carga resistiva, para os quais a forma de onda não é relevante. Os mais sensíveis são aqueles que no seu projeto assumem a existência de uma alimentação senoidal.

## **2.4 - Normas**

A norma IEEE 519-1992 menciona alguns dos efeitos causados pela presença de harmônicas na rede elétrica, como sobreaquecimento de transformadores, correntes excessivas nos condutores de neutro e interferências nos sistemas de comunicação. Esta norma recomenda práticas e limites de distorção da corrente para o consumidor, com o objetivo de limitar a máxima tensão individual harmônica.

O PRODIST é um conjunto de documentos elaborados pela ANEEL e normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. O Módulo 8 deste documento trata exclusivamente de definições relacionadas à qualidade da tensão suprida aos consumidores e estabelece os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço.

### **2.4.1 – Norma IEEE**

A norma IEEE- 519-1992 recomenda práticas e limites de distorção da corrente para o consumidor, com o objetivo de limitar a máxima tensão individual harmônica em até 3%. Os limites são especificados em função do nível de tensão dos sistemas, de 120V a 69kV e de

69,1kV a 161kV, e da razão da corrente de curto-circuito do sistema de ponto comum de conexão em relação a máxima corrente demandada.

Os limites estabelecidos referem-se aos valores medidos no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), que é o ponto no sistema elétrico compartilhado entre uma carga específica e outras cargas consumidas. Assim, não interessa ao sistema o que ocorre dentro de uma instalação, mas sim o que ela reflete para o exterior, ou seja, para os outros consumidores conectados à mesma alimentação.

Os limites diferem de acordo com o nível de tensão e com o nível de curto-circuito do PAC. Quanto maior a corrente de curto circuito ( $I_{cc}$ ) em relação a corrente de carga, maiores são as distorções de corrente admissíveis, uma vez que elas distorcerão em menor intensidade a tensão no PAC. A medida que se eleva o nível de tensão, menores são os limites aceitáveis. (POMÍLIO e DECKMANN, 2017).

A grandeza TDD significa distorção de demanda total, isto é, distorção harmônica de corrente em porcentagem da máxima corrente de demanda. Sendo assim, definida como a distorção harmônica da corrente, em porcentagem da máxima demanda de corrente de carga (demanda de 15 ou 30 minutos). A medição da TDD deve ser feita no pico de consumo.

A Tabela 2.1 apresenta os limites de distorção de corrente para sistemas de distribuição com tensões entre 120V e 69kV tomando como base a máxima corrente fundamental da carga.

Tabela 2.1 - Limites de Distorção da Corrente para Sistemas de Distribuição (120V a 69kV).

Máxima corrente harmônica em % da corrente de carga ( $I_o$ - valor da componente fundamental)						
Harmônicas Impares						
$I_{cc}/I_o$	<11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 < n$	TDD (%)
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20 < 50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50 < 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100 < 1000	12	5,5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2,5	1,4	20

A Tabela 2.2 apresenta os limites de distorção de corrente para sistemas de subtransmissão com tensões entre 69kV e 161kV.

Tabela 2.2 - Limites de distorção da Corrente para Sistemas de Subdistribuição (69001V a 161kV).

Limites para harmônicas de corrente de carga não-lineares no PAC com outras cargas						
Harmônicas Impares						
Icc/Io	<11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 < n$	TDD (%)
< 20	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
20 < 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
50 < 100	5	2,25	2	0,75	0,35	6
100 < 1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
> 1000	7	3,5	3	1,25	0,7	10

A Tabela 2.3 apresenta os limites de distorção de corrente para sistemas de transmissão com tensões acima de 161kV.

Tabela 2.3 - Limites de distorção de corrente para sistemas de alta tensão (> 169kV) e sistemas de geração e co-geração isolados.

Harmônicas Impares						
Icc/Io	<11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 < n$	TDD (%)
< 50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
$\geq 50$	3	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Para os limites de tensão, os valores mais severos são para tensões menores. É estabelecido um limite individual por componente e um limite para a distorção harmônica total (THD).

Tabela 2.4 - Limites de distorção de Tensão.

	Distorção individual	THD
69kV e abaixo	3%	5%
69,001kV até 161kV	1,5%	2,5%
Acima de 161kV	1%	1,5%

#### 2.4.2 - Norma ANEEL de qualidade de energia

Esta norma tem como objetivo estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço. Para a qualidade do produto, este módulo define a terminologia e os indicadores, caracteriza os fenômenos, estabelece os limites ou valores de referência, a metodologia de medição, a gestão das reclamações relativas à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na

---

forma de onda de tensão e os estudos específicos de qualidade da energia elétrica para fins de acesso aos sistemas de distribuição. Para a qualidade do fornecimento de energia elétrica, este módulo estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades.

Os procedimentos de qualidade de energia elétrica definidos neste módulo devem ser observados por consumidores com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição, pelos produtores de energia, distribuidoras de energia, agentes importadores ou exportadores de energia elétrica e o ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico).

#### 2.4.2.1 – Distorções harmônicas

As expressões para o cálculo das grandezas que medem as distorções harmônicas são apresentadas nas equações (2.16), (2.17), (2.18), (2.19) e (2.20).

$DIT_h\%$  - Distorção harmônica individual de tensão de ordem  $h$ .

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} 100 \quad (2.16)$$

Onde:

$V_h$ : tensão harmônica de ordem  $h$  [V];

$V_1$ : tensão fundamental medida [V].

$DTT\%$  - Distorção harmônica total de tensão é apresentada a seguir.

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} 100 \quad (2.17)$$

Onde:

$h$ : todas as ordens harmônicas de 2 até  $h_{max}$ ;

$h_{max}$ : ordem harmônica máxima conforme a classe A ou S.

---

DTT<sub>p</sub>% - distorção harmônica de tensão para a componentes pares não múltiplas de 3.

$$DTT_p \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} 100 \quad (2.18)$$

Onde:

$h$ : todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3 ( $h = 2, 4, 8, 10, 14, 16, 20, 22, 26, 28\dots$ )

$h_p$  : máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3.

DTT<sub>i</sub>% - distorção harmônica de tensão para a componentes ímpares não múltiplas de 3.

$$DTT_i \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_h^2}}{V_1} 100 \quad (2.19)$$

Onde:

$h$  = todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3 ( $h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37, \dots$ );

$h_i$  = máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3.

DTT<sub>3</sub>% - distorção harmônica de tensão para a componentes múltiplas de 3.

$$DTT_3 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} 100 \quad (2.20)$$

Onde:

$h$  = todas as ordens harmônicas múltiplas de 3 ( $h = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39, \dots$ );

$h_3$  = máxima ordem harmônica múltipla de 3.

O 95% presente nas siglas da distorção significa que representa o valor do indicador que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas.

Tabela 2.5 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

Indicador	Tensão Nominal		
	$V_n \leq 1.0 \text{ kV}$	$1.0 \text{ kV} < V_n < 69\text{kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230\text{kV}$
DTT <sub>95%</sub>	10,0%	8,0%	5,0%
DTT <sub>p95%</sub>	2,5%	2,0%	1,0%
DTT <sub>i95%</sub>	7,5%	6,0%	4,0%
DTT <sub>395%</sub>	6,5%	5,0%	3,0%

Os limites para as distorções harmônicas totais constam na Tabela 2.5 e correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição.

#### 2.4.2.2 – Desequilíbrio de Tensão

Os limites para os indicadores de desequilíbrio de tensão são apresentados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Limites para os desequilíbrios de tensão.

Indicador	Tensão Nominal	
	$V_n \leq 1.0 \text{ kV}$	$1.0 \text{ kV} < V_n < 230\text{kV}$
FD <sub>95%</sub>	3,0%	2,0%

Os limites correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição.

A norma PRODIST define que o fator de potência é uma relação que depende da potência ou da energia reativa. No entanto, não especifica como tal grandeza deve ser medida, o que é um grande problema para formas de onda não senoidais e em casos de redes trifásicas desequilibradas.

## 2.5 – Conclusão

O desequilíbrio de tensão ocorre quando se tem diferentes valores de tensão em módulo e/ou ângulo. A origem desse desequilíbrio provém da existência de cargas desequilibradas nos sistemas de distribuição e até mesmo pela presença de cargas monofásicas nestes. A

---

alimentação da rede elétrica com desequilíbrio de fases é um dos fatores que corroboram para o aumento de perdas em motores trifásicos.

Um sinal tem a presença de componentes harmônicas quando a forma de onda é deformada se comparada a um sinal senoidal e são originadas de cargas não-lineares conectadas a rede, e a presença de harmônicas na rede afeta diretamente a qualidade de energia além de inúmeras perturbações e redução de vida útil de equipamentos como motores, geradores, transformadores, capacitores e etc.

A norma da ANEEL não apresenta a definição para o cálculo de distorção harmônica de corrente e nem de desequilíbrio de tensão, nem tampouco apresenta os limites permitidos para tais distorções. Visto que quando aplica-se desequilíbrio de tensão, conseqüentemente é gerado o desequilíbrio na corrente seria importante ter também esse valor normalizado.

---

## **CAPÍTULO 3 - EFEITO DA TENSÃO DESBALANCEADA E DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS NO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO**

### **3.1 – Introdução**

Este capítulo é dedicado a apresentação do modelo equivalente do motor de indução trifásico submetido a condições de desequilíbrio de fase e distorções harmônicas e do equacionamento pertinente baseando-se neste modelo. Este capítulo visa, também, analisar os efeitos das condições de desequilíbrio e harmônicas no MIT.

Sabe-se que o motor de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo é o mais utilizado em aplicações industriais devido as suas vantagens, tais como: baixo custo, facilidade de controle, durabilidade, confiabilidade e robustez. Essas vantagens; especialmente a confiabilidade e durabilidade, só podem ser alcançadas se o motor de indução for alimentado com tensões de entrada balanceadas senoidais com magnitude apropriada. Infelizmente as aplicações de energia em potência atuais, envolvem semicondutores de potência os quais, injetam harmônicas na rede de serviços públicos, e as distorções harmônicas deterioram a qualidade da energia fornecida.

### **3.2 – Circuito Equivalente do Motor de Indução Trifásico**

Sob condição de distorções harmônicas e/ou desequilíbrio da tensão de alimentação, o convencional circuito equivalente do motor de indução não é conveniente, uma vez que devem ser considerados os efeitos das ordens harmônicas e tensões de sequência. Desse modo será apresentado neste trabalho o circuito equivalente do MIT modificado, tomando como base Deraz e Azazi (2017) e Neves (2016).

A Figura 3.1 mostra o circuito modificado, no qual as perdas no núcleo de ferro são expressas pela resistência ( $R_m$ ) conectada em paralelo com o ramo de magnetização. Esta figura representa o circuito equivalente do MIT sob a condição de tensão distorcida.

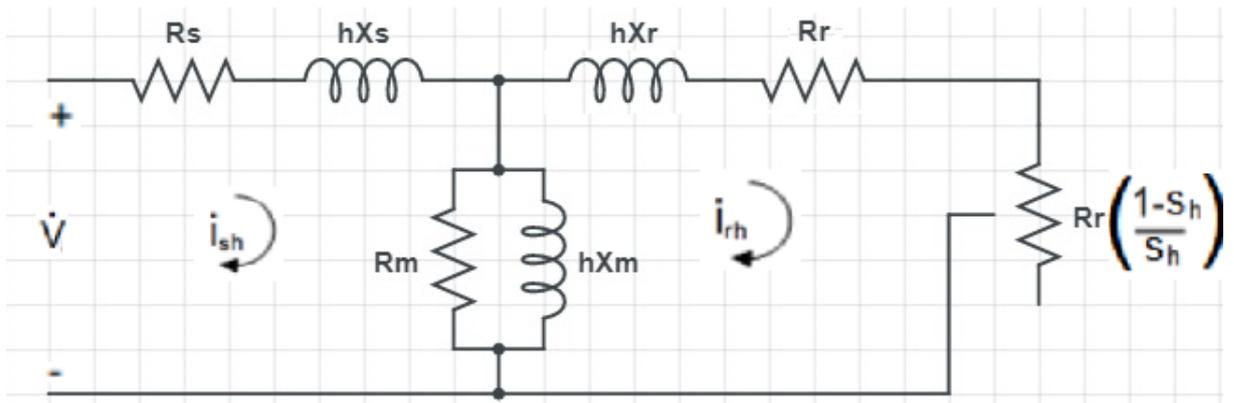


Figura 3.1- Circuito Equivalente monofásico modificado do MIT para cada ordem harmônica.

Observando a figura identifica-se ( $R_s$ ) que é a resistência do estator, ( $X_s$ ) reatância de fuga do estator, ( $R_m$ ) resistência à magnetização, ( $X_m$ ) reatância de magnetização, ( $R_r$ ) resistência do rotor e ( $X_r$ ) reatância de fuga do rotor. Esses valores são determinados experimentalmente usando testes tradicionais sem carga e com rotor bloqueado em valores nominais. Sendo ainda  $h$  a ordem harmônica,  $i_{sh}$  e  $i_{rh}$  as correntes harmônicas do estator e do rotor e  $\hat{V}$  a tensão harmônica na fase,  $s_h$  é o escorregamento na frequência da ordem harmônica  $h$ .

O escorregamento da ordem harmônica  $h$  ( $s_h$ ) pode ser dado como:

$$s_h = \frac{\pm h\omega_s - (1-s)\omega_s}{\pm h\omega_s} = \frac{\pm h - (1-s)}{\pm h} \quad (3.1)$$

Onde  $s$  é o escorregamento da frequência fundamental e  $\omega_s$  é a velocidade síncrona. Os sinais positivos e negativos referem-se a sequência positiva e negativa das harmônicas, respectivamente.

O conjugado corresponde a  $h$ -ésima harmônica ( $T_h$ ) de corrente e é apresentado na equação (3.2).

$$T_h = \frac{3I_{rh}^2 R_r}{\pm h s_h \omega_s} \quad (3.2)$$

As potências de entrada e de saída são apresentadas nas equações (3.3) e (3.4).

$$P_{out} = T_h \omega_m \quad (3.3)$$

$$P_{in} = 3 V_{ef} I_{ef} \quad (3.4)$$

Onde:

$P_{out}$ : potência de saída [W];

$T_h$ : conjugado [N.m];

$\omega_m$ : velocidade do eixo da máquina [rad/s];

$P_{in}$ : potência de entrada [W];

$V_{ef}$ : é o valor eficaz da tensão na fase [V];

$I_{ef}$ : é o valor eficaz da corrente na fase [A].

Já o rendimento pode ser obtido conforme observado na equação (3.5).

$$\eta [\%] = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 = \frac{T_h \omega_m}{3 V_e I_{ef}} \cdot 100 \quad (3.5)$$

### 3.2.1 - Circuitos Equivalentes por Fase do MIT com Desequilíbrio de Tensão

Segundo Neves (2016), quando o motor é alimentado por condições de desequilíbrio há parcelas de tensão relacionadas a sequência positiva, negativa e sequência zero. Assim, os circuitos equivalentes por fase adaptados para os componentes da sequência positiva, negativa e de sequência zero para o motor de indução são mostrados nas Figuras 3.2, 3.3 e 3.4.

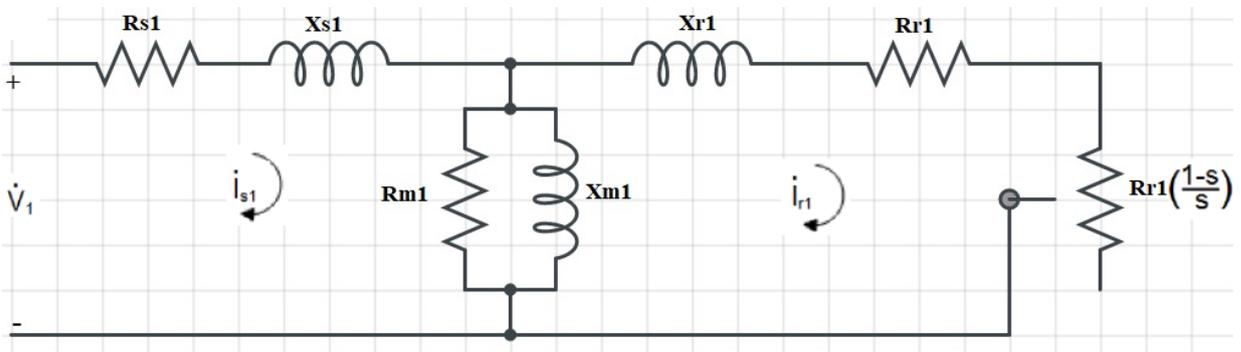


Figura 3.2- Circuito equivalente por fase de sequência positiva

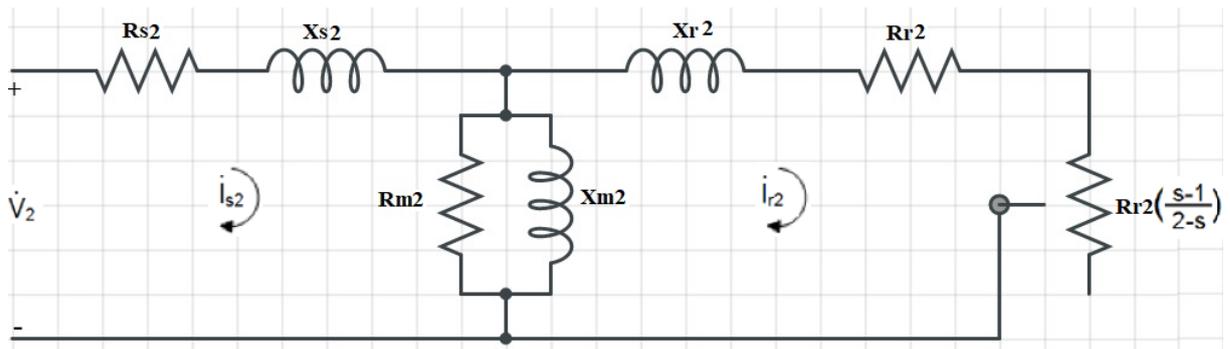


Figura 3.3- Circuito equivalente por fase de seqüência negativa.

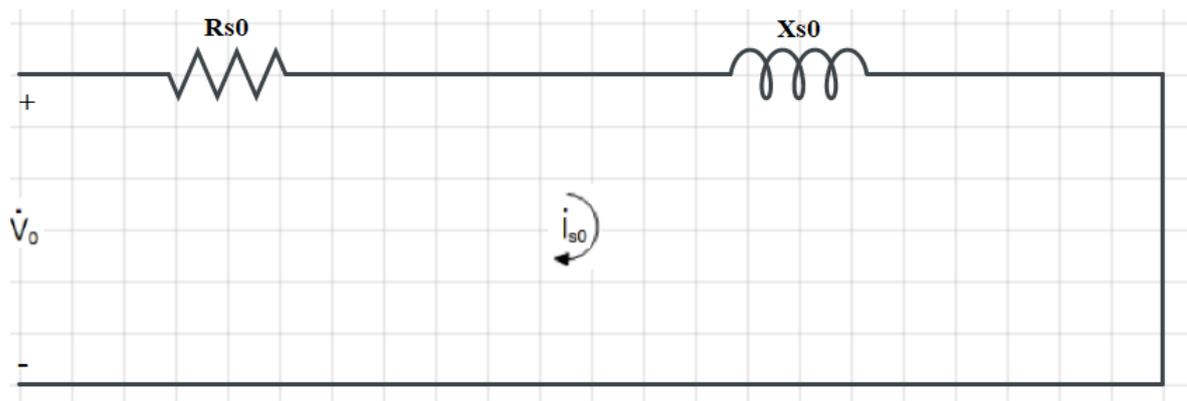


Figura 3.4- Circuito equivalente por fase de seqüência zero.

Nessas figuras  $R_s$ ,  $X_s$ ,  $R_r$  e  $X_r$  são a resistência e reatância do estator e rotor, respectivamente,  $R_m$  é a resistência das perdas do núcleo e a reatância de magnetização é  $X_m$ .  $I_s$  e  $I_r$  são as correntes do estator e do rotor, respectivamente, e “s” é o escorregamento.  $R_{r1}$  e  $R_{r2}$  são as resistências que representam a carga. Os índices 0, 1 ou 2 com estas quantidades representam o componente da seqüência a que se refere, zero, positivo e negativo, respectivamente.

A componente de seqüência zero não ultrapassa o entreferro, assim como pode-se observar na Figura 3.4 não existe o rotor, conseqüentemente, não há potência de saída e torque relacionados este componente, sendo assim nulo.

### 3.2.2 – Equações

O equacionamento relacionado ao circuito equivalente por fase da seqüência positiva, negativa e zero do motor de indução, apresentadas nas figuras 3.2, 3.3 e 3.4 foram desenvolvidas no trabalho de Neves (2016).

O torque ( $T$ ) em uma máquina alimentada por tensões desbalanceadas é a soma dos torques de sequência positiva e sequência negativa, respectivamente:

$$T_1 = \frac{3V_1^2 k_1^2 R_{r1}}{s\omega_s} \quad (3.6)$$

$$T_2 = -\frac{3V_2^2 k_2^2 R_{r2}}{(2-s)\omega_s} \quad (3.7)$$

O torque  $T_2$  tem um sinal negativo que é justificado pelo fato de que  $V_2$  gera um torque no sentido oposto ao torque produzido por  $V_1$ . O torque total  $T$  é a soma de  $T_1$  e  $T_2$ .

$k_1$  e  $k_2$  são as constantes, dadas respectivamente por:

$$k_1 = \frac{\lambda}{\left[\frac{R_{r1}}{s} + jx_{r1} + \lambda\right] [R_{s1} + jx_{s1} + \lambda] - \lambda^2} \quad (3.8)$$

$$k_2 = \frac{\alpha}{\left[\frac{R_{r2}}{2-s} + jx_{r2} + \alpha\right] [R_{s2} + jx_{s2} + \alpha] - \alpha^2} \quad (3.9)$$

Onde:

$\lambda$ : o paralelo entre  $R_{m1}$  e  $jX_{m1}$  e

$\alpha$ : o paralelo entre  $R_{m2}$  e  $jX_{m2}$ .

A potência de saída pode ser calculada pela adição de  $P_1$  e  $P_2$ . Essas potências correspondem as sequências positivas e negativas, respectivamente.

$$P_1 = 3V_1^2 k_1^2 R_{r1} \left[ \frac{1-s}{s} \right] \quad (3.10)$$

$$P_2 = 3V_2^2 k_2^2 R_{r2} \left[ \frac{s-1}{2-s} \right] \quad (3.11)$$

---

O valor relacionado as perdas rotacionais inerentes ao atrito e a ventilação é denominado ( $P_{RL}$ ) e não foram representados nos circuitos equivalentes dos motores de indução trifásicos. Entretanto, para os cálculos essas perdas são consideradas fixas.

A potência de entrada ( $P_{in}$ ) é calculada pela seguinte equação:

$$P_{in} = 3[V_0 I_0 \cos(\theta_{V_0 I_0}) + V_1 I_1 \cos(\theta_{V_1 I_1}) + V_2 I_2 \cos(\theta_{V_2 I_2})] \quad (3.12)$$

Onde:

$\theta$ : ângulo entre a tensão e a corrente.

A potência de saída ( $P_{OUT}$ ) também pode ser obtida pela velocidade do motor e torque:

$$P_{out} = (1 - s)\omega_s T = T \omega_m \quad (3.13)$$

A eficiência ( $\eta$ ) é dada por:

$$\eta [\%] = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 = \frac{T \omega_m}{P_{in}} \cdot 100 \quad (3.14)$$

### 3.3 – Efeitos

Distorção e desequilíbrio das tensões de alimentação do motor são os problemas mais comuns de qualidade aos quais os motores de indução estão expostos.

A tensão de alimentação desequilibrada tem efeitos adversos nos aparelhos elétricos, especialmente os motores, pelo fato de gerar uma corrente elevada a qual leva ao aquecimento do motor gerando mais perdas, vibrações, ruído acústico, diminuição do torque e encurtamento da vida do motor de indução.

Tanto Neves (2014) e (2016), quanto Deraz e Azazi (2017), Lee et al. (1998), Sahu et al. (2017) e Silva (2009) apresentam os efeitos causados por tensões desequilibradas e harmônicas no motor de indução trifásico através de experimentos.

---

### 3.3.1 – Efeitos do desequilíbrio de tensão no motor de indução trifásico

Com relação aos efeitos do desequilíbrio de tensão, como visto no capítulo 2, o fornecimento de tensão com baixa qualidade resulta em perdas de potência, e essas perdas causam aumento da temperatura do enrolamento, o que acelera a taxa de envelhecimento térmico do motor.

Inicialmente o impacto é a redução da capacidade de sobrecarga, conforme Neves (2014), bem como o aumento de correntes do estator e rotor acima dos níveis nominais. Ocorrendo assim, perdas de energia mais elevadas, aquecimento adicional e redução da eficiência. Outra consequência é a vibração induzida eletricamente pelo desequilíbrio da rede. Além dos efeitos já apresentados, como redução de velocidade, pulsações de torque, ruídos, redução da vida útil, alteração do torque e variação no escorregamento.

De acordo com Silva (2009) em 1963, Berndt e Schmitz apresentaram o método de redução da potência para cada percentual de desequilíbrio de tensão, conforme mostra a Figura 3.5.

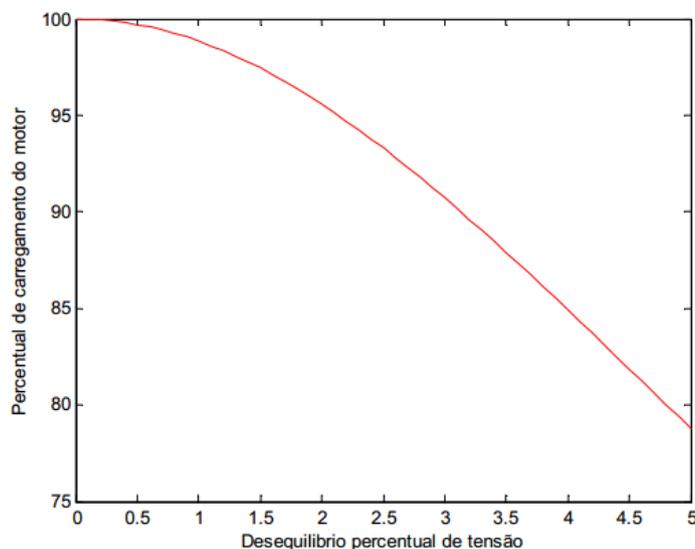


Figura 3.5 - Carregamento do Motor em Função do desequilíbrio de tensão.  
Fonte: SILVA, 2009.

O valor percentual de redução da potência é determinado pela equação (3.15). É uma equação citada pela norma NEMA, como um dos métodos usados para traçar o gráfico de redução de potência em função do desequilíbrio de tensão, após ser testadas em vários motores.

---

$$\Delta P_{\%} = 1 + \frac{2(V_{deseq\%})^2}{100} = \frac{(C_{\%})^{-1.7}}{100} \quad (3.15)$$

Onde:

$\Delta P_{\%}$ : redução da potência [%];

$V_{deseq\%}$ : desequilíbrio de tensão em [%];

$C_{\%}$ : carregamento do motor em [%].

Na curva apresentada na Figura 3.5 que foi obtida através da equação (3.15), é possível observar que a redução máxima de carregamento é de aproximadamente 21,2% para um desequilíbrio de tensão de 5%.

Pode-se efetuar um cálculo aproximado do aumento da temperatura em função do desequilíbrio de tensão, conforme é apresentado na equação (3.17) (SILVA, 2009).

$$\Delta T_{\%} = 2. (V_{deseq\%})^2 \quad (3.17)$$

Onde:

$\Delta T_{\%}$ : variação percentual de temperatura [%];

$V_{deseq\%}$ : desequilíbrio de tensão em [%].

De acordo com Silva (2009), não existe uma fórmula exata para cálculo de perdas para o valor de desequilíbrio, porém existe um cálculo aproximado, conforme é apresentado na equação (3.16).

$$P_{\%} = 2. (V_{deseq\%})^2 \quad (3.16)$$

Onde:

$P_{\%}$ : aumento das perdas em [%];

$V_{deseq\%}$ : desequilíbrio de tensão em [%].

Com base nesta equação, tem-se a curva do aumento percentual de perdas em função do desequilíbrio de tensão, como apresentado na Figura 3.6.

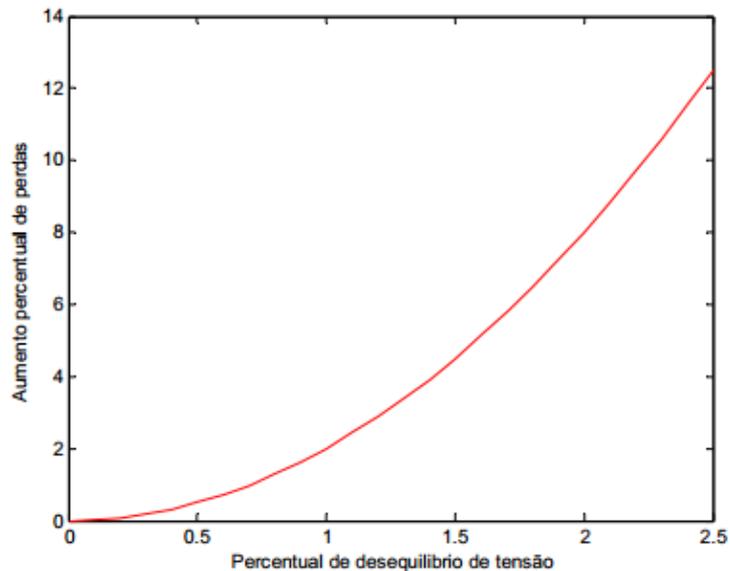


Figura 3.6 - Aumento percentual das perdas em função do desequilíbrio de tensão.  
Fonte: SILVA, 2009.

Além disso, os motores quando submetidos a desequilíbrios de tensão, apresentam duas componentes de tensão de sentidos opostos. A componente de sequência positiva responsável pelo campo magnético girante no entreferro, que em conjunto com a corrente do rotor, desenvolve o conjugado eletromagnético do motor. A componente de sequência negativa é responsável pelo campo girante no sentido oposto ao campo da sequência positiva, conseqüentemente, produz um conjugado no sentido oposto a rotação do motor. Dessa forma, como o conjugado e velocidade tendem a diminuir, o motor drena da alimentação elétrica uma potência adicional para compensar as perdas da componente de sequência negativa, resultando em um aumento de perdas, sobreaquecimento e aparecimento do conjugado pulsante devido ao sentido de giro oposto das componentes de sequência positiva e negativa.

### 3.3.2 – Efeitos das distorções no motor de indução trifásico

As distorções harmônicas podem ocasionar, dependendo do grau da distorção, um aumento demasiado das perdas. Especialmente, as perdas nos enrolamentos que pode danificar motores com rotor enrolado, isso se deve ao aumento da frequência, que causa aumento do efeito pelicular. Também ocasionam vibrações, ruídos, redução de potência, torque pulsantes e envelhecimento térmico.

As perdas por componentes harmônicas nos motores devem ser calculadas para cada ordem harmônica e em seguida, adicionadas.

Na presença de componentes harmônicas na alimentação do motor ocorrem perdas no ferro devido a saturação do núcleo magnético e as perdas no cobre. As perdas totais no núcleo podem ser obtidas através da expressão:

$$P_{feharm} = 3 \frac{\dot{E}_m^2}{R_m} + 3 \sum_{h \neq 1}^{\infty} \frac{\dot{E}_m(h)^2}{R_m(h)} \quad (3.19)$$

Onde:

$P_{feharm}$ : perdas no núcleo magnético [W];

$\dot{E}_m$ : tensão no ramo magnetizante [V];

$R_m$ : resistência de magnetização [ $\Omega$ ];

$h$ : ordem harmônica.

As perdas por efeito joule no estator devido a presença de harmônicas, são determinadas somando as perdas da fundamental com as perdas de todas as componentes harmônicas calculadas individualmente, conforme equação (3.19). O efeito pelicular no estator pode ser desprezado devido a pequena seção transversal do fio do enrolamento.

$$P_{jsharm} = 3 \left( \sum_{h=1}^{\infty} R_s(h) I_{sh}^2(h) \right) \quad (3.19)$$

Onde:

$P_{jsharm}$ : perdas por efeito joule nos enrolamentos do estator [W];

$I_{sh}$ : corrente no ramo do estator [A];

$R_s$ : resistência dos enrolamentos do estator [ $\Omega$ ].

As perdas por efeito joule no rotor somente leva em conta o efeito pelicular nos condutores do rotor de motores de grande porte.

$$P_{jrharm} = 3 \left( \sum_{h=1}^{\infty} R_r(h) I_{rh}^2(h) \right) \quad (3.20)$$

Onde:

$P_{jrharm}$ : perdas por efeito joule nos enrolamentos do rotor [W];

$I_{rh}$ : corrente no ramo do rotor [A];

$R_r$ : resistência dos enrolamentos do rotor [ $\Omega$ ].

As perdas harmônicas podem ser calculadas percentualmente, de modo aproximado, utilizando o fator harmônico de tensão FHV, o qual é definido pela equação (3.21) (SILVA, 2009).

$$FHV = \sqrt{\sum \frac{V_k^2}{k}} \quad (3.21)$$

Onde:

$FHV$ : fator harmônico de tensão [pu],

$V_k$ : harmônica de tensão em relação à tensão nominal [pu];

$k$ : ordem da harmônica, não divisível por três em motores trifásicos.

As perdas totais aproximadas devido a presença de componentes harmônicas podem ser obtidas através da expressão (3.22).

$$P_H \cong 35 \sum_{n=5}^{n=\infty} \frac{(V_n)^2}{n} \cong 35(FHV)^2 \quad (3.22)$$

Onde:

$P_H$ : perdas harmônicas [pu];

$V_n$ : harmônico de tensão [pu];

$n$ : ordem da harmônica.

De acordo com a NBR7094 de 2003 o fator FHV permitido para motores de indução de categoria N deve ser menor ou igual a 3%, e para motores os demais 2%.

A Figura 3.7 mostra o gráfico da redução do carregamento do motor em função do fator FHV.

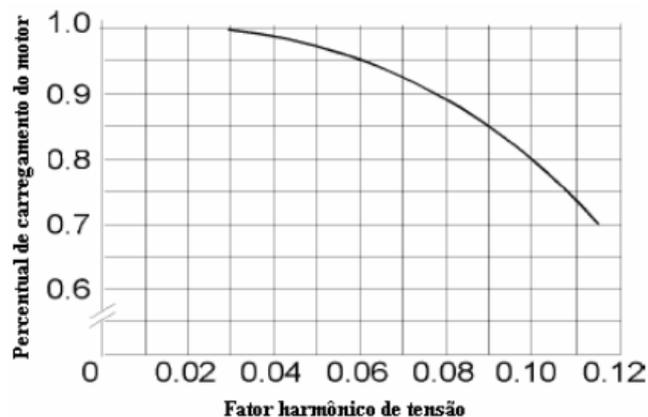


Figura 3.7 - Redução do carregamento do motor em função de FHV.  
Fonte: SILVA, 2009.

---

### 3.3.3 – Aquecimento

Lee et al. (1998) afirmam que o sobreaquecimento é originado de correntes harmônicas. O aumento de temperatura do motor de indução em qualquer caso de ordem harmônica é maior do que no caso normal (onda fundamental). Isso significa que o sobreaquecimento do motor pode acontecer em qualquer condição de harmônicas. Isso levará ao dano dos enrolamentos do estator, cunhas e rolamentos, e assim encurtará a vida útil do motor de indução. Portanto, uma operação de redução do uso do motor é necessária para impedir que o motor sobreaqueça ao ser alimentado por um sinal de tensão não senoidal.

Além disso, sob tensões distorcidas, a corrente do estator tem uma forma de onda distorcida possuindo assim um valor maior em comparação com seu valor na condição de fornecimento de tensão senoidal. Esse aumento na corrente desencadeia o aumento das perdas no cobre, aumento na temperatura dos enrolamentos do estator, deteriora o isolamento, diminui a vida útil do motor, reduzindo a eficiência do mesmo. Neste caso, o motor de indução deve ser operado com fator de *Derating* reduzido, a fim de superar esses problemas (DERAZ e AZAZI, 2017).

### 3.3.4 – Fator de *Derating* do Motor de Indução

O *Derating* do motor de indução refere-se ao funcionamento do motor em carga reduzida e é avaliado quando o motor é submetido a condição de distorção de tensão de alimentação, a fim de superar seus problemas de desempenho e manter sua vida útil (DERAZ e AZAZI, 2017).

Para determinar o fator de *Derating*, o motor é continuamente carregado até a corrente do estator do motor de indução atingir seu valor nominal. Neste caso, a potência do motor de indução com alimentação distorcida é medido ( $P_{out-d}$ ).

O fator de *Derating* ( $D_F$ ) pode ser dado como:

$$D_F = \frac{P_{out-d}}{P_{out-s}} \quad (3.23)$$

O fator de *Derating* ( $D_F$ ) é a razão entre a potência de saída fonte distorcida ( $P_{out-d}$ ) para a potência de saída com o sinal senoidal fornecimento ( $P_{out-s}$ ) na corrente nominal.

---

### 3.3.5 – Vibração

Sob fornecimento de tensão não-senoidal, o torque eletromagnético do motor está pulsando. Este torque pulsante resulta em vibrações, as quais originam-se do torque de pulsação causados por harmônicas de sequência positiva e negativa. Embora as harmônicas de sequência positiva causem um aumento no torque de sequência positiva (para frente) e assim benéficos, as harmônicas de sequência negativa causam a diminuição do torque (para trás), causando o aquecimento. Desse modo, os efeitos das harmônicas de sequência negativa anulam os benefícios trazidos pelas harmônicas de sequência positiva.

A vibração do rotor pode aumentar as perdas por fricção nos mancais e reduzir a vida útil dos rolamentos, aumentando assim a probabilidade de falha mecânica. Lee et al. (1998) afirmam que a vibração excessiva pode causar fadiga nos eixos e prematuramente destruir acoplamentos. O dano causado por essas vibrações são cumulativas e podem passar de despercebidas até falhas catastróficas. Essas vibrações aumentam as perdas mecânicas e reduzem a vida útil das peças mecânicas para o motor e a carga.

### 3.3.6 – *Cogging e Crawling*

De acordo Silva (2009), quando a tensão de alimentação do motor é distorcida, as harmônicas de sequência positiva produzem campos magnéticos girantes no mesmo sentido da componente fundamental, aumentando assim o conjugado de partida, propiciando o aparecimento do *Cogging*, que é a recusa de partida suave devido à redução do escorregamento, além do aumento da velocidade.

Já as harmônicas de sequência negativa produzem campos magnéticos girantes no sentido oposto ao da frequência fundamental, propiciando o aparecimento do *Crawling*, que é o aumento do escorregamento, reduzindo o conjugado de partida e a velocidade do motor.

## 3.4 – Conclusão

Foi apresentado o circuito modificado do motor de indução de tal forma que as harmônicas e as perdas do núcleo de ferro do motor são levadas em consideração para se adaptar à distorção da tensão de alimentação desequilibrada de sequência positiva, negativa e zero.

---

Um dos fatores que confirmam a redução da eficiência de um Motor de Indução Trifásico é a presença de distúrbios de qualidade de energia elétrica em sua tensão de alimentação, como o desequilíbrio de tensão e a distorção harmônica.

Os desequilíbrios de tensão geram uma corrente elevada na alimentação dos motores e esta grande corrente leva ao aquecimento gerando mais perdas, vibrações, ruído acústico, diminuição da torque e encurtamento da vida do motor de indução.

Por outro lado, as distorções harmônicas podem ocasionar um aumento demasiado das perdas. Especialmente, as perdas nos enrolamentos, vibrações, ruídos, redução de potência, torque pulsantes e envelhecimento térmico.

---

## **CAPÍTULO 4 - POTÊNCIA ELÉTRICA TRIFÁSICA EM SISTEMAS DESBALANCEADOS NA PRESENÇA DE HARMÔNICAS**

### **4.1- Introdução**

O aumento da utilização de cargas não-lineares causou o surgimento de formas de ondas distorcidas, com conteúdo harmônico, desse modo, tornou-se necessário a proposição de novas teorias de cálculos potências elétricas, que abrangem a presença de distorções harmônicas e desequilíbrios de tensão na rede elétrica. Porém, as definições propostas se divergem pela falta de senso comum em relação à definição da potência reativa e se diferenciam com relação a interpretação física da mesma.

A influência de distorções de forma de onda e de assimetrias nos sistemas polifásicos é um assunto muito antigo, porém a definição de uma teoria de potência que se aplique em tais condições, ainda é um desafio. Sendo assim, de extrema importância considerar o estudo das várias propostas de teorias de potência apresentadas nos últimos anos e da escolha daquela que mais se adequa as várias aplicações que uma teoria de potências possa vir a ter.

Tradicionalmente, a definição de potência elétrica considera que o sistema elétrico foi projetado para operar com a frequência fundamental da rede, assim sendo, todas as outras frequências presentes no sinal do sistema são definidas como poluição. Alguns autores e inclusive a norma IEEE propõem a separação dos componentes fundamentais de potência das harmônicas presentes no sistema elétrico, visto que o ideal seria o fornecimento de tensão senoidal livre de harmônicas e distorções.

Neste capítulo será apresentado o histórico de teorias sobre cálculo de potências em condições de desequilíbrios, serão apresentadas as principais proposições sobre o assunto e a análise de cada uma delas indicando a mais adequada para mensurar potência de sistemas com conteúdo harmônico e tensões distorcidas.

### **4.2 – Histórico**

De acordo com Lima (2014) as primeiras teorias sobre cálculo de potência na presença de distorções harmônicas e desequilíbrios surgiram nas décadas de 1920 e 1930. Existiam, duas

---

linhas de desenvolvimento, a primeira com Constantin Budeanu, que utilizou séries de Fourier para descrever as propriedades dos circuitos elétricos tratando as formas de onda como uma soma de componentes com diferentes frequências. Ainda atualmente as propriedades de potência são comumente definidas no domínio da frequência.

Com o passar dos anos a difusão de distorções harmônicas na rede elétrica devido à crescente utilização de equipamentos de eletrônica de potência fez com que surgissem vários estudos, conferências e workshops abordando a questão de potência elétrica em regime não senoidal sem, no entanto, chegar a uma conclusão definitiva sobre o assunto.

Alguns anos depois, Stanislaw Fryze desenvolveu outra linha de pesquisa, utilizando definições de potência no domínio do tempo.

No início da década de 90, o IEEE definiu um “Grupo de Trabalho” para situações não senoidais. Foi organizado um tutorial contendo trabalhos de diversos autores, os quais abordavam os problemas das definições e instrumentação usuais, sob formas de onda distorcidas ou assimétricas, bem como novas propostas.

Neste capítulo serão tratadas as teorias de maior relevância, que mais contribuíram com a área e as mais difundidas, tais como: Budeanu, Fryze, Akagi e Nabae, Czarnecki e o grupo de trabalho do IEEE.

### **4.3 – Teoria de Potências Propostas**

As teorias de potência propostas neste capítulo são baseadas nos trabalhos de Lima (2014), Deckmann e Pomílio (2017) e Alves e Santos (2010). Essas propostas são divididas em propostas no domínio da frequência e no domínio do tempo. Sendo que, no domínio da frequência tem por motivação a definição de grandezas que possam ser aplicadas a sistemas de medição e tarifação de energia e neste trabalho são representadas pela proposta de Budeanu, proposta de Czarnecki e a do IEEE.

Já a maioria das propostas no domínio do tempo tem como principal motivação a compensação de distúrbios e elas são encontradas nos métodos de Fryze e Akagi e Nabae.

A Figura 4.1 apresentada a seguir mostra a lista de contribuições de estudos nesta área.

	<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>Ano</b>
1	C Budeanu	Budeanu's power theory	1927
2	S Fryze	Orthogonal currents	1931
3	W Shepherd & P Zakikhani	Definition of reactive power	1972
4	D Sharon	Reactive power definitions	1973
5	H Depenbrock	The first harmonic of voltage and current	1979
6	N L Kuster's & M J M Moore	Definition of reactive power	1980
7	C H Page	Reactive power definition	1980
8	G Nomowejski	Generalised theory of electrical power	1981
9	Akagi & Nabae	Original p-q theory	1983
10	L S Czarnecki	CPC Theory	1988
11	M D Slonim & J D Van Wyck	Definition of active, reactive and apparent powers with clear physical interpretation	1988
12	J H Enslin & J D Van Wyck	Load related time domain generalised definition	1988
13	I Takahashi	Instantaneous Vectors	1988
14	M J Robinson & P H G Allen	Power factor and quadergy definitions	1989
15	T Furuhasi	Theory of instantaneous reactive power	1990
16	Ferrero e Superti-Furga	The Park power theory	1991
17	P S Fillipski	Elucidation of apparent power and power factor	1991
18	A Ferrero & G Superti-Furga	Powers using Parks transform	1991
19	Willems	Generalized Akagi's and Ferrero's p-q power theories	1992
20	Willems	Instantaneous voltage and current vectors	1993
21	E H Watanabe	Generalised theory of instantaneous powers a-β-0 transformation	1993
22	Rossetto e Tenti	Instantaneous orthogonal currents	1994
23	Akagi & Nabae	Modified p-q theory	1994
24	IEEE Working Group	Practical power definitions	1995
25	F Z Peng & J S Lai	Generalised instantaneous reactive power theory	1996
26	D Sharon	Power factor definitions	1996
27	A Nabae & T Tanaka	Powers based on instantaneous space vector	1996
28	L M Dalgerti	Concepts based on instantaneous complex power approach	1996
29	H Akagi & K Hyosung	Instantaneous power theory based on mapping matrices	1996
30	Nils & Marja	Vector space decomposition of reactive power	1997
31	A E Emanuel	Definitions of apparent power	1998
32	K Hyusong & H Akagi	Instantaneous p-q-r power theory	1999
33	J Cohen, F Keon & K M Hernandez	Time domain representation of powers	1999
34	F Ghassemi	Definition of apparent power based on modified voltage	2000
35	F Z Peng & L M Tolbert	Definitions of nonactive power from compensation standpoint	2000
36	S K Chen & G W Chang	Instantaneous power theory based on active filter	2000
37	H Lev-Ari & A M Stankovic	Reactive power definition via local Fourier transform	2002
38	M Depenbrock	FBD Method	2003
39	A Menti T Zacharias & J. Miliadis-Argitis	Introduced the framework of Geometric Algebra to non-sinusoidal power theory	2007
40	M Castilla et all	Extended the use of Geometric Algebra in non-sinusoidal power theory	2009
41	IEEE Std 1459	Definitions for the measurement of electric power quantities	2010

Figura 4.1 - Histórico de estudos sobre cálculo de potência na presença de desequilíbrios e harmônicos.

Fonte: LIMA, 2014

---

### 4.3.1 - Definições de Potências Segundo Budeanu

É válido para formas de ondas genéricas de tensão e corrente. Em 1927 Budeanu compreendeu que a potência aparente tinha mais de duas componentes em condições não senoidais e postulou que a potência aparente é composta por duas componentes ortogonais, chamadas de potência ativa e não ativa.

Baseando-se em Lima (2014), a potência ativa é definida como a potência média, sendo calculada pela média da potência instantânea no domínio do tempo dada por:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = V_0 I_0 + \sum_{h=1}^n V_h I_h \cos \varphi_h \quad (4.1)$$

Onde:

$V_h$  e  $I_h$  são os módulos da tensão e corrente, respectivamente, na frequência harmônica  $h$  [V];

$V_0$  e  $I_0$  são as componentes contínuas [V];

$\varphi_h$ : defasagem entre o ângulo da tensão e corrente da componente harmônica  $h$ .

A potência não ativa é dividida em duas: Potência Reativa de Budeanu e Potência de Distorção.

A potência reativa ( $Q_B$ ) de Budeanu utiliza as componentes harmônicas dos sinais.

$$Q_B = \sum_{h=1}^n V_h I_h \sin \varphi_h \quad (4.2)$$

A potência aparente ( $S$ ) é:

$$S = \sum_{h=1}^n V_h I_h \quad (4.3)$$

A potência de Distorção é dada por:

$$D_B = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_B^2} \quad (4.4)$$

---

A potência de distorção é composta por produtos cruzados de tensões e correntes harmônicas, de diferentes ordens e só será zero se as componentes harmônicas forem nulas.

A partir da potência de distorção,  $D$ , as potências podem ser representadas graficamente em três dimensões, conforme apresentado na Figura 4.2 (SUHETT, 2008).

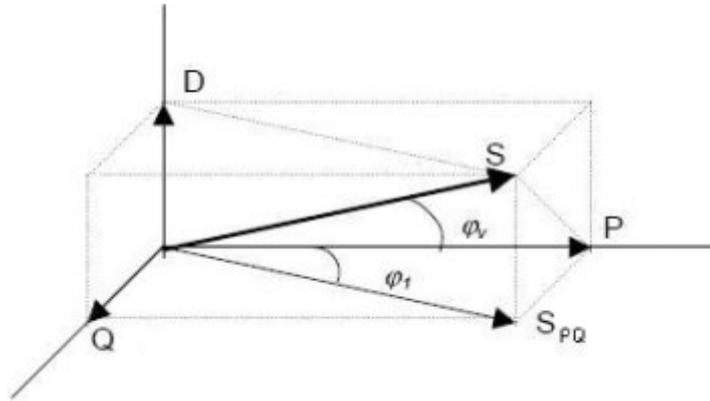


Figura 4.2 - Tetraedro de potências.  
Fonte: SUHETT, 2008.

De acordo com Deckmann e Pomílio (2017), uma das maiores dificuldades desse método é a necessidade de decompor tensões e correntes em componentes ortogonais, seno e cosseno, para a presença de distorções é uma tarefa complexa, porque deve ser feita para cada frequência, independentemente.

Além disso, em alguns casos a utilização do critério de Budeanu resulta em inconsistências, como exemplo, no caso de um circuito linear puramente reativo, alimentado por tensão distorcida. As correntes serão distorcidas mas a potência de distorção indicará um valor igual a zero. A falta de associação com os fenômenos físicos que as originaram e o fato dessa proposta ter sido desenvolvida para sistemas monofásicos, são algumas das outras limitações do método.

O fato de não isolar as correntes ativas e reativas das correntes harmônicas não permite com que sejam calculadas as parcelas de potências associadas com as perdas e posteriormente eliminadas por meio de um compensador.

A potência reativa proposta por Budeanu pode apresentar resultados contraditórios para algumas condições harmônicas. O somatório dos produtos das componentes harmônicas na fórmula da potência reativa pode resultar em um valor menor que a potência reativa fundamental, levando as seguintes questões:

- Não é possível separar os efeitos entre cargas não-lineares e reatâncias;
- Não é possível obter parâmetros para compensação ativa ou passiva;

- 
- A potência reativa não pode ser compensada de forma independente da potência de distorção.

Esta teoria foi bastante difundida décadas atrás, quando as distorções de corrente e de tensão poderiam ser desprezadas. Porém, nos sistemas elétricos atuais as distorções de forma de onda e desequilíbrio estão quase sempre presentes e não podem ser desprezadas.

### 4.3.2 – Definições de Potências Segundo Fryze

No ano de 1931 Stanislaw Fryze propôs que a corrente seja decomposta em duas partes: uma corrente com a mesma forma de onda e fase do sinal de tensão e um termo residual, chamadas de corrente ativa e corrente reativa.

Segundo Lima (2014), a corrente ativa,  $i_a$ , é calculada utilizando a potência ativa da carga.

$$i_a(t) = \frac{P}{\|v(t)\|^2} \cdot v(t) = G_e v(t) \quad (4.5)$$

Onde:

$P$ : potência ativa [W];

$\|v(t)\|$ : tensão RMS [V];

$G_e$ : condutância equivalente de carga.

A parte remanescente da corrente da fonte é chamada de corrente reativa ( $i_r$ ), conforme representada na equação (4.6).

$$i_r(t) = i(t) - i_a(t) \quad (4.6)$$

Assim, as potências definidas por Fryze são dadas pelas seguintes expressões:

Potência ativa:

$$P = \|v(t)\| \cdot \|i_a\| \quad (4.7)$$

---

Potência reativa:

$$Q_F = \|v(t)\| \cdot \|i_r\| \quad (4.8)$$

Potência aparente:

$$S^2 = P^2 + Q_F^2 \quad (4.9)$$

Analisando esta proposta pode se observar a vantagem de que ela permite o projeto de filtros ativos de potência, para a eliminação da corrente  $i_r$ . Porém, fornece uma interpretação superficial dos fenômenos de energia, além de considerar a potência ativa como componente útil, sendo que estas não são sinônimos.

Possui ainda as seguintes desvantagens, com base em Deckmann e Pomílio (2017):

- Foi definido para sistemas monofásicos.
- Não separa nem mesmo as contribuições das fundamentais do sistema, das demais componentes.
- Pelo fato de agrupar todos os distúrbios de corrente na parcela  $i_r$  tal teoria não permite o aprofundamento dos estudos sobre cada tipo de fenômeno físico envolvido na transferência de energia, bem como não permite a monitoração para fins de tarifação ou compensação de determinadas parcelas de corrente e potência.

#### 4.3.3 - Definições propostas por Akagi e Nabae

Os trabalhos apresentados por Akagi et al. Em 1983, contribuíram para as áreas de cálculo de potências instantâneas e filtragem ativa, sobretudo sem a necessidade de elementos armazenadores de energia. Os conceitos e definições publicados nestes trabalhos impulsionaram desenvolvimentos nas áreas de eletrônica de potência, filtragem ativa e qualidade de energia.

Ficou conhecida como teoria p-q e tem como base a transformação algébrica de coordenadas de um sistema trifásico para um sistema bifásico, também chamada Transformação de Clarke.

A teoria p-q pode ser bastante eficiente para o projeto de compensadores eletrônicos, no entanto, existem limitações e desvantagens desta proposta quando formalizada como uma teoria de potência, a qual deveria ser geral o suficiente para ser aplicada nas mais diversas áreas.

Possuindo ainda as seguintes desvantagens (DECKMANN E POMÍLIO, 2017):

- Não pode ser aplicada em sistemas monofásicos.
- A técnica de compensação baseada nas correntes reativas só funciona se as tensões de alimentação forem senoidais e simétricas.
- Não prevê a separação das contribuições dos sinais fundamentais daqueles com distorções harmônicas.

Logo, apesar de ter sido uma das maiores contribuições para compensação de distúrbios não é uma teoria de potência simples e geral a ponto de ser incorporada.

#### 4.3.4 - Definições propostas por Czarnecki

Proposta datada de 1988, utiliza de uma abordagem vetorial. Esta proposta busca encontrar as parcelas de corrente relacionadas com distorções harmônicas, assimetrias, reativos, dentre outros. Assume, inicialmente, uma fonte trifásica senoidal equilibrada alimentando um circuito trifásico assimétrico. Utiliza a Teoria dos Componentes Físicos da Corrente (CPC), que divide a corrente em vários componentes ortogonais de forma a fornecer uma interpretação física do fenômeno de energia em sistemas elétricos, conforme apresentado na Figura 4.3.

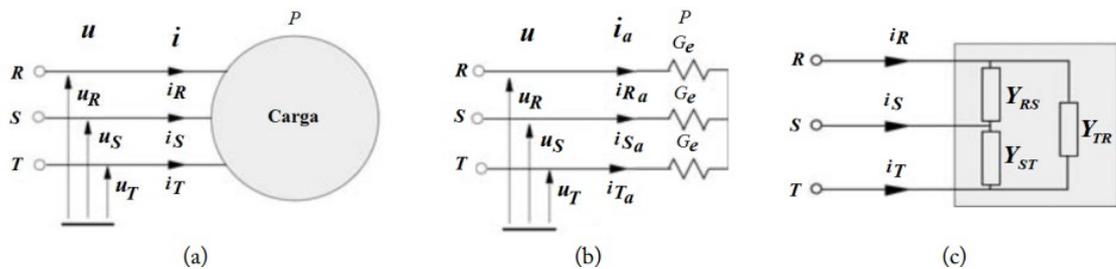


Figura 4.3 – Teoria dos Componentes Físicos da Corrente. (a) Sistema trifásico de referência; (b) Equivalente em relação a potência ativa P e (c) Carga equivalente em delta.

Fonte: LIMA, 2014.

O equacionamento apresentado para este método tem por base Lima (2014).

A tensão não-senoidal balanceada é dada por:

$$u = \sqrt{2} \cdot \text{Re} \sum \begin{pmatrix} U_{Rn} \\ U_{Sn} \\ U_{Tn} \end{pmatrix} e^{jn\omega_1 t} \quad (4.10)$$

Onde:

$u$ : vetor de tensão;

$n$ : representa a  $n$ -ésima ordem harmônica;

$U_{R,S,T}$ : indica a tensão eficaz de  $u$  para cada fase.

A corrente de alimentação é dada por:

$$i = \sqrt{2} \cdot \text{Re} \sum \left\{ [(G_{en} + jB_{en}) \begin{pmatrix} U_{Rn} \\ U_{Sn} \\ U_{Tn} \end{pmatrix} + A_n \begin{pmatrix} U_{Rn} \\ U_{Tn} \\ U_{Sn} \end{pmatrix}] e^{jn\omega_1 t} \right\} \quad (4.11)$$

Onde:

$$G_{en} = \frac{P_n}{\|u\|^2}; \quad B_{en} = \frac{Q_n}{\|u\|^2}; \quad A_n = -(Y_{STn} + Y_{TRn}e^{jn120^\circ} + Y_{RSn}e^{-jn120^\circ})$$

$n$ :  $n$ -ésima ordem harmônica;

$G_{en}$ : Condutância [S];

$B_{en}$ : Susceptância equivalente [S];

$Y$ : Admitância [S];

$A_n$ : Admitância desbalanceada [S].

$$i = i_a + i_r + i_u + i_s \quad (4.12)$$

A corrente é dividida em quatro componentes: corrente ativa, corrente reativa, corrente de desequilíbrio e corrente dispersa, respectivamente representadas nas equações abaixo:

$$i_a = \sqrt{2} \cdot \text{Re} \sum G_{en} \begin{pmatrix} U_{Rn} \\ U_{Sn} \\ U_{Tn} \end{pmatrix} e^{jn\omega_1 t} \quad (4.12.1)$$

$$i_r = \sqrt{2} \cdot \text{Re} \sum jB_{en} \begin{pmatrix} U_{Rn} \\ U_{Sn} \\ U_{Tn} \end{pmatrix} e^{jn\omega_1 t} \quad (4.12.2)$$

$$i_u = \sqrt{2} \cdot \text{Re} \sum A_n \begin{pmatrix} U_{Rn} \\ U_{Tn} \\ U_{Sn} \end{pmatrix} e^{jn\omega_1 t} \quad (4.12.3)$$

$$i_s = \sqrt{2} \cdot \text{Re} \sum (G_{en} - G_e) \begin{pmatrix} U_{Rn} \\ U_{Sn} \\ U_{Tn} \end{pmatrix} e^{jn\omega_1 t} \quad (4.12.4)$$

As potências segundo este método podem ser expressas, como:

---

Potência ativa:

$$P = \|i_a\| \cdot \|u\| = G_e \cdot \|u\|^2 \quad (4.13)$$

Potência reativa:

$$Q_F = \|i_r\| \cdot \|u\| = -B_e \cdot \|u\|^2 \quad (4.14)$$

Potência de desequilíbrio:

$$D_u = \|i_s\| \cdot \|u\| = A \cdot \|u\|^2 \quad (4.15)$$

Potência dispersa:

$$D_s = \|i_s\| \cdot \|u\| \quad (4.16)$$

Potência aparente:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D_u^2 + D_s^2 \quad (4.17)$$

Essa teoria não é muito utilizada devido a sua complexidade de equacionamento. No entanto, auxilia na compreensão dos fenômenos físicos que compõe o sistema elétrico e assim pode ser utilizada tanto em sistemas de análise de monitoração de energia, quanto em sistemas de condicionamento de energia.

Este método é muito interessante se o objetivo for a identificação, tarifação ou compensação de correntes de distúrbios. Porém não esclarece as questões de compensação de distúrbios de tensão de fornecimento e em que mudaria na decomposição se a tensão fundamental fosse assimétrica (DECKMANN E POMÍLIO, 2017).

#### 4.3.5 - Definições da Norma IEEE 1459-2010

Neste método em uma situação não-senoidal, a tensão e a corrente são decompostas em fundamental e harmônicas. Além disso, de acordo Deckmann e Pomílio (2017), o grupo sugere algumas definições como, por exemplo, a utilização de valores de tensão e corrente equivalentes para o sistema trifásico, bem como a “Potência Aparente Efetiva”, como uma alternativa ao cálculo da potência aparente de forma vetorial. Neste trabalho faz-se a separação da contribuição das ondas fundamentais de sequência positiva, das outras parcelas de potência, e define algumas outras potências, por exemplo, as potências não-ativa (tudo que não gera  $P$ ) e não-fundamental ( $h \neq 1$ ), parcela atribuída as harmônicas, inter-harmônicas e suas interações.

Essas definições se baseiam na separação dos valores das harmônicas fundamentais de tensão ( $V_1$ ) e corrente ( $I_1$ ) dos termos residuais que contém todas as componentes harmônicas e sub-harmônicas.

O equacionamento apresentado a seguir tem por base Alves e Santos (2010) e foi utilizado neste trabalho como referência para o desenvolvimento do *software* em MATLAB que calcula potências e outras grandezas em situações de desequilíbrio e distorções harmônicas.

As tensões e correntes de linha instantâneas das fases  $a$ ,  $b$  e  $c$  são definidas através das séries trigonométricas, de acordo com as expressões abaixo apresentadas.

$$\begin{aligned}
 v_a(t) &= \sqrt{2}V_{a1}\text{sen}(\omega_1 t + \alpha_{a1}) + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} V_{ah}\text{sen}(h\omega_1 t + \alpha_{ah}) \\
 v_b(t) &= \sqrt{2}V_{b1}\text{sen}\left(\omega_1 t + \alpha_{b1} - \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} V_{bh}\text{sen}\left(h\omega_1 t + \alpha_{bh} - \frac{2\pi}{3}h\right) \\
 v_c(t) &= \sqrt{2}V_{c1}\text{sen}\left(\omega_1 t + \alpha_{c1} + \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} V_{ch}\text{sen}\left(h\omega_1 t + \alpha_{ch} + \frac{2\pi}{3}h\right)
 \end{aligned} \tag{4.18}$$

$$\begin{aligned}
 i_a(t) &= \sqrt{2}I_{a1}\text{sen}(\omega_1 t + \beta_{a1}) + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} I_{ah}\text{sen}(h\omega_1 t + \beta_{ah}) \\
 i_b(t) &= \sqrt{2}I_{b1}\text{sen}\left(\omega_1 t + \beta_{b1} - \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} I_{bh}\text{sen}\left(h\omega_1 t + \beta_{bh} - \frac{2\pi}{3}h\right) \\
 i_c(t) &= \sqrt{2}I_{c1}\text{sen}\left(\omega_1 t + \beta_{c1} + \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} I_{ch}\text{sen}\left(h\omega_1 t + \beta_{ch} + \frac{2\pi}{3}h\right)
 \end{aligned} \tag{4.19}$$

Onde:

$h$ : ordem harmônica (múltiplo inteiro da frequência fundamental);

$I_{a1}$ ,  $I_{b1}$  e  $I_{c1}$ : valores eficazes das componentes fundamentais da corrente [A];

$V_{a1}$ ,  $V_{b1}$  e  $V_{c1}$ : valores eficazes das componentes fundamentais da tensão [V];

$I_{ah}$ ,  $I_{bh}$  e  $I_{ch}$ : valores eficazes das componentes harmônicas da corrente [A];

$V_{ah}$ ,  $V_{bh}$  e  $V_{ch}$ : valores eficazes das componentes harmônicas da tensão [V];

$f_1$ : frequência da componente fundamental [Hz];

$\omega_1$ : frequência angular fundamental  $\omega_1 = 2\pi f_1$ , [rad/s];

$t$ : variável temporal [s];

$\alpha_{a1}$ ,  $\alpha_{b1}$ ,  $\alpha_{c1}$ ,  $\beta_{a1}$ ,  $\beta_{b1}$  e  $\beta_{c1}$ : ângulos de fase das componentes fundamentais de tensão e corrente, respectivamente [rad];

$\alpha_{ah}, \alpha_{bh}, \alpha_{ch}, \beta_{ah}, \beta_{bh}$  e  $\beta_{ch}$ : ângulos de fase das componentes harmônicas da tensão e da corrente, respectivamente [rad].

#### 4.3.5.1 - Potência Ativa

Para cargas trifásicas desbalanceadas, a potência ativa é obtida pela soma das potências ativas das fases:

$$P = P_a + P_b + P_c \quad (4.20)$$

Onde:

$$\begin{aligned} P_a &= V_{a1}I_{a1}\cos(\alpha_{a1} - \beta_{a1}) + \sum_{h \neq 1} V_{ah}I_{ah}\cos(\alpha_{ah} - \beta_{ah}) \\ P_b &= V_{b1}I_{b1}\cos(\alpha_{b1} - \beta_{b1}) + \sum_{h \neq 1} V_{bh}I_{bh}\cos(\alpha_{bh} - \beta_{bh}) \\ P_c &= V_{c1}I_{c1}\cos(\alpha_{c1} - \beta_{c1}) + \sum_{h \neq 1} V_{ch}I_{ch}\cos(\alpha_{ch} - \beta_{ch}) \end{aligned}$$

##### 4.3.5.1.1 – Potência Ativa Fundamental

Para algumas aplicações é interessante separar a potência efetivamente consumida pela carga da potência ativa daquela que provém da poluição harmônica, assim na expressão (4.21) tem-se a potência ativa fundamental ( $P_1$ ):

$$P_1 = V_{a1}I_{a1}\cos(\alpha_{a1} - \beta_{a1}) + V_bI_{b1}\cos(\alpha_{b1} - \beta_{b1}) + V_{c1}I_{c1}\cos(\alpha_{c1} - \beta_{c1}) \quad (4.21)$$

##### 4.3.5.1.2 – Potência Ativa não Fundamental

A potência ativa não fundamental ( $P_H$ ), é apresentada na equação (4.22).

$$P_H = P - P_1 \quad (4.22)$$

A potência ativa não fundamental tem o sentido do seu fluxo baseado no conjunto de cargas não lineares que originou as harmônicas.

---

#### 4.3.5.2- Potência aparente efetiva

A potência aparente efetiva ( $S_e$ ) é calculada tomando como base uma carga trifásica equivalente resistiva balanceada fictícia que apresenta as mesmas perdas em potência de uma carga trifásica real. Geralmente, a carga equivalente é ajustada para permitir que a transferência de potência seja máxima. A carga real trifásica é desbalanceada a quatro fios ou a três fios, neste primeiro caso é suprida com tensões linha-neutro  $V_a, V_b, V_c$  e tensões linha-linha  $V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$ , e absorve correntes de linha,  $I_a, I_b, I_c$  e a corrente de neutro,  $I_n$ . Desse modo, são definidos a tensão efetiva ( $V_e$ ) e a corrente efetiva ( $I_e$ ), que são grandezas de sequência positiva (ALVES e SANTOS, 2010).

A potência aparente efetiva é:

$$S_e = 3V_e I_e \quad (4.23)$$

##### 4.3.5.2.1 - Carga desbalanceada a quatro fios

A tensão efetiva ( $V_e$ ) é relacionada ao valor eficaz da componente fundamental ( $V_{e1}$ ) e ao valor eficaz das componentes harmônicas ( $V_{eH}$ ):

$$V_e = \sqrt{V_{e1}^2 + V_{eH}^2} \quad (4.24)$$

Onde  $V_{e1}$  representa a tensão efetiva da componente fundamental e  $V_{eH}$  a tensão efetiva das componentes harmônicas, conforme as expressões (4.24.1) e (4.24.2):

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{3(V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2) + V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2}{18}} \quad (4.24.1)$$

$$V_{eH} = \sqrt{\frac{3(V_{aH}^2 + V_{bH}^2 + V_{cH}^2) + V_{abH}^2 + V_{bcH}^2 + V_{caH}^2}{18}} \quad (4.24.2)$$

De modo análogo, o valor da corrente efetiva ( $I_e$ ) pode ser escrito conforme:

$$I_e = \sqrt{I_{e1}^2 + I_{eH}^2} \quad (4.25)$$

Onde  $I_{e1}$  representa a corrente efetiva da componente fundamental e  $I_{eH}$  a corrente efetiva das componentes harmônicas, conforme as expressões (4.25.1) e (4.25.2):

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2 + I_{n1}^2}{3}} \quad (4.25.1)$$

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{I_{aH}^2 + I_{bH}^2 + I_{cH}^2 + I_{nH}^2}{3}} \quad (4.25.2)$$

#### 4.3.5.2.2 - Carga desbalanceada a três fios

A tensão efetiva é calculada do mesmo modo que para a carga desbalanceada a quatro fios.

$$V_e = \sqrt{\frac{3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{18}} \quad (4.26)$$

Os valores eficazes da componente fundamental e das harmônicas são apresentados nas expressões seguintes:

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{3(V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2) + V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2}{18}} \quad (4.26.1)$$

$$V_{eH} = \sqrt{\frac{3(V_{aH}^2 + V_{bH}^2 + V_{cH}^2) + V_{abH}^2 + V_{bcH}^2 + V_{caH}^2}{18}} \quad (4.26.2)$$

A corrente efetiva é:

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}} \quad (4.27)$$

Os valores eficazes da componente fundamental e das harmônicas:

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2}{3}} \quad (4.27.1)$$

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{I_{aH}^2 + I_{bH}^2 + I_{cH}^2}{3}} \quad (4.27.2)$$

#### 4.3.5.3 - Potências fundamentais de seqüências positiva, negativa e zero

Para calcular as potências relacionadas é necessário determinar as tensões e correntes de seqüência positiva, de seqüência negativa e de seqüência zero a partir das tensões e correntes fundamentais em suas formas fasoriais, com módulo e fase.

As expressões (4.28), (4.29) e (4.30) abaixo são utilizadas para obter as tensões da seqüência:

$$\hat{V}_1^+ = \frac{1}{3}(\hat{V}_{a1} + a\hat{V}_{b1} + a^2\hat{V}_{c1}) \quad (4.28)$$

$$\hat{V}_1^- = \frac{1}{3}(\hat{V}_{a1} + a^2\hat{V}_{b1} + a\hat{V}_{c1}) \quad (4.29)$$

$$\hat{V}_1^0 = \frac{1}{3}(\hat{V}_{a1} + \hat{V}_{b1} + a^2\hat{V}_{c1}) \quad (4.30)$$

Analogamente, tem-se as correntes da seqüência:

$$\hat{I}_1^+ = \frac{1}{3}(\hat{I}_{a1} + a\hat{I}_{b1} + a^2\hat{I}_{c1}) \quad (4.31)$$

$$\hat{I}_1^- = \frac{1}{3}(\hat{I}_{a1} + a^2\hat{I}_{b1} + a\hat{I}_{c1}) \quad (4.32)$$

$$\hat{I}_1^0 = \frac{1}{3}(\hat{I}_{a1} + \hat{I}_{b1} + a^2\hat{I}_{c1}) \quad (4.33)$$

Onde:

$$a = 1 < 120^\circ = \cos(120^\circ) + j \sin(120^\circ) = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$a^2 = 1 < -120^\circ = \cos(-120^\circ) + j \sin(-120^\circ) = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

A partir das tensões e das correntes da sequência, calculam-se as potências de sequência positiva, negativa e zero. Neste trabalho será apresentado apenas o cálculo de potências de sequência positiva, uma vez que apenas esta que está definida na norma do IEEE. Sendo que as demais potências de sequência seguem o modelo do cálculo da sequência positiva.

A potência ativa de sequência positiva:

$$P_1^+ = 3 V_1^+ I_1^+ \cos(\angle \hat{V}_1^+ - \angle \hat{I}_1^+) \quad (4.34)$$

A potência reativa de sequência positiva é:

$$Q_1^+ = 3 V_1^+ I_1^+ \sin(\angle \hat{V}_1^+ - \angle \hat{I}_1^+) \quad (4.35)$$

Potência aparente:

$$S_1^+ = 3 V_1^+ I_1^+ = \sqrt{(P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2} \quad (4.36)$$

Assim também pode-se calcular as potências fundamentais com base nas potências de sequência, como mostra as equações (4.37), (4.38) e (4.39) que apresentação, respectivamente, a potência ativa fundamental, potência reativa fundamental e a potência aparente fundamental.

$$P_1 = P_1^+ + P_1^- + P_1^0 \quad (4.37)$$

$$Q_1 = Q_1^+ + Q_1^- + Q_1^0 \quad (4.38)$$

$$S_1 = \sqrt{(P_1)^2 + (Q_1)^2} \quad (4.39)$$

#### 4.3.5.4 - Potência aparente efetiva e a relação com os indicadores de distorção

A potência aparente efetiva pode ser escrita com base na potência aparente efetiva fundamental ( $S_{e1}$ ) e da potência aparente efetiva não fundamental ( $S_{eN}$ ).

$$S_e^2 = S_{e1}^2 + S_{eN}^2 \quad (4.40)$$

---

Onde:

$$S_{e1} = 3V_{e1}I_{e1} \quad (4.41)$$

$$S_{eN}^2 = D_{e1}^2 + D_{eV}^2 + S_{eH}^2 \quad (4.42)$$

As componentes da potência aparente efetiva não fundamental ( $S_{eN}$ ) são designadas como:

Potência de distorção de corrente ( $D_{eI}$ )

$$D_{e1} = 3V_{e1}I_{eH} \quad (4.43)$$

Potência de distorção de tensão ( $D_{eV}$ )

$$D_{eV} = 3V_{eH}I_{e1} \quad (4.44)$$

Potência aparente harmônica ( $S_{eH}$ )

$$S_{eH} = 3V_{eH}I_{eH} \quad (4.45)$$

As distorções harmônicas totais de tensão e de corrente são definidas como a seguir:

- Distorção harmônica efetiva da tensão:

$$DTT_e = \frac{V_{eH}}{V_{e1}} \quad (4.46)$$

- Distorção harmônica efetiva da corrente:

$$DTI_e = \frac{I_{eH}}{I_{e1}} \quad (4.47)$$

Com base na expressão, a potência aparente efetiva não fundamental é calculada através dos índices de distorção:

$$S_{eN} = S_{e1} \sqrt{DTT_e^2 + DTI_e^2 [(DTT_e)(DTI_e)]^2} \quad (4.48)$$

Se, em porcentagem, tem-se  $DTT_e \leq 5\%$  e  $DTI_e \geq 40\%$ , a seguinte aproximação no cálculo da potência aparente efetiva não fundamental pode ser feita:

$$S_{eN} = S_{e1}(DTI_e) \quad (4.49)$$

#### 4.3.5.5 - Potência aparente fundamental de desbalanço

A potência aparente fundamental de desbalanço é a potência que avalia o desbalanço da carga, é definida por ( $S_{U1}$ ):

$$S_{U1} = \sqrt{S_{e1}^2 - (S_1^+)^2} \quad (4.50)$$

Onde:

$S_{e1}$ : potência aparente fundamental [VA];

$S_1^+$  : potência aparente fundamental de sequência positiva [VA].

O fator de desbalanço da carga para a frequência fundamental é dado pela relação seguinte:

$$FDC = \frac{S_{U1}}{S_1^+} \quad (4.51)$$

Já o desbalanço das tensões para a frequência fundamental é apresentado na expressão (4.52):

$$FDT = \frac{V_1^-}{V_1^+} \quad (4.52)$$

---

### 4.3.5.6 - Fator de Potência

#### 4.3.5.6.1 – Fator de potência efetivo

Para cargas trifásicas desbalanceadas, o fator de potência efetivo é:

$$FP_e = \frac{P}{S_e} \quad (4.53)$$

Onde:

$P$ : potência ativa [W];

$S_e$ : potência aparente efetiva [VA].

Esse fator de potência considera tanto o desbalanço da carga quanto as distorções harmônicas.

#### 4.3.5.6.2 – Fator de potência de sequência positiva

O fator de potência fundamental de sequência positiva é:

$$FP_1^+ = \frac{P_1^+}{S_1^+} \quad (4.54)$$

Onde:

$P_1^+$ : potência ativa fundamental de sequência positiva [W];

$S_1^+$ : potência aparente fundamental de sequência positiva [VA].

Desse acordo com Deckmann e Pomílio (2017), o trabalho do IEEE considera a potência reativa como sendo originada de componentes armazenadores de energia, apenas para a condição fundamental e o conceito de potência de distorção para as potências não-ativas, que não podem ser convertidas em trabalho, para a condição não-fundamental. As definições ainda permitem determinar o nível de poluição harmônica através da potência aparente não-fundamental. Baseando ainda neste trabalho são apresentadas as vantagens e desvantagens deste método.

---

## **Vantagens**

- A separação das componentes fundamentais de sequência positiva das demais parcelas da tensão, corrente e potência, é um ponto importante em relação à compreensão dos fenômenos físicos, bem como à medição e tarifação das potências envolvidas no processo de fornecimento de energia;
- Flexibilidade em relação a quantas e quais parcelas de potência se deseja calcular, dependendo da necessidade ou objetivo;
- Possui uma relação com os conceitos convencionais para o caso senoidal e balanceado;
- A definição de potência aparente efetiva parece mais rigorosa e útil do que as definições convencionais.

## **Desvantagens**

- Todas as definições são baseadas em valores eficazes, quando na verdade poderiam ter sido generalizadas no domínio do tempo e, então, aplicadas para tarifação;
- Mesmo permitindo a identificação de parcelas de potência que poderiam ser compensadas (eliminadas) através de compensadores ativos ou passivos, por não ser este o objetivo principal do grupo, tais vertentes da proposta ainda não foram suficientemente exploradas;
- Um ponto crítico em quase todas as propostas de teoria de potência é a identificação do sentido do fluxo de potência harmônico, e nesta teoria também não foi solucionado.

## **4.4 – Conclusão**

As distorções harmônicas são identificadas como poluição do ponto de vista da qualidade de energia. Entretanto, a eliminação das distorções de um sistema elétrico de grande porte, como o sistema brasileiro, enfrenta barreiras econômicas que a tornam inviável uma vez que os equipamentos geradores de harmônicas, teriam seus custos aumentados consideravelmente com a adição de um filtro para as harmônicas. Desse modo, sabe-se que tem que se conviver com a presença de tais distorções na rede elétrica.

A partir da comparação das propostas apresentadas, verificou-se que a grande diferença entre elas é a definição de um possível significado físico associado. Entretanto, mesmo com a

---

definição de uma norma pelo IEEE, ainda existem discussões sobre a correta interpretação dos valores de potência do sistema elétrico.

Com base nas diferentes teorias de potências vistas no capítulo, suas aplicabilidades, vantagens e desvantagens é possível concluir que a mais adequada atualmente para o cálculo de potência em sistemas desequilibrados com distorções é a proposta pelo IEEE. Uma vez que faz a decomposição de sinais das harmônicas e faz uso de cálculos simples para equacionar os sinais de tensão corrente e potência, mostrando ser um método eficaz para o cálculo da mesma. Assim, a técnica utilizada neste trabalho para os cálculos de potências em sistemas trifásicos desequilibrados e com a presença de harmônicas é a proposta pelo IEEE.

---

## CAPÍTULO 5 – ESTUDO DO DESEMPENHO DO MOTOR DE INDUÇÃO EM REGIME PERMANENTE ALIMENTADO COM TENSÕES DESEQUILIBRADAS E DISTORCIDAS

### 5.1- Introdução

Neste capítulo será apresentado o modelo equivalente do MIT considerando o desequilíbrio de tensão e distorções harmônicas afim de apresentar a correção dos parâmetros do mesmo diante de tais perturbações na alimentação.

É necessário fazer a correção dos parâmetros do modelo equivalente do MIT pois deve-se levar em consideração os efeitos das distorções harmônicas e do desequilíbrio de tensão, os quais afetam o funcionamento do motor, como já visto anteriormente.

### 5.2 – Modelo Equivalente do Motor de Indução Trifásico com Tensões Desequilibradas e Distorcidas

Para motores com tensões desequilibradas e distorcidas os sentidos de rotação do campo girante do estator e do rotor nem sempre coincidem, ao contrário do que ocorre na alimentação equilibrada, devido às sequencias de fase da componente fundamental e das componentes harmônicas.

Como pode se observar na Tabela 5.1, as componentes de sequencia positiva produzirão conjugados que serão somados ao produzido pela fundamental. Já os componentes de sequencia negativa produzirão conjugados opostos ao da fundamental. As componentes de sequencia zero não produzirão conjugado pois os campos magnéticos nesta sequencia se anulam.

Tabela 5.1 – Sentido de rotação do campo girante do estator e do rotor.

<b>Ordem da harmônica (h)</b>	<b>Componente de sequencia</b>	<b>Harmônica de sequencia</b>	<b>Sentido de rotação do campo girante em relação ao sentido de rotação do rotor</b>
1	Positiva	Positiva	Mesmo
1	Negativa	Positiva	Contrário
5	Positiva	Negativa	Contrário

5	Negativa	Negativa	Mesmo
7	Positiva	Positiva	Mesmo
7	Negativa	Positiva	Contrário
11	Positiva	Negativa	Contrário
11	Negativa	Negativa	Mesmo
13	Positiva	Positiva	Mesmo
13	Negativa	Positiva	Contrário
17	Positiva	Negativa	Contrário
17	Negativa	Negativa	Mesmo
19	Positiva	Positiva	Mesmo
19	Negativa	Positiva	Contrário
23	Positiva	Negativa	Contrário
23	Negativa	Negativa	Mesmo
25	Positiva	Positiva	Mesmo
25	Negativa	Positiva	Contrário

O sentido de rotação das componentes harmônicas também interferem na resistência do enrolamento do rotor, visto que a influência do efeito pelicular é medida, segundo Lima (2016), com o auxílio da velocidade relativa harmônica, que leva em consideração os sentidos de rotação.

Desse modo, há a necessidade da correção do circuito equivalente do MIT de modo a incluir os efeitos associados as distorções harmônicas presentes na tensão de alimentação. Considera-se que o motor é alimentado por várias fontes de tensão senoidal, cada fonte representando uma harmônica, seguindo a decomposição da forma de onda resultante, utilizando a série de Fourier.

Segundo Silva (2012), pode-se encontrar as perdas referentes a cada ordem harmônica no motor. No final, as perdas totais são resultado do somatório entre a componente fundamental e as perdas de cada ordem harmônica, conforme apresentado em (5.1).

$$Perdas_{Totais} = Perdas_{fundamental} + Perdas_{harmônicas} \quad (5.1)$$

O circuito equivalente considerando a alimentação com presença de harmônicas é apresentado nas Figuras 5.1 e 5.2. De acordo com a figura apresentada, cada parâmetro do circuito equivalente deve ser avaliado em função da frequência harmônica de ordem  $h$ .

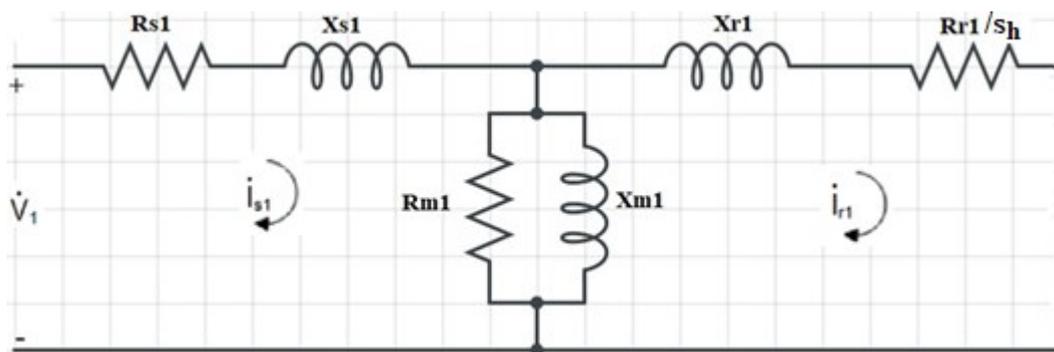


Figura 5.1 – Circuito equivalente ao motor de indução para harmônica de tensão de sequência positiva.

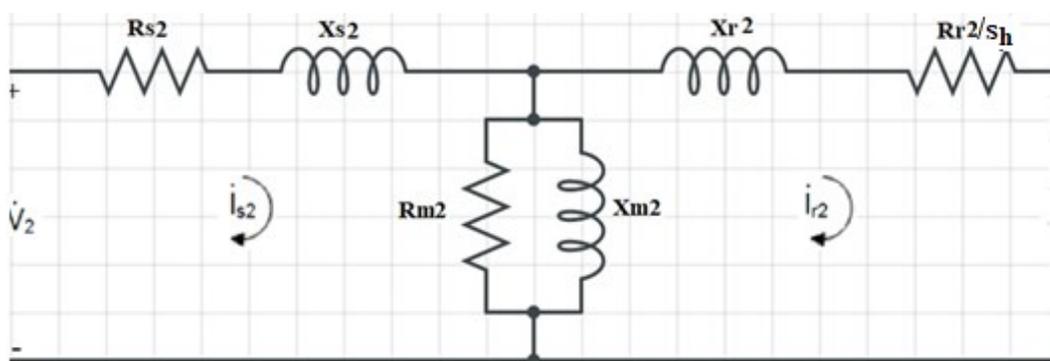


Figura 5.2 – Circuito equivalente ao motor de indução para harmônica de tensão de sequência negativa.

$\dot{V}_1$  e  $\dot{V}_2$  são respectivamente, os fasores que representam harmônicas de tensão de fase de sequência positiva e de sequência negativa, resultando para cada uma das distorções harmônicas de tensão em dois circuitos elétricos equivalentes para representar o comportamento do motor.

### 5.2.1 – Correção dos Parâmetros do Circuito Equivalente do MIT em função da Ordem Harmônica

No estator a frequência da onda de tensão para cada harmônica é dada como múltiplo da fundamental. (SILVA, 2012).

$$f_s(h) = hf_s(1) \quad (5.2)$$

Onde:

---

$f_s(h)$ : frequência da onda de tensão para a ordem harmônica  $h$  [Hz];

$h$ : ordem harmônica;

$f_s(1)$ : frequência da onda de tensão da fundamental [Hz].

$$s_h = 1 \pm \frac{[1 - s(1)]}{h} \quad (5.3)$$

Onde:

$s_h$ : escorregamento para a frequência harmônica de ordem  $h$ ;

$h$ : ordem harmônica;

$s(1)$ : escorregamento para a frequência fundamental.

Na equação (5.3), o sinal positivo ou negativo é escolhido através da Tabela 5.2.

Para se saber qual a frequência irá aparecer no circuito do rotor, antes deve-se definir o escorregamento relacionado a ordem harmônica, levando em consideração o sentido de rotação do campo magnético girante produzido pelas correntes da mesma ordem. Na Tabela 5.2 indica-se o sinal a ser usado para o cálculo do escorregamento correspondente para cada ordem harmônica.

Tabela 5.2– Sinal para escorregamento em função da ordem harmônica.

<b>Ordem Harmônica</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>11</b>	<b>13</b>	<b>17</b>	<b>19</b>
<b>Sequência de Fases</b>	+	-	+	-	+	-	+
<b>Sinal para o escorregamento</b>	-	+	-	+	-	+	-

Fonte: Autor, baseado em Silva, 2012.

Assim, define-se a frequência das tensões e correntes presentes no rotor quando há presença de harmônicas nas tensões de alimentação através de:

$$f_R(h) = hf_s(1)s_h \quad (5.4)$$

Onde:

$f_R(h)$ : frequência das tensões e correntes presentes no rotor [Hz].

---

### 5.2.1.1 – Ajuste da Resistência do Circuito Equivalente ao Enrolamento do Estator ( $R_s$ )

O efeito pelicular é o deslocamento da densidade de corrente para regiões mais externas da seção transversal de um condutor elétrico, implicando na redução da vida útil do condutor. Assim, a resistência elétrica dos condutores do estator e do rotor de um MIT terão seu valor acrescido em função da ordem harmônica da corrente, influenciando também a indutância dos condutores. (SILVA, 2012).

Este efeito faz com que a frequência influencie no valor da resistência. Contudo, no enrolamento do estator, esse efeito é muito pequeno devido ao fato de ser composto por fios de pequena seção transversal, sendo desprezado.

Desse modo, a resistência do enrolamento de sequência positiva e negativa são consideradas constantes e iguais a resistência do circuito equivalente ao enrolamento do estator operando em regime permanente com tensões equilibradas e senoidais  $R_1$ .

$$R_{s1} = R_{s2} = R_1 \quad (5.5)$$

Onde:

$R_{s1}$ : resistência do circuito equivalente ao enrolamento do estator da componente de sequência positiva [ $\Omega$ ];

$R_{s2}$ : resistência do circuito equivalente ao enrolamento do estator da componente de sequência negativa [ $\Omega$ ];

$R_1$ : resistência do circuito equivalente ao enrolamento do estator para tensões equilibradas e senoidais [ $\Omega$ ].

### 5.2.1.2 – Ajuste da Resistência que representa as perdas a vazio ( $R_m$ )

Essa resistência representa as perdas a vazio do motor, sendo as perdas por atrito, ventilação, perdas adicionais e perdas no núcleo. Como suas resistências representativas sofrem pouca alteração quanto à frequência de alimentação, estas serão consideradas constantes, igual ao valor encontrado a vazio usando tensões puramente senoidais de alimentação, conforme equação (5.6).

$$R_{m1} = R_m \quad (5.6)$$

---

Onde:

$R_{m1}$ : resistência que representa as perdas a vazio para a componente fundamental de sequência positiva [ $\Omega$ ];

$R_m$ : resistência que representa as perdas a vazio para operação em regime permanente com tensões equilibradas e senoidais [ $\Omega$ ].

De acordo com Lima (2016), a componente fundamental de sequência negativa e as componentes harmônicas de sequência positiva e negativa para a resistência que representa as perdas em vazio não será considerada, uma vez que a componente fundamental de sequência positiva ( $R_{m1}$ ) já representa essas perdas. Sendo assim essas componentes tem valor igual a zero.

### 5.2.1.3 – Ajuste da Reatância de Dispersão do enrolamento do estator ( $X_s$ )

A reatância indutiva para uma ordem harmônica  $h$  dependerá da frequência do harmônico, uma vez que, a indutância é mantida constante porque o efeito pelicular para baixas frequências pode ser desprezado.

$$X_{s1} = X_{s2} = hX_s \quad (5.7)$$

Onde:

$X_{s1}$ : reatância de dispersão do circuito equivalente ao enrolamento do estator das componentes de sequência positiva para as harmônicas de ordem  $h$  [ $\Omega$ ];

$X_{s2}$ : reatância de dispersão do circuito equivalente ao enrolamento do estator das componentes de sequência negativa para as harmônicas de ordem  $h$  [ $\Omega$ ];

$X_s$ : reatância de dispersão do circuito equivalente ao enrolamento do estator para tensões equilibradas e senoidais [ $\Omega$ ].

### 5.2.1.4 – Ajuste da reatância de dispersão do enrolamento do rotor bloqueado ( $X_{rb}$ )

As mesmas considerações feitas para a reatância de dispersão do circuito equivalente do enrolamento do estator são feitas para a reatância do rotor bloqueado e para a reatância de magnetização, conforme observa-se nas equações (5.8) e (5.9).

---

$$X_{rb1} = X_{rb2} = hX_{rb} \quad (5.8)$$

Onde:

$X_{rb1}$ : reatância de dispersão do circuito equivalente ao enrolamento do rotor bloqueado das componentes de sequência positiva para as harmônicas de ordem  $h$  [ $\Omega$ ];

$X_{rb2}$ : reatância de dispersão do circuito equivalente ao enrolamento do rotor bloqueado das componentes de sequência negativa para as harmônicas de ordem  $h$  [ $\Omega$ ];

$X_{rb}$ : reatância de dispersão do circuito equivalente ao enrolamento do rotor bloqueado para tensões equilibradas e senoidais [ $\Omega$ ].

### 5.2.1.5 – Ajuste da reatância do ramo de magnetização ( $X_m$ )

Para cada harmônica de ordem  $h$ , as reatâncias do ramo magnetizante serão ajustadas para as sequências positiva e negativa.

$$X_{m1} = X_{m2} = hX_m \quad (5.9)$$

Onde:

$X_{m1}$ : reatância do ramo de magnetização, para a componente de sequência positiva para as harmônicas de ordem  $h$  [ $\Omega$ ];

$X_{m2}$ : reatância do ramo de magnetização, para a componente de sequência negativa para as harmônicas de ordem  $h$  [ $\Omega$ ];

$X_m$ : reatância do ramo de magnetização para operação com tensões equilibradas e senoidais [ $\Omega$ ].

Devido ao fato do efeito pelicular ser sentido pelo rotor para realizar o ajuste da resistência do enrolamento do rotor ( $R_r$ ) deve-se levar em conta a velocidade relativa harmônica, a qual depende do sentido de rotação da componente de sequência.

---

### 5.2.2 – Cálculo do Escorregamento correspondente ao conjugado da carga

O escorregamento operacional do motor é calculado com o auxílio da equação de Kloss. O escorregamento operacional é válido para o circuito equivalente alimentado pela componente de sequência positiva da componente fundamental da tensão. (LIMA, 2016).

$$s_{op} = s_k \left( \frac{M_K}{M_C} \left( \frac{V_{f1}}{V_{FN}} \right)^2 + \sqrt{\left( \frac{M_K}{M_C} \right)^2 \left( \frac{V_{f1}}{V_{FN}} \right)^4 - 1} \right) \quad (5.10)$$

Onde:

$s_{op}$ : escorregamento operacional;

$s_k$ : escorregamento máximo;

$M_K$ : conjugado máximo [N.m];

$M_C$ : conjugado de carga [N.m];

$V_{f1}$ : componente fundamental de sequência positiva da tensão de fase [V];

$V_{FN}$ : tensão nominal de fase do motor [V].

O escorregamento máximo é obtido pela equação:

$$s_k = s_N \left( \frac{M_K}{M_N} + \sqrt{\left( \frac{M_K}{M_N} \right)^2 - 1} \right) \quad (5.11)$$

Onde:

$s_k$ : escorregamento máximo;

$s_N$ : escorregamento nominal;

$M_K$ : conjugado máximo [N.m];

$M_N$ : conjugado nominal [N.m].

A partir do escorregamento operacional pode-se definir a velocidade do motor em função da velocidade síncrona, conforme equação (5.12).

$$n = n_s (1 - s_{op}) \quad (5.12)$$

Onde:

$n$ : velocidade do motor [rpm];

$n_s$ : velocidade síncrona [rpm].

### 5.2.3 – Cálculo da Velocidade Relativa Harmônica e Correção da Resistência do Rotor

A velocidade relativa harmônica é função da velocidade nominal do campo girante ( $n_{1N}$ ) e da velocidade do rotor ( $n$ ), considerando a sequência de fase.

$$n_{r(h)} = hn_s \pm n \quad (5.13)$$

Onde:

$n_{r(h)}$ : velocidade relativa harmônica [rpm].

O sinal da expressão (5.13) é definido conforme apresentado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3– Sinal para o cálculo da velocidade relativa.

<b>Componente simétrica de sequência</b>	<b>Harmônica de Sequência</b>	$n_{r(h+)(+)} e n_{r(h-)(-)}$
Positivo	Positivo	$hn_s - n_N$
Negativa	Negativo	
<b>Componente simétrica de sequência</b>	<b>Harmônica de Sequência</b>	$n_{r(h+)(-)} e n_{r(h-)(+)}$
Positiva	Negativa	$hn_s + n_N$
Negativa	Positiva	

Onde:

$n_{r(h+)(+)}$  : velocidade relativa harmônica para componente de sequência positiva da harmônica de sequência positiva;

$n_{r(h-)(-)}$  : velocidade relativa harmônica para componente de sequência negativa da harmônica de sequência negativa;

$n_{r(h+)(-)}$  : velocidade relativa harmônica para componente de sequência positiva da harmônica de sequência negativa;

$n_{r(h-)(+)}$  : velocidade relativa harmônica para componente de sequência negativa da harmônica de sequência positiva.

---

### 5.2.3.1 – Ajuste da Reatância do Rotor

A reatância de dispersão do circuito equivalente do rotor depende da velocidade relativa, da indutância, conforme a expressão (5.14).

$$X_{r(h)} = k_x n_{r(h)} L_r \quad (5.14)$$

Onde:

$X_{r(h)}$ : reatância de dispersão do rotor para cada ordem harmônica [ $\Omega$ ];

$k_x$ : constante da reatância;

$n_{r(h)}$ : velocidade relativa harmônica [rpm];

$L_r$ : indutância do rotor [H].

Para o rotor bloqueado, tem-se a seguinte expressão da reatância do rotor:

$$X_{rb(h)} = k_x n_s L_r \quad (5.15)$$

Onde:

$X_{rb(h)}$ : reatância de dispersão do rotor bloqueado para cada ordem harmônica [ $\Omega$ ];

$n_s$ : velocidade síncrona [rpm].

### 5.2.3.2 – Ajuste da Resistência do Rotor

A resistência do circuito equivalente ao enrolamento do varia de forma exponencial, conforme expressão (5.16).

$$R_r = k_1 e^{k_2 \sqrt{n_{r(h)}}} \quad (5.16)$$

Onde:

$R_r$ : resistência equivalente ao enrolamento do rotor [ $\Omega$ ];

$k_1$  e  $k_2$  : constantes;

$n_{r(h)}$ : velocidade relativa harmônica [rpm].

As constantes  $k_1$  e  $k_2$  podem ser determinadas a partir das equações (5.17) e (5.18).

---

$$k_1 = \frac{R_{rb}}{e^{k_2 \sqrt{n_s}}} \quad (5.17)$$

$$k_2 = \frac{Ln \frac{R_r}{R_{rb}}}{\sqrt{n_r(h)} - \sqrt{n_s}} \quad (5.18)$$

Para o rotor bloqueado, tem-se a seguinte expressão da resistência do rotor:

$$R_{rb} = k_1 e^{k_2 \sqrt{n_s}} \quad (5.19)$$

Onde:

$R_{rb}$ : resistência do rotor bloqueado [ $\Omega$ ];

$n_s$ : velocidade síncrona [rpm].

### 5.3 – Conclusão

Neste capítulo foi apresentado a correção dos parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico considerando desequilíbrios de tensão e ou/ distorções harmônicas. Foram apresentadas as expressões que permitem os cálculos dos parâmetros como resistências, reatâncias, velocidade e escorregamento para o motor em tais condições.

Deste modo, observa-se que as distorções harmônicas e sequência de fase impactam diretamente nos valores dos parâmetros do circuito equivalente do MIT uma vez que dependem da ordem harmônica e para o rotor além da ordem harmônica dependem também da velocidade relativa harmônica devido ao efeito pelicular.

---

## **CAPÍTULO 6 - MONTAGEM DA BANCADA DE AQUISIÇÕES DE DADOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

### **6.1- Introdução**

Após a definição de desequilíbrios e distorções harmônicas e seu impacto no motor de indução trifásico, e do estudo da melhor maneira de calcular as potências, fator de potência e desequilíbrios nas condições apresentadas, iniciou-se a etapa e desenvolvimento do código em MATLAB para cálculo dessas variáveis e a construção da plataforma para aquisição de dados do motor, afim de analisar em laboratório o comportamento do motor de indução trifásico diante de diversos cenários de tensões e correntes na presença de desequilíbrios e harmônicas.

### **6.2- Objetivos**

Para validação do trabalho proposto é necessário validar o código desenvolvido que analisa o comportamento de tensões e correntes no motor de indução trifásico diante de desequilíbrio de tensão ou distorção harmônica. Sendo assim, necessário a construção de uma bancada de aquisição de dados. Dessa forma, no intuito de aproveitar ao máximo os recursos oferecidos pela universidade e pelo laboratório foi desenvolvida uma bancada de aquisição de dados que oferece precisão e confiabilidade nas medidas.

### **6.3- Bancada de aquisição de dados e ensaios**

Com o intuito de facilitar a manipulação de todos os equipamentos necessários à realização do trabalho, toda o experimento foi acomodado em uma bancada para a realização da aquisição de dados. A bancada conta com os principais dispositivos de proteção contra eventuais falhas que possam ocorrer durante a realização dos ensaios.

A Figura 6.1 apresenta o fluxograma que relaciona todos os elementos envolvidos na aquisição de dados e processamento para obtenção dos efeitos observados no motor de indução trifásico.

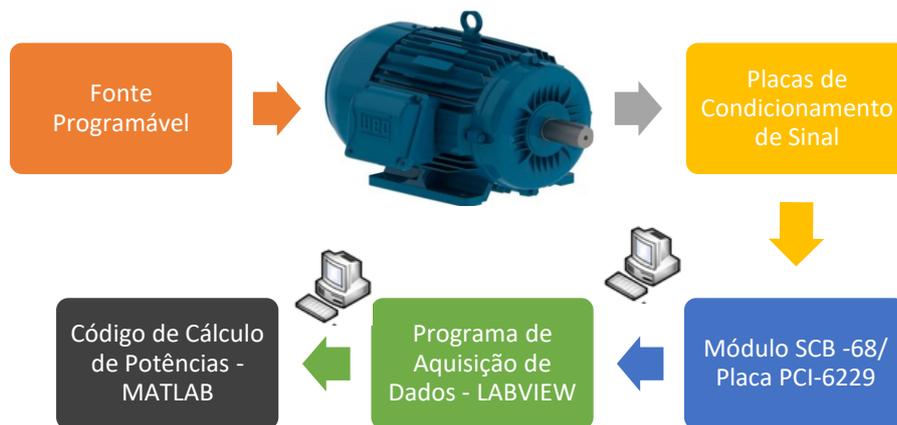


Figura 6.1 - Diagrama em blocos da plataforma experimental completa.

Os elementos utilizados na bancada, conforme apresenta o fluxograma serão detalhados a seguir.

### 6.3.1 – Elementos da bancada

#### Fonte Programável

É utilizada para alimentar o motor de indução trifásico. A fonte programável permite a simulação de diversos cenários de tensões, correntes, frequências e inclusive permite a inserção de afundamento de tensão, distorções harmônicas e desequilíbrios. Desse modo, foi utilizada para fazer a simulação de diversos ensaios com desequilíbrio e distorção harmônica na tensão de alimentação do motor.



Figura 6.2 - Fonte programável AMETEK presente no Laboratório.

A fonte programável utilizada apresentada na (Figura 6.2), é desenvolvida pela AMETEK Programmable Power, indústria localizada em San Diego – Califórnia. É um equipamento que possui alta eficiência e precisão com baixa distorção de sinal. O modelo utilizado foi o CSW5550 e possui interfaces remotas GPIB, RS 232 e USB. As características da fonte são apresentadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Dados da fonte programável.

<b>Fabricante</b>	AMETEK
<b>Marca</b>	California Instruments
<b>Modelo</b>	CSW5550
<b>Tensão de Saída (CA/CC)</b>	0-156 V <sub>rms</sub> (FN)/ 0-312V <sub>rms</sub> (FN)
<b>Corrente de Saída</b>	32,16 A (por fase)
<b>Frequência de Saída</b>	40-5000 Hz

A programação da fonte pode ser feita através do *software* ou por meio do teclado do painel frontal. O *software* da fonte programável permite ainda a leitura e armazenagem de dados, visualização de gráficos de tensão e corrente, conforme observado na Figura 6.3.

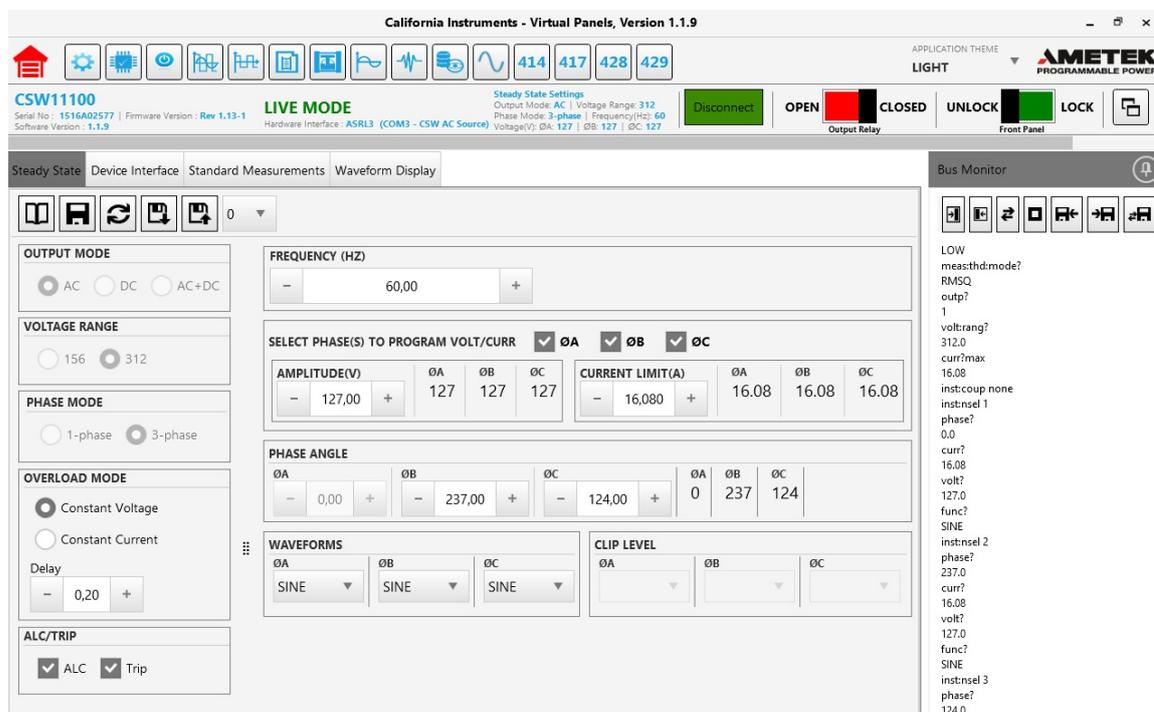


Figura 6.3 - Tela do *software* da fonte programável.

---

## Motor de Indução Trifásico

O motor utilizado no ensaio foi um MIT de 3cv da WEG, tipo rotor em gaiola, conforme especificações apresentadas na Tabela 6.2.



Figura 6.4 - Motor de Indução Trifásico.  
Fonte: Site Loja do Mecânico, 2019.

Tabela 6.2 - Dados do Motor de Indução trifásico utilizado no ensaio.

<b>Fabricante</b>	WEG
<b>Potência</b>	2,2 (3,0) kW (cv)
<b>Tensão (<math>\Delta/Y</math>)</b>	220/380 V
<b>Corrente (<math>\Delta/Y</math>)</b>	8,39/ 4,86 A
<b>Frequência</b>	60 Hz
<b>Velocidade</b>	3450rpm – 2 pólos
<b>Rendimento</b>	81,9%
<b>Fator de potência</b>	0,84
<b>Fator de serviço</b>	1,15
<b>Categoria</b>	N
<b>Classe de Isolamento</b>	F
<b>Regime de Serviço</b>	S1

## Placas de Condicionamento de Sinais

Para a aquisição de dados de tensões e correntes nas fases do MIT é necessário um circuito elétrico de condicionamento de sinais em razão dos elevados níveis de tensão e corrente a serem mensurados, que não é possível de ser realizado diretamente pelas entradas dos blocos de leitura da placa de aquisição de dados, sendo necessário a conversão das grandezas.

Além de converter a tensão e a corrente para níveis baixos de tensão (-10V a 10V), também filtra sinais de altas frequências a fim de evitar ruídos e efeitos de *aliasing*.

O circuito apresentado na Figura 6.5 mostra o circuito das placas de condicionamento de sinais:

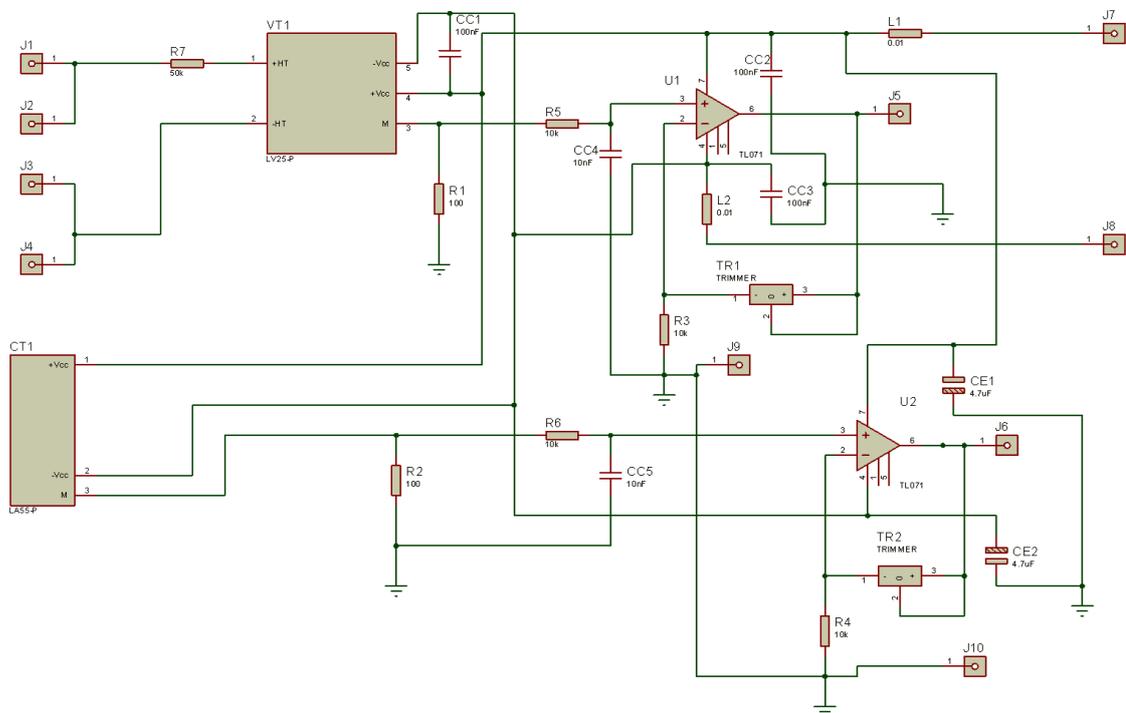


Figura 6.5 - Circuito elétrico da placa de condicionamento de sinais utilizada.

Basicamente, esta placa é dividida em 3 circuitos:

- Circuito 1 - Entrada dos transdutores de corrente e tensão: a etapa de entrada dos transdutores é dimensionada (capacitores e resistores) de acordo com os níveis das grandezas que irão ser adquiridas.
- Circuito 2 - Estágio de filtro passa-baixa: neste estágio tem-se o início do condicionamento do sinal, sendo este presente tanto ao sinal de corrente quanto ao sinal de tensão. O filtro passa-baixa tem por função limitar a frequência de aquisição do sinal amostrado, de forma que sinais fora da frequência desejada, geralmente ruídos, sejam

atenuados para a frequência de 60Hz.

- Circuito 3 - Estágio de condicionamento final e somador de nível contínuo: neste estágio temos o condicionamento do sinal de -10V a 10V, ou seja, a partir disso pode-se trabalhar com um sinal alternado em níveis adequados as entradas analógicas da placa de aquisição em questão. Assim como o circuito anterior este está presente no condicionamento tanto da corrente quanto da tensão.

A Figura 6.6 a seguir apresenta a placa de condicionamento e os seus componentes, tais como resistores, capacitores, amplificador operacional, regulador e tensão, sensores de corrente e tensão.

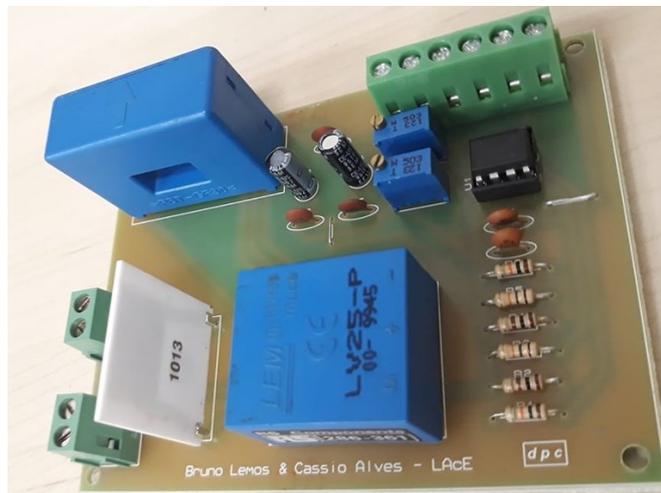


Figura 6.6 - Placa de condicionamento de sinais.

Na Figura 6.7 abaixo observa-se as três placas de condicionamento de sinal utilizadas, uma vez que necessita-se de uma placa para cada fase.

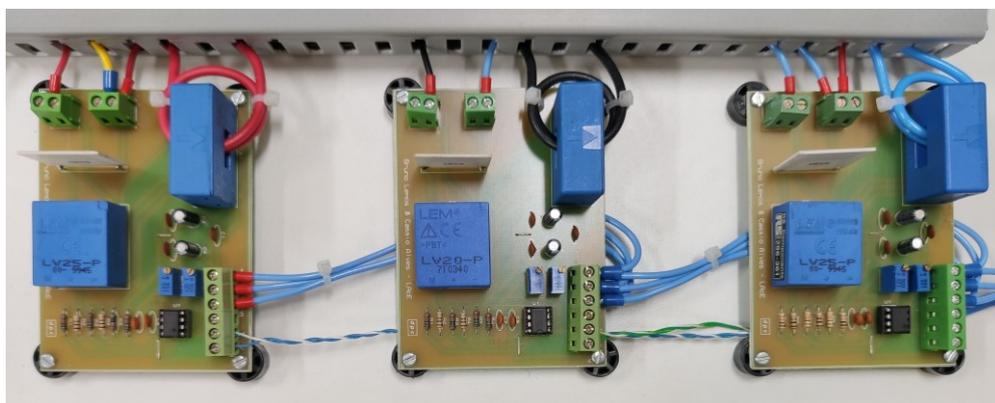


Figura 6.7 - Conjunto de placa de condicionamento de sinais utilizadas na bancada experimental.

---

## Módulo SCB-68

As saídas de sinais de tensões e correntes provenientes das placas de aquisição de dados entram no módulo SCB-68 para iniciar a aquisição de sinais pelas placas da NI.

O bloco de terminais SCB 68 é um equipamento da *National Instruments* (Figura 6.8), que realiza a interface entre os dispositivos que compõem o sistema (sistema principal, fonte de alimentação e sistema de aquisição e processamento de sinais). Possui 68 pinos conectores para realizar a conexão das fases dos motores e da fonte alimentadora com a placa de aquisição e processamento de sinais.

Suas especificações técnicas básicas são:

- Número de terminais: 68 (tipo parafuso);
- Tensão máxima de trabalho: 30 Vrms/ 42 Vpp / 60VDC
- Consumo máximo de energia: (+5VDC, +-5%): 800mA



Figura 6.8 - Módulo SCB-68 da NI.  
Fonte: EURICH, 2014.

## Placa PCI-6229

Os sinais do bloco SCB são enviadas a placa PCI -6229 para fazer o processamento de sinais para a aquisição de dados através do programa desenvolvido no LabVIEW.

As placas de aquisição são os equipamentos responsáveis pelas entradas e saídas de sinais no sistema analisado, sendo capazes de converter e processar, na entrada, os sinais analógicos de tensão e corrente provenientes das fases do motor para o formato digital através de conversores digitais. Após a conversão, os sinais são transferidos para o computador para serem armazenados, visualizados e analisados.

---

A placa de aquisição utilizada neste trabalho, modelo NI PCI 6229 do fabricante *National Instruments* (Figura 6.9), é capaz de adquirir e processar inúmeros tipos de grandezas físicas, tais como: posição, velocidade, aceleração, pressão e temperatura.



Figura 6.9 - Placa de aquisição de dados da NI modelo 6229.  
Fonte: *National Instruments*, 2019.

As especificações das placas são:

- Entradas analógicas: 16 diferenciais ou 32 modo-comum  
Resolução: 16 bits  
Taxa de amostragem: 250 kS/s (kiloamostras por segundo)  
Precisão de temporização: 50ppm(partes por milhão) por taxa de amostragem  
Faixa máxima de tensão:  $\pm 11V$   
Escala de medição:  $\pm 0.2V$ ,  $\pm 1V$ ,  $\pm 5V$ ,  $\pm 10V$ .  
Escala máxima:  $\pm 11V$ ,  
Impedância de entrada:  $>10G\Omega$  em paralelo com 100pF.
- Saídas analógicas: 4  
Resolução: 16 bits  
Taxa de atualização: 1 canal: 833 kS/s; 2 canais 740kS/s; 3 canais: 666 kS/s; 4 canais 625 kS/s.  
Precisão de temporização: 50ppm por taxa de amostragem  
Faixa de saída:  $\pm 10V$   
Impedância de saída:  $0.2 \Omega$   
Drive de corrente:  $\pm 5mA$
- Entradas e saídas digitais: 48
- Contadores: 2

---

Resolução: 32 bits.

## **LabVIEW**

Para realizar a aquisição de dados necessita de um *software*, já que este quem permite a comunicação entre os diversos subsistemas que integram o sistema. Assim, o trabalho utiliza este *software* para fazer a aquisição de dados através das placas da NI e possibilita determinação de número de amostras e a frequência de amostragem das aquisições.

Através do programa desenvolvido no LabVIEW foi possível fazer a aquisição dos dados de tensão e corrente do MIT nas condições especificadas pelos ensaios e armazenados em arquivo *.txt* para posterior leitura no MATLAB.

## **MATLAB**

O código desenvolvido no *software* MATLAB utiliza os arquivos *.txt*, gerados através do sistema de aquisição desenvolvido no LabVIEW, para extrair os dados de tensões e correntes do motor de indução trifásico e aplica as equações de cálculo de potências e distorções afim de analisar o efeito no MIT e a geração de gráficos que enfatizem os efeitos de diversas condições de desequilíbrios e harmônicas aplicadas.

### **6.3.2 – Montagem final**

A fonte programável é conectada ao motor de indução trifásico para criar os diversos cenários de tensão e correntes para realização dos ensaios.

A Figura 6.10 apresenta a montagem final da bancada de aquisição de dados, onde é possível observar o MIT utilizado com suas fases conectadas as placas de condicionamento de sinais, estas por sua vez enviam os sinais adquiridos para o bloco SCB-68 através do cabo de rede mostrado na figura, a qual está conectada na placa PCI-6229 no computador que possui os *softwares* LabVIEW e o MATLAB para o processamento dos sinais e realização dos ensaios.

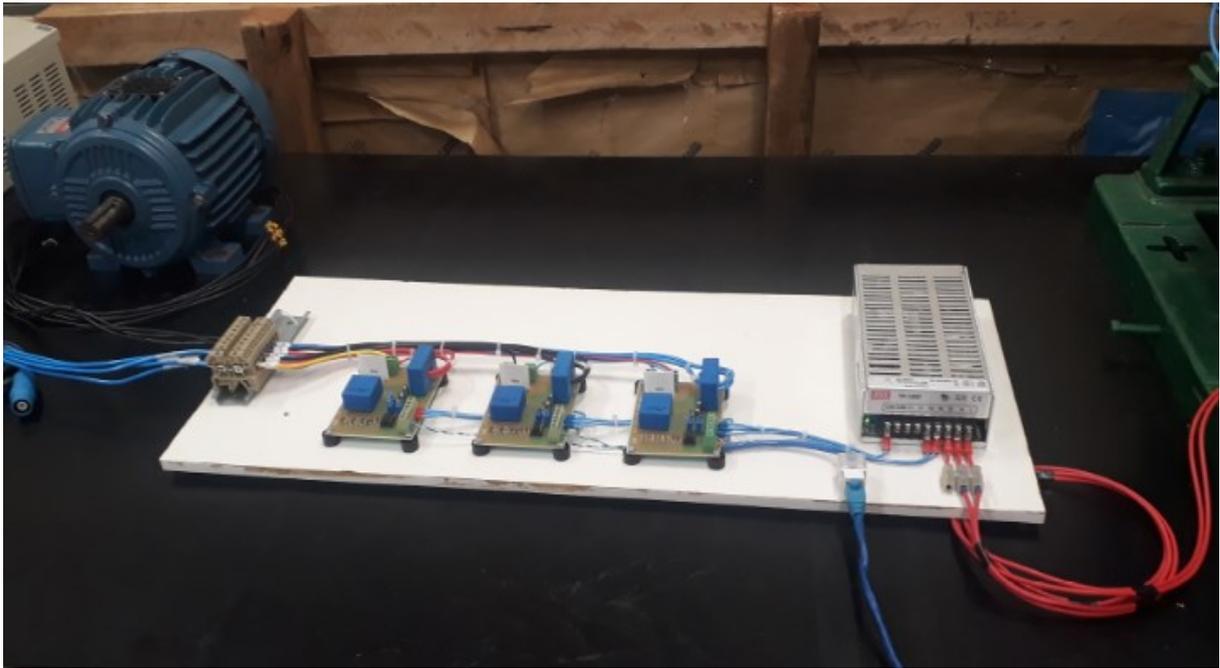


Figura 6.10 - Montagem final da bancada de aquisição de dados para ensaios.

#### 6.4- Resultados experimentais

Após a montagem da bancada de aquisição de dados e a programação dos *softwares* de aquisição de dados e do cálculo de potências e demais variáveis, iniciaram-se os ensaios e aquisição de resultados experimentais. A seguir serão apresentados os ensaios realizados e consequentemente os resultados obtidos.

Os principais objetivos desta etapa experimental foram o de validar a bancada de aquisição de dados, comprovar a eficiência da aquisição e analisar os efeitos de diversas condições de harmônicas e desequilíbrios no motor de indução trifásico diante de frequências e taxa de amostragem distintas.

Foram feitos oito ensaios com o motor a vazio e cada ensaio foi realizado para as frequências de 60Hz, 75Hz e 90Hz. No programa do LabVIEW foi definido a taxa de amostragem e número de pontos. Assim, para a frequência de 60Hz a taxa de aquisição foi de 7680 e 8192 pontos. Já para 75Hz a taxa de aquisição utilizada foi de 9600 e o número de pontos 16384. Por fim, para a frequência de 90 Hz a taxa de aquisição foi de 11520 para um total de 16384 pontos.

---

As distorções harmônicas de tensão utilizada nos ensaios foram de no máximo 10%, de modo a respeitar o limite da norma da ANEEL de qualidade de energia apresentada no Módulo 8 do PRODIST, que especifica para uma tensão nominal menor ou igual a 1.0kV uma distorção de tensão de 10% e desequilíbrio de tensão de 3%.

Além disso, os ensaios foram realizados para o motor ligado em delta devido a melhor precisão oferecida pelo sinal de tensão gerado pela fonte programável nesta configuração de ligação.

#### **6.4.1 – Ensaio 1: Apenas a Fundamental**

Neste ensaio foi simulado apenas a frequência fundamental sem a presença de desequilíbrios e distorções harmônicas, assim sendo foi aplicado ao MIT uma tensão perfeitamente senoidal.

##### **6.4.1.1 - Frequência 60Hz**

Na Tabela 6.3 são apresentados os dados de tensão que foram aplicados ao motor através da fonte programável e os valores de corrente medidos através do software da fonte.

Tabela 6.3 - Dados para o ensaio para a fundamental na frequência de 60Hz.

	<b>Fase A</b>	<b>Fase B</b>	<b>Fase C</b>
<b>Tensão (Vrms)</b>	126,99	127	126,99
<b>Defasagem (Graus)</b>	0°	240,3°	120,5°
<b>Corrente (Irms)</b>	2,49	2,54	2,48
<b>Defasagem (Graus)</b>	81,37°	81,95°	82,53°

As Figuras 6.11 e 6.12 apresentam as tensões e correntes em 60Hz gerados no MATLAB a partir dos dados da aquisição.

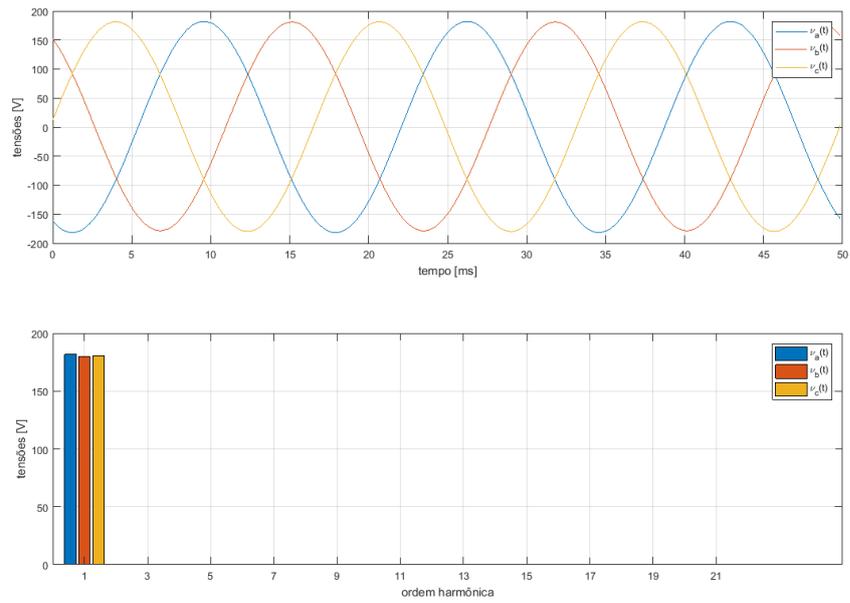


Figura 6.11 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio com tensão de alimentação perfeitamente senoidal e sem harmônicos a 60Hz.

Como é de se esperar a tensão não apresenta desequilíbrios e nem componentes harmônicas, uma vez que foi aplicado uma componente totalmente senoidal para a realização do ensaio.

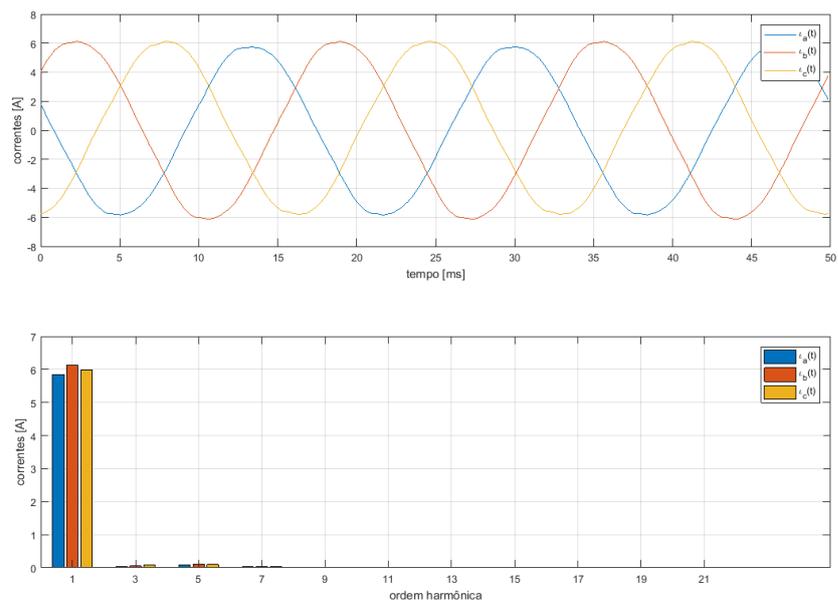


Figura 6.12 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio com tensão de alimentação perfeitamente senoidal e sem harmônicos a 60Hz.

Já a corrente apresentou algumas distorções, devido a saturação do motor e a presença de harmônicas espaciais.

Os harmônicos espaciais representam a contribuição das harmônicas de baixa ordem e são decorrentes da construção física do motor e do posicionamento dos seus enrolamentos os quais resultam em ondas de força magnetomotriz e força eletromotriz não-senoidais.

### 6.4.1.2 - Frequência 75Hz

Na Tabela 6.4 tem-se os dados de tensão e correntes lidos através do software da fonte programável.

Tabela 6.4 - Dados para o ensaio para a fundamental na frequência de 75Hz.

	Fase A	Fase B	Fase C
<b>Tensão (Vrms)</b>	127	127	126,99
<b>Defasagem (Graus)</b>	0°	240,3°	120,5°
<b>Corrente (Irms)</b>	2,78	2,82	2,78
<b>Defasagem (Graus)</b>	77,29°	77,29°	77,88°

Abaixo tem-se as figuras das tensões e correntes geradas a partir dos dados da aquisição.

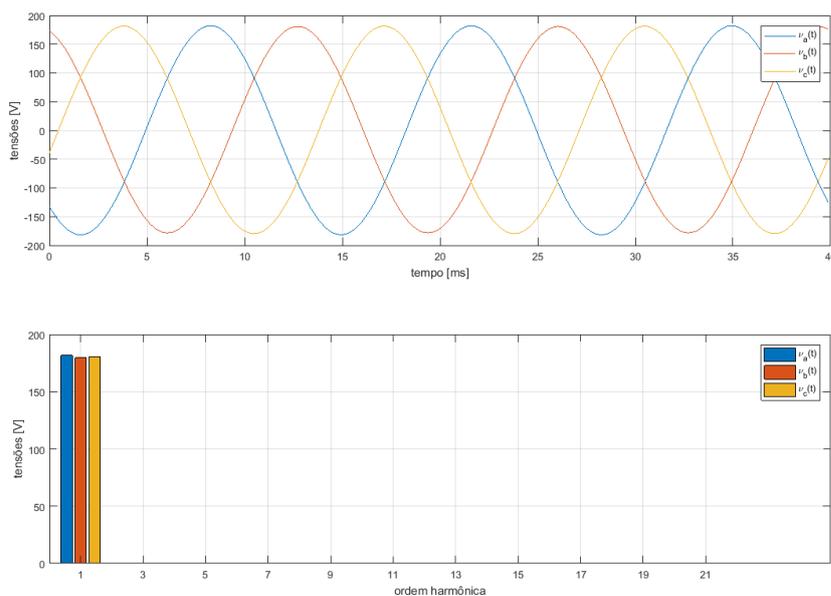


Figura 6.13 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio com tensão de alimentação perfeitamente senoidal e sem harmônicos a 75Hz.

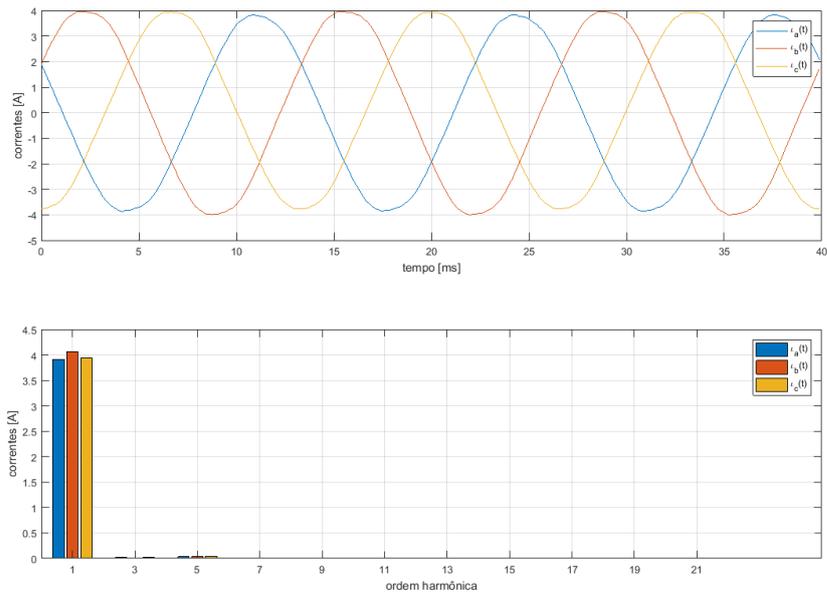


Figura 6.14 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio com tensão de alimentação perfeitamente senoidal e sem harmônicos a 75Hz.

Ao observar as figuras para o ensaio da fundamental a 75Hz observa-se o comportamento das formas de onda de tensão e corrente similares as do ensaio de 60Hz. Ressaltando que para o espectro harmônico de corrente observa-se nesta frequência uma diminuição do efeito da saturação devido a diminuição dos valores dos harmônicos espaciais.

### 6.4.1.3 - Frequência 90Hz

Na Tabela 6.5 tem-se os dados de tensão aplicados a alimentação do motor e os valores de corrente medidos para o ensaio na frequência de 90Hz.

Tabela 6.5 - Dados para o ensaio para a fundamental na frequência de 90Hz.

	<b>Fase A</b>	<b>Fase B</b>	<b>Fase C</b>
<b>Tensão (Vrms)</b>	127,01	127,01	127,01
<b>Defasagem (Graus)</b>	0°	240,3°	120,5°
<b>Corrente (Irms)</b>	2,35	2,38	2,34
<b>Defasagem (Graus)</b>	71,94°	71,94°	71,94°

Nas figuras 6.15 e 6.16 tem-se respectivamente, a tensão e a corrente provenientes da aquisição de dados para o ensaio da fundamental na frequência de 90Hz.

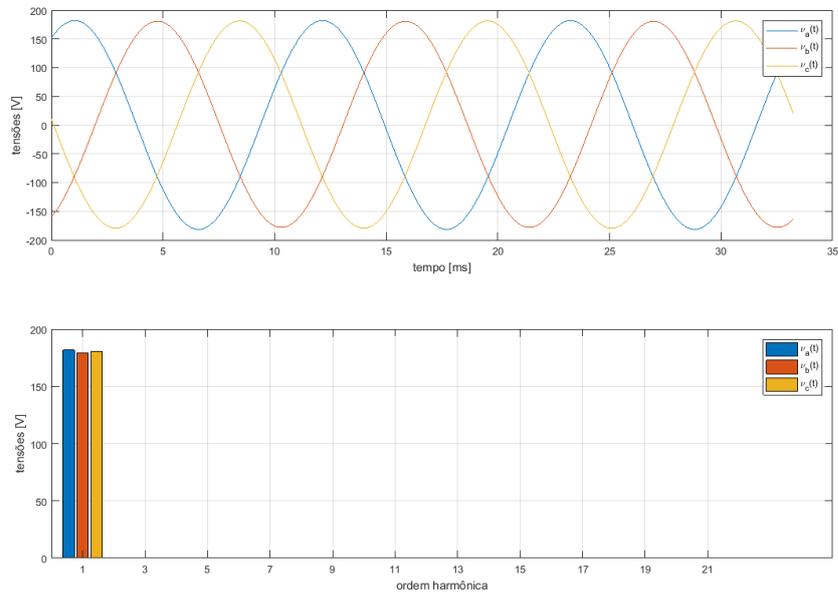


Figura 6.15 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio com tensão de alimentação perfeitamente senoidal e sem harmônicos a 90Hz.

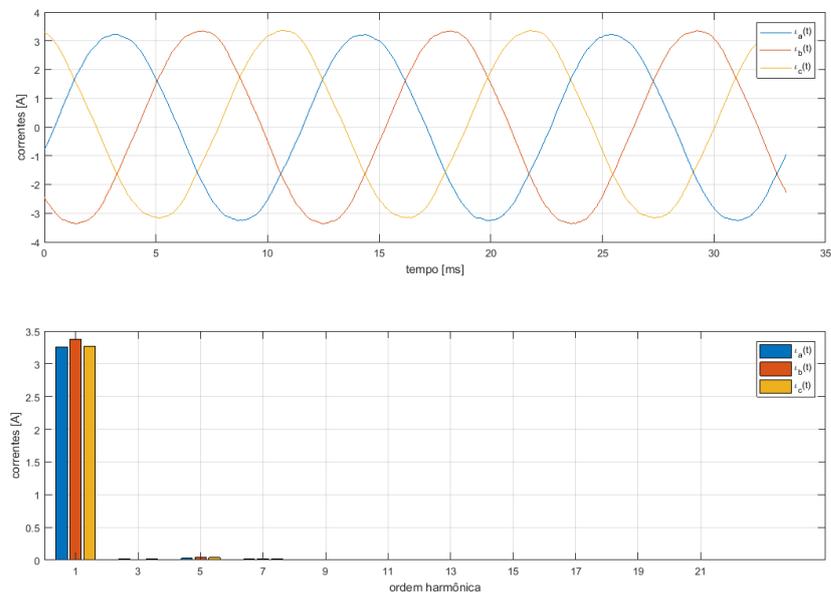


Figura 6.16 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio com tensão de alimentação perfeitamente senoidal e sem harmônicos a 90Hz.

Ao observar as figuras para o ensaio da fundamental a 90Hz observa-se o comportamento das formas de onda de tensão e corrente similares as do ensaio de 75Hz.

Tabela 6.6 - Parâmetros calculados para o ensaio da frequência fundamental.

Parâmetro	Valor		
	60Hz	75Hz	90Hz
Potência Ativa (W)	231,6323	236,7815	294,9899
Potência Aparente Efetiva (VA)	1623,8724	1076,6267	893,6885
Fator de potência efetivo	0,1426	0,2199	0,3301
Potência Ativa Fundamental (W)	231,6364	236,7831	294,9913
Potência Aparente Efetiva Fundamental (VA)	1623,5349	1076,5539	893,6199
Potência Aparente Fundamental de Desbalanço (VA)	35,6627	22,9369	18,6736
Potência Aparente Efetiva não fundamental (VA)	33,1039	12,5200	11,0730
Potência Aparente Harmônica (VA)	0,0076	0,0026	0,0021
Potência Ativa Não Fundamental (W)	0	0	0
Distorção harmônica efetiva total de tensão	0,0002	0,0002	0,0002
Distorção harmônica efetiva total de corrente	0,0204	0,0116	0,0124
Fator de desbalanço da carga	0,0220	0,0213	0,0209
Fator de desbalanço das tensões para frequência fundamental	0,0058	0,0068	0,0075
Fator de potência fundamental de sequência positiva = Fator de potência de deslocamento	0,1427	0,2199	0,3301
Potência ativa fundamental de sequência positiva (W)	231,5483	236,6914	294,9112
Potência reativa fundamental de sequência positiva (VAr)	1606,5426	1049,9616	843,3476
Potência aparente fundamental de sequência positiva (VA)	1623,1432	1076,3096	893,4248

Observando os valores calculados conclui-se que para frequências de 75Hz e 90Hz tem uma distorção harmônica da corrente menor do que a 60Hz, conforme observado também no espectro harmônico de correntes. Conclui-se que a frequências acima da nominal atenua-se os efeitos de harmônicos espaciais.

---

## 6.4.2- Ensaio 2: Fundamental e Terceiro Harmônico

Neste ensaio foi simulado na fonte programável a frequência fundamental e 10% de harmônico de 3ª ordem no sinal de tensão aplicado para as frequências de 60Hz, 75Hz e 90Hz.

As harmônicas de terceira ordem se caracterizam como componentes de sequência zero. O fato de possuírem a sequência zero indica que poderá haver uma corrente significativa circulando pela malha do triângulo na conexão em delta, que é o caso do fechamento do motor para os ensaios.

### 6.4.2.1- Frequência 60Hz

Desequilíbrios de tensão não foram aplicados, por isso os valores de tensão em módulo e ângulo não sofreram alteração conforme observado nos valores da Tabela 6.7.

Tabela 6.7 - Dados para o ensaio para a fundamental e terceiro harmônico na frequência de 60Hz.

	<b>Fase A</b>	<b>Fase B</b>	<b>Fase C</b>
<b>Tensão (Vrms)</b>	127	127	127
<b>Defasagem (Graus)</b>	0°	240,3°	120,5°
<b>Corrente (Irms)</b>	2,44	2,48	2,42
<b>Defasagem (Graus)</b>	81,37°	81,95°	82,53°

Nas Figuras 6.17 e 6.18 tem-se respectivamente, a tensão e a corrente provenientes da aquisição de dados para o ensaio da fundamental na frequência de 60Hz.

Como pode ser observado na Figura 6.17, que representa a tensão, esta apresenta no seu espectro harmônico a componente de terceira ordem que foi aplicado pela fonte programável. Desse modo ao observar a forma de onda da tensão percebe-se uma leve distorção com relação a forma de onda senoidal devido a componente harmônica de terceira ordem inserida.

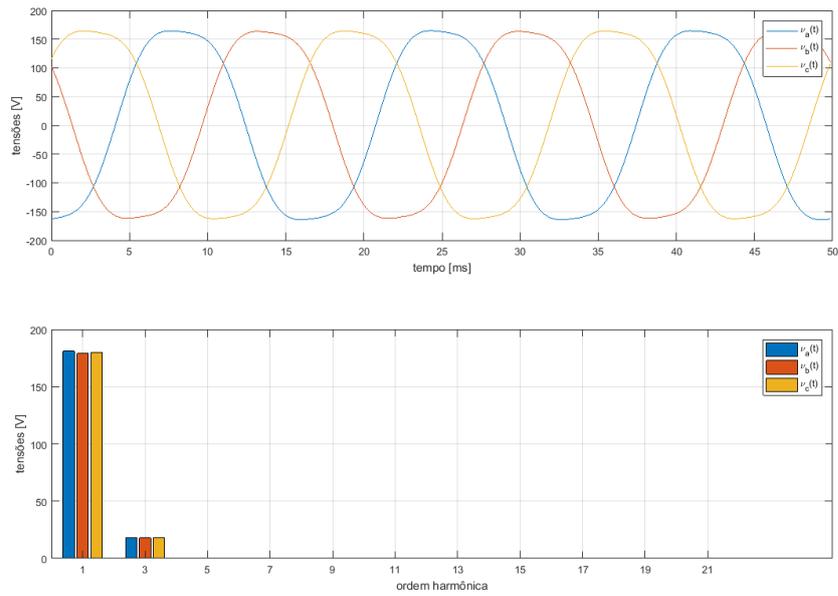


Figura 6.17 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e terceiro harmônico a 60Hz.

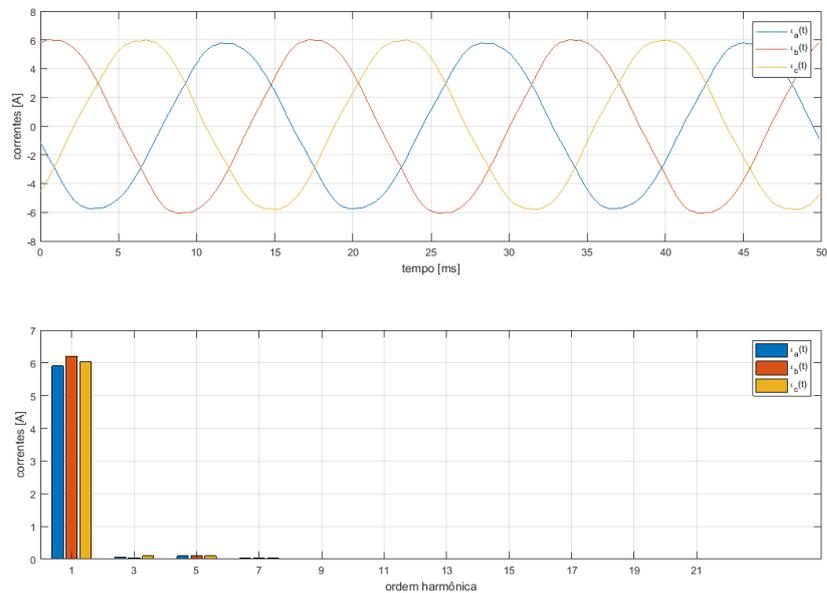


Figura 6.18 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e terceiro harmônico a 60Hz.

A corrente, como observado na Figura 6.18, não apresenta distorções harmônicas significativas, deste modo a inserção da distorção harmônica de ordem 3 não afeta a corrente de maneira significativa. Fato também evidenciado na forma de onda da corrente que continua

na forma senoidal. Os pequenos valores encontrados no espectro harmônico de 3ª e 5ª ordem se devem a saturação do motor e harmônicos espaciais.

#### 6.4.2.2 - Frequência 75Hz

Na Tabela 6.8 tem-se os valores de tensão e corrente medidos através da fonte programável para o ensaio de terceiro harmônico em 75Hz.

Tabela 6.8 - Dados para o ensaio para a fundamental e terceiro harmônico na frequência de 75Hz.

	Fase A	Fase B	Fase C
<b>Tensão (Vrms)</b>	127	127	127
<b>Defasagem (Graus)</b>	0°	240,3°	120,5°
<b>Corrente (Irms)</b>	2,80	2,84	2,80
<b>Defasagem (Graus)</b>	77,29°	77,29°	77,88°

As figuras abaixo apresentam as tensões e correntes em 75Hz geradas a partir da aquisição de dados realizada.

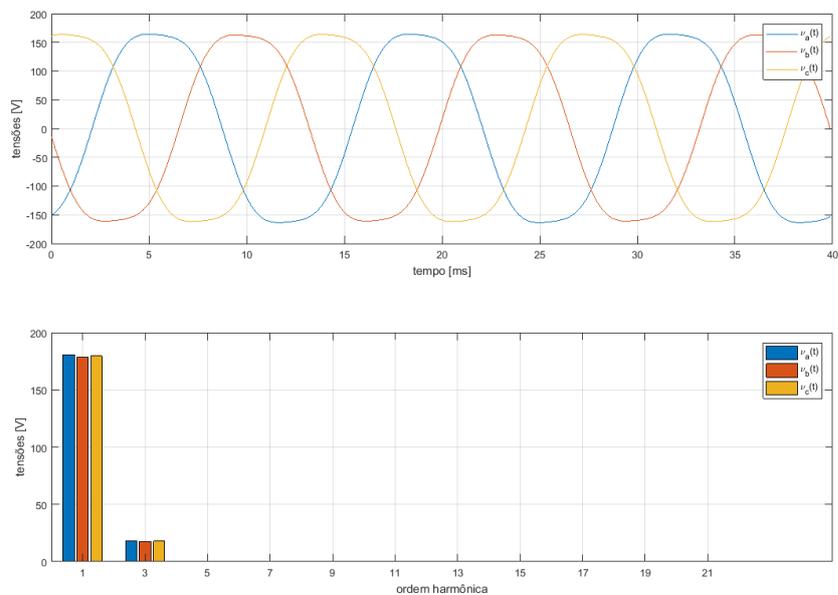


Figura 6.19 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e terceiro harmônico a 75Hz.

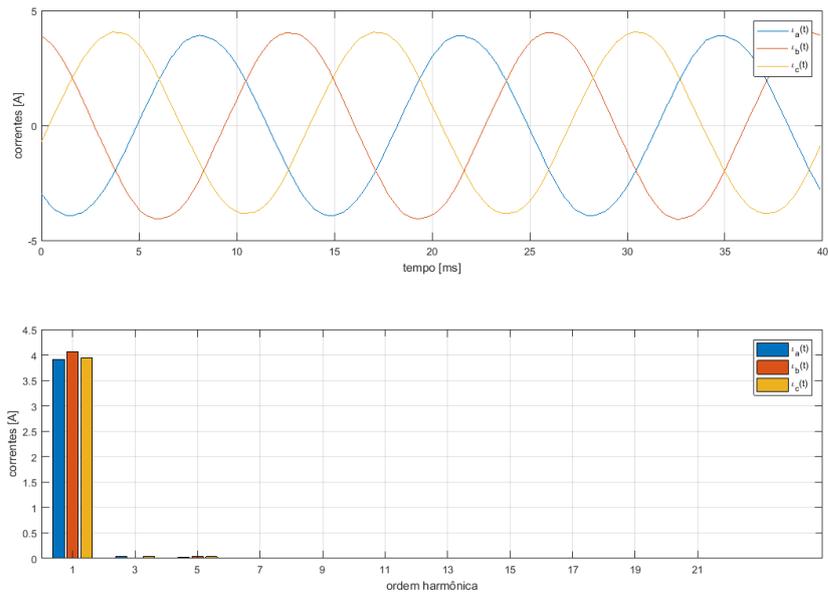


Figura 6.20 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e terceiro harmônico a 75Hz.

Observando os gráficos de tensão e corrente gerados e os comparando com o ensaio para a frequência de 60 Hz podem ser feitas as mesmas considerações, uma vez que o comportamento foi similar.

### 6.4.2.3 - Frequência 90Hz

Na Tabela 6.9 são apresentados os valores de tensão aplicados ao motor e o valor de corrente medido para o ensaio na frequência de 90Hz.

Tabela 6.9 - Dados para o ensaio para a fundamental e terceiro harmônico na frequência de 90Hz.

	<b>Fase A</b>	<b>Fase B</b>	<b>Fase C</b>
<b>Tensão (Vrms)</b>	127	127	127
<b>Defasagem (Graus)</b>	0°	240,3°	120,5°
<b>Corrente (Irms)</b>	2,34	2,36	2,33
<b>Defasagem (Graus)</b>	71,94°	71,94°	71,94°

Além disso, as Figuras 6.21 e 6.22 apresentam o sinal de corrente e tensão e seu respectivo espectro harmônico, gerados no MATLAB a partir dos dados da aquisição.

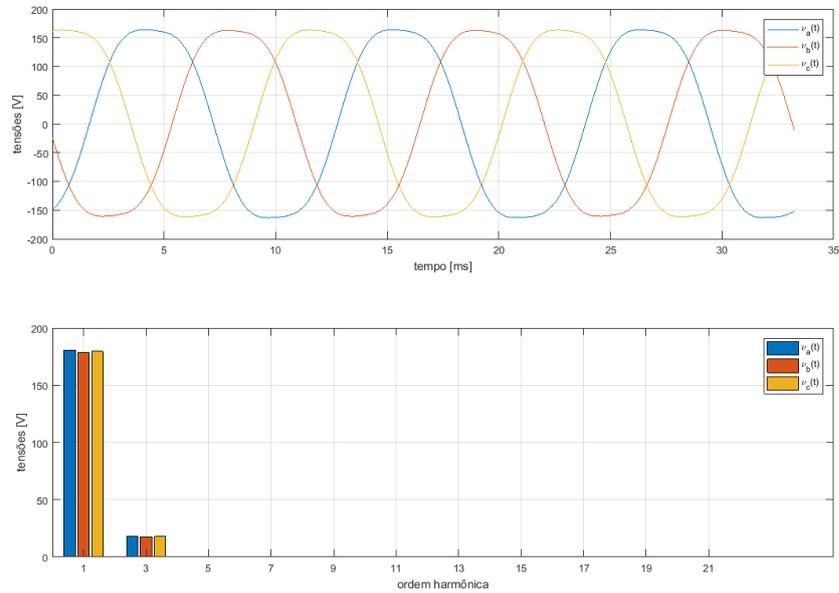


Figura 6.21 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e terceiro harmônico a 90Hz.

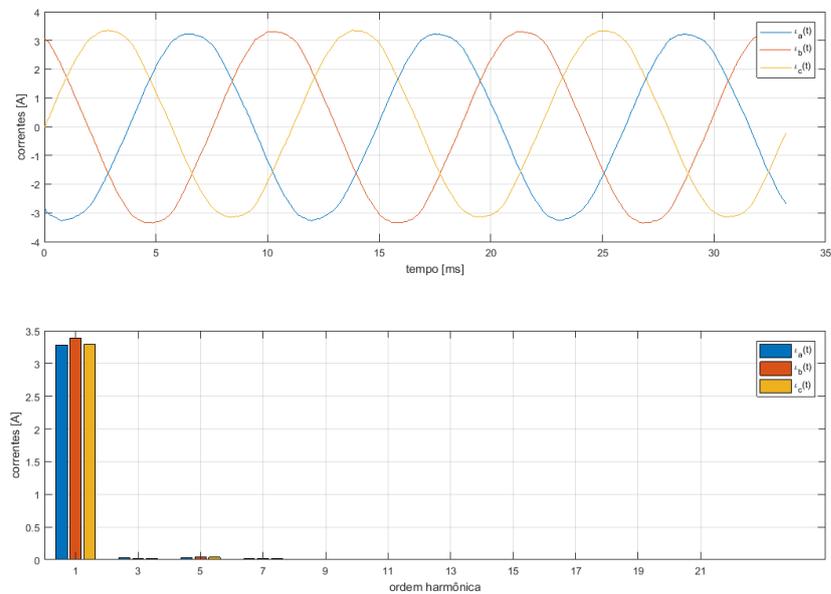


Figura 6.22 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e terceiro harmônico a 90Hz.

O comportamento observado para a tensão e corrente é o mesmo para os ensaios realizados na frequência de 60Hz e 75Hz, e ao observar o espectro harmônico da corrente observa-se que a presença de harmônicos espaciais é quase inexistente.

Na Tabela 6.10 tem-se os parâmetros calculados via MATLAB para o ensaio da frequência fundamental e terceiro harmônico nas frequências de 60 Hz, 75Hz e 90 Hz.

Tabela 6.10 - Parâmetros calculados para o ensaio da Fundamental e Terceiro Harmônico.

Parâmetro	Valor		
	60Hz	75Hz	90Hz
Potência Ativa (W)	246,9507	240,3949	311,9663
Potência Aparente Efetiva (VA)	1636,3796	1073,1512	896,5548
Fator de potência efetivo	0,1509	0,2240	0,3480
Potência Ativa Fundamental (W)	246,9602	240,3955	311,9630
Potência Aparente Efetiva Fundamental (VA)	1631,9655	1070,4590	894,2862
Potência Aparente Fundamental de Desbalanço (VA)	34,7099	21,8545	17,8952
Potência Aparente Efetiva não fundamental (VA)	120,1123	75,9669	63,7394
Potência Aparente Harmônica (VA)	2,3942	0,8057	0,8002
Potência Ativa Não Fundamental (W)	0	0	0,0033
Distorção harmônica efetiva total de tensão	0,0706	0,0701	0,0701
Distorção harmônica efetiva total de corrente	0,0208	0,0107	0,0128
Fator de desbalanço da carga	0,0213	0,0204	0,0200
Fator de desbalanço das tensões para frequência fundamental	0,0058	0,0067	0,0075
Fator de potência fundamental de sequência positiva = Fator de potência de deslocamento	0,1513	0,2245	0,3488
Potência ativa fundamental de sequência positiva (W)	246,8802	240,3060	311,8874
Potência reativa fundamental de sequência positiva (VAr)	1612,8102	1042,9084	837,9462
Potência aparente fundamental de sequência positiva (VA)	1631,5963	1070,2359	894,1072

---

### 6.4.3- Ensaio 3: Fundamental e Quinto Harmônico

Neste ensaio foi simulado a frequência fundamental e 10% de harmônico de 5ª ordem.

As distorções harmônicas de ordem 5 apresentam sequência negativa. O mesmo acontece para todas as harmônicas de ordem  $3n-1$  (sendo  $n=1, 2, 3 \dots$ ). Segundo Deckmann e Pomílio (2017), o fato dessa componente harmônica apresentar sequência negativa indica que sua presença na tensão terá efeito de redução do torque em máquinas que possuem campos girantes, como os motores de indução. Causando os efeitos de vibrações, perdas adicionais, aquecimento e redução do torque médio útil.

#### 6.4.3.1- Frequência 60Hz

Na Tabela 6.11 tem se as medidas das tensões e correntes medidas através da fonte programável.

Tabela 6.11 - Dados para o ensaio para a fundamental e quinto harmônico na frequência de 60Hz.

	<b>Fase A</b>	<b>Fase B</b>	<b>Fase C</b>
<b>Tensão (Vrms)</b>	126,99	127	126,99
<b>Defasagem (Graus)</b>	0°	240,3°	120,5°
<b>Corrente (Irms)</b>	2,58	2,62	2,56
<b>Defasagem (Graus)</b>	81,95°	82,53°	82,53°

Nas Figuras 6.23 e 6.24 tem-se o gráfico de tensão e de corrente, respectivamente, para o ensaio da distorção harmônica de 5ª ordem para a frequência de 60Hz.

Ao observar o gráfico de tensão percebe-se uma distorção bem maior na forma de onda do que se comparar para a distorção harmônica de 3ª ordem. Isso evidencia o fato que as distorções harmônicas de sequência negativa afetam muito mais o sistema elétrico.

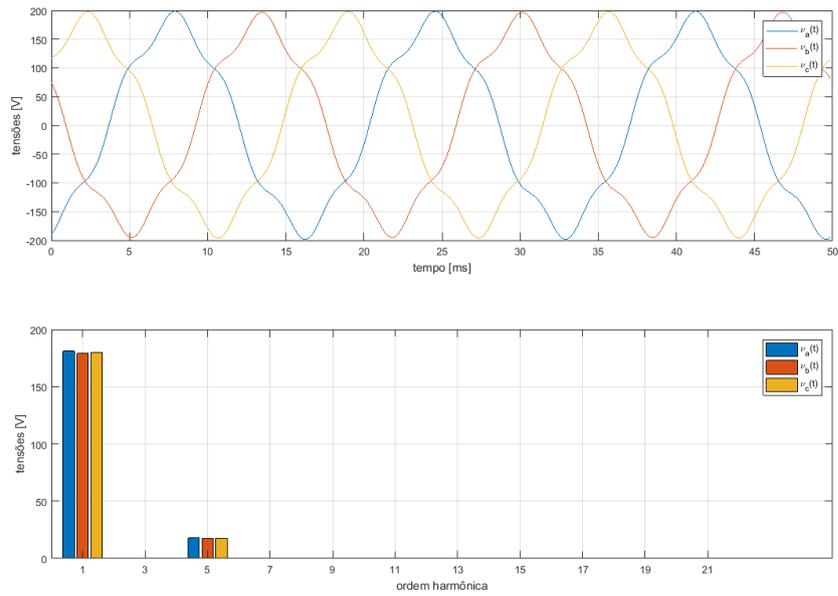


Figura 6.23 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e quinto harmônico a 60Hz.

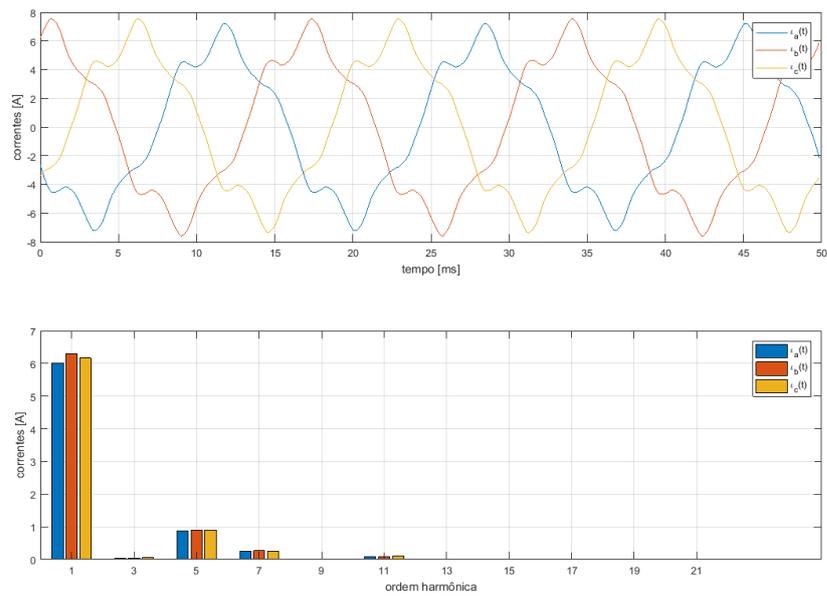


Figura 6.24 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e quinto harmônico a 60Hz.

Ao observar a forma de onda da corrente é constatada uma distorção na forma de onda maior ainda se comparada com a tensão.

Com relação ao espectro harmônico observa-se o surgimento de harmônicas de 7ª e 11ª ordem além do 5º harmônico aplicado, este fato justifica a maior deformação na forma de onda da corrente se comparada com a tensão. Isso se deve a saturação magnética do motor.

### 6.4.3.2 - Frequência 75Hz

Na tabela 6.12 apresenta-se os dados para o ensaio de harmônica de 5ª ordem para a frequência de 75Hz.

Tabela 6.12 - Dados para o ensaio para a fundamental e quinto harmônico na frequência de 75Hz.

	Fase A	Fase B	Fase C
<b>Tensão (Vrms)</b>	127	127	127
<b>Defasagem (Graus)</b>	0°	240,3°	120,5°
<b>Corrente (Irms)</b>	2,8	2,83	2,8
<b>Defasagem (Graus)</b>	77,29°	77,29°	77,88°

Nas figuras seguintes são apresentados os gráficos de tensão e corrente para o ensaio citado.

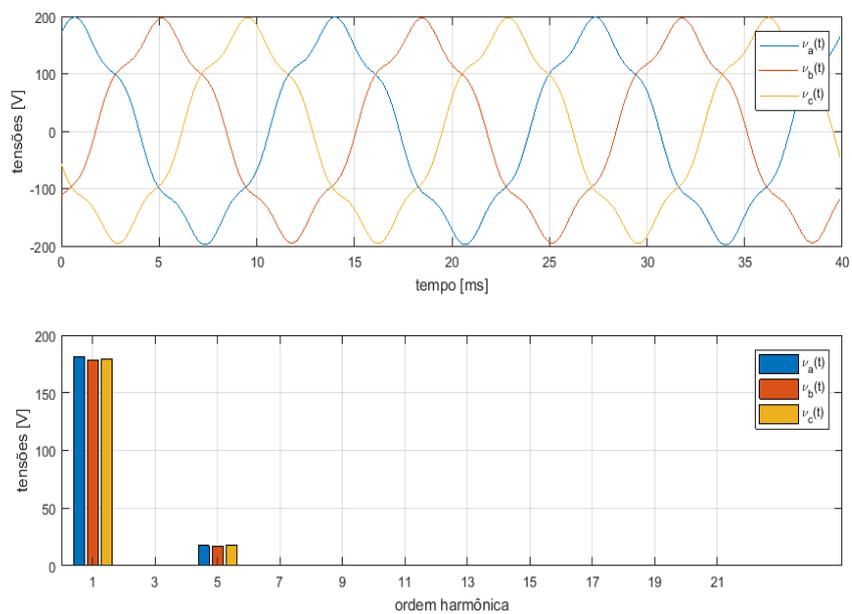


Figura 6.25 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e quinto harmônico a 75Hz.

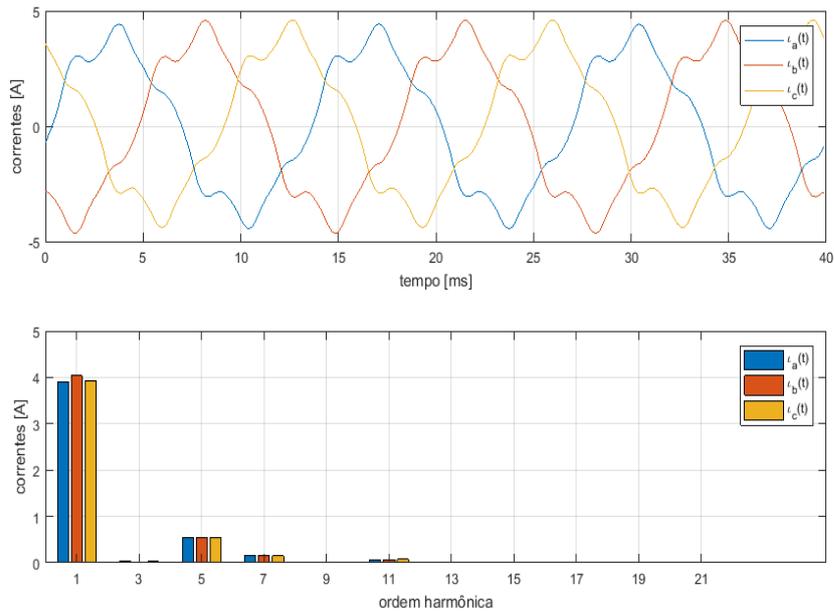


Figura 6.26 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e quinto harmônico a 75Hz.

O comportamento observado através das Figuras é o mesmo para o ensaio de quinto harmônico na frequência de 60Hz.

### 6.4.3.3- Frequência 90Hz

Tem-se na tabela 6.13 os valores de tensão aplicados ao motor de indução trifásico no ensaio de quinto harmônico para 90Hz.

Tabela 6.13 - Dados para o ensaio para a fundamental e quinto harmônico na frequência de 90Hz.

	Fase A	Fase B	Fase C
<b>Tensão (Vrms)</b>	127	127	127
<b>Defasagem (Graus)</b>	0°	240,3°	120,5°
<b>Corrente (Irms)</b>	2,35	2,38	2,35
<b>Defasagem (Graus)</b>	71,94°	71,94°	71,94°

Com base na aquisição de dados feita, obteve-se os seguintes gráficos apresentados nas Figuras 6.27 e 6.28.

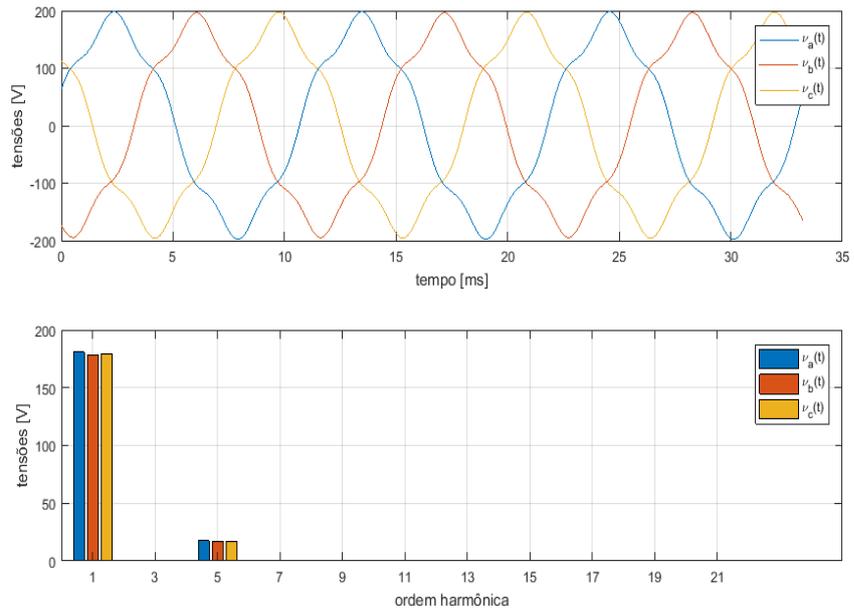


Figura 6.27– Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e quinto harmônico a 90Hz.

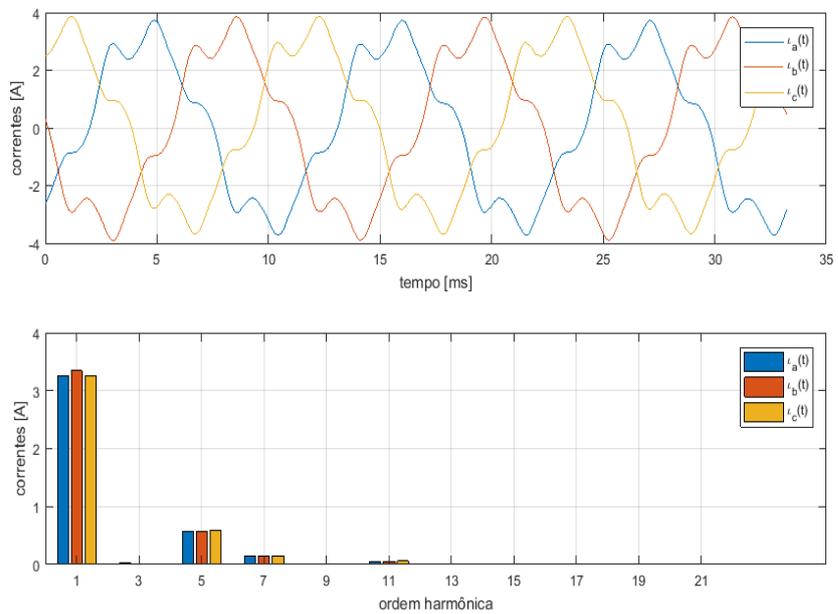


Figura 6.28 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e quinto harmônico a 90Hz.

O comportamento observado através das Figuras é o mesmo para o ensaio de quinto harmônico na frequência de 60Hz.

Tabela 6.14 - Parâmetros calculados para o ensaio da Fundamental e Quinto Harmônico.

Parâmetro	Valor		
	60Hz	75Hz	90Hz
Potência Ativa (W)	246,6234	243,2280	304,2757
Potência Aparente Efetiva (VA)	1689,6201	1083,3445	904,7868
Fator de potência efetivo	0,1460	0,2245	0,3363
Potência Ativa Fundamental (W)	239,5829	238,9511	299,8601
Potência Aparente Efetiva Fundamental (VA)	1662,5364	1067,3436	885,9360
Potência Aparente Fundamental de Desbalanço (VA)	34,5538	19,7724	16,7837
Potência Aparente Efetiva não fundamental (VA)	301,3117	185,5070	183,7296
Potência Aparente Harmônica (VA)	24,7513	14,8347	15,6270
Potência Ativa Não Fundamental (W)	7,0405	4,2769	4,4156
Distorção harmônica efetiva total de tensão	0,0982	0,0967	0,0966
Distorção harmônica efetiva total de corrente	0,1516	0,1438	0,1827
Fator de desbalanço da carga	0,0208	0,0185	0,0189
Fator de desbalanço das tensões para frequência fundamental	0,0059	0,0068	0,0076
Fator de potência fundamental de sequência positiva = Fator de potência de deslocamento	0,1441	0,2238	0,3384
Potência ativa fundamental de sequência positiva (W)	239,5196	238,8759	299,7903
Potência reativa fundamental de sequência positiva (VAr)	1644,8294	1040,0816	833,5027
Potência aparente fundamental de sequência positiva (VA)	1662,1773	1067,1604	885,7770

De acordo com os valores calculados, apresentados na Tabela 6.14, a distorção harmônica de 5<sup>2</sup> ordem provocam grandes distorções harmônicas no sinal de corrente e afetam muito mais a corrente do que o sinal de tensão.

#### 6.4.4- Ensaio 4: Fundamental e Sétimo Harmônico

Neste ensaio foi simulado a frequência fundamental e 10% de harmônico de 7ª ordem. A componente harmônica de ordem 7, assim como as de ordem  $3n-2$ , apresentam sequencia positiva. Apesar de apresentar um torque com mesmo sentido giro da componente fundamental essas componentes provocam vibração, perdas adicionais e aquecimento do motor.

##### 6.4.4.1- Frequência 60Hz

Neste ensaio não foi imposto a condição de desequilíbrio de tensão, somente a distorção harmônica de sétima ordem, conforme se observa na Tabela 6.15.

Tabela 6.15 - Dados para o ensaio para a fundamental e sétimo harmônico na frequência de 60Hz.

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensão (Vrms)	127	127	127
Defasagem (Graus)	0°	240,3°	120,5°
Corrente (Irms)	2,45	2,50	2,44
Defasagem (Graus)	81,95°	82,53°	82,53°

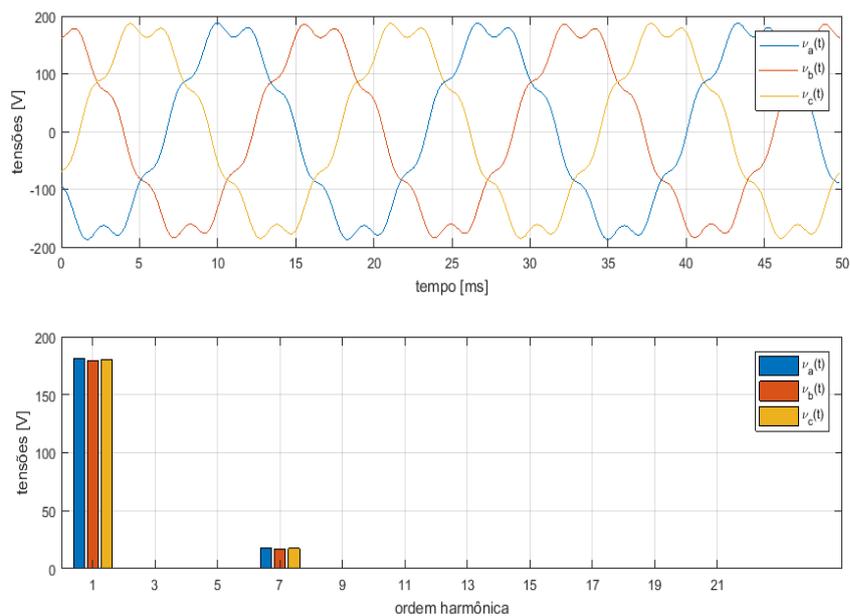


Figura 6.29– Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e sétimo harmônico a 60Hz.

A tensão como simulado apresenta a frequência fundamental e 10% de harmônico de 7ª ordem e essa componente também distorce a forma de onda da tensão.

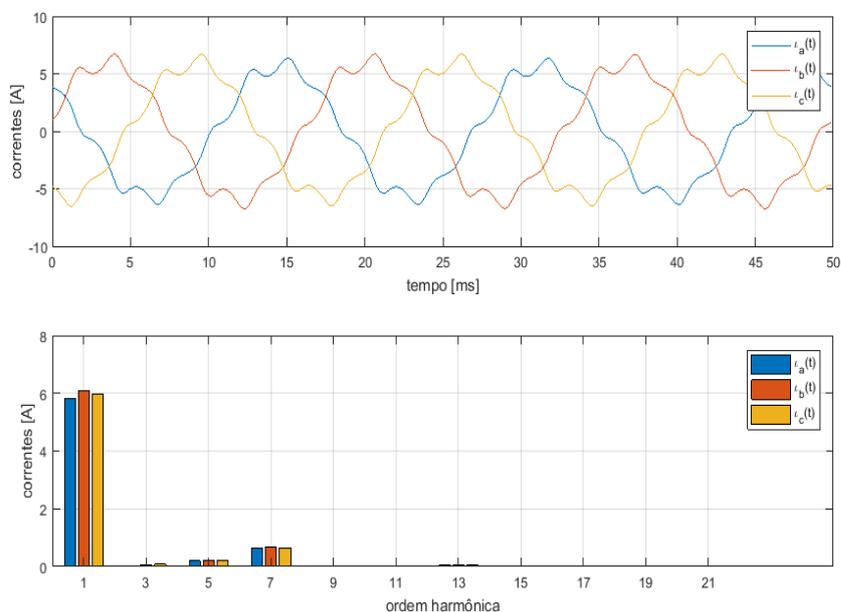


Figura 6.30– Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e sétimo harmônico a 60Hz.

Para a corrente, além da distorção imposta aparecem componentes harmônicas de ordem 3, 5 e 13, apesar de possuírem valores muito pequenos, quase desprezíveis, que também são causadas pela saturação do motor e harmônicos espaciais.

#### 6.4.4.2- Frequência 75Hz

Na tabela 6.16 apresenta-se os dados para o ensaio de sétima harmônica em 75Hz.

Tabela 6.16 - Dados para o ensaio para a fundamental e sétimo harmônico na frequência de 75Hz.

	<b>Fase A</b>	<b>Fase B</b>	<b>Fase C</b>
<b>Tensão (Vrms)</b>	127	127	127
<b>Defasagem (Graus)</b>	0°	240,3°	120,5°
<b>Corrente (Irms)</b>	2,81	2,85	2,81
<b>Defasagem (Graus)</b>	77,29°	77,88°	77,88°

Para a frequência de 75Hz a aquisição de dados resultou nos gráficos apresentados abaixo.

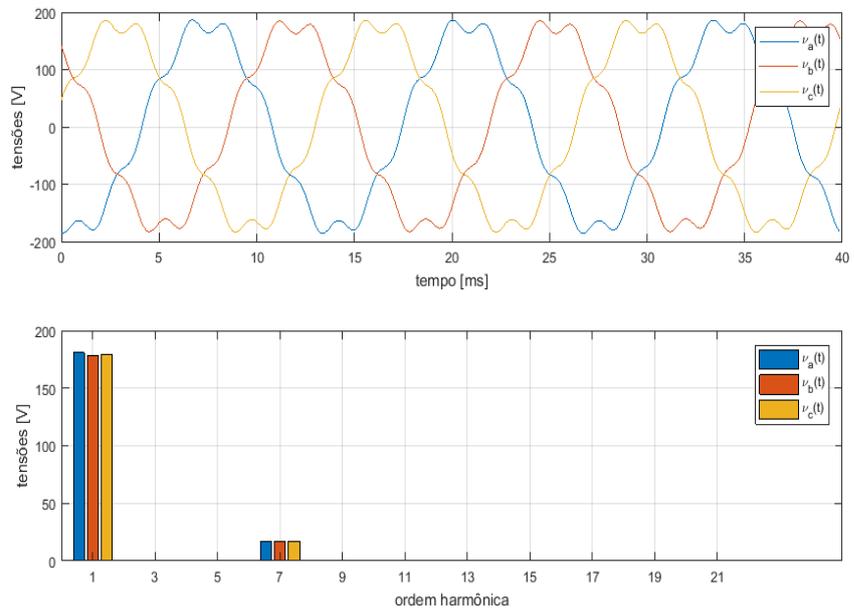


Figura 6.31 - Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e sétimo harmônico a 75Hz.

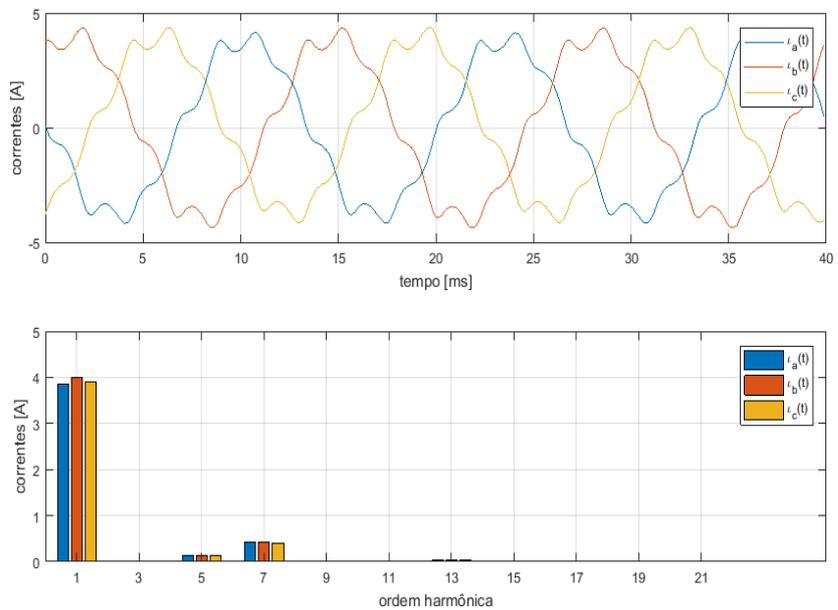


Figura 6.32- Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e sétimo harmônico a 75Hz.

Possuindo comportamento similar ao apresentado para o ensaio na frequência de 60Hz.

### 6.4.4.3 - Frequência 90Hz

A tabela 6.17 demonstra os dados do ensaio com distorção harmônica de sétima ordem para frequência de 90Hz.

Tabela 6.17 - Dados para o ensaio para a fundamental e sétimo harmônico na frequência de 90Hz.

	Fase A	Fase B	Fase C
<b>Tensão (Vrms)</b>	127	127	127
<b>Defasagem (Graus)</b>	0°	240,3°	120,5°
<b>Corrente (Irms)</b>	2,33	2,35	2,32
<b>Defasagem (Graus)</b>	71,94°	71,94°	71,94°

Os gráficos de corrente e tensão gerados para a frequência de 90Hz são apresentados a seguir.

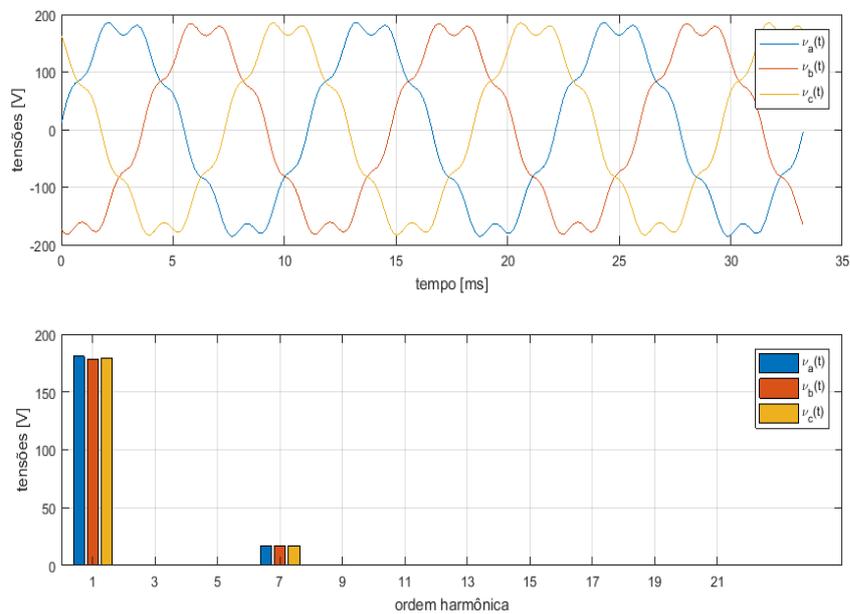


Figura 6.33- Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e sétimo harmônico a 90Hz.

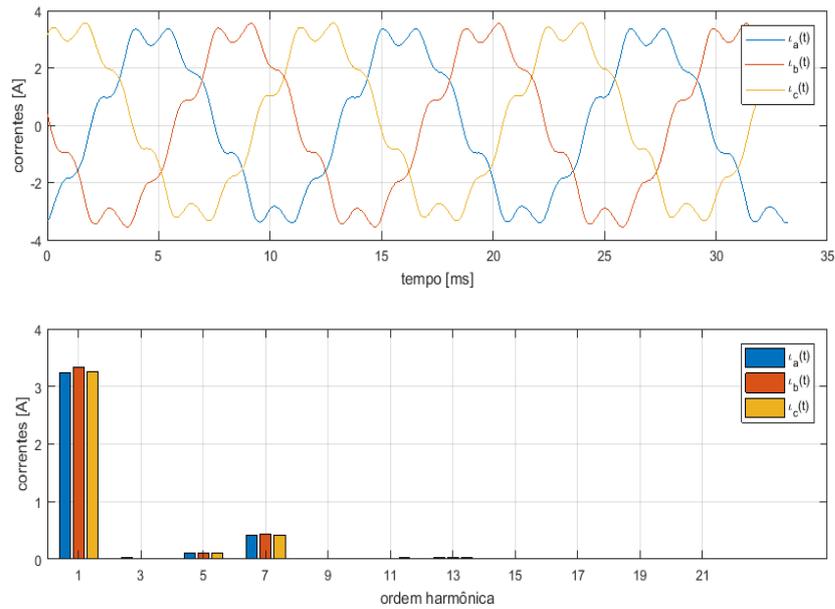


Figura 6.34 - Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e sétimo harmônico a 90Hz.

A mesma avaliação feita para 60Hz e 75Hz é feita para o ensaio a 90Hz.

Na Tabela apresentada abaixo tem-se os parâmetros para as diferentes frequências no ensaio do harmônico de ordem 7.

Tabela 6.18 - Parâmetros calculados para o ensaio da Fundamental e Sétimo Harmônico.

Parâmetro	Valor		
	60Hz	75Hz	90Hz
Potência Ativa (W)	243,8507	240,4645	296,6668
Potência Aparente Efetiva (VA)	1626,4857	1069,2751	895,3827
Fator de potência efetivo	0,1499	0,2249	0,3313
Potência Ativa Fundamental (W)	239,1998	236,9817	293,0406
Potência Aparente Efetiva Fundamental (VA)	1608,1928	1057,8437	883,5671
Potência Aparente Fundamental de Desbalanço (VA)	34,1177	20,8497	17,5161
Potência Aparente Efetiva não fundamental (VA)	243,2519	155,9355	144,9809
Potência Aparente Harmônica (VA)	18,0158	11,2344	11,1132

Potência Ativa Não Fundamental (W)	4,6508	3,4828	3,6262
Distorção harmônica efetiva total de tensão	0,0969	0,0938	0,0939
Distorção harmônica efetiva total de corrente	0,1156	0,1132	0,1340
Fator de desbalanço da carga	0,0212	0,0197	0,0198
Fator de desbalanço das tensões para frequência fundamental	0,0059	0,0068	0,0076
Fator de potência fundamental de sequência positiva = Fator de potência de deslocamento	0,1487	0,2240	0,3316
Potência ativa fundamental de sequência positiva (W)	239,1264	236,9048	292,9653
Potência reativa fundamental de sequência positiva (VAr)	1589,9493	1030,7641	833,3998
Potência aparente fundamental de sequência positiva (VA)	1607,8309	1057,6382	883,3934

Observando os dados calculado conclui-se que a distorção na corrente foi bem maior do que para a tensão, conforme observado também nos gráficos apresentados para as três frequências analisadas.

#### **6.4.5- Ensaio 5: Fundamental e Décimo Primeiro Harmônico**

Neste ensaio foi simulado a frequência fundamental e 10% de distorção harmônica de 11ª ordem. A harmônica de décima primeira ordem é uma das harmônicas de sequência negativa, assim como a 5ª harmônica, apresenta torque de sentido oposto ao gerado pela onda fundamental, tendendo a reduzir a capacidade para acionamento da carga mecânica acoplada ao eixo girante. Sendo entendido pelo motor como um aumento na carga no eixo, um torque resistente, provocando a absorção de parcela adicional de corrente no estator, podendo até mesmo ocasionar a queima do motor caso a condição de carga seja elevada e as proteções de sobrecorrente estejam mal dimensionadas.

### 6.4.5.1- Frequência 60Hz

A 60Hz foi aplicado ao motor os valores de tensão apresentados na Tabela 6.19.

Tabela 6.19 - Dados para o ensaio para a fundamental e décimo primeiro harmônico na frequência de 60Hz.

	Fase A	Fase B	Fase C
<b>Tensão (Vrms)</b>	127	127	127
<b>Defasagem (Graus)</b>	0°	240,3°	120,5°
<b>Corrente (Irms)</b>	2,51	2,56	2,50
<b>Defasagem (Graus)</b>	81,95°	82,53°	82,53°

Conforme pode ser observado na Figura 6.35 o espectro harmônico de tensão aplicado foi o de 11ª ordem e não houve aplicação de desequilíbrio de tensão.

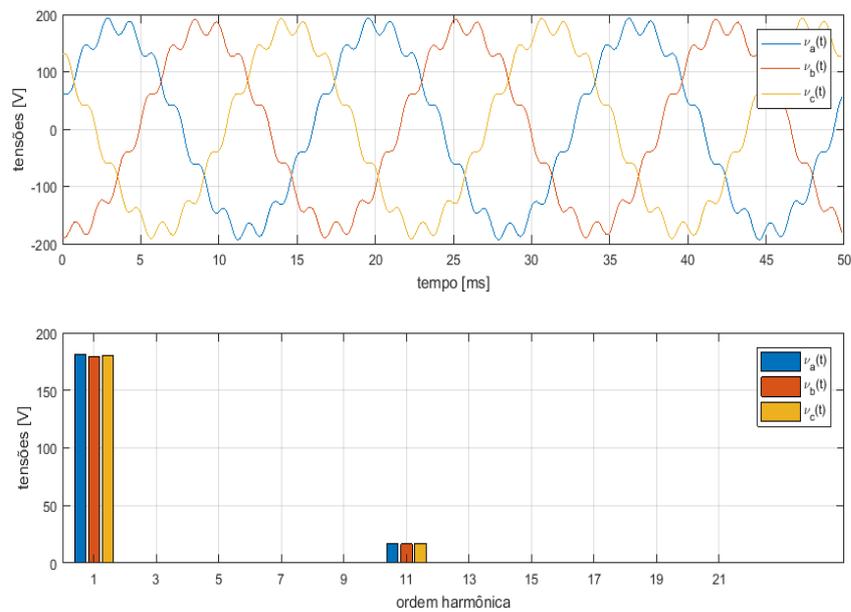


Figura 6.35 - Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e décimo primeiro harmônico a 60Hz.

Com relação a forma de onda da tensão, para este ensaio a distorção foi maior do que para o ensaio de sétimo harmônico anteriormente apresentado.

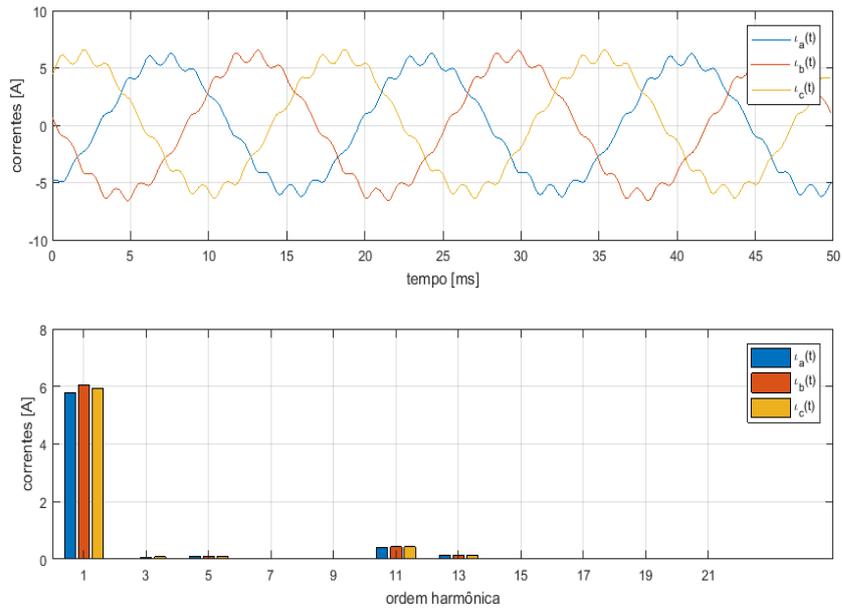


Figura 6.36 - Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e décimo primeiro harmônico a 60Hz.

A corrente apresentou harmônico de valores muito pequenos para a 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> ordem. Salientando, que essas distorções harmônicas são as espaciais advindas da saturação do motor. Porém para a forma de onda da corrente se comparada com a tensão são parecidas, demonstrando que apesar de ser de sequência negativa não afeta tanto a corrente como a harmônica de ordem 5.

#### 6.4.5.2- Frequência 75Hz

Apresenta-se na Tabela 6.20 os dados do ensaio de 11<sup>a</sup> ordem harmônica em 75Hz.

Tabela 6.20 - Dados para o ensaio para a fundamental e décimo primeiro harmônico na frequência de 75Hz.

	<b>Fase A</b>	<b>Fase B</b>	<b>Fase C</b>
<b>Tensão (Vrms)</b>	127	127	127
<b>Defasagem (Graus)</b>	0°	240,3°	120,5°
<b>Corrente (Irms)</b>	2,80	2,84	2,80
<b>Defasagem (Graus)</b>	77,29°	77,29°	77,88°

Nas Figuras 6.37 e 6.38 tem-se respectivamente, a tensão e a corrente provenientes da aquisição de dados para o ensaio da décima primeira harmônica de 75Hz.

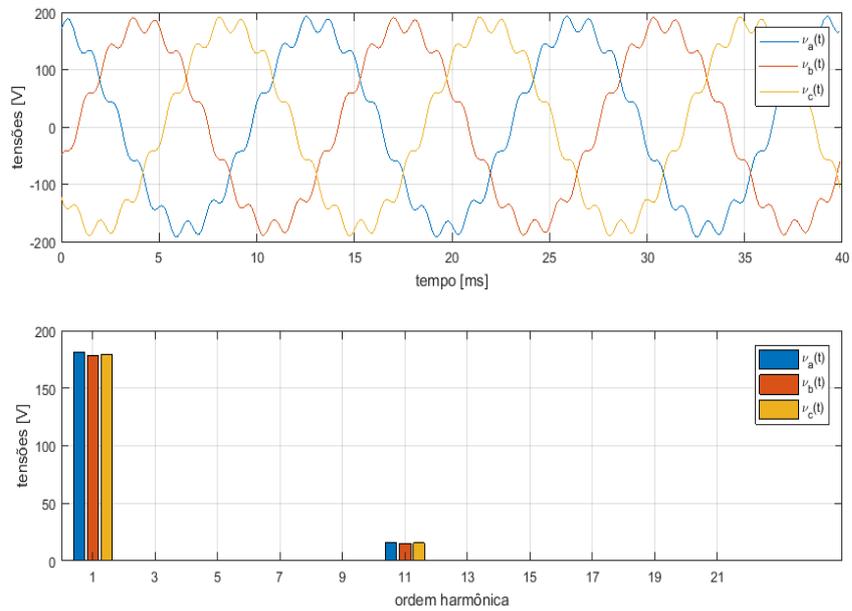


Figura 6.37 - Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e décimo primeiro harmônico a 75Hz.

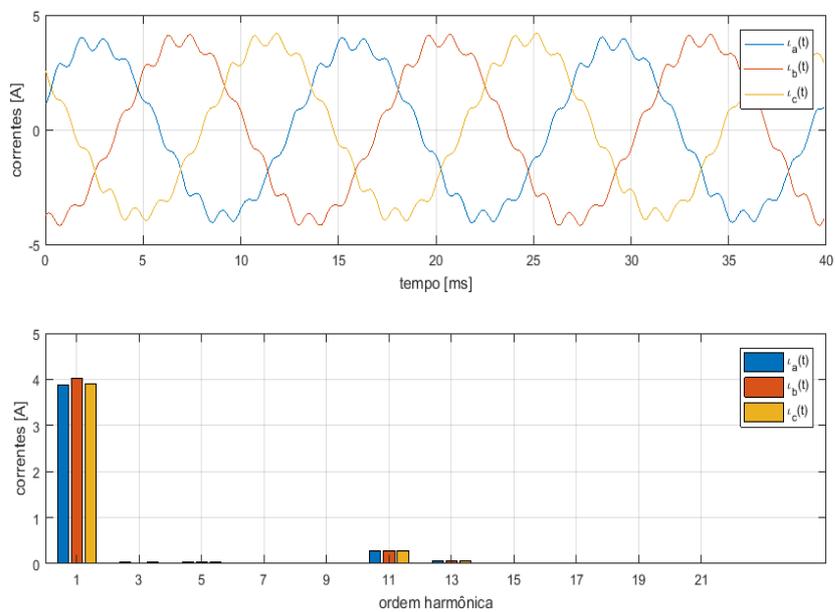


Figura 6.38 - Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e décimo primeiro harmônico a 75Hz.

O comportamento observa de tensão e corrente é similar ao da frequência de 60Hz.

### 6.4.5.3- Frequência 90Hz

A tabela 6.21 se refere aos dados do ensaio para 90Hz.

Tabela 6.21 - Dados para o ensaio para a fundamental e décimo primeiro harmônico na frequência de 90Hz.

	Fase A	Fase B	Fase C
<b>Tensão (Vrms)</b>	127	127	127
<b>Defasagem (Graus)</b>	0°	240,3°	120,5°
<b>Corrente (Irms)</b>	2,32	2,34	2,31
<b>Defasagem (Graus)</b>	71,94°	71,94°	71,94°

Nas figuras tem-se respectivamente, a tensão e a corrente provenientes da aquisição de para o ensaio da decima primeira harmônica em 90Hz.

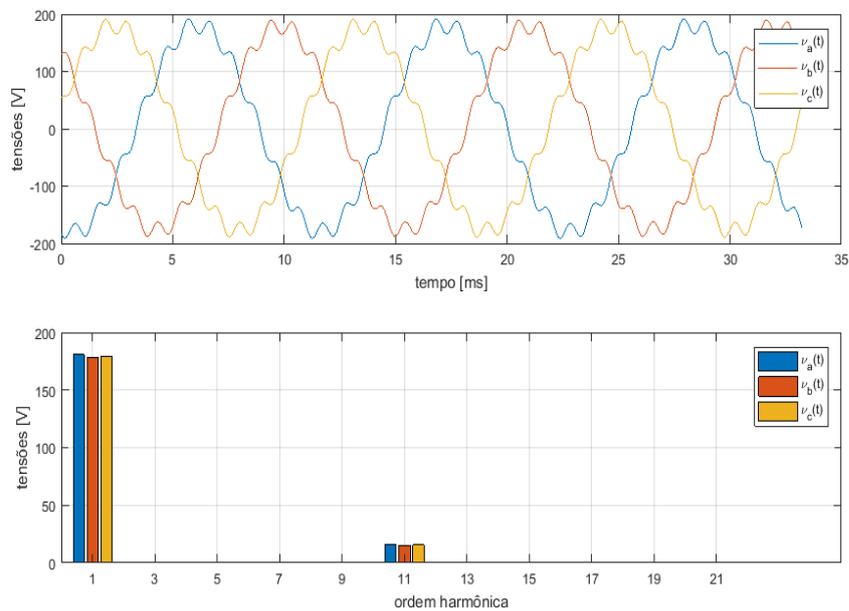


Figura 6.39- Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e décimo primeiro harmônico a 90Hz.

Apresenta o mesmo comportamento para as frequências de 60Hz e 75Hz.

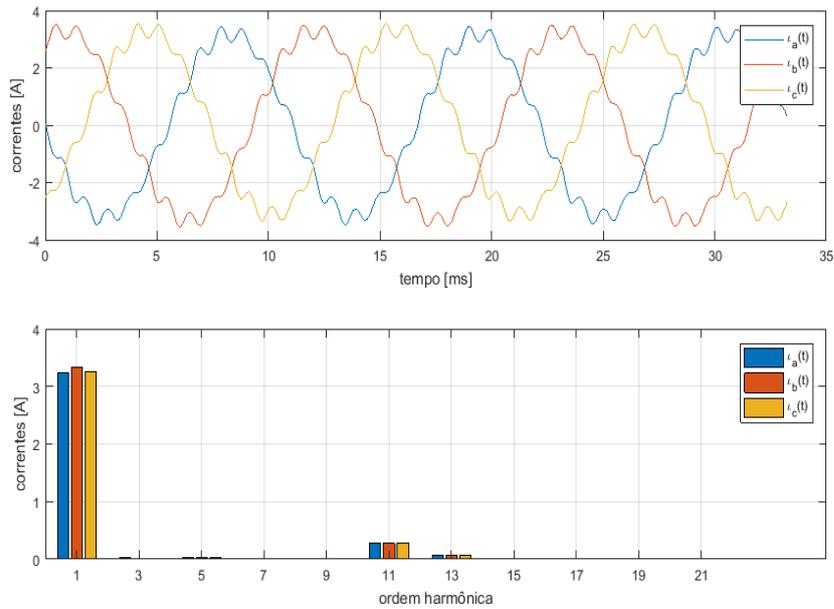


Figura 6.40 - Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e décimo primeiro harmônico a 90Hz.

Tabela 6.22 - Parâmetros calculados para o ensaio da Fundamental e Décimo Primeiro Harmônico.

Parâmetro	Valor		
	60Hz	75Hz	90Hz
Potência Ativa (W)	232,5081	236,6129	296,8117
Potência Aparente Efetiva (VA)	1608,2643	1067,4457	888,6250
Fator de potência efetivo	0,1446	0,2217	0,3340
Potência Ativa Fundamental (W)	228,1196	233,5598	293,6468
Potência Aparente Efetiva Fundamental (VA)	1596,3081	1060,5159	881,8688
Potência Aparente Fundamental de Desbalanço (VA)	33,6612	21,0043	17,4815
Potência Aparente Efetiva não fundamental (VA)	195,7415	121,4344	109,3699
Potência Aparente Harmônica (VA)	11,7942	6,8616	6,7559
Potência Ativa Não Fundamental (W)	4,3885	3,0530	3,1649
Distorção harmônica efetiva total de tensão	0,0934	0,0863	0,0871
Distorção harmônica efetiva total de corrente	0,0791	0,0749	0,0880
Fator de desbalanço da carga	0,0211	0,0198	0,0198

Fator de desbalanço das tensões para frequência fundamental	0,0058	0,0068	0,0075
Fator de potência fundamental de sequência positiva = Fator de potência de deslocamento	0,1429	0,2202	0,3330
Potência ativa fundamental de sequência positiva (W)	228,0504	233,4810	293,5735
Potência reativa fundamental de sequência positiva (VAr)	1579,5757	1034,2821	831,3853
Potência aparente fundamental de sequência positiva (VA)	1595,9531	1060,3079	881,6955

Com relação a distorção harmônica neste caso em específico as distorções de tensão e corrente apresentaram valores próximos, conforme a Tabela 6.22 e para as frequências de 60Hz e 75Hz a distorção de tensão foi pouco maior do que para a corrente.

#### 6.4.6- Ensaio 6: Fundamental e Harmônicos ímpares

Neste ensaio foi aplicado: Fundamental + 3ºharmônico (8%), + 5ºharmônico (5%) + 7ºharmônico (2%) + 11ºharmônico (3%) + 17ºharmônico (1%).

Desse modo foram aplicadas distorções harmônicas de sequência zero: 3º; de sequência positiva: 7º e harmônicos de sequência negativa: 5º, 11º e 17º.

##### 6.4.6.1- Frequência 60Hz

Os dados para o ensaio a 60Hz são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 6.23 - Dados para o ensaio para a fundamental e harmônicos ímpares na frequência de 60Hz.

	Fase A	Fase B	Fase C
<b>Tensão (Vrms)</b>	127	127	127
<b>Defasagem (Graus)</b>	0°	240,3°	120,5°
<b>Corrente (Irms)</b>	2,56	2,60	2,54
<b>Defasagem (Graus)</b>	81,37°	82,53°	82,53°

Nas Figuras 6.41 e 6.42 é possível observar os gráficos de tensão e corrente, respectivamente, para o ensaio de harmônicas ímpares em 60Hz.

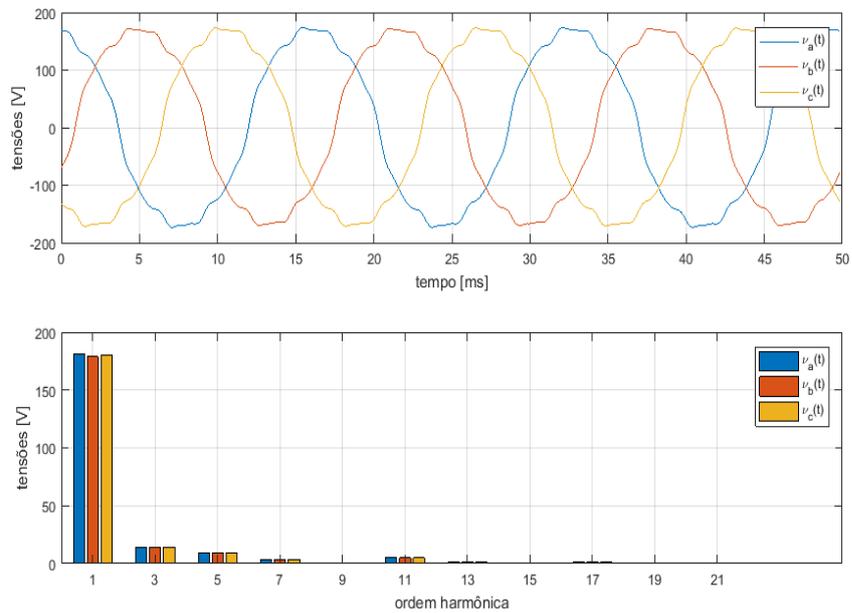


Figura 6.41 - Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e harmônicos ímpares a 60Hz.

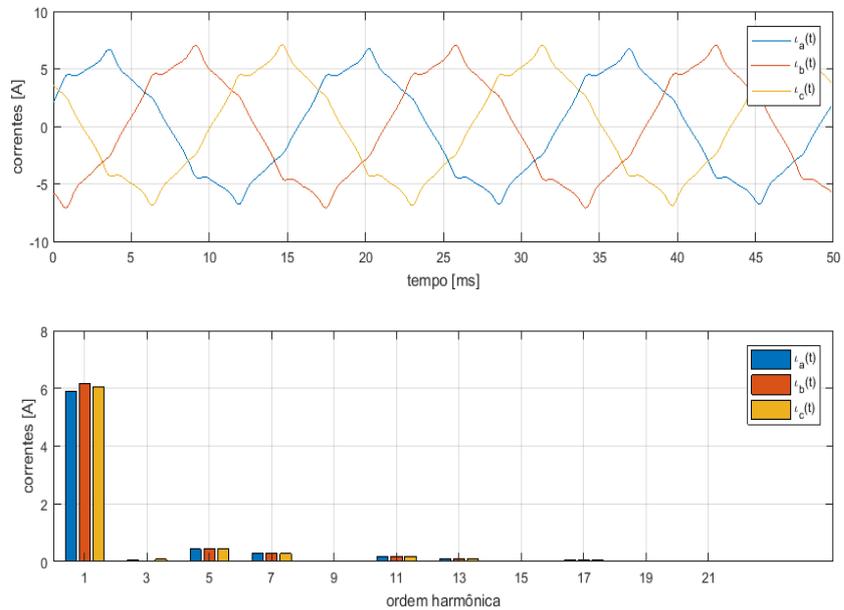


Figura 6.42 - Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e harmônicos ímpares a 60Hz.

A distorção na forma de onda de corrente é maior do que a distorção na forma de onda da tensão.

### 6.4.6.2- Frequência 75Hz

A tabela a seguir apresenta os dados utilizados neste ensaio.

Tabela 6.24 - Dados para o ensaio para a fundamental e harmônicos ímpares na frequência de 75Hz.

	Fase A	Fase B	Fase C
<b>Tensão (Vrms)</b>	127	127	127
<b>Defasagem (Graus)</b>	0°	240,3°	120,5°
<b>Corrente (Irms)</b>	2,83	2,87	2,83
<b>Defasagem (Graus)</b>	77,29°	77,88°	77,88°

Nas figuras tem-se respectivamente, a tensão e corrente provenientes da aquisição de dados para o ensaio da fundamental na frequência de 75Hz.

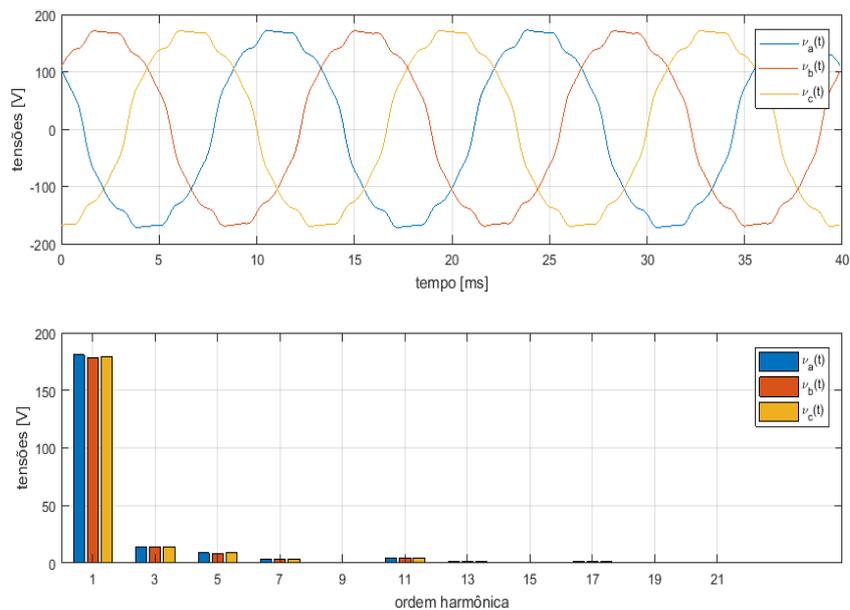


Figura 6.43 - Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e harmônicos ímpares a 75Hz.

O comportamento da tensão foi o mesmo observado para a frequência a 60Hz. Para a corrente, apresentada na Figura 6.44, tem-se uma distorção maior do que a distorção da forma de onda da tensão.

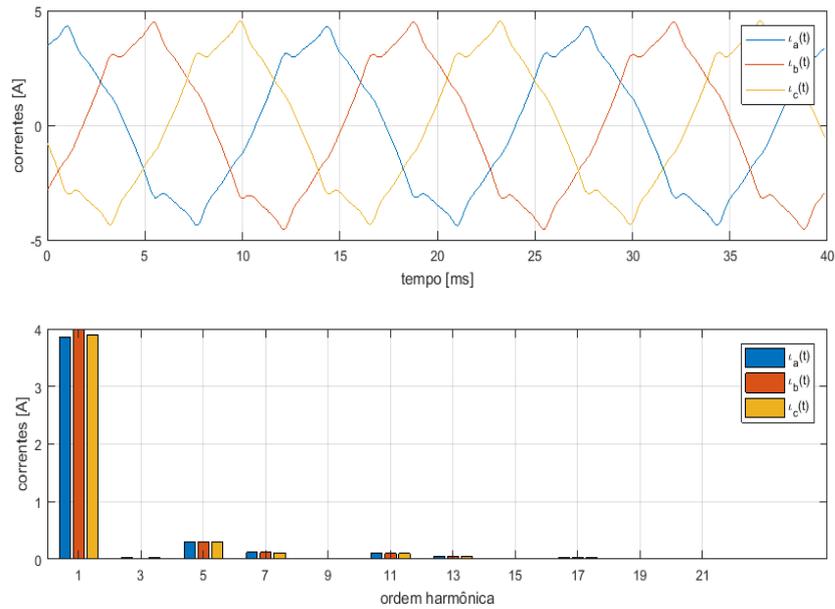


Figura 6.44 - Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e harmônicos ímpares a 75Hz.

### 6.4.6.3- Frequência 90Hz

Os dados para o ensaio de harmônicas ímpares em 90Hz são observados na Tabela 6.25.

Tabela 6.25 - Dados para o ensaio para a fundamental e harmônicos ímpares na frequência de 90Hz.

	<b>Fase A</b>	<b>Fase B</b>	<b>Fase C</b>
<b>Tensão (Vrms)</b>	127	127	127
<b>Defasagem (Graus)</b>	0°	240,3°	120,5°
<b>Corrente (Irms)</b>	2,31	2,33	2,30
<b>Defasagem (Graus)</b>	71,94°	71,94°	71,94°

Nas Figuras 6.45 e 6.46 apresenta-se os gráficos de tensão e corrente que foram extraídos via MATLAB com base nos dados da aquisição.

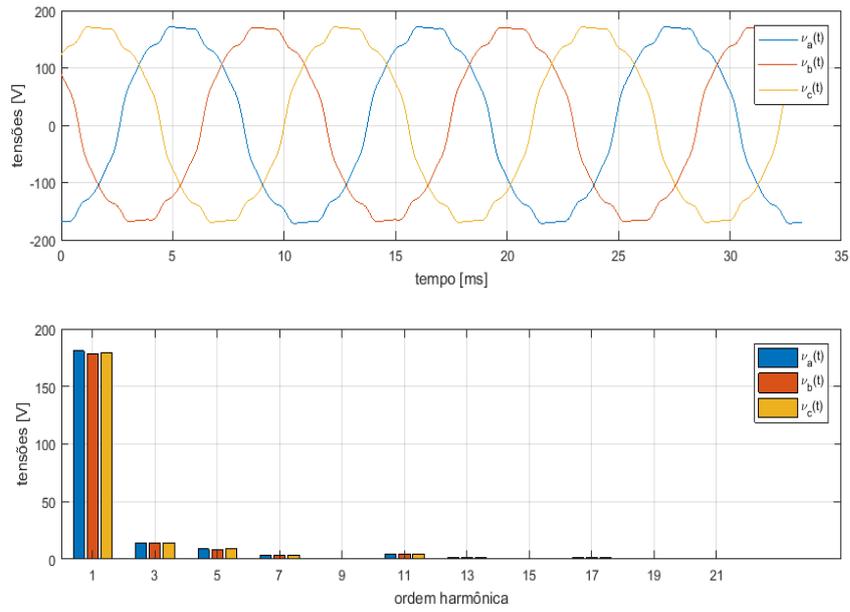


Figura 6.45 - Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e harmônicos ímpares a 90Hz.

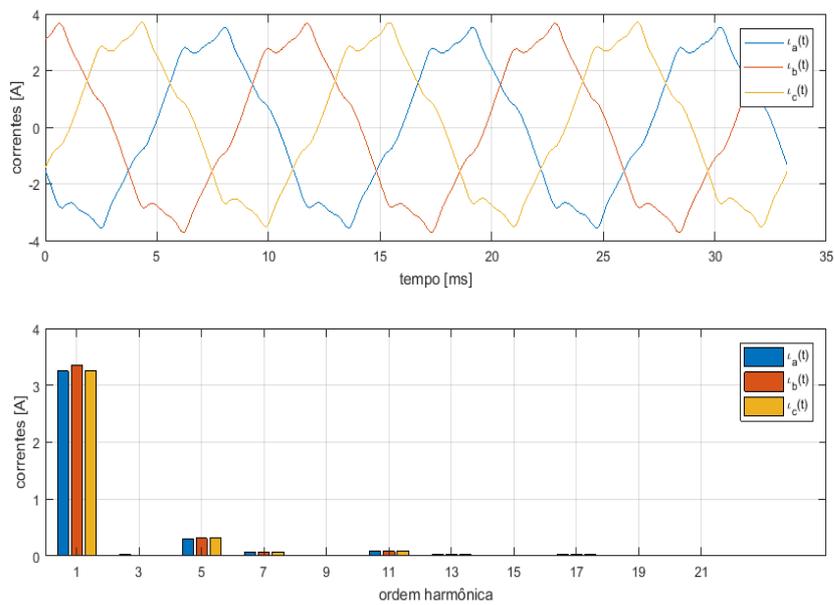


Figura 6.46 - Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio fundamental e harmônicos ímpares a 90Hz.

Em 90 Hz se observa o mesmo comportamento de tensão e corrente já apresentado no ensaio a 60Hz.

Na Tabela 6.26 apresenta-se os parâmetros calculados para o ensaio de harmônicas ímpares.

Tabela 6.26 - Parâmetros calculados para o ensaio da Fundamental e Harmônicos Ímpares

Parâmetro	Valor		
	60Hz	75Hz	90Hz
Potência Ativa (W)	236,1677	236,7625	304,2147
Potência Aparente Efetiva (VA)	1638,8289	1063,1218	892,5619
Fator de potência efetivo	0,1441	0,2227	0,3408
Potência Ativa Fundamental (W)	233,4855	235,4588	302,7704
Potência Aparente Efetiva Fundamental (VA)	1626,1682	1055,7237	885,0583
Potência Aparente Fundamental de Desbalanço (VA)	34,2050	20,6248	17,3143
Potência Aparente Efetiva não fundamental (VA)	203,3158	125,2019	115,4926
Potência Aparente Harmônica (VA)	12,5843	7,3882	7,3295
Potência Ativa Não Fundamental (W)	2,6822	1,3037	1,4443
Distorção harmônica efetiva total de tensão	0,0832	0,0815	0,0816
Distorção harmônica efetiva total de corrente	0,0930	0,0859	0,1015
Fator de desbalanço da carga	0,0210	0,0195	0,0196
Fator de desbalanço das tensões para frequência fundamental	0,0057	0,0068	0,0076
Fator de potência fundamental de sequência positiva = Fator de potência de deslocamento	0,1436	0,2230	0,3421
Potência ativa fundamental de sequência positiva (W)	233,4138	235,3785	302,6997
Potência reativa fundamental de sequência positiva (VAr)	1608,9658	1028,9432	831,5055
Potência aparente fundamental de sequência positiva (VA)	1625,8084	1055,5222	884,8889

Através dos dados da Tabela 6.26 sabe-se que a distorção harmônica de corrente para este ensaio é maior do que a distorção harmônica de tensão.

### 6.4.7- Ensaio 7: Desequilíbrio de Amplitude a 60Hz

Neste ensaio foi simulado um desequilíbrio na amplitude das fases das tensões na frequência de 60Hz com as seguintes especificações: 130V na fase A, 135V na fase B e 125V na fase C, como apresentado na Figura 6.47, que mostra a condição imposta pela fonte programável. Esses valores foram estipulados para estar dentro da norma da ANEEL que propõe para a tensão nominal menor que 1kV um valor de desequilíbrio de até 3%.

A alimentação com desequilíbrio de amplitude foi feita de forma progressiva, iniciando em 60V em todas as fases e posteriormente chegando no valor do desequilíbrio, o qual foi imposto no motor durante um período de 300s.

Type	Time (sec)	Delay Time(sec)	Frequency	VoltageA	Func A	VoltageB	Func B	VoltageC
Voltage Sweep	0.01	0.01	60	60	SINE	60	SINE	60
Voltage Sweep	0.01	0.01	70	70	SINE	70	SINE	70
Voltage Sweep	0.01	0.01	80	80	SINE	80	SINE	80
Voltage Sweep	0.01	0.01	90	90	SINE	90	SINE	90
Voltage Sweep	0.01	0.01	100	100	SINE	100	SINE	100
Voltage Sweep	0.01	20	110	110	SINE	110	SINE	110
Voltage Sweep	0.01	0.01	120	120	SINE	120	SINE	120
Voltage Sweep	0.01	120	127	127	SINE	127	SINE	127
Voltage Sweep	0.01	300	130	135	SINE	135	SINE	125

Figura 6.47– Tela do *software* da fonte programável para tensões de alimentação do motor com desequilíbrio de amplitude.

Como visto no capítulo 4, o desequilíbrio de tensão cria um fluxo de correntes excessivas em uma ou mais fases do motor aumentando sua temperatura de operação e quebrando a isolação. Resultando assim na perda da eficiência do motor e conseqüente redução da vida útil.

Na Tabela 6.27 é apresentado os valores de desequilíbrio na amplitude aplicados nas fases de alimentação do motor e os valores de corrente aferidos provenientes dessa alimentação desequilibrada.

Tabela 6.27 - Dados para o ensaio de desequilíbrio de amplitude.

	Fase A	Fase B	Fase C
<b>Tensão (Vrms)</b>	130	135	125
<b>Defasagem (Graus)</b>	0°	240,3°	120,5°
<b>Corrente (Irms)</b>	2,65	3,13	2,38
<b>Defasagem (Graus)</b>	73,14°	84,84°	89,43°

Observa-se que a aplicação do desequilíbrio na fase causa uma variação nos valores de amplitude de corrente, aumentando especialmente o valor da corrente na Fase B do motor.

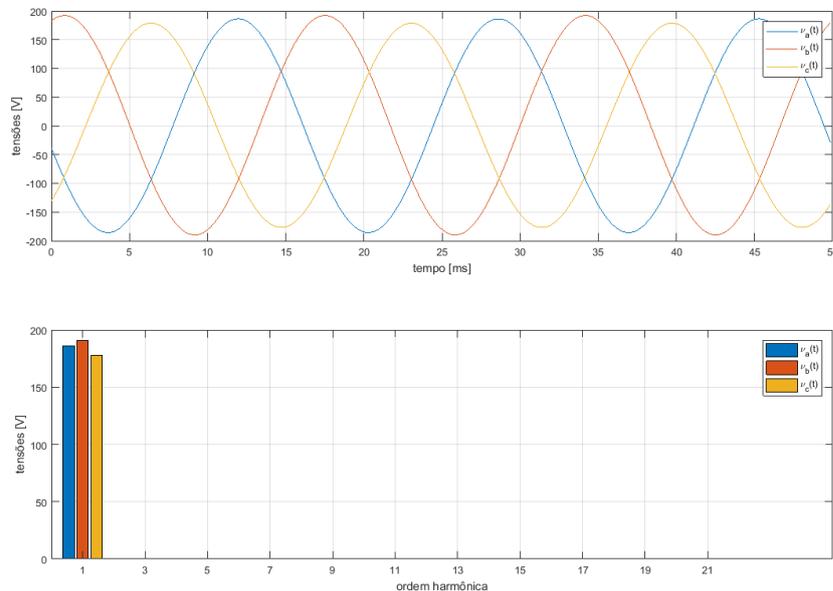


Figura 6.48 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio de desequilíbrio de amplitude.

Analisando o espectro de harmônicos da tensão deste ensaio, observa-se que o desequilíbrio de amplitude não causou o aparecimento de harmônicos nas tensões medidas no motor. Observando as formas de onda é possível ver a diferença nos valores de pico entre as fases.

Já observando a corrente no motor, apresentada na figura a seguir, percebe-se que o desequilíbrio na amplitude acarretou um desequilíbrio e distorção nas correntes das três fases, surgiram ainda pequenas distorções harmônicas espaciais de 3ª e 5ª ordem. Além disso, a fase B, conforme os valores da Tabela 6.27 possui uma amplitude maior que as demais fases.

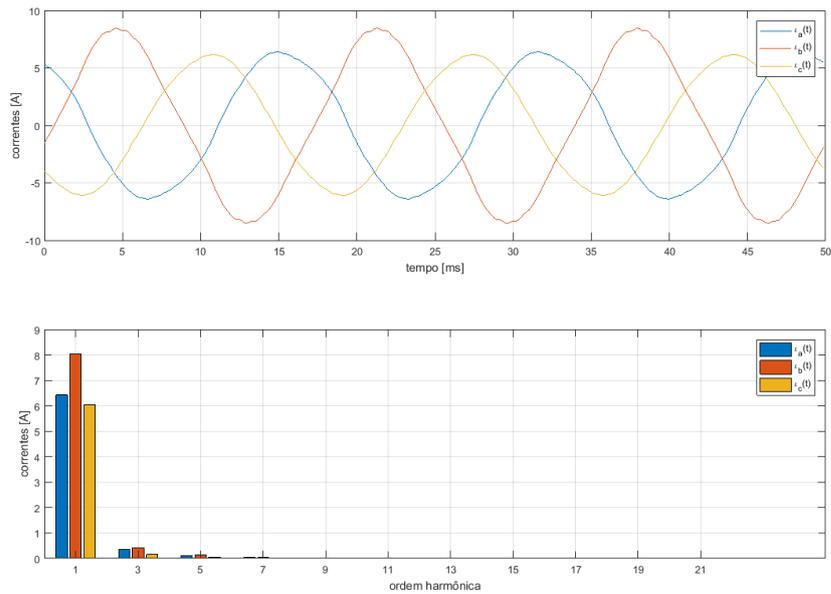


Figura 6.49 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio de desequilíbrio de amplitude.

Na Tabela 6.28 é apresentado os parâmetros calculados para o ensaio do desequilíbrio de amplitude.

Tabela 6.28 - Parâmetros calculados para o ensaio de desequilíbrio de amplitude a 60Hz.

Parâmetro	Valor
Potência Ativa (W)	261,7087
Potência Aparente Efetiva (VA)	1914,3679
Fator de potência efetivo	0,1367
Potência Ativa Fundamental (W)	261,7351
Potência Aparente Efetiva Fundamental (VA)	1911,9256
Potência Aparente Fundamental de Desbalanço (VA)	339,7904
Potência Aparente Efetiva não fundamental (VA)	96,6696
Potência Aparente Harmônica (VA)	0,0398
Potência Ativa Não Fundamental (W)	0
Distorção harmônica efetiva total de tensão	0,0004
Distorção harmônica efetiva total de corrente	0,0506
Fator de desbalanço da carga	0,1806
Fator de desbalanço das tensões para frequência fundamental	0,0210

Fator de potência fundamental de sequência positiva = Fator de potência de deslocamento	0,1369
Potência ativa fundamental de sequência positiva (W)	257,5914
Potência reativa fundamental de sequência positiva (VAr)	1863,7727
Potência aparente fundamental de sequência positiva (VA)	1881,4893

De acordo com a tabela apresentada a distorção harmônica de tensão foi quase desprezível, ao contrário do valor da distorção harmônica de corrente. Assim sendo, conclui-se que o desequilíbrio na amplitude do ensaio em questão quase não causa distorções de tensão, porém causa distorções na corrente e apresenta um valor considerável de desbalanço de tensão, na ordem de 2,10%.

#### 6.4.8- Ensaio 8: Desequilíbrio de Fase a 60Hz

Neste ensaio foi simulado um desequilíbrio nos ângulos das tensões na frequência de 60Hz, conforme pode ser observado na Figura 6.50, que apresenta a tela de simulação da fonte programável, os ângulos utilizados neste ensaio foram de 0° para a fase A, 237° para a fase B e 124° para a fase C.

The screenshot shows the configuration interface for a programmable power source. The settings are as follows:

- FREQUENCY (HZ):** 60,00
- SELECT PHASE(S) TO PROGRAM VOLT/CURR:** All three phases (ØA, ØB, ØC) are selected.
- AMPLITUDE (V):** 127,00
- CURRENT LIMIT (A):** 16,080
- PHASE ANGLE:**
  - ØA: 0,00
  - ØB: 237,00
  - ØC: 124,00
- WAVEFORMS:** All three phases (ØA, ØB, ØC) are set to SINE.
- CLIP LEVEL:** All three phases (ØA, ØB, ØC) are set to 0.

Figura 6.50 – Tela do *software* da fonte programável que apresenta os valores aplicados ao MIT de desequilíbrio angular.

A Tabela 6.29 demonstra os dados do ensaio do desequilíbrio angular na frequência de 60Hz.

Tabela 6.29 - Dados para o ensaio de desequilíbrio angular.

	Fase A	Fase B	Fase C
<b>Tensão (Vrms)</b>	127	127	127
<b>Defasagem (Graus)</b>	0°	237,1°	124,3°
<b>Corrente (Irms)</b>	3,09	2,36	2,21
<b>Defasagem (Graus)</b>	80,21°	88,28°	73,74°

Conforme demonstrado na Tabela 6.29 o desequilíbrio nos ângulos das tensões provoca uma variação no valor da corrente, especialmente a corrente da Fase A.

Nas Figuras 6.51 e 6.52 observa-se os sinais de correntes e tensões e seu respectivo harmônico, provenientes da aquisição de dados para o ensaio de desequilíbrio angular.

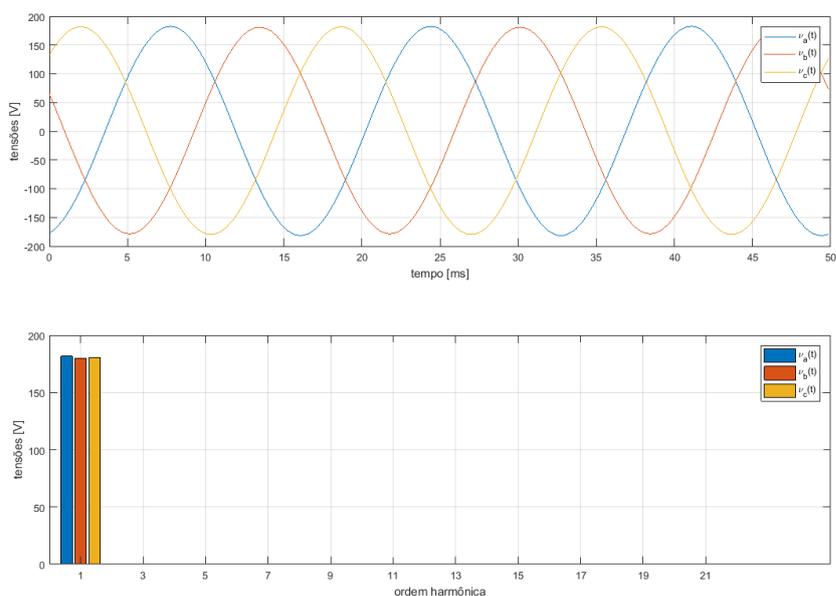


Figura 6.51 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para o ensaio de desequilíbrio angular.

Ao analisar o gráfico de tensões para o desequilíbrio angular, quase não é observada alteração na forma de onda, uma vez que a alteração do desequilíbrio do ângulo foi pequena, possuindo assim praticamente, uma forma de onda senoidal equilibrada.

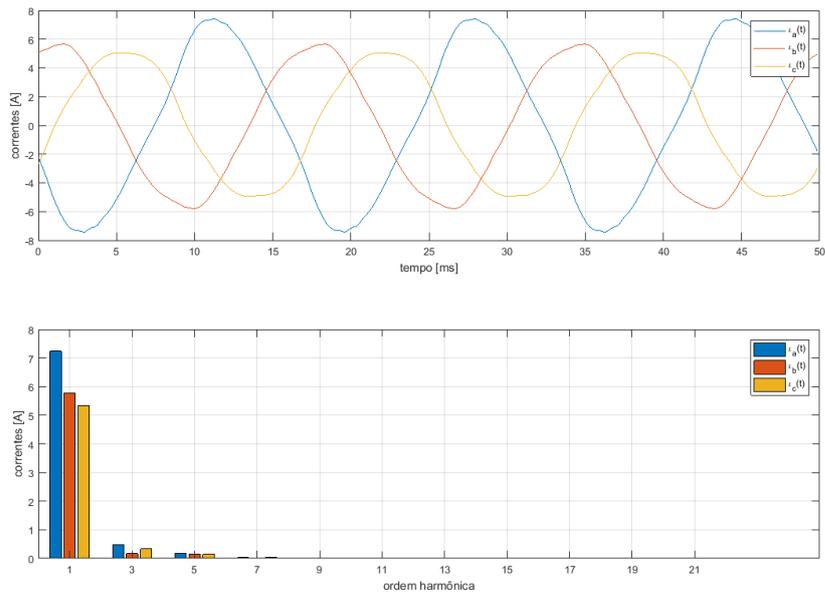


Figura 6.52 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para o ensaio de desequilíbrio angular.

Ao analisar as formas de onda da corrente, percebe-se uma grande alteração na forma de onda, com relação ao formato senoidal e uma amplitude de corrente maior na fase A. Para o espectro harmônico ocorreu surgimento de harmônicos de ordem 3 e ordem 5 devido a saturação do motor.

Na Tabela 6.30 tem-se os parâmetros calculados para o ensaio em questão através do MATLAB.

Tabela 6.30 - Parâmetros calculados para o ensaio de desequilíbrio de fase a 60Hz.

Parâmetro	Valor
Potência Ativa (W)	237,9019
Potência Aparente Efetiva (VA)	1676,0212
Fator de potência efetivo	0,1419
Potência Ativa Fundamental (W)	237,9372
Potência Aparente Efetiva Fundamental (VA)	1672,7940
Potência Aparente Fundamental de Desbalanço (VA)	364,8019
Potência Aparente Efetiva não fundamental (VA)	103,9583
Potência Aparente Harmônica (VA)	0,0502
Potência Ativa Não Fundamental (W)	0

Distorção harmônica efetiva total de tensão	0,0005
Distorção harmônica efetiva total de corrente	0,0621
Fator de desbalanço da carga	0,2235
Fator de desbalanço das tensões para frequência fundamental	0,0415
Fator de potência fundamental de sequência positiva = Fator de potência de deslocamento	0,1422
Potência ativa fundamental de sequência positiva (W)	232,1419
Potência reativa fundamental de sequência positiva (VAr)	1615,9423
Potência aparente fundamental de sequência positiva (VA)	1632,5316

O desequilíbrio angular apresentado afeta muito mais a corrente do que a tensão e conforme a Tabela 6.30 demonstra, a distorção de corrente tem valor muitas vezes superior do que a distorção na tensão. Com relação ao desbalanço de tensão apresenta o fator de 4,15%, valor que supera o permitido pela norma da qualidade de energia.

#### 6.4.9 – Análise Comparativas dos Parâmetros Calculados Para os Ensaio

Com o intuito de analisar o comportamento das tensões e correntes no motor diante da aplicação de tensões desequilibradas ou distorcidas na alimentação são apresentadas as tabelas 6.31, 6.32 e 6.33, que demonstram o comparativo dos parâmetros calculados para os ensaios realizados.

##### 6.4.9.1 – Análise dos ensaios para a frequência de 60Hz

Tabela 6.31 – Tabela dos parâmetros calculados para os ensaios a 60Hz.

Parâmetro	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6	Ensaio 7	Ensaio 8
Potência Ativa	231,63	246,95	246,62	243,85	232,51	236,17	261,71	237,90
Potência Aparente Efetiva	1623,87	1636,38	1689,62	1626,49	1608,26	1638,83	1914,37	1676,02
Fator de potência efetivo	0,14	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14
Potência Ativa Fundamental	231,63	246,96	239,58	239,20	228,12	233,49	261,74	237,94
Potência Aparente Efetiva Fundamental	1623,54	1631,97	1662,54	1608,19	1596,31	1626,17	1911,93	1672,79

Potência Fundamental de Desbalanço	Aparente de	35,66	34,71	34,55	34,12	33,66	34,21	339,79	364,80
Potência Não-Fundamental	Aparente Efetiva	33,10	120,11	301,31	243,25	195,74	203,32	96,67	103,96
Potência Harmônica	Aparente	0,0076	2,39	24,75	18,02	11,79	12,58	0,0398	0,0502
Potência Fundamental	Ativa não	0	0	7,04	4,65	4,39	2,68	0	0
Distorção efetiva total de tensão	harmônica	0,02%	7,06%	9,82%	9,69%	9,34%	8,32%	0,04%	0,05%
Distorção efetiva total de corrente	harmônica	2,04%	2,08%	15,16%	11,56%	7,91%	9,30%	5,06%	6,21%
Fator de desbalanço da carga		2,20%	2,13%	2,08%	2,12%	2,11%	2,10%	18,06%	22,35%
Fator de desbalanço das tensões para a frequência fundamental		0,58%	0,58%	0,59%	0,59%	0,58%	0,57%	2,10%	4,15%
Fator de potência fundamental de sequencia positiva		0,14	0,15	0,14	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14
Potência ativa fundamental de sequencia positiva		231,55	246,88	239,52	239,13	228,05	233,41	257,59	232,14
Potência fundamental de sequencia positiva	reativa	1606,54	1612,81	1644,83	1589,95	1579,58	1608,97	1863,77	1615,94
Potência fundamental de sequencia positiva	aparente	1623,14	1631,60	1662,18	1607,83	1595,95	1625,81	1881,49	1632,53

No ensaio da fundamental observa-se a presença de pequenos valores de distorções harmônicas e desbalanço de tensão devido a saturação do motor, como já mencionado anteriormente, o que acarreta a presença de harmônicos espaciais.

Para a frequência de 60 Hz, com relação a Potência Aparente Fundamental de desbalanço conclui-se que para os ensaios onde foram aplicadas distorções harmônicas apresentou valores quase constantes e pequenos, porém para os ensaios de desequilíbrio de tensão, ensaios 6 e ensaio 7, apresentou um valor dez vezes maior.

A Potência Aparente Efetiva não Fundamental representa a poluição harmônica do sinal e como é de se esperar os ensaios de distorções harmônicas, ensaios 2 a 6, apresentaram os maiores valores para esse parâmetro, salientando que o maior valor foi encontrado para a harmônica de 5ª ordem, seguido da harmônica de 7ª ordem.

Com relação a Potência Ativa não fundamental, que é atribuída as distorções harmônicas e inter-harmônicas, o maior valor encontrado também foi para o ensaio da distorção harmônica de ordem 5.

Se tratando das distorções harmônicas de tensão todos os ensaios apresentaram os valores dentro do limite permitido pela norma da qualidade de energia e o ensaio de quinto harmônico apresentou a maior distorção, seguido do ensaio de sétima ordem.

Para o desequilíbrio de tensão, que foram aplicados aos ensaios 7 e 8, o ensaio de desequilíbrio de amplitude apresentou o maior valor superando inclusive, o valor máximo permitido pela norma da qualidade de energia que é de 3,0% para uma tensão nominal de 1,0kV. O desequilíbrio presente na tensão desencadeia o desbalanço da carga, o que justifica os valores mais elevados desse fator para os ensaios 7 e 8.

Nos ensaios de desequilíbrio na tensão evidencia-se, através dos parâmetros calculados para as distorções, que uma pequena distorção na tensão acarreta uma grande distorção na corrente, nesse caso em específico da ordem de 100x maior a distorção na corrente em relação a tensão.

Desse modo, a distorção harmônica de quinta ordem foi a que mais prejudicou as tensões e correntes do motor e o desequilíbrio angular foi muito mais danoso ao motor do que o desequilíbrio na amplitude.

#### 6.4.9.2 – Análise dos ensaios para a frequência de 75Hz

Tabela 6.32 – Tabela dos parâmetros calculados para os ensaios a 75Hz.

Parâmetro	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6
Potência Ativa	236,78	240,39	243,23	240,46	236,61	236,76
Potência Aparente Efetiva	1076,63	1073,15	1083,34	1069,28	1067,45	1063,12
Fator de potência efetivo	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Potência Ativa Fundamental	236,78	240,40	238,95	236,98	233,56	235,46
Potência Aparente Efetiva Fundamental	1076,55	1070,46	1067,34	1057,84	1060,52	1055,72
Potência Aparente Fundamental de Desbalanço	22,94	21,85	19,77	20,85	21,00	20,62

Potência Aparente Efetiva Não-Fundamental	12,52	75,97	185,51	155,94	121,43	125,20
Potência Aparente Harmônica	0,0026	0,81	14,83	11,23	6,86	7,39
Potência Ativa não Fundamental	0	0	4,28	3,48	3,05	1,30
Distorção harmônica efetiva total de tensão	0,02%	7,01%	9,67%	9,38%	8,63%	8,15%
Distorção harmônica efetiva total de corrente	1,16%	1,07%	14,38%	11,32%	7,49%	8,59%
Fator de desbalanço da carga	2,13%	2,04%	1,85%	1,97%	1,98%	1,95%
Fator de desbalanço das tensões para a frequência fundamental	0,68%	0,67%	0,68%	0,68%	0,68%	0,68%
Fator de potência fundamental de sequencia positiva	0,22	0,23	0,22	0,22	0,22	0,22
Potência ativa fundamental de sequencia positiva	236,69	240,31	238,88	236,90	233,48	235,38
Potência reativa fundamental de sequencia positiva	1049,96	1042,91	1040,08	1030,76	1034,28	1028,94
Potência aparente fundamental de sequencia positiva	1076,31	1070,24	1067,16	1057,64	1060,31	1055,52

Para a frequência de 75Hz podem ser feitas as mesmas considerações do ensaio de 60Hz com relação ao comportamento do ensaio da fundamental.

Com relação a distorção harmônica de tensão os valores foram quase iguais aos valores dos ensaios a 60Hz, portanto, tem-se a mesma análise. Já para a distorção na corrente, os valores foram um pouco menores do que no ensaio de 60Hz para todos os ensaios.

#### 6.4.9.3 – Análise dos ensaios para a frequência de 90Hz

Tabela 6.33 – Tabela dos parâmetros calculados para os ensaios a 90Hz.

Parâmetro	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6
Potência Ativa	294,99	311,97	304,28	296,67	296,81	304,21
Potência Aparente Efetiva	893,69	896,55	904,79	895,38	888,63	892,56
Fator de potência efetivo	0,33	0,35	0,34	0,33	0,33	0,34
Potência Ativa Fundamental	294,99	311,96	299,86	293,04	293,65	302,77
Potência Aparente Efetiva Fundamental	893,62	894,29	885,94	883,57	881,87	885,06

Potência Aparente Fundamental de Desbalanço	18,67	17,90	16,78	17,52	17,48	17,31
Potência Aparente Efetiva Não-Fundamental	11,07	63,74	183,73	144,98	109,37	115,49
Potência Aparente Harmônica	0,0021	0,80	15,63	11,11	6,76	7,33
Potência Ativa não Fundamental	0	0,0033	4,42	3,63	3,16	1,44
Distorção harmônica efetiva total de tensão	0,02%	7,01%	9,66%	9,39%	8,71%	8,16%
Distorção harmônica efetiva total de corrente	1,24%	1,28%	18,27%	13,40%	8,80%	10,15%
Fator de desbalanço da carga	2,09%	2,00%	1,89%	1,98%	1,98%	1,96%
Fator de desbalanço das tensões para a frequência fundamental	0,75%	0,75%	0,76%	0,76%	0,75%	0,76%
Fator de potência fundamental de sequencia positiva	0,33	0,35	0,34	0,33	0,33	0,34
Potência ativa fundamental de sequencia positiva	294,91	311,89	299,79	292,97	293,57	302,70
Potência reativa fundamental de sequencia positiva	843,35	837,95	833,50	833,40	831,39	831,51
Potência aparente fundamental de sequencia positiva	893,42	894,11	885,78	883,39	881,70	884,89

Para a frequência de 90Hz podem ser feitas as mesmas considerações com relação ao comportamento do ensaio da fundamental para o ensaio de 60Hz.

Com relação a distorção harmônica de tensão, os valores foram quase iguais aos dos ensaios a 60Hz e 75Hz, portanto, tem-se a mesma análise. Por outro lado, com relação a distorção na corrente os valores apresentados foram maiores do que as distorções nos ensaios a 60Hz, exceto para o ensaio de terceiro harmônico. Isso se deve ao fato da saturação do motor ter sido maior na frequência de 90Hz do que nas demais frequências.

## 6.5 – Conclusão

O surgimento de distorções harmônicas na corrente do motor se deve a saturação magnética devido ao seu comportamento não-linear.

---

Analisando os parâmetros calculados, de maneira geral, conclui-se que as distorções harmônicas de corrente apresentaram maior valor para quinta ordem e sétima ordem, depois décima primeira ordem e um valor muito pequeno para harmônicos de terceira ordem. Evidenciando mais uma vez os harmônicos que mais afetam o funcionamento do motor, como visto no capítulo 3, sendo eles o de 5ª e 7ª ordem, devido as sequências negativa e positiva interferirem no torque, dentre outros efeitos indesejáveis.

Observando os valores da norma da ANEEL com relação a distorção de tensão todos os ensaios respeitaram o valor da norma, possuindo valores menores que 10%, porém para o desequilíbrio de tensão o ensaio de desequilíbrio angular superou o limite permitido pela norma, apresentando o valor de 4,15%, sendo que o valor máximo permitido é 3%.

Percebe-se também que uma pequena distorção na tensão causa uma distorção muito grande na corrente.

Comparando os efeitos de desequilíbrio de tensão sendo eles: amplitude e angular, conclui-se que o desequilíbrio angular afeta muito mais o motor pois possuem maiores índices de desequilíbrio de tensão e corrente.

---

## CAPÍTULO 7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 7.1- Conclusões Finais

Com a criação das normas de qualidade de energia cada vez mais é necessário um fornecimento de energia livre de perturbações.

A presença de componentes harmônicos é indesejável no sistema elétrico, visto que a presença de desequilíbrios e harmônicos causam efeitos altamente prejudiciais ao rendimento e redução da vida útil do motor, como esses são responsáveis pelo consumo de grande parte da energia elétrica gerada, torna-se essencial a análise dos efeitos destes distúrbios nos motores.

Foi apresentado os estudos de cálculo de potencias em sistemas desequilibrados, sendo que o método do IEEE 1459-2010 é o mais indicado e sendo o utilizado no *software* desenvolvido no MATLAB para cálculo das potencias dos ensaios realizados.

A montagem da bancada de aquisição de dados foi apresentada, bem como todos os equipamentos utilizados no experimento. Consequentemente com a apresentação dos resultados dos ensaios realizados conclui-se que a corrente é a mais afetada por distorções harmônicas e desequilíbrios de tensão presentes na rede.

Desse modo, o trabalho proposto possibilita o cálculo de potências, fatores de potencias e distorções nas condições de desequilíbrios e harmônicos, permitindo assim a análise do efeito de tais perturbações no motor de indução trifásico.

A bancada de aquisição de dados pode ser utilizada para ensaios em motores com diversas condições de simulação.

### 7.2- Propostas para trabalhos futuros

No intuito de dar sequencia a esse trabalho e com o objetivo de complementar esta pesquisa, os seguintes trabalhos futuros são propostos:

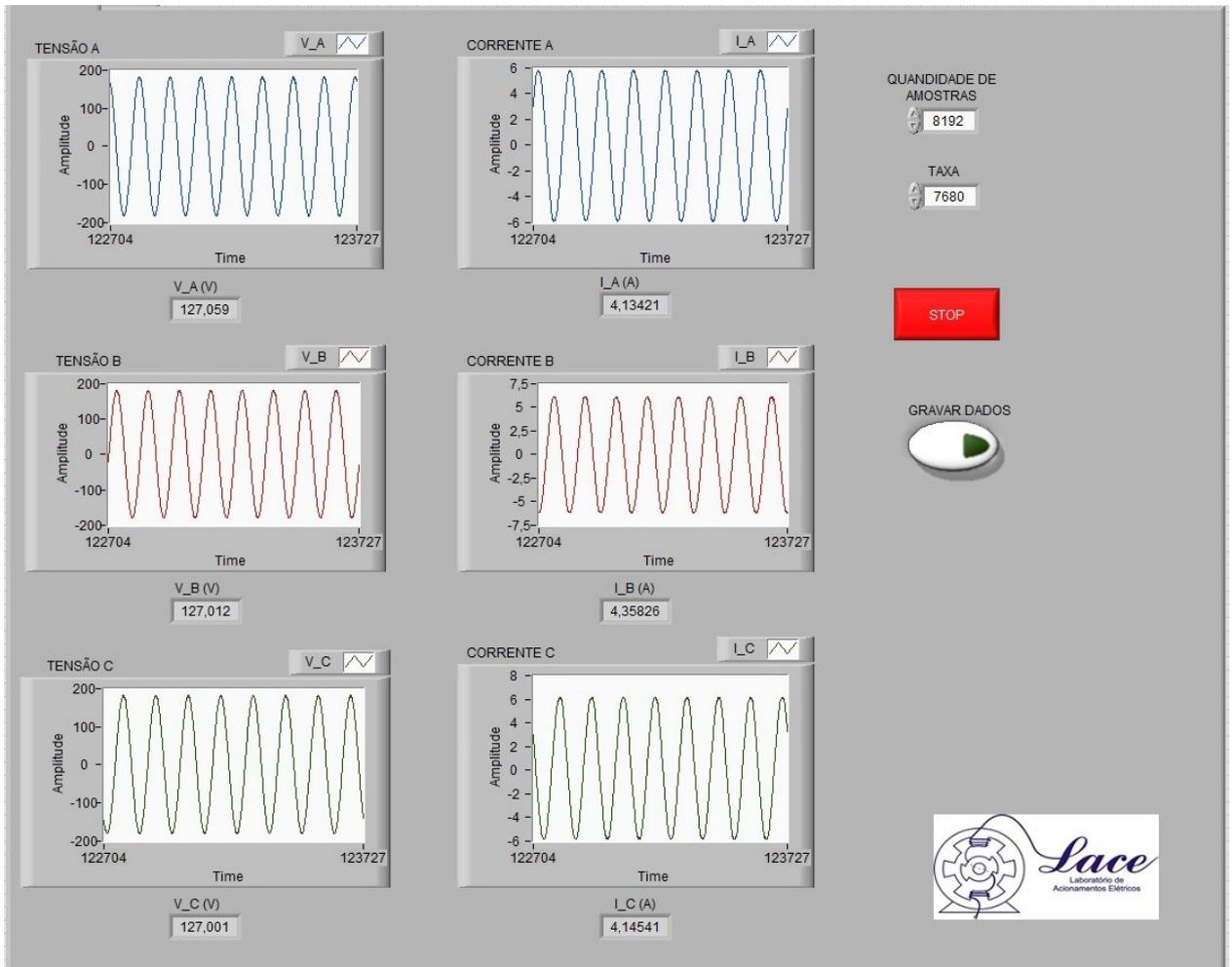
- Análise do conjugado do motor com carga diante da presença de desequilíbrio e harmônicos;
- Analisar o rendimento de motores diante das situações apresentadas quando é acoplada uma carga no mesmo;
- Verificar se outros motores apresentam o mesmo comportamento do MIT diante de tais

---

situações;

- Analisar a temperatura do motor diante dos cenários apresentados de desequilíbrio e harmônicos, no intuito de verificar o quanto cada situação interfere no aumento da temperatura;
- Medir a velocidade e o torque do motor diante de desequilíbrios
- Quantificar as perdas nos motores com base nos valores de desequilíbrio e harmônicos.

## Apêndice A – Tela do *software* de aquisição de dados



---

## Referências bibliográficas

- [1] REZENDE, P. H. O; SAMESIMA, M. I. **Efeitos do desequilíbrio de tensões de suprimentos nos motores de indução trifásico**. Horizonte Científico, Uberlândia, Vol.6, n°2, pp. 30, Fevereiro 2012. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/view/4473>. Acesso em: 24/07/2018.
- [2] MEHL, E. L. M. **Qualidade da Energia Elétrica**. Curso de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004 Disponível em: <http://www.critcle2004.eletrica.uftp.br/mehl/posgrad/qualidade-energia.pdf>. Acesso em: 14/10/2018.
- [3] LIMA, E. C. (2016). **Diagnóstico de Motores de Indução Trifásicos Operando em Redes Desequilibradas e Distorcidas**. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.
- [4] GOSBELL, V.; PERERA, S.; SMITH, V. (2002). **Voltage Unbalance**. Technical Note 06 - Integral, Energy Power Quality Centre. University of Wollongong, School of Electrical, Computer & Telecommunications Engineering. Disponível em: <http://www.elec.uow.edu.au/apqrc/content/technotes/technote6.pdf>. Acesso em: 02/01/2019.
- [5] NEVES, A. B. F. (2014). **Análise dos Efeitos do Desequilíbrio e da Distorção Harmônica de Tensão no Conjugado e no Rendimento de um Motor de Indução Trifásico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.
- [6] SCHNEIDER. **Qualidade de energia Harmônicas**. Workshop Instalações Elétricas de Baixa Tensão, Procobre, 2003. Disponível em: [paginapessoal.utfpr.edu.br > sola > Harmonicas.pdf > at\\_download > file](http://paginapessoal.utfpr.edu.br/sola/Harmonicas.pdf). Acesso em: 17/06/2018.
- [7] POMÍLIO, J. A.; DECKMANN, S. M. (2007). **Characterization and Compensation of Harmonics and Reactive Power of Residual and Commercial Loads**. IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 22, no. 2, April 2007, pp. 1049-1055.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.893179>

---

[8] ANEEL. (2018). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – **PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo\\_8Revis%C3%A3o\\_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9](http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8Revis%C3%A3o_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9). Acesso em: 10/01/2019.

[9] DERAZ, S. A.; AZAZI, H. Z. **Impact of Distorted Voltage on Three-Phase Induction Motor Performance**. IEEE 17th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON). Egypt, 19-21 December 2017. pp. 857-863.

<https://doi.org/10.1109/MEPCON.2017.8301280>

[10] NEVES, A. B. F et al. **Effects of Voltage Unbalance and Harmonic Distortion on the Torque and Efficiency of a Three Phase Induction Motor**. IEEE, pp. 943-948, 2016.

<https://doi.org/10.1109/ICHQP.2016.7783350>

[11] LEE, C-Y et al. **Effects of Voltage Harmonics on the Electrical and Mechanical Performance of a Three-phase Induction Motor**. IEEE, pp. 88-94, 1998.

<https://doi.org/10.1109/ICPS.1998.692550>

[12] SAHU, S. et al. (2017). **Unbalanced Voltage Effects and its Analysis on an Induction Motor**. IEEE International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA, 2017)., pp. 263-268.

<https://doi.org/10.1109/ICIMIA.2017.7975616>

[13] SILVA, M. A. **Avaliação de Parâmetros Técnicos e Econômicos na Substituição de Motores de Indução Trifásicos de 1cv a 10cv**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade de Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

[14] LIMA, E. J. **Reflexões sobre as teorias de potência elétrica em regime não senoidal**. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

[15] DECKMANN, S. M.; POMÍLIO, J. A. **Avaliação da Qualidade da energia Elétrica**. Universidade Estadual de Campinas. Fevereiro de 2017. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/qualidade/a1.pdf>. Acesso em: 12/01/2019.

- 
- [16] ALVES, A. C. B.; SANTOS, E. B. **Cálculo de potências aparente, ativa, não ativa e indicadores de distorção e desbalanço, e fator de potência segundo Buchholz-Goodhue e IEEE Standart 1459-2010**. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010. Disponível em: [https://www.emc.ufg.br/harm/arquivos/relatorio\\_potencias.pdf](https://www.emc.ufg.br/harm/arquivos/relatorio_potencias.pdf). Acesso em: 04/07/2018.
- [17] SUHETT, M. R. **Análise de Técnicas de Medição de Potência Reativa em Medidores Eletrônicos**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- [18] National Instruments. **PCI-6229 Dispositivo de E/S multifuncionais**. National Instruments, 2019. Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br/support/model.pci-6229.html>. Acesso em: 04/07/2019.
- [19] PHIPPS, J. K., NELSON, J. P., SEN, P. K. **Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems**. IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 30, no. 2, March/April 1994, pp. 476-485.
- [20] ROCHA, J. E. **Qualidade da Energia Elétrica**. Departamento de Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. 2016. Disponível em: [http://paginapessoal.utfpr.edu.br/joaquimrocha/qualidade-da-energia-eletrica/Qualidade%20da%20Energia%20Eletrica%20\\_%20Apostila.pdf/view](http://paginapessoal.utfpr.edu.br/joaquimrocha/qualidade-da-energia-eletrica/Qualidade%20da%20Energia%20Eletrica%20_%20Apostila.pdf/view). Acesso em: 03/01/2019.
- [21] IEEE. **IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions**. IEEE 1459-2010. Nova Iorque, 2010. 52p. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1589271/mod\\_resource/content/1/IEEE%20Std%201459-2010.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1589271/mod_resource/content/1/IEEE%20Std%201459-2010.pdf). Acesso em: 07/06/2018.
- [22] Epe. **Balanco Energético Nacional 2019 – Ano base 2018**. Ministério de Minas e Energia. Epe, 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf>. Acesso em: 02/12/2019.

---

[23] AREE, P. **Effects of Unbalanced Voltage On Induction Motor Operating Points Under Different Load Torque Profiles.** IEEE, 2016.

<https://doi.org/10.1109/ECTICon.2016.7561443>

[24] RENGIFO, J. et al. **Experimental evaluation of the voltage unbalance in the efficiency of induction motors.** IEEE, 2017.

<https://doi.org/10.1109/PEPQA.2017.7981667>

[25] MANJURE, D. P., MAKRAM, E. B., SEN, P. K. (2002). **Impact of unbalance on Power System Harmonics.** IEEE, pp. 328-333, 2002.

<https://doi.org/10.1109/ICHQP.2002.1221454>

[26] ANWARI, M., HIENDRO, A. (2010). **New Unbalance Factor for Estimating Performance of a Three-Phase Induction Motor With Under- and Overvoltage Unbalance.** IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 25, no. 3, September 2010, pp. 619-625.

<https://doi.org/10.1109/TEC.2010.2051548>

[27] RODRIGUES, J. E. **Interferência de Harmônicas em Equipamentos de Medição de Energia Elétrica.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009

[28] LANGELLA, R., TESLA, A., EMANUEL, A. K. (2011). **Unbalance Analysis for Electrical Power Systems in the Presence of Harmonics and Interharmonics.** IEEE.

<https://doi.org/10.1109/AMPS.2011.6090567>

[29] SILVA, V. P. (2012). **Análise Comparativa do Desempenho do Motor de Indução Trifásico de Alto Rendimento e Linha Padrão em Condições de Alimentação Ideal e não Ideal.** Dissertação (Mestre em Ciências), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.