

UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS MISSÕES
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS DE ERECHIM
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DOUGLAS ROBERTO TABOLKA

ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA:
DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM UMA PLANTA INDUSTRIAL
UM ESTUDO DE CASO

ERECHIM - RS

2022

DOUGLAS ROBERTO TABOLKA

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA:
DISTRORÇÕES HARMÔNICAS EM UMA PLANTA INDUSTRIAL
UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharias e Ciência da Computação da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Campus de Erechim.

Orientador: Prof. Me. Sérgio Bordignon.

ERECHIM - RS

2022

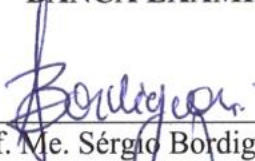
DOUGLAS ROBERTO TABOLKA

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA:
DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM UMA PLANTA INDUSTRIAL
UM ESTUDO DE CASO**

**Trabalho de conclusão de curso apresentado
como requisito parcial à obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica,
Departamento de Engenharias e Ciência da
Computação da Universidade Regional
Integrada do Alto Uruguai e das Missões –
Campus de Erechim.**

Erechim, 09 de dezembro de 2022.

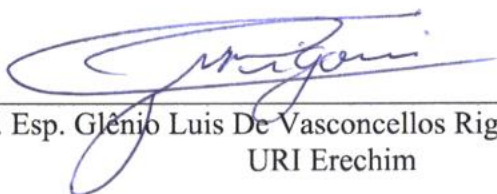
BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Sérgio Bordignon (Orientador)
URI Erechim



Prof. Esp. Fernando Luis Tartari Peres (Examinador)
URI Erechim



Prof. Esp. Glênio Luis De Vasconcellos Rigoni (Examinador)
URI Erechim

Aos meus pais, irmão e irmã.
À minha namorada Larissa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente sou grato a Deus por ter me dado sabedoria e força para superar todas as dificuldades ao longo desta caminhada. Em especial agradeço aos meus pais Dionísio e Neli por sempre estarem ao meu lado, pela dedicação e me incentivo para que eu não desistisse ao longo dos dias mais difíceis. À minha namorada Larissa pelo apoio, paciência e equilíbrio.

Agradeço também aos meus irmãos pelo incentivo em buscar sempre mais conhecimento.

Ao meu orientador Sérgio pela dedicação, paciência e pelos seus conhecimentos repassados.

A todos os professores da URI pela notável dedicação e excelência nos conhecimentos apresentados e qualidade do ensino.

A Montebras Montagens Elétricas pelo apoio e flexibilização dos horários de trabalho.

A todos meus amigos e todas as pessoas que coloram a minha disposição seu apoio e conhecimentos.

O gênio é um por cento de inspiração e noventa e nove por cento de suor.

(Thomas Edison)

RESUMO

Neste trabalho será apresentada uma análise das distorções harmônicas tendo como base os dados coletados através de um analisador de energia RE7000 em uma indústria metal mecânica da cidade de Ibirubá — RS. O intuito é analisar e caracterizar as distorções harmônicas presentes na planta industrial, por medições realizadas por equipamentos e métodos apropriados, para que se possa observar a qualidade da energia elétrica, presente no local. Foram adotadas as normalizações impostas pela ANEEL — Agência Nacional de Energia Elétrica, através do manual de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica — PRODIST Módulo 8 e pela IEEE 519. Além de caracterizar os distúrbios harmônicos, esse trabalho apresenta possíveis métodos para mitigar os problemas associados as distorções harmônicas, por meio dos resultados, ao final do estudo serão apresentados tópicos e sugestões para correção que podem ser aperfeiçoados em trabalhos futuros.

Palavras-chave: Qualidade da energia elétrica; Distorções Harmônicas; PRODIST; IEEE 519.

ABSTRACT

In this work, an analysis of harmonic distortions will be presented based on data collected through a RE7000 energy analyzer in a metal mechanic industry in the city of Ibirubá - RS. The aim is to analyze and characterize the harmonic distortions present in the industrial plant, by measurements carried out by appropriate equipment and methods, so that the electric power quality present in the place can be observed. Standardizations imposed by ANEEL — National Electric Energy Agency, through the Manual of Electric Power Distribution Procedures — PRODIST Module 8 and by IEEE 519 were adopted. In addition to characterizing harmonic disturbances, this work presents possible methods to mitigate the problems associated with harmonic distortions, through the results, at the end of the study topics and suggestions for correction will be presented that can be improved in the future works.

Keywords: Electric Power Quality; Harmonic Distortions; PRODIST; IEEE 519.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Onda distorcida “T” e suas componentes de 1 ^a (fundamental) e 5 ^a ordem.....	19
Figura 2: Ressonância série.....	27
Figura 3: Ressonância paralela.....	27
Figura 4: Topologia de filtros passivos para harmônicos de 5 ^a , 7 ^a , 11 ^o e 13 ^a ordem.....	29
Figura 5: Filtro ativo paralelo com a carga não linear.....	30
Figura 6: Analisador de QEE RE7000.....	31
Figura 7: Local de instalação do analisador de QEE.....	34
Figura 8: Conexão dos TC’s do analisador de QEE.....	34
Figura 9: Diagrama unifilar.....	35
Figura 10: Esquema de ligação do Analisador Ligação trifásica estrela 4 fios.....	36
Figura 11: Espectro harmônico de tensão - Fase A (Potência Mínima).....	42
Figura 12: Espectro harmônico de corrente - Fase A (Potência Mínima).....	43
Figura 13: Espectro harmônico de tensão - Fase A (Potência Máxima).....	44
Figura 14: Espectro harmônico de corrente - Fase A (Potência Máxima).....	45
Figura 15: Espectro harmônico de tensão - Fase B (Potência Mínima).....	46
Figura 16: Espectro harmônico de corrente - Fase B (Potência Mínima).....	47
Figura 17: Espectro harmônico de tensão - Fase B (Potência Máxima).....	48
Figura 18: Espectro harmônico de corrente - Fase B (Potência Máxima).....	49
Figura 19: Espectro harmônico de tensão - Fase C (Potência Mínima).....	50
Figura 20: Espectro harmônico de corrente - Fase C (Potência Mínima).....	51
Figura 21: Espectro harmônico de tensão - Fase C (Potência Máxima).....	52
Figura 22: Espectro harmônico de corrente - Fase C (Potência Máxima).....	53
Figura 23: Relatório global de harmônicos de tensão - Fase A.....	54
Figura 24: Relatório global de harmônicos de tensão - Fase B.....	55
Figura 25: Relatório global de harmônicos de tensão - Fase C.....	55
Figura 26: Relatório global de harmônicos de corrente - Fase A.....	56
Figura 27: Relatório global de harmônicos de corrente - Fase B.....	57
Figura 28: Relatório global de harmônicos de corrente - Fase C.....	57
Figura 29: Distorção de tensão nas fases.....	58
Figura 30: Distorção de corrente nas fases.....	59
Figura 31: Potência aparente.....	60
Figura 32: Formas de ondas de tensão distorcidas.....	61

Figura 33: Espectro harmônico da Figura 32.	61
Figura 34: Formas de ondas de corrente distorcidas.	62
Figura 35: Espectro harmônico da Figura 34.	63
Figura 36: Diagrama Ligação Filtro 25 kVAr	71
Figura 37: Diagrama de Ligação Filtro 50 kVAr	71
Figura 38: Comportamento do Filtro de 25 kVAr	72
Figura 39: Comportamento do Filtro de 50 kVAr	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Indicadores de distorções harmônicas	23
Tabela 2: Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).	25
Tabela 3: Limite de distorção de corrente em relação à corrente do sistema de até 69 kV.....	26
Tabela 4: Especificações técnicas RE7000.	32
Tabela 5: Valores médios diários 15/04/2022.	37
Tabela 6: Valores médios diários 16/04/2022.	37
Tabela 7: Valores médios diários 17/04/2022.	38
Tabela 8: Valores médios diários 18/04/2022.	38
Tabela 9: Valores médios diários 19/04/2022.	38
Tabela 10: Valores médios diários 20/04/2022.	38
Tabela 11: Valores médios diários 21/04/2022.	39
Tabela 12: Valores médios diários 22/04/2022.	39
Tabela 13: Valores médios diários 23/04/2022.	39
Tabela 14: Valores médios diários 24/04/2022.	39
Tabela 15: Valores médios diários 25/04/2022.	40
Tabela 16: Valores médios diários 26/04/2022.	40
Tabela 17: Valores médios diários 27/04/2022.	40
Tabela 18: Valores médios diários 28/04/2022.	40
Tabela 19: Valores médios diários 29/04/2022.	41
Tabela 20: Valores médios diários 30/04/2022.	41
Tabela 21: Valores médios diários 30/04/2022.	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DTT	Distorção Total de Tensão
DTTi	Distorção Total de Tensão de Ordem Ímpar
DTTp	Distorção Total de Tensão de Ordem Par
DTT3	Distorção Total de Tensão de Ordens Múltiplas de Três
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
FP	Fator de Potência
MVA	Mega Volt Ampère
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCC	Ponto Comum de Conexão
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
RMS	<i>Root Mean Squared</i> (Raíz Média Quadrada)
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i> (Distorção Harmônica Total)
TR	Transformador

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Objetivo geral	15
1.2 Objetivos específicos	16
1.3 Estrutura do trabalho	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 Qualidade de energia	18
2.2 Harmônicos.....	18
2.3 Cargas	20
2.3.1 Cargas lineares	20
2.3.2 Cargas não lineares	21
2.4 Medições.....	22
2.5 Regulamentação	22
2.5.1 Indicadores de qualidade harmônica.....	22
2.5.1.1 Distorção harmônica individual de tensão	23
2.5.1.2 Distorção harmônica total de tensão	23
2.5.1.3 Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3.....	24
2.5.1.4 Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3.....	24
2.5.1.5 Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	24
2.5.2 Norma ieee std 519	25
2.6 Efeitos das harmônicas	26
2.7 Métodos para mitigação das harmônicas.....	28
2.7.1 Filtros passivos.....	28
2.7.2 Filtros ativos.....	29
3 METODOLOGIA	31
3.1 Instrumento	31
3.2 Software	33
3.3 Estudo de caso	33
3.3.1 Local da medição	33
4 RESULTADOS	37
4.1 Dados obtidos.....	37

4.1.1 Fase A	42
4.1.2 Fase B.....	46
4.1.3 Fase C.....	50
5 PROJETO DO FILTRO DESSINTONIZADO	64
5.1 Dimensionamento.....	64
5.1.1 Cálculo do filtro de 25 kVAr	66
5.1.2 Cálculo do filtro de 50 kVAr	69
5.2 Considerações	71
6 CONCLUSÃO.....	74
REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

Os estudos relacionados com a qualidade de energia elétrica (QEE), têm se tornado um assunto de grande relevância para as concessionárias de energia, pesquisadores, órgãos reguladores e consumidores. Desde os anos 1980, estes procuram a normatização, identificação, qualificação e a redução das causas dos distúrbios, buscando uma energia elétrica de qualidade. (DUGAN, 2002).

As pesquisas nessa área têm se intensificado ao longo dos anos, com o aumento do uso de equipamentos que utilizam chaveamento eletrônico, como por exemplos inversores de frequência. Os distúrbios gerados por esses equipamentos, denominadas cargas não lineares, afetam, principalmente, equipamentos eletrônicos microprocessados, sendo mais sensíveis a variações ou interferências elétricas, fazendo-os operar de maneira incorreta ou ineficiente, e reduzindo sua vida útil, outros equipamentos bastante afetados são transformadores de distribuição e bancos capacitores (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2016).

Os problemas de qualidade de energia são definidos como qualquer perturbação ou distúrbio ocorridos nos níveis de tensão, corrente ou variações de frequência na energia fornecida. (HADDAD, 2004).

Dentre esses distúrbios, as distorções harmônicas de corrente e tensão têm grande relevância. Uma distorção de forma de onda é dita harmônica quando a deformação se apresenta de forma similar em cada ciclo da frequência fundamental, neste caso, o espectro contém apenas frequências múltiplas inteiras da fundamental.

O presente trabalho apresenta um estudo da qualidade de energia em uma empresa metalmeccânica localizada na cidade de Ibirubá Rio Grande do Sul, destacando os níveis de harmônicos com os valores de referência, definidos no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Para tal, será utilizado um analisador de energia, marca Embrasul, modelo RE7000, conectado no Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT) de uma subestação de 2 MVA 13,8 kV/0,38 kV.

1.1 Objetivo geral

O objetivo do trabalho é medir e analisar os níveis de harmônicas de tensão e corrente presentes no sistema elétrico da empresa, no entanto, outros aspectos da qualidade de energia possíveis de serem avaliados também serão abordados, identificando suas causas para propor melhorias para o sistema.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar uma revisão bibliográfica da literatura acerca de harmônicas e impactos na rede elétrica;
- Coletar dados elétricos da planta industrial utilizando o analisador de QEE no QGBT alimentado pelo secundário do transformador de 2 MVA;
- Analisar os dados elétricos obtidos, comparando-os com o PRODIST, com enfoque nas distorções harmônicas;
- Propor um projeto de melhoria da planta, através do estudo dos resultados obtidos para melhoria da QEE;

1.3 Estrutura do trabalho

A estrutura desta monografia foi dividida em seis capítulos, com os respectivos títulos:

1. Introdução;
2. Referencial teórico;
3. Metodologia;
4. Resultados;
5. Projeto do Filtro Dessintonizado;
6. Conclusão;

O Capítulo 1, Introdução, visa identificar e apresentar os objetos de pesquisa deste trabalho, bem como verificar e dar relevância às questões de pesquisa. Além disso, adapta o leitor à estrutura a ser observada em capítulos posteriores.

O Capítulo 2, Referencial Teórico, visa introduzir e caracterizar as distorções harmônicas. Além disso, este capítulo apresenta conceitos importantes e ferramentas matemáticas usadas para o estudo.

Uma vez apresentados os conhecimentos básicos no Capítulo 2, o Capítulo 3 discorre os métodos e instrumentos utilizados nesse estudo.

O Capítulo 4, no que lhe concerne, apresenta os resultados obtidos através da leitura e interpretação dos dados coletados pelo analisador de energia.

O Capítulo 5 discorre a metodologia de cálculo para o projeto de um filtro dessintonizado.

O Capítulo 6 realiza o fechamento do trabalho, por meio da conclusão apresentando possíveis soluções para os problemas e sugestões para seguimento do estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Qualidade de energia

Conforme a IEEE 1159 - 2009, a qualidade de energia pode ser definida por uma série de fenômenos eletromagnéticos que caracterizam as formas de onda de tensão e corrente em um determinado momento em uma posição especificada no sistema de potência.

Para garantir o funcionamento normal dos equipamentos eletroeletrônicos, as normas devem ser respeitadas, pois, este equipamento foi projetado conforme os limites neles estabelecidos (MEHL, 2001).

Um sistema tem baixa qualidade de energia quando sua onda de tensão e/ou corrente tem desvio suficiente do padrão para degradar a operação ou até mesmo causar falha no equipamento, o sistema tem boa qualidade de energia quando atende aos requisitos da norma, e o funciona sem problemas. (ROCHA, 2016).

De forma geral, a conceituação da perda da qualidade da energia é adotada pelos especialistas da área, como sendo: “qualquer desvio que possa ocorrer na magnitude, forma de onda ou frequência da tensão e/ou corrente elétrica, que resulte em falha ou operação indevida de equipamentos elétricos [...]”. (PAULILO, 2013).

Saber identificar os fenômenos que afetam a qualidade de energia do seu sistema pode ajudá-lo a comprar um dispositivo que resolva os problemas de qualidade de energia do seu sistema. Assim, a norma IEEE 1159-2009 descreve os conceitos dos fenômenos que afetam a qualidade da energia: harmônicos, oscilações de tensão transitórias, oscilações de tensão, transitórios, desequilíbrios de tensão, tensões em regime permanente, coeficientes de potência e flutuações de tensão.

2.2 Harmônicos

A primeira definição de harmônicos se origina de instrumentos acústicos e musicais, a explicação é a vibração de um fio ou coluna de ar que produz uma composição sonora onde existem várias frequências relativas a uma frequência característica, comumente chamada frequência fundamental. (SOUZA, 2008).

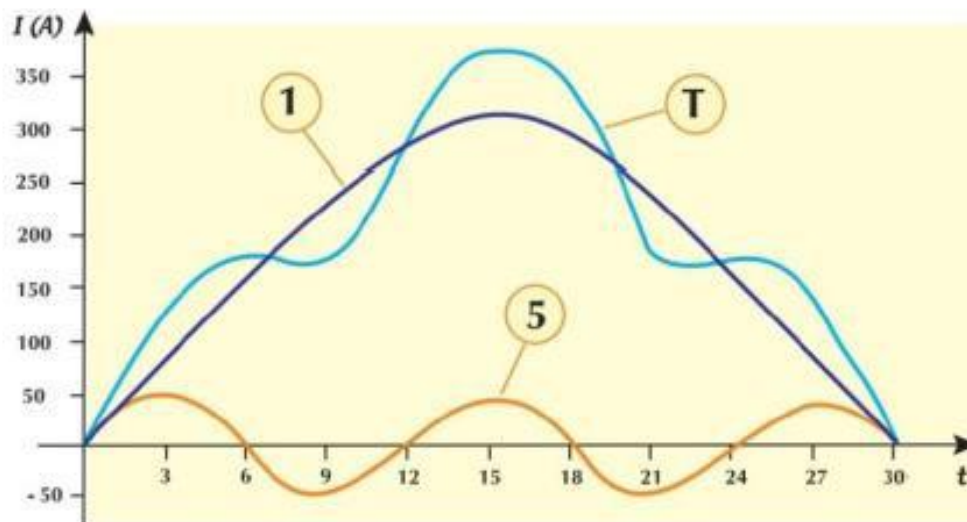
No campo da engenharia elétrica, os harmônicos se desenvolveram no início do século XX com o desenvolvimento de sistemas de energia em corrente alternada. O primeiro autor a

mencionar este termo foi Steimetz em 1916. Steimetz abordou as causas da saturação magnética do ferro em transformadores e máquinas (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Em um sistema elétrico, os harmônicos são o componente senoidal de um sinal periódico cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental do sinal fundamental. A composição da fundamental e dos harmônicos é chamada distorção harmônica.

As distorções harmônicas presentes em sistemas elétricos são normalmente causadas por dispositivos com características não lineares como, pontes retificadoras, compensadores controlados por tiristores etc. A Figura 1, mostra a composição do sinal de onda fundamental e seus componentes harmônicos.

Figura 1: Onda distorcida “T” e suas componentes de 1ª(fundamental) e 5ª ordem.



Fonte: (MORENO, 2001).

As harmônicas são muito típicas das perturbações já mencionadas sendo causadas por cargas elétricas não lineares. Essas cargas fazem com que a corrente consumida pelo dispositivo seja desequilibrada afetando a forma de onda da tensão aplicada e distorce a forma senoidal original (ORTMANN, 2008).

Essas fontes harmônicas podem ter origens diferentes. Podem ocorrer na rede elétrica frente ao ponto de entrega de energia, sendo de responsabilidade da concessionária ou, alternativamente, pode ser gerado por uma carga elétrica do consumidor.

Entre os consumidores, a indústria desempenha um papel importante na geração de harmônicos, pois ocupa a maioria da demanda dos sistemas elétricos de potência e dos detalhes de seus equipamentos elétricos (TEIXEIRA, 2009).

2.3 Cargas

As cargas residenciais são divididas em resistivas, indutivas e eletrônicas.

Cargas resistivas não produzem harmônicos porque são cargas lineares. As cargas eletrônicas causam distorção na corrente de entrada e baixo fator de potência, devido ao estágio de retificação, gerado por diodos, tiristores ou outros dispositivos de comutação (OLIVEIRA, 2009). Em contrapartida, Pomilio (2008), cita que a análise de harmônicos em unidades residenciais deve ser limitada a cargas indutivas e eletrônicas, dada a natureza linear das cargas resistivas.

Para Leão, Sampaio e Antunes (2014) definem cargas usando diferentes classificações. Os autores definem as cargas como críticas, sensíveis e perturbadoras.

Cargas críticas requerem precauções, pois podem colocar em risco a vida humana e causar danos substanciais. São oriundas de centros de controle de voo, centros de processamento dados financeiros, hospitais e muito mais. Podem ou não ser lineares e em hipótese alguma são permitidas interrupções de energia.

Cargas sensíveis, são aquelas cuja tensão não suporta variações, mesmo por curtos períodos, por exemplo, de cargas eletrônicas e digitais, controladores lógicos programáveis, robôs, atuadores de velocidade para motores e computadores pessoais.

Cargas perturbadoras, são em sua maioria, as cargas industriais com processo de retificação, forno elétrico a arco, motores de grande porte, entre outros.

A mesma carga pode operar simultaneamente em condições críticas, sensíveis e intermitentes.

2.3.1 Cargas lineares

Cargas lineares são caracterizadas por sua corrente ser diretamente proporcional à tensão aplicada. Os principais exemplos são os resistores, indutores insaturados e capacitores de valor fixo que absorvem a corrente e atuam como fontes de corrente (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Franco (2008) explica que o rápido desenvolvimento da eletrônica de potência e os avanços tecnológicos aumentaram a presença de harmônicos e têm efeitos indesejados nos dispositivos.

Rosa (2006) afirma que uma carga linear ocorre quando os sinais de tensão e corrente estão próximos na chamada relação de ohm. Essa relação define que a corrente que flui através

de um resistor fornecido por uma fonte de tensão variável é igual à relação entre tensão e resistência. O autor explica por que as ondas de tensão e corrente são semelhantes entre si em circuitos elétricos. A carga de resistência linear é proporcional ao quadrado da corrente.

Por outra definição, Suresh e Panda (2016) relatam que uma carga linear é uma carga em que tensão e corrente seguem em uma onda senoidal pura sem distorção.

2.3.2 Cargas não lineares

Cargas não lineares são um dos principais contribuintes para correntes distorcidas, mesmo quando são alimentadas por uma fonte de tensão senoidal. A tensão distorcida também afeta a corrente. Mesmo que a tensão não seja senoidal, a corrente será distorcida pela tensão e não pela linearidade da carga. No entanto, ambos possuem tensões e correntes não constantes (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Dugan (2012) esclarece que a distorção harmônica é causada por dispositivos não lineares no sistema elétrico. Para o autor, um dispositivo não linear é aquele em que a corrente não é proporcional à tensão aplicada. A fonte da maior distorção harmônica em sistemas elétricos é a duplicação, onde a corrente pode ser expressa como uma porcentagem da tensão. Entre as diversas cargas não lineares, podemos citar:

- Fornos a arco;
- Fornos de indução de alta frequência;
- Motores de corrente contínua controlados por retificadores;
- Motores síncronos controlados por ciclo conversores;
- Motores CA controlados por inversor de frequência;
- Máquinas de solda a ponto;

Leão, Sampaio e Antunes (2014) afirmam que cargas que requerem correntes não senoidais provenientes de tensões senoidais são não lineares. Os autores acrescentam que cargas não lineares causam correntes distorcidas, quando alimentadas por uma fonte de energia livre de distorção, definindo tensão e correntes não constantes.

Rosa (2006) descreve que os transformadores de potência podem operar de forma não linear devido à saturação. O autor dá um exemplo do caso onde a densidade de fluxo magnético em um transformador para de aumentar ou aumenta ligeiramente quando a intensidade do fluxo continua a aumentar.

2.4 Medições

As medições quantificam e qualificam parâmetros para determinar o processo de sucesso ou fracasso.

Dessa forma, é possível monitorar a ocorrência de falhas e determinar sua periodicidade e gravidade. Seus principais objetivos são diagnosticar incompatibilidades de energia e carga, medir o desempenho da carga e do processo, analisar as causas-raiz dos problemas, avaliar a conformidade regulatória e prever o desempenho futuro de equipamentos ou dispositivos de mitigação de QEE. (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

2.5 Regulamentação

O Procedimento de Distribuição (PRODIST) é um documento criado pela ANEEL com o objetivo de normatizar e padronizar as atividades técnicas relacionadas ao fundamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2018). O PRODIST é padronizado em 11 módulos, sendo o Módulo 8, Qualidade de Energia Elétrica responsável pelas orientações sobre a qualidade da energia fornecida.

ANEEL identifica como público-alvo consumidores com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição, fábricas, distribuidoras, agentes de importação/exportação de energia elétrica, transmissoras detentoras, as Demais Instalações de Transmissão e Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS.

2.5.1 Indicadores de qualidade harmônica

Para quantificar e classificar a poluição harmônica de tensão e corrente em uma instalação foram criados vários indicadores, conforme a Tabela 1.

As distorções harmônicas são parametrizadas pelas equações referidas no PRODIST, módulo 8.

Tabela 1: Indicadores de distorções harmônicas

Descrição	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTT_p\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTT_i\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DTT_3\%$
Valor do indicador $DTT\%$ que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	$DTT_{95\%}$
Valor do indicador $DTT_p\%$ que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	$DTT_{p,95\%}$
Valor do indicador $DTT_i\%$ que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	$DTT_{i,95\%}$
Valor do indicador $DTT_3\%$ que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	$DTT_{3,95\%}$

Fonte: (PRODIST – Módulo 8, 2022)

2.5.1.1 Distorção harmônica individual de tensão

$$DIT_h(\%) = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2.1)$$

Onde:

V_h - Valor eficaz da componente harmônica da tensão de ordem “h”;

V - Valor eficaz da componente fundamental da tensão;

h - Ordem harmônica individual;

2.5.1.2 Distorção harmônica total de tensão

$$DTT(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.2)$$

Onde:

V_h - Valor eficaz da componente harmônica da tensão de ordem “h”;

V - Valor eficaz da componente fundamental da tensão;

h - Todas as ordens harmônicas individual de 2 até h_{\max} ;
 h_{\max} – Ordem harmônica máxima;

2.5.1.3 Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3

$$DTT_p(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.3)$$

Onde:

V_h - Valor eficaz da componente harmônica da tensão de ordem “h”;

V - Valor eficaz da componente fundamental da tensão;

h - Todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3 ($h = 2, 4, 8, 10, 14, 16, 20, 22, 26, 28, 32, 34, 38, \dots$);

h_p – Ordem harmônica máxima par, não múltipla de 3;

2.5.1.4 Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3

$$DTT_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_i} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.4)$$

Onde:

V_h - Valor eficaz da componente harmônica da tensão de ordem “h”;

V - Valor eficaz da componente fundamental da tensão;

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

h_i – Ordem harmônica máxima ímpar, não múltipla de 3;

2.5.1.5 Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3

$$DTT_3(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.5)$$

Onde:

V_h - Valor eficaz da componente harmônica da tensão de ordem “h”;

V - Valor eficaz da componente fundamental da tensão;

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 – Ordem harmônica máxima múltipla de 3;

A Tabela 2 lista os limites da distorção harmônica total correspondente aos valores máximos permitidos no sistema.

Tabela 2: Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

Indicador	Tensão nominal (V_n)		
	$V_n < 2,3 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} \leq V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT _{95%}	10,0%	8,0%	5,0%
DTT _{p,95%}	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _{i,95%}	7,5%	6,0%	4,0%
DTT _{3,95%}	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: (PRODIST – Módulo 8, 2022).

2.5.2 Norma IEEE std 519

Esta norma determina os valores máximos permitidos de distorção harmônica única para tensão de barramento e corrente total em sistemas elétricos. Com uma abordagem envolvendo consumidores e concessionárias, a norma foca em limitar os efeitos de cargas não lineares, definindo os níveis máximos de distorção para concessionárias no ponto de entrega de energia (LEÃO, 2014).

Para a verificação do limite de distorção, ele é baseado na tensão de operação do sistema. A partir disso, a tensão única e a tensão de base são comparadas para determinar a distorção harmônica. Além desse fator, são utilizadas a relação das correntes de curto-circuito e as correntes máximas solicitadas pela carga ISC e IL, respectivamente. O limiar de distorção é proporcional a essa relação (TEIXEIRA, 2009).

A Tabela 3 fornece os limites harmônicos conforme a ordem e os valores totais permitidos de acordo com IEEE std 519. Vale ressaltar que o limite de distorção é limitado a 20% independente da relação de corrente.

Tabela 3: Limite de distorção de corrente em relação à corrente do sistema de até 69 kV.

Máxima Distorção Harmônica de Corrente em percentual de I_L						
Ordem Harmônica Individual (harmônicos ímpares) ^(a,b)						
I_L/I_{sc}	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
$< 20^c$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.4	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

^a Harmônicos pares são limitados a 25% dos limites dos harmônicos ímpares acima

^b Distorções de corrente que resultam em um offset CC, e.g., conversores de meia onda, não são permitidos

^c Todo equipamento de geração de energia está limitado a estes valores de distorção de corrente, independente do I_{sc}/I_L atual

onde:

I_{sc} = máxima corrente de curto-circuito no PCC

I_L = máxima corrente de carga demandada (componente de frequência fundamental) no PCC sobre condições de operação nominal

Fonte: (IEEE std 519, 2022).

2.6 Efeitos das harmônicas

Os sistemas de baixa tensão de hoje, inevitavelmente, têm correntes harmônicas. Estes são gerados pelas cargas não lineares a eles conectada e, causam efeitos indesejados nos dispositivos conectados ao sistema, alguns dos efeitos indesejados das harmônicas em equipamentos são. (KASSICK, 2016).

- Capacitores: aumento de temperatura, aumento de perdas, diminuição da vida útil; sobretensões e ressonância podem causar a ruptura do dielétrico;
- Motores: aumento de temperatura, diminuição da vida útil, diminuição do rendimento, aumento de ruídos, danificação de mancais devido à batimentos de torque;
- Fusíveis/disjuntores/chaves seccionadoras: atuação indevida;
- Transformadores: aumento da temperatura, aumento das perdas no ferro e no cobre, diminuição da vida útil;
- Medidores: erros de medição;

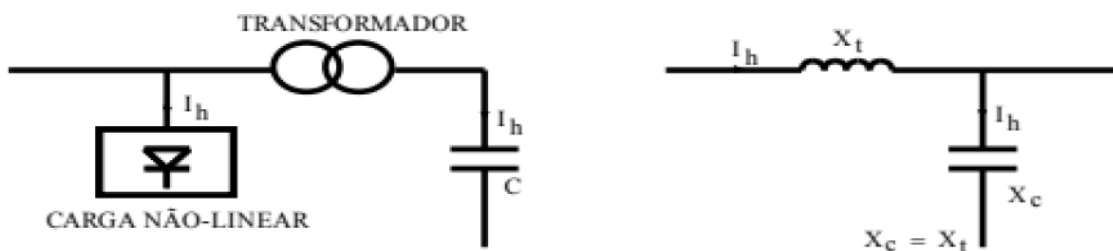
- Acionamentos/UPS: anomalia de operação, usualmente causado por múltiplas passagens por zero das tensões e correntes, falhas nos circuitos de comutação;

Dentre os efeitos citados, destacam-se as ressonâncias que podem ser série ou paralelo. O primeiro é caracterizado por um caminho de correntes harmônicas de baixa impedância e o segundo é caracterizado por um caminho de correntes harmônicas de alta impedância.

De acordo com Kassick (2016,), a ressonância em série é “o resultado de uma combinação de múltiplos bancos de capacitores e indutância de linha (parasitas) ou transformadores (dispersão) [...]”, conforme mostra a Figura 2.

O caminho de baixa impedância que caracteriza a ressonância em série mantém as correntes harmônicas em uma frequência sintonizada e pode causar distorção de alta tensão em capacitores e indutores.

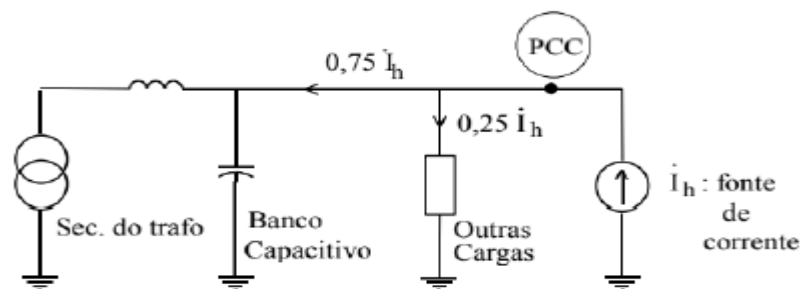
Figura 2: Ressonância série.



Fonte: (KASSICK, 2016).

Por outro lado, a ressonância paralela, ocorre quando a indutância e a capacitância totais, conectadas a um ponto comum de conexão (PCC), excitam uma corrente de frequência coincidente com a frequência de harmônica. A Figura 3 mostra como se comporta o fluxo de harmônicas diante da ressonância paralela em um sistema.

Figura 3: Ressonância paralela.



Fonte: (KASSICK, 2016).

2.7 Métodos para mitigação das harmônicas

As soluções disponíveis para reduzir a distorção harmônica não são únicas, cada instalação elétrica dispõe de métodos distintos para a mitigação de tais problemas. Dentre as soluções possíveis, as mais utilizadas são abordadas nos tópicos a seguir. Contudo, é importante ressaltar que, existem outras possibilidades e topologias para a mitigação de harmônica.

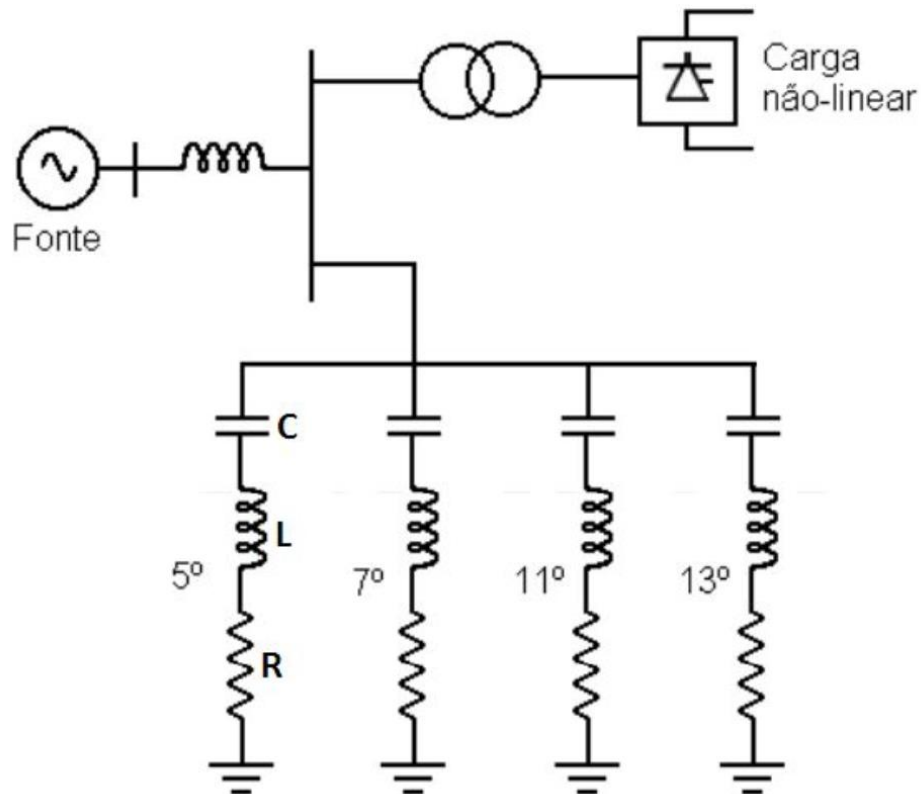
2.7.1 Filtros passivos

Em uma topologia em série, o filtro é conectado em série com o sistema para evitar a circulação de um certo harmônico entre a carga e o sistema elétrico ao qual está conectado. Este filtro pode ser composto por indutores e capacitores ligados em paralelo, mas em série com o sistema, e representa uma grande impedância para a frequência da harmônica projetada a se evitar.

Os filtros harmônicos passivos também podem ter uma topologia “*shunt*”, onde o filtro é conectado em paralelo com o sistema, para fornecer um caminho de baixa impedância para as frequências harmônicas esperadas, evitando que entrem no sistema. Estes são dimensionados para suportar somente correntes harmônicas para as quais estão sintonizados, somadas a uma corrente fundamental inferior à do circuito principal. A Figura 4 mostra a topologia do filtro “*shunt*” para harmônicos de 5 a 13. A figura abaixo mostra os filtros em paralelo com a carga e adicionando resistência devido às perdas do indutor e resistência dos cabos e terminais.

A instalação de filtros implica na inserção de capacitores, que, além de ajudar a mitigar os harmônicos, também absorvem a potência reativa presente na rede, auxiliando na melhoria do fator de potência da instalação. A precisão na sintonia de frequências do filtro com harmônicos não é fácil de obter. Durante a operação, as especificações dos componentes mudam com a temperatura, causando a dessintonização do filtro. O resultado é sempre uma filtragem harmônica parcial suficiente para melhorar a QEE.

Figura 4: Topologia de filtros passivos para harmônicos de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordem.



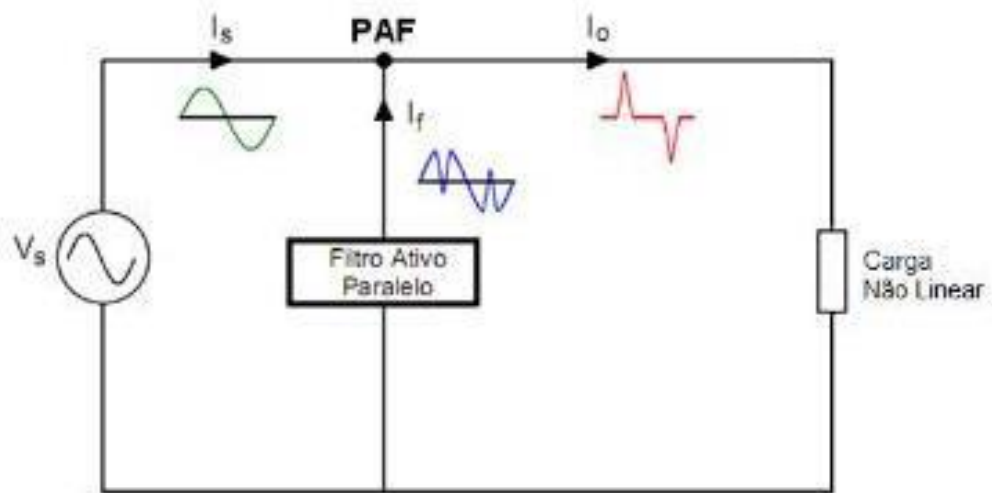
Fonte: (ROLIN, 2015).

2.7.2 Filtros ativos

Os filtros ativos consistem na instalação de dispositivos dotados de uma eletrônica mais complexa, em série ou em paralelo com cargas que criam distorção harmônica na rede. Ele é implementado para compensar esta distorção injetando uma corrente em fase contrária com a corrente presente no sistema, resultando em uma corrente de linha não distorcida. Na Figura 5, há um exemplo do funcionamento de um filtro ativo paralelo com carga não linear. A corrente é injetada de modo que a corrente exista apenas na frequência fundamental.

Por possuírem circuitos eletrônicos de potência mais complexos, custam mais do que os filtros passivos vistos anteriormente. No entanto, são mais eficazes na redução do conteúdo harmônico das instalações elétricas, além disso, esse tipo de filtro pode operar em uma faixa mais ampla de frequências harmônicas, diferentemente dos filtros passivos que são projetados para operar apenas em uma frequência fixa.

Figura 5: Filtro ativo paralelo com a carga não linear.



Fonte: (Lucival Guerreiro e Paulo Kanasiro, 2011).

3 METODOLOGIA

3.1 Instrumento

Utilizou-se o analisador de energia RE7000, desenvolvido pela empresa EMBRASUL, que indica a medição de perturbações na rede, o RE7000 permite a análise de tensões, potências, desbalanceamentos, frequência, distorção de harmônicos, consumos, demandas e interrupções.

Esses analisadores QEE apresentam um design robusto e compacto para fácil instalação por técnicos e engenheiros. Este equipamento, deve sempre ser operado por um profissional com experiência e conhecimento técnico dos ajustes e configurações necessários para o seu bom funcionamento.

A figura 6 ilustra o design do analisador de energia RE7000 utilizado neste trabalho.

Figura 6: Analisador de QEE RE7000.



Fonte: (Embrasul, 2022).

A Tabela 4 apresenta as especificações técnicas do equipamento. Os dados coletados, são posteriormente analisados em computador, com auxílio do software ANL7000, contudo, algumas informações podem ser vistas previamente no próprio equipamento.

Tabela 4: Especificações técnicas RE7000.

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS	
Alimentação auxiliar ou pela medição de tensão	
Faixa Vac:	70 a 500Vac (Fase/Neutro)
Consumo:	5VA
ENTRADAS DE TENSÃO	
Número de entradas:	3 (VA, VB, VC) ou 4 (VA, VB, VC, VN) *
Faixa de Medição:	50 a 500Vac (Fase-Neutro) 866V (F-F)
Resolução:	0,01V
Precisão:	0,2%
Sobrecarga de tensão:	+10% valor máximo durante 1 segundo.
Impedância de entrada:	2MW
Amplitude de banda:	2460Hz
* Para equipamento com módulo de medição do Neutro	Opcional
ENTRADAS DE CORRENTE	
Número de entradas:	3 (IA, IB, IC) ou 4 (IA, IB, IC, IN) *
Tipo:	Sensor flexível** ou TI80
Com sensor flexível: 0,1A a 3000A	Faixa de medição:
Com TI150: 0,1A a 150A	
* Para equipamento com módulo (N) de medição de Neutro.	Opcional
Resolução:	0,01A
Precisão:	0,2% + precisão do sensor de corrente
Amplitude de banda:	1500Hz
FREQUÊNCIA NOMINAL	
Frequência:	45 a 70Hz
Resolução:	0,01Hz
Precisão:	±0,01Hz
COMBINAÇÕES DE FIAÇÃO	
Monofásicas:	2F
Bifásicas:	2F, 3F
Trifásicas:	3F, 4F e 5F
PARÂMETROS MEDIDOS (4 QUADRANTES)	
Tensões:	Por fase e trifásicas
Correntes:	Por fase e trifásicas
Precisão das potências:	±0,5% + precisão do sensor de corrente
Fator de potência:	Indutivo e capacitivo
Faixa do FP:	0,001 até 1 indutivo e 0,001 até 1 capacitivo

Fonte: (Embrasul, 2022, adaptado).

3.2 Software

O *software* utilizado, foi o ANL7000, que tem sua licença disponibilizada com a compra do analisador RE7000, permite a análise, geração de relatórios, tratamento de dados e a visualização dos resultados.

Utilizou-se um cabo de Ethernet para a exportação deste arquivo .emb do analisador para o *software*, que, após carregado, permite a manipulação dos dados de acordo com as exigências do usuário e limitações do programa. Entre as opções ofertadas estão: relatório de dados completo, relatório de dados resumido, gráficos das grandezas analisadas, planilhas de dados coletados, gráficos e relatórios de harmônicos e configuração dos parâmetros de visualização dos itens anteriores.

Todos os dados podem ser visualizados através de listas ou planilhas, podendo ser exportados para um arquivo .CSV ou .CVS.

3.3 Estudo de caso

As medições foram realizadas entre os dias 15/04 e 01/05 de 2022 em uma indústria metalmeccânica localizada na cidade de Ibirubá-RS. Os procedimentos executados para a instalação do equipamento e as características técnicas dos circuitos analisados estão apresentados a seguir.

3.3.1 Local da medição

O analisador de QEE foi instalado no QGBT do transformador de 2 MVA, com tensão primária de 13,8 kV e secundária de 0,38 kV, conforme Figura 7, por segurança, as áreas ao redor e de acesso ao local de instalação do equipamento foram isoladas devido ao risco de choque elétrico.

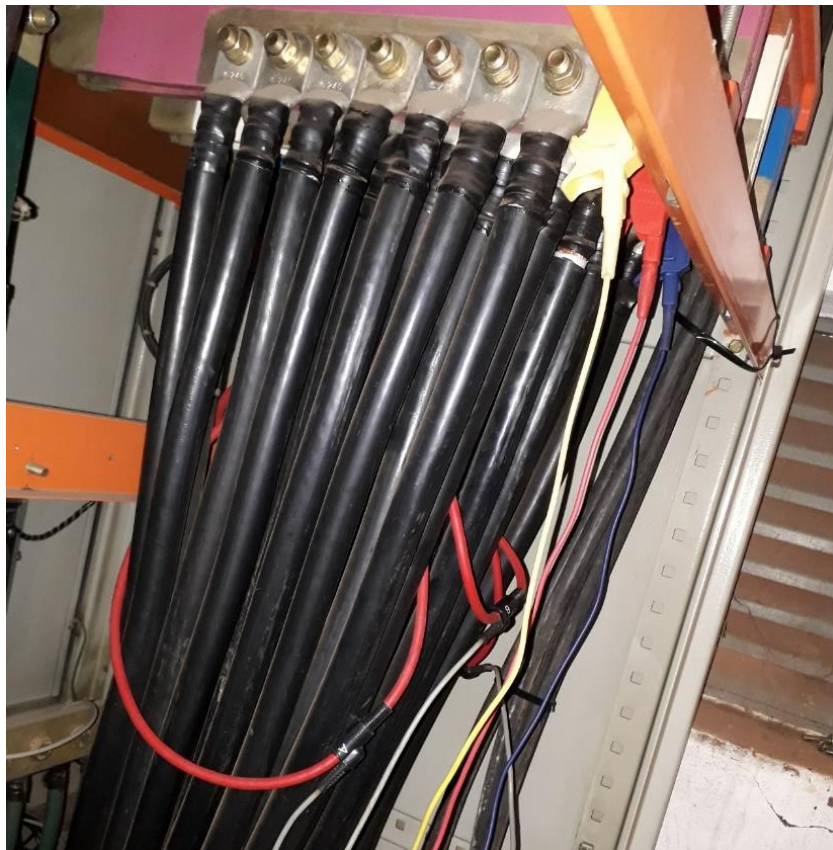
A instalação do analisador QEE foi realizada sob a supervisão de um técnico de segurança. A figura 9, ilustra o diagrama unifilar geral da indústria, indicando o ponto de conexão do analisador de QEE.

Figura 7: Local de instalação do analisador de QEE.



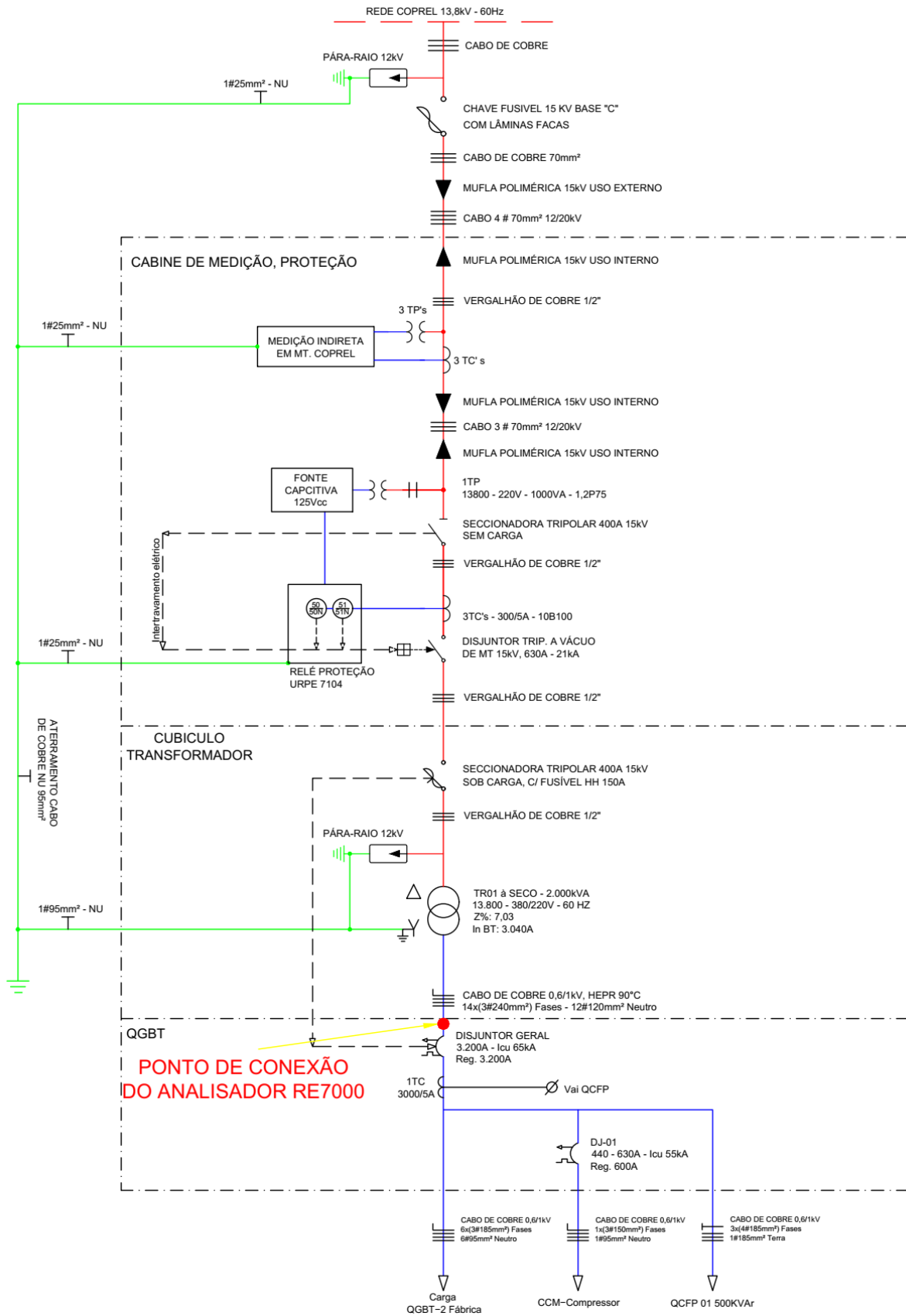
Fonte: (Autor, 2022).

Figura 8: Aquisição do sinal de corrente.



Fonte: (Autor, 2022).

Figura 9: Diagrama unifilar.

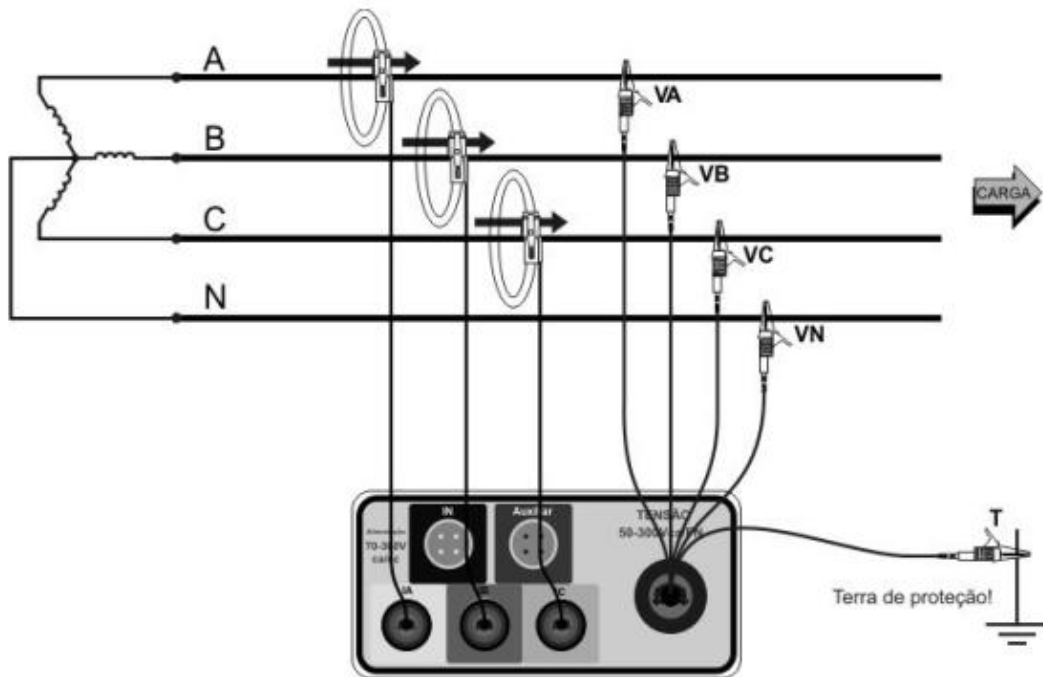


Fonte: (Autor, 2022).

Durante a instalação do equipamento na subestação, fez-se necessário interromper a alimentação da concessionária por um curto intervalo de tempo, garantindo assim a segurança de todos os elementos e indivíduos presentes. Realizou-se a interface com os responsáveis da indústria, informando a interrupção no fornecimento de energia e a previsão de retorno.

A figura 10 ilustra o esquema de ligação do analisador na instalação.

Figura 10: Esquema de ligação do Analisador Ligação trifásica estrela 4 fios.



Fonte: (Embrasul, 2022).

4 RESULTADOS

Para realizar a análise pertinente ao estudo realizado foram adotados como parâmetros, dados do módulo PRODIST 8 - 12ª edição (2022) e a IEEE Std 519, onde estão disponíveis os limiares para distorção harmônica em sistemas elétricos, conforme já demonstrado em tópicos anteriores.

4.1 Dados obtidos

Com o sistema de medição adotado neste trabalho, são obtidas médias diárias de tensão, corrente, potência ativa, reativa e aparente do sistema, bem como o fator de potência de operação deste sistema. Para essas medições, foi considerado o intervalo do dia 15/04/2022 as 14:09:29,00 até o dia 01/05/2022 as 08:34:15,00, com uma medição a cada 1 minuto.

Os valores médios diários encontrados estão apresentados nas tabelas a seguir.

Tabela 5: Valores médios diários 15/04/2022.

Grandezas	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	226,11	225,96	226,31
Correntes [A]	510,598	497,324	499,083
Potências ativas [kW]	110,614	107,484	108,752
Potências reativas [kVAr]	32,466	32,236	29,929
Potências aparentes [kVA]	115,28	112,214	112,795
Fatores de potência	0,959	0,958	0,964

Fonte: (Autor, 2022).

Tabela 6: Valores médios diários 16/04/2022.

Grandezas	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	226,75	226,79	226,92
Correntes [A]	437,042	427,996	426,491
Potências ativas [kW]	94,883	92,571	92,892
Potências reativas [kVAr]	27,825	28,394	26,359
Potências aparentes [kVA]	98,879	96,828	96,559
Fatores de potência	0,959	0,956	0,962

Fonte: (Autor, 2022).

Tabela 7: Valores médios diários 17/04/2022.

Grandezas	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	226,8	226,68	226,8
Correntes [A]	464,071	462,447	457,906
Potências ativas [kW]	100,716	100,1	99,654
Potências reativas [kVAr]	29,449	30,013	28,11
Potências aparentes [kVA]	104,933	104,502	103,543
Fatores de potência	0,96	0,958	0,962

Fonte: (Autor, 2022).

Tabela 8: Valores médios diários 18/04/2022.

Grandezas	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	227,76	227,94	228,15
Correntes [A]	258,066	262,421	261,362
Potências ativas [kW]	56,359	57,252	57,186
Potências reativas [kVAr]	16,049	16,708	16,291
Potências aparentes [kVA]	58,6	59,64	59,461
Fatores de potência	0,962	0,96	0,962

Fonte: (Autor, 2022).

Tabela 9: Valores médios diários 19/04/2022.

Grandezas	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	229,74	229,74	229,88
Correntes [A]	128,254	125,485	138,637
Potências ativas [kW]	26,546	25,839	28,181
Potências reativas [kVAr]	12,576	12,583	14,599
Potências aparentes [kVA]	29,374	28,74	31,738
Fatores de potência	0,904	0,899	0,888

Fonte: (Autor, 2022).

Tabela 10: Valores médios diários 20/04/2022.

Grandezas	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	227,95	227,94	228,03
Correntes [A]	346,235	337,708	339,753
Potências ativas [kW]	74,999	72,717	73,637
Potências reativas [kVAr]	23,186	23,882	22,472
Potências aparentes [kVA]	78,501	76,538	76,99
Fatores de potência	0,955	0,95	0,956

Fonte: (Autor, 2022).

Tabela 11: Valores médios diários 21/04/2022.

Grandezas	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	227,71	227,6	227,63
Correntes [A]	426,499	412,747	416,977
Potências ativas [kW]	92,906	89,478	91,016
Potências reativas [kVAr]	26,936	27,318	25,569
Potências aparentes [kVA]	96,732	93,555	94,539
Fatores de potência	0,96	0,956	0,963

Fonte: (Autor, 2022).

Tabela 12: Valores médios diários 22/04/2022.

Grandezas	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	225,98	225,93	226,1
Correntes [A]	412,567	410,926	410,28
Potências ativas [kW]	89,362	88,741	89,262
Potências reativas [kVAr]	25,723	26,391	24,345
Potências aparentes [kVA]	92,99	92,583	92,522
Fatores de potência	0,961	0,958	0,965

Fonte: (Autor, 2022).

Tabela 13: Valores médios diários 23/04/2022.

Grandezas	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	227,28	227,09	227,25
Correntes [A]	423,537	421,601	422,698
Potências ativas [kW]	92,366	91,678	92,533
Potências reativas [kVAr]	26,368	26,865	25,09
Potências aparentes [kVA]	96,056	95,533	95,874
Fatores de potência	0,961	0,96	0,965

Fonte: (Autor, 2022).

Tabela 14: Valores médios diários 24/04/2022.

Grandezas	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	226,62	226,51	226,6
Correntes [A]	452,541	451,138	450,939
Potências ativas [kW]	95,022	94,159	95,224
Potências reativas [kVAr]	36,814	37,866	35,397
Potências aparentes [kVA]	101,905	101,487	101,59
Fatores de potência	0,932	0,928	0,937

Fonte: (Autor, 2022).

Tabela 15: Valores médios diários 25/04/2022.

Grandezas	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	228,11	228,18	228,16
Correntes [A]	224,929	231,218	229,902
Potências ativas [kW]	46,778	47,868	48,497
Potências reativas [kVAr]	20,494	21,688	19,439
Potências aparentes [kVA]	51,071	52,552	52,248
Fatores de potência	0,916	0,911	0,928

Fonte: (Autor, 2022).

Tabela 16: Valores médios diários 26/04/2022.

Grandezas	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	230,35	230,59	230,75
Correntes [A]	107,894	116,077	122,995
Potências ativas [kW]	22,348	24,29	26,279
Potências reativas [kVAr]	10,848	11,211	10,702
Potências aparentes [kVA]	24,842	26,753	28,374
Fatores de potência	0,9	0,908	0,926

Fonte: (Autor, 2022).

Tabela 17: Valores médios diários 27/04/2022.

Grandezas	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	226,46	226,38	226,58
Correntes [A]	391,478	387,027	389,471
Potências ativas [kW]	84,221	82,878	84,447
Potências reativas [kVAr]	25,872	26,635	23,756
Potências aparentes [kVA]	88,105	87,053	87,725
Fatores de potência	0,956	0,952	0,963

Fonte: (Autor, 2022).

Tabela 18: Valores médios diários 28/04/2022.

Grandezas	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	226,77	226,65	226,85
Correntes [A]	462,98	447,409	451,151
Potências ativas [kW]	100,975	97,187	98,815
Potências reativas [kVAr]	27,841	28,02	25,685
Potências aparentes [kVA]	104,743	101,146	102,099
Fatores de potência	0,964	0,961	0,968

Fonte: (Autor, 2022).

Tabela 19: Valores médios diários 29/04/2022.

Grandezas	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	226,39	226,39	226,46
Correntes [A]	438,068	432,566	431,887
Potências ativas [kW]	95,413	93,817	94,429
Potências reativas [kVAr]	26,242	27,188	24,679
Potências aparentes [kVA]	98,956	97,677	97,6
Fatores de potência	0,964	0,96	0,967

Fonte: (Autor, 2022).

Tabela 20: Valores médios diários 30/04/2022.

Grandezas	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	226,03	225,94	226
Correntes [A]	440,9	433,762	436,836
Potências ativas [kW]	95,78	93,887	95,396
Potências reativas [kVAr]	26,626	27,146	24,555
Potências aparentes [kVA]	99,412	97,732	98,505
Fatores de potência	0,963	0,961	0,968

Fonte: (Autor, 2022).

Tabela 21: Valores médios diários 30/04/2022.

Grandezas	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	225,63	225,75	225,73
Correntes [A]	349,108	350,544	344,532
Potências ativas [kW]	75,848	76,039	74,916
Potências reativas [kVAr]	20,577	21,147	20,219
Potências aparentes [kVA]	78,59	78,925	77,597
Fatores de potência	0,965	0,963	0,965

Fonte: (Autor, 2022).

Observando os dados apresentados nas tabelas, é possível observar que a Fase B do sistema sempre possui um valor médio menor de fator de potência quando comparado as outras fases apresentadas.

Os dados obtidos quanto à distorção harmônica de tensão e corrente por fase são apresentados nos gráficos a seguir.

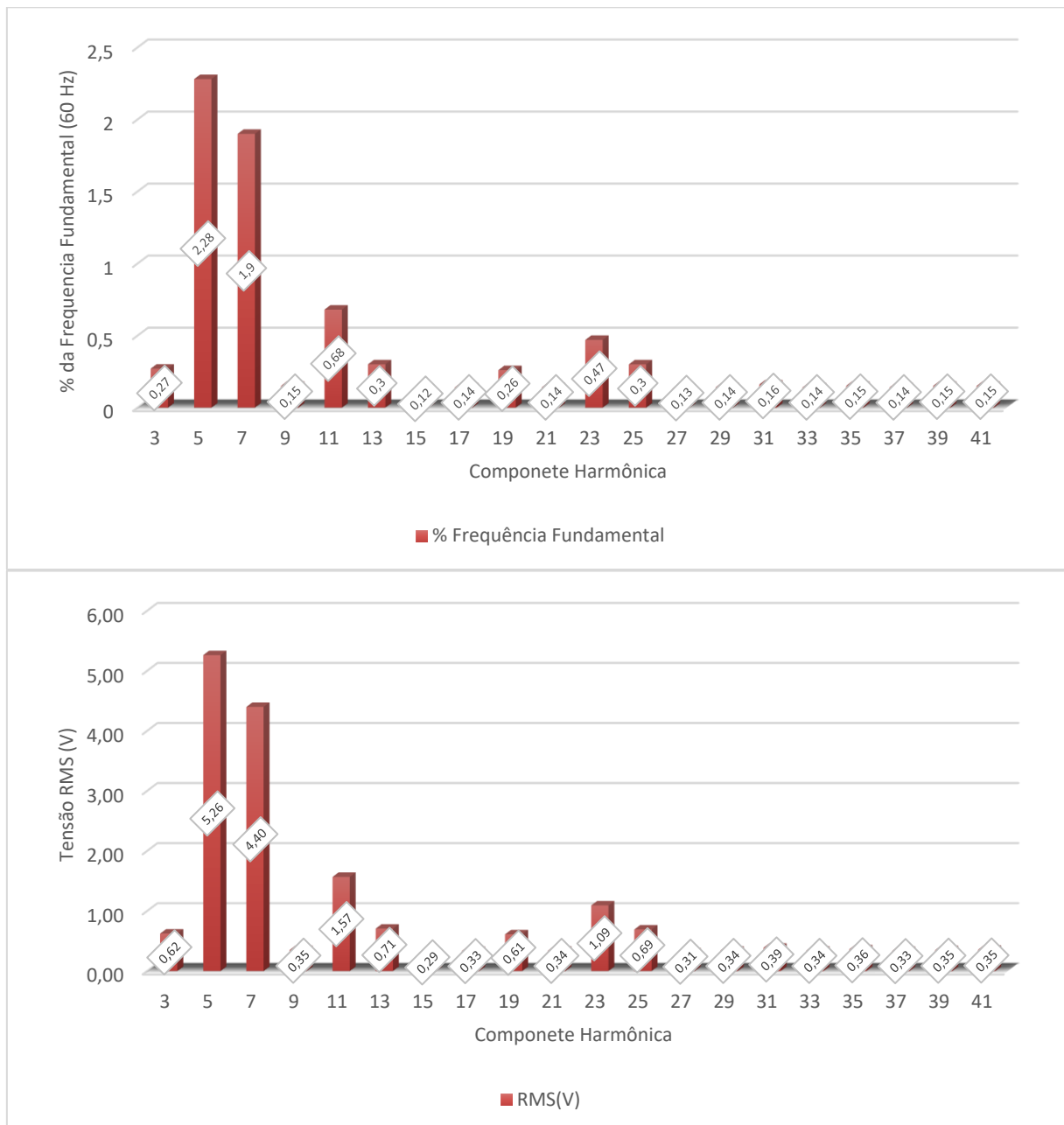
Foram analisados os registros com maior e menor potência em cada fase.

4.1.1 Fase A

Registro com potência mínima.

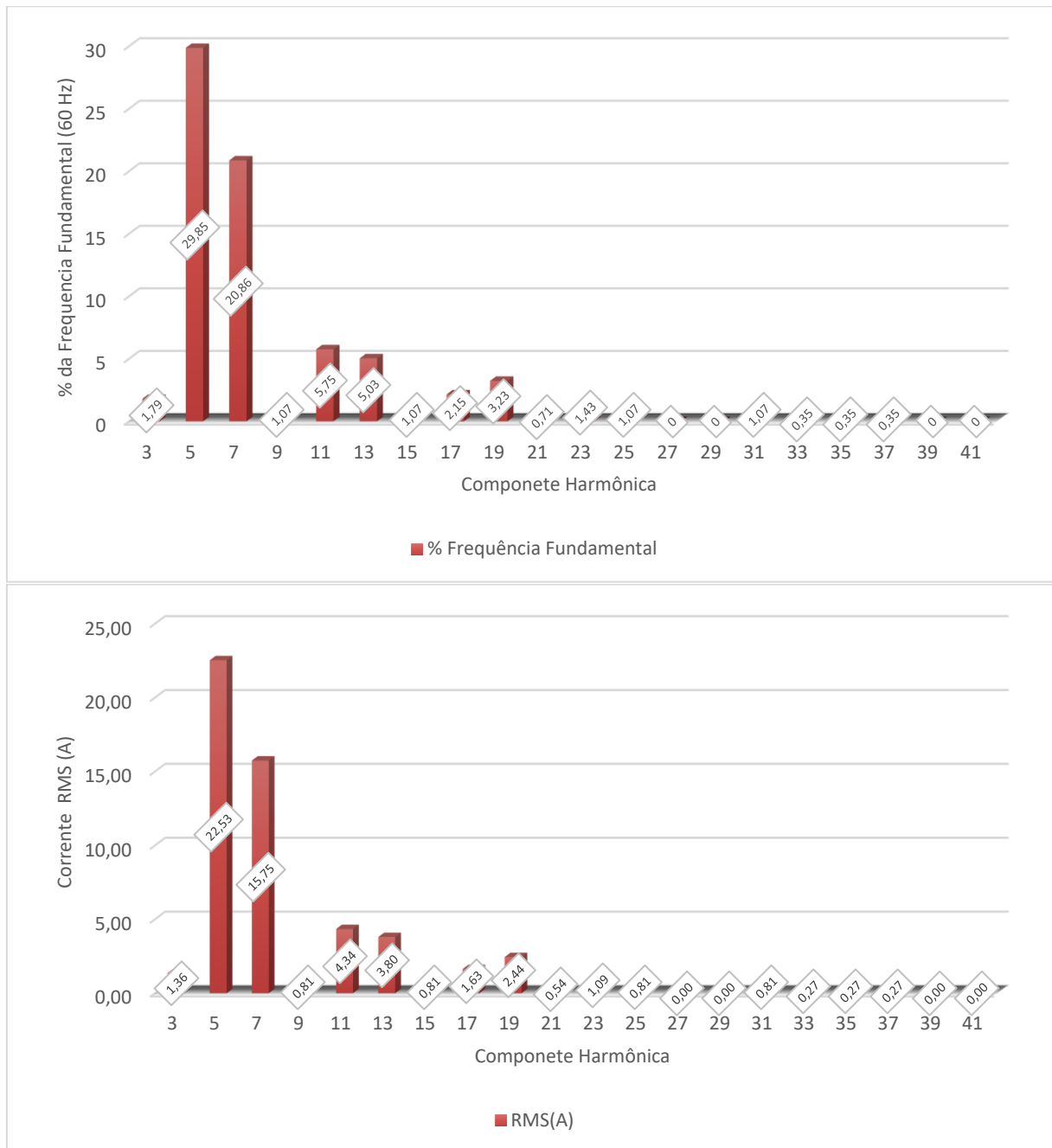
Tensão [V]	230,49
Corrente [A]	80,62
Potências ativa [kW]	16,37
Potências reativa [kVAr]	8,79
Potências aparente [kVA]	18,58
Fator de potência	0,881

Figura 11: Espectro harmônico de tensão - Fase A (Potência Mínima).



Fonte: (Autor, 2022).

Figura 12: Espectro harmônico de corrente - Fase A (Potência Mínima).

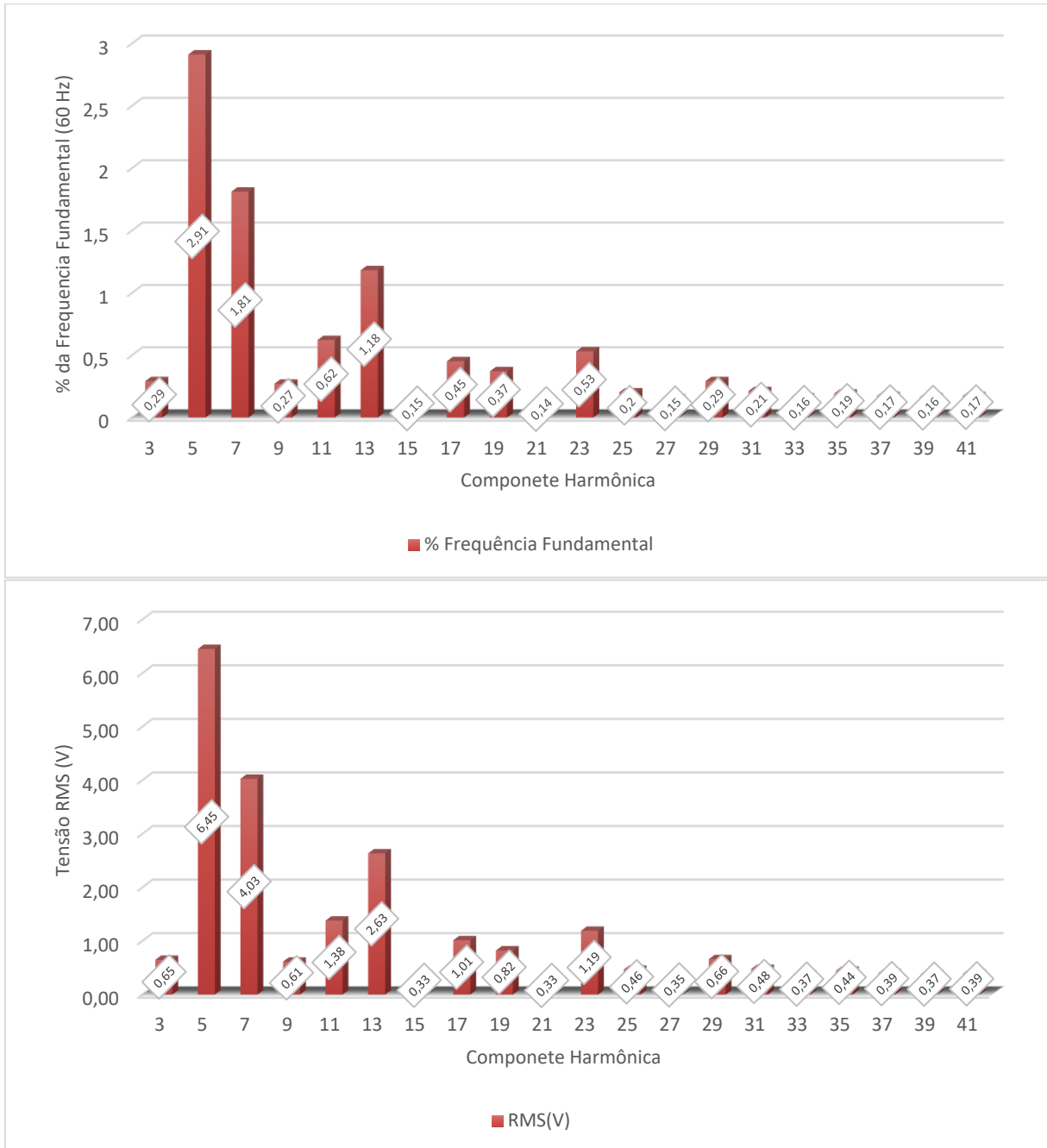


Fonte: (Autor, 2022).

Registro com potência máxima.

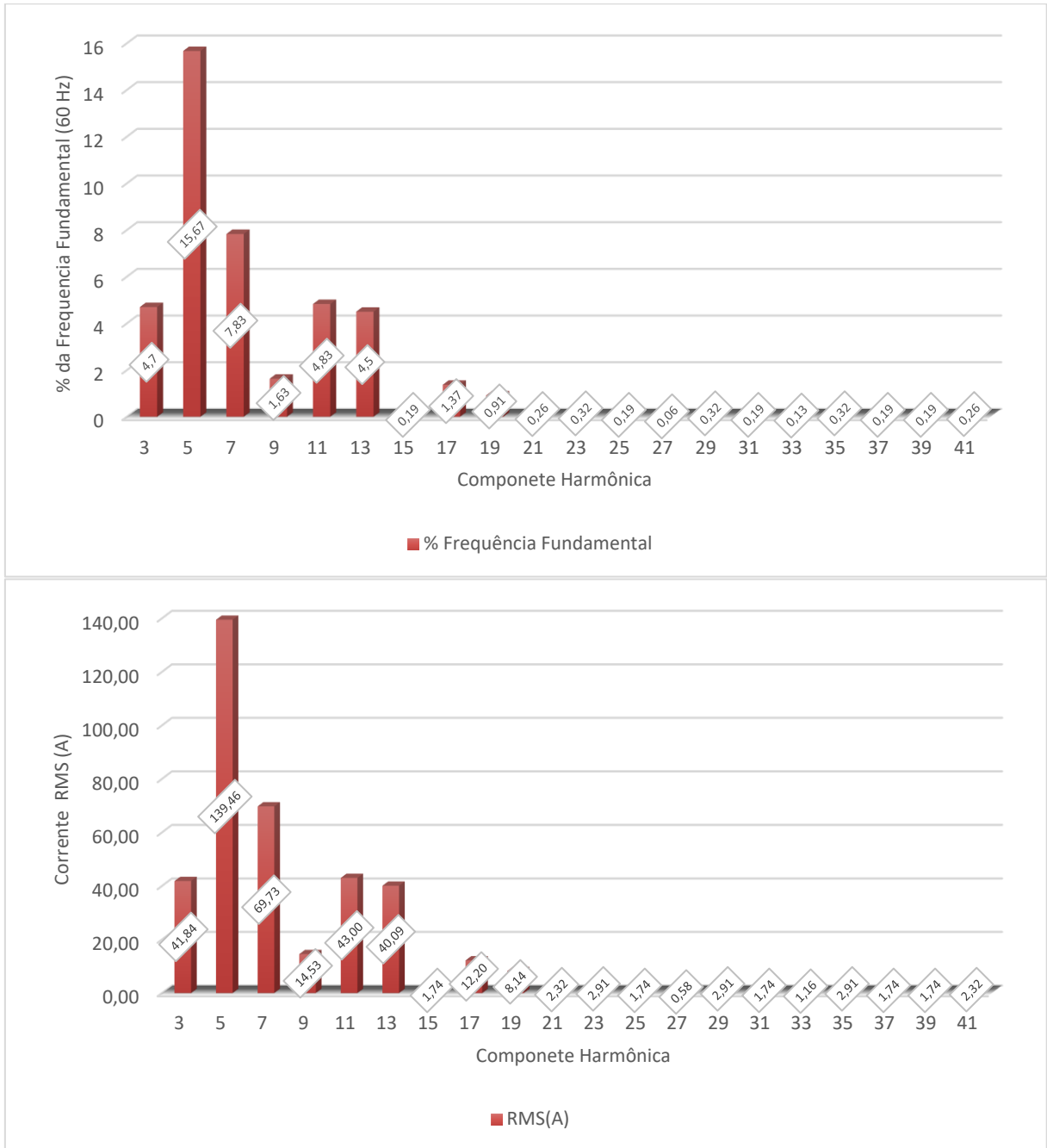
Tensão [V]	221,66
Corrente [A]	906,32
Potências ativa [kW]	190,66
Potências reativa [kVAr]	63,34
Potências aparente [kVA]	200,90
Fator de potência	0,949

Figura 13: Espectro harmônico de tensão - Fase A (Potência Máxima)



Fonte: (Autor, 2022).

Figura 14: Espectro harmônico de corrente - Fase A (Potência Máxima)



Fonte: (Autor, 2022).

Analisando-se as figuras 11 e 13, é possível verificar que a distorção harmônica total de tensão na fase A (DHT_A), atingiu 3,26 % com potência mínima e, 3,91% com potência máxima. A tensão RMS fundamental (60 Hz) ficou entre 230,37 V e 221,5 V, respectivamente.

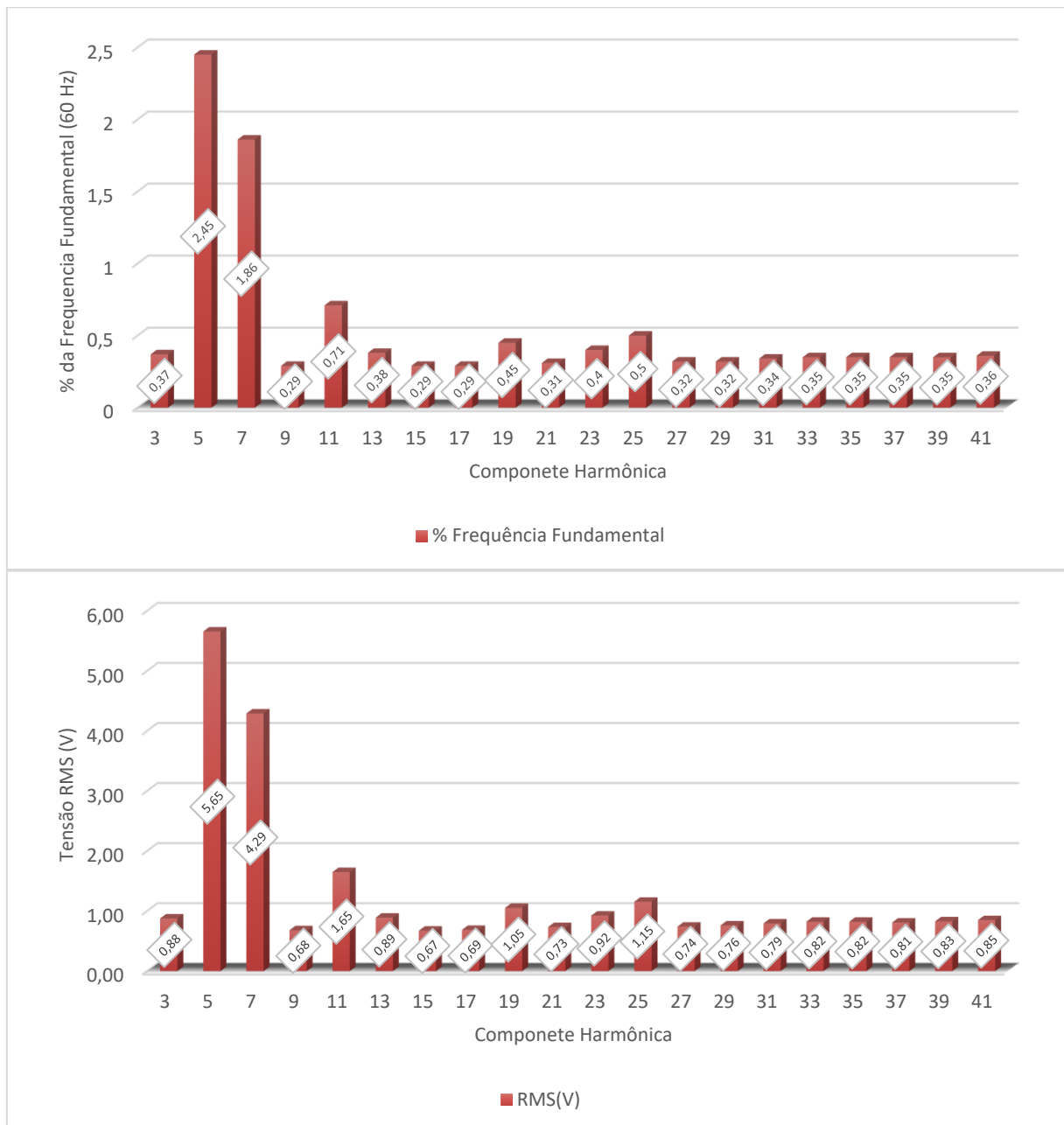
Para as distorções de corrente, observando-se as figuras 12 e 14, pode-se verificar distorções harmônicas totais de corrente na fase A (DHT_{iA}), de 37,91% com potência mínima e, 19,53% com potência máxima. A corrente fundamental (60 Hz) variou entre 75,47 A e 889,61 A, respectivamente.

4.1.2 Fase B

Registro com potência mínima.

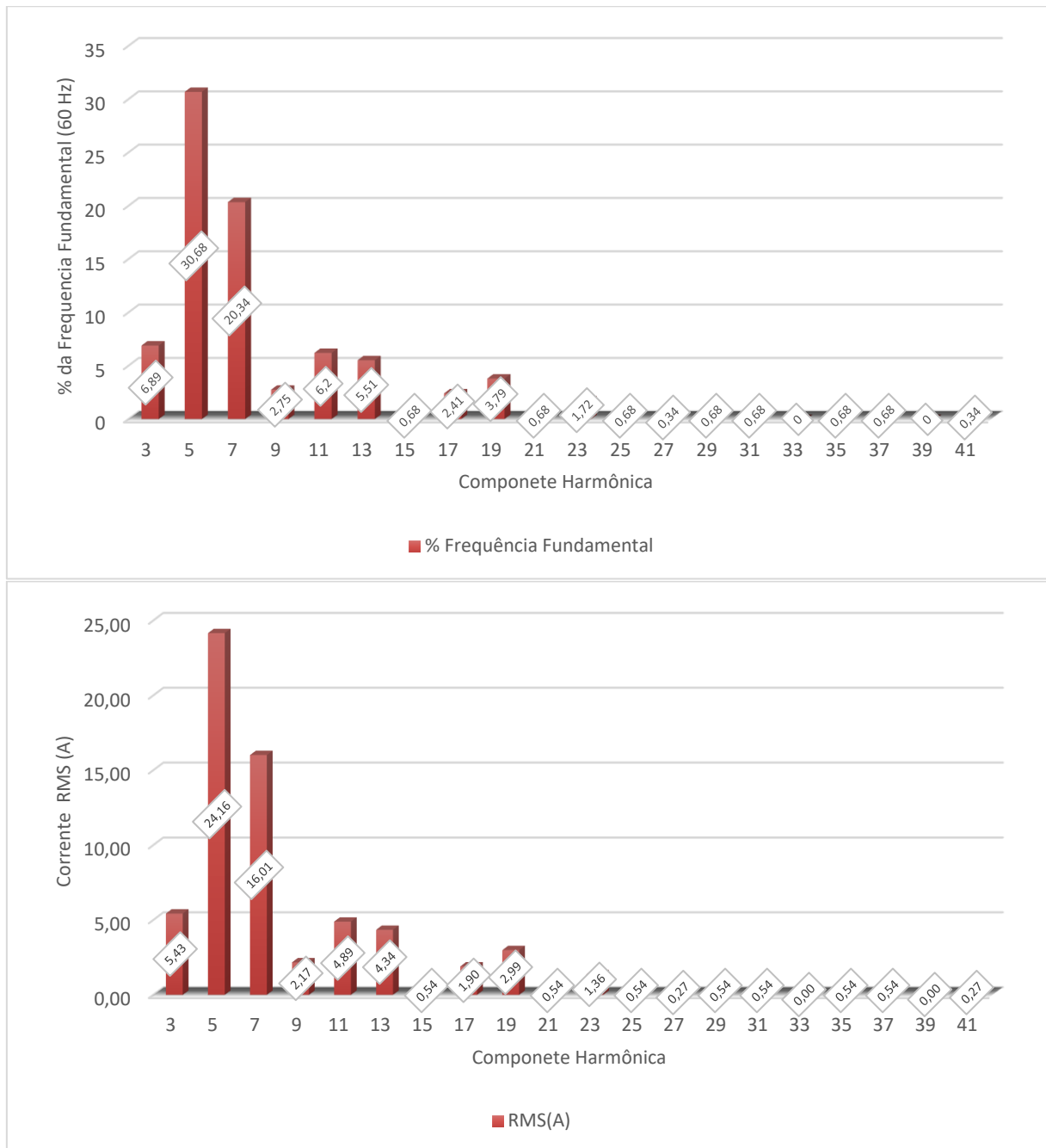
Tensão [V]	230,62
Corrente [A]	84,44
Potências ativa [kW]	17,14
Potências reativa [kVAr]	9,25
Potências aparente [kVA]	20,92
Fator de potência	0,881

Figura 15: Espectro harmônico de tensão - Fase B (Potência Mínima).



Fonte: (Autor, 2022).

Figura 16: Espectro harmônico de corrente - Fase B (Potência Mínima).

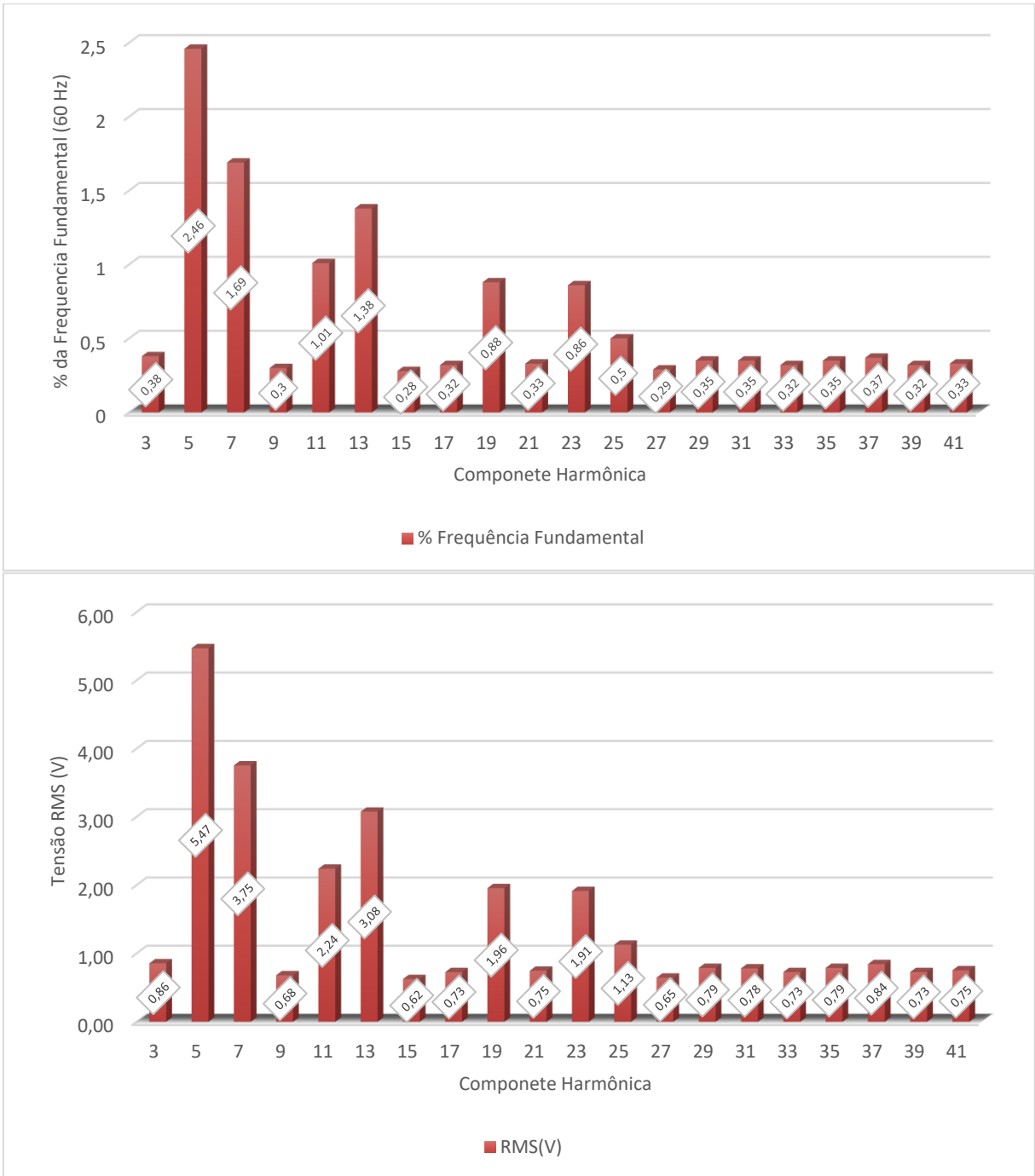


Fonte: (Autor, 2022).

Registro com potência máxima:

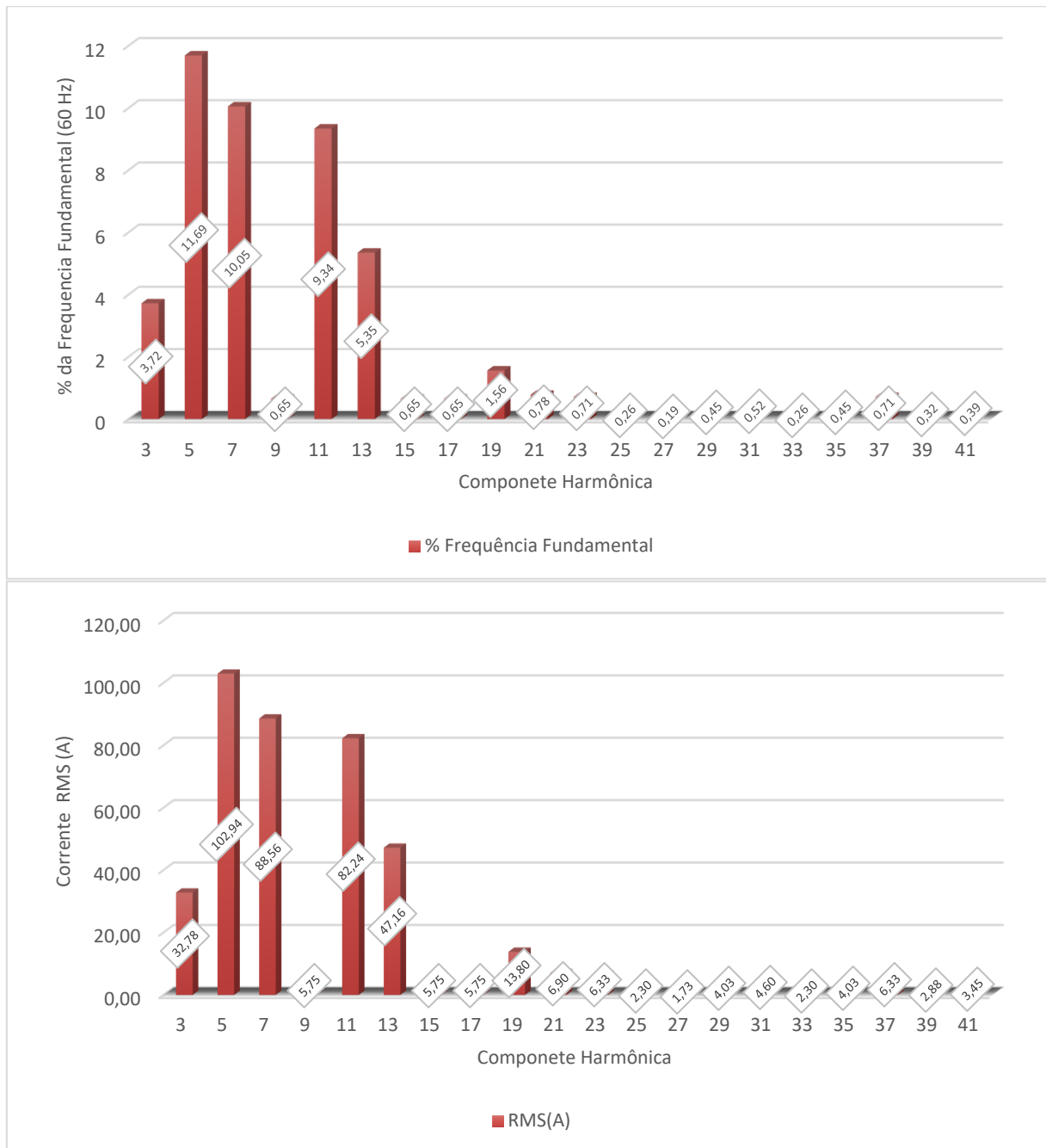
Tensão [V]	222,83
Corrente [A]	896,83
Potências ativa [kW]	181,84
Potências reativa [kVAr]	80,18
Potências aparente [kVA]	198,94
Fator de potência	0,914

Figura 17: Espectro harmônico de tensão - Fase B (Potência Máxima).



Fonte: (Autor, 2022).

Figura 18: Espectro harmônico de corrente - Fase B (Potência Máxima)



Fonte: (Autor, 2022).

Analisando-se as figuras 15 e 17, é possível verificar que a distorção harmônica total de tensão na fase B (DHT_B), atingiu 3,78 % com potência mínima e, 4,11% com potência máxima. A tensão RMS fundamental (60 Hz) ficou entre 230,46 V e 221,64 V, respectivamente.

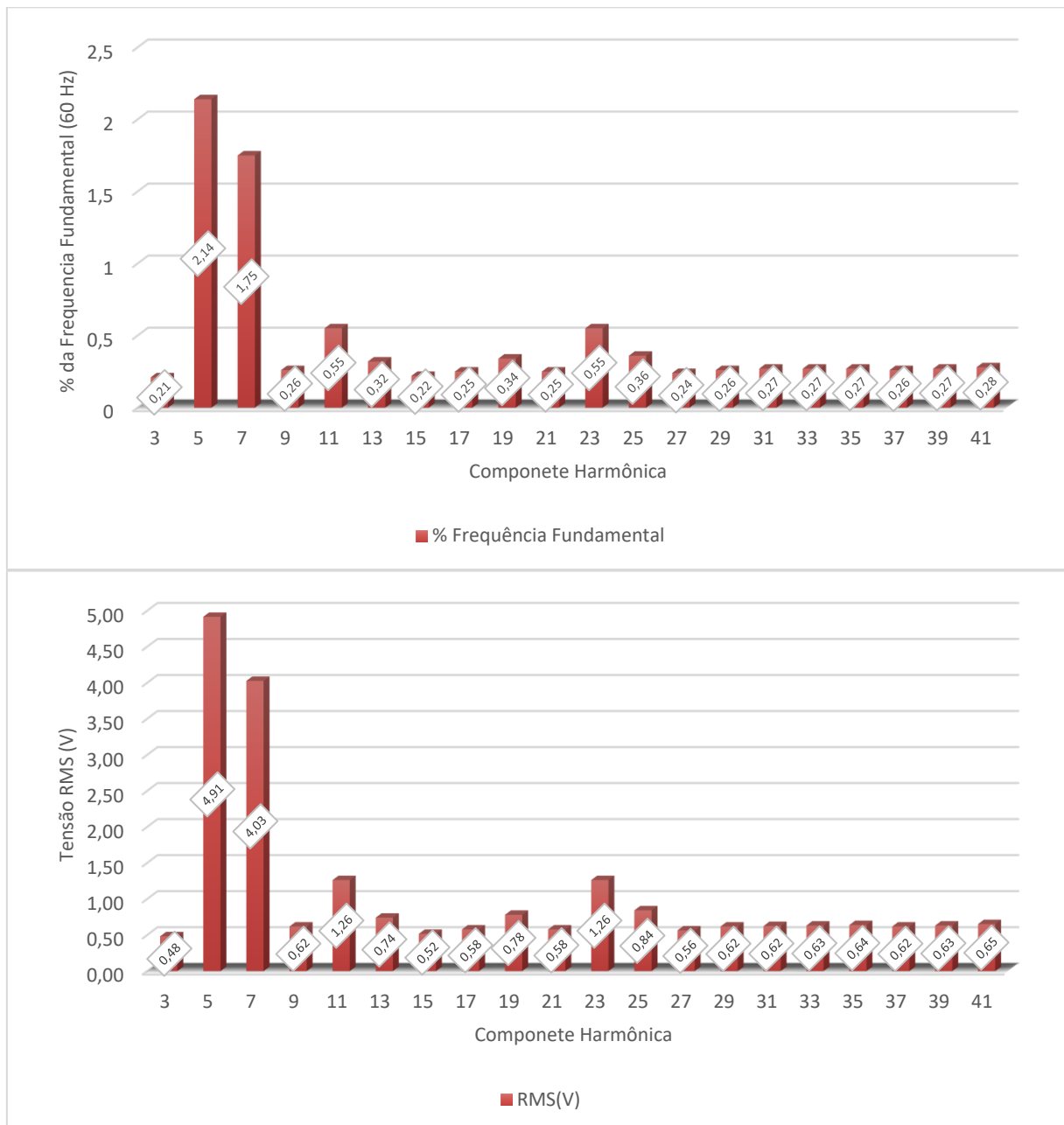
Para as distorções de corrente, observando-se as figuras 16 e 18, pode-se verificar distorções harmônicas totais de corrente na fase B (DHT_{iB}), de 39,16% com potência mínima e, 19,47% com potência máxima. A corrente fundamental (60 Hz) variou entre 78,71 A e 880,46A, respectivamente.

4.1.3 Fase C

Registro com potência mínima.

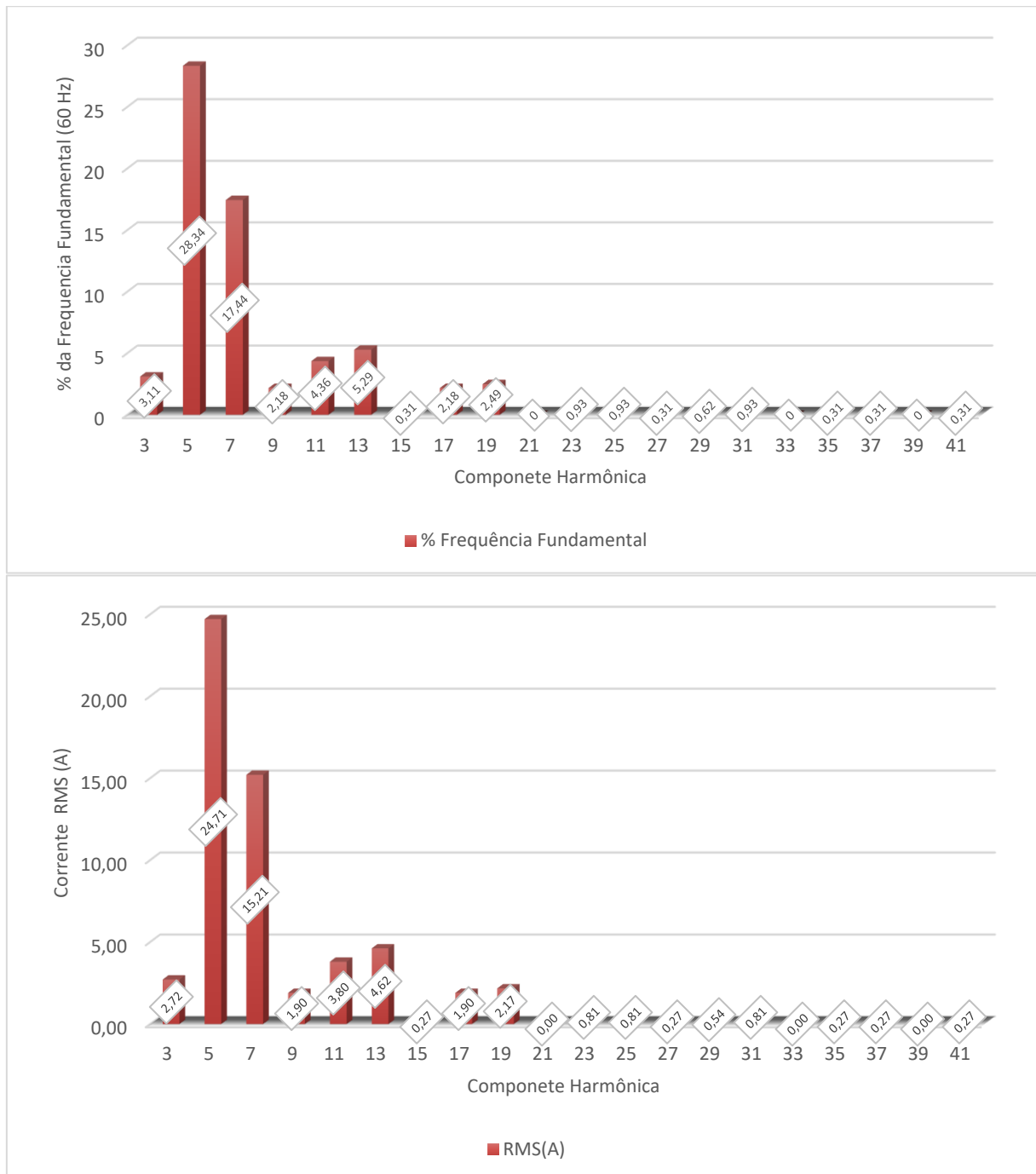
Tensão [V]	229,46
Corrente [A]	92,18
Potências ativa [kW]	19,49
Potências reativa [kVAr]	8,19
Potências aparente [kVA]	21,14
Fator de potência	0,922

Figura 19: Espectro harmônico de tensão - Fase C (Potência Mínima).



Fonte: (Autor, 2022).

Figura 20: Espectro harmônico de corrente - Fase C (Potência Mínima).

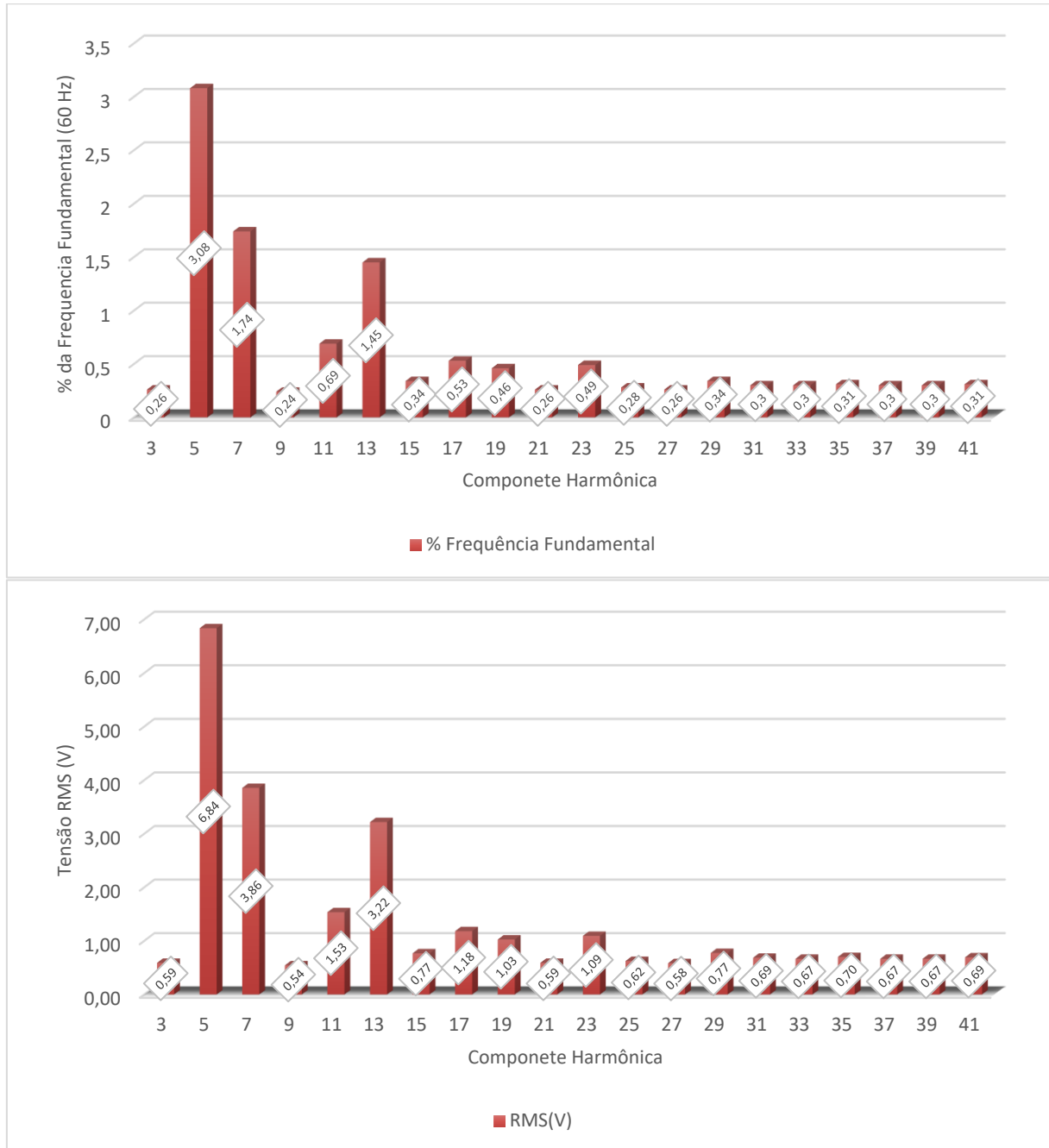


Fonte: (Autor, 2022).

Registro com potência máxima:

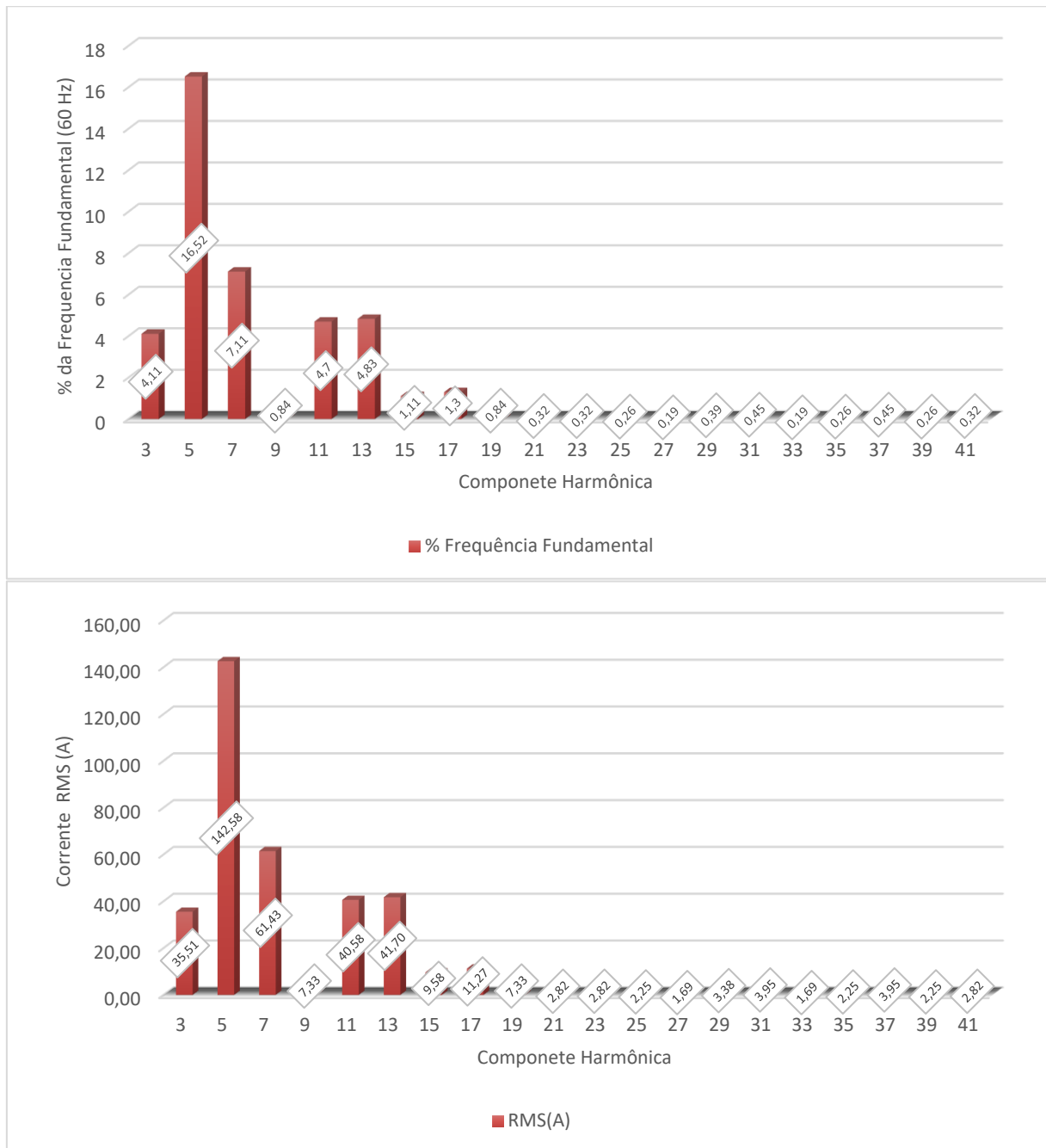
Tensão [V]	221,58
Corrente [A]	879,59
Potências ativa [kW]	185,35
Potências reativa [kVAr]	60,26
Potências aparente [kVA]	194,9
Fator de potência	0,959

Figura 21: Espectro harmônico de tensão - Fase C (Potência Máxima).



Fonte: (Autor, 2022).

Figura 22: Espectro harmônico de corrente - Fase C (Potência Máxima).



Fonte: (Autor, 2022).

Analisando-se as figuras 19 e 21, é possível verificar que a distorção harmônica total de tensão na fase C (DHT_C), atingiu 3,28 % com potência mínima e, 4,30% com potência máxima. A tensão RMS fundamental (60 Hz) ficou entre 229,35 V e 221,38 V, respectivamente.

Para as distorções de corrente, observando-se as figuras 20 e 22, pode-se verificar distorções harmônicas totais de corrente na fase C (DHT_{iC}), de 34,61% com potência mínima e, 19,20% com potência máxima. A corrente fundamental (60 Hz) variou entre 87,16 A e 862,82 A, respectivamente.

Para facilitar o entendimento dos dados, foi obtido um relatório geral dos valores de distorções harmônicas de tensão e corrente do sistema em cada fase.

Nos valores obtidos na fase A, pode-se observar que os registros de DHT variaram entre o valor mínimo de 2,28% e máximo de 5,63% durante o período analisado. Por verificação é possível observar que o máximo valor não atingiu o limite estabelecido pelo PRODIST, de DTT95% de 10%.

Figura 23: Relatório global de harmônicos de tensão - Fase A.

```
EMBRASUL BPNH N.S:72000281 V.S.2,00 ANL 5,37 (10 minutos)

Relatório Global de harmônicas
Os valores de máximos e mínimos exibidos são os primeiros
a serem localizados no arquivo.

Sinal considerado: Tensão - fase A
Número total de registros      22697

Registro com maior DHT
Registro 12700 09:57:42,00 de 24/04/2022
DHT calculada: 5,63 %
Registro com menor DHT
Registro 22563 06:20:15,00 de 01/05/2022
DHT calculada: 2,28 %

Registro com maior no. de componentes
Registro 1 14:10:29,00 de 15/04/2022
Número de componentes harmônicas 25
Registro com menor no. de componentes
Registro 1 14:10:29,00 de 15/04/2022
Número de componentes harmônicas 25

Registro com harmônica de mais alta ordem
Registro 1 14:10:29,00 de 15/04/2022
Harmônica de mais alta ordem 41
```

Fonte: (Autor, 2022).

Nos valores obtidos na fase B, de maneira análoga a fase A, pode-se observar que os registros de DHT variaram entre o valor mínimo de 2,36% e máximo de 5,28% durante o período analisado. Assim como na fase A, por verificação, é possível observar que o máximo valor não atingiu o limite estabelecido pelo PRODIST, de DTT95% de 10%.

Figura 24: Relatório global de harmônicos de tensão - Fase B.

EMBRASUL BPNH N.S:72000281 V.S.2,00 ANL 5,37 (10 minutos)

Relatório Global de harmônicas
Os valores de máximos e mínimos exibidos são os primeiros a serem localizados no arquivo.

Sinal considerado: Tensão - fase B
Número total de registros 22697

Registro com maior DHT
Registro 2686 10:55:29,00 de 17/04/2022
DHT calculada: 5,28 %
Registro com menor DHT
Registro 22561 06:18:15,00 de 01/05/2022
DHT calculada: 2,36 %

Registro com maior no. de componentes
Registro 1 14:10:29,00 de 15/04/2022
Número de componentes harmônicas 25
Registro com menor no. de componentes
Registro 1 14:10:29,00 de 15/04/2022
Número de componentes harmônicas 25

Registro com harmônica de mais alta ordem
Registro 1 14:10:29,00 de 15/04/2022
Harmônica de mais alta ordem 41

Fonte: (Autor, 2022).

Nos valores obtidos na fase C, de maneira análoga as outras duas fases analisadas, pode-se observar que os registros de DHT variaram entre o valor mínimo de 2,51% e máximo de 5,65% durante o período analisado. Assim como na fase anteriores, por verificação, é possível observar que o máximo valor não atingiu o limite estabelecido pelo PRODIST, de DTT95% de 10%.

Figura 25: Relatório global de harmônicos de tensão - Fase C.

EMBRASUL BPNH N.S:72000281 V.S.2,00 ANL 5,37 (10 minutos)

Relatório Global de harmônicas
Os valores de máximos e mínimos exibidos são os primeiros a serem localizados no arquivo.

Sinal considerado: Tensão - fase C
Número total de registros 22697

Registro com maior DHT
Registro 12700 09:57:42,00 de 24/04/2022
DHT calculada: 5,65 %
Registro com menor DHT
Registro 22559 06:16:15,00 de 01/05/2022
DHT calculada: 2,51 %

Registro com maior no. de componentes
Registro 1 14:10:29,00 de 15/04/2022
Número de componentes harmônicas 25
Registro com menor no. de componentes
Registro 1 14:10:29,00 de 15/04/2022
Número de componentes harmônicas 25

Registro com harmônica de mais alta ordem
Registro 1 14:10:29,00 de 15/04/2022
Harmônica de mais alta ordem 41

Fonte: (Autor, 2022).

Por meio desses relatórios é possível constatar se é necessário ser aplicado algum tipo de técnica de mitigação de harmônicos ou se o sinal presente na instalação elétrica está de acordo as normas adotadas. Pode-se observar que a fase C apresenta a maior distorção harmônica total de tensão medida ao longo do período de amostragem (5,65%), no dia 24/04/2022. As fases A e B apresentaram seu valor máximo de distorções harmônicas totais de tensão nos dias 17/04/2022 e 24/04/2022, respectivamente.

Nas distorções harmônicas de corrente, para os valores na fase A, pode-se observar que os registros extremos de DHT foram de 7,28% e 44,13% durante o período analisado. Conforme o módulo 8 do PRODIST, não há limites especificados para distorção de corrente. Para realizar a avaliação desses valores, foi utilizado como base o padrão IEEE Std 519. Onde, para tensões entre 120 V e 69 kV o limite para um $ISC/IL > 1000$ é de 20%, podendo ser inferior de acordo com as correntes nominais e de curto circuito do sistema. O cenário estudado está acima dos valores aceitáveis, segundo a norma IEEE.

Figura 26: Relatório global de harmônicos de corrente - Fase A.

```

EMBRASUL BPNH N.S:72000281 V.S.2,00 ANL 5,37 (10 minutos)

Relatório Global de harmônicas
Os valores de máximos e mínimos exibidos são os primeiros
a serem localizados no arquivo.

Sinal considerado: Corrente - fase A
Número total de registros      22697

Registro com maior DHT
Registro 5373  07:42:29,00 de 19/04/2022
DHT calculada: 44,13 %
Registro com menor DHT
Registro 13583  00:40:42,00 de 25/04/2022
DHT calculada: 7,28 %

Registro com maior no. de componentes
Registro 1  14:10:29,00 de 15/04/2022
Número de componentes harmônicas 25
Registro com menor no. de componentes
Registro 1  14:10:29,00 de 15/04/2022
Número de componentes harmônicas 25

Registro com harmônica de mais alta ordem
Registro 1  14:10:29,00 de 15/04/2022
Harmônica de mais alta ordem 41

```

Fonte: (Autor, 2022).

Nos valores obtidos na fase B, semelhante à fase A, podem ser observados registros extremos de DHT de 6,98% e 48,04% durante o período analisado, valores que estão acima do limite de acordo com IEEE Std 519.

Figura 27: Relatório global de harmônicos de corrente - Fase B.

EMBRASUL BPNH N.S:72000281 V.S.2,00 ANL 5,37 (10 minutos)

Relatório Global de harmônicas
Os valores de máximos e mínimos exibidos são os primeiros a serem localizados no arquivo.

Sinal considerado: Corrente - fase B
Número total de registros 22697

Registro com maior DHT
Registro 5373 07:42:29,00 de 19/04/2022
DHT calculada: 48,04 %
Registro com menor DHT
Registro 14461 15:18:42,00 de 25/04/2022
DHT calculada: 6,98 %

Registro com maior no. de componentes
Registro 1 14:10:29,00 de 15/04/2022
Número de componentes harmônicas 25
Registro com menor no. de componentes
Registro 1 14:10:29,00 de 15/04/2022
Número de componentes harmônicas 25

Registro com harmônica de mais alta ordem
Registro 1 14:10:29,00 de 15/04/2022
Harmônica de mais alta ordem 41

Fonte: (Autor, 2022).

Nos valores obtidos na fase C, de maneira análoga as duas fases analisadas anteriormente, podem ser observados registros extremos de DHT de 7,61% e 42,43% durante o período analisado, ultrapassando os limites da IEEE Std 519.

Figura 28: Relatório global de harmônicos de corrente - Fase C.

EMBRASUL BPNH N.S:72000281 V.S.2,00 ANL 5,37 (10 minutos)

Relatório Global de harmônicas
Os valores de máximos e mínimos exibidos são os primeiros a serem localizados no arquivo.

Sinal considerado: Corrente - fase C
Número total de registros 22697

Registro com maior DHT
Registro 5593 11:22:29,00 de 19/04/2022
DHT calculada: 42,43 %
Registro com menor DHT
Registro 14461 15:18:42,00 de 25/04/2022
DHT calculada: 7,61 %

Registro com maior no. de componentes
Registro 1 14:10:29,00 de 15/04/2022
Número de componentes harmônicas 25
Registro com menor no. de componentes
Registro 1 14:10:29,00 de 15/04/2022
Número de componentes harmônicas 25

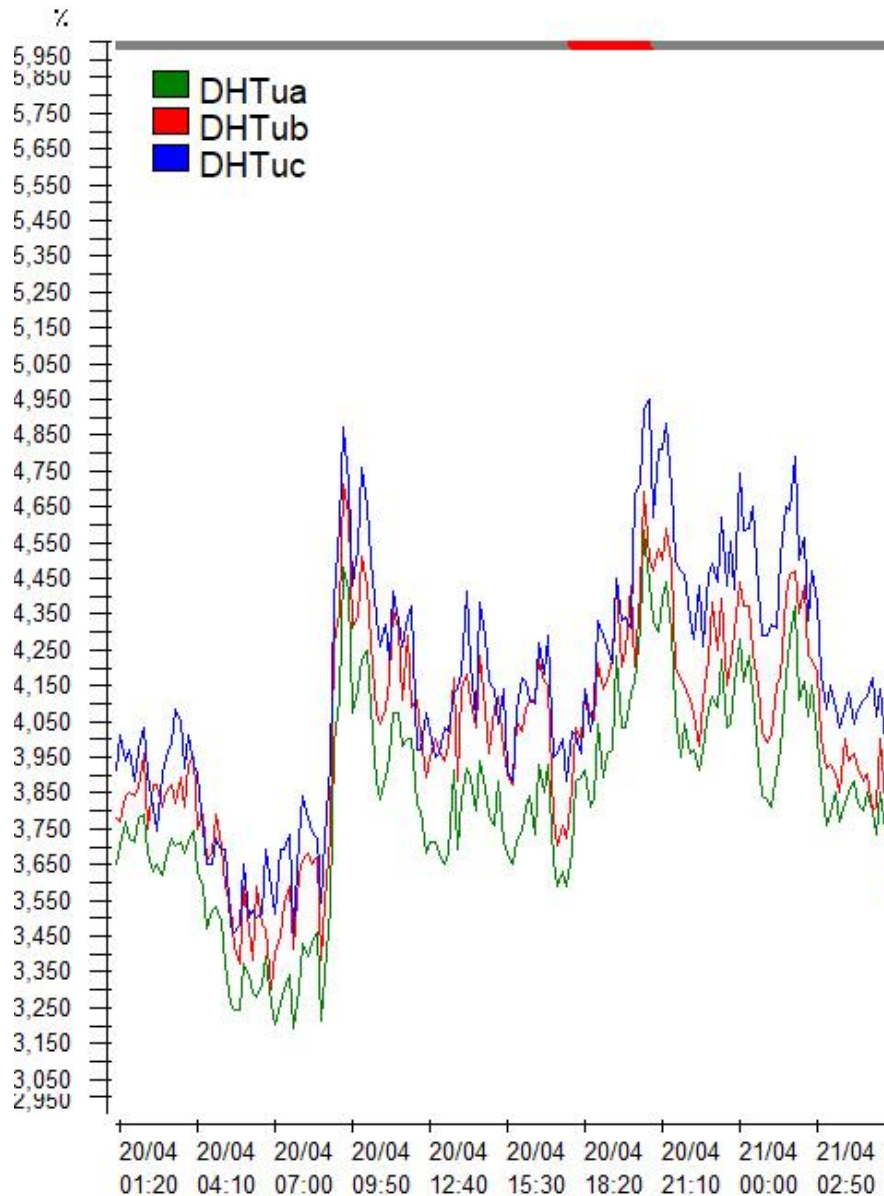
Registro com harmônica de mais alta ordem
Registro 1 14:10:29,00 de 15/04/2022
Harmônica de mais alta ordem 41

Fonte: (Autor, 2022).

Com esses dados, pode-se observar que a distorção de corrente total nas fases A e B tem o maior valor em 19/04/2022, no mesmo horário, e para a fase C, o valor máximo da distorção harmônica de corrente total também ocorre em 19/04/2022, porém, em um momento diferente das demais fases.

Para observar como se comportam as distorções totais de tensão e de corrente do circuito elétrico em questão, foi plotado um gráfico com período de amostragem reduzido, aproximadamente 24 horas, em relação ao total que foi medido, pois a visualização do gráfico com o período total ficaria de difícil visualização.

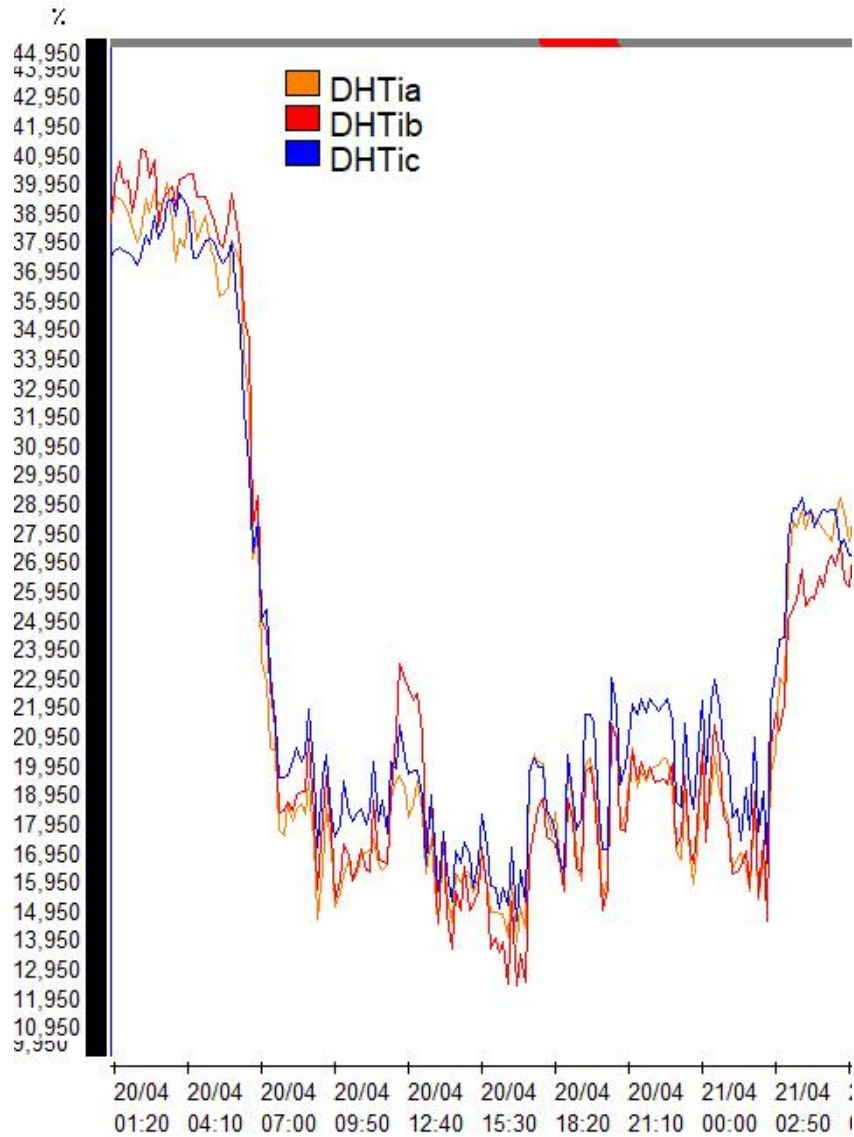
Figura 29: Distorção de tensão nas fases.



Fonte: (Autor, 2022).

A Figura 29 mostra o comportamento das distorções de tensão para as três fases ao longo do tempo, em um período de aproximadamente 24 horas.

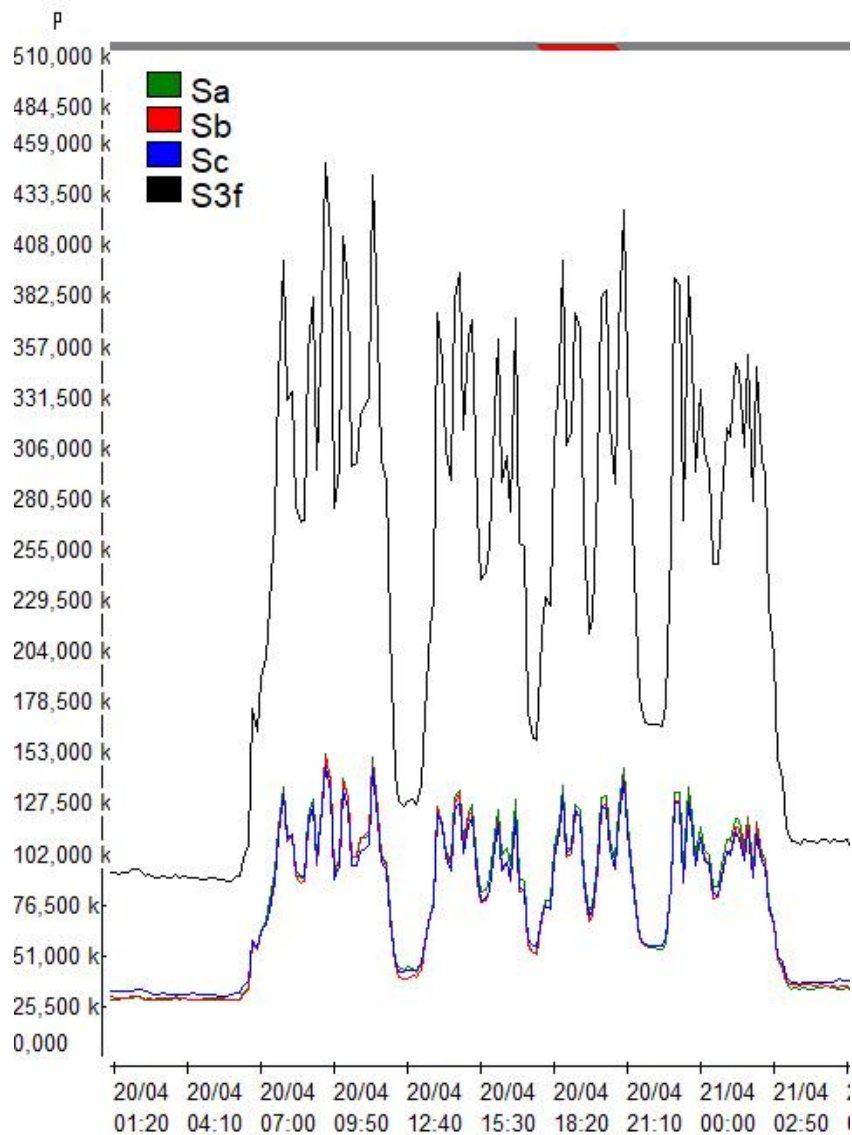
Figura 30: Distorção de corrente nas fases.



Fonte: (Autor, 2022).

A Figura 30, de maneira análoga à Figura 29, mostra o comportamento das distorções harmônicas de corrente das três fases durante o mesmo período de amostragem. Também foi obtido um gráfico envolvendo a potência aparente requerida pela indústria, mostrando que seu comportamento é muito semelhante ao das curvas de distorção harmônica de tensão.

Figura 31: Potência aparente



Fonte: (Autor, 2022).

Observou-se que os gráficos referentes a demanda de potência aparente e a distorção harmônica total de tensão do sistema são bem semelhantes, sendo diretamente proporcionais, analisando-se a potência aparente e a distorção harmônica total de corrente, observa-se que seu comportamento é inversamente proporcional.

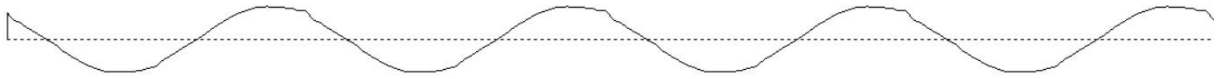
Por fim, o software disponibilizou as características das formas de onda de tensão e corrente do sistema elétrico. Para apresentar tal função, será exibido os sinais de tensão encontrados no dia 20/04/2020, para as três fases, podendo ser visível assim a distorção do sinal da senoide fundamental.

Figura 32: Formas de ondas de tensão distorcidas.

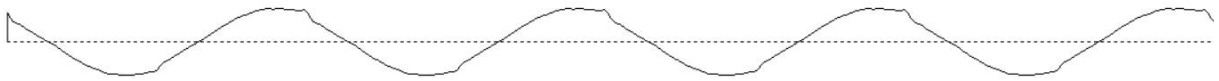
EMBRASUL BPNH N.S:72000281 V.S.2,00 ANL 5,37 (1 minuto)
Sinal de Tensão - fase A



Sinal de Tensão - fase B



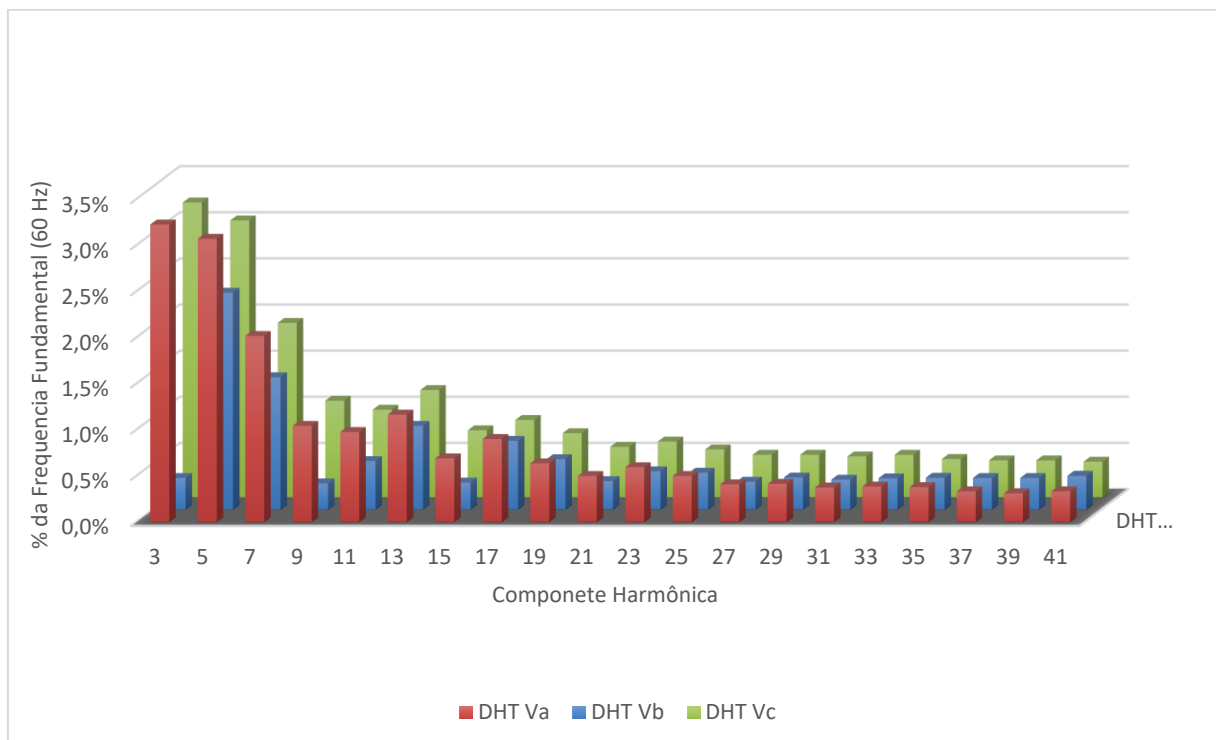
Sinal de Tensão - fase C



Fonte: (Autor, 2022).

Na Figura 32, apresenta-se quatro ciclos da forma de onda de tensão presentes na instalação. Pode-se observar uma pequena distorção quando comparada a uma onda senoidal pura, exibindo graficamente os valores de distorção encontrados nos relatórios apresentados anteriormente por fase.

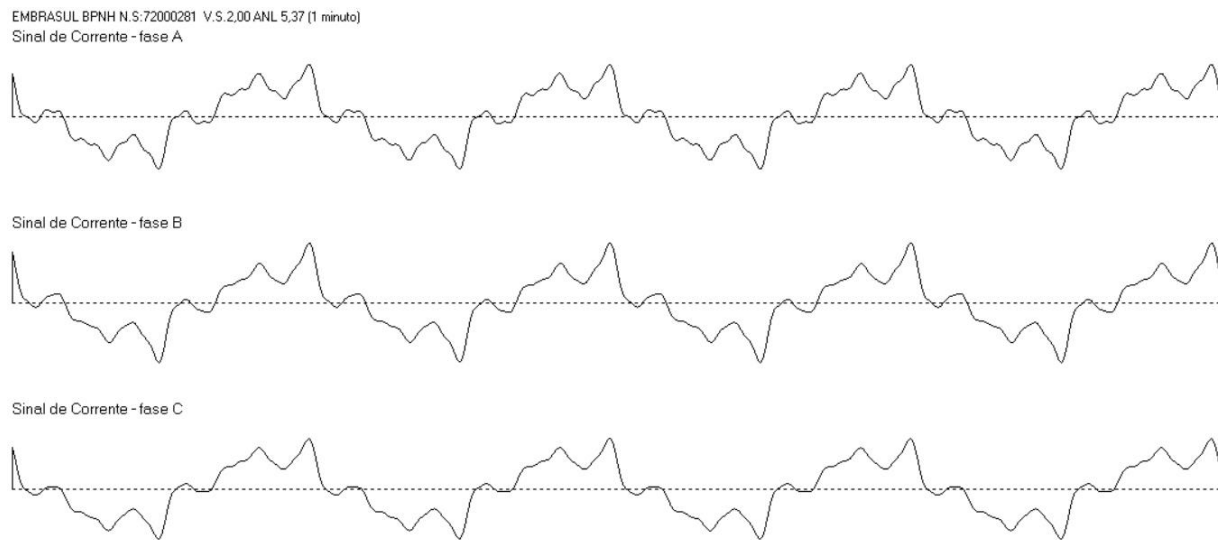
Figura 33: Espectro harmônico da Figura 32.



Fonte: (Autor, 2022).

Analisando as Figuras 32 e 33, pode-se visualizar com clareza a relação do espectro harmônico do um sinal analisado com sua distorção real na rede. A mesma análise será apresentada para os sinais de corrente do sistema, obtendo as formas de ondas e espectro harmônico para as três fases do circuito.

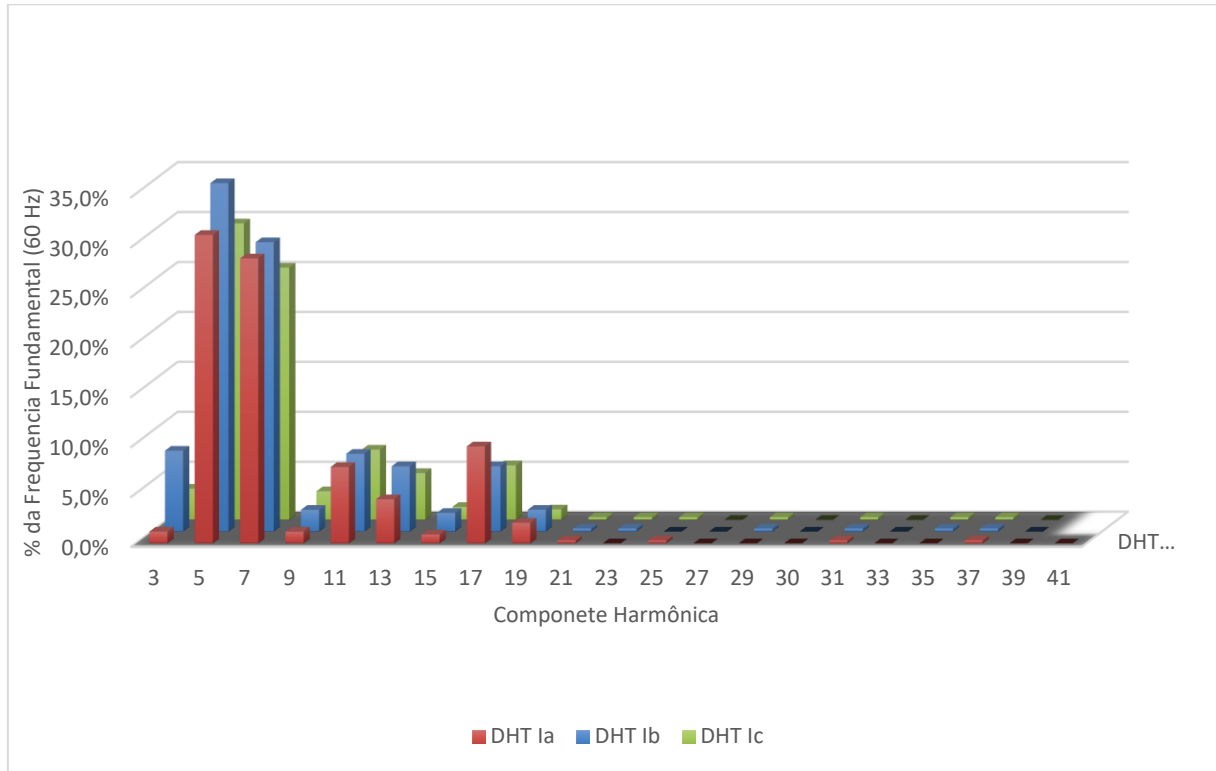
Figura 34: Formas de ondas de corrente distorcidas.



Fonte: (Autor, 2022).

Nesse caso, pode-se observar que as distorções harmônicas totais de corrente apresentam um valor muito superior aos valores encontrados para os sinais de tensão. Para comprovar isso, foi verificado o espectro harmônico para os sinais de corrente das três fases, conforme a Figura 35. Fica comprovado que o sinal obtido na Figura 34 apresenta uma distorção harmônica total muito maior para o sinal de corrente do que o sinal de tensão (Figura 32).

Figura 35: Espectro harmônico da Figura 34.



Fonte: (Autor, 2022).

5 PROJETO DO FILTRO DESSINTONIZADO

Com intuito de reduzir os níveis de distorções harmônicas apresenta-se o cálculo de um filtro de harmônicas sintonizado, que são construídos especificamente para filtrar uma harmônica perturbadora, absorvendo assim um percentual muito grande da ordem harmônica selecionada. O filtro dessintonizado também faz correção de fator de potência, porém sua principal função é eliminar a harmônica perturbadora que foi selecionada para filtragem.

Devido à grande quantidade de corrente harmônica drenada, seus componentes são projetados para suportar grandes esforços elétricos, sem perder as características de projeto, mantendo a filtragem das harmônicas por um longo tempo dentro dos limites projetados. Tipicamente é sintonizado para eliminar a 5ª harmônica.

Para o estudo está sendo proposto substituir o banco de capacitores existente de 500 kVAr por um filtro dessintonizado de mesma potência.

5.1 Dimensionamento

A equação (5.1) apresenta o método para o cálculo do fator de dessintonia (FD). Segundo Lemes (2010), quanto menor o fator de dessintonia maior a frequência de ressonância entre o indutor e o capacitor, isso mostra que estamos mais próximo da harmônica característica do sistema.

$$FD = \frac{Z_L}{Z_C} = \frac{2\pi fL}{\frac{1}{2\pi fC}} = 4\pi^2 f^2 * L * C \quad (5.1)$$

Onde:

FD – Fator de dessintonia;

Z_L – Impedância indutiva (ohms);

Z_C – Impedância capacitiva (ohms);

f – Frequência fundamental (Hz);

L – Indutância (Henry);

C – Capacitância (Faraday);

Os fatores de dessintonia mais utilizados são $FD=0,07$ (227 Hz) e $FD=0,14$ (160 Hz). Caso nenhuma dessas frequências se enquadre no projeto é possível construir sob encomenda reatores para esta aplicação, porém o custo será mais elevado.

Com a instalação de um reator em série com o capacitor existe uma elevação de tensão permanente no capacitor, ou seja, os capacitores aplicados sem filtro de dessintonia e dimensionados para a tensão nominal da rede não poderão ser utilizados em sistemas anti-ressonantes para a mesma instalação.

A equação (5.2) apresenta a tensão nos terminais do capacitor do filtro de dessintonia.

$$V_{cap} = \frac{V_{rede}}{1 - FD} \quad (5.2)$$

Onde:

V_{cap} – Tensão no capacitor (Volts);

V_{rede} – Tensão de linha (Volts);

É necessário verificar primeiramente a tensão que surgirá nos terminais dos capacitores com a inserção do reator de dessintonia em série, utilizando fator de dessintonia de 7 % (0,07).

$$V_{cap} = \frac{380}{1 - 0,07} = 408,6 \text{ V}$$

Portanto, o banco de capacitores atual deverá ser substituído por um novo banco de capacitores, com a potência de 500 kVAr e suportar a tensão de 440 V. Na prática não é inserido um único reator em série com o banco de capacitores e sim um reator em série para cada estágio do banco. O novo banco de capacitores será composto por dois estágios de 25 kVAr e oito estágios de 50 kVAr em 440 V.

Como a tensão nominal dos capacitores é 440 V e eles serão ligados em uma rede 380 V, e tensão terminal nos bornes de capacitor $V_{cap} = 408,6 \text{ V}$, a potência nominal dos capacitores será reduzida, conforme equação (5.3).

5.1.1 Cálculo do filtro de 25 kVAr

$$P_{fe} = P_{cap} \cdot \frac{V_{cap}^2}{V_{Ncap}^2} \quad (5.3)$$

Onde:

P_{fe} – Potência final efetiva do capacitor (kVAr);

P_{cap} – Potência nominal do capacitor (kVAr);

V_{Ncap} – Tensão nominal do capacitor (Volts);

$$P_{fe} = 25 \cdot \frac{408,6^2}{440^2} = 21,55 \text{ kVAr}$$

Visto que, a potência final efetiva do capacitor (P_{fe}) ficou abaixo dos 25 kVAr determinados para cada um dos dois estágios do banco, é necessário refazer o cálculo com um capacitor de 30 kVAr, que é a próxima potência comercial.

$$P_{fe} = 30 \cdot \frac{408,6^2}{440^2} = 25,87 \text{ kVAr}$$

Verifica-se, portanto, que a potência final efetiva do capacitor (P_{fe}) ficou em 25,87 kVAr, muito próximo do estipulado. Utilizando a equação (5.5) pode-se calcular qual o valor da indutância a ser inserida em série com o capacitor de 30 kVAr (P_{cap}) para dessintonizar o banco de capacitor. Para este cálculo é necessário conhecer a capacitância do banco de capacitor e o fator de dessintonia desejado. Para cálculo da capacitância foi utilizada a equação (5.4).

$$C = \frac{Q}{2 * \pi * f * V_{Ncap}^2} \quad (5.4)$$

Onde:

C – Capacitância (μF);

Q – Potência do capacitor (kVAr);

$$C = \frac{30.000}{2 * \pi * 60 * 440^2} = 411,04 \mu F$$

Equação da indutância do filtro.

$$L = \frac{FD}{4 * \pi^2 * f^2 * C} \quad (5.5)$$

Onde:

L – Indutância (mH);

$$L = \frac{0,07}{4 * \pi^2 * 60^2 * 411,04 \cdot 10^{-6}} = 1,198 mH$$

Para o cálculo da corrente do indutor (5.8), corrente no capacitor (5.9), é necessário encontrar as reatâncias do capacitor (5.6) e do indutor (5.7).

Equação da reatância no capacitor.

$$X_C = \frac{1}{2 * \pi * f * C} \quad (5.6)$$

Onde:

X_C – Reatância capacitiva (Ω);

$$X_C = \frac{1}{2 * \pi * 60 * 411,04 \cdot 10^{-6}} = 6,45 \Omega$$

Equação da reatância no indutor.

$$X_L = 2 * \pi * f * L \quad (5.7)$$

Onde:

X_L – Reatância indutiva (Ω);

$$X_L = 2 * \pi * f * 1,198 \cdot 10^{-3} = 0,45 \Omega$$

Cálculo corrente do indutor.

$$I_L = \frac{V_{rede}}{X_C - X_L} \quad (5.8)$$

Onde:

I_L – Corrente no indutor (A);

$$I_L = \frac{380}{6,45 - 0,45} = 63,33A$$

Cálculo corrente do capacitor.

$$I_C = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \quad (5.9)$$

Onde:

I_C – Corrente no capacitor (A);

$$I_C = \frac{63,33}{\sqrt{3}} = 36,56A$$

De posse desses dados é possível calcular a potência reativa do capacitor depois do filtro, mediante a equação (5.10)

$$P_f = P_{fe} - (X_L * I_L^2 * 0,001) \quad (5.10)$$

Onde:

P_f – Potência reativa depois do filtro (kVAr);

$$P_f = 25,87 - (0,45 * 63,33^2 * 0,001) = 24,06 \text{ kVAr}$$

Conseqüentemente, a potência reativa do capacitor que inicialmente foi estipulada em 25 kVAr, após o filtro, passa a ser de 24,06 kVAr, uma diferença de 3,77 %.

5.1.2 Cálculo do filtro de 50 kVAr

Aplicando a equação (5.3)

$$P_{fe} = 50 \cdot \frac{408,6^2}{440^2} = 43,12 \text{ kVAr}$$

Visto que, a potência final efetiva do capacitor (P_{fe}) ficou abaixo dos 50 kVAr determinados para cada um dos oito estágios do banco, é necessário refazer o cálculo com um capacitor de 60 kVAr, todavia, comercialmente não é comum encontrar capacitores nesta potência, isso posto, será necessário fazer uma associação em paralelo de dois bancos de capacitor de 30 kVAr.

$$P_{fe} = 60 \cdot \frac{408,6^2}{440^2} = 51,74 \text{ kVAr}$$

Verifica-se, portanto, que a potência final efetiva do capacitor (P_{fe}) ficou em 51,74 kVAr, muito próximo do estipulado. Para calcular da capacitância foi utilizada a equação (5.4).

$$C = \frac{60.000}{2 * \pi * 60 * 440^2} = 822,08 \mu F$$

Utilizando a equação (5.5) pode-se calcular qual o valor da indutância a ser inserida em série com o capacitor de 60 kVAr (P_{cap}) para dessintonizar o banco de capacitor.

$$L = \frac{0,07}{4 * \pi^2 * 60^2 * 822,08 \cdot 10^{-6}} = 0,599 \text{ mH}$$

Para encontrar as reatâncias do capacitor e do indutor foram aplicadas as equações (5.6) e (5.7), respectivamente.

$$X_C = \frac{1}{2 * \pi * 60 * 822,08 \cdot 10^{-6}} = 3,23 \Omega$$

$$X_L = 2 * \pi * f * 0,599 \cdot 10^{-3} = 0,225 \Omega$$

Aplicando as equações de corrente do indutor (5.8), corrente no capacitor (5.9), respectivamente, encontra-se:

$$I_L = \frac{380}{3,23 - 0,225} = 126,66A$$

$$I_C = \frac{126,66}{\sqrt{3}} = 73,13A$$

Utilizando a equação (5.10) para potência reativa do capacitor depois do filtro.

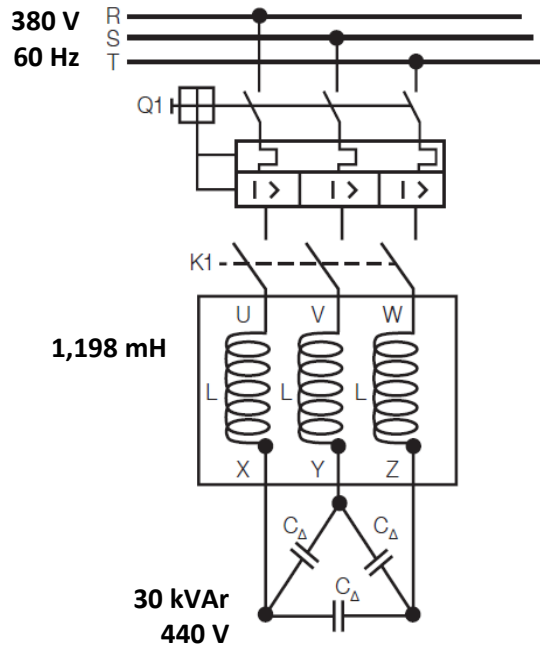
$$P_f = 51,74 - (0,225 * 126,66^2 * 0,001) = 48,13 \text{ kVAr}$$

Consequentemente, a potência reativa do capacitor que inicialmente foi estipulada em 50 kVAr, após o filtro, passa a ser de 48,13 kVAr, uma diferença de 3,77 %.

5.2 Considerações

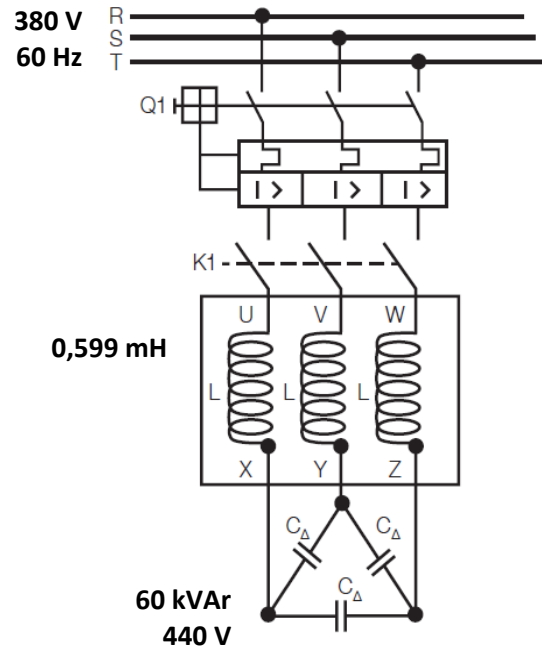
De posse dos valores calculados de capacitor e indutor, a configuração final do filtro dessintonizado está apresentada nas figuras 36 e 37.

Figura 36: Diagrama Ligação Filtro 25 kVAr



Fonte: (Autor, 2022).

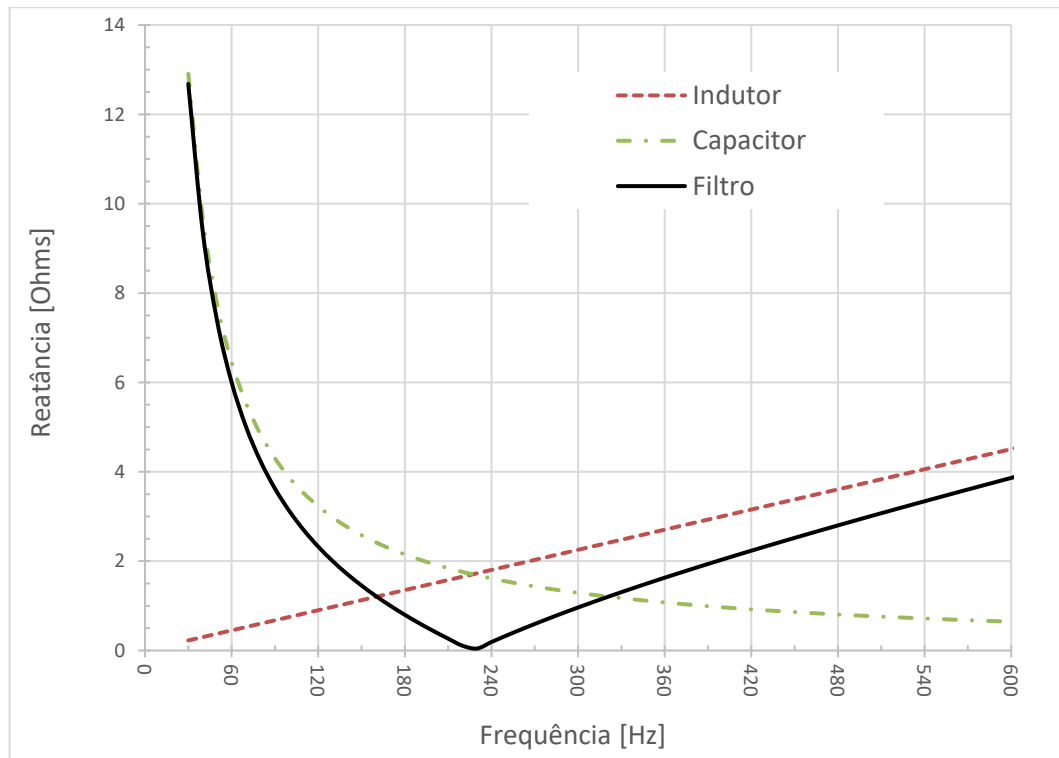
Figura 37: Diagrama de Ligação Filtro 50 kVAr



Fonte: (Autor, 2022).

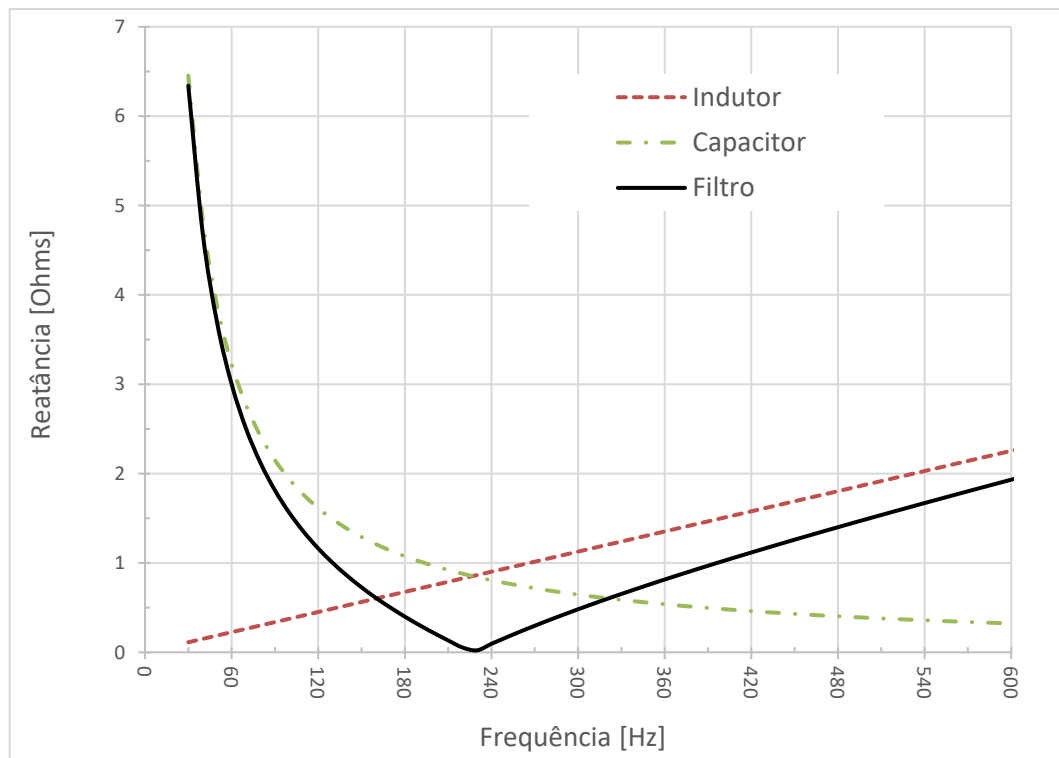
Dentro deste contexto foi simulado o comportamento dos filtros na frequência de dessintonia calculada 227 Hz (7%).

Figura 38: Comportamento do Filtro de 25 kVAr.



Fonte: (Autor, 2022).

Figura 39: Comportamento do Filtro de 50 kVAr.



Fonte: (Autor, 2022).

Observa-se que na frequência de dessintonia, 227 Hz, o circuito equivalente série indutor-capacitor, é um curto circuito, porém isso não é problema, pois não temos frequência de 227 Hz presentes no sistema, as frequências harmônicas são sempre múltiplas da frequência fundamental, 60 Hz. Neste ponto ocorre a mudança do circuito, passando de em circuito equivalente de capacitor para um circuito equivalente de indutor, resumidamente até a frequência de 180 Hz (3ª harmônica) o circuito é um capacitor, acima dos 240 Hz (4ª harmônica) o circuito é um indutor, com isso, a reatância do circuito fica em paralelo com a reatância do sistema, o que não causa ressonância no sistema.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma avaliação da situação atual em relação às distorções harmônicas de corrente e tensão de um grande consumidor industrial. Foram levantadas as características das tensões e correntes no QGBT da subestação de 2 MVA.

A qualidade da energia é analisada, comparando os valores individuais e totais de distorção presentes no sistema. A principal causa dessa distorção são as cargas não lineares presentes nas operações da indústria.

A distorção de tensão no ponto de análise converge para o valor aceitável indicado pelo módulo PRODIST 8, que limita a distorção a 10% para tensões abaixo de 1kV, com a distorção máxima atingindo pouco mais de 5% nos estudos realizados.

Para as distorções de corrente, observa-se a presença de todas as ordens harmônicas, até a 41ª limite do analisador, verifica-se uma predominância dos harmônicos de 5ª ordem devido à presença de inversores na composição de cargas lineares do sistema. Essas distorções atingem grandes índices de THD, alcançando níveis acima de 40%, valores bastante altos, considerando-se os parâmetros de IEEE 519.

Para corrigir estas distorções, a instalação de filtros se faz necessária. A solução proposta para minimizar essas distorções é a inserção de um filtro dessintonizado para a frequência de 227 Hz, reduzindo as distorções da 5ª harmônica em diante. Esta opção de filtro dessintonizado deve ser adicionado junto os bancos de capacitores para correção do fator de potência das cargas da indústria.

A instalação de filtro dessintonizados é uma boa solução em instalações com alto nível de DHT, pois além de filtrarem os principais harmônicos presentes, fornecem energia reativa para elevar o fator de potência.

Com isso, o trabalho atinge o objetivo principal do estudo de caso: medir e analisar a distorção harmônica de tensão e corrente. Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, algumas possibilidades de trabalhos futuros podem ser identificadas, permitindo a continuidade da pesquisa.

- Análise dos outros fenômenos que cercam o PRODIST, na parte de qualidade de energia;
- Simular digitalmente o filtro dessintonizado;
- Analisar e simular outros tipos de filtro, fazendo uma comparação de eficiência e custo benefício;

- Verificar a integridade dos equipamentos que fazem parte da instalação elétrica da indústria, como transformadores, motores, etc.;
- Realizar análise em locais diferentes, setorizados, com uma quantidade de máquinas que podem ser usadas durante dia e noite, e assim verificar a sua interferência na rede;

REFERÊNCIAS

- AFONSO, J. L.; MARTINS, J. S. **As Oportunidades das Ameaças: A Qualidade da Energia Elétrica**. Ciclo de Seminários, Departamento de Electrónica Industrial, Universidade do Minho Campus de Azurém, Guimarães – Portugal, 2003.
- ANEEL, P. d. D. d. E. **Elétrica no sistema elétrico nacional–prodlist: Módulo 8-qualidade de energia elétrica**. ANEEL Resolução Normativa, 2022.
- DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, W. H. **Electrical Power Systems Quality**. 2. ed. McGraw-Hill, 2002.
- FRANCO, Edgard. **Qualidade de energia - causas, efeitos e soluções**. Engecomp Tecnologia em Automação e Controle Ltda. 2008.
- IEEE Std. 519-1992, **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**, 1992.
- KASSICK, E. V. **Harmônicas em sistemas elétricos de baixa tensão**. 2016. Apostila – Faculdade de Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Educação, 2016.
- LEÃO, R.; SAMPAIO, R.; ANTUNES, F. **Harmônicos em Sistemas elétricos**. 1 edição. ed. Brasil: Elsevier, 2014.
- LEMES, Marcelo Inácio. **Comparação técnico-econômica entre equipamentos mitigadores de harmônicas e compensadores de energia reativa**. Uberlândia – MG. 2010. 199 f. Tese (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2010.
- PAULILO, G. **Conceitos Gerais Sobre Qualidade da Energia**. Cap. 1: Qualidade de Energia. O Setor Elétrico. Ed 84, 2013.
- POMILIO, José Antenor. **Compensação capacitiva e filtros passivos em redes secundárias parte 2**. Revista O Setor Elétrico. São Paulo, v.2, 2007.
- OLIVEIRA, Caio Gomes; **Estudo sobre conservação de energia elétrica e qualidade de energia elétrica**, 2009.
- OLIVEIRA, J. C. Projeto SIDAQEE. **Qualidade de Energia Elétrica: Definição e Análise dos Itens de Qualidade**. Grupo de Qualidade e Racionalização da Energia Elétrica. Cap. II, Universidade Federal de Uberlândia, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Uberlândia, 2000.
- ORTMANN, M. S. **Filtro Ativo Trifásico com Controle Vetorial Utilizando DSP: Projeto e Implementação**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- SADIKU, M. N. O; Alexander, C. K. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5ª. Ed. Porto Alegre, AMGH, 2013.

SOUSA NETO, Cecilio Martins de. **Estabilizador de Sistema de Potência para Máquinas Síncronas de Polos Salientes Utilizando a Transformada Wavelet**. 2013. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

ROCHA, Celso; RADATZ, Paulo. **Elemento Load do OpenDSS**. 2017.

ROCHA, Joaquim Eloir. **Qualidade de Energia**. 2016. Monografia (Especialização) – Curso de Engenharia Elétrica, Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

ROSA, Francisco de la. **Harmonics and power systems**. Boca Raton: CRC Press, 2006.

SURESH M., PANDA, A, K., **Power Quality Issues Current Harmonics, International Standard Book**, vol. 1, 2016.

TEIXEIRA, D. Â. **Análise das distorções harmônicas – Estudo de caso em um sistema industrial**, Universidade Federal de Minas Gerais, Dissertação de Mestrado, 2009.