

**INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
Goiás

CIRO FELIPE NASCIMENTO SOARES

LUCAS CABRAL DE PAULO

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA
EM UMA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA:
DISTÚRBIOS OBSERVADOS NAS CORRENTES E
TENSÕES DURANTE EVENTOS DE INTERRUPÇÃO,
RESTABELECIMENTO E OPERAÇÃO EM REGIME**

VALPARAÍSO DE GOIÁS - GO

2023



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS VALPARAÍSO

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

TERMO 6/2024 - VAL-DAA/CP-VALPARAÍSO/IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia - Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho apresentado em evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome completo do(a) autor(a): **Ciro Felipe Nascimento Soares**

Matrícula: 20191150050053

Título do trabalho: **Análise da qualidade de energia elétrica em uma indústria alimentícia: Distúrbios observados nas correntes e tensões durante eventos de interrupção, restabelecimento e operação em regime**

Autorização - Marque uma das opções

- ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
- ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
- ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
- ☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
- ☐ Outra justificativa: _____.

Declaração de distribuição não-exclusiva

O(A) referido(a) autor(a) declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Valparaíso de Goiás, 7 de fevereiro de 2024.

(assinado eletronicamente)

CIRO FELIPE NASCIMENTO SOARES

Autor(a) e/ou Detentor(a) dos Direitos Autorais

Documento assinado eletronicamente por:

- **Ciro Felipe Nascimento Soares, Giro Felipe Nascimento Soares - Estudante - Ifg - Câmpus Valparaíso de Goiás (10870883001540)**, em 07/02/2024 20:08:32.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 07/02/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 505565

Código de Autenticação: 57aefd29f9



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

BR 040, KM 6, Avenida Saia Velha, S/Nº, Área 8, None, Parque Esplanada V, VALPARAÍSO DE GOIÁS / GO, CEP 72876-601
(61) 3615-9210 (ramal: 9210)



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS VALPARAISO

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

TERMO 5/2024 - VAL-DAA/CP-VALPARA/IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia - Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho apresentado em evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome completo do(a) autor(a): Lucas Cabral de Paulo

Matrícula: 20191150050347

Título do trabalho: Análise da qualidade de energia elétrica em uma indústria alimentícia: Distúrbios observados nas correntes e tensões durante eventos de interrupção, restabelecimento e operação em regime

Autorização - Marque uma das opções

- ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
- ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
- ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
- ☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
- ☐ Outra justificativa: _____.

Declaração de distribuição não-exclusiva

O(A) referido(a) autor(a) declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Valparaíso de Goiás, 7 de fevereiro de 2024.

(assinado eletronicamente)

LUCAS CABRAL DE PAULO

Autor(a) e/ou Detentor(a) dos Direitos Autorais

Documento assinado eletronicamente por:

- Lucas Cabral de Paulo, Lucas Cabral de Paulo - Estudante - Ifg - Câmpus Valparaíso de Goiás (10870883001540), em 07/02/2024 19:29:15.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 07/02/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

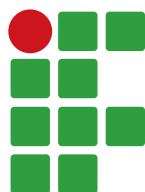
Código Verificador: 505567

Código de Autenticação: 29ba2c98e4



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

BR 040, KM 6, Avenida Saia Velha, S/Nº, Área 8, None, Parque Esplanada V, VALPARAÍSO DE GOIÁS / GO, CEP 72876-601
(61) 3615-9210 (ramal: 9210)



**INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
Goiás

CIRO FELIPE NASCIMENTO SOARES

LUCAS CABRAL DE PAULO

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA
EM UMA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA:
DISTÚRBIOS OBSERVADOS NAS CORRENTES E
TENSÕES DURANTE EVENTOS DE INTERRUPÇÃO,
RESTABELECIMENTO E OPERAÇÃO EM REGIME**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia
Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás – Câmpus Valparaíso, como parte
dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro
Eletricista.

Orientador: PROF. DR. PEDRO HENRIQUE FRANCO MORAES

VALPARAÍSO DE GOIÁS - GO

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S676a Soares, Ciro Felipe Nascimento

Análise da qualidade de energia elétrica em uma indústria alimentícia [recurso eletrônico] : distúrbios observados nas correntes e tensões durante eventos de interrupção, restabelecimento e operação em regime / Ciro Felipe Nascimento Soares, Lucas Cabral de Paulo. -- 2023.

Dados eletrônicos (1 arquivo).
69 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique Franco Moraes.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, câmpus Valparaíso, 2023.

Modo de acesso: World Wide Web.

Arquivo de texto em formato PDF.

Disponível em: <https://repositorio.ifg.edu.br>.

1. Energia elétrica - Controle de qualidade. 2. Sistemas de energia elétrica - Goiás (GO). 3. Harmônicos (Ondas elétricas). 4. Fator de potência. 5. Energia elétrica - Distribuição. I. Título. II. Paulo, Lucas Cabral de. III. Moraes, Pedro Henrique Franco, orient.

CDD 621.31



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS VALPARAÍSO

Folha de Aprovação

TERMO 4/2023 - VAL-CCBENG/VAL-DAA/CP-VALPARA/IFG

CIRO FELIPE NASCIMENTO SOARES

LUCAS CABRAL DE PAULO

ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA EM UMA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA: DISTÚRBIOS OBSERVADOS NAS CORRENTES E TENSÕES DURANTE EVENTOS DE INTERRUPÇÃO, RESTABELECIMENTO E OPERAÇÃO EM REGIME

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Valparaíso, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Monografia defendida e aprovada, em 6 de dezembro de 2023, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

(assinado eletronicamente)

Prof. Dr. PEDRO HENRIQUE FRANCO MORAES
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG
Presidente da banca / Orientador(a)

(assinado eletronicamente)

Prof. Me. ALISSON LIMA SILVA
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG
Membro da banca

(assinado eletronicamente)

Profa. Dra. JESSICA SANTORO GONÇALVES PENA
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG
Membro da banca

Valparaíso de Goiás, 7 de dezembro de 2023

Documento assinado eletronicamente por:

- **Pedro Henrique Franco Moraes**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 27/01/2024 11:52:31.
- **Jessica Santoro Goncalves Pena**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 07/12/2023 09:14:53.
- **Alisson Lima Silva**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 07/12/2023 09:05:08.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 14/11/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 475922

Código de Autenticação: acf69be233



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

BR 040, KM 6, Avenida Saia Velha, S/Nº, Área 8, Parque Esplanada V, VALPARAÍSO DE GOIÁS / GO, CEP 72876-601

Sem Telefones cadastrados

Agradecimentos

Eu, **Ciro Felipe Nascimento Soares**, agradeço a minha família por ajudar em momentos difíceis, e aos meus colegas de turma, por compartilharem comigo tantos momentos de descobertas e aprendizado e por todo o companheirismo ao longo deste percurso.

Eu, **Lucas Cabral de Paulo**, agradeço primeiramente a Deus e a Virgem Maria por me capacitarem durante toda a minha graduação, agradeço a minha família por todo o apoio que me deram durante esse longo e difícil caminho e por acreditarem no meu potencial. Agradeço aos meus colegas de turma que dividiram toda a caminhada da graduação comigo me dando apoio.

Gostaríamos também de expressar nossos agradecimentos aos professores **Pedro e Alisson**.

Ao Professor Doutor **Pedro Henrique Franco Moraes** por compartilhar todo o seu conhecimento conosco durante toda a escrita do trabalho, dando dicas fundamentais e participando ativamente de todo o processo.

Ao Professor Mestre **Alisson Lima Silva** por nos auxiliar com a ferramenta de escrita do trabalho, apontando pontos importantes e deixando o processo de escrita menos doloroso.

Resumo

A geração de energia elétrica brasileira é concentrada em cinco principais fontes, a hidrelétrica, eólica, solar, térmica e nuclear, alimentando toda sua extensão territorial. O setor industrial está entre os maiores consumidores de energia elétrica no Brasil, gerando impactos na qualidade de energia elétrica (QEE). O presente trabalho, verificou a QEE no centro de comando de motores (CCM) de uma indústria alimentícia, com o objetivo de analisar cinco distúrbios de QEE: tensão em regime permanente, harmônicos, fator de potência, flutuação de tensão e variação de frequência. Os distúrbios foram analisados no CCM da extração, setor fabril responsável por extrair o óleo do grão de soja, em três cenários propostos, a fábrica em funcionamento nominal até o desligamento dos motores, a interrupção da alimentação da energia elétrica e a operação em regime permanente. Após as análises dos dados, pode-se notar distúrbios presentes em dois cenários propostos.

Palavras-Chave: Qualidade de energia elétrica, tensão em regime permanente, harmônicos, fator de potência, flutuação de tensão e variação de frequência.

Abstract

The Brazilian electrical power generation is concentrated in five main sources: hydroelectric, wind, solar, thermal, and nuclear, supplying to the entire national territory. The industrial sector ranks among the largest consumers of electrical energy in Brazil, generating impacts on Power Quality (PQ). This study examined PQ in the Motor Control Center (MCC) of a food industry, aiming to analyze five PQ disturbances: steady-state voltage, harmonics, power factor, voltage fluctuation, and frequency variation. The disturbances were analyzed in the extraction MCC, the manufacturing sector responsible for extracting soybean oil, under three proposed scenarios: the factory operating at nominal conditions until motor shutdown, interruption of electrical power supply, and steady-state operation. After analyzing the data, disturbances were observed in two proposed scenarios.

Keywords: Power quality, steady-state voltage, harmonics, power factor, voltage fluctuation, and frequency variation.

Lista de Figuras

1.1	Capacidade de geração elétrica instalada no Brasil	18
2.1	Faixas de tensão em relação à tensão de referência	22
2.2	Elevação de tensão	24
2.3	Afundamento de tensão	25
2.4	Interrupção	28
2.5	Representação de harmônicos na onda senoidal	31
2.6	Fator de potência	33
2.7	Flutuação de tensão vista por um osciloscópio.....	34
2.8	Variação na frequência	35
2.9	Imagem do analisador RE7080	37
3.1	Diagrama de conexão do analisador de QEE	40
3.2	Conexão do analisador de QEE no CCM.....	41
3.3	Primeiro e segundo cenário de medição	43
3.4	Terceiro cenário de medição	43
4.1	Tensão no CCM sem motores	45
4.2	Níveis de tensão antes e depois do religamento dos motores	46
4.3	Níveis de tensão durante a análise.....	47
4.4	3°, 5°, 7° e 9° harmônicas da fase A da tensão no primeiro cenário	50
4.5	3°, 5°, 7° e 9° harmônicas da fase B da tensão no primeiro cenário	51
4.6	3°, 5°, 7° e 9° harmônicas da fase C da tensão no primeiro cenário	52
4.7	3°, 5°, 7° e 9° harmônicas da fase A da tensão no terceiro cenário	53
4.8	3°, 5°, 7° e 9° harmônicas da fase B da tensão no terceiro cenário.....	54
4.9	3°, 5°, 7° e 9° harmônicas da fase C da tensão no terceiro cenário.....	55
4.10	2°, 4°, 6° e 8° harmônicas da fase A da tensão no primeiro cenário	56

4.11	2°, 4°, 6° e 8° harmônicas da fase B da tensão no primeiro cenário	56
4.12	2°, 4°, 6° e 8° harmônicas da fase C da tensão no primeiro cenário	57
4.13	Fator de potência no primeiro cenário	59
4.14	Fator de potência no terceiro cenário	60
4.15	Fator de potência primeiro cenário	61
4.16	Tensões no terceiro cenário	61
4.17	Flutuação de tensão no cenário analisado	62
4.18	Variação de frequência no primeiro e segundo cenário.....	63
4.19	Variação de frequência no terceiro cenário	63

Lista de Tabelas

2.1	Faixa de valores para tensão de referência (TR)	25
2.2	Indicadores de QEE.....	26
2.3	Limite dos indicadores totais de harmônicas	30
2.4	Limite dos indicadores totais de flutuação de tensão	33
3.1	Motores alimentados pelo CCM da extração	39
3.2	Configuração para primeira medição (1 minuto)	42
3.3	Configuração para a segunda medição (10 segundos)	42
4.1	Níveis de tensão durante a análise.....	46
4.2	Média das tensões	48
4.3	Resultados de DRP e DRC da tensões durante primeiro e segundo cenário	48
4.4	Resultados de DRP e DRC da tensões durante terceiro cenário.....	49
4.5	Distorção Harmônica individual de tensão	50
4.6	Limites para as componentes harmônicas pares	55
4.7	Potência Ativa, Reativa, Aparente e Fator de Potência.....	58
4.8	Fator de potência no primeiro cenário.....	59
4.9	Fator de potência no segundo cenário	59
4.10	Potência Ativa, Reativa, Aparente e Fator de Potência.....	60

Lista de Abreviaturas e Símbolos

Lista de Abreviaturas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Continua
CCM	Centro de Controle de Motores
DRC	Duração Relativa da transgressão de tensão Crítica
DRP	Duração Relativa da transgressão de tensão Precária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IEEE	Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos
PRODIST	Procedimento de Distribuição
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RMS	Inglês Root Mean Square / Português Raiz Média Quadrada
SECEX	Secretaria de Comércio Exterior

Lista de Símbolos

DHI	Distorções harmônicas de tensão individual
DHP	Distorções harmônicas total de tensão par
DHT	Distorções harmônicas de tensão Total

DTT_3	Distorções harmônicas múltiplas de 3
DTT_i	Distorções harmônicas de tensão ímpar
DTT_p	Distorções harmônicas de tensão par
FP	Fator de Potência
Hz	Hertz
kVA/S	Potência Aparente
$kVar/Q$	Potência Reativa
kW/P	Potência Ativa
n_{lc}	Números de ultrapassagens de Limite Crítico
n_{lp}	Número de ultrapassagens de Limite Precário
PU	Sistema por unidade
T_L	Tensão de Leitura
T_R	Tensão de Referência
V	Tensão

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	17
1.2	JUSTIFICATIVA.....	18
1.3	OBJETIVO GERAL	19
1.4	OBJETIVO ESPECÍFICO	19
1.5	ORGANIZAÇÃO TEXTUAL	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	21
2.2	TENSÃO EM REGIME PERMANENTE.....	23
2.2.1	ELEVAÇÃO DE TENSÃO E AFUNDAMENTO DE TENSÃO.....	23
2.2.2	INTERRUPÇÃO	27
2.3	HARMÔNICOS	28
2.4	FATOR DE POTÊNCIA	31
2.5	FLUTUAÇÃO DE TENSÃO.....	33
2.6	VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA	34
2.7	FUNÇÃO DO ANALISADOR DE QEE	35
2.8	MODELO DO ANALISADOR UTILIZADO	36
3	METODOLOGIA	38
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	38
3.2	METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO DO CCM	39
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	44
4.1	ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	45
4.1.1	TENSÃO EM REGIME PERMANENTE	45

4.1.2	HARMÔNICOS	49
4.1.3	FATOR DE POTÊNCIA	57
4.1.4	FLUTUAÇÃO DE TENSÃO	61
4.1.5	VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA	62
5	CONCLUSÃO	65
5.1	CONCLUSÃO GERAL	65
5.2	TRABALHOS FUTUROS	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

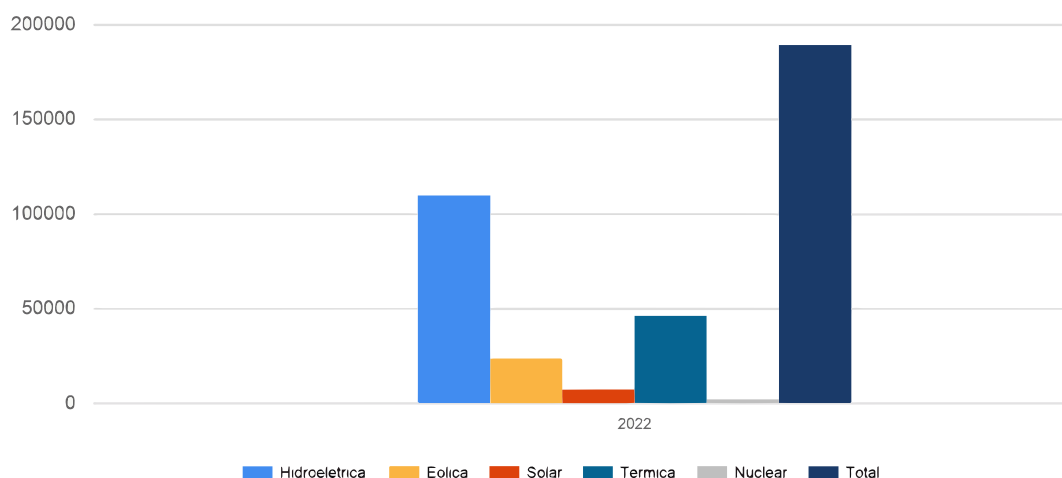
Com o início da primeira revolução industrial na Inglaterra em meados de 1760, aconteceu uma mudança que marcou a industrialização global, a introdução de máquinas que convertiam matérias-primas em produtos finais de forma distribuída e padronizada, resultando em avanços no setor industrial. Esse processo ficou conhecido mundialmente como fabricação mecânica e exigiu o desenvolvimento de novas tecnologias e processos técnicos.

Segundo dados do Ministério de Minas e Energia do ano de 2021 [1], o Brasil possui uma capacidade instalada de geração elétrica de 190.574,49 MW (Megawatts), como pode ser observado na Figura 1.1. Este cenário é representados por cinco principais fontes geradoras: hidrelétrica, eólica, solar, térmica e nuclear. Com ênfase, a energia elétrica produzida no Brasil pelas grandes hidrelétricas tem um papel importante no desenvolvimento do país, proporcionando auto-suficiência na geração de energia elétrica a baixos custos [2].

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) [3] publicou o anuário estatístico de energia elétrica do ano de 2017 apontando os principais consumidores brasileiros. O setor industrial corresponde a aproximadamente 36% do total, seguido pelo setor residencial e comercial com 29% e 19,7%, respectivamente.

O consumo de eletricidade do país cresceu 1,2% em relação ao ano de 2016, com as regiões sul e centro-oeste lideraram o crescimento com taxas de 3,1% e 2,4%. A região sudeste é a região que possui maior participação no consumo energético, representando praticamente 50%.

Figura 1.1: Capacidade de geração elétrica instalada no Brasil



Fonte: EPE para dados nacionais, IEA para dados internacionais, 2021 [3]

1.2 Justificativa

A soja, oleaginosa típica de países temperados, foi tropicalizada e apresenta-se como uma das culturas mais bem estabelecida no território brasileiro [4] no contexto mundial, o Brasil figura como o segundo produtor, com claras indicações de que será o primeiro ainda no correr desta década [5], visto que o país é um dos principais produtores e exportadores desse grão. No entanto, os números de produção podem variar a cada safra devido a diversos fatores, como condições climáticas, demanda global e questões de mercado.

A área plantada do país, considerando todas as culturas, totalizou 86,7 milhões de hectares, uma ampliação de 3,3 milhões de hectares, 3,9% superior na comparação com 2020 [6]. A safra de soja em 2021 ficou marcada pelos números recordes de produção, área plantada e rendimento médio, consolidando o país como o maior produtor e exportador mundial do grão, segundo dados da Secretaria de Comércio Exterior (SECEX) [6]. A soja é uma cultura de grande importância econômica para o país, tanto para o mercado interno quanto para as exportações. É comum o emprego deste grão na produção de óleo de soja e em diversos produtos derivados, como ração animal.

Correlacionando a produção energética brasileira com o consumo do setor industrial, tornam-se significativos os estudos de acesso e as análises da qualidade da energia elétrica para identificação de distúrbios gerados pelos grandes consumidores.

Assim, este trabalho analisa distúrbios de correntes e tensões elétricas de uma indústria de grande porte, com esmagamento médio de 1704 toneladas de soja por dia, localizada no estado de Goiás. Com base nas análises desenvolvidas, é possível identificar e avaliar os distúrbios existentes, a fim de apontar possíveis intervenções que possam gerar benefícios para a indústria, para a concessionária responsável e também ao meio ambiente.

1.3 Objetivo geral

Analisar o comportamento das grandezas elétricas e os distúrbios de qualidade da energia elétrica presentes em uma indústria do ramo alimentício de grande porte durante três eventos/cenários: com os motores parados, com os motores entrando em funcionamento e com os motores em pleno funcionamento.

1.4 Objetivo específico

- Analisar o comportamento das ondas de corrente e tensão nos três cenários propostos;
- Analisar os dados coletados da indústria;
- Comparar os dados nos três cenários analisados;
- Sugerir ações para mitigação de potenciais problemas no fornecimento de energia desta indústria.

1.5 Organização textual

A apresentação do trabalho tem a seguinte estrutura:

Neste capítulo foi apresentado a contextualização, a justificativa e os objetivos específicos e gerais do trabalho.

O Capítulo 2 tem como propósito apresentar a fundamentação teórica essencial para embasar o conteúdo que será discutido durante todo o trabalho.

O Capítulo 3 expõem a metodologia empregada para realizar a análise da qualidade de energia na indústria alimentícia, explicando a conexão do analisador de energia e os cenários analisados.

O Capítulo 4 discorre sobre os resultados obtidos durante os cenários analisados.

Por fim, o Capítulo 5 resume as conclusões do estudo e identifica potenciais áreas de pesquisa a serem exploradas por futuros trabalhos.

Capítulo 2

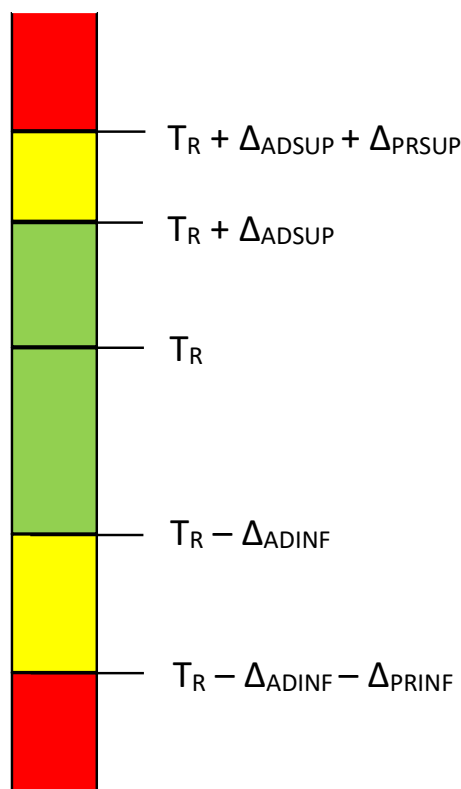
Fundamentação teórica

2.1 Considerações iniciais

O termo qualidade de energia elétrica (QEE) é associado aos padrões e parâmetros que necessitam ser atendidos por companhias e consumidores de energia elétrica. Esses parâmetros são estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), agência responsável pela regulação e fiscalização do setor elétrico no Brasil, e autora da Resolução Normativa ANEEL nº 956/2021 que estabelece os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) [7].

Esses procedimentos normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e ao desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Como exemplo, pode-se mencionar o caso da tensão de atendimento que deve ser classificada segundo faixas em torno da tensão de referência (T_R), conforme a Figura 2.1.

Figura 2.1: Faixas de tensão em relação à tensão de referência



Fonte: PRODIST MÓDULO 8, 2021 [7]

Sendo:

- T_R : Tensão de Referência;
- Faixa Adequada de Tensão: intervalo entre $(T_R - \Delta_{ADINF})$ e $(T_R + \Delta_{ADSUP})$;
- Faixas Precárias de Tensão: intervalo entre $(T_R + \Delta_{ADSUP})$ e $(T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP})$ ou intervalo entre $(T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF})$ e $(T_R - \Delta_{ADINF})$;
- Faixas Críticas de Tensão: valores acima de $(T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP})$ ou abaixo de $(T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF})$.

O PRODIST é um conjunto de procedimentos operacionais e técnicos que regulamentam a operação e o funcionamento do sistema elétrico no Brasil. Ele foi criado para garantir a padronização e eficiência na transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica no país.

A versão de 2023 do PRODIST é composta por onze módulos:

- Módulo 1 - Glossário de Termos Técnicos do PRODIST;
- Módulo 2 - Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição;
- Módulo 3 - Conexão ao Sistema de Distribuição de Energia Elétrica;
- Módulo 4 - Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição;
- Módulo 5 - Sistemas de Medição e Procedimentos de Leitura;
- Módulo 6 - Informações Requeridas e Obrigações;
- Módulo 7 - Cálculo de Perdas na Distribuição;
- Módulo 8 - Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica;
- Módulo 9 - Ressarcimento de Danos Elétricos;
- Módulo 10 - Sistema de Informação Geográfica Regulatório;
- Módulo 11 - Fatura de Energia Elétrica e Informações Suplementares;

Cada módulo aborda aspectos específicos relacionados à distribuição de energia.

Para este estudo será utilizado o Módulo 8, referente a qualidade do fornecimento de energia elétrica. O principal objetivo dele é garantir que a energia fornecida pelas distribuidoras atenda a padrões aceitáveis de qualidade.

O Módulo 8 descreve os principais distúrbios que afetam a QEE, além de abordar sobre o funcionamento de equipamentos elétricos e eletrônicos, discute sobre as medidas para mitigar esses distúrbios, que podem incluir o uso de dispositivos de proteção, como filtros de linha, filtros capacitivos, estabilizadores de tensão, *nobreaks* e vários outros.

2.2 Tensão em Regime Permanente

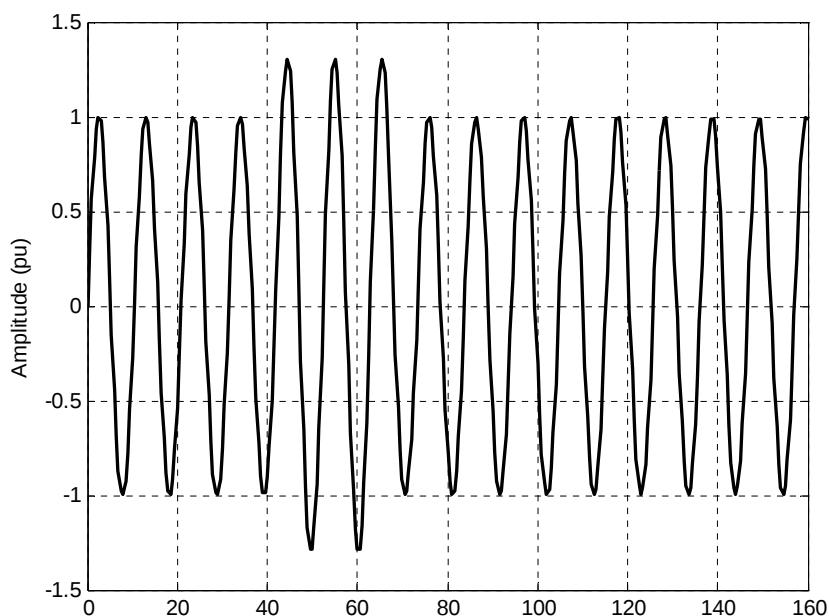
2.2.1 Elevação de tensão e afundamento de tensão

Elevação e afundamento de tensão são dois termos relacionados a QEE em sistemas de distribuição de energia, sendo a elevação de tensão um aumento da diferença de potencial elétrico em um sistema, enquanto o afundamento de tensão indica a diminuição dessa diferença.

A elevação de tensão (*Voltage Swell*) é um fenômeno que ocorre quando a tensão elétrica em um sistema excede os valores especificados. Isso pode ocorrer por várias razões e em diferentes escalas, como em manobras de comutação, descargas atmosféricas, operação de equipamentos elétricos, falhas elétricas, entre outros.

A Figura 2.2 apresenta através de um osciloscópio as modificações causadas na senoide após uma elevação de tensão.

Figura 2.2: Elevação de tensão



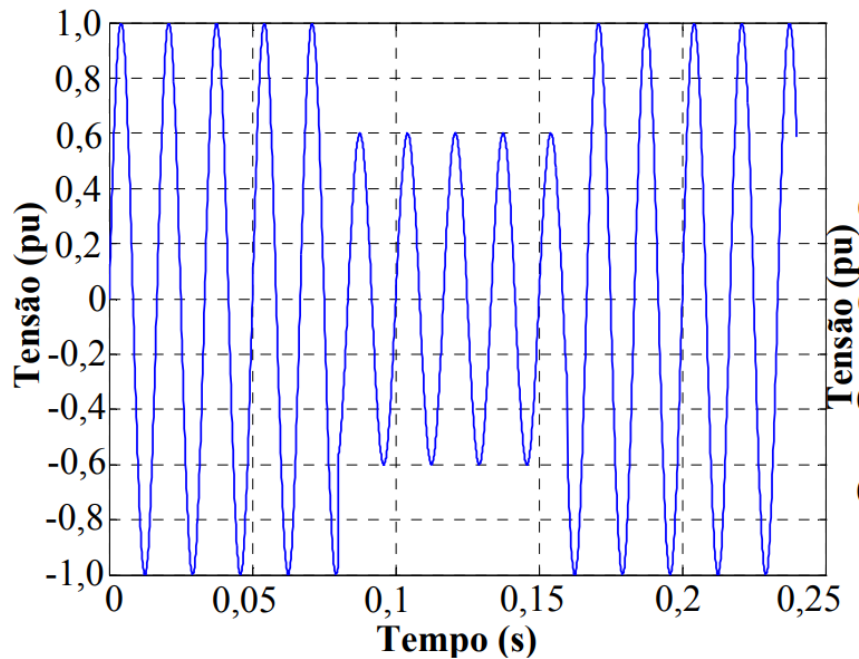
Fonte: KERN, 2008 [8]

O afundamento de tensão (*Voltage Sag*) trata-se de um fenômeno que se caracteriza pela queda da tensão abaixo dos valores nominais ou especificados. Esse evento normalmente é temporário e dura apenas alguns ciclos de onda. Os principais motivos que causam esses distúrbios são as partidas de motores, curto-circuito, operações de comutação e fenômenos atmosféricos.

Um afundamento de tensão é tão danoso para a indústria quanto uma interrupção, pois são pequenos problemas recorrentes, que podem acontecer várias vezes durante o dia [9]. Para proteger equipamentos sensíveis contra afundamento de tensão, dispositivos como reguladores de tensão, *nobreaks* e estabilizadores de tensão são utilizados.

A Figura 2.3 apresenta o afundamento de tensão em uma onda senoidal registrado por um osciloscópio.

Figura 2.3: Afundamento de tensão



Fonte: DE ANDRADE, 2011 [10]

Com o objetivo de assegurar a qualidade de tensão (V) em situações de operação em regime, o PRODIST estabelece três categorias para o nível de tensão, denominadas como tensão adequada, precária e crítica. A Tabela 2.1 apresenta a faixa de valores para tensão de referência, com destaque para a tensão de leitura (TL) e seus respectivos intervalos.

Tabela 2.1: Faixa de valores para tensão de referência (TR)

Níveis	220V
Precário	$(191 \leq TL \leq 202)$ ou $(231 \leq TL \leq 233)$
Adequado	$(202 \leq TL \leq 231)$
Crítico	$(TL \leq 191)$ ou $(TL \geq 233)$

Fonte: PRODIST

As medições para verificação da qualidade da tensão são feitas através de amostras conduzidas pelas concessionárias de energia. São coletadas 1008 amostras com um intervalo de 10 minutos utilizando um analisador de energia. Com os resultados das medições, são calculados os indicadores de Duração Relativa da transgressão de tensão Precária (*DRP*) e a Duração Relativa da transgressão de tensão Crítica (*DRC*).

Após as medições, os cálculos de *DRP* e *DRC* são efetuados por meio das Equações (2.1) e (2.2) respectivamente, além disso, é necessário encontrar os valores máxi-

mos durante a coleta das 1008 amostras. Eles são nomeados como números de ultrapassagens de limite crítico (nlc) e número de ultrapassagens de limite precário (nlp).

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

A ANEEL estabelece limites máximos e mínimo para os indicadores de tensão em regime permanente, conforme a Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Indicadores de QEE

Indicadores de QEE	Limites
DRP (%)	3
DRC (%)	0,5

Fonte: PRODIST

Caso a concessionária de energia elétrica do local não mantenha a sua distribuição dentro desses limites de tensão, ela deverá compensar os consumidores. Para o cálculo da compensação, emprega-se a Equação (2.3).

$$Valor = \frac{(DRP - DRP_{li})}{100} \cdot k_1 + \frac{(DRC - DRC_{li})}{100} \cdot k_2 \cdot EUSD \quad (2.3)$$

Onde:

$$k_1 = 0, \text{ se } DRP \leq DRP_{li};$$

$$k_1 = 3, \text{ se } DRP > DRP_{li};$$

$$k_2 = 0, \text{ se } DRC \leq DRC_{li};$$

$$k_2 = 7, \text{ para consumidores atendidos em Baixa Tensão, se } DRC > DRC_{li};$$

$$k_2 = 5, \text{ para consumidores atendidos em Média tensão, } DRC > DRC_{li};$$

$$k_2 = 3, \text{ para consumidores atendidos em Alta Tensão, } DRC > DRC_{li};$$

$$DRP = \text{Valor do } DRP \text{ expresso em } \%, \text{ apurado na última medição};$$

$$DRP_{li} = 3\%;$$

DRC = Valor de DRC expresso em %, apurado na última medição;

$$DRC_{li} = 0,5\%;$$

$EUSD$ = Valor do encargo de uso do sistema de distribuição correspondente ao mês de referência da última medição.

2.2.2 Interrupção

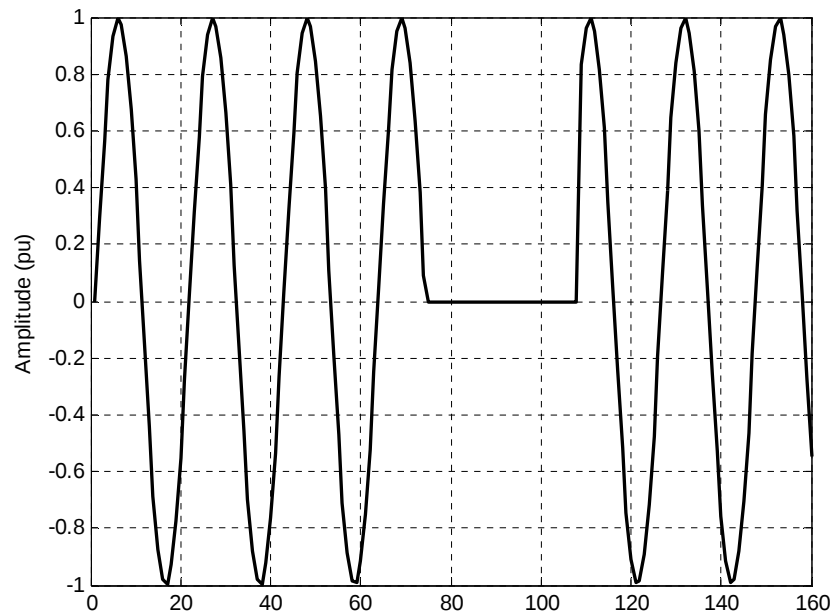
A interrupção de energia elétrica refere-se à paralisação temporária do fornecimento de eletricidade em uma determinada área, instalação ou rede elétrica. Elas podem ter impactos significativos, afetando residências, empresas, serviços públicos e a infraestrutura em geral.

A gestão eficaz da energia e a manutenção adequada da infraestrutura elétrica são essenciais para minimizar a frequência e a duração dessas interrupções. Além disso, existem interrupções programadas criadas pela concessionária de energia local para realização de manutenção focando na melhoria da rede elétrica [11].

A manutenção preventiva, corretiva, preditiva e o fortalecimento da infraestrutura elétrica são pilares importantes para evitar essas interrupções. A manutenção preventiva tem como objetivo atuar de forma preventiva, ou seja, antecipando a falha. A manutenção corretiva é aplicada após a falha do equipamento, adotada em situações em que a manutenção preventiva não foi eficaz. A manutenção preditiva adota técnicas específicas, como a análise de ruídos e vibrações, para que possa realizar a intervenção no equipamento. Como medidas adicionais, adota-se a instalação de sistemas de *backup* com geradores de energia e fontes de energia alternativa, os sistemas de *backup* são aplicados em locais que não são admitidos interrupções de energia elétrica por um curto período de tempo, como por exemplo em hospitais ou indústrias.

A Figura 2.4 apresenta a interrupção da tensão registrada por um osciloscópio.

Figura 2.4: Interrupção



Fonte: MARTINS, 2003 [11]

2.3 Harmônicos

Os distúrbios harmônicos são uma preocupação comum em sistemas elétricos, especialmente em instalações industriais e comerciais. São fenômenos elétricos indesejados que ocorrem quando a tensão ou a corrente em um sistema elétrico não seguem uma forma de onda senoidal pura, como a corrente alternada ideal.

Segundo Carvalho [12], os harmônicos são divididos nas classes pares, ímpares e múltiplas de três.

As equações para o cálculo dos indicadores de distorções harmônicas de tensão individual, total são:

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

Sendo:

V_h = tensão harmônicas de ordem h ;

h = ordem harmônicas individual;

V_1 = tensão fundamental medida.

Para o cálculo total das distorções harmônicas de tensão utiliza-se:

$$DHT_{\%} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (2.5)$$

h = ordens harmônicas de 2 até h_{max} ;

h_{max} = harmônica máxima, com base no analisador de energia;

V_h^2 = tensão harmônicas de ordem h ;

V_1 = tensão fundamental medida.

Para harmônicas de tensão par utiliza-se:

$$DTT_P\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (2.6)$$

Sendo:

h = todas as ordens harmônicas pares;

h_p = máxima ordem harmônica par;

V_h^2 = tensão harmônicas de ordem h ;

V_1 = tensão fundamental medida.

E para harmônicas de tensão ímpar utiliza-se:

$$DTT_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_h^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (2.7)$$

Sendo:

h = todas as ordens harmônicas ímpares;

h_i = máxima ordem harmônica ímpar;

V_h^2 = tensão harmônicas de ordem h ;

V_1 = tensão fundamental medida.

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_i} V_h^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (2.8)$$

Sendo:

h = todas as ordens harmônicas múltiplas de 3;

h_i = máxima ordem harmônica ímpar;

V_h^2 = tensão harmônicas de ordem h ;

V_1 = tensão fundamental medida.

O PRODIST estabelece os limites dos indicadores harmônicos totais para tensões nominais, com base nos dados presente na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Limite dos indicadores totais de harmônicas

Indicador	Tensão nominal (V_n)		
	$V_n < 2,3 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} \leq V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
$DHT \text{ } 95\%$	10,0%	8,0	5,0
$DTT_p \text{ } 95\%$	2,5	2,0	1,0
$DTT_i \text{ } 95\%$	7,5	6,0	4,0
$DHI_3 \text{ } 95\%$	6,5	5,0	3,0

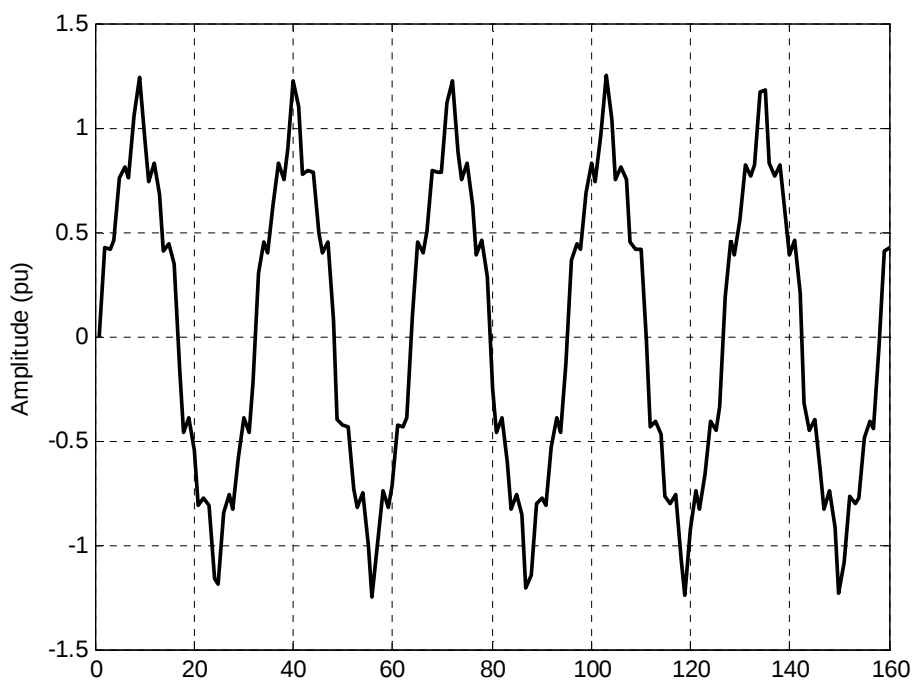
Fonte: PRODIST

Os principais causadores desses distúrbios são as cargas não lineares, como inversores, retificadores, computadores, lâmpadas fluorescentes, dispositivos eletrônicos, motores controlados por frequência e outros equipamentos eletrônicos.

A análise de distorções harmônicas é feita por meio de instrumentos de medição de qualidade de energia, por exemplo, os analisadores de espectro, que permite identificar a presença e a magnitude dos harmônicos em um sistema elétrico.

A Figura 2.5 apresenta a elevação na onda de tensão analisada através de um osciloscópio.

Figura 2.5: Representação de harmônicos na onda senoidal



Fonte: KERN, 2008 [8]

2.4 Fator de Potência

O fator de potência é a relação entre a potência ativa total em watts e a potência aparente total em volt-ampères, conforme definido pelo IEEE [13]. Aplicados em sistemas elétricos, o fator de potência é fundamental para a eficiência na utilização de energia elétrica, sendo normalmente representado por um valor entre 0 e 1.

Para evitar problemas, o fator de potência deve ser mantido dentro dos padrões exigidos pelo PRODIST, o documento aponta que o valor deve estar entre 0,92 a 1,00. Caso não esteja nessas condições, pode gerar problemas como má eficiência nas linhas de transmissão e conta de energia com valor acentuado.

Os motores de indução são cargas indutivas, as quais demandam energia reativa para gerar o fluxo magnético. É fato que a energia reativa ocupa volume nos condutores, potenciais perdas energéticas decorrentes do efeito Joule podem ocorrer causadas pelo calor gerado nos condutores em virtude da corrente que percorre os mesmos [14].

Um elevado fator de potência indica que uma grande proporção da potência elétrica é efetivamente utilizada para realizar tarefas proveitosas, minimizando o desperdício como energia reativa. Por outro lado, um fator de potência baixo reflete um nível significativo de energia

reativa, o que pode demandar uma maior geração de energia para suprir essa exigência específica.

Para calcular o fator de potência, é necessário encontrar os valores de potência ativa e potência aparente. Antes de utilizar a Equação (2.12), para determinar a potência ativa utiliza-se a Equação (2.9) e para a potência aparente a Equação (2.11).

$$P = \sqrt{S^2 - Q^2} \quad (2.9)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.10)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.11)$$

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.12)$$

Sendo;

P = Potência Ativa (kW);

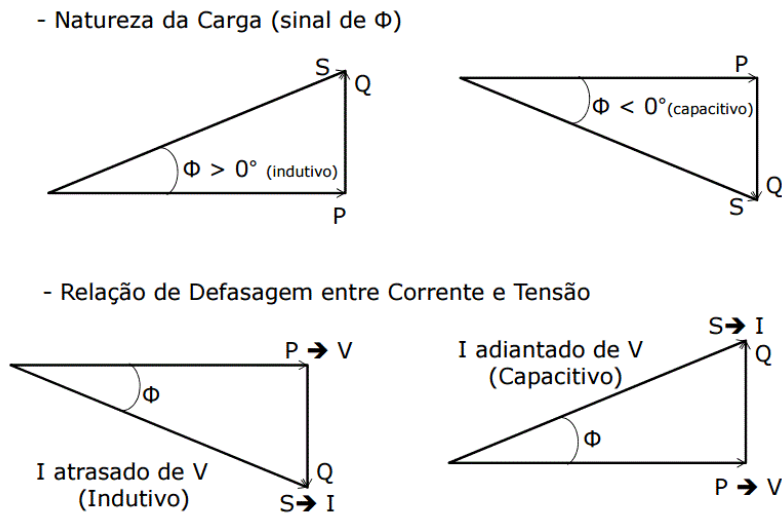
Q = Potência Reativa (kVAr);

S = Potência Aparente (kVA);

FP = Fator de Potência.

A Figura 2.6 apresenta o triângulo de potência frequentemente utilizados para representar as relações entre potência ativa, reativa e aparente.

Figura 2.6: Fator de potência



Fonte: ARGOUD, 2017 [15]

2.5 Flutuação de Tensão

De acordo com o PRODIST, a flutuação de tensão é um fenômeno caracterizado pela variação aleatória, repetitiva ou esporádica dos valores eficazes ou de pico da tensão instantânea [7]. O valor da tensão deve estar dentro da faixa de 0,95 e 1,05 por unidade (PU) para tensões abaixo de 2,3 kV com base na Tabela 2.4 que também está presente no módulo 8 do PRODIST.

Tabela 2.4: Limite dos indicadores totais de flutuação de tensão

Indicador	Tensão nominal (V_n)		
	$V_n < 2,3 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} \leq V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
$P_{st} 95\%$	1,0 pu	1,5 pu	2,0 pu

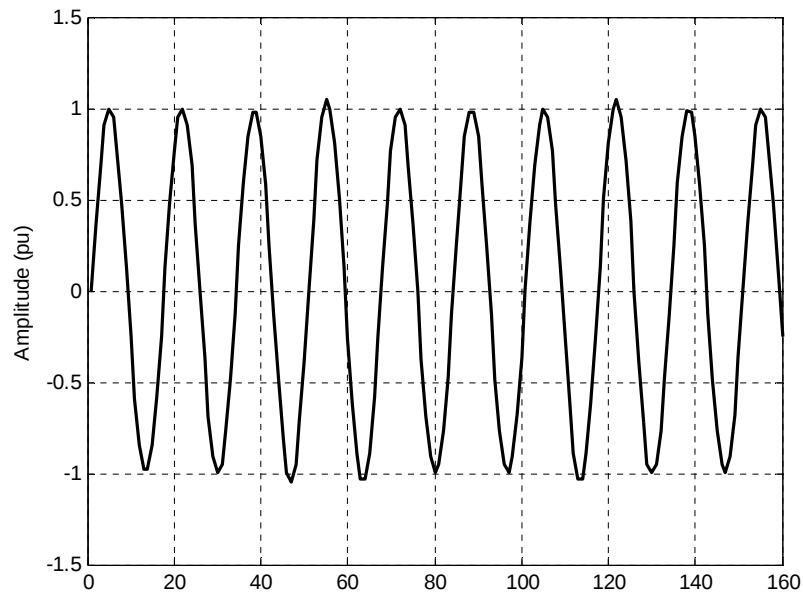
Fonte: PRODIST

Flutuações de tensão excessivas podem acarretar problemas, como mal funcionamento de equipamentos, perda de dados e interrupções na operação de sistemas elétricos. Os fornos de arco são a causa mais comum de flutuação de tensão na transmissão e distribuição do sistema de energia [16].

Portanto, é importante estar ciente dessas flutuações e tomar medidas adequadas para proteger os dispositivos eletrônicos e as instalações elétricas.

A Figura 2.7 apresenta um modelo de flutuação de tensão, analisado por meio de um osciloscópio.

Figura 2.7: Flutuação de tensão vista por um osciloscópio



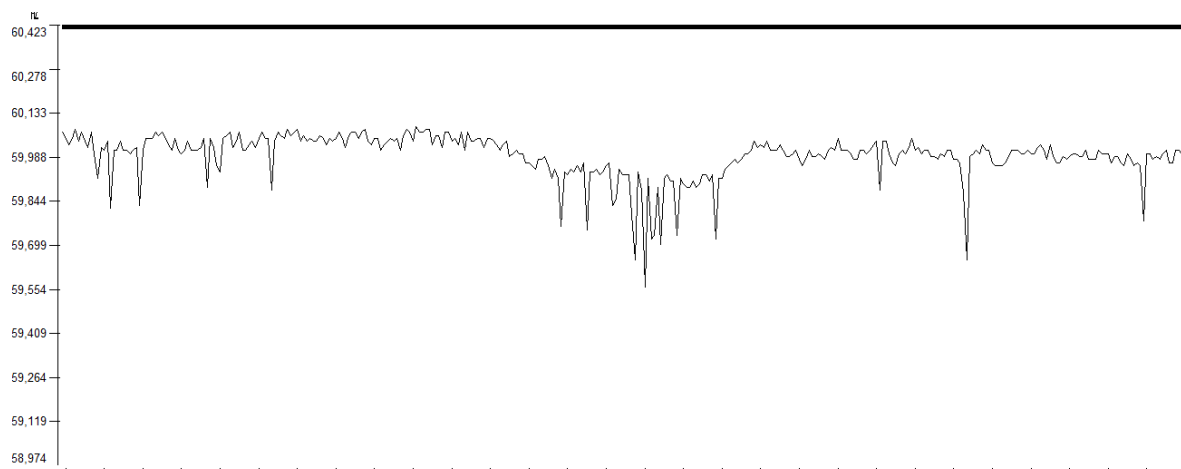
Fonte: KERN, 2008 [8]

2.6 Variação de frequência

Variação de frequência refere-se à mudança na frequência de um sinal, onda ou fenômeno periódico ao longo do tempo [7]. A frequência é uma medida da taxa de repetição de um ciclo completo em uma onda periódica que é geralmente expressa em hertz (Hz), representando assim os ciclos por segundos.

A frequência deve se manter dentro dos limites exigidos pelo PRODIST, nunca inferior a 59,9 Hz e também não deve ser maior que 60,1 Hz, dessa forma se mantendo dentro das condições normais. A Figura 2.8 representa a variação de frequência analisada por um analisador de QEE.

Figura 2.8: Variação na frequência



Fonte: Autores, 2023

2.7 Função do analisador de QEE

O analisador de energia é um dispositivo utilizado para monitorar e analisar a QEE em um sistema, tendo como objetivo principal a identificação de problemas relacionados a distorções e anomalias na tensão e corrente, sendo assim, um equipamento importante para manter a operação dos sistema confiável e eficiente.

Esse dispositivo monitora constantemente a tensão e a corrente elétrica em um sistema ao longo do tempo, podendo identificar harmônicas nas formas de onda da tensão e da corrente, após isso é possível determinar os níveis totais de distorções harmônicas presentes nas fases. O analisador tem outras funções importantes, como medir a flutuação de tensão de curto prazo, fazer registros de eventos, tais como interrupções, afundamentos de tensão, sobretensão, variações de frequência, dentre outras.

Este equipamento se tornou muito importante para as empresas, pois possibilita analisar a energia elétrica fornecida pela concessionária, desempenhando também um papel importante na manutenção de sistemas elétricos e na garantia da qualidade de energia, sendo indispensável em ambientes críticos, como hospitais, *data centers* e indústrias que dependem de processos precisos.

As normas estabelecem requisitos específicos para garantir que os analisadores de energia forneçam medições precisas e confiáveis, por esse motivo, eles são divididos em duas classes, A e S conforme a norma IEC [17] estabelece:

Analizador de energia de Classe A;

- Esses analisadores são os mais precisos e são usados em aplicações que requerem medições de alta precisão e conformidade com normas rigorosas;
- São capazes de medir distorções harmônicas com alta resolução;
- São ideais para análises de qualidade de energia em ambientes industriais e comerciais;
- A incerteza de medição para os indicadores de distorções harmônicas é inferior ou igual a 5,0% da tensão medida.

Analizadores de energia de classe S;

- Os analisadores de classe S são projetados para aplicações em sistemas de baixa tensão e são usados principalmente em ambientes residenciais;
- A incerteza de medição para os indicadores de distorções harmônicas é inferior ou igual a 10,0% da tensão medida;
- Oferece medição de qualidade em um formato compacto e acessível.

Para esse estudo foi utilizado o analisador de energia classe A, sendo ideal para a análise em ambiente fabril.

2.8 Modelo do analisador utilizado

Focada em serviços, e montagens em elétrica, a Embrasul nasceu prestando serviços em campo. Atenta às necessidades de manutenção, controle, e eventuais desperdícios, investiu no desenvolvimento de tecnologias no Brasil, e atualmente é uma das principais fabricantes de analisadores do país.

Será utilizado para este estudo o analisador de energia RE7080, fabricado pela Embrasul, para a análise da QEE na indústria alimentícia. Ele possui várias funcionalidades, como medição de tensão, corrente, potência ativa, potência reativa, potência aparente, fator de potência, harmônicas e registros de eventos.

Esse analisador é capaz de efetuar a transferência de dados para o *software* de análise ANL7000, que permite verificar detalhadamente todos os dados coletados, o que facilita a análise dos dados adquiridos.

Conforme descrito no catálogo da Embrasul "O analisador de energia RE7080 foi desenvolvido com a capacidade de adquirir, ao mesmo tempo, os sinais de quatro canais de corrente e quatro de tensão". Utilizando um sistema de aquisição de 16 bits, são capturadas 128 amostras em cada ciclo de maneira simultânea nos oito canais quando se trata da medição de grandezas eficazes (RMS). Com uma frequência de amostragem de 8 kHz, o sistema é capaz de detectar perturbações com uma duração mínima de 130 microssegundos. Esse processo de amostragem é conduzido de forma contínua e simultânea para todas as grandezas e eventos (Embrasul Catálogo RE7080, Out/2015).

A Figura 2.9 apresenta o analisador de energia utilizado para a análise na referida indústria analisada.

Figura 2.9: Imagem do analisador RE7080



Fonte: Catálogo da Embrasul - RE7080

Capítulo 3

Metodologia

3.1 Considerações Iniciais

A indústria alimentícia analisada é composta por sete setores, que são eles: Armazenagem, preparação, extração, caldeira, refinaria, envase e depósito de produto acabado.

O grão de soja é recebido no setor da armazenagem, que é responsável por receber, classificar, secar e estocar a matéria-prima, após esse processo a soja é entregue para o setor da preparação, que é responsável por quebrar e laminar o grão de soja, após esse processo a matéria-prima é entregue ao setor da extração, que tem o objetivo de extrair o óleo de soja da matéria-prima com o uso de solvente, nesse caso o hexano, após esse processo o óleo bruto é separado do farelo, o farelo é tostado e dessolventizado para o consumo animal, pois é altamente proteico, o óleo bruto é entregue ao setor da refinaria que tem por objetivo refinar o óleo bruto, transformando em óleo desodorizado que é levado até o setor do envase, já como produto final, no envase o óleo é envasado e rotulado e entregue ao departamento de produto acabado, que é o setor responsável por entregar o óleo ao consumidor final.

Foi selecionado, de forma estratégica, para a análise de QEE o centro de controle de motores (CCM) da extração, setor fabril crítico, pois só admite intervenções estratégicas.

Tabela 3.1: Motores alimentados pelo CCM da extração

MOTORES DE INDUÇÃO	CLASSE	TENSÃO	CV	POLOS	QTD.
	IR3	220/380	3	II	1
	IR3	220/380	4	II	1
	IR3	220/380	4	IV	2
	IR3	220/380	5	II	3
	IR3	220/380	5	IV	3
	IR3	220/380	6	IV	1
	IR3	220/380	7,5	VI	1
	IR3	220/380	10	IV	1
	IR3	220/380	10	VI	1
	IR3	220/380	12,5	II	1
	IR3	220/380	12,5	IV	2
	IR3	220/380	12,5	VIII	1
	IR3	220/380	15	IV	1
	IR3	220/380	20	II	1
	IR3	220/380	20	IV	5
	IR3	220/380	25	IV	7
	IR3	220/380	25	II	1
	IR3	220/380	40	IV	1
	IR3	220/380	100	IV	2
	IR3	220/380	150	IV	1
	IR3	220/380	20	XII	1
	IR3	220/380	3	IV	1

Fonte: Autores, 2023

A definição de analisar este CCM foi tomada para que os dados coletados pudessem ser analisados de forma exata e precisa. Ele é o responsável por energizar 39 (trinta e nove) motores, que estão dispostos na Tabela 3.1.

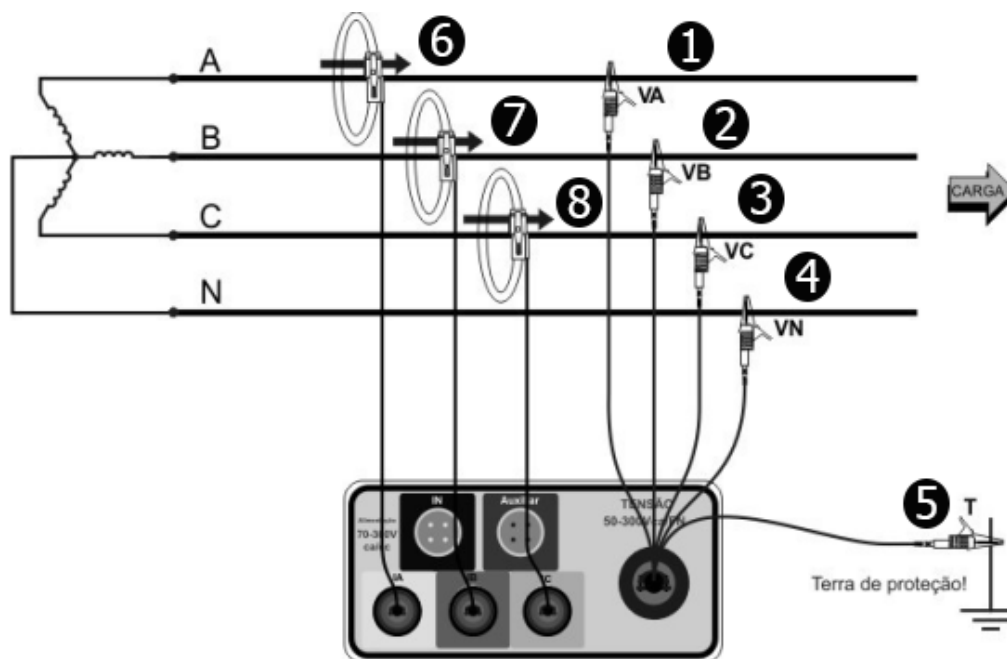
Os motores utilizados nos equipamentos da extração, setor que é energizado pelo CCM que será analisado, são motores de indução trifásicos de modelo gaiola, antiexplosivos e possuem classes, potências e polos variados e a mesma tensão de alimentação.

3.2 Metodologia para a avaliação do CCM

O analisador de QEE Embrasul RE7080 foi conectado na alimentação do disjuntor principal do CCM da extração, que é alimentado por tensão de 220 V e 60 Hz de frequência, o CCM recebe alimentação trifásica, possuindo 220 V em cada fase e 380 V entre fases.

Para a coleta dos dados, será utilizado o diagrama de conexão conforme a Figura 3.1.

Figura 3.1: Diagrama de conexão do analisador de QEE



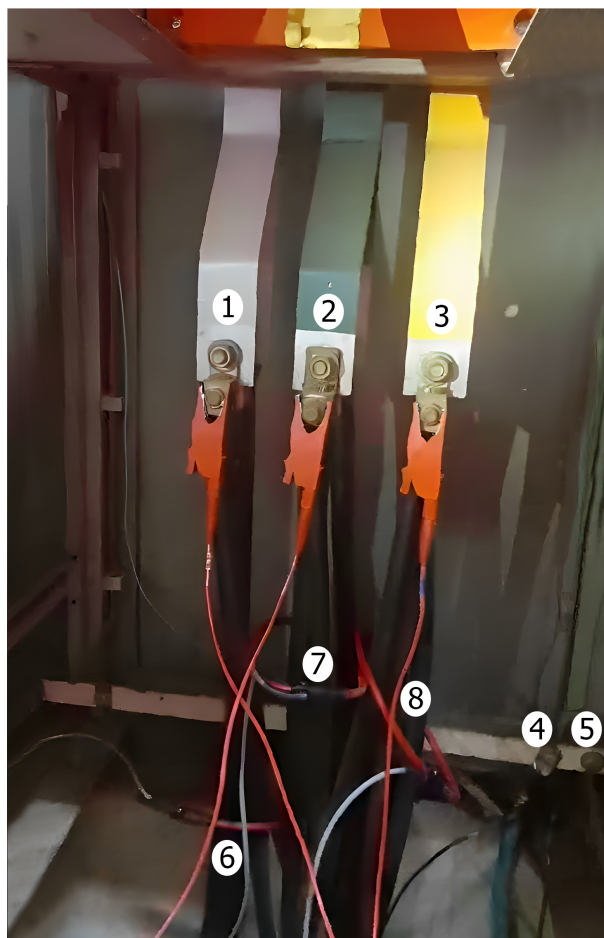
Fonte: Manual de instalação e operação do RE 70X0

E conectado no CCM conforme a Figura 3.2, as enumerações presentes na foto indicam as conexões.

De acordo com as enumerações tem-se:

1. Conexão de tensão, fase A;
2. Conexão de tensão, fase B;
3. Conexão de tensão, fase C;
4. Conexão de tensão, neutro;
5. Conexão no aterramento;
6. Conexão de corrente, fase A;
7. Conexão de corrente, fase B;
8. Conexão de corrente, fase C.

Figura 3.2: Conexão do analisador de QEE no CCM



Fonte: Autores, 2023

Foram realizadas duas medições, a primeira medição ocorreu do dia 17/10/2023 com início às 19:54:44,00 e término no dia 19 de outubro de 2023 às 01:04:41,00. O analisador de QEE foi configurado conforme a Tabela 3.2.

Para a primeira medição, é importante se atentar ao tempo de integração, tempo de registro entre as medições, que foi configurado para 1 minuto.

A segunda medição foi realizada no dia 19 de outubro de 2023 com início às 01:05:15,00 e com término no dia 20 de outubro de 2023 às 14:22:53,00. Para essa medição foi considerado o tempo de integração para 10 segundos.

Para a segunda medição o analisador de QEE foi configurado conforme a Tabela 3.3.

Tabela 3.2: Configuração para primeira medição (1 minuto)

Configuração de Medição	
Tempo de integração	1 minuto
Tipo de memória	Linear
Fator de potência	Fundamental
Tensão fase A	380 V
Tensão fase B	380 V
Tensão fase C	380 V
Relação TP	1:1
Relação TC	1:1
Escala	TI3000/3000 A
Tipo de ligação	4F-3E-ES-GE

Fonte: Autores, 2023

Tabela 3.3: Configuração para a segunda medição (10 segundos)

Configuração de Medição	
Tempo de integração	10 segundos
Tipo de memória	Linear
Fator de potência	Harmônicas
Tensão fase A	380 V
Tensão fase B	380 V
Tensão fase C	380 V
Relação TP	1:1
Relação TC	1:1
Escala	TI3000/3000 A
Tipo de ligação	4F-3E-ES-GE

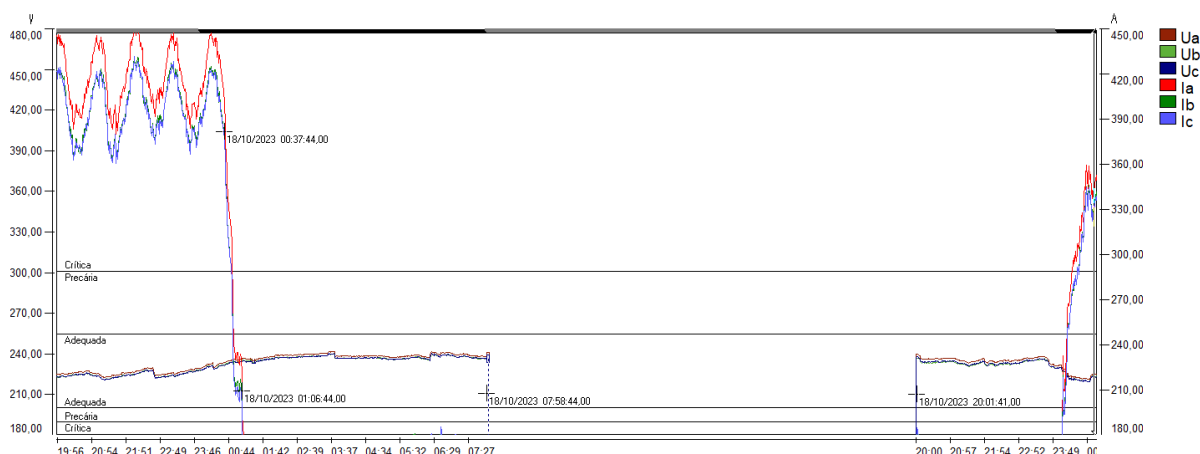
Fonte: Autores, 2023

Foram realizadas as coletas em 3 (três) cenários distintos do CCM, no primeiro cenário o CCM está em pleno funcionamento, até às 00:37:44,00 como pode-se notar na Figura 3.3, com os motores sendo desligados, de forma gradual, com início às 00:37:44,00 e término às 01:05:44,00 no dia 18 de outubro de 2023. Após esse desligamento é possível analisar o comportamento da corrente e tensão. Com o desligamento gradual dos equipamentos que são alimentados pelo CCM, pode-se notar uma elevação de tensão.

Outro ponto importante que pode-se notar na Figura 3.3 é o desligamento total do CCM que ocorre às 07:58:44,00, com a reenergização ocorrendo às 20:00:41,00 do dia 18 de outubro de 2023, este é o segundo cenário de medição.

A barra lateral esquerda representa a escala da tensão, a barra lateral direita representa a escala da corrente e a barra inferior representa o horário de medição.

Figura 3.3: Primeiro e segundo cenário de medição

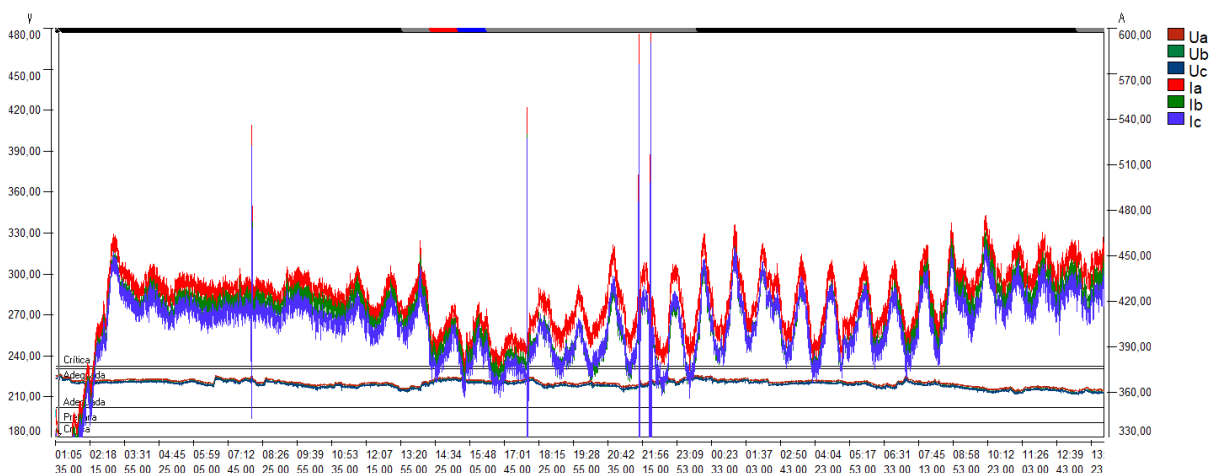


Fonte: Autores, 2023

A Figura 3.3 traz a análise de QEE realizada pelo *software* ANL7000, a mesma apresenta a corrente e tensão nas três fases, conforme a legenda no canto superior direito, são elas: Ua, a tensão da fase A na cor vermelha; Ub, a tensão na fase B na cor verde; Uc, a tensão na fase C na cor azul; Ia, a corrente da fase A na cor azul marinho; Ib, a tensão na fase B na cor vermelha; Ic, a tensão na fase C na cor azul verde.

O terceiro cenário de medição inicia-se às 01:05:25;00 do dia 19 de outubro de 2023 com os motores sendo ligados de forma gradual, como pode-se notar na Figura 3.4, a partida dos motores é perceptível por meio da variação da corrente, e possui o término no dia 20 de outubro de 2023 às 14:22:53,00.

Figura 3.4: Terceiro cenário de medição



Fonte: Autores, 2023

Capítulo 4

Apresentação e análise dos resultados

Neste capítulo serão apresentadas as análises dos dados obtidos pelo analisador de energia RE7080, que foi conectado no CCM da extração. Foi utilizado o *software* ANL7000 para fazer verificação dos dados, O mesmo é disponibilizado pela EMBRASUL, visando deixar a análise mais didática e com fácil entendimento.

Com base nos dados obtidos, foi possível verificar a QEE atual da indústria alimentícia e, a partir disso, será feita a análise dos dados encontrados com a finalidade de certificar que os parâmetros analisados estão conforme os padrões exigidos pelo Módulo 8 do PRODIST.

As análises foram baseadas em 5 (cinco) indicadores de qualidade de energia que são:

- Tensão em regime permanente;
- Harmônicos;
- Fator de potência;
- Flutuação de tensão;
- Variação de frequência.

4.1 Análise da qualidade de energia elétrica

4.1.1 Tensão em Regime permanente

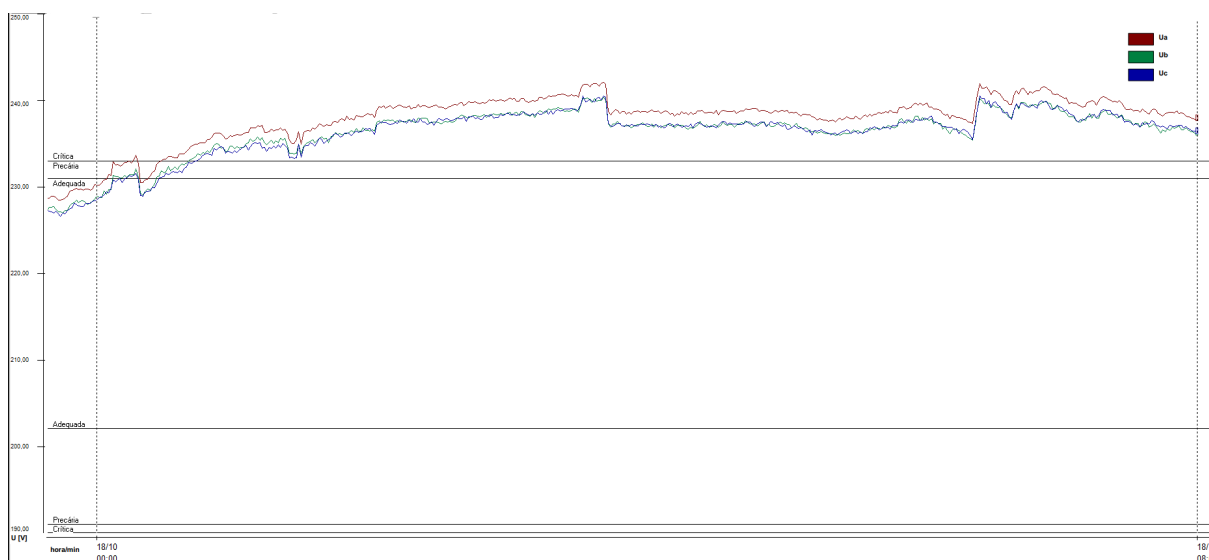
Conforme o PRODIST, a tensão em regime permanente refere-se à comparação do valor de tensão obtido por medição apropriada, no ponto de conexão, em relação aos níveis de tensão especificados como adequados, precários e críticos [7].

Os limites de tensão em 220V estão descritos na Tabela 2.1, esse valor será utilizado como referência, pois o CCM analisado opera em baixa tensão.

A análise será realizada nos três cenários propostos, avaliando os distúrbios de QEE. O primeiro cenário inicia-se às 00:00:00,00 do dia 18 de outubro de 2023 e vai até às 08:00:00,00 durante esse período os níveis de tensão das fases elevam drasticamente.

A Figura 4.1 apresenta o início da elevação de tensão logo após o desligamento dos motores, nesse momento a tensão sai do nível adequado, passa por precária e sobe para crítica no decorrer de 30 minutos, ultrapassando os valores limites descritos no PRODIST de 233 V, conforme a Tabela 2.1.

Figura 4.1: Tensão no CCM sem motores



Fonte: Autores, 2023

Durante esse período, a tensão máxima de 242,12 V foi encontrada na fase A, esse valor está 10% acima dos níveis adequados, esse episódio ocorreu no dia 19 de outubro às 06:25:44,00, já a tensão mínima de 219,56 V ocorreu minutos antes do desligamento completo dos motores.

Para encontrar a tensão média dessa análise, foram utilizadas todas as amostras desse período totalizando 432. A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4.1: Níveis de tensão durante a análise

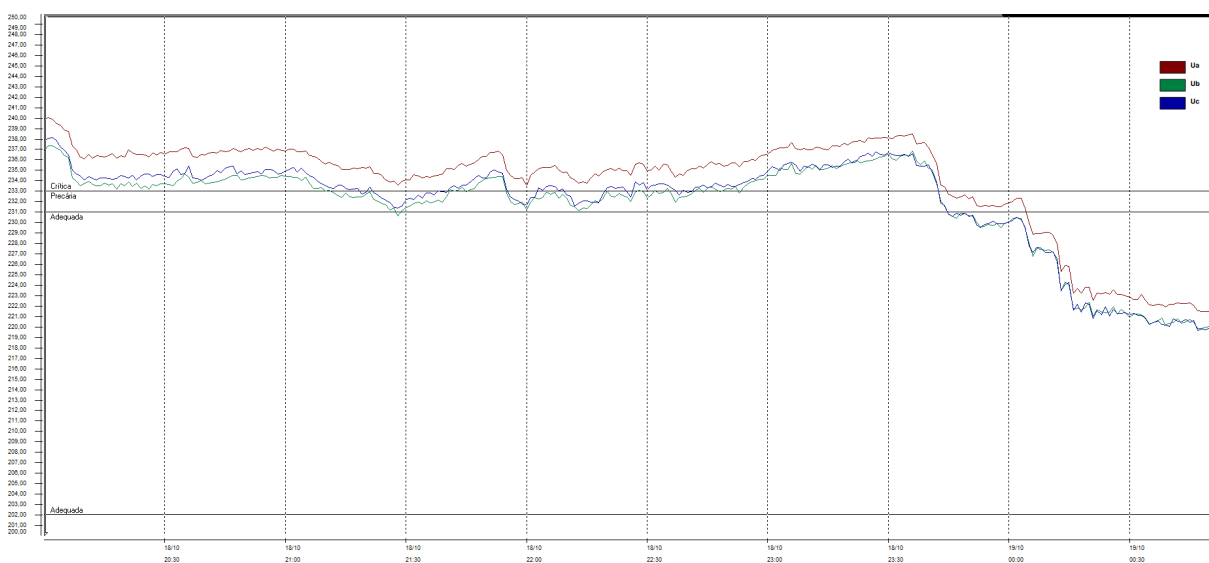
	Fase A	Fase B	Fase C
Tensão Média	237,53 V	235,97 V	235,89 V
Tensão Máxima	242,12 V	240,34 V	240,54 V
Tensão Mínima	221,50 V	219,86 V	219,56 V

Fonte: Autores, 2023

Com base nos dados analisados, conclui-se que houve elevação de tensão durante todo o tempo após o desligamento dos motores, totalizando 8 horas de sobretensão que inicia-se às 00:00:00,00 do dia 18 de outubro com término às 08:00:00,00 do mesmo dia, ao longo desse período todas as fases foram afetadas, apresentando valores destoantes dos padrões exigidos pelo PRODIST.

No segundo cenário, após a reenergização da indústria que ocorreu às 20:00:00,00 do dia 18 de outubro, os motores ainda estavam desligados, porém, a tensão já estava em 240,06 V na fase A, como a Figura 4.2 mostra, totalmente divergente dos limites permitidos. No entanto, após o religamento dos motores às 00:00:00 a tensão apresentou diminuição nos valores e se estabelecendo nos padrões exigidos.

Figura 4.2: Níveis de tensão antes e depois do religamento dos motores



Fonte: Autores, 2023

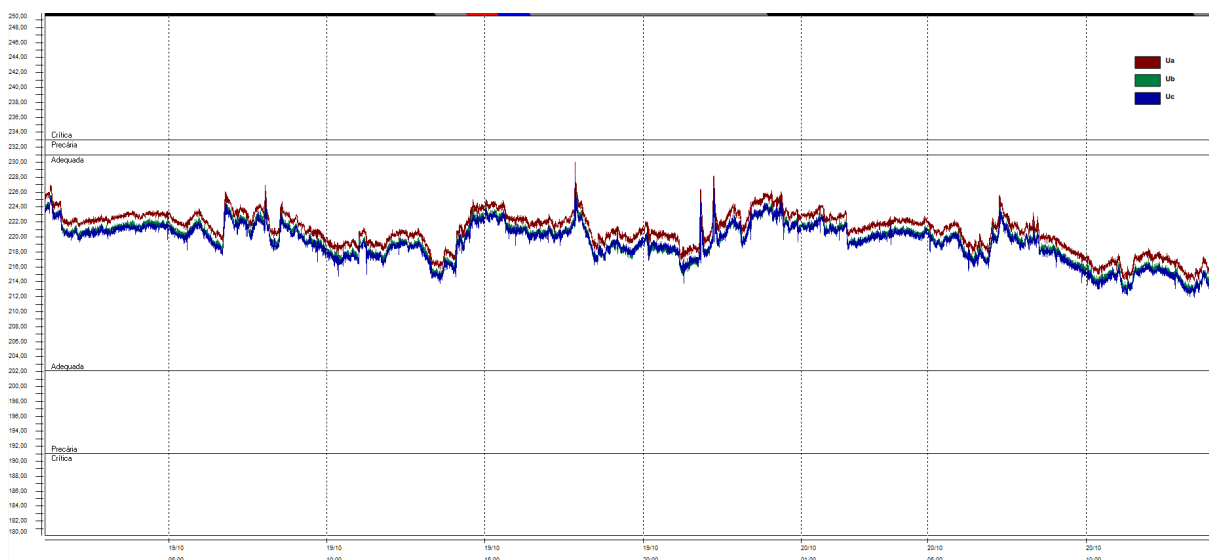
O maior valor de tensão encontrado durante a reenergização foi às 20:00:00,00, chegando

em 240,06 V na fase A. A análise aponta que após o religamento da indústria, a menor tensão encontrada ocorreu 1 (uma) hora depois do religamento dos motores, momento que a tensão diminui por conta da adição de carga nas fases. Nesse trecho, a tensão se estabilizou próxima à 220 V nas fases A, B e C.

Com base nos dados analisados, houve afundamento de tensão no momento da partida dos motores, os dados também apresentaram que durante esse período existe uma péssima qualidade de tensão, pois os valores encontrados nas fases A, B e C não se encontram dentro dos padrões adequados exigidos pelo PRODIST, apenas após o religamento dos motores, o nível de tensão se adéqua.

O terceiro cenário iniciou-se no dia 19 de outubro às 01:05:15,00 com término no dia 20 de outubro às 14:22:53,00, nesse período é possível observar a tensão necessária para manter o funcionamento da indústria, pois, todos os 39 motores estão em funcionamento, representando a operação em dias normais. A Figura 4.3 apresenta as tensões em regime permanente das três fases que compõem o CCM.

Figura 4.3: Níveis de tensão durante a análise



Fonte: Autores, 2023

A Tabela 4.2 apresenta as tensões mínimas, que ocorreram no mesmo horário, às 13:25:45,00 do dia 19 de outubro de 2023, as máximas ocorreram às 17:50:35,00 do dia 19 de outubro de 2023 e a média foi obtida através das 13.341 amostras geradas durante a análise.

Tabela 4.2: Média das tensões

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensão Média	220,85 V	219,40 V	219,19 V
Tensão Máxima	230,01 V	228,22 V	228,08 V
Tensão Mínima	213,94 V	212,24 V	211,96 V

Fonte: Autores, 2023

Então, conclui-se que durante esse período, os níveis de tensão se encontram em perfeito estado. Em nenhum momento as tensões ultrapassam os limites permitidos pelo PRODIST.

Agora para a análise da qualidade das tensões no primeiro e no segundo cenário, foram utilizadas 1.006 amostras, portanto apenas 30% dessas amostras apresentaram níveis de tensão em estado adequado, os outros 70% estavam em estado crítico ou precário.

Para a análise da qualidade das tensões são utilizadas as Equações (2.1) e (2.2) visando encontrar a porcentagem das durações relativa da transgressão.

O primeiro e o segundo cenário obtiveram resultados extremamente fora dos limites exigidos do PRODIST. A leitura mais crítica de DRP foi encontrada na fase B de 10,44%, já as outras foram 3,68% na fase A e 6,56% na fase C, fora do limite de 0,5%. Mesma situação ocorreu no DRC, com o pior valor na fase A, 67,40%, a fase B com 58,05% e a fase C com 61,23% encontrando-se fora dos limites de 3%. A Tabela 4.3 mostra os dados obtidos.

Tabela 4.3: Resultados de DRP e DRC da tensões durante primeiro e segundo cenário

	Ua	Ub	Uc
Total de leituras	1006	1006	1006
Leituras em queda	(2) 0,20 %	(2) 0,20 %	(2) 0,20 %
Leituras zero	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %
Leituras válidas	(1006) 99,80 %	(1006) 99,80 %	(1006) 99,80 %
Leituras adequadas	(291) 28,93 %	(317) 31,51 %	(324) 32,21 %
Leituras precárias (inferior)	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %
Leituras precárias (superior)	(37) 3,68 %	(105) 10,44 %	(66) 6,56 %
Leituras precárias (total)	(37) 3,68 %	(105) 10,44 %	(66) 6,56 %
DRP calculada	3,68 %	10,44 %	6,56 %
Leituras críticas (inferior)	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %
Leituras críticas (superior)	(678) 67,40 %	(584) 58,05 %	(616) 61,23 %
Leituras críticas (total)	(678) 67,40 %	(584) 58,05 %	(616) 61,23 %
DRC calculado	67,40 %	58,05 %	61,23 %

Fonte: Autores, 2023

Tendo como base o padrão proposto no PRODIST, as medições da qualidade de tensão devem

se estender por sete dias, para serem consideradas leituras válidas, devem ser executadas a cada 10 (dez) minutos, dentro do período de observação, e assim apresentar o valor de 1008 amostras válidas.

No terceiro cenário a análise foi realizada entre os dias 18 de outubro e 20 de outubro, totalizando 37 horas e 1.008 leituras válidas.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados obtidos, percebe-se que todos os valores estão em 0%, isso mostra uma excelente qualidade de tensão, sendo os limites de 3 % de DRP e 0,5% de DRC.

Tabela 4.4: Resultados de DRP e DRC da tensões durante terceiro cenário

	Ua	Ub	Uc
Total de leituras	1008	1008	1008
Leituras em queda	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %
Leituras zero	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %
Leituras válidas	(1008) 100,00 %	(1008) 100,00 %	(1008) 100,00 %
Leituras adequadas	(1008) 100,00 %	(1008) 100,00 %	(1008) 100,00 %
Leituras precárias (inferior)	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %
Leituras precárias (superior)	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %
Leituras precárias (total)	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %
DRP calculado	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Leituras críticas (inferior)	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %
Leituras críticas (superior)	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %
Leituras críticas (total)	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %	(0) 0,00 %
DRC calculado	0,00 %	0,00 %	f0,00 %

Fonte: Autores, 2023

4.1.2 Harmônicos

Será realizada a análise das componentes harmônicas, dentre elas, a distorção harmônica total de tensão para as componentes harmônicas múltiplas de 3 (DHI) e a componente harmônica total de tensão (DHT).

Será considerado o primeiro e o terceiro cenário de medição, o segundo cenário não será considerado pois a CCM foi totalmente desenergizado, não havendo assim nenhum dado para ser analisado. A análise das componentes harmônicas estarão divididas entre a análise das harmônicas das tensões e das correntes, ambas com análises das 3 (três) fases.

A terceira, quinta, sétima e nona componentes foram escolhidas, de forma estratégica, pois são as componentes que apresentam as maiores porcentagens de distorções em relação a

harmônica fundamental. As componentes harmônicas, segundo o PRODIST, podem representar valores limites conforme a Tabela 4.5.

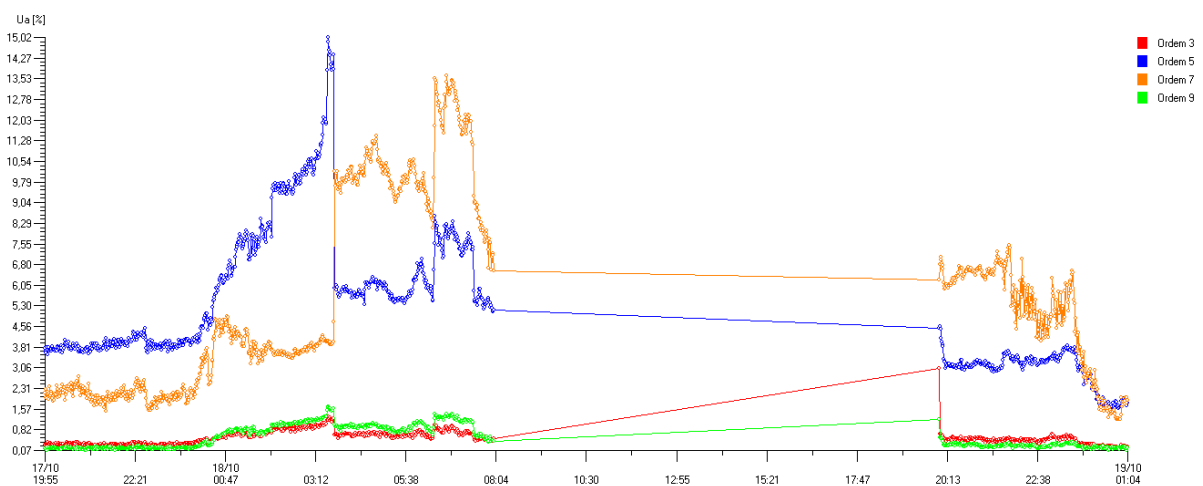
Tabela 4.5: Distorção Harmônica individual de tensão

ORDEM HARMÔNICA	Distorção Harmônica individual de tensão [%]	
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5
	7	6,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5
	9	2

Fonte: Autores, 2023

A Figura 4.4 apresenta a análise harmônica da tensão na fase A, no primeiro cenário de medição.

Figura 4.4: 3°, 5°, 7° e 9° harmônicas da fase A da tensão no primeiro cenário



Fonte: Autores, 2023

Pode-se notar na Figura 4.4 uma perceptível variação da DHT. O primeiro ponto para ser analisado é às 01:05:44;00 do dia 18 de outubro de 2023, a quinta harmônica apresenta o valor de DHI de 7,51%, ultrapassando assim o valor permitido que consta na Tabela 2.3, apresentando uma distorção harmônica, e permanece variando fora da condição normal até às 03:42:44,00 atingindo o maior valor, o DHI de 13,86% da fundamental.

Às 03:43:44;00 a sétima harmônica apresenta um valor de DHI de 10,17%, assumindo o lugar da quinta harmônica com relação a variação, e permanece com o valor alterado até às 07:55:44;00 onde apresenta o valor de DHI de 7,58%.

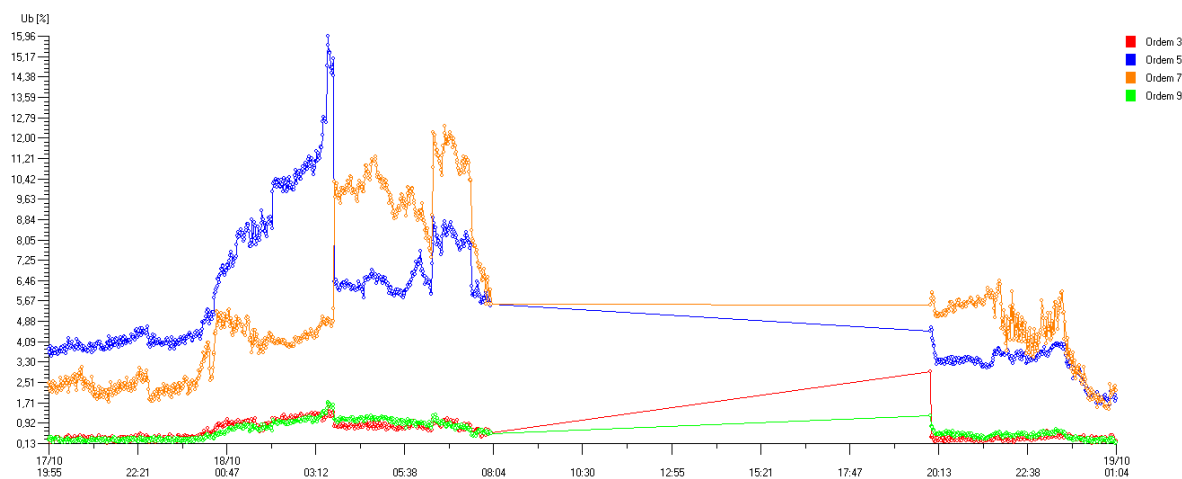
O maior valor de DHI na tensão da fase A encontra-se às 06:25:44,00 na sétima harmônica com um valor de DHI de 13,53%.

Logo, o DHT acompanhando a variação do DHI da quinta e sétima componente, apresenta o valor de 10,11% às 02:02:41,00, ou seja, valor acima do permitido, e segue fora do permitido até às 07:38:44,00 com o pico às 06:15:44,00 registrando o valor de DHT de 16,20%.

Importante nessa análise que a variação das componentes harmônicas é notável após o desligamento dos motores que são energizados pelo CCM, que ocorre de forma total às 01:05:44,00.

A Figura 4.5 apresenta a análise harmônica da tensão na fase B, no primeiro cenário de medição.

Figura 4.5: 3°, 5°, 7° e 9° harmônicas da fase B da tensão no primeiro cenário



Fonte: Autores, 2023

Pode-se notar na Figura 4.5 uma perceptível variação da DHT. O primeiro ponto para ser analisado é às 00:53:44,00 do dia 18 de outubro de 2023, momento que a quinta harmônica assume o valor de DHI de 7,58%, ultrapassando assim o valor permitido, que consta na Tabela 2.3, apresentando uma distorção harmônica, e permanecendo com o valor fora de padrão até às 03:42:44,00 com DHI de 14,41%.

Às 03:43:44,00 do dia 18 de outubro de 2023 a sétima harmônica apresenta o valor de DHI de 10,29%, esse valor de distorção harmônica permanece até às 07:44:44,00 com o valor de DHI de 6,77%.

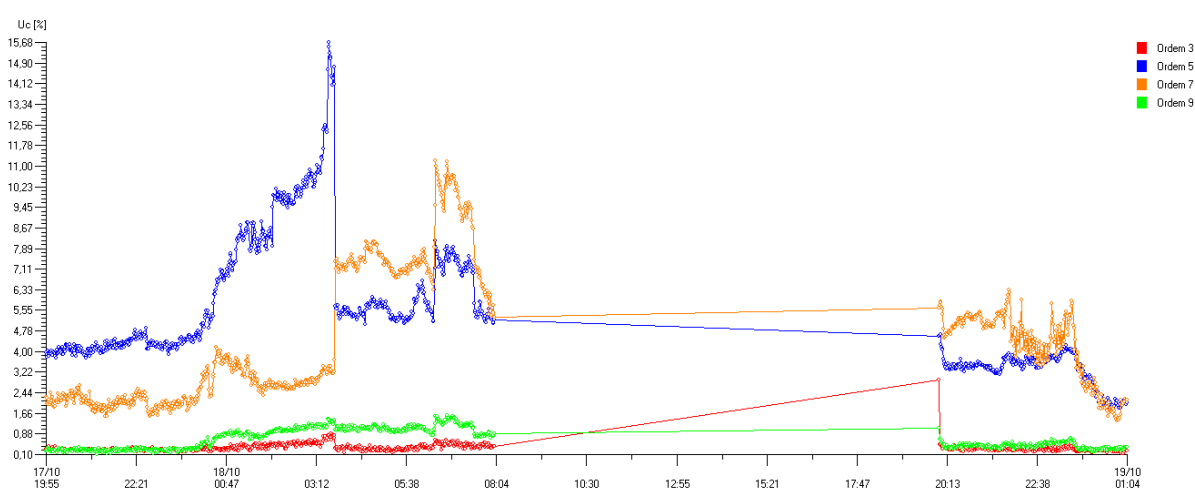
O maior valor de DHI na tensão da fase B encontra-se às 03:32:44,00 na quinta harmônica com um valor de DHI de 15,95%.

Logo, o DHT acompanhando a variação do DHI da quinta e sétima componente, apresenta o valor de 10,04% às 01:05:44;00, ou seja, valor acima do permitido, e segue fora do permitido até às 06:20:44,00 com o pico às 03:32:44,00 registrando o valor de DHT de 17,00%.

Assim como na fase A, é notável a variação das distorções no momento em que os motores são desligados.

A Figura 4.6 apresenta a análise harmônica da tensão na fase C, no primeiro cenário de medição.

Figura 4.6: 3°, 5°, 7° e 9° harmônicas da fase C da tensão no primeiro cenário



Fonte: Autores, 2023

Pode-se notar na Figura 4.6 uma perceptível variação da DHT. O primeiro ponto para ser analisado é às 00:53:44,00 do dia 18 de outubro de 2023, momento que a quinta harmônica assume o valor de DHI de 7,63%, ultrapassando assim o valor permitido, que consta na Tabela 2.3, apresentando uma distorção harmônica, e permanecendo com o valor fora de padrão até às 03:42:44,00 com o valor de DHI de 14,07%.

Às 03:43:44,00 do dia 18 de outubro de 2023 a sétima harmônica apresentou o valor de DHI de 7,37%, esse valor de distorção harmônica permanece até às 06:21:44,00 com o valor de DHI de 6,52%.

O maior valor de DHI na tensão da fase B encontra-se às 03:32:44,00 na quinta harmônica com um valor de DHI de 15,67%.

Logo, o DHT acompanhando a variação do DHI da quinta e sétima componente, apresenta o valor de 10,03% às 02:02:44;00, ou seja, valor acima do permitido, e segue fora do permitido até

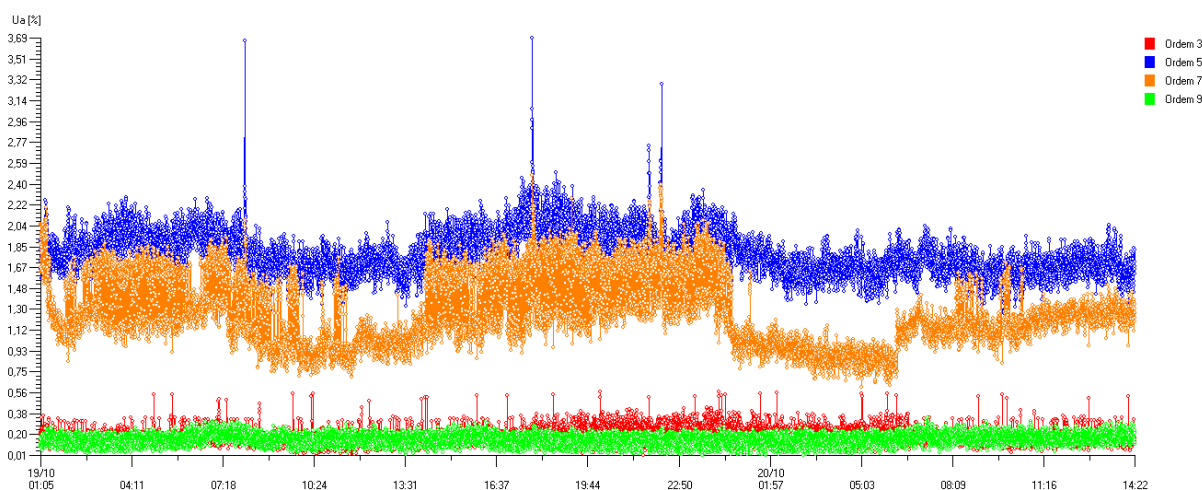
às 04:51:44,00 com o pico às 03:32:44,00, registrando o valor de DHT de 16,19%.

Assim como na fase A e fase B, é notável a variação das distorções no momento em que os motores são desligados.

Assim, finaliza-se as análises das componentes harmônicas das tensões no primeiro cenário de medição e inicia-se as análises no terceiro cenário.

A Figura 4.7 apresenta a análise harmônica da tensão na fase A, no terceiro cenário de medição.

Figura 4.7: 3°, 5°, 7° e 9° harmônicas da fase A da tensão no terceiro cenário



Fonte: Autores, 2023

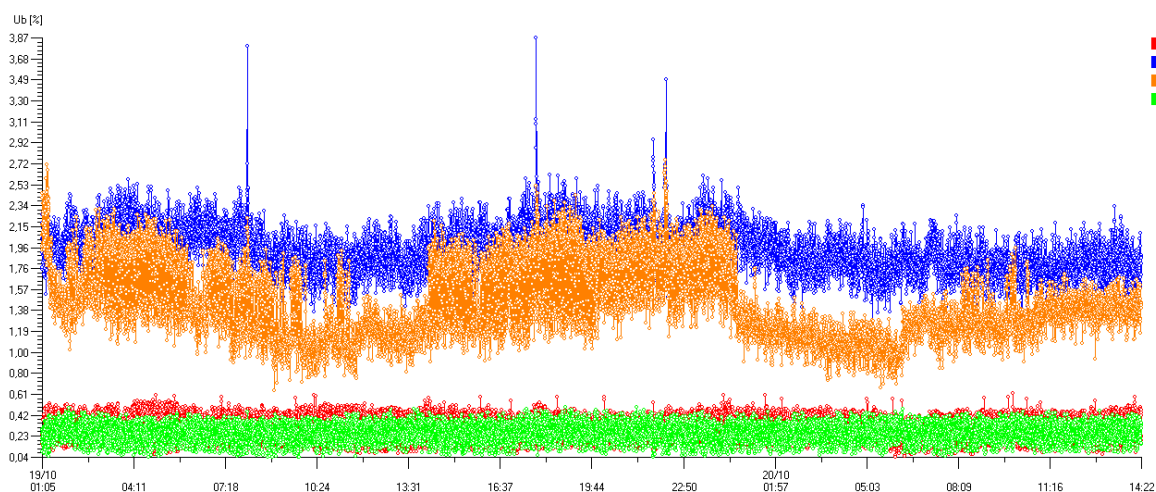
As componentes harmônicas analisadas encontram-se dentro dos padrões estabelecidos no PRODIST. Pode-se destacar o maior valor de DHI da quinta harmônica que é de 3,69% às 07:31:20,00 e a sétima componente apresenta o maior valor de DHI de 2,48% às 17:30:35,00 do dia 19 de outubro de 2023.

Portanto, o DHT de 4,65%, com o maior valor é registrado às 17:51:05,00 no dia 19 de outubro de 2023, não havendo assim distorção harmônica fora dos limites estabelecidos no PRODIST.

É importante ressaltar que no terceiro cenário, o CCM está energizado e alimentando os seus respectivos motores.

A Figura 4.8 apresenta a análise harmônica da tensão na fase B, no terceiro cenário de medição.

Figura 4.8: 3°, 5°, 7° e 9° harmônicas da fase B da tensão no terceiro cenário



Fonte: Autores, 2023

As componentes harmônicas analisadas encontram-se dentro dos padrões estabelecidos no PRODIST. Pode-se destacar o maior valor de DHI da quinta harmônica que é de 3,87% às 17:35:30,00 e a sétima componente apresenta o maior valor de DHI de 2,76% às 21:40:45,00 do dia 19 de outubro de 2023.

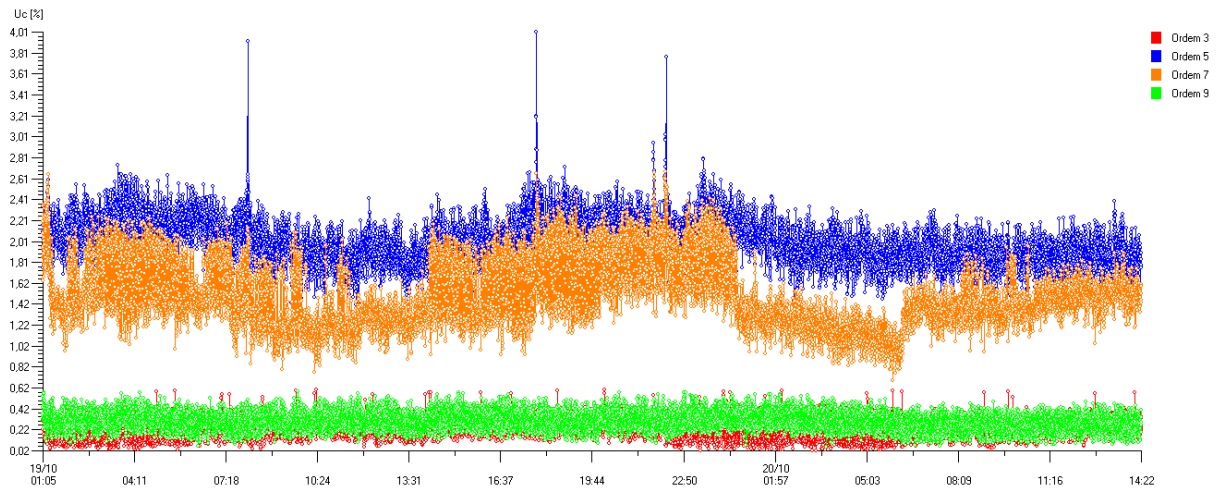
Portanto, o DHT de 4,65%, com o maior valor é registrado às 17:51:05,00 no dia 19 de outubro de 2023, não havendo assim distorção harmônica fora dos limites estabelecidos no PRODIST.

A Figura 4.9 apresenta a análise harmônica da tensão na fase C, no terceiro cenário de medição.

As componentes harmônicas analisadas encontram-se dentro dos padrões estabelecidos no PRODIST. Pode-se destacar o maior valor de DHI da quinta harmônica que é de 4,01% às 17:20:51,40 e a sétima componente apresenta o maior valor de DHI de 2,68% às 21:41:25,00 do dia 19 de outubro de 2023.

Portanto, o DHT de 5,30%, com o maior valor é registrado às 17:51:25,00 no dia 19 de outubro de 2023, não havendo assim distorção harmônica fora dos limites estabelecidos no PRODIST.

Figura 4.9: 3°, 5°, 7° e 9° harmônicas da fase C da tensão no terceiro cenário



Fonte: Autores, 2023

Assim, finaliza-se as análises das componentes harmônicas ímpares múltiplas de três, das tensões do terceiro cenário.

Para as componentes de ordem par, será realizada a análise das componentes harmônicas, evidenciando a distorção harmônica total de tensão para as componentes harmônicas pares (DHP).

As componentes harmônicas, de ordem par, analisadas de forma estratégica são a segunda, quarta, sexta e oitava componente. Os limites são descritos conforme a Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Limites para as componentes harmônicas pares

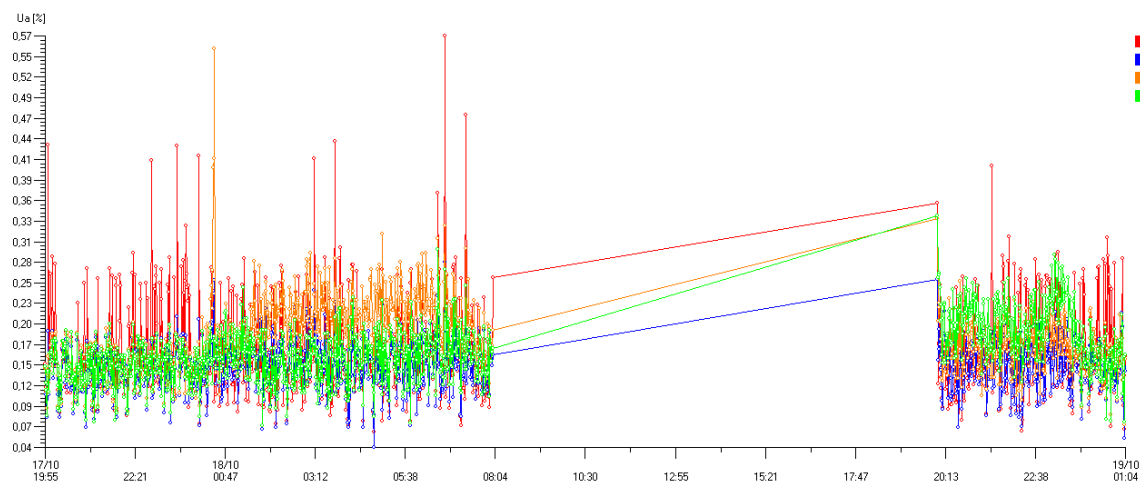
ORDEM HARMÔNICA	Distorção Harmônica individual de tensão [%]	
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	
Pares	2	2,5
	4	1,5
	6	1
	8	1

Fonte: Autores, 2023

A Figura 4.10 representa as componentes harmônicas pares, correspondentes a análise da fase A da tensão no primeiro cenário de medição.

Pode-se notar que as componentes apresentam distorções harmônicas, com o valor máximo de 0,57% de DHP, da segunda componente harmônica, leitura coletada no dia 17 de outubro de 2023 às 06:22:41;00.

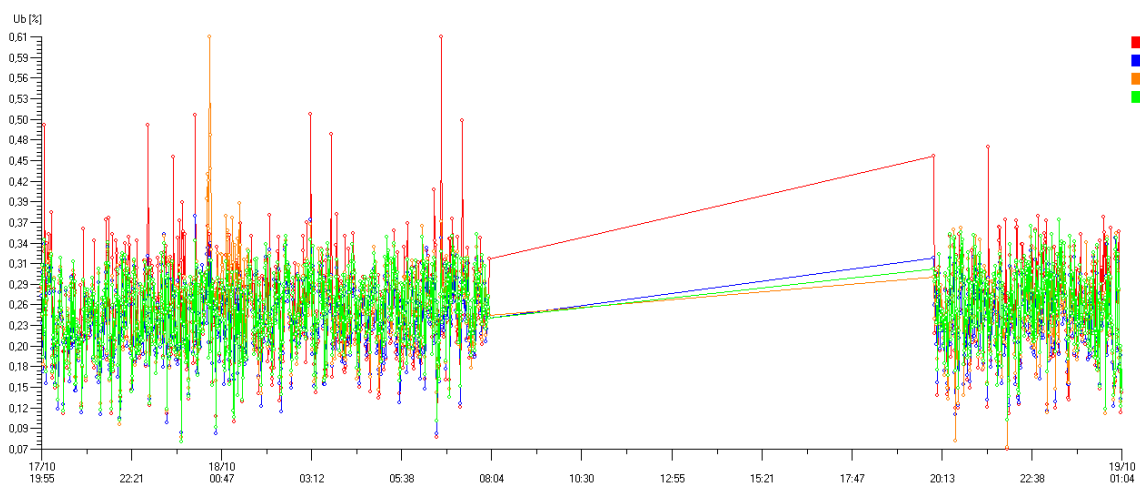
Figura 4.10: 2°, 4°, 6° e 8° harmônicas da fase A da tensão no primeiro cenário



Fonte: Autores, 2023.

A Figura 4.11 representa as componentes harmônicas pares, correspondentes a análise da fase B da tensão no primeiro cenário de medição.

Figura 4.11: 2°, 4°, 6° e 8° harmônicas da fase B da tensão no primeiro cenário

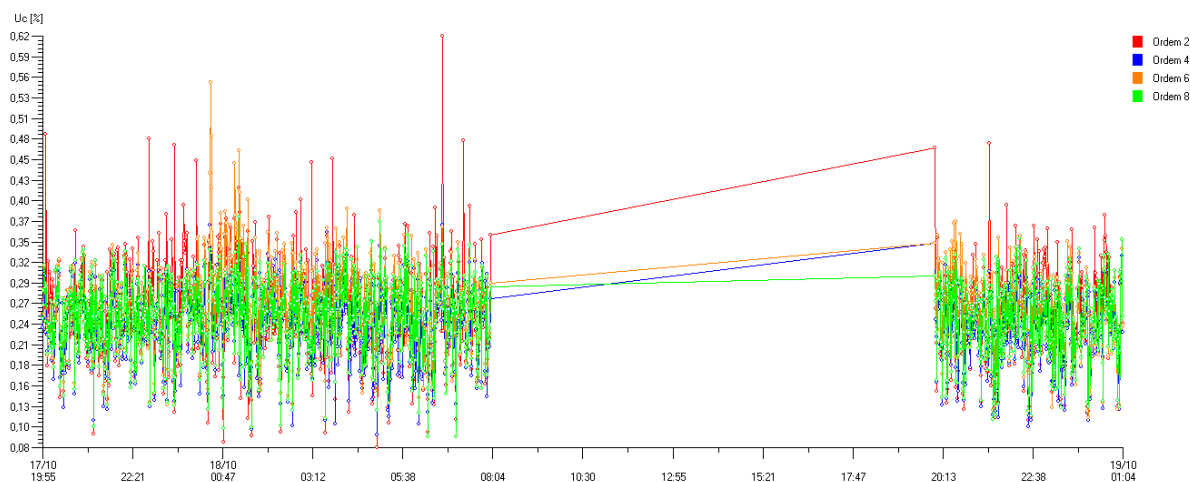


Fonte: Autores, 2023

Pode-se notar que as componentes apresentam distorções harmônicas, com o valor máximo de 0,61% de DHP, da segunda componente harmônica, leitura coletada no dia 17 de outubro de 2023 às 06:22:41;55.

A Figura 4.12 representa as componentes harmônicas pares, correspondentes a análise da fase C da tensão no primeiro cenário de medição.

Figura 4.12: 2°, 4°, 6° e 8° harmônicas da fase C da tensão no primeiro cenário



Fonte: Autores, 2023

Pode-se notar que as componentes apresentam distorções harmônicas, com o valor máximo de 0,62% de DHP, da segunda componente harmônica, leitura coletada no dia 17 de outubro de 2023 às 06:22:41;40.

4.1.3 Fator de potência

A análise do fator de potência será dividida em três cenários, o primeiro cenário representa os motores sendo desligados de forma gradual, o segundo será no religamento da indústria e o terceiro que representa o funcionamento normal da indústria,

Para encontrar os valores do fator de potência, é necessário a utilização da Equação (2.12), os valores de potência ativa e aparente que são disponibilizados pelo analisador de energia após a análise.

O primeiro cenário aconteceu no dia 18 de outubro de 2023 das 00:00:00,00 até às 08:00:00,00. Durante esse período os motores estão desligados, porém, o banco de capacitores continuou ativo, pois ele funciona de forma manual. Apenas uma pessoa pode desligá-lo, dessa forma, a potência reativa fica negativa. A Tabela 4.7 apresenta os valores coletado pelo analisador.

Tabela 4.7: Potência Ativa, Reativa, Aparente e Fator de Potência

FASE	kW	kVAr	kVA	FP
A	19,652	-22,823	43,770	-0,050
B	19,821	-24,532	43,641	-0,060
C	18,189	-23,488	42,876	-0,040
TOTAL	57,644	-70,845	130,253	-0,05

Fonte: Autores, 2023

O motivo do fator de potência estar negativo é o banco de capacitores que continua ativo, mesmo depois dos motores estarem desligados, isso ocorre porque o mesmo foi dimensionado para atuar nos momentos em que os níveis de cargas devem estar funcionando no máximo, quando essas cargas são desligadas a potência de neutralização dos capacitores fica em excesso.

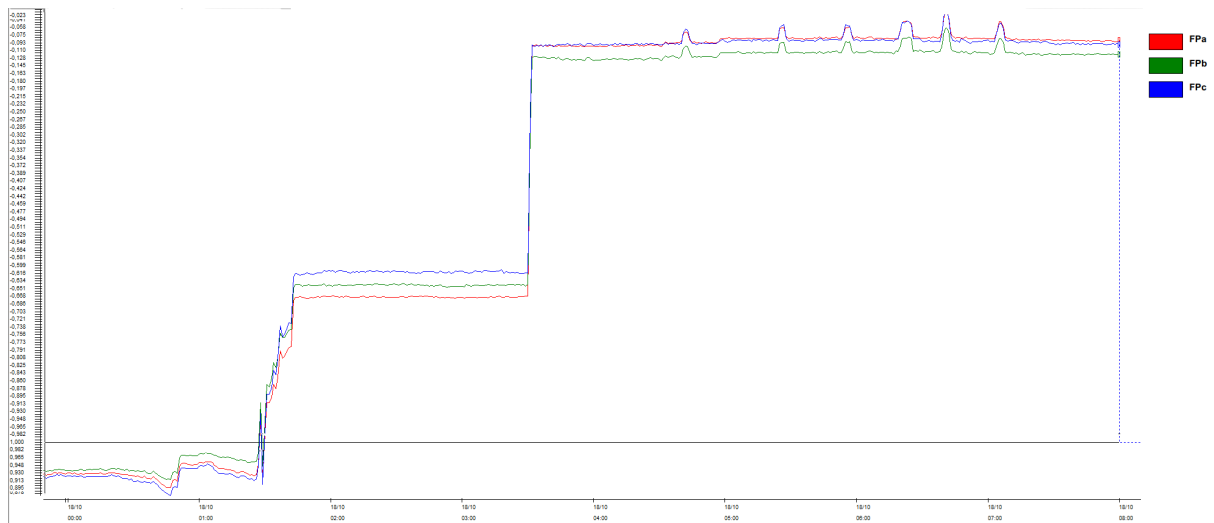
Os bancos de capacitores são usados para compensar a componente reativa indutiva de cargas, melhorando assim o fator de potência. Quando um banco de capacitores é ligado sem carga, os capacitores começam a fornecer energia reativa em excesso ao sistema, pois não há energia indutiva. Por esse motivo, a criação de uma automação para o desligamento simultâneo dos motores e capacitores seria de extrema importância para mitigar esse problema. No momento da análise ele funcionava de forma manual.

A Figura 4.13 apresenta o fator de potência total em valores positivos de 0,935 durante o tempo em que os motores elétricos estão ligados, porém, após o desligamento completo das cargas que começa às 00:00:00,00 e finaliza às 01:28:44,00 o fator de potência total cai para -0,670 e no pior caso às 06:23:44,00 do dia 18 de outubro chegou a -0,058 na fase C.

O segundo momento acontece no restabelecimento da indústria que começa às 20:00:00,00 do dia 18 de outubro, porém apenas às 00:00:00,00 os motores são reativados. Durante esse período o fator de potência apresentado pelo analisador se mantêm negativo, com a potência reativa em valores abaixo de 0, mesma situação presente no primeiro cenário. Durante esse período, o banco de capacitores também permaneceu ativado.

Com base nos dados disponibilizados pelo analisador no momento anterior ao religamento dos motores elétricos, a Tabela 4.8 apresenta a potência ativa em kW, a reativa em kVAr e a aparente em kVA.

Figura 4.13: Fator de potência no primeiro cenário



Fonte: Autores, 2023

Tabela 4.8: Fator de potência no primeiro cenário

FASE	kW	kVAr	kVA
A	10,798	-32,187	36,711
B	11,421	-32,792	37,107
C	10,273	-32,242	36,543

Fonte: Autores, 2023

Conforme a Figura 4.14 mostra, assim que os motores são reativados, o fator de potência começa a se reestabelecer demorando cerca de 40 minutos, apenas às 00:40:41,00 o fator de potência total já está em 0,920, durante esses 40 minutos, o menor valor encontrado foi de 0,830 na fase C.

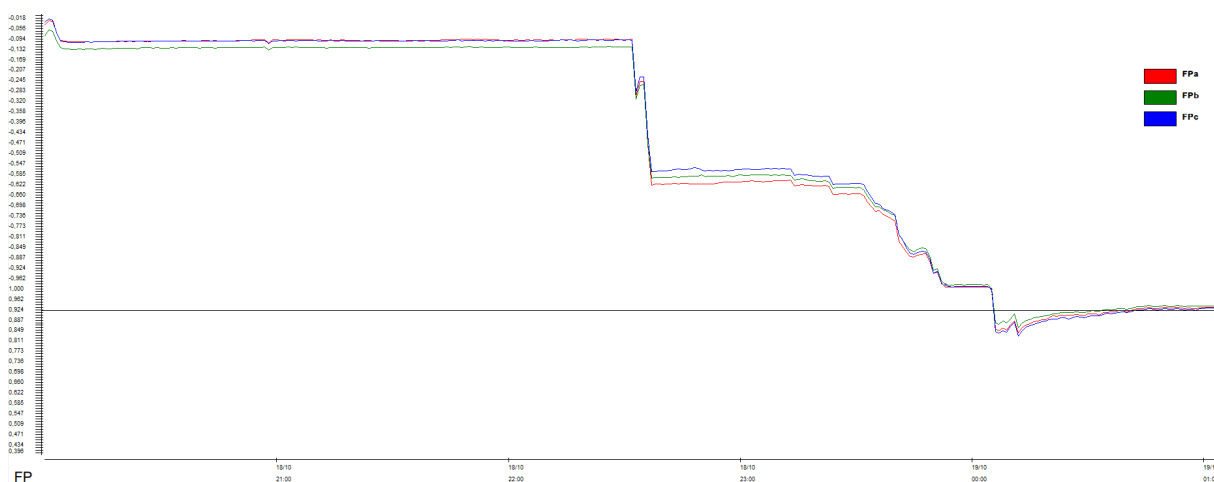
Após o religamento dos motores, os valores de potência ativa, reativa e aparente subiram e melhoram, conseqüentemente, o fator de potência. A Tabela 4.9 mostra a média dos dados medidos pelo analisador.

Tabela 4.9: Fator de potência no segundo cenário

FASE	kW	kVAr	kVA
A	62,651	28,021	68,734
B	60,063	25,112	65,175
C	58,851	27,311	64,985
TOTAL	181,565	80,446	198,868

Fonte: Autores, 2023

Figura 4.14: Fator de potência no terceiro cenário



Fonte: Autores, 2023

No terceiro cenário o analisador mostra que a indústria apresenta valores adequados de fator de potência conforme a Tabela 4.10 apresenta, mantendo a média durante o funcionamento de 0,938. Porém, com o decorrer da análise, ocorreram três problemas conforme a Figura 4.15 mostra. Nesses períodos os valores apresentados não se encontram dentro dos limites do PRODIST.

Tabela 4.10: Potência Ativa, Reativa, Aparente e Fator de Potência

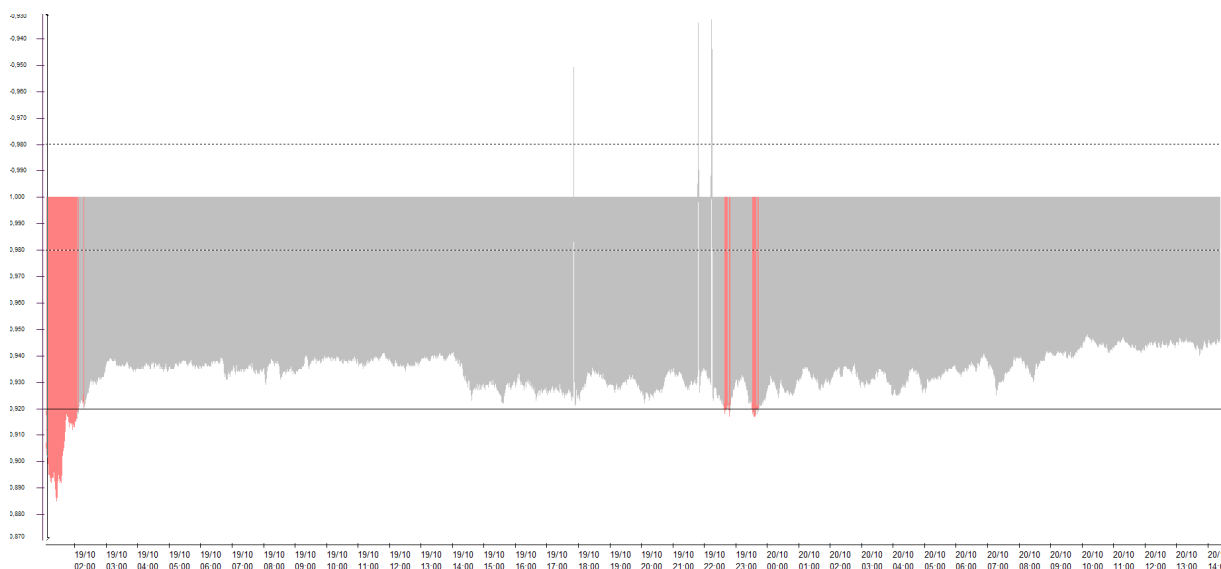
FASE	kW	kVAr	kVA	FP
A	86,673	31,988	92,388	0,938
B	84,034	29,820	89,169	0,942
C	82,416	31,375	88,186	0,934
TOTAL	253,124	93,183	269,731	0,938

Fonte: Autores, 2023

A primeira situação é logo após o religamento dos motores, durante esse momento o fator de potência fica abaixo do permitido por duas horas, atingindo 0,89 nas três fases. Essa oscilação ocorreu no período de 00:00:00,00 até às 02:00:00,00 conforme é possível visualizar na Figura 4.15.

As outras duas situações de baixo fator de potência foram afundamentos que duraram em média dez minutos. O primeiro ocorreu de 22:37:23,00 até às 22:48:33,00, ficando com valores abaixo de 0,916, e o segundo foi de 23:33:53,00 até 23:43:53,00, valores encontrados de 0,918, esses dois problemas ocorreram na Fase C.

Figura 4.15: Fator de potência primeiro cenário

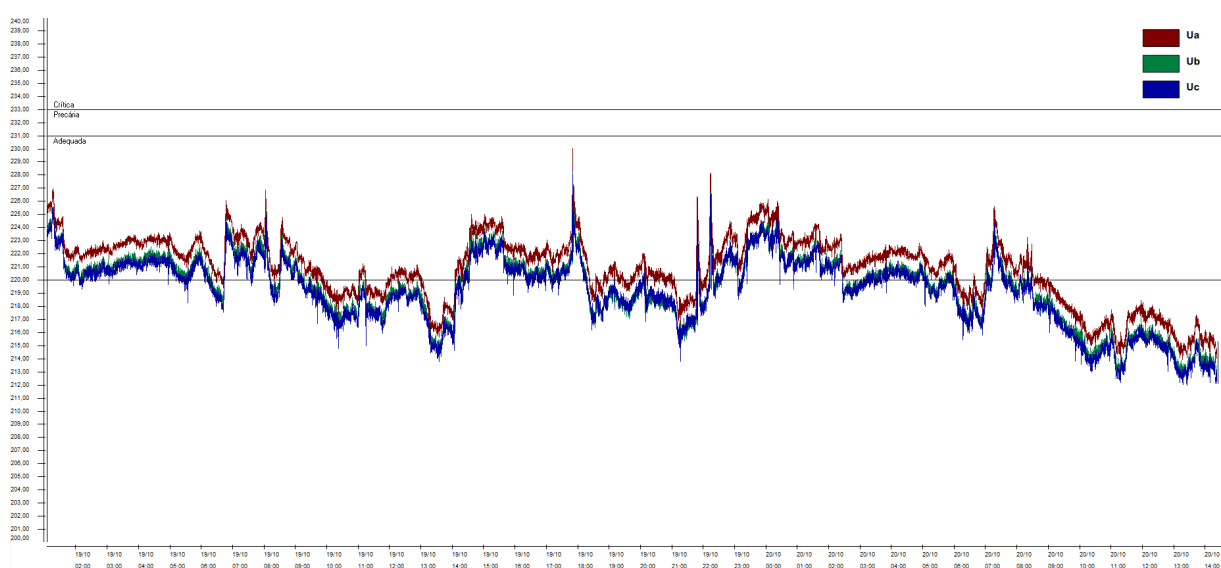


Fonte: Autores, 2023

4.1.4 Flutuação de tensão

A flutuação de tensão foi analisada em um cenário onde a indústria estava funcionando normalmente. Esse período ocorreu logo após o religamento da indústria às 01:00:00,00 do dia 19 de outubro e durou até às 14:00:00,00 do dia 20 de outubro, totalizando 37 horas. A Figura 4.16 apresenta os valores de tensão obtidos durante a análise.

Figura 4.16: Tensões no terceiro cenário



Fonte: Autores, 2023

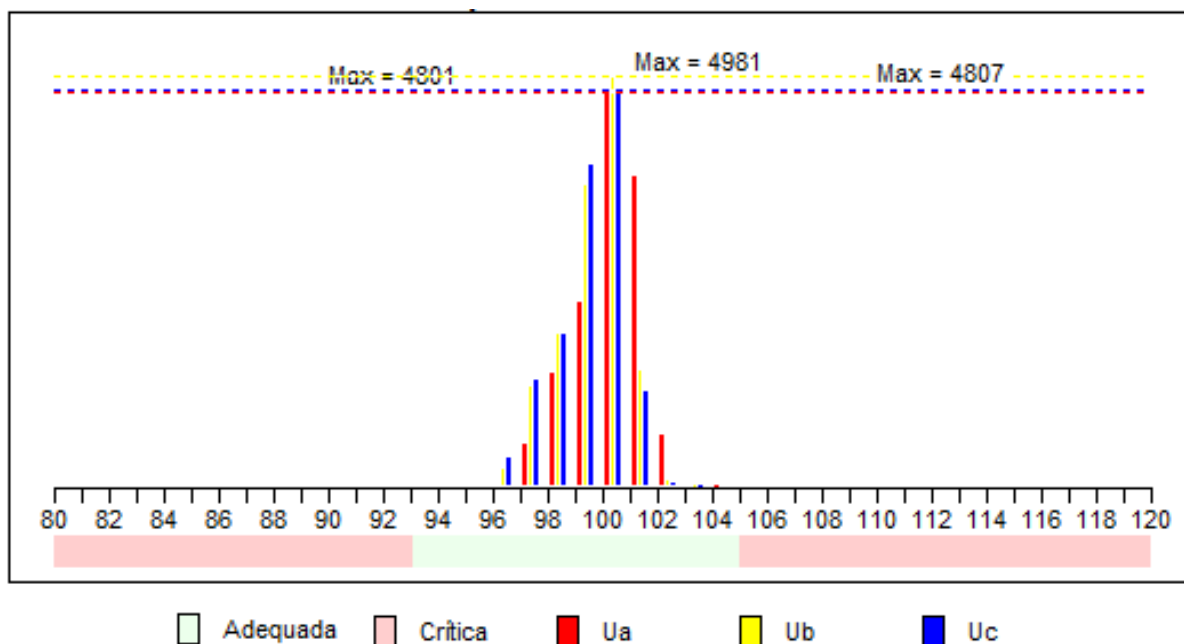
Essa variação que ocorre na tensão é causada pelas cargas presentes no CCM que nesse caso

são os motores elétricos. Durante a rotina da indústria alguns motores podem variar a potência e torque, consequentemente, a tensão também oscila, além disso, a corrente de partida do motor pode provocar afundamento na tensão causando problemas na sua qualidade.

O PRODIST estabelece limites de flutuação de tensão para cada classe. Nesse caso a indústria se encaixa no primeiro, que são os menores que 2,3 kV. A Tabela 2.4 apresenta o valor ideal a se seguir.

Durante toda essa análise a tensão se encontra dentro dos limites, ocorrendo apenas alguns pequenos afundamentos que ainda permanecem em valores adequados, conforme mostra a Figura 4.17, a tensão nominal está em 100%, representando 220 V.

Figura 4.17: Flutuação de tensão no cenário analisado



Fonte: Autores, 2023

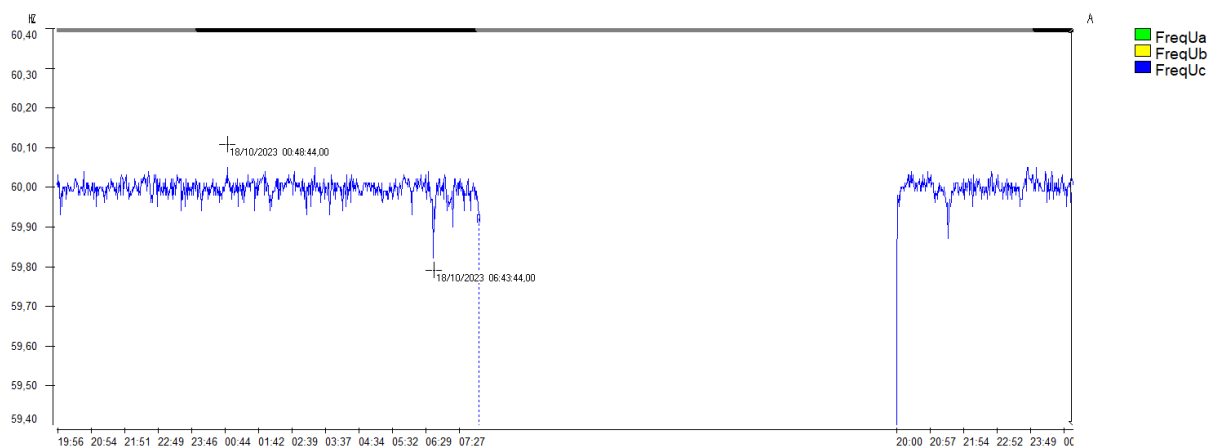
4.1.5 Variação de Frequência

A frequência, indicador que permite o mínimo de variação possível, foi analisada nos três cenários de medições. Conforme o PRODIST, a frequência nominal, fornecida pela concessionária de energia é de 60 Hz, não podendo ser menor que 59,9 Hz e também não deve ser maior que 60,1 Hz.

No primeiro cenário de medição, tem-se os valores para a variação conforme a Figura 4.18,

valores referentes as frequências entre as fases, conforme a legenda.

Figura 4.18: Variação de frequência no primeiro e segundo cenário

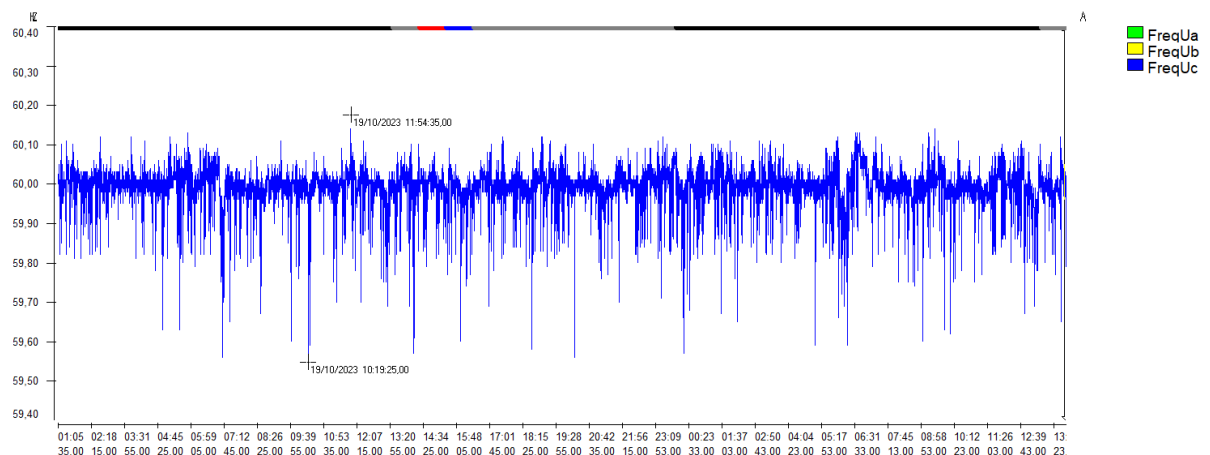


Fonte: Autores, 2023

Pode-se notar na Figura 4.18 que a variação de frequência está de acordo com os padrões determinados no PRODIST. O valor mínimo é encontrado no dia 18 de outubro de 2023 às 06:46:44,00 correspondendo a 59,96 Hz, e o valor máximo é encontrado no dia 18 de outubro de 2023 às 00:48:44,00 correspondendo a 60,04 Hz. Ambos não são prejudiciais aos equipamentos.

No terceiro cenário de medição, tem-se os valores para a variação conforme a Figura 4.19

Figura 4.19: Variação de frequência no terceiro cenário



Fonte: Autores, 2023

Pode-se notar na Figura 4.19 que a variação de frequência está de acordo com os padrões determinados no PRODIST. O valor mínimo é encontrado no dia 19 de outubro de 2023 às 10:19:25,00 correspondendo a 59,56 Hz, e o valor máximo é encontrado no dia 19 de outubro de 2023 às 11:54:35,00 correspondendo a 60,04 Hz.

2023 às 11:54:35,00 correspondendo a 60,03 Hz. Ambos não são prejudiciais aos equipamentos.

Uma observação importante referente ao valor mínimo encontrado é que, segundo o PRODIST, "quando existe ocorrência de distúrbios no sistema de distribuição, as instalações de geração devem garantir que a frequência retorne, no intervalo de tempo de 30 (trinta) segundos após a transgressão, para a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz, para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração" [7].

Capítulo 5

Conclusão

Após as análises de QEE realizadas neste trabalho, foram evidenciados distúrbios na indústria alimentícia, baseado nos cenários propostos.

Na tensão em regime permanente, durante o primeiro e segundo cenário, foram obtidos valores acima dos padrões exigidos pelo PRODIST. Já o terceiro cenário, onde a indústria está em regime permanente, a tensão analisada apresentou resultados satisfatórios.

Nas distorções harmônicas, durante o primeiro cenário, foram encontrados distúrbios na quinta e sétima componente harmônica. Já no terceiro cenário, foram encontrados resultados satisfatórios e dentro dos padrões do PRODIST.

O fator de potência, durante o período em que os motores estão funcionando em regime permanente, se mantém superior a 0,92, ocorrendo apenas dois momentos onde ele reduziu para valores inferiores a 0,92, porém, quando os motores estão desligados, o fator de potência se encontra em valores negativos por conta do banco de capacitores que ainda continua operando.

Flutuação de tensão e variação de frequência, foram obtidos valores satisfatórios.

5.1 Conclusão Geral

Com relação a análise da tensão em regime permanente, pode-se notar a variação de tensão no momento exato em que os motores são desligados. No primeiro cenário de medição, a tensão máxima registrada é de 242,12 V e foi mensurada na fase A, esse valor está 10% a mais do que os níveis adequados, a sobretensão permanece até chegar no segundo cenário de medição.

O terceiro cenário de medição apresenta resultados satisfatórios, sem nenhuma ocorrência de sobretensão.

Portanto, é possível concluir que a sobretensão, na indústria analisada, pode resultar em sobreaquecimento do equipamentos.

As componentes harmônicas, que foram analisadas durante os três cenários de medições, apresentam resultados fora da faixa permitida para o primeiro cenário de medição.

No primeiro cenário de medição, o ponto mais crítico, nota-se distúrbios harmônicos de tensão nas fases A, B e C. A fase A apresenta um DHT de 16,20%, a fase B apresenta um DHT de 17,00% e a fase C um DHT de 16,19%, distúrbios encontrados na terceira, quinta, sétima e nona componente harmônica.

O segundo e o terceiro cenário apresentam resultados satisfatórios, ou seja, de acordo com o estabelecido pelo PRODIST.

É importante salientar que a indústria alimentícia possui banco de capacitor, para corrigir o fator de potência, entretanto o banco de capacitor é ligado de forma manual, o que pode-se notar quando os motores são desligados e o banco de capacitor permanecer corrigindo o fator de potência, que no momento não é necessário, evidenciando os distúrbios que foram analisados.

Durante o período onde os motores estão operando em regime permanente, o fator de potência total se mantém nos níveis adequados, superior a 0,92 como é exigido pelo PRODIST, porém, há dois momentos que duram em média 10 minutos onde ele cai para valores inferiores a 0,920.

Com relação a flutuação de tensão e a variação de frequência, foram obtidos resultados satisfatórios durante toda a análise.

Dito isso, pode-se concluir que a indústria analisada apresenta distúrbios em cenários bem específicos, mas apresenta resultados satisfatórios quando está em condições de operação nominal, que foi analisado no terceiro cenário de medição.

5.2 Trabalhos Futuros

Como opção de linha de pesquisa e análise para trabalhos futuros, sugere-se:

- Estudo de inter-harmônicas presente no sistema analisado;

- Instalação de filtros nos inversores de frequências dos motores;
- O acionamento automatizado dos bancos de capacitores da indústria.

Referências Bibliográficas

- [1] BRASIL. Ministério de minas e energia/empresa de pesquisa energética. *Ministério de Minas e Energia alcança importantes resultados em 2021*, Acesso em: 2023.
- [2] BRONZATTI, F. L.; NETO, A. I. Matrizes energéticas no brasil: cenário 2010-2030. *Encontro Nacional de Engenharia de Produção - 2008*, v. 28, p. 13–16, Acesso em: 2023.
- [3] BRASIL. Empresa de pesquisa energética (epe). *Anuário estatístico de energia elétrica do ano de 2017*, Acesso em: 2023.
- [4] DOMINGUES, M. S. D.; BERMANN, C.; MANFREDINI, S. S. A produção de soja no brasil e sua relação com o desmatamento na amazônia. *Revista Presença Geográfica - 2014*, v. 1, n. 1, Acesso em: 2023.
- [5] DALL'AGNOL, A. et al. O complexo agroindustrial da soja brasileira. Londrina: Embrapa Soja, 2007., Acesso em: 2023.
- [6] IBGE. Valor de produção bate recorde, mas safra 2021 não supera ano anterior. <https://acesse.one/r7R6K>. Acesso em: 2023.
- [7] ANEEL. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (prodist) módulo 8: Qualidade da energia elétrica. Brasília, Brasil: 2020.
- [8] KERN, F. G. Análise da qualidade de energia elétrica utilizando transformada wavelet-2008. Acesso em: 2023.
- [9] BOLLEN, M. H. Voltage sags characterization. Wiley-IEEE Press, 2000.
- [10] JÚNIOR, G. V. d. A. Análise estocástica dos afundamentos de tensão em sistemas de distribuição. Universidade Federal de Campina Grande, 2011.

- [11] MARTINS, J. S.; COUTO, C.; AFONSO, J. L. Qualidade de energia eléctrica. 2003.
- [12] CARVALHO, J. R. de. *Estimação de harmônicos/inter-harmônicos: uma abordagem multitaxa*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, 2008.
- [13] IEEE. Standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions-1459. March. 2010.
- [14] ROCHA, J. E. Qualidade de energia. *Curso de Engenharia Elétrica, Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016*, Acesso em: 2023.
- [15] AGOUD, F. I. M. Fator de potência. https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA12_Circuitos2-Engenharia. Acesso em: 2023.
- [16] IEEE. Recommended practice for monitoring electric power quality-1159. 2019.
- [17] IEC-61000-4-30. Testing and measurement techniques—power quality measurement methods. *IEC*, 2015.