



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SHAKIBE PATRESE CELY DA SILVA

**UMA ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA NO SANEAMENTO EM
PERNAMBUCO**

Recife
2024

SHAKIBE PATRESE CELY DA SILVA

**UMA ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA NO SANEAMENTO EM
PERNAMBUCO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do grau de
Engenheiro Eletricista.

Orientador (a): Profa. Dra. Milde Maria da Silva Lira.

Recife
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Cely da Silva, Shakibe Patrese.

Uma análise da qualidade de energia elétrica no saneamento em
Pernambuco / Shakibe Patrese Cely da Silva. - Recife, 2024.
64p : il., tab.

Orientador(a): Milde Maria da Silva Lira

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica -
Bacharelado, 2024.

Inclui referências, apêndices, anexos.

1. Qualidade de Energia Elétrica. 2. Saneamento. 3. Distribuição de Energia
Elétrica. 4. Variação de Tensão. 5. Grandezas Elétricas. I. da Silva Lira, Milde Maria.
(Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

SHAKIBE PATRESE CELY DA SILVA

**O IMPACTO DA QUALIDADE DE ENERGIA NO SANEAMENTO EM
PERNAMBUCO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do grau de
Engenheiro Eletricista.

Aprovado em: 14/10/2024.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Milde Maria da Silva Lira (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. M.Sc. Artur Muniz Szpak Furtado (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Eng. M.Sc. Samuel Dias Vasconcelos (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO

A análise da qualidade de energia elétrica é de grande interesse por partes de diversos consumidores, como indústrias, comércio, empresas de telecomunicações e serviços públicos. No âmbito do saneamento, a qualidade de energia tem sua importância para o abastecimento de água adequado para a população. As estações de tratamento, estações elevatórias e também os poços geridos pela Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa) utilizam-se da energia elétrica para levar água aos moradores do estado. Neste trabalho será analisado como está sendo fornecida a energia elétrica para dez unidades da Compesa utilizando os tópicos de qualidade de energia no módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), regulado pela ANEEL. Através de gráficos e tabelas, é possível fazer uma análise dos indicadores relatados no PRODIST, verificando assim, a qualidade da energia que está sendo fornecida pela concessionária para que os motores e outros equipamentos elétricos que atuam nas unidades da Compesa possam funcionar de maneira adequada e garantir saneamento de qualidade para a população.

Palavras-chave: saneamento; Qualidade de Energia Elétrica; Pernambuco; indicador de qualidade; grandezas elétricas.

ABSTRACT

The analysis of electric power quality has great interest from various consumers, such as industries, commerce, telecommunications companies and public service. In the context of sanitation, power quality is essential for the adequate supply of water to the population. Water treatment plants, pumping stations and wells managed by the Pernambuco Sanitation Company (Compesa) rely on electric power to deliver water to residents of the state. This study will analyze how electricity is being supplied to ten units of Compesa, using the power quality topics outlined in module 8 of the Electric Power Distribution Procedures in the National Electrical System (PRODIST), regulated by ANEEL. Through graphs and tables, it will be possible to analyze the indicators reported in PRODIST, thus assessing the quality of the power supplied by the utility, ensuring that the motors and other electrical equipment operating in Compesa units can function properly and provide quality sanitation for the population.

Keywords: sanitation, Electric Power Quality, Pernambuco, quality indicator, electrical quantities.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema de abastecimento de água.....	27
Figura 2 - Consumo de energia elétrica no ano de 2023	28
Figura 3 - Unidades da Compesa no estado de Pernambuco.....	29
Figura 4 - Localização das unidades Compesa.....	30
Figura 5 - Analisador de qualidade de energia elétrica P55.....	31
Figura 6 - Sistema de registro de ocorrência Compesa	32
Figura 7 - Diagrama da instalação do medidor.....	33
Figura 8 - Instalação do medidor em uma das unidades da Compesa	34
Figura 9 - Grandezas elétricas mostradas no display do medidor.....	34
Figura 10 - Software Sistema de Manipulação de Dados (SMD)	35
Figura 11 - TRP - EEAB Tiuma	16
Figura 12 - TRP - EEAB Ipojuca.....	16
Figura 13 - TRP - Matriz da Luz	17
Figura 14 - TRP - Elevatória Totó.....	17
Figura 15 - TRP - EEAT Alto da Bondade	18
Figura 16 - TRP - Elevatória Cliper	18
Figura 17 - TRP - EEAT Alça Sul	19
Figura 18 - TRP - GNM Sul	19
Figura 19 – TRP - Elevatória Muribequinha	20
Figura 20 – TRP - Elevatória Cortegadas	20
Figura 21 - VF - EEAB Tiuma.....	22
Figura 22 - VF - EEAB Ipojuca	22
Figura 23 - VF - ETA Matriz da Luz.....	23
Figura 24 - VF - Elevatória Totó	23
Figura 25 - VF - Elevatória Muribequinha.....	24
Figura 26 - VF - Elevatória Cortegadas.....	24
Figura 27 - DT - EEAB Tiuma.....	25
Figura 28 - DT - EEAB Ipojuca	25
Figura 29 - DT - ETA Matriz da Luz.....	26
Figura 30 - DT - Elevatória Totó	26
Figura 31 - DT - EEAT Alto da Bondade	27

Figura 32 - DT - Elevatória Cliper.....	27
Figura 33 - DT - EEAT Alça Sul.....	28
Figura 34 - DT - GNM Sul	28
Figura 35 - DT - Elevatória Muribequinha	29
Figura 36 - DT - Elevatória Cortegadas.....	29
Figura 37 - DHT - Elevatória Cliper	31
Figura 38 - DHT - Elevatória Muribequinha.....	31
Figura 39 - DHT - Elevatória Cortegadas	32
Figura 40 - DHT Par - Elevatória Muribequinha	32
Figura 41 - DHT Par - Elevatória Cortegadas.....	33
Figura 42 - DHT Ímpar - Elevatória Muribequinha.....	33
Figura 43 - DHT Ímpar - Elevatória Cortegadas	34
Figura 44 - DHT Tripla - Elevatória Muribequinha.....	34
Figura 45 - DHT Tripla - Elevatória Cortegadas	35
Figura 46 - Indicador Pst - Elev. Muribequinha	36
Figura 47 - Indicador Pst - Elev. Cortegadas.....	37
Figura 48 - Unidades da Compesa e o indicador DIC	38
Figura 49 - Unidades da Compesa e o indicador FIC	38
Figura 50 - Unidades da Compesa e o indicador DMIC	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categorias da qualidade de energia segundo a IEEE 1159	18
Tabela 2 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual a 380/220 V	20
Tabela 3 - Indicadores de distorções harmônicas de tensão	21
Tabela 4 - Limites das distorções harmônicas totais	22
Tabela 5 - Limites para os desequilíbrios de tensão	23
Tabela 6 - Grandezas para análise dos indicadores da flutuação de tensão	23
Tabela 7 - Limites para flutuação de tensão	24
Tabela 8 - Classificação das variações de tensão de curta duração	25
Tabela 9 - Descrição dos indicadores de continuidade individuais	26
Tabela 10 - Coordenadas geográficas das unidades Compesa analisadas	30
Tabela 11 - Características elétricas do equipamento	31
Tabela 12 - Índices de qualidade de energia a ser analisados	14
Tabela 13 - Início e término das leituras nas unidades Compesa	14
Tabela 14 - Valores dos indicadores DRP e DRC	21
Tabela 15 - Valores do indicador FD95%	30
Tabela 16 - Valores dos indicadores DTT95%, DTTp95%, DTTi95% e DTT395%	35
Tabela 17 - Valores do indicador Pst95%	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
Compesa	Companhia Pernambucana de Saneamento
csv	<i>Comma-Separated Values</i>
DH	Distorção Harmônica
DIC	Duração de Interrupção Individual
DMIC	Duração Máxima de Interrupção Individual
DRA	Diretoria Regional Agreste e Matas
DRM	Diretoria Regional Metropolitana
DRS	Diretoria Regional do Sertão
DT	Desequilíbrio de Tensão
EEAB	Estação Elevatória de Água Bruta
ETA	Estação de Tratamento de Água
FD	Fator de Desequilíbrio
FI	Fator de Impacto
FIC	Frequência de Interrupção Individual
FP	Fator de Potência
FT	Flutuação de Tensão
GGE	Gerência de Gestão Energética
GNM	Gerência de Unidade de Negócios Metropolitana
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
SMD	Sistema de Manipulação de Dados
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
TRP	Tensão em Regime Permanente
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VF	Variação de Frequência
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Geral.....	15
1.1.2	Específicos	15
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	DEFINIÇÃO DE QUALIDADE DE ENERGIA	17
2.2	PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO (PRODIST)	19
2.2.1	Tensão em Regime Permanente	19
2.2.2	Fator de potência.....	20
2.2.3	Distorções Harmônicas.....	21
2.2.4	Desequilíbrio de tensão	22
2.2.5	Flutuação de tensão	23
2.2.6	Variação de frequência.....	24
2.2.7	Variação de tensão de curta duração	25
2.2.8	Indicadores de continuidade individuais	26
3	ANÁLISE DOS DADOS E ESPECIFICAÇÕES DO MEDIDOR	27
3.1	DADOS DA COMPESA E CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	27
3.2	A COMPESA E O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO ANO DE 2023 28	
3.3	MEDIÇÃO DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS	29
3.3.1	Especificações do medidor.....	30
3.3.2	Instalação do medidor	32
3.3.3	Registro e coleta de dados	35
4	RESULTADOS E ANÁLISE	14
4.1	TENSÃO EM REGIME PERMANENTE.....	15
4.2	VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA.....	22
4.3	DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	25
4.4	DISTORÇÃO HARMÔNICA	30
4.4.1	Distorção Harmônica Total	30
4.4.2	Distorção Harmônica Total Par.....	32
4.4.3	Distorção Harmônica Total Ímpar	33
4.4.4	Distorção Harmônica Total Tripla	34
4.4.5	Análise geral das distorções harmônicas	35
4.5	FLUTUAÇÃO DE TENSÃO	36
4.6	INDICADORES DE CONTINUIDADE INDIVIDUAIS	37
5	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	40

5.1	CONCLUSÃO	40
5.2	PROPOSTA DE CONTINUIDADE.....	41
	REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

A busca por uma energia de melhor qualidade tem se tornado cada vez mais importante, pois a disponibilidade de eletricidade é fundamental para o bem-estar da população, influenciando praticamente todas as atividades diárias. A qualidade de energia elétrica refere-se a características como a amplitude e a forma das ondas de corrente e tensão, que são cruciais para assegurar o bom funcionamento dos equipamentos. Quando a qualidade de energia é alta, há pouca variação nessas ondas, o que minimiza o risco de falhas nos equipamentos; por outro lado, uma energia de baixa qualidade, com variações significativas, pode causar danos severos aos equipamentos elétricos. Por isso, os consumidores valorizam o acesso a uma energia de qualidade a preços competitivos, o que incentiva as concessionárias a garantirem um fornecimento consistente e confiável. Para satisfazer essa expectativa, o setor elétrico deve monitorar constantemente a energia distribuída, garantindo que ela esteja de acordo com os padrões necessários para a segurança e o bem-estar social [10] [11].

No contexto do saneamento, a qualidade de energia torna-se um assunto pertinente devido a grande quantidade de energia elétrica consumida. Em 2023, a Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa) foi responsável por 4,41% do consumo total de energia elétrica em Pernambuco, um valor superior ao consumo individual de 181 municípios. O consumo médio mensal da empresa foi de aproximadamente 52 GWh, resultando em um total de 623,86 GWh ao longo do ano e um custo anual de cerca de R\$336 milhões pagos à Neoenergia Pernambuco. Dada a importância da energia elétrica para os serviços de saneamento, que são essenciais para a qualidade de vida da população, é crucial garantir a qualidade desse insumo, pois problemas nesse aspecto podem afetar significativamente o setor e a sociedade [9].

A qualidade do fornecimento de energia elétrica pelas distribuidoras é avaliada sob três aspectos principais: a continuidade do fornecimento, que analisa a duração e a frequência das interrupções de energia; a qualidade de tensão, que mede as variações e desvio dos parâmetros ideais de tensão; e a qualidade comercial que avalia o atendimento e o cumprimento dos prazos para serviços comerciais. A ANEEL regula esses aspectos por meio de indicadores e incentivos para garantir um serviço

eficiente e de qualidade para os consumidores através da Resolução Normativa ANEEL nº956/2021, que começou a valer em 1º de janeiro de 2022, onde estabelece diretrizes para a distribuição de energia elétrica no Brasil, chamada PRODIST. Esta norma revoga as regulamentações anteriores e padroniza as práticas técnicas para a operação e eficiência dos sistemas de distribuição de energia elétrica [7].

Neste trabalho, será analisado a qualidade de energia elétrica em 10 unidades da Compesa, verificando os índices e os indicadores relatados na PRODIST. Também será verificado os indicadores de continuidade de serviço (DIC, FIC e DMIC) que foram fornecidos pela Neoenergia Pernambuco. A depender dos resultados, pode-se chegar a conclusão de uma avaliação do fornecimento de energia elétrica através da concessionária local.

1.1 Objetivos

Neste tópico, serão apresentados os objetivos gerais e específicos estabelecidos no início do trabalho, mostrando o propósito central da pesquisa.

1.1.1 Geral

- Analisar os tópicos de qualidade de energia;
- Demonstrar a importância da qualidade de energia no saneamento;
- Explicar a relação entre a falta de água e a interrupção no fornecimento de energia elétrica.

1.1.2 Específicos

- Estudo do módulo 8 do PRODIST;
- Analisar as grandezas elétricas medidas pelo Analisador de Qualidade de Energia Elétrica, modelo P55 da Primata Tecnologia Eletrônica instalado nas unidades da Compesa;

- Contribuir na melhora da qualidade de energia no saneamento

1.2 Organização do Trabalho

No capítulo 2, será abordado a fundamentação teórica do trabalho, mostrando o que é Qualidade de Energia Elétrica (QEE), as definições dos tópicos de QEE segundo a IEEE 1159 e também os indicadores abordados no módulo 8 da PRODIST.

No capítulo 3, será descrito como e onde o trabalho foi desenvolvido, explicando sobre a empresa pública estudada (Compesa) e onde cada unidade analisada se localiza, em seguida será descrito como foi feita a instalação do medidor e como foram obtidos os valores das grandezas elétricas relacionadas a QEE.

No capítulo 4, será ilustrado todos os gráficos com as grandezas elétricas obtidas pelo analisador de qualidade de energia elétrica P55 da Tecnologia Primata Eletrônica, bem como a análise de cada indicador abordado no módulo 8 do PRODIST.

No capítulo 5, será descrito as conclusões e propostas de continuidade da pesquisa e trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Definição de qualidade de energia

Há diferentes definições para o conceito de qualidade de energia elétrica. *Sankaran define como “Um conjunto de limites elétricos que permite que um equipamento funcione de maneira pretendida sem perda significativa de desempenho ou expectativa de vida”.* Esta definição engloba duas coisas que são exigidas em um equipamento elétrico: desempenho e expectativa de vida [3].

Outro autor também define qualidade de energia, porém de uma maneira diferente. *Para Dugan “Qualidade de energia é qualquer problema de energia manifestado em desvios de tensão, corrente ou frequência que resulte em falha ou mau funcionamento do equipamento do cliente [2]”.*

É imprescindível que haja uma boa qualidade de energia, caso contrário, pode acarretar em diversos problemas para a população, por exemplo, na área industrial e comercial pode ocorrer bastante prejuízos, inclusive na elevação dos preços dos produtos em geral, já que a má qualidade acarretaria em falhas no funcionamento dos equipamentos usados para a fabricação das mercadorias [11]. Outra área que pode ser bastante prejudicada seria a do saneamento, que precisa de um grande consumo de energia elétrica para que os motores ajudem a abastecer toda a população [8].

As categorias e características de qualidade de energia podem ser classificadas como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Categorias da qualidade de energia segundo a IEEE 1159

<i>Categorias</i>	<i>Conteúdo espectral típico</i>	<i>Duração típica</i>	<i>Magnitude de tensão típica</i>
<i>1.0 Transitório</i>			
<i>1.1 Impulso</i>			
<i>1.1.1 Nanosegundo</i>	<i>5ns</i>	<i>< 50ns</i>	
<i>1.1.2 Microsegundo</i>	<i>1μs</i>	<i>50ns - 1ms</i>	
<i>1.1.3 Milisegundo</i>	<i>0.1ms</i>	<i>> 1ms</i>	
<i>1.2 Oscilatório</i>			
<i>1.2.1 Baixa frequência</i>	<i>< 5kHz</i>	<i>0,3 - 50ns</i>	<i>0 - 4pu</i>
<i>1.2.2 Média frequência</i>	<i>5 - 500kHz</i>	<i>20μs</i>	<i>0 - 8pu</i>
<i>1.2.3 Alta frequência</i>	<i>0,5 - 5MHz</i>	<i>5μs</i>	<i>0 - 4pu</i>
<i>2.0 Variação de curta duração</i>			
<i>2.1 Instantânea</i>			
<i>2.1.1 Interrupção</i>		<i>0,5 - 30 ciclos</i>	<i>< 0,1pu</i>
<i>2.1.2 Afundamento</i>		<i>0,5 - 30 ciclos</i>	<i>0,1 - 0,9pu</i>
<i>2.1.3 Elevação</i>		<i>0,5 - 30 ciclos</i>	<i>1,1 - 1,8pu</i>
<i>2.2 Momentâneas</i>			
<i>2.2.1 Interrupção</i>		<i>30 ciclos - 3s</i>	<i>< 0,1pu</i>
<i>2.2.2 Afundamento</i>		<i>30 ciclos - 3s</i>	<i>0,1 - 0,9pu</i>
<i>2.2.3 Elevação</i>		<i>30 ciclos - 3s</i>	<i>1,1 - 1,2pu</i>
<i>2.3 Temporário</i>			
<i>2.3.1 Interrupção</i>		<i>3s - 1min</i>	<i>< 0,1pu</i>
<i>2.3.2 Afundamento</i>		<i>3s - 1min</i>	<i>0,1 - 0,9pu</i>
<i>2.3.3 Elevação</i>		<i>3s - 1min</i>	<i>1,1 - 1,2pu</i>
<i>3.0 Variação de longa duração</i>			
<i>3.1 Interrupção, sustentada</i>		<i>> 1min</i>	<i>0,0pu</i>
<i>3.2 Subtensão</i>		<i>> 1min</i>	<i>0,8 - 0,9pu</i>
<i>3.3 Sobretensão</i>		<i>> 1min</i>	<i>1,1 - 1,2pu</i>
<i>4.0 Desbalanceamento de tensão</i>		<i>Regime permanente</i>	<i>0,5 - 2%</i>
<i>5.0 Distorção de onda</i>			
<i>5.1 DC Offset</i>		<i>Regime permanente</i>	<i>0 - 0,1%</i>
<i>5.2 Harmônicos</i>		<i>Regime permanente</i>	<i>0 - 20%</i>
<i>5.3 Interharmônicos</i>		<i>Regime permanente</i>	<i>0 - 2%</i>
<i>5.4 Notching</i>		<i>Regime permanente</i>	
<i>5.5 Noise</i>		<i>Regime permanente</i>	<i>0 - 1%</i>
<i>6.0 Flutuação de tensão</i>		<i>Regime intermitente</i>	<i>0,1 - 7% e 0,2 - 2 Pst</i>
<i>7.0 Variação de frequência</i>		<i>< 10s</i>	

Fonte: [8]

Em diversos países, a qualidade de energia é avaliada por meio de uma ampla gama de indicadores que consideram diferentes aspectos do fornecimento elétrico. No entanto, no Brasil, o módulo 8 do PRODIST estabelece critérios específicos para avaliar a qualidade de energia elétrica no Brasil, que podem diferir em termos de abordagem e detalhamento em relação aos padrões internacionais [10] [11].

2.2 Procedimentos de distribuição (PRODIST)

O PRODIST é um conjunto de normas estabelecidas pela ANEEL para regular a distribuição de energia elétrica no Brasil, garantindo padrões mínimos de qualidade no fornecimento desse serviço. Essas normas têm como objetivo assegurar que a energia elétrica fornecida às unidades consumidoras atenda a critérios de qualidade e confiabilidade, promovendo um atendimento adequado e seguro aos consumidores [7].

O PRODIST é dividido em onze módulos, cada um abordando assuntos específicos relacionados a distribuição de energia elétrica. O módulo 8 é um dos componentes mais críticos desse conjunto de normas, tratando dos indicadores de qualidade de energia elétrica fornecida aos consumidores, estabelecendo padrões sobre qualidade da tensão e da frequência do sistema e também sobre a continuidade do serviço. Além disso, o módulo 8 detalha as metodologias para medição e avaliação dos indicadores, informando as responsabilidades da concessionária de distribuição local de energia em relação ao monitoramento e a manutenção da qualidade [7].

Há sete assuntos sobre qualidade de energia que o módulo 8 aborda: Tensão em Regime Permanente, Fator de potência, Distorções Harmônicas, Desequilíbrio de Tensão, Flutuação de Tensão, Variação de Frequência e Variação de Tensão de Curta Duração. Além disso, o mesmo módulo informa os procedimentos que devem ser adotados em caso de não conformidade, incluindo compensações financeiras para os consumidores afetados. Dessa forma, o Módulo 8 desempenha um papel fundamental na garantia de um serviço de distribuição de energia elétrica confiável e de alta qualidade, protegendo os consumidores de possíveis danos causados por falhas ou interrupções no fornecimento de energia e assegurando que as concessionárias cumpram com as suas obrigações regulatórias [7].

2.2.1 Tensão em Regime Permanente

A tensão em regime permanente deve ser comparada com a tensão de referência que, no caso de baixa tensão, é a nominal (380/220 V). Divide-se as tensões em três categorias: adequadas, precárias e críticas, que se baseiam no

afastamento da tensão de referência. A Tabela 2 indica as faixas de valores da tensão de atendimento.

Tabela 2 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual a 380/220 V

<i>Tensão de Atendimento (TA)</i>	<i>Faixa de Variação da Tensão de Leitura (V)</i>
<i>Adequada</i>	$(350 \leq TL \leq 399) / (202 \leq TL \leq 231)$
<i>Precária</i>	$(331 \leq TL < 350 \text{ ou } 399 < TL \leq 403) /$ $(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
<i>Crítica</i>	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403) / (TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: [7]

É importante salientar que o conjunto de leituras para gerar indicadores individuais deve compreender o registro de 1.008 (mil e oito) leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada. Após essas medições, devem ser calculados os índices de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) e para tensão crítica (DRC) de acordo com as expressões abaixo:

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \times 100[\%] \quad 2.1$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \times 100[\%] \quad 2.2$$

Em que nlp e nlc representam o maior valor entre as fases do número de leituras situadas nas faixas precária e crítica, respectivamente. Os limites para os indicadores DRP e DRC são, respectivamente, 3,0% e 0,5%.

2.2.2 Fator de potência

Para calcular o fator de potência é necessário ter acesso aos valores de potência ativa e reativa (P, Q) ou as respectivas energias (EA, ER), para que o valor desejado seja encontrado através da equação

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \text{ ou } \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \quad 2.3$$

Para unidades consumidoras com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo ou 1,00 e 0,92 capacitivo.

2.2.3 Distorções Harmônicas

Distorções harmônicas estão relacionadas as alterações na forma de onda de tensão e corrente em relação à onda senoidal da frequência fundamental. A Tabela 3 mostra os símbolos das grandezas utilizadas para achar os indicadores deste tópico e suas respectivas definições.

Tabela 3 - Indicadores de distorções harmônicas de tensão

Identificação da Grandeza	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	$DTT_3\%$
Tensão harmônica de ordem h	V_h
Ordem harmônica	H
Ordem harmônica máxima	hmáx
Ordem harmônica mínima	hmín
Tensão fundamental medida	V_1
Valor do indicador $DTT\%$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT_{95\%}$
Valor do indicador $DTT_p\%$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT_{p95\%}$
Valor do indicador $DTT_i\%$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT_{i95\%}$
Valor do indicador $DTT_3\%$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT_{395\%}$

Fonte: [7]

As expressões para o cálculo das grandezas $DIT_h\%$, $DTT\%$, $DTT_p\%$, $DTT_i\%$ e $DTT_3\%$ são:

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad 2.4$$

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmáx} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad 2.5$$

$$DTT_p\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hp} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad 2.6$$

$$DTT_I\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad 2.7$$

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad 2.8$$

Sendo h a ordem harmônica individual, todas as ordens harmônicas de 2 até $h_{\text{máx}}$, ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3, ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3 e todas as ordens harmônicas múltiplas de 3, respectivamente. Em relação a ordem da harmônica tem-se $h_{\text{máx}}$ que varia dependendo do equipamento ser classe A ou S, h_p que representa a máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3, h_i que representa a máxima ordem ímpar, não múltipla de 3 e h_3 sendo o valor da máxima ordem harmônica múltipla de 3.

O módulo 8 do PRODIST delimita as distorções harmônicas totais a depender dos valores de tensão conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Limites das distorções harmônicas totais

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
$DTT_{95\%}$	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: [7]

2.2.4 Desequilíbrio de tensão

Segundo o módulo 8 do PRODIST, o desequilíbrio de tensão é o fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, e/ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema. Através dessa definição, utiliza-se das magnitudes de tensão registradas para obter o Fator de Desequilíbrio de tensão (FD).

$$FD\% = 100 \times \frac{\sqrt{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}} \quad 2.9$$

Sendo

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad 2.10$$

Onde V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} são os valores das magnitudes de tensão. Os limites para o indicador FD está apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Limites para os desequilíbrios de tensão

Indicador	Tensão nominal	
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
FD95%	3,0%	2,0%

Fonte: [7]

2.2.5 Flutuação de tensão

O módulo 8 do PRODIST define flutuação de tensão como “Um fenômeno caracterizado pela variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz ou de pico da tensão *instantânea*. ”

Para avaliar a flutuação de tensão deve-se observar, prioritariamente, o incômodo causado pela cintilação luminosa em unidades consumidoras que possuam pontos de iluminação alimentados em baixa tensão. Para isso, é imprescindível o conhecimento das definições descritas na Tabela 6.

Tabela 6 - Grandezas para análise dos indicadores da flutuação de tensão

Identificação da Grandeza	Símbolo
Severidade de Flutuação de Tensão de Curta Duração	Pst
Severidade de Flutuação de Tensão de Longa Duração	Plt
Valor do indicador Pst que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	Pst95%

Fonte: [7]

As expressões para encontrar os valores de Pst e Plt são

$$P_{st} = \sqrt{0,314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad 2.11$$

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (P_{sti})^3} \quad 2.12$$

Onde $P_i(0,1; 1; 3; 10; 50)$ se refere ao nível de flutuação de tensão que foi ultrapassado durante $i\%$ do tempo, obtido a partir da função de distribuição acumulada complementar, de acordo com o procedimento estabelecido nas Normas IEC 61000-4-15: *Flickermeter – Functional and Design Specifications*. Pst representa a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão durante um período de dez minutos e o indicador Plt informar a severidade num período de duas horas.

Para uma referência que delimita os valores dos indicadores, foi dada a Tabela 7 para verificação dos limites da flutuação de tensão.

Tabela 7 - Limites para flutuação de tensão

Indicador	Tensão Nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
Pst95%	1,0 pu	1,5 pu	2,0 pu

Fonte: [7]

2.2.6 Variação de frequência

As variações de frequência verificadas em regime permanente, devem operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. Além disso, existem algumas ressalvas a serem consideradas no sistema:

- Não pode exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz em condições extremas;
- Pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo 10 segundos;

- Pode permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 05 segundos.

2.2.7 Variação de tensão de curta duração

Diferentemente da tensão em regime permanente, onde é analisado o comportamento utilizando 1.008 leituras em intervalos de 10 minutos, a variação de tensão de curta duração observa os desvios que acontece em um intervalo inferior a três minutos. A Tabela 8 mostra como são classificados os valores do indicador estudado nesse tópico.

Tabela 8 - Classificação das variações de tensão de curta duração

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude de tensão (valor eficaz) em relação à distância de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 pu
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 pu
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 pu
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 pu

Fonte: [7]

Essas variações também podem ser analisadas utilizando indicadores encontrados através de cálculos usando tensão residual do evento de VTCD, tensão de referência, instante final e inicial de um evento de VTCD, entre outros.

2.2.8 Indicadores de continuidade individuais

Por meio da análise das interrupções e dos indicadores de continuidade, é possível que as distribuidoras avaliem tanto a qualidade do serviço fornecido quanto o desempenho do sistema elétrico. Os indicadores de continuidade, relacionados à distribuição de energia elétrica, são definidos com base na duração e na frequência das interrupções.

Em resumo, a Tabela 9 mostra a descrição e a sigla dos indicadores de continuidade individuais.

Tabela 9 - Descrição dos indicadores de continuidade individuais

Indicador	Descrição
DIC	Duração de interrupção individual por unidade consumidora
FIC	Frequência de interrupção individual por unidade consumidora
DMIC	Duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora
DICRI	Duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora

Fonte: [7]

As fórmulas dos indicadores são

$$DIC = \sum_{i=1}^n t_i \quad 2.13$$

$$FIC = n \quad 2.14$$

$$DMIC = t_{imax} \quad 2.15$$

$$DICRI = t_{crítico} \quad 2.16$$

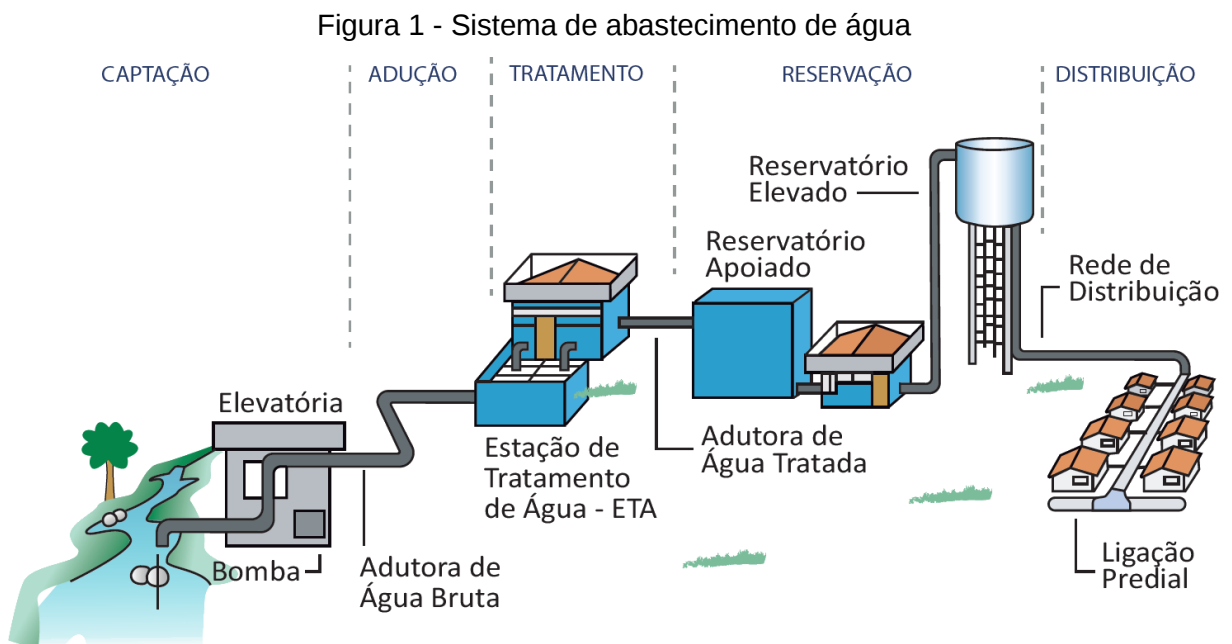
Onde i significa o número de interrupções da unidade consumidora no período de apuração, t_i o tempo de duração da interrupção i da unidade consumidora considerada no período de apuração, t_{imax} o valor correspondente ao tempo da máxima duração de interrupção contínua i , no período de apuração verificada na unidade consumidora ou no ponto de conexão considerado e $t_{crítico}$ a duração da interrupção ocorrida em Dia Crítico.

3 ANÁLISE DOS DADOS E ESPECIFICAÇÕES DO MEDIDOR

3.1 Dados da Compesa e características do sistema de abastecimento de água

A Compesa é uma empresa pública que tem como dever prestar, de forma sustentável, serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário, com a promoção do bem-estar e da qualidade de vida da população pernambucana que é atendida pelo seu serviço. Para que todos os cidadãos do estado possam ter acesso a um saneamento de qualidade é necessário entender como funciona o sistema de abastecimento de água [14].

Para poder levar saneamento para um grande número de pessoas, é necessário muito planejamento, sendo assim, todas as empresas de saneamento devem-se planejar e se atentar para alguns detalhes específicos quando se refere ao sistema de abastecimento de água. O sistema funciona, basicamente, em cinco etapas, iniciando com a captação da água, passando pela estação elevatória de água bruta, seguindo pela estação de tratamento de água, chegando no reservatório e por fim, entrando na rede de distribuição, conforme ilustrado na Figura 1 [12].



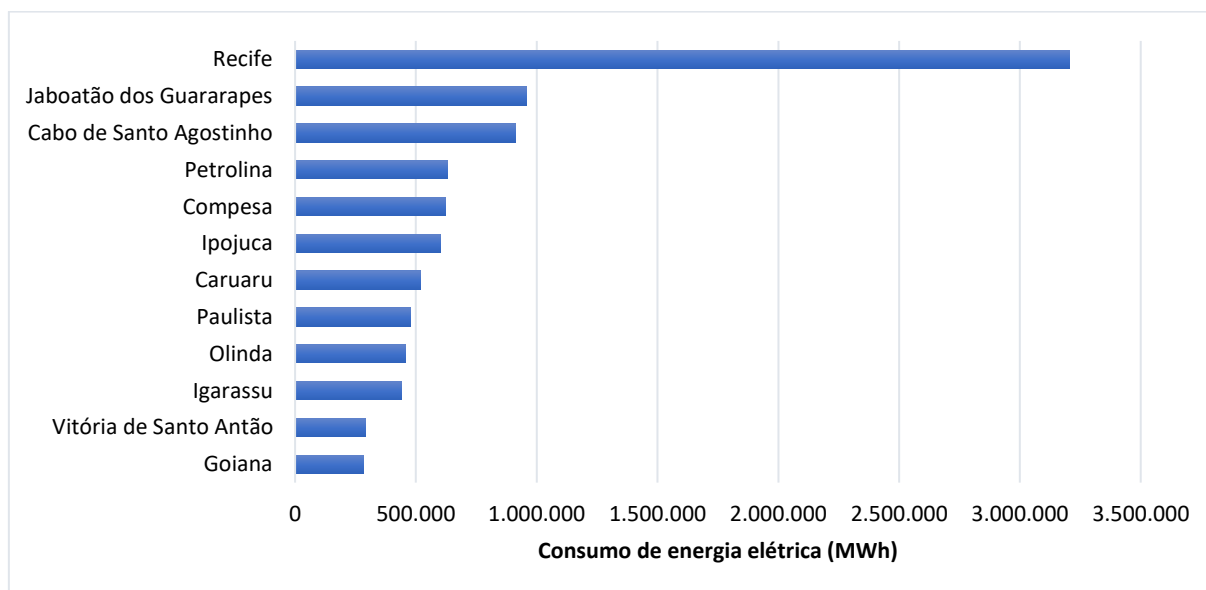
Fonte: [12]

Entre essas etapas, principalmente entre a captação e a estação de tratamento, é necessário utilizar máquinas elétricas que conduzam água através das adutoras. Por esse motivo, é necessário fornecer energia elétrica de qualidade para o bom funcionamento dos motores e de outros equipamentos elétricos utilizados nas unidades das empresas de saneamento [12] [7].

3.2 A Compesa e o consumo de energia elétrica no ano de 2023

De acordo com a Base de Dados do Estado, o consumo de energia elétrica considerando os 185 municípios de Pernambuco, foi de 14.132.719 MWh. A maior cidade do estado, a capital Recife, teve um consumo de 3.204.353 MWh enquanto a Compesa consumiu 623.863,414 MWh, ficando na frente de muitas cidades grandes do estado como Ipojuca, Caruaru, Paulista, Olinda e Igarassu. Este fato manifesta um alerta à importância de investir cada vez mais na área elétrica quando se refere ao âmbito do saneamento. A Figura 2 mostra em que posição a Compesa fica comparada com as 11 cidades que mais consumiram energia elétrica no estado durante o ano de 2023 [9].

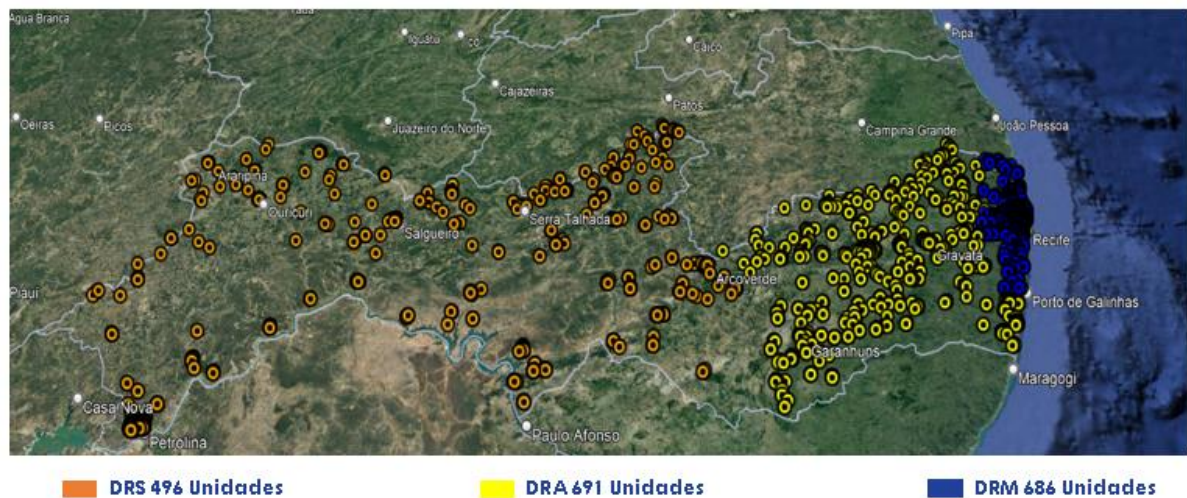
Figura 2 - Consumo de energia elétrica no ano de 2023



Fonte: [9] (Adaptado)

Esse grande consumo de energia elétrica se dá pela grande quantidade de unidades da compesa que estão espalhadas por todo o estado de Pernambuco. No total são 1.873 unidades, como mostrado na Figura 3, divididas em 3 diretorias, DRS, DRA e DRM, que auxiliam no abastecimento de água e precisam estar em constante funcionamento para atender as necessidades da população [13].

Figura 3 - Unidades da Compesa no estado de Pernambuco



Fonte: [13].

3.3 Medição das grandezas elétricas

Para fazer uma análise dos indicadores de qualidade de energia e avaliar se estão de acordo com o módulo 8 do PRODIST, é necessário possuir os valores das grandezas elétricas. Para isso, foi utilizado um analisador portátil de qualidade de energia elétrica em dez unidades da Compesa com suspeitas de má qualidade de energia. A Tabela 10 e a Figura 4 informam a localização de cada uma das unidades exploradas neste tópico.

Figura 4 - Localização das unidades Compesa



Fonte: Autoria própria.

Tabela 10 - Coordenadas geográficas das unidades Compesa analisadas

Unidade Compesa	Latitude (°)	Longitude (°)
EEAB Tiuma	-7,981633732	-35,078177353
EEAB Ipojuca	-8,399353716	-35,07270443
ETA Matriz da Luz	-8,037908333	-35,10043611
Elevatória Totó	-8,07847778	-34,97093889
EEAT Alto da bondade	-7,982861111	-34,91238889
Elevatória Cliper	-8,294961696	-35,58027451
EEAT Alça sul	-7,974611111	-34,84969444
GNM Sul	-8,147422222	-34,91950278
Elev Muribequinha	-8,16628889	-35,00711389
Elev Cortegadas	-7,806472222	-34,91877778

Fonte: Autoria própria.

3.3.1 Especificações do medidor

Para analisar a qualidade de energia foi utilizado o Analisador Portátil de Qualidade de energia, modelo P55, fabricado pela empresa Primata Tecnologia Eletrônica, como mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Analisador de qualidade de energia elétrica P55



Fonte: [6].

As principais características elétricas do equipamento (Classe S), segundo a Primata Tecnologia Eletrônica, estão descritas na Tabela 11.

Tabela 11 - Características elétricas do equipamento

Fonte de alimentação	
Tensão de alimentação	70 a 300 Vca – F/N
Fase de alimentação	Qualquer uma das fases
Consumo (alimentado pelas 3 fases)	3,5 Wh em 127 V ou 4,5 Wh em 220 V
Com bateria NiCd recarregável (autonomia de 200 dias sem alimentação)	Com bateria NiCd recarregável (autonomia de 200 dias sem alimentação)
Circuitos de adequação dos sinais de entrada	Sim
Comunicação	
Porta	USB
Velocidade	115kbps (Conexão direta de alta-velocidade com computador)
Fundo de escala (tensão)	300 Vca – F/N ou 520 Vca – F/F
Resolução	0,05% do fundo de escala
Exatidão	<0,5% do fundo de escala
Fundo de escala (corrente)	Até 1500 A (TC's tipo clamp) Até 5000 A (TC's flexíveis)
Exatidão	< 1,0% do fundo de escala
Medição da tensão de neutro de aterramento	Opcional
Corrente de neutro	Calculada (medida / registrada opcional)

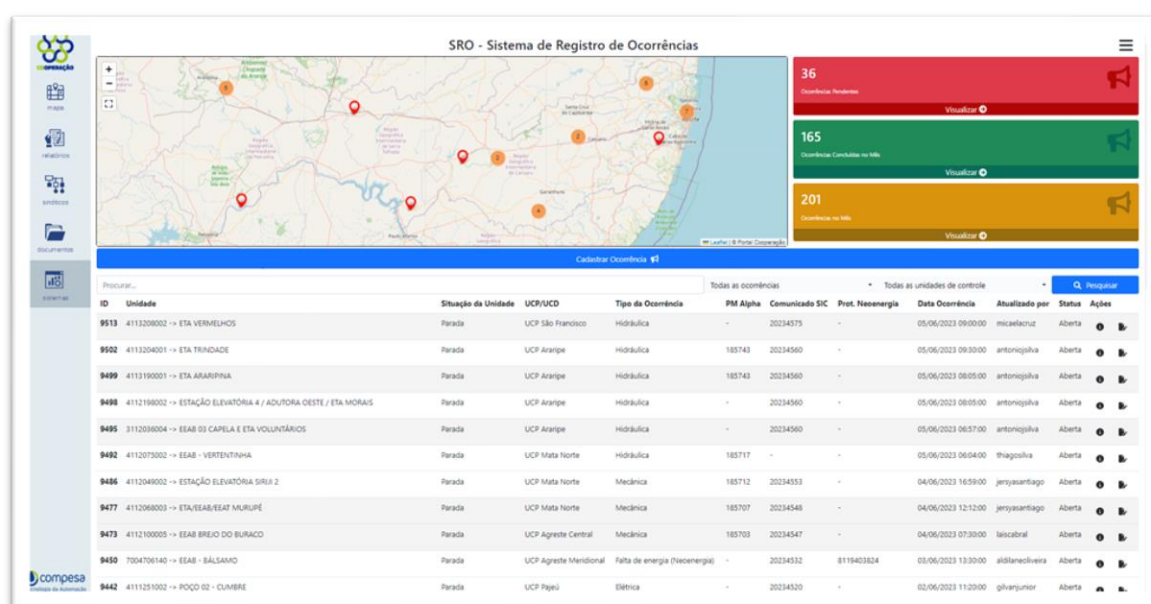
Tipos de ligação	Estrela / Delta (aberto e fechado)
Condições ambientais de operação	
Nível de proteção	IP 659
Temperatura	-10 a 60 °C
Umidade	0 a 100% sem condensação
Isolação dos conectores	600 V
MTBF (Mean Time Between Failures)	68.400
Registro de faltas	Sim
Blindagem eletromagnética	Sim

Fonte: [5].

3.3.2 Instalação do medidor

Em todas as unidades da Compesa há uma preocupação com o fornecimento da concessionária de energia elétrica local para evitar que o abastecimento de água para a população seja interrompido. Sendo assim, a Gerência de Gestão Energética (GGE) utiliza um sistema de registro de ocorrências, mostrado na Figura 6, onde diversos profissionais, que trabalham nas unidades espalhadas pelo estado, registram quedas de energia que ocorrem durante um determinado período. Ao verificar esses resultados, escolhe-se as estações que estão tendo problemas recorrentes e o medidor é instalado para a verificação da qualidade de energia elétrica no local.

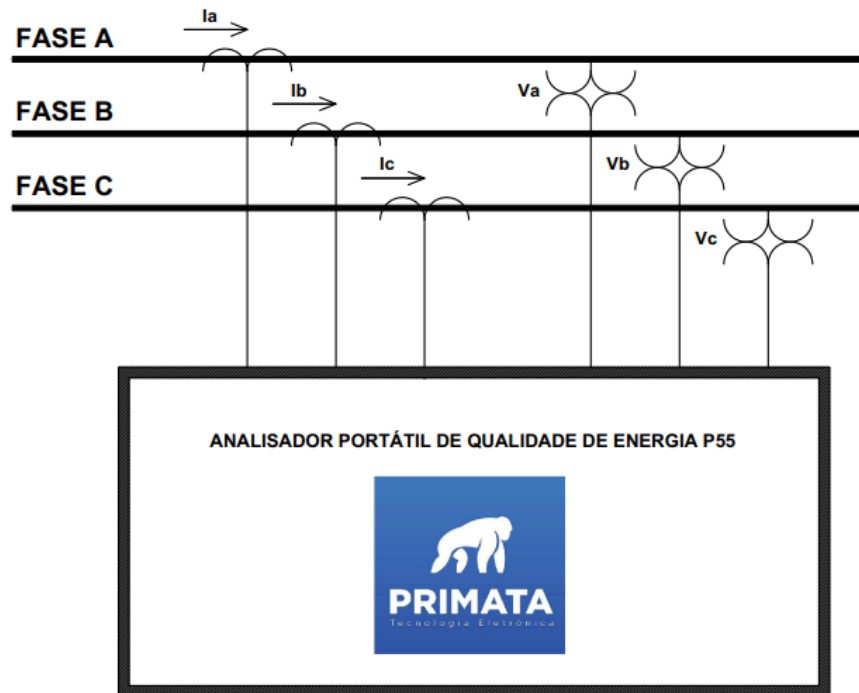
Figura 6 - Sistema de registro de ocorrência Compesa



Fonte: [13].

O medidor instalado verifica os valores de tensão e corrente nas 3 fases do sistema através dos TC's e TP's oriundos do próprio equipamento. As Figuras 7 e 8 mostram, respectivamente, um diagrama de como o equipamento é instalado e uma imagem do medidor analisando a qualidade de energia em uma das estações da Compesa.

Figura 7 - Diagrama da instalação do medidor



Fonte: Autoria própria.

Figura 8 - Instalação do medidor em uma das unidades da Compesa



Fonte: [13].

As grandezas elétricas podem ser vistas através do *display* mostrado na parte frontal do medidor, como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Grandezas elétricas mostradas no display do medidor

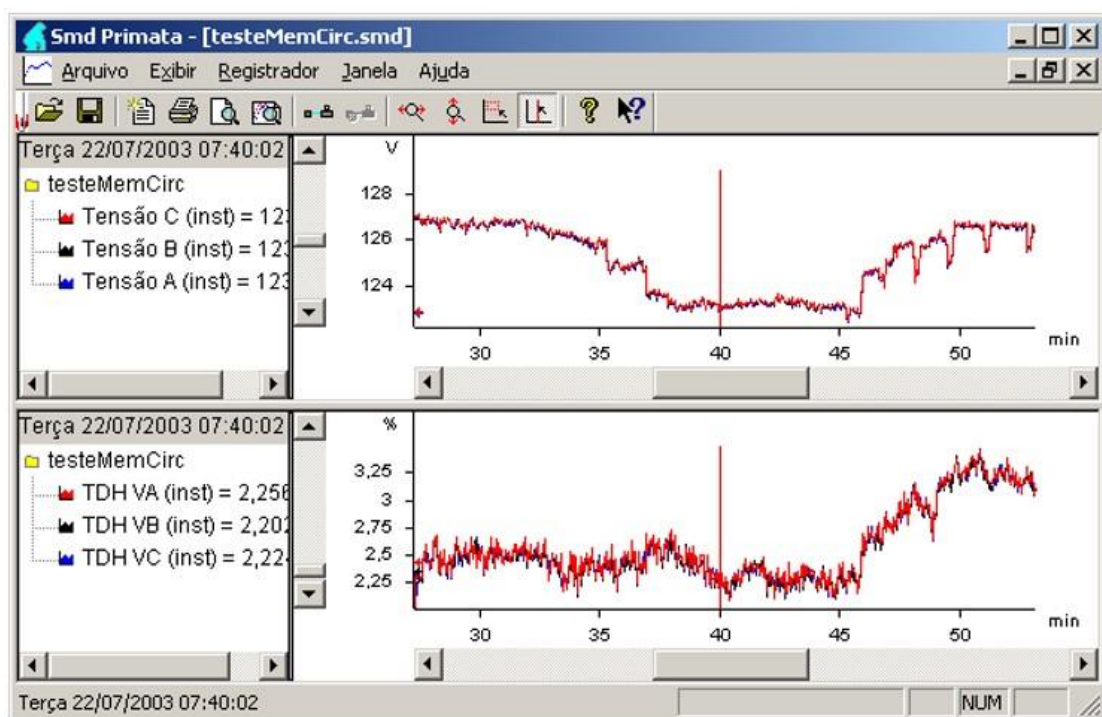


Fonte: [5].

3.3.3 Registro e coleta de dados

Ao instalar o medidor por um determinado tempo de análise, os dados são arquivados em uma unidade USB. Após esse arquivamento, para uma melhor análise dos indicadores de qualidade de energia, usa-se o *software* SMD para separar os dados de interesse e importar um arquivo .csv que contém todas as informações necessárias das grandezas elétricas para futuras análises.

Figura 10 - Software Sistema de Manipulação de Dados (SMD)



Fonte: [6].

Recebido o arquivo em formato .csv, utiliza-se as informações importadas do *software* SMD para plotar gráficos que facilitam a análise da qualidade de energia elétrica nas unidades da Compesa.

4 RESULTADOS E ANÁLISE

Neste tópico serão apresentados os resultados das análises feita pelo Analisador de Qualidade de Energia P55 utilizado para verificar como está a qualidade de energia elétrica fornecida as estações da Compesa. A Tabela 12 mostra as unidades e quais indicadores de qualidade de energia segundo o módulo 8 do PRODIST foi possível ser analisado. Dentre os dados disponibilizado pela Gerência de Gestão Energética da Compesa, foi possível analisar 5 dos 7 índices de qualidade de energia.

Tabela 12 - Índices de qualidade de energia a ser analisados

Estação	TRP	FP	DH	DT	FT	VF	VTCD
EEAB Tiuma	x	-	-	x	-	x	-
EEAB Ipojuca	x	-	-	x	-	x	-
ETA Matriz da Luz	x	-	-	x	-	x	-
Elevatória Totó	x	-	-	x	-	x	-
EEAT Alto da bondade	x	-	-	x	-	-	-
Elevatória Cliper	x	-	x	x	-	-	-
EEAT Alça sul	x	-	-	x	-	-	-
GNM Sul	x	-	-	x	-	-	-
Elev Muribequinha	x	-	x	x	x	x	-
Elev Cortegadas	x	-	x	x	x	x	-

Fonte: Autoria própria.

A depender da época do ano, alguns fatores interferem nas grandezas elétricas, tanto pelos desgastes e falta de manutenção em alguns equipamentos elétricos, quanto também pela mudança do clima em determinadas regiões do estado. Para melhor compreensão sobre como estão se comportando as grandezas elétricas, a Tabela 13 mostra o tempo em que foram feitas as medidas em todas as dez unidades que foram estudadas até aqui.

Tabela 13 - Início e término das leituras nas unidades Compesa

Unidades	Início		Término	
	Data	Horário (h)	Data	Horário (h)
EEAB Tiuma	08/02/2021	09:00	14/02/2021	09:00
EEAB Ipojuca	17/02/2021	10:55	23/02/2021	10:55
ETA Matriz da Luz	26/02/2021	04:40	05/03/2021	04:40
Elevatória Totó	02/06/2021	15:50	09/06/2021	15:50
EEAT Alto da bondade	05/10/2021	09:40	12/10/2021	09:40
Elevatória Cliper	10/06/2022	10:10	17/06/2022	10:10

Unidades	Início		Término	
	Data	Horário (h)	Data	Horário (h)
EEAT Alça sul	31/01/2023	14:20	07/02/2023	14:20
GNM Sul	08/02/2023	10:47	15/02/2023	10:47
Elevatória Muribequinha	09/12/2023	00:59	16/12/2023	00:59
Elevatória Cortegadas	06/07/2023	11:12	13/07/2023	11:12

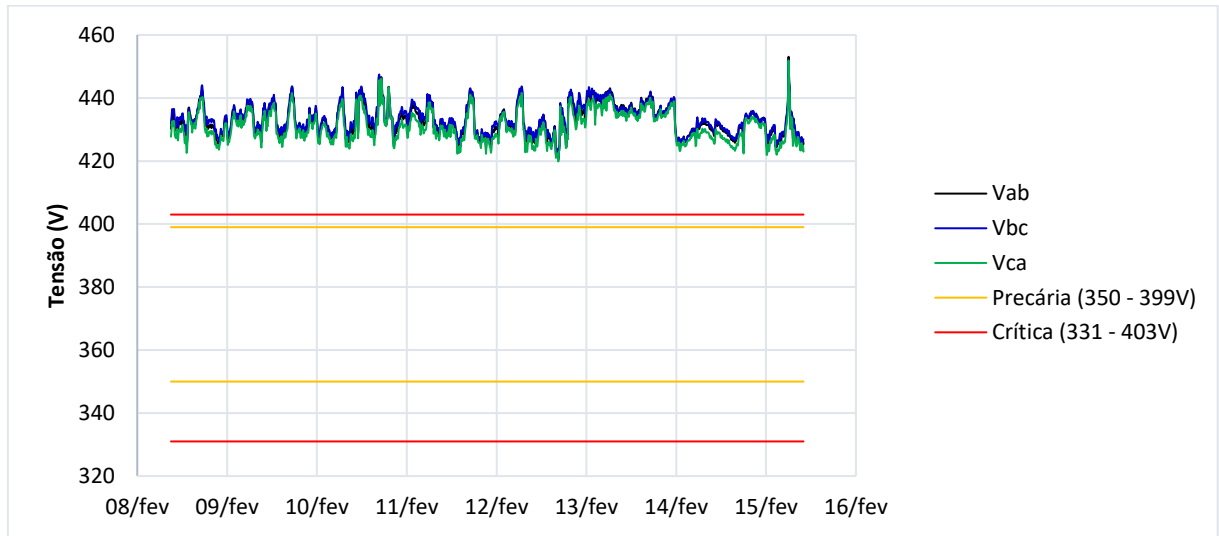
Fonte: Autoria própria.

Dentre todas as unidades analisadas, percebe-se que foi possível analisar cinco dos sete índices de qualidade de energia. De acordo com o módulo 8 do PRODIST, para o estudo do comportamento do fator de potência, é necessária uma análise permanente, diferentemente do que é feito pela GGE, utilizando medições eventuais para a análise da qualidade de energia. Para analisar a Variação de Tensão de Curta Duração é necessário ter acesso a medições em intervalos curtos e para calcular alguns indicadores relacionados a esse índice como o Fator de Impacto (FI), são necessárias medições entre 2,3 e 230 kV, o que difere dos dados disponibilizados pela GGE, com medições nos intervalos mínimos de 1 minuto para algumas unidas e de 10 minutos para outras. Sendo assim, os tópicos a seguir detalharão o resultado dos valores importados do *software* SMD e analisarão o comportamento de cada grandeza elétrica para comparação das normas impostas pelo módulo 8 do PRODIST.

4.1 Tensão em Regime Permanente

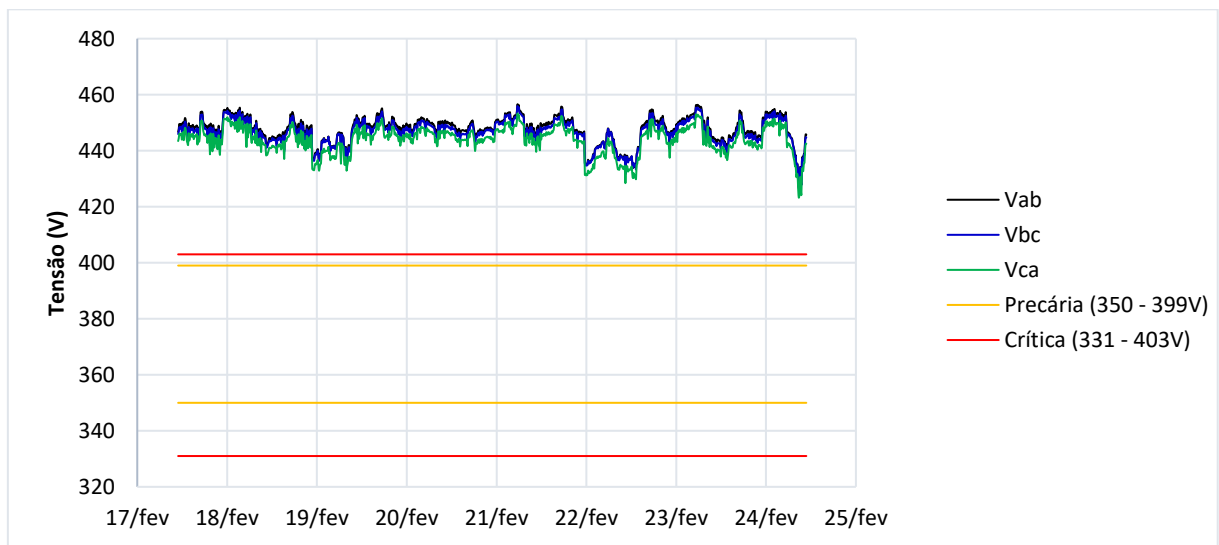
Analisando os valores de tensão de linha retirados do analisador portátil de qualidade de energia utilizado nas unidades da compesa, foi possível plotar os gráficos que analisam a tensão em regime permanente. A Tabela 14 informa a tensão de referência e a faixa de valores das tensões de atendimento, podendo ser definida como adequada, precária ou crítica. As Figuras 11 a 20 mostram de maneiras clara a análise do indicador de qualidade abordado nesse tópico de acordo com a Tabela 2.

Figura 11 - TRP - EEAB Tiuma



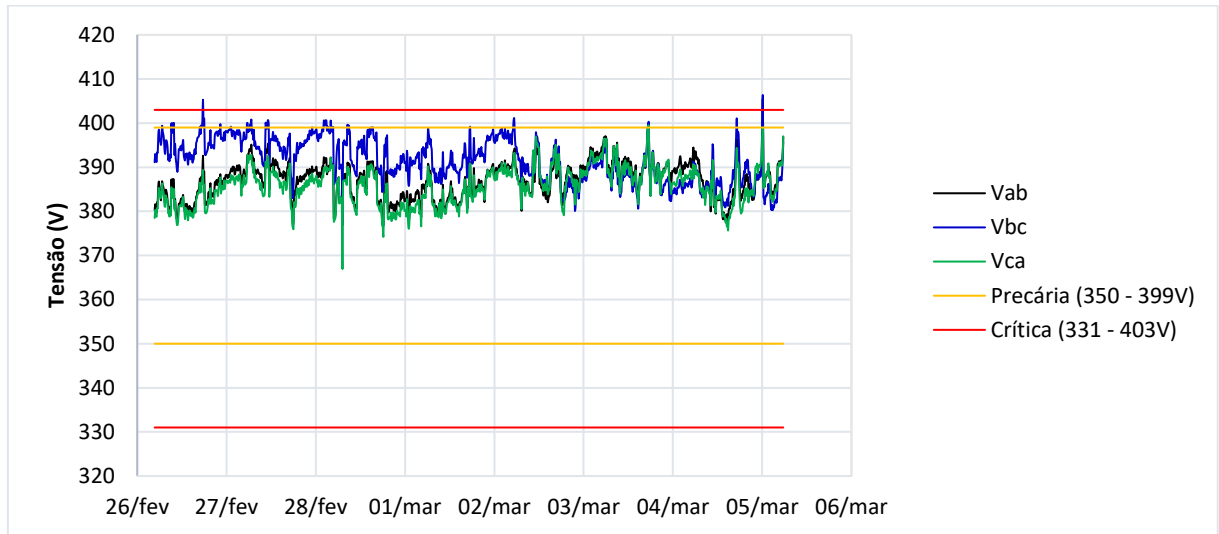
Fonte: Autoria própria.

Figura 12 - TRP - EEAB Ipojuca



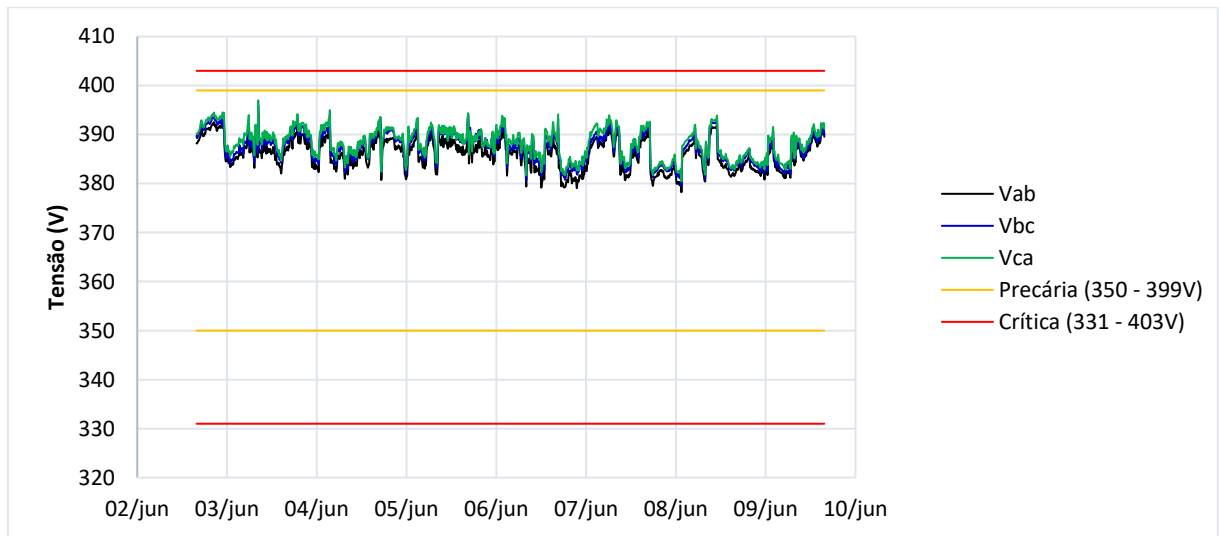
Fonte: Autoria própria.

Figura 13 - TRP - Matriz da Luz



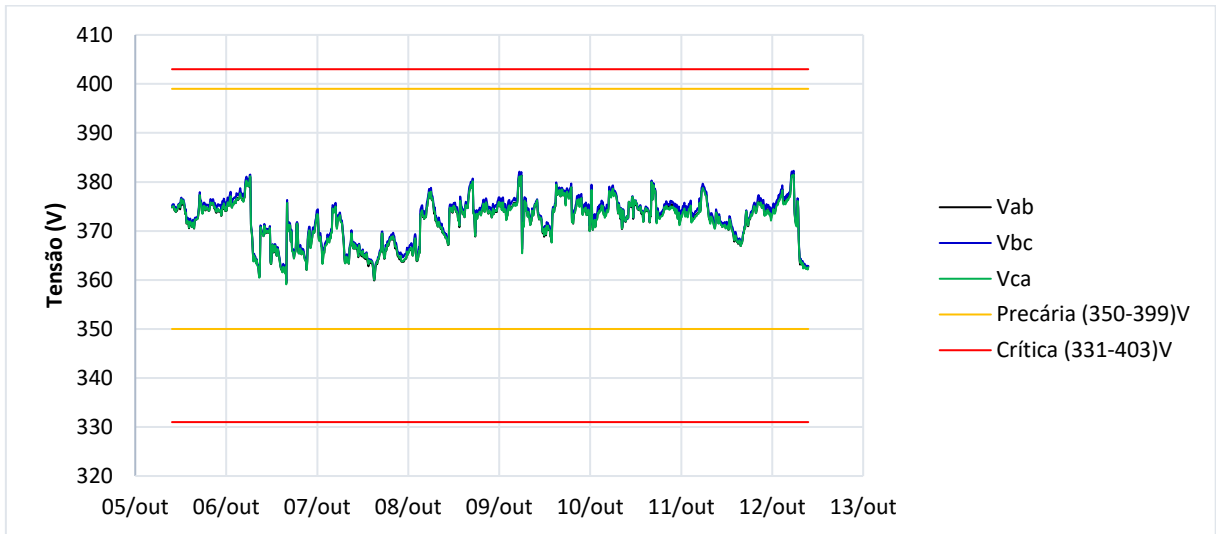
Fonte: Autoria própria.

Figura 14 - TRP - Elevatória Totó



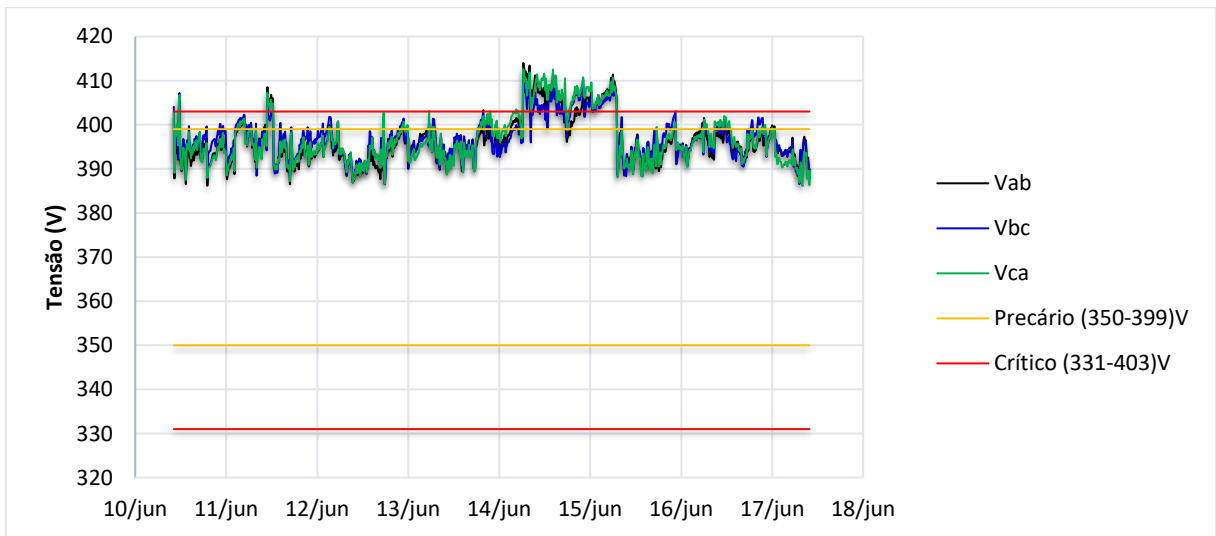
Fonte: Autoria própria.

Figura 15 - TRP - EEAT Alto da Bondade



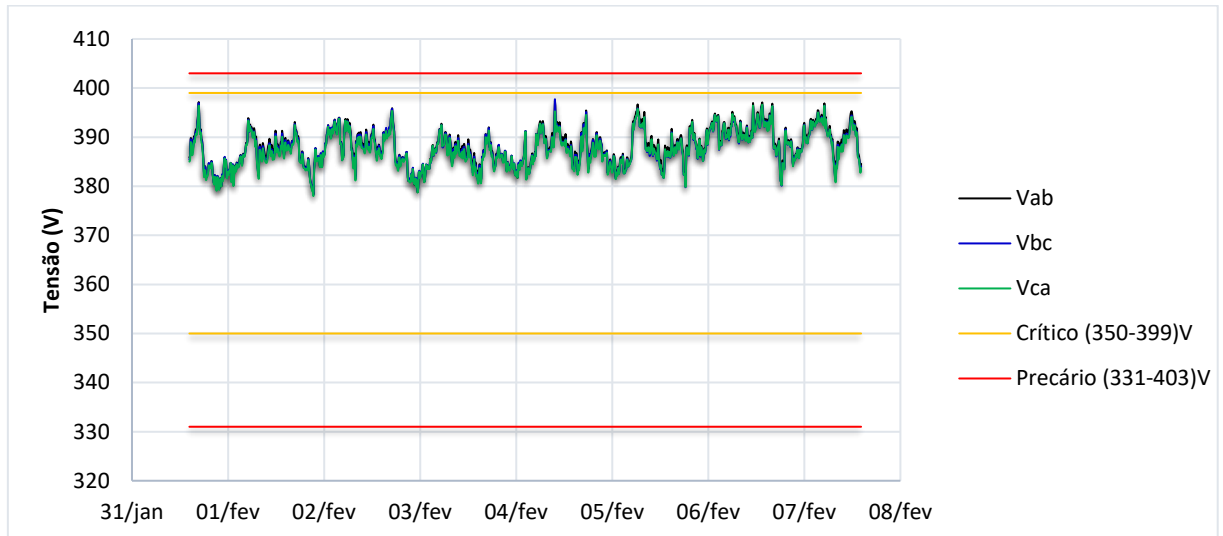
Fonte: Autoria própria.

Figura 16 - TRP - Elevatória Cliper



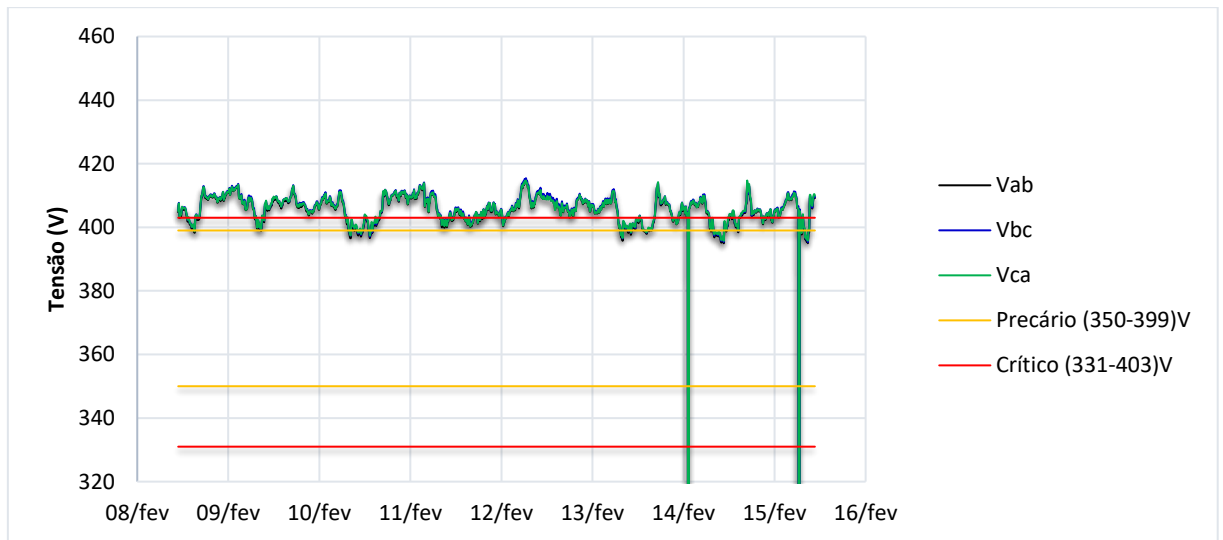
Fonte: Autoria própria.

Figura 17 - TRP - EEAT Alça Sul



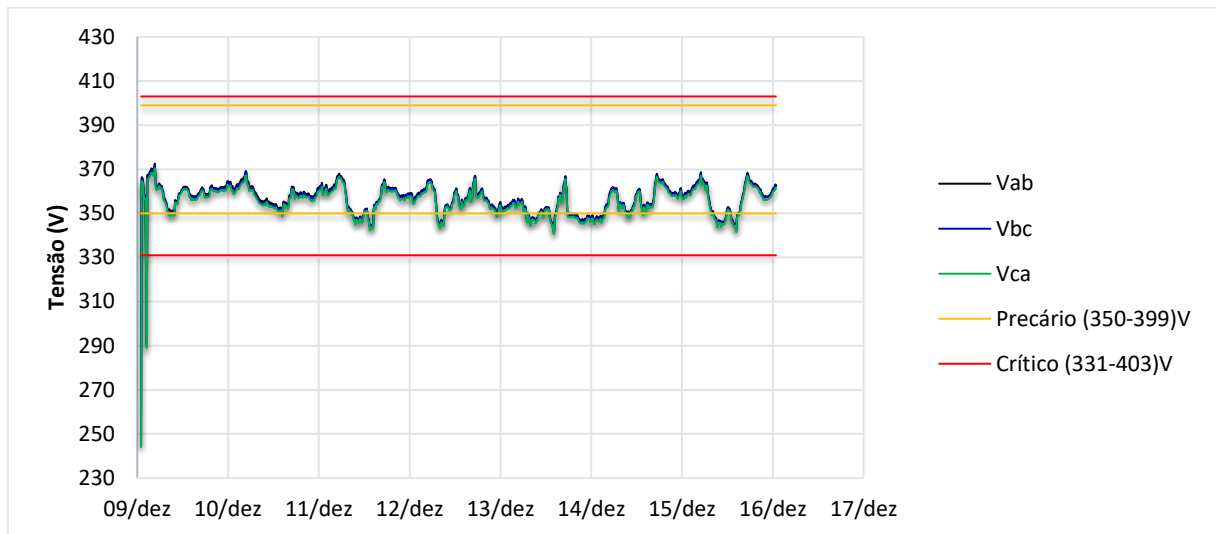
Fonte: Autoria própria.

Figura 18 - TRP - GNM Sul



Fonte: Autoria própria.

Figura 19 – TRP - Elevatória Muribequinha



Fonte: Autoria própria.

Figura 20 – TRP - Elevatória Cortegadas



Fonte: Autoria própria.

Conforme relatado no tópico 2.2.1, os limites para os indicadores DRP e DRC são respectivamente, 3,0% e 0,5%. A Tabela 14 mostra esses valores associados as tensões de linha de cada unidade da Compesa.

Tabela 14 - Valores dos indicadores DRP e DRC

Unidade Compesa	DRP			DRC		
	Vab	Vbc	Vca	Vab	Vbc	Vca
EEAB Tiuma	0,00%	0,00%	0,00%	100%	100%	100%
EEAB Ipojuca	0,00%	0,00%	0,00%	100%	100%	100%
ETA Matriz da Luz	0,10%	4,17%	0,30%	0,10%	0,20%	0,00%
Elev. Totó	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
EEAT Alto da Bondade	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Elevatória Cliper	8,13%	16,07%	12,60%	13,39%	12,60%	15,77%
EEAT Alça Sul	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
GNM Sul	19,35%	18,45%	19,44%	73,81%	76,49%	76,09%
Elev. Muribequinha	16,47%	18,06%	20,14%	0,30%	0%	0,30%
Elev. Cortegadas	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Autoria própria.

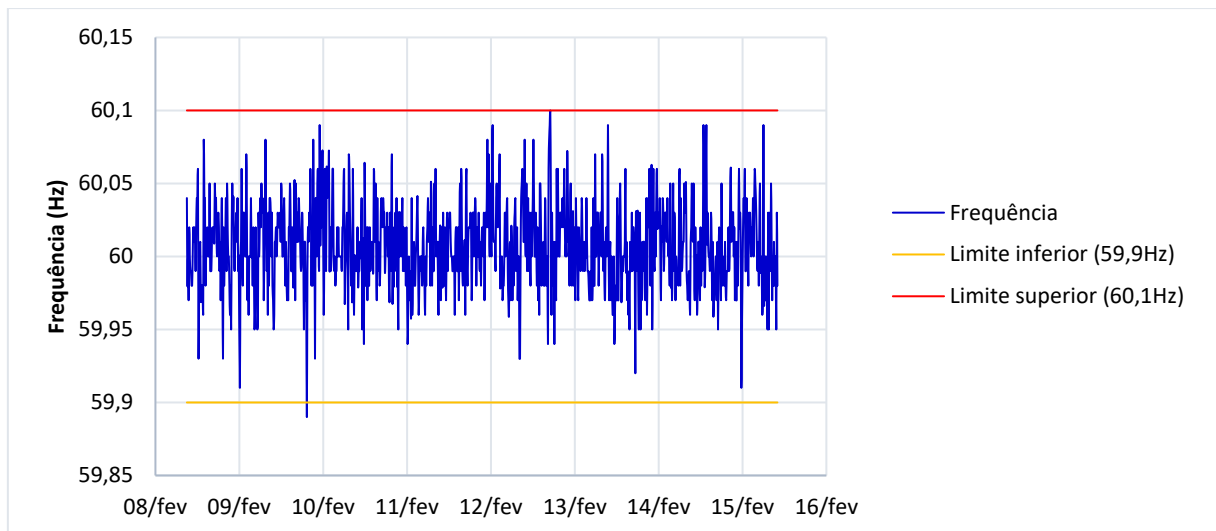
Idealmente, o melhor cenário se dá com todas as medições de tensão na faixa próximo a tensão nominal do sistema, que no caso estudado é entre 350 e 399V, o que induziria os indicadores abordados na Tabela 14 a terem valores nulos.

Ao observar os valores de DRP e DRC, percebe-se que dentre as 10 unidades Compesa, apenas 4 unidades tiveram seus indicadores com valores iguais a zero. Outras unidades como Elev. Muribequinha e ETA Matriz da Luz, atenderam aos limites de DRC, porém os valores de DRP divergem do ideal proposto pelo módulo 8 do PRODIST. Em seguida, pode-se observar algumas unidades que possuem valores acima do limite dos indicadores tanto no precário como no crítico como GNM Sul e Elevatória Cliper. Por fim, ao verificar os valores de DRC e DRP em EEAB Tiuma e EEAB Ipojuca, conclui-se que as duas unidades estão em estados extremamente crítico, visto que todos os valores de tensão registrados estão bem acima da faixa crítica durante todo o tempo de medição. Essa situação pode danificar os equipamentos elétricos nas respectivas Estações Elevatórias de Água Bruta, levando até a interrupção do fornecimento de água para a população.

4.2 Variação de frequência

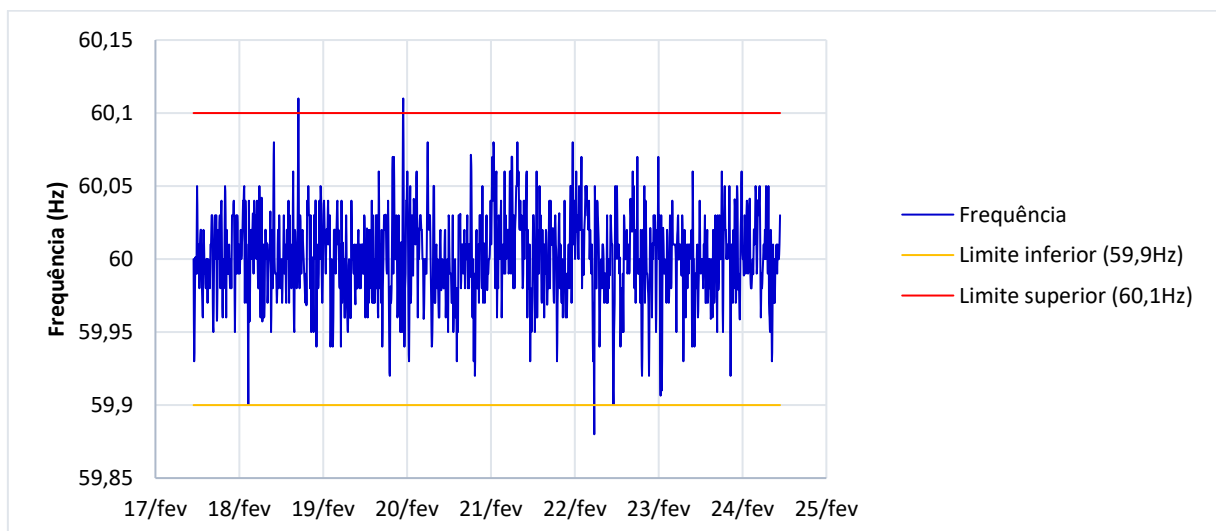
No que se refere à variação de frequência, as Figuras 21 a 26 mostram os valores da frequência para cada uma das 1.008 medições, tendo como limite superior 60,1 Hz e como inferior 59,9 Hz.

Figura 21 - VF - EEAB Tiuma



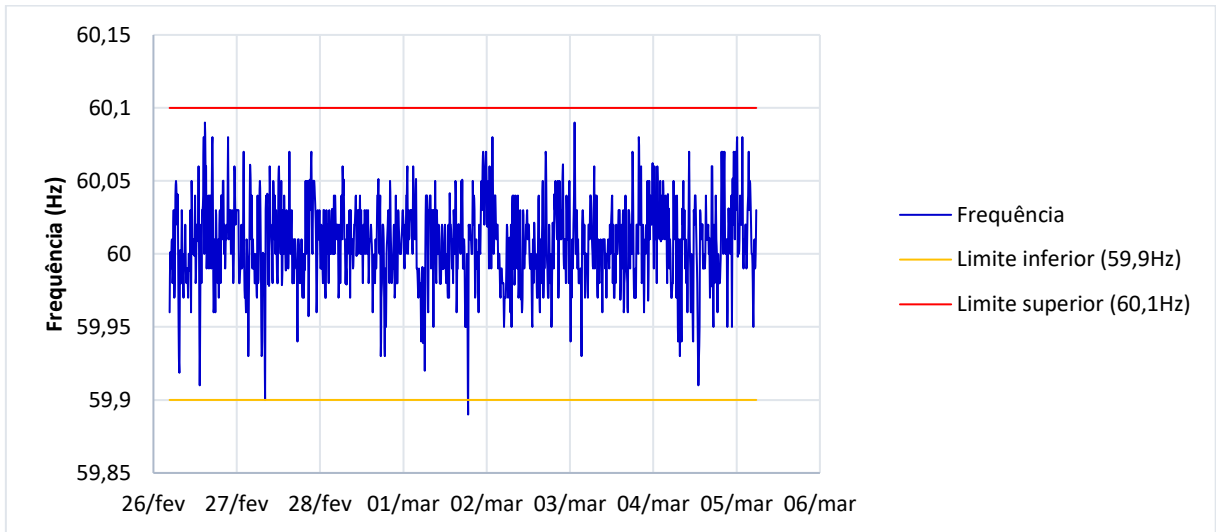
Fonte: Autoria própria.

Figura 22 - VF - EEAB Ipojuca



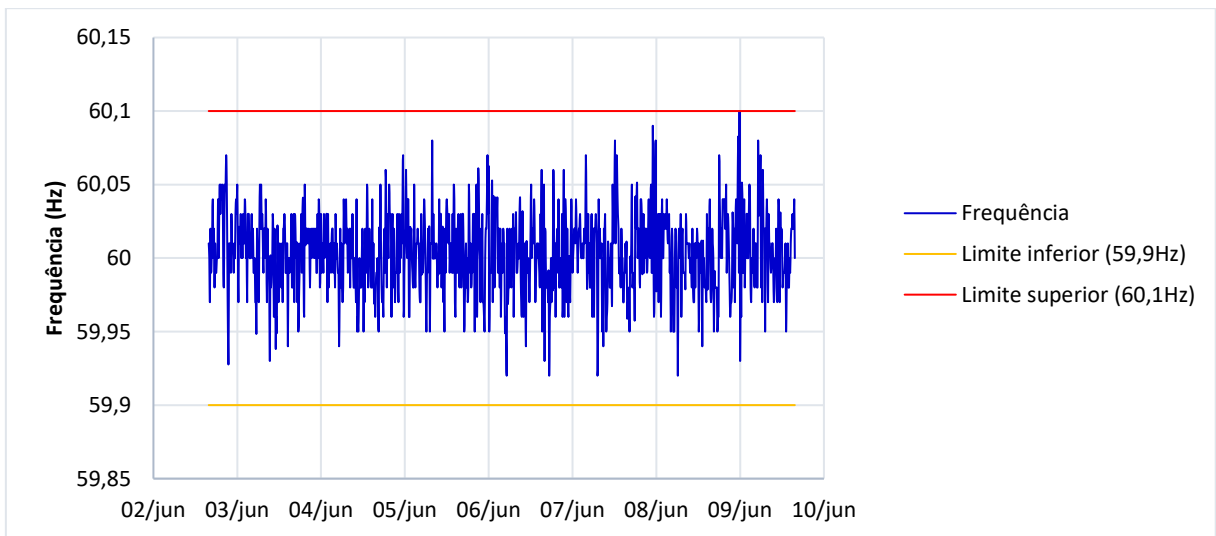
Fonte: Autoria própria.

Figura 23 - VF - ETA Matriz da Luz



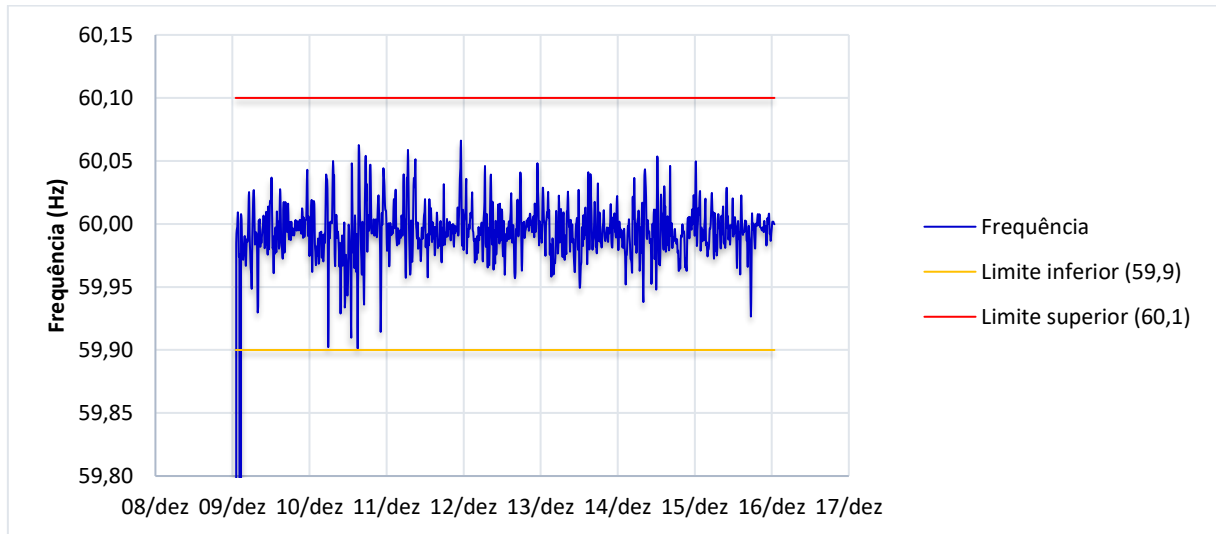
Fonte: Autoria própria.

Figura 24 - VF - Elevatória Totó



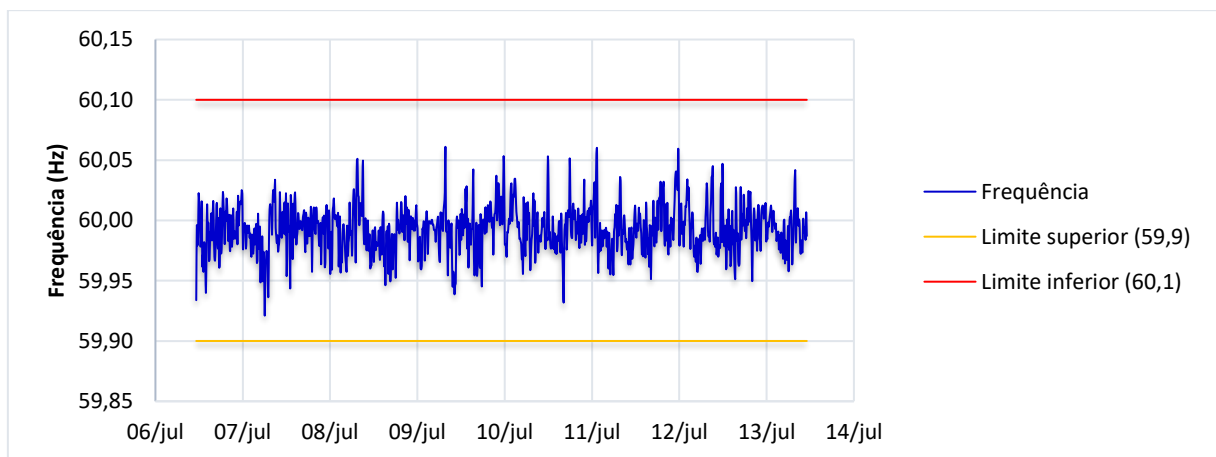
Fonte: Autoria própria.

Figura 25 - VF - Elevatória Muribequinha



Fonte: Autoria própria.

Figura 26 - VF - Elevatória Cortegadas



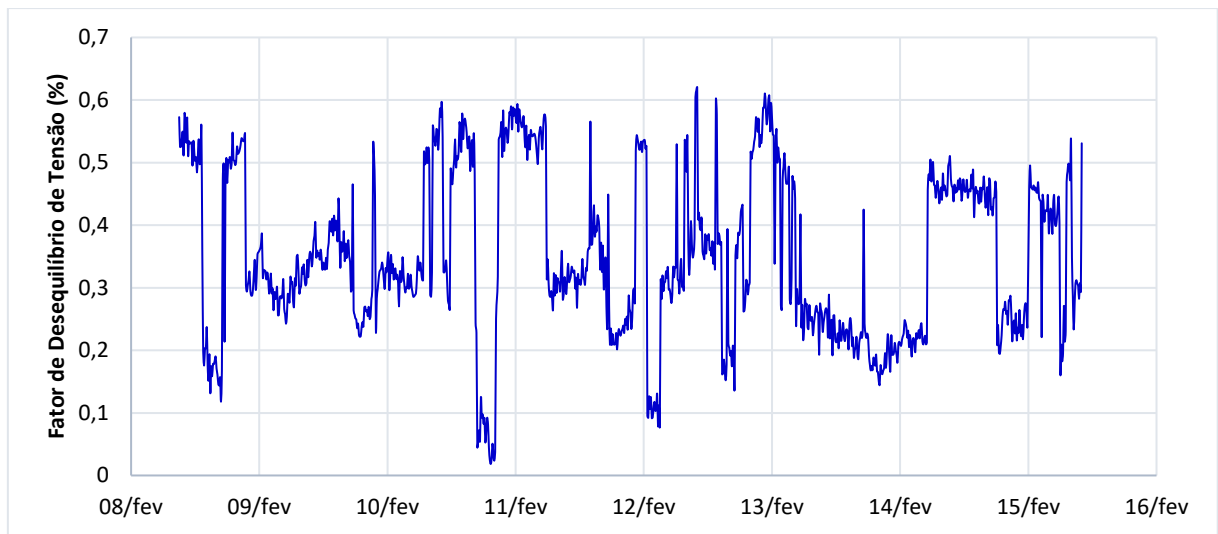
Fonte: Autoria própria.

Ao verificar os valores da variação de frequência, é possível concluir que todas as unidades estão de acordo com o que foi informado no tópico 2.2.6, com alguns valores um pouco acima da faixa considerada adequada, porém sendo rapidamente inseridas na frequência desejada, exceto pela unidade Elevatória Muribequinha, que possuiu valores de frequência que divergem do ideal relatado no PRODIST. Para essa unidade em questão foram verificados valores muito abaixo do desejado chegando a atingir 47,21 Hz.

4.3 Desequilíbrio de tensão

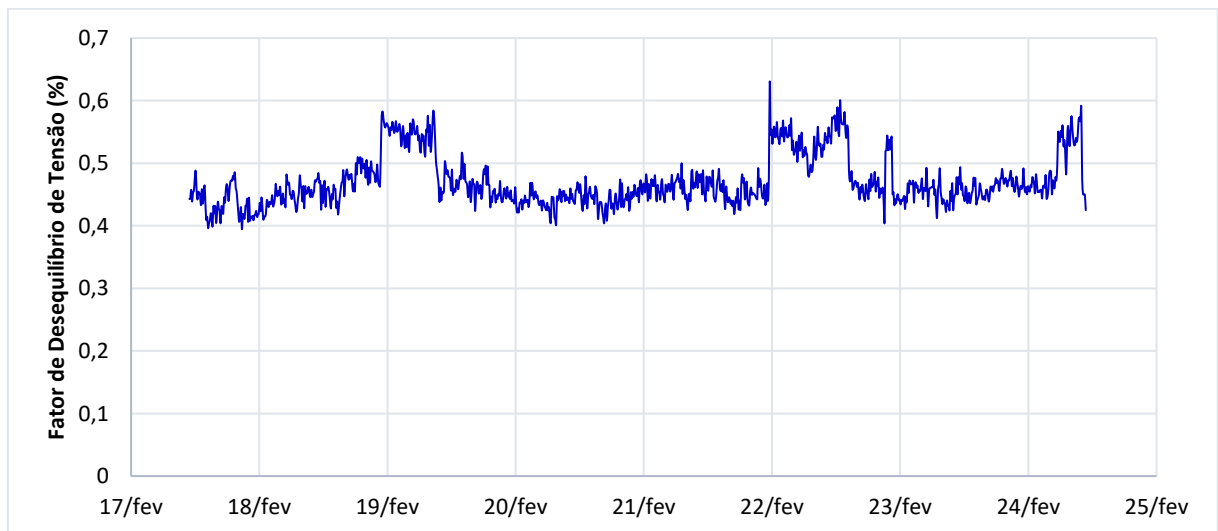
Com relação ao desequilíbrio de tensão, as Figuras 27 a 36 retratam os gráficos com os valores do indicador FD% para cada uma das 1.008 medidas registradas no equipamento.

Figura 27 - DT - EEAB Tiuma



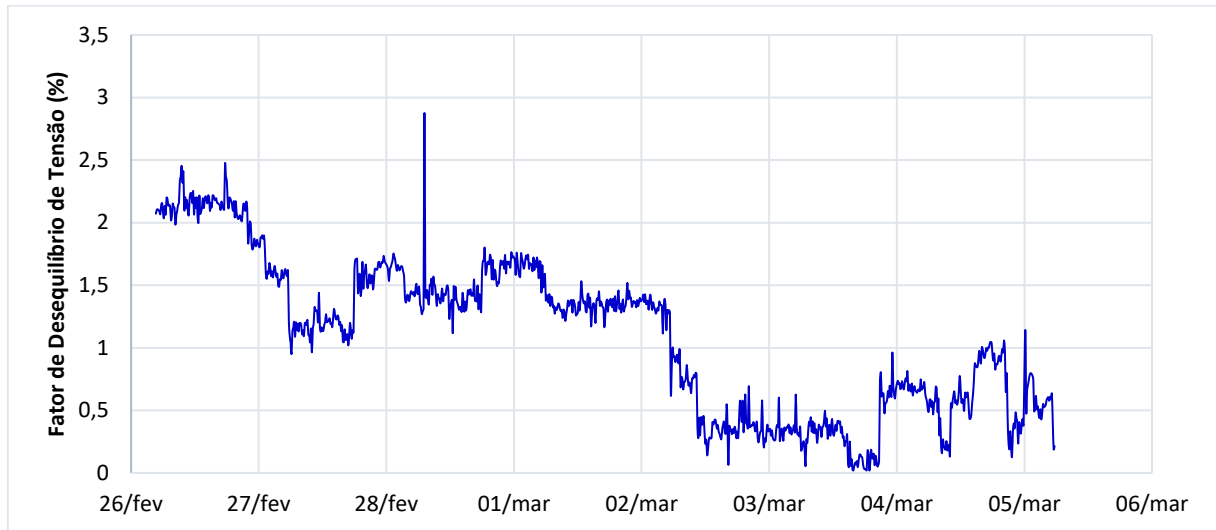
Fonte: Autoria própria.

Figura 28 - DT - EEAB Ipojuca



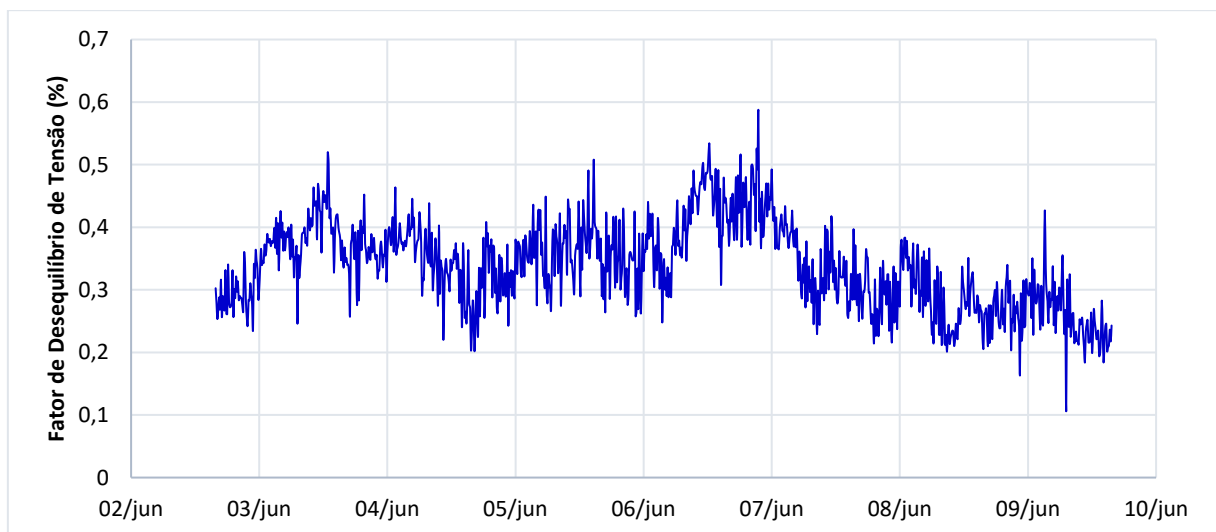
Fonte: Autoria própria.

Figura 29 - DT - ETA Matriz da Luz



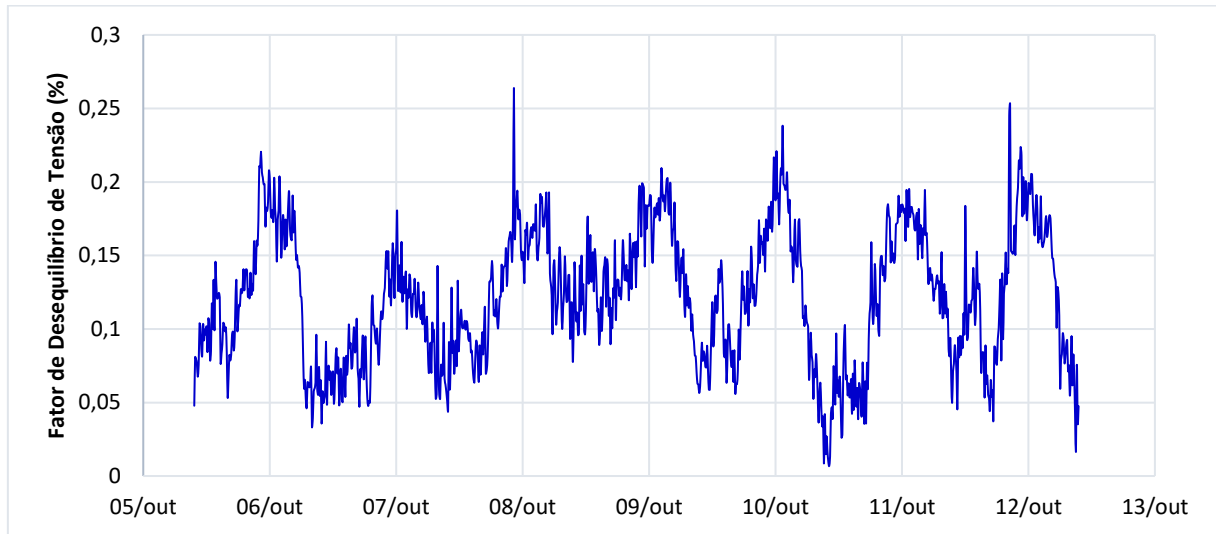
Fonte: Autoria própria.

Figura 30 - DT - Elevatória Totó



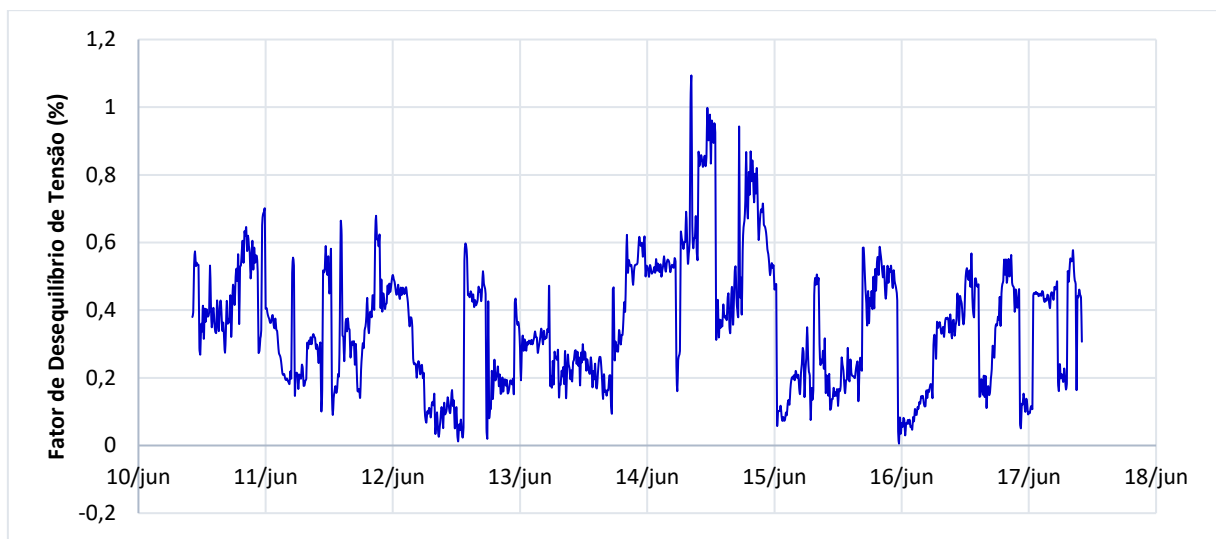
Fonte: Autoria própria.

Figura 31 - DT - EEAT Alto da Bondade



Fonte: Autoria própria.

Figura 32 - DT - Elevatória Cliper



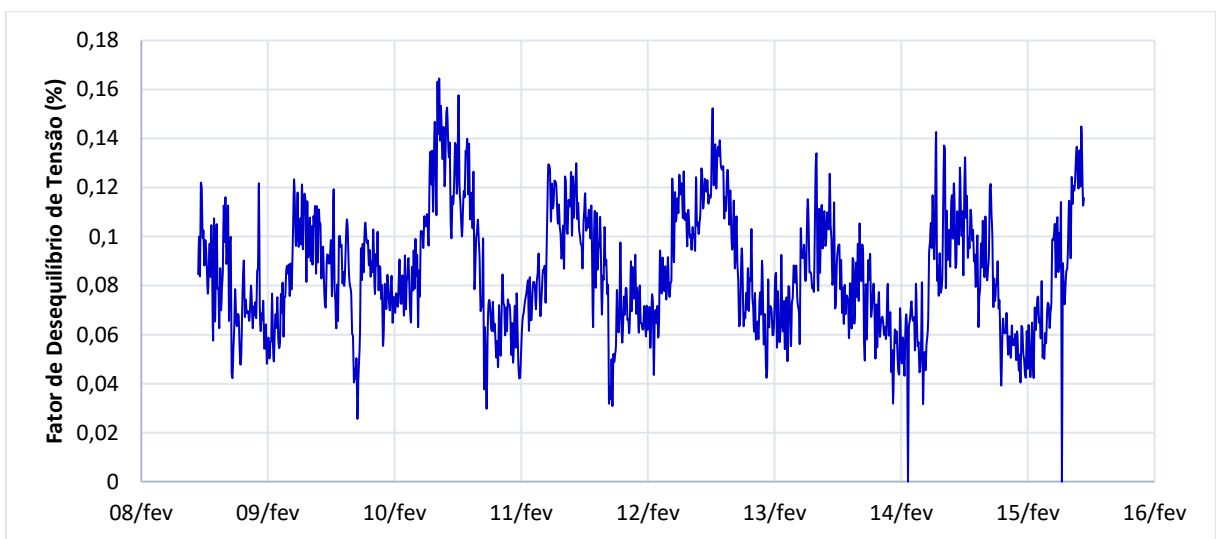
Fonte: Autoria própria.

Figura 33 - DT - EEAT Alça Sul



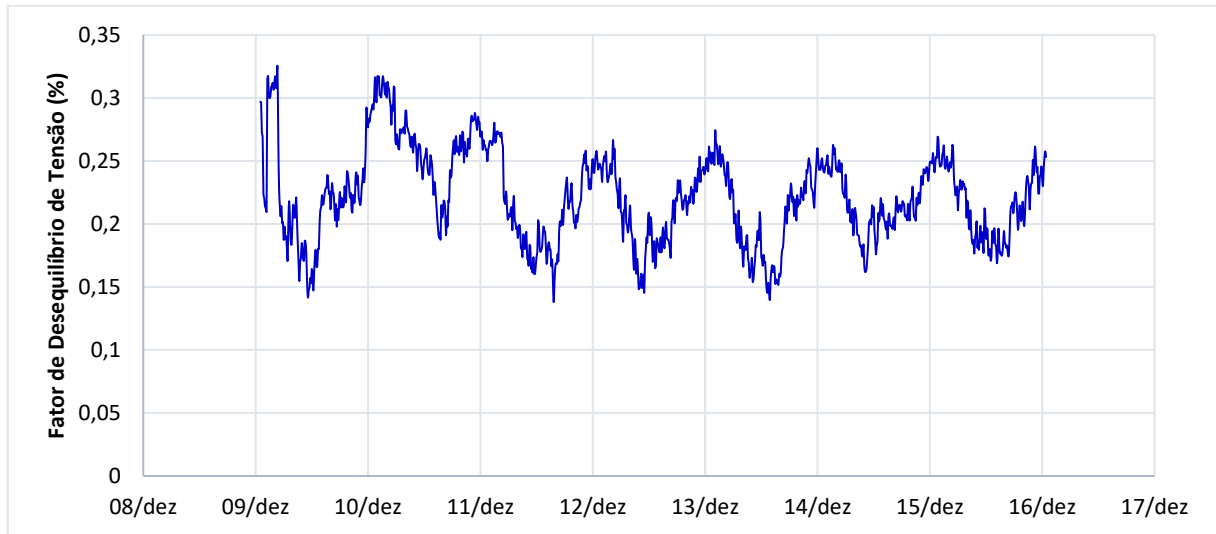
Fonte: Autoria própria.

Figura 34 - DT - GNM Sul



Fonte: Autoria própria.

Figura 35 - DT - Elevatória Muribequinha



Fonte: Autoria própria.

Figura 36 - DT - Elevatória Cortegadas



Fonte: Autoria própria.

Dentre os valores de FD%, encontra-se o valor do indicador FD95% como mostrado na Tabela 15.

Tabela 15 - Valores do indicador FD95%

Unidade Compesa	FD95%
EEAB Tiuma	0,577%
EEAB Ipojuca	0,473%
ETA Matriz da Luz	2,143%
Elev. Totó	0,452%
EEAT Alto da Bondade	0,193%
Elevatória Cliper	0,653%
EEAT Alça Sul	0,173%
GNM Sul	0,070%
Elev. Muribequinha	0,286%
Elev. Cortegadas	0,387%

Fonte: Autoria própria.

Observando a Tabela 15, nota-se que, para tensão nominal menor ou igual a 1 kV, o limite do indicador FD95% é de 3,0%. O maior valor encontrado nas unidades estudadas nesse tópico é de 2,143%, demonstrando assim, total acordo com o módulo 8 do PRODIST.

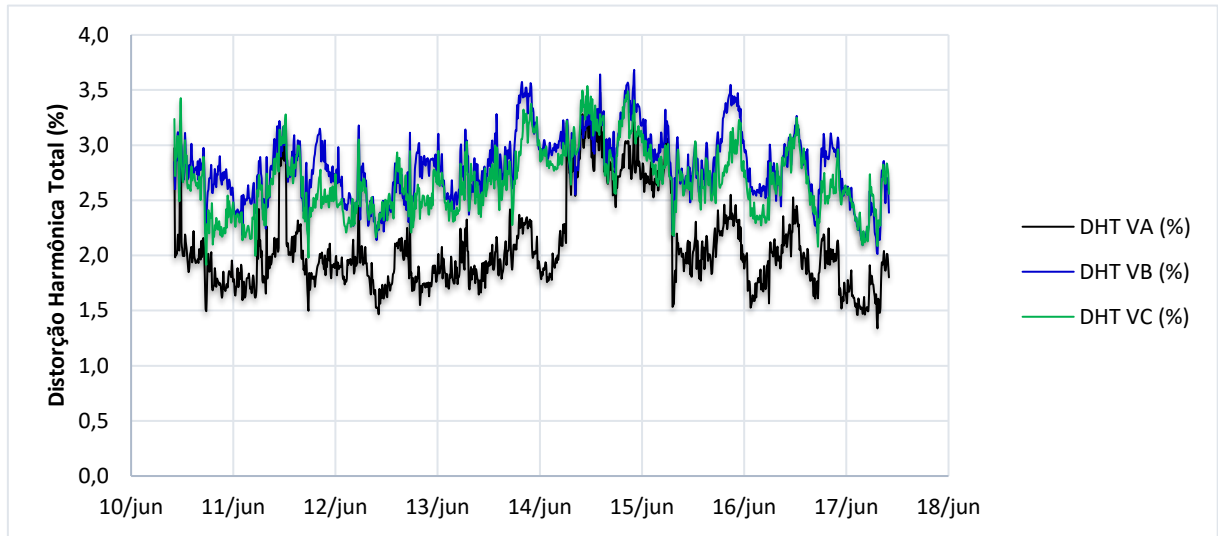
4.4 Distorção harmônica

No que diz respeito a distorção harmônica, existem quatro indicadores a serem analisados, DTT%, DTT_p%, DTT_i% e DTT₃%, que se referem a distorção harmônica total, pares não múltiplas de 3, ímpares não múltiplas de 3 e múltiplas de 3.

4.4.1 Distorção Harmônica Total

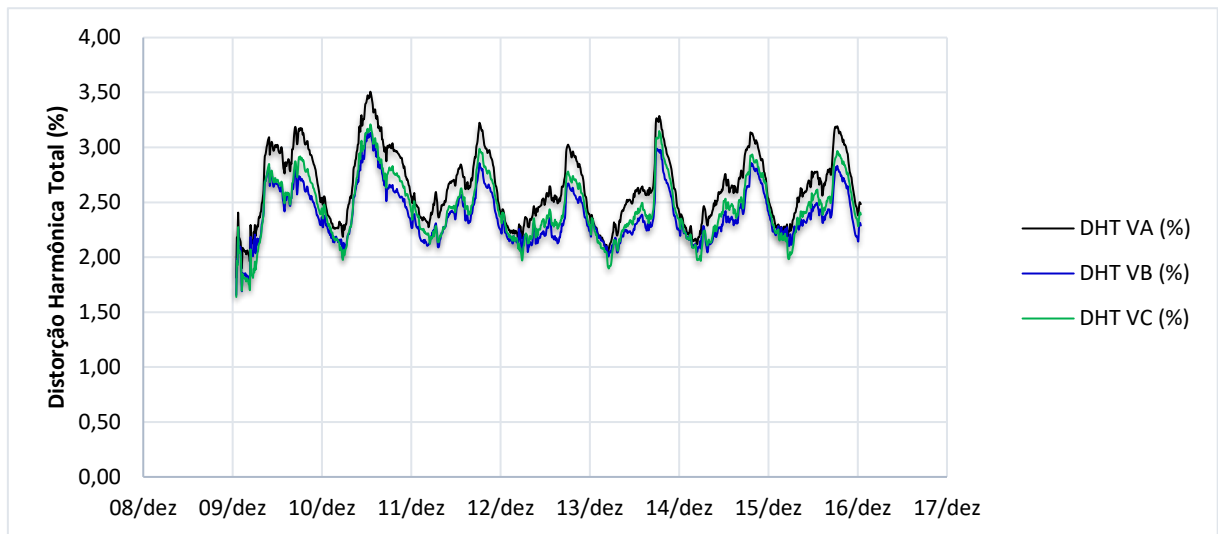
Para distorção harmônica total, foram encontrados os valores para as unidades da Elevatória Cliper, Elevatória Muribequinha e Elevatória Cortegadas. As Figuras 37 a 39 mostram os valores encontrados da DHT.

Figura 37 - DHT - Elevatória Cliper



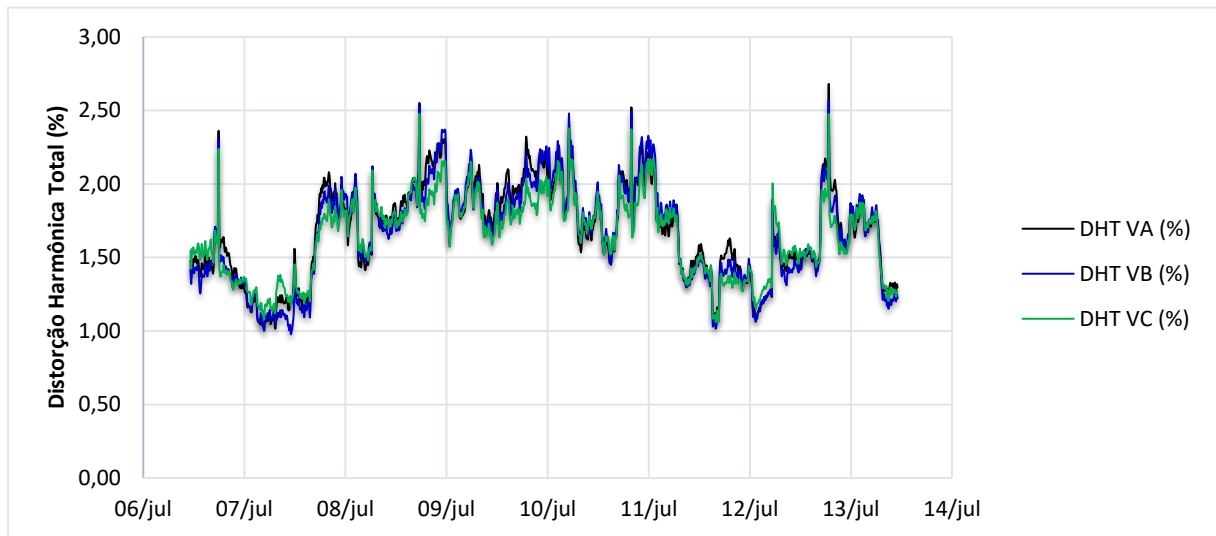
Fonte: Autoria própria.

Figura 38 - DHT - Elevatória Muribequinha



Fonte: Autoria própria.

Figura 39 - DHT - Elevatória Cortegadas

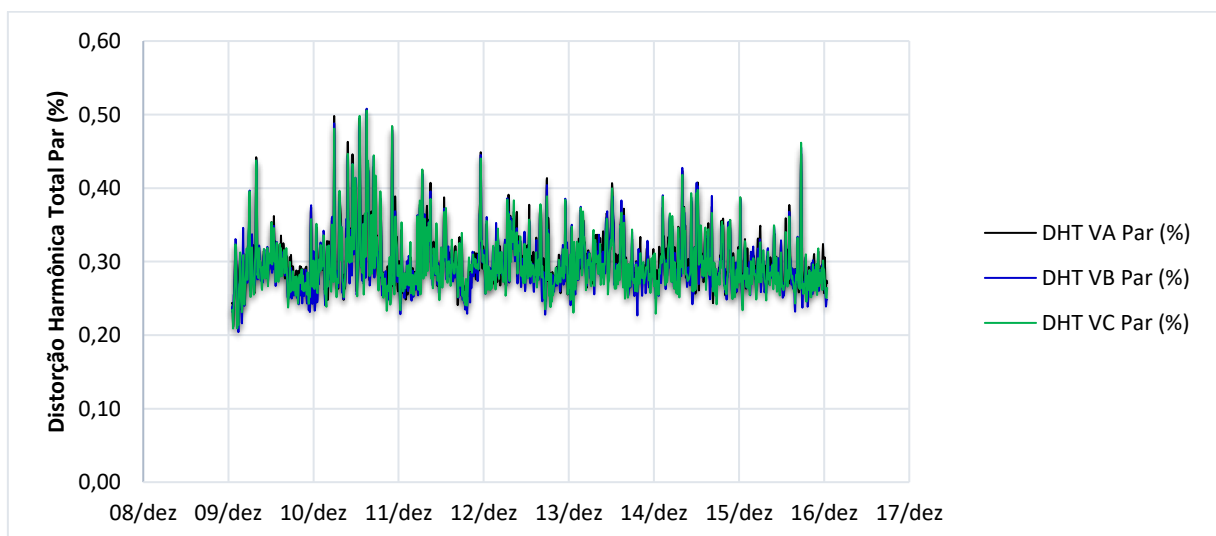


Fonte: Autoria própria.

4.4.2 Distorção Harmônica Total Par

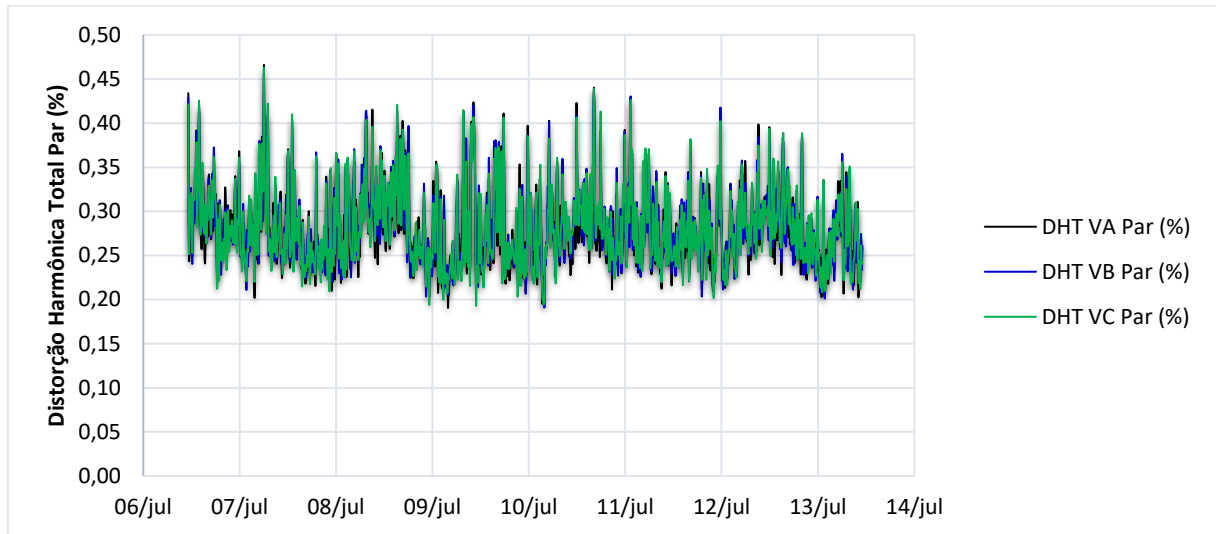
No que se refere a distorção harmônica total par, foram encontrados os valores para as unidades da Elevatória Muribequinha e Elevatória Cortegadas. As Figuras 40 e 41 mostram os valores encontrados da DHT Par.

Figura 40 - DHT Par - Elevatória Muribequinha



Fonte: Autoria própria.

Figura 41 - DHT Par - Elevatória Cortegadas

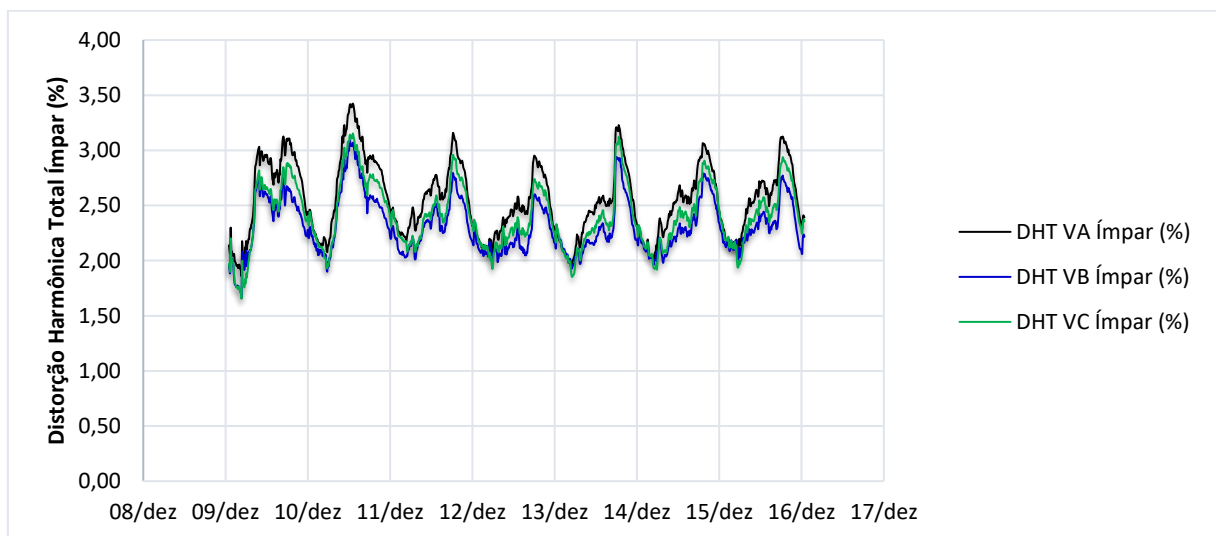


Fonte: Autoria própria.

4.4.3 Distorção Harmônica Total Ímpar

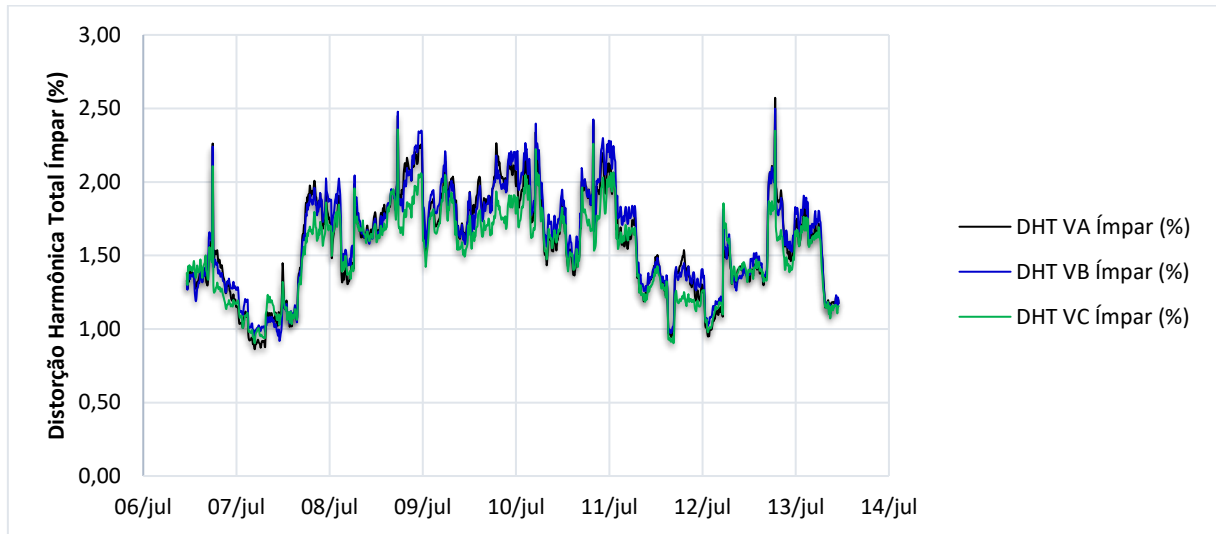
Em relação a distorção harmônica total, foram encontrados os valores para as unidades da Elevatória Muribequinha e Elevatória Cortegadas. As Figuras 42 e 43 mostram os valores encontrados da DHT Ímpar.

Figura 42 - DHT Ímpar - Elevatória Muribequinha



Fonte: Autoria própria.

Figura 43 - DHT Ímpar - Elevatória Cortegadas

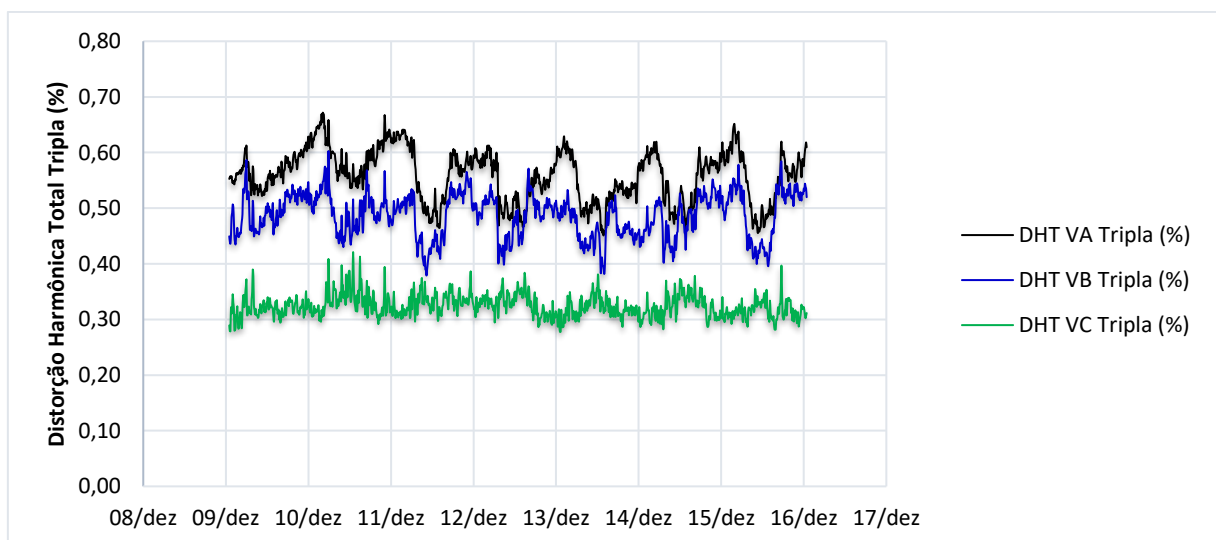


Fonte: Autoria própria.

4.4.4 Distorção Harmônica Total Tripla

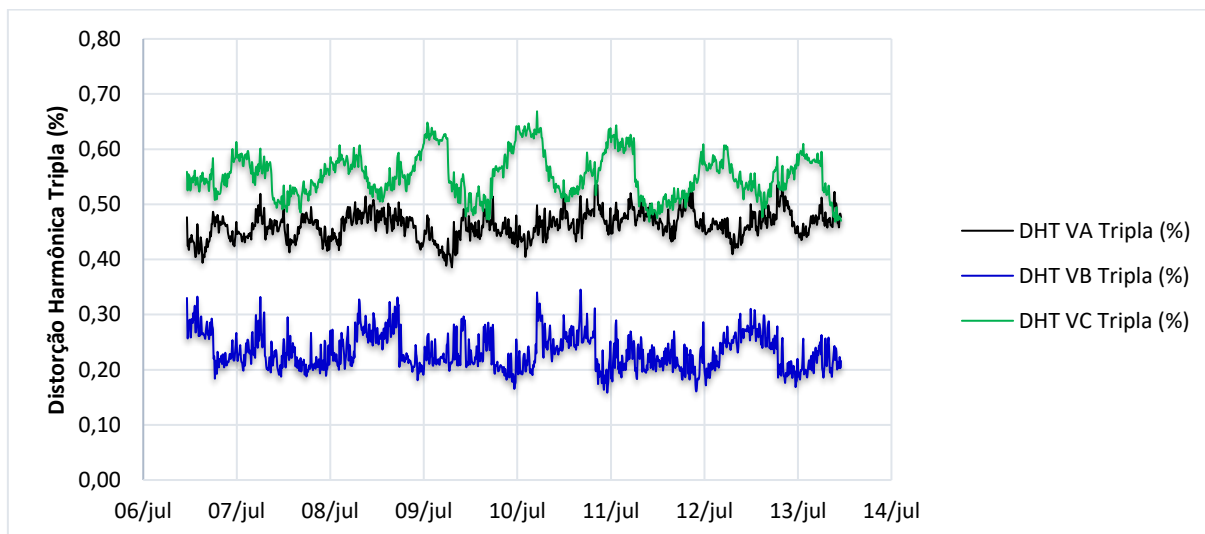
Analisando o último indicador relacionado a distorções harmônicas, para distorção harmônica total tripla, foram encontrados os valores para as unidades da Elevatória Muribequinha e Elevatória Cortegadas. As Figuras 44 e 45 mostram os valores encontrados do indicador DHT Tripla.

Figura 44 - DHT Tripla - Elevatória Muribequinha



Fonte: Autoria própria.

Figura 45 - DHT Tripla - Elevatória Cortegadas



Fonte: Autoria própria.

4.4.5 Análise geral das distorções harmônicas

Tendo posse de todos os gráficos relacionados aos indicadores de distorções harmônicas, pode-se analisar os valores para cada tensão das unidades analisadas, conforme mostrado na Tabela 16.

Tabela 16 - Valores dos indicadores DTT95%, DTTp95%, DTTi95% e DTT₃95%.

Indicador	Tensão	Unidade Compesa		
		Elev. Cliper	Elev. Muribequinha	Elev. Cortegadas
DTT95%	Va	2,98%	3,18%	2,17%
	Vb	3,35%	2,82%	2,21%
	Vc	3,22%	2,89%	2,14%
DTTp95%	Va	-	0,37%	0,36%
	Vb	-	0,37%	0,37%
	Vc	-	0,37%	0,37%
DTTi95%	Va	-	3,11%	2,11%
	Vb	-	2,77%	2,17%
	Vc	-	2,91%	1,94%
DTT ₃ 95%	Va	-	0,63%	0,50%
	Vb	-	0,54%	0,29%
	Vc	-	0,36%	0,63%

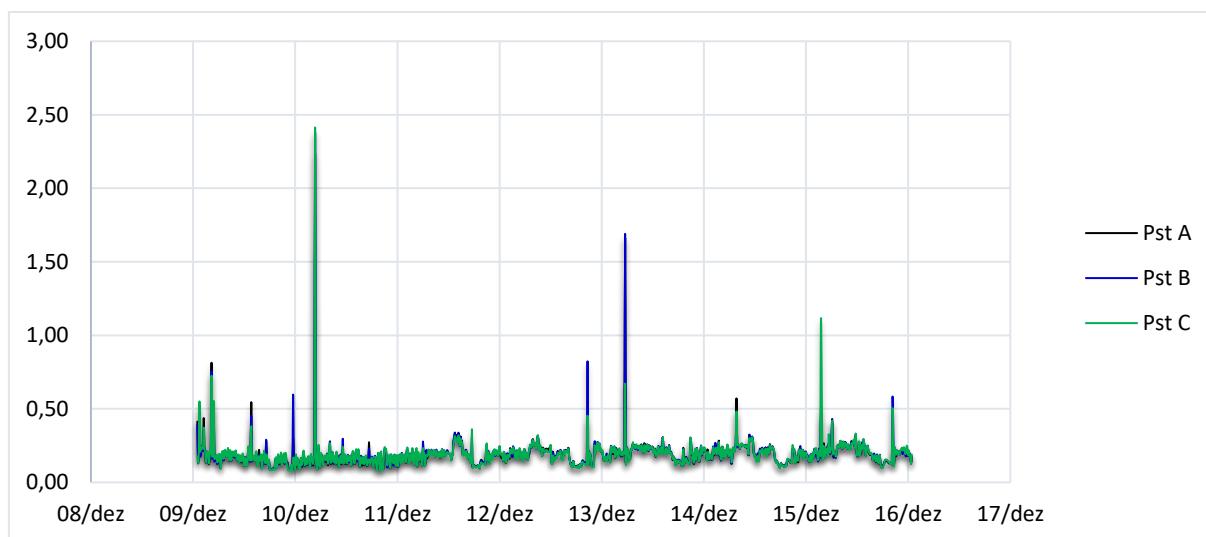
Fonte: Autoria própria.

Observando os valores dos indicadores estudados no atual tópico e comparando-os com a Tabela 4, é possível concluir que os resultados obtidos estão de acordo com os limites das distorções harmônicas para tensão nominal menor que 1,0 kV, já que para os indicadores $DTT_{95\%}$, $DTT_{p95\%}$, $DTT_{i95\%}$ e $DTT_{395\%}$, os limites são, respectivamente, 10,0%, 2,5%, 7,5% e 6,5%.

4.5 Flutuação de Tensão

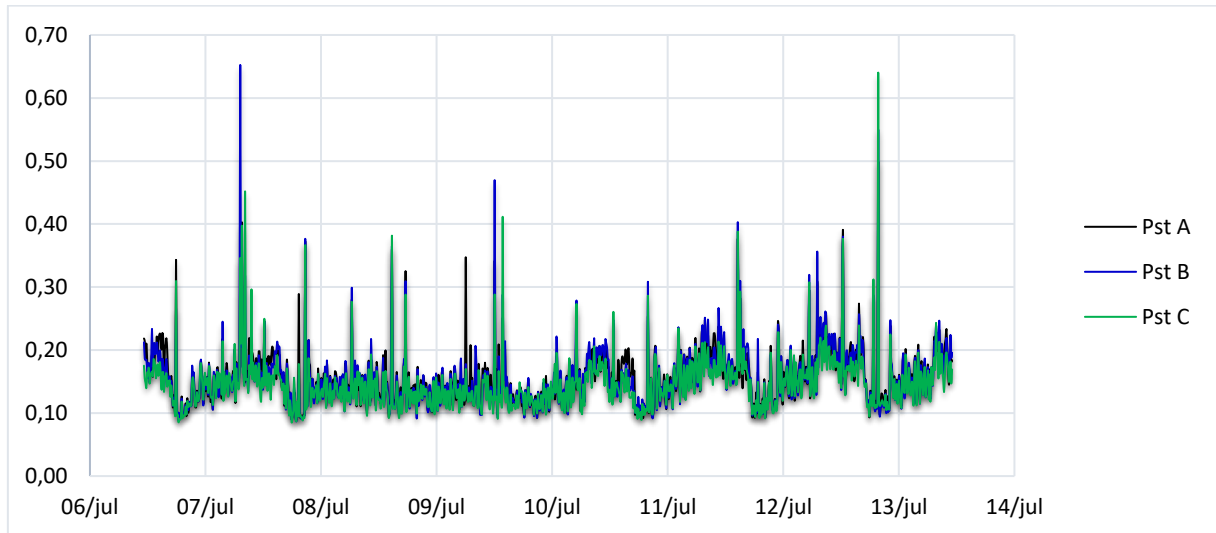
Referente a flutuação de tensão, foi possível obter informações de duas unidades: Elevatória Muribequinha e Elevatória Cortegadas. Para avaliar se a flutuação de tensão está de acordo com o módulo 8 do PRODIST, foi necessário verificar os valores do indicador Pst a cada 10 minutos, conforme está escrito no tópico 2.2.5. As Figuras 46 e 47 mostram os valores do indicador Pst calculado em cada fase das unidades Compesa.

Figura 46 - Indicador Pst - Elev. Muribequinha



Fonte: Autoria própria.

Figura 47 - Indicador Pst - Elev. Cortegadas



Fonte: Autoria própria.

Com esses valores obtidos, é possível observar os valores do indicador Pst95% de cada fase nas duas unidades analisadas, conforme mostrado na Tabela 4.6.1.

Tabela 17 - Valores do indicador Pst95%

Indicador	Elev. Muribequinha			Elev. Cortegadas		
	Vab	Vbc	Vca	Vab	Vbc	Vca
Pst95%	0,270 pu	0,275 pu	0,273 pu	0,221 pu	0,224 pu	0,200 pu

Fonte: Autoria própria.

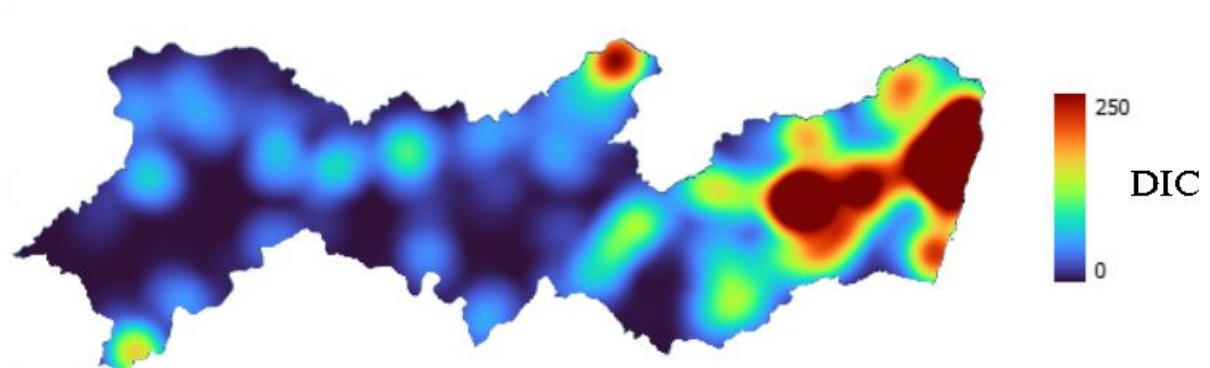
Observando os valores do indicador Pst95% e verificando a Tabela 7, pode-se concluir que os valores estão de acordo com o módulo 8 do PRODIST, com valores abaixo 1,0 pu como descrito na norma.

4.6 Indicadores de continuidade individuais

Para análise dos indicadores individuais de continuidade de serviço, a GGE solicitou os valores dos indicadores DIC e FIC para todas as unidades da Compesa no ano de 2023. Os valores enviados foram referentes apenas aos meses de janeiro, fevereiro, março, abril e agosto, isso indica que os outros meses do ano foram definidos como dias que podem ser desconsiderados segundo o PRODIST.

Dos valores obtidos, considerando as 1.873 unidades da Compesa, o DIC total foi de 7.754,74 horas e o FIC total foi de 3.728 interrupções. As Figura 48 e 49 mostram o mapa de Pernambuco com os locais onde mais se prolongaram a Duração de Interrupção individual e onde mais ocorreu a Frequência de Interrupção Individual, respectivamente.

Figura 48 - Unidades da Compesa e o indicador DIC



Fonte: Autoria própria.

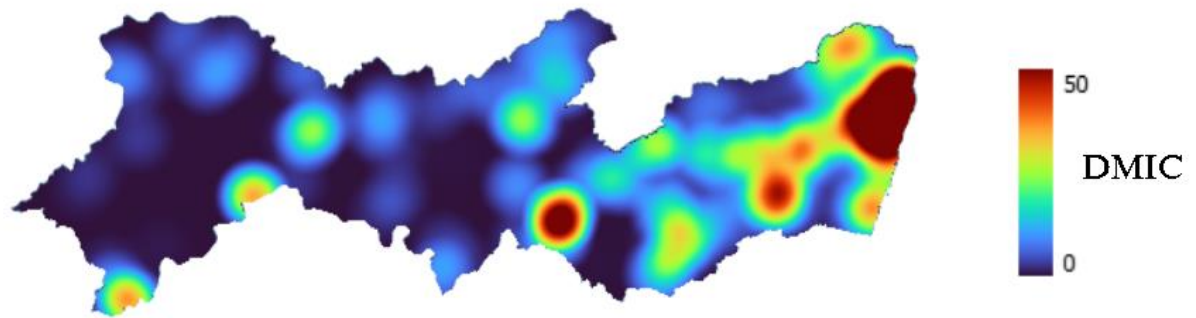
Figura 49 - Unidades da Compesa e o indicador FIC



Fonte: Autoria própria.

Outro indicador que é útil para a análise de continuidade de serviço e que foi dado para a Compesa através da concessionária local foi o DMIC que mostra a duração máxima, em horas, de interrupção contínua por unidade consumidora. A Figura 50 mostra, através de um mapa de calor, como ficou distribuído esse indicador no estado de Pernambuco.

Figura 50 - Unidades da Compesa e o indicador DMIC



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Este capítulo apresenta a conclusão do trabalho, resumindo os principais resultados obtidos ao longo das análises feitas anteriormente. Além disso, é proposto uma continuidade para o estudo, destacando áreas que podem ser exploradas em trabalhos futuros, com base nos desafios identificados durante a pesquisa.

5.1 CONCLUSÃO

Este trabalho mostrou uma análise na QEE em 10 das 1.873 unidades espalhadas em todo o Estado de Pernambuco. Essas unidades têm o papel de contribuir para o fornecimento de saneamento básico para toda a população do estado, todas com diferentes funções como elevação de água bruta, tratamento de água, elevação de água tratada, etc. Para que cada uma das unidades analisadas cumpra o seu objetivo, é necessário que a concessionária que atende ao estado, a Neoenergia Pernambuco, forneça energia elétrica para o devido funcionamento dos motores e dos outros equipamentos elétricos que compõe cada unidade consumidora. Para isso, foi feito uma consulta no módulo 8 do PRODIST, que relata os procedimentos que devem ser realizados e os indicadores que devem ser verificados para a análise da QEE. Para isso, foi instalado o Analisador Portátil de Qualidade de energia, modelo P55, fabricado pela empresa Primata Tecnologia Eletrônica que foi útil para capturar as grandezas elétricas utilizadas no cálculo dos indicadores.

É importante salientar que todas as análises neste tópico foram feitas com base nas medições que estavam disponíveis, ou seja, as unidades podem ter sofrido problemas antes ou depois das medições. Primeiramente foi estudado o índice de Tensão de Regime Permanente, onde a tensão nas unidades analisadas deveria estar, idealmente, sem ultrapassar os limites precários e críticos, no intervalo de 350 e 399 V. Ao obter os valores da tensão nos intervalos estabelecidos pela PRODIST, é possível calcular os valores dos indicadores DRC e DRP, que mostram, em porcentagem, quantas medidas da magnitude da tensão foram registradas na área crítica e precária, respectivamente. Apenas 4 unidades estiveram com todas as medidas registradas na região ideal sem ultrapassar os valores críticos e precários.

No que se refere a variação de frequência, das unidades analisadas, apenas uma unidade, em um pequeno intervalo de medições estiveram fora do que está proposto no PRODIST, chegando a atingir valor mínimo de 47,21 Hz. Em relação ao desequilíbrio de tensão, verificando os valores do indicador FD95%, não houve nenhuma divergência com os requisitos mínimos estabelecidos pela norma abordada neste trabalho. Observando também as distorções harmônicas com os 4 indicadores DTT95%, DTT_p95%, DTT_i95% e DTT₃95%, juntamente com o indicador do índice de flutuação de tensão Pst95%, é possível concluir que estão todos dentro do limite estabelecido pela PRODIST.

Por fim, analisando os indicadores DIC, FIC e DMIC fornecidos pela Neoenergia Pernambuco, percebe-se que a região metropolitana e algumas cidades ao entorno precisam de uma atenção especial devido ao grande número de interrupções com longas durações nas unidades consumidoras dessa região. Como essa área possui uma alta densidade populacional comparada ao restante do estado, é necessário priorizar uma boa QEE neste território prejudicado.

5.2 PROPOSTA DE CONTINUIDADE

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, surgem novas oportunidades para aprofundar e expandir o estudo. Uma das possibilidades de continuidade está relacionada a expansão da análise de QEE em outras unidades da compesa onde os indicadores DIC, FIC e DMIC estão em maior número. A medição utilizando todos os índices possíveis do módulo 8 do PRODIST também ajudaria em uma análise cada vez mais completa para conscientizar a concessionária a melhorar cada vez mais o serviço dado a Compesa e a mesma teria comprovações mais claras para solicitar a distribuidora uma melhora no serviço. Dessa forma, a continuidade deste trabalho poderia ir para temas como o impacto desta boa ou má qualidade de energia elétrica nos equipamentos elétrico, com explicações técnicas mais aprofundadas com os equipamentos mais utilizados nas 1.873 unidades espalhadas por todo o estado. Sendo assim, tudo isso estaria contribuindo de maneira significativa para o avanço das pesquisas na área.

REFERÊNCIAS

- [1] R. A. Lopez, *Qualidade na energia elétrica*, São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2013.
- [2] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso e H. W. Beaty, *Electrical Power System Quality*, Estados Unidos: McGraw-Hill, 2012.
- [3] C. Sankaran, *Power Quality*, Boca Raton: CRC Press, 2002.
- [4] IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, “*IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*,” *IEEE Std 1159-2019*, 2019.
- [5] *Primata Tecnologia Eletrônica*, “*Especificações Técnicas P55 - Analisador de Qualidade de Energia*,” *Março 2023*. [Online]. Available: <https://primataeletronica.com.br/wp-content/uploads/2024/08/Especificacoes-Tecnicas-P55-Analisador-de-Qualidade-de-Energia-v2024-03.pdf>. [Acesso em 12 Setembro 2024].
- [6] *Primata Tecnologia Eletrônica*, “*P55 Analisador de Qualidade de energia*,” *Primata Tecnologia Eletrônica*, [Online]. Available: https://primataeletronica.com.br/produto/analizador-portatil-de-qualidade-de-energia/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwoooq3BhB3EiwAYqYoEsmo8HNwV9B5dTKVLO2BqoOIUTU2_hYJ14GBmHXBnMjiTPIC49U0qxoCr7AQAvD_BwE. [Acesso em 12 Setembro 2024].
- [7] Brasil, Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica, “*RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 956/2021*,” *ANEEL*, 2021.
- [8] R. Torres, M. Cruz, M. Tavares, F. Tiba e V. Luz, “*A Qualidade da Energia Elétrica no Contexto do Saneamento Ambiental*,” *XV Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*, 2023.
- [9] *Base de Dados do Estado*, “*Consumo de Energia Elétrica em Pernambuco*,” 2023. [Online]. Available: http://www.bde.pe.gov.br/visualizacao/Visualizacao_formato2.aspx?CodInformacao=416&Cod=3. [Acesso em 12 Setembro 2024].
- [10] J. Paiva, “*Análise de índices de qualidade da energia elétrica considerando uma planta de geração eólica*,” *Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Elétrica)*, Unidade Acadêmica Cabo de Santo Agostinho, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Cabo de Santo Agostinho, 2022.
- [11] F. D. C. Poll, “*Análise da qualidade de energia elétrica em baixa tensão: Estudo de caso em um ambiente universitário*,” *Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Elétrica)*, Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2013.
- [12] *Plano Municipal de Saneamento Básico, FUNASA*, “*Saneamento básico*,” [Online]. Available: <https://pmsb-funasa.uaec.ufcg.edu.br/index.php/saneamento-basico>. [Acesso em 12 Setembro 2024].
- [13] Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa), [Online]. Available: <https://servicos.compesa.com.br/>. [Acesso em 12 Setembro 2024].
- [14] *Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa)*, “*História e Perfil, Compesa*,” *Compesa*, [Online]. Available: <https://servicos.compesa.com.br/historia-e->

perfil/#:~:text=Prestar%2C%20de%20forma%20sustent%C3%A1vel%2C%20servi%C3%A7os,qualidade%20de%20vida%20dos%20clientes.&text=Ser%20uma%20empres
a%20de%20refer%C3%A2ncia,a%20popula%C3%A7%C3%A3o%20pernambucana
%20at%C3. [Acesso em 12 Setembro 2024].