

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

WAGNER FERRONATO TREVISOL

**ANÁLISE DE QUALIDADE DE ENERGIA DO BLOCO DE LABORATÓRIOS DE
COMPUTAÇÃO DE UMA UNIVERSIDADE NO OESTE DO PARANÁ**

MEDIANEIRA

2025

WAGNER FERRONATO TREVISOL

**ANÁLISE DE QUALIDADE DE ENERGIA DO BLOCO DE LABORATÓRIOS DE
COMPUTAÇÃO DE UMA UNIVERSIDADE NO OESTE DO PARANÁ**

**Energy quality analysis from the computer laboratory block of a university in
west Paraná**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Leandro Antonio Pasa.

MEDIANEIRA

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

WAGNER FERRONATO TREVISOL

**ANÁLISE DE QUALIDADE DE ENERGIA DO BLOCO DE LABORATÓRIOS DE
COMPUTAÇÃO DE UMA UNIVERSIDADE NO OESTE DO PARANÁ**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 06/fevereiro/2025

Leandro Antonio Pasa
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Filipe Marangoni
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Thiago Naufal Santelo
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

MEDIANEIRA

2025

RESUMO

A qualidade de energia elétrica visa verificar se as grandezas elétricas de um sistema apresentam valores dentro dos limites impostos pela norma, possibilitando a adequação em casos que isso se mostre necessário, trazendo maior eficiência e confiabilidade ao sistema. O estudo em questão busca selecionar, apurar e analisar dados referentes as grandezas elétricas utilizadas para determinar os indicadores de qualidade que a ANEEL apresenta no PRODIST. Os dados foram obtidos através do equipamento *PowerNET P-600*, instalado na saída do disjuntor que alimenta o bloco de laboratórios de computação de uma universidade no oeste do Paraná, afim de identificar distorções provocadas pela grande carga de computadores. Com 3 ciclos de medição realizados, utilizou-se o software *PowerMANAGER* desktop para realizar a transferência dos registros para o computador, permitindo a geração de gráficos que apresentam o comportamento das grandezas medidas. Assim constatou-se que os parâmetros analisados atendiam aos requisitos da norma, com exceção apenas do fator de potência, que apresentou vários registros com valores fora dos limites especificados, porém o mesmo não tem necessidade de corresponder a tais limites, uma vez que essa grandeza só é determinante no ponto de conexão da unidade consumidora com a concessionária de energia. Outro parâmetro que apresentou valores significativamente maiores do que o esperado para um sistema elétrico, apesar de não serem determinados indicadores na norma, são as distorções harmônicas de corrente, onde boa parte dos registros de distorção total da fase C ultrapassaram o valor de 30%. Com isso conclui-se que, perante ao que estipula a norma brasileira, a instalação analisada atende aos requisitos, mas que outros parâmetros podem indicar melhorias a serem realizadas na instalação.

Palavras-chave: controle de qualidade; energia elétrica; instrumentos de medição; normas técnicas (engenharia).

ABSTRACT

The purpose of electrical power quality assessment is to verify whether the electrical quantities of a system are within the limits imposed by the regulation, enabling adjustments in cases where this is necessary, thus providing greater efficiency and reliability to the system. The study in question seeks to select, verify and analyze data related to the electrical quantities used to determine the quality indicators that ANEEL presents in PRODIST. The data were obtained through the PowerNET P-600 equipment, installed at the output of the circuit breaker that supplies the computer laboratory block of a university in west Paraná, in order to identify distortions caused by the heavy computer load. With 3 measurement cycles performed, the PowerMANAGER desktop software was used to transfer the records to the computer, allowing the generation of graphs that show the behavior of the measured quantities. It was thus found that the parameters analyzed met the requirements of the regulation, with the exception of the power factor, which presented several records with values outside the specified limits. However, it does not need to correspond to such limits, since this quantity is only decisive at the connection point of the consumer unit with the energy provider. Another parameter that presented values significantly higher than expected for an electrical system, despite not being determined indicators in the regulation, is the harmonic current distortions, where a good part of the records of total distortion of phase C exceeded the value of 30%. With this, it is concluded that, in view of what is stipulated by the Brazilian standard, the installation analyzed meets the requirements, but that other parameters may indicate improvements to be made in the installation.

Keywords: quality control; electric power; measuring instruments; standards engineering.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Faixas de Tensão em relação à de referência | 12 |
| Figura 2 - Triângulo de potências..... | 14 |
| Figura 3 - Distribuição acumulada complementar da sensação de cintilação | 19 |
| Figura 4 - Conectores de medição de tensão..... | 24 |
| Figura 5 - Sensores de corrente Rugowski | 24 |
| Figura 6 - Conexão do PowerNET P-600 G4 (Estrela a 4 fios) | 25 |
| | |
| Gráfico 1 - Tensão média de fase no ciclo 1 | 27 |
| Gráfico 2 - Tensões individuais de fase no ciclo 1 | 27 |
| Gráfico 3 - Tensão média de linha no ciclo 1 | 28 |
| Gráfico 4 - Tensões individuais de linha no ciclo 1..... | 29 |
| Gráfico 5 - Fator de potência por fase no ciclo 1 | 30 |
| Gráfico 6 - Distorções harmônicas totais de tensão no ciclo 1 | 31 |
| Gráfico 7 - Distorções harmônicas totais de tensão ímpares no ciclo 1 | 31 |
| Gráfico 8 - Distorções harmônicas totais de tensão pares no ciclo 1 | 32 |
| Gráfico 9 - Distorções harmônicas totais de tensão múltiplas de 3 no ciclo 1 | 33 |
| Gráfico 10 - Distorções harmônicas totais de corrente no ciclo 1..... | 33 |
| Gráfico 11 - Distorções harmônicas totais de corrente ímpares no ciclo 1 | 34 |
| Gráfico 12 - Distorções harmônicas totais de corrente pares no ciclo 1..... | 35 |
| Gráfico 13 - Distorções harmônicas totais de corrente múltiplas de 3 no ciclo 1..... | 35 |
| Gráfico 14 - Desequilíbrio de tensão no ciclo 1 | 36 |
| Gráfico 15 - Frequência no ciclo 1..... | 37 |
| Gráfico 16 - Tensão média de fase no ciclo 2 | 38 |
| Gráfico 17 - Tensões individuais de fase no ciclo 2 | 39 |
| Gráfico 18 - Tensão média de linha no ciclo 2 | 39 |
| Gráfico 19 - Tensões individuais de linha no ciclo 2..... | 40 |
| Gráfico 20 - Fator de potência por fase no ciclo 2..... | 41 |
| Gráfico 21 - Distorções harmônicas totais de tensão no ciclo 2..... | 42 |
| Gráfico 22 - Distorções harmônicas totais de tensão ímpares no ciclo 2 | 42 |
| Gráfico 23 - Distorções harmônicas totais de tensão pares no ciclo 2..... | 43 |
| Gráfico 24 - Distorções harmônicas totais de tensão múltiplas de 3 no ciclo 2..... | 43 |
| Gráfico 25 - Distorções harmônicas totais de corrente no ciclo 2..... | 44 |
| Gráfico 26 - Distorções harmônicas totais de corrente ímpares no ciclo 2..... | 45 |
| Gráfico 27 - Distorções harmônicas totais de corrente pares no ciclo 2..... | 45 |
| Gráfico 28 - Distorções harmônicas totais de corrente múltiplas de 3 no ciclo 2..... | 46 |
| Gráfico 29 - Desequilíbrio de tensão no ciclo 2..... | 47 |
| Gráfico 30 - Frequência no ciclo 2..... | 48 |
| Gráfico 31 - Tensão média de fase no ciclo 3 | 49 |

| | |
|--|----|
| Gráfico 32 - Tensões individuais de fase no ciclo 3 | 49 |
| Gráfico 33 - Tensão média de linha no ciclo 3 | 50 |
| Gráfico 34 - Tensões individuais de linha no ciclo 3..... | 50 |
| Gráfico 35 - Fator de potência por fase no ciclo 3..... | 51 |
| Gráfico 36 - Distorções harmônicas totais de tensão no ciclo 3..... | 52 |
| Gráfico 37 - Distorções harmônicas totais de tensão impares no ciclo 3 | 53 |
| Gráfico 38 - Distorções harmônicas totais de tensão pares no ciclo 3..... | 53 |
| Gráfico 39 - Distorções harmônicas totais de tensão múltiplas de 3 no ciclo 3..... | 54 |
| Gráfico 40 - Distorções harmônicas totais de corrente no ciclo 3..... | 54 |
| Gráfico 41 - Distorções harmônicas totais de corrente impares no ciclo 3..... | 55 |
| Gráfico 42 - Distorções harmônicas totais de corrente pares no ciclo 3..... | 56 |
| Gráfico 43 - Distorções harmônicas totais de corrente múltiplas de 3 no ciclo 3..... | 56 |
| Gráfico 44 - Desequilíbrio de tensão no ciclo 3 | 57 |
| Gráfico 45 - Frequência no ciclo 3..... | 58 |
| Gráfico 46 - Reconstrução da forma de onda de tensão do ciclo 1 (01/03/2024 20:20 hrs) | 59 |
| Gráfico 47 - Reconstrução da forma de onda de tensão do ciclo 2 (07/04/2024 09:30 hrs) | 60 |
| Gráfico 48 - Reconstrução da forma de onda de tensão do ciclo 3 (25/04/2024 08:10 hrs) | 60 |
| Gráfico 49 - Harmônicos de tensão do ciclo 1 (01/03/2024 20:20 hrs)..... | 61 |
| Gráfico 50 - Harmônicos de tensão do ciclo 2 (07/04/2024 09:30 hrs)..... | 62 |
| Gráfico 51 - Harmônicos de tensão do ciclo 3 (25/04/2024 08:10 hrs)..... | 62 |
| Gráfico 52 - Reconstrução da forma de onda de corrente do ciclo 1 (29/02/2024 15:50 hrs) | 63 |
| Gráfico 53 - Reconstrução da forma de onda de corrente do ciclo 2 (03/04/2024 07:00 hrs) | 63 |
| Gráfico 54 - Reconstrução da forma de onda de corrente do ciclo 3 (29/04/2024 07:30 hrs) | 64 |
| Gráfico 55 - Harmônicos de corrente do ciclo 1 (29/02/2024 15:50 hrs) | 64 |
| Gráfico 56 - Harmônicos de corrente do ciclo 2 (03/04/2024 07:00 hrs) | 65 |
| Gráfico 57 - Harmônicos de corrente do ciclo 3 (29/04/2024 07:30 hrs) | 65 |
| | |
| Quadro 1 - Indicadores de distorções harmônicas | 15 |
| Quadro 2 - Classificação das variações de tensão de curta duração - VTCD..... | 21 |
| Quadro 3 - Estratificação das VTCD com base nos níveis de sensibilidade das diversas cargas | 21 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Pontos de conexão em Tensão Nominal inferior a 2,3 kV (220/127) | 13 |
| Tabela 2 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)..... | 17 |
| Tabela 3 - Limites para o indicador de desequilíbrio de tensão | 18 |
| Tabela 4 - Limites para flutuação de tensão | 19 |
| Tabela 5 - Fator de ponderação e fator de impacto base de acordo com a tensão nominal (V_n) | 22 |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 7 |
| 2 | OBJETIVO | 9 |
| 2.1 | Objetivos específicos..... | 9 |
| 3 | QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA | 10 |
| 3.1 | PRODIST | 10 |
| 3.1.1 | Variação de tensão em regime permanente..... | 11 |
| 3.1.2 | Fator de potência..... | 13 |
| 3.1.3 | Distorções harmônicas | 14 |
| 3.1.4 | Desequilíbrio de tensão..... | 17 |
| 3.1.5 | Flutuação de tensão | 18 |
| 3.1.6 | Variação de frequência..... | 19 |
| 3.1.7 | Variação de tensão de curta duração..... | 20 |
| 4 | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS..... | 23 |
| 5 | RESULTADOS OBTIDOS | 26 |
| 5.1 | Ciclo 1..... | 26 |
| 5.1.1 | Variação de tensão em regime permanente..... | 26 |
| 5.1.2 | Fator de potência..... | 29 |
| 5.1.3 | Distorções harmônicas | 30 |
| 5.1.4 | Desequilíbrio de tensão..... | 36 |
| 3.1.5 | Variação de frequência..... | 37 |
| 5.2 | Ciclo 2..... | 38 |
| 5.2.1 | Variação de tensão em regime permanente..... | 38 |
| 5.2.2 | Fator de potência..... | 40 |
| 5.2.3 | Distorções harmônicas | 41 |
| 5.2.4 | Desequilíbrio de tensão..... | 47 |
| 3.2.5 | Variação de frequência..... | 47 |
| 5.3 | Ciclo 3..... | 48 |
| 5.3.1 | Variação de tensão em regime permanente..... | 48 |
| 5.3.2 | Fator de potência..... | 51 |
| 5.3.3 | Distorções harmônicas | 52 |
| 5.3.4 | Desequilíbrio de tensão..... | 57 |
| 3.3.5 | Variação de frequência..... | 58 |
| 5.4 | Flutuações de tensão e variação de tensão de curta duração..... | 58 |

| | | |
|-----|------------------------------|----|
| 5.5 | Efeitos das distorções | 59 |
| 6 | CONCLUSÃO | 63 |
| | REFERÊNCIAS..... | 69 |

1 INTRODUÇÃO

A utilização de fontes externas de energia, como alternativa ao esforço braçal para a realização de trabalhos, é uma prática amplamente utilizada pela humanidade ao longo da história. O fogo por exemplo, liberando energia térmica através da queima de combustíveis, ajuda no preparo de alimentos, possibilitando a absorção mais fácil de nutrientes.

Através de avanços tecnológicos, mais fontes de energia foram dominadas pelo ser humano, possibilitando uma maior eficiência na realização de diversas tarefas, porém com o empecilho de que essa energia não podia ser transmitida a grandes distâncias, como um moinho d'água por exemplo, transfere a energia da correnteza de um rio para realizar a moagem de grãos, mas para isso, a instalação do moedor precisa ser feita às margens de um rio, próximo da roda d'água. Já com o advento da energia elétrica, foi possível a transmissão de energia em longas distâncias e com perdas relativamente pequenas, além de flexibilizar a forma que essa energia será utilizada, independente da fonte geradora, viabilizando o seu uso de forma mais ampla.

Com isso, a utilização da eletricidade se expandiu para todos os setores, culminando na implementação de redes de transmissão que conectam as fontes geradoras às cargas instaladas, como pode ser observado no Sistema Interligado Nacional (SIN) do Brasil, que abrange praticamente todo o território do país. Esse tipo de sistema possui grande confiabilidade, de modo que se houver algum problema em determinada região, as outras podem continuar funcionando normalmente, mas apresenta o contraponto de que se deve adotar um padrão aos parâmetros das ondas de tensão e corrente para todo o sistema. Isso, juntamente com a presença cada vez maior de equipamentos e processos que são sensíveis a variações desses parâmetros, evidenciam a necessidade de se adotar medidas que garantam a qualidade de energia elétrica, dentro de valores pré-definidos.

Outro ponto importante, é que a eletricidade é utilizada e comercializada como um produto, porém com a característica de ela ser adquirida e imediatamente utilizada, não havendo maneiras de realizar um controle de sua qualidade pelo próprio consumidor antes de sua utilização. Assim, cabe as empresas fornecedoras a responsabilidade de garantir que os parâmetros estejam adequados às necessidades do cliente (MARTINHO, 2013).

Na década de 1990, o setor elétrico brasileiro passou por uma reestruturação, o que levou a separação de empresas de energia elétrica nos setores de geração, de transmissão e de distribuição e acarretou a criação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que tem por função regulamentar e fiscalizar os serviços relacionados a energia elétrica (KAGAN, 2009).

É comum diferenciar três conceitos referentes a qualidade do fornecimento de energia, sendo estes a qualidade de atendimento, referente ao atendimento comercial entre cliente e empresas do setor, a qualidade do serviço, referente a continuidade do fornecimento, e a qualidade do produto, referente a forma de onda de tensão dos componentes de um sistema trifásico. Para a análise de qualidade de energia, leva-se em consideração tanto a qualidade de serviço quanto a do produto (KAGAN, 2009).

Para se realizar o estudo optou-se por fazê-lo nas mediações da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Medianeira, pois a mesma possui uma instalação grande e com cargas de diferentes naturezas, sendo uma opção bastante interessante para se observar os possíveis efeitos de distúrbios elétricos.

Com essa análise pode-se constatar que a qualidade de energia elétrica presente na instituição atende ou não aos critérios da ANEEL, bem como onde podem ser direcionados esforços para as possíveis adequações. Assim este trabalho se mostra relevante pela necessidade de se conhecer, entender e buscar minimizar os efeitos de distúrbios elétricos na rede do campus.

2 OBJETIVO

Analisar a qualidade de energia presente nas instalações do bloco de laboratórios de computação de uma universidade no oeste do Paraná, com relação aos critérios de qualidade estabelecidos pela ANEEL.

2.1 Objetivos específicos

- Determinar os parâmetros da energia elétrica a serem analisados;
- Obter os dados de medição da energia elétrica presente nas instalações do bloco;
- Comparar dados obtidos com os critérios da ANEEL;

3 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Qualidade de energia está relacionada diretamente à modificação da energia elétrica gerada, de modo que a onda senoidal padrão sofre alterações por diversos motivos. Essa alteração pode ser percebida basicamente na amplitude (contendo valores distintos por trecho do sistema) e na frequência (60 Hz em todo sistema) porém, com as características próprias de cada evento, diversas nomenclaturas são usadas a fim de diferenciar fenômenos, definir seus indicadores e estabelecer valores limitantes para esses indicadores (MARTINHO, 2013).

Como apresentado anteriormente a qualidade do fornecimento pode ser diferenciado em 3 conceitos, dentre esses, o que melhor se relaciona aos conceitos de qualidade de energia elétrica apresentados é o definido como qualidade do produto, por se tratar da característica da forma de onda apresentada (KAGAN, 2009). Assim essas características podem ser afetadas principalmente pelos seguintes fenômenos:

- a) Variação de tensão de longa duração;
- b) Distorções harmônicas;
- c) Desequilíbrio de tensão e corrente;
- d) Flutuação de tensão;
- e) Variação de frequência;
- f) Variação de tensão de curta duração.

Segundo Dugan, McGranaghan, Santoro e Beaty (2003), um problema de qualidade de energia elétrica pode ser definido como “Qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou frequência que resulte em falha ou má operação de equipamento do consumidor”.

3.1 PRODIST

O PRODIST – Procedimentos de Distribuição da ANEEL, em vigência desde 31 de dezembro 2008 (Atualização mais recente de 07 de dezembro de 2021), trata da qualidade de energia elétrica no modulo 8 (KAGAN, 2009).

No documento são listados os objetivos a serem atingidos com sua implementação (ANEEL, 2021), sendo eles:

- a) Estabelecer os procedimentos relacionados à qualidade de energia elétrica na distribuição;
- b) Definir fenômenos relacionados a qualidade do produto, com relação a conformidade da onda de tensão;
- c) Definir fenômenos relacionados a qualidade do serviço, com relação a continuidade do fornecimento;
- d) Estabelecer procedimentos relacionados à apuração comercial, com relação ao atendimento do consumidor;
- e) Estabelecer procedimentos para apuração e repasse das informações relativas a acidentes;
- f) Estabelecer procedimentos para a realização de compensações e envios de relatórios de acompanhamentos à ANEEL.

Neste modulo são definidos os fenômenos, metodologia de medição, parâmetros a serem analisados e os valores de referência, relacionados a qualidade do produto.

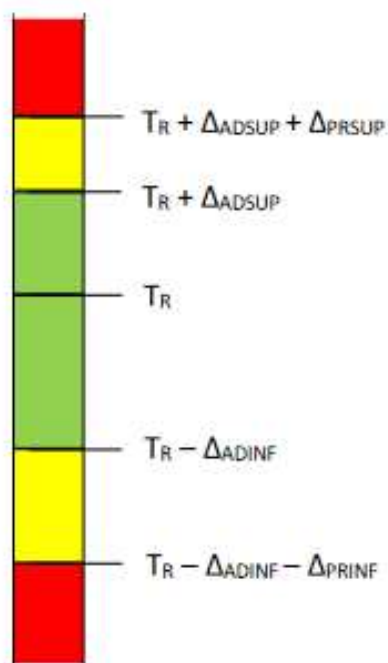
3.1.1 Variação de tensão em regime permanente

Também relacionados ao termo variação de tensão de longa duração, é um fenômeno que ocorre por consequência da contínua variação de carga no sistema elétrico, acarretando variações de tensão. O rendimento e a vida útil de alguns equipamentos podem ser reduzidos por operarem com tensão aplicada inferior ou superior a valores limites (KAGAN, 2009).

O nível de variação é avaliado através da obtenção de valores de tensão medidos e comparados com o valor de referência, sendo classificados como adequado, precário ou crítico, baseados no afastamento do valor real com o esperado, como indicado na Figura 1 onde, TR indica o valor de tensão de referência, Δ_{ADSUP} e Δ_{ADINF} indicam a variação máxima permitida, superior e inferior, respectivamente, para permanecer dentro da faixa adequada do nível de tensão (área verde) e, de modo semelhante, Δ_{PRSUP} e Δ_{PRINF} indicam a variação, superior e inferior, respectivamente, dos valores limites para determinar, a partir dos limites da faixa adequada, as faixas precárias de tensão (áreas amarelas), valores de tensão

que ultrapassem os limites estabelecidos das faixas precárias são situados nas faixas críticas de tensão (áreas vermelhas) (ANEEL, 2021).

Figura 1 – Faixas de Tensão em relação à de referência



Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2021)

A fim de se ter um parâmetro quantitativo para realizar a avaliação do nível de tensão, o PRODIST determina 2 indicadores, DRP – Duração relativa da transgressão de tensão precária e DRC – Duração relativa da transgressão de tensão crítica (ANEEL, 2021).

As medições devem estar relacionadas a um mês civil, considerando 1008 leituras validas, obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada, dentre essas são extraídas a quantidade de leituras em níveis precários e críticos, a fim de calcular os indicadores, como mostrado nas equações 1 e 2, onde as variáveis nlp e nlc, são os números de leituras precárias e críticas, respectivamente, referentes a fase que apresente o maior número de leituras dentro desses parâmetros (ANEEL, 2021).

$$\text{DRP} = (\text{nlp}/1008) * 100 [\%] \quad (1)$$

$$\text{DRC} = (\text{nlc}/1008) * 100 [\%] \quad (2)$$

Os valores dos indicadores devem respeitar os limites determinados de 3% para o DRP e de 0,5% para o DRC.

Para a análise da tensão de regime permanente serão definidos os limites de tensão para cada faixa de acordo com o anexo 8.A do PRODIST, onde para a tensão nominal de 220 V/127 V deve ser adotados os limites definidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Pontos de conexão em Tensão Nominal inferior a 2,3 kV (220/127)

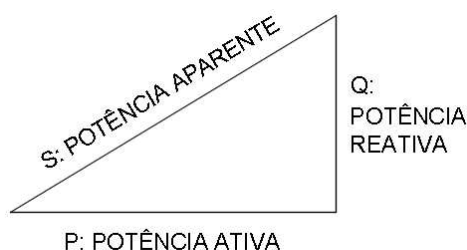
| Tensão de Atendimento | Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts) |
|------------------------------|--|
| Adequada | $(202 \leq TL \leq 231) / (117 \leq TL \leq 133)$ |
| Precária | $(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233) /$ $(110 \leq TL < 117 \text{ ou } 133 < TL \leq 135)$ |
| Crítica | $(TL < 191 \text{ ou } TL > 233) / (TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$ |

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2021)

3.1.2 Fator de potência

Em cargas lineares, ou seja, que obedecem à Lei de Ohm, ao se ter uma onda de tensão aplicada a corrente resultante não apresenta uma defasagem de onda em relação à tensão, já em cargas não lineares a onda da corrente resultante apresenta um deslocamento temporal, em casos de cargas puramente indutivas por exemplo, a corrente fica 90° adiantada em relação a tensão, e para cargas capacitivas fica 90° atrasada (CAPELLI, 2013).

Em fenômenos práticos, essa defasagem se manifesta como potência reativa que, em contraponto à potência ativa, não efetua trabalho de fato, mas ainda apresenta grande importância para o funcionamento de cargas como motores. Essas duas potências também estão defasadas em 90° uma da outra, de modo que se adota um triângulo retângulo para sua representação, como apresentado na Figura 2, onde cada uma delas é relacionada a um cateto e a potência aparente, ou “total”, é o resultado do valor da hipotenusa, que conseqüentemente é a maior das três. O termo fator de potência trata da relação entre a potência aparente e a potência ativa, sendo assim, sempre menor que 1 (CAPELLI, 2013).

Figura 2 – Triângulo de potências

Fonte: Autoria própria (2023)

O valor do fator de potência pode ser determinado a partir dos valores registrados de potência ativa e reativa ou de suas respectivas energias, como mostrado na equação 3 com os valores de potência e na equação 4 como os valores de energia registrados (ANEEL, 2021).

$$FP = P/\sqrt{(P^2 + Q^2)} \quad (3)$$

$$FP = EA/\sqrt{(EA^2 + ER^2)} \quad (4)$$

Unidades consumidoras do grupo A devem apresentar um valor de fator de potência entre a faixa de 0,92 capacitivo e 0,92 indutivo (ANEEL, 2021).

3.1.3 Distorções harmônicas

Em uma rede elétrica as distorções harmônicas se referem a presença de correntes e tensões que não apresentem a mesma onda senoidal que a nominal do sistema, podendo causar danos imediatos à componentes mais sensíveis e até redução de vida útil em outros equipamentos mais robustos (ANEEL, 2021).

Pode-se definir como tensão ou corrente harmônica um sinal senoidal com frequência que apresente um valor múltiplo inteiro do valor da frequência nominal do sistema, sendo caracterizadas assim como ordens a partir do número inteiro referente, desse modo idealiza-se o caso que apresenta a existência apenas da harmônica de ordem 1, que faz referência ao valor de 60 Hz (MORENO, 2021).

As harmônicas são geradas a partir de cargas não lineares, como as que possuem dispositivos semicondutores ou materiais ferromagnéticos que operam em regime de saturação. Exemplos de cargas são variadores de velocidade, sendo uma carga bastante poluidora que alcança níveis altos de distorção, e fontes de

alimentação monofásica, que são mais comuns de serem utilizadas, estando presentes em praticamente todos os equipamentos eletrônicos (MORENO, 2021).

A análise desse fenômeno é bastante complexa, porém facilitada pela decomposição do sinal em outros sinais com frequências específicas através da transformada de Fourier, permitindo uma análise isolada de cada uma delas e uma atuação mais direta para a resolução de um eventual problema (ANEEL, 2021).

Os indicadores apresentados no módulo 8 do PRODIST para descrever os diferentes tipos de distorções harmônicas são apresentados no Quadro 1 (ANEEL, 2021).

Quadro 1 – Indicadores de distorções harmônicas

| Descrição | Símbolo |
|--|----------------------|
| Distorção harmônica individual de tensão de ordem h | DIT _h % |
| Distorção harmônica total de tensão | DTT% |
| Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3 | DTT _p % |
| Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 | DTT _i % |
| Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3 | DTT ₃ % |
| Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas | DTT ₉₅ % |
| Valor do indicador DTT _p % que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas | DTT _{p95} % |
| Valor do indicador DTT _i % que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas | DTT _{i95} % |
| Valor do indicador DTT ₃ % que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas | DTT ₃₉₅ % |

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2021)

Para a obtenção dos valores dos indicadores DIT_h%, DTT%, DTT_p%, DTT_i% e DTT₃% são utilizadas as equações 5, 6, 7, 8 e 9 respectivamente.

$$DIT_h\% = (V_h / V_1) [\%] \quad (5)$$

Onde:

V_h – tensão harmônica de ordem h;

h – ordem harmônica individual;

V_1 – tensão fundamental medida.

$$DTT\% = (\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} (V_h^2)}) / V_1 \text{ [%]} \quad (6)$$

Onde:

h – todas as ordens harmônicas de 2 até h_{\max} ;

h_{\max} – ordem harmônica máxima, conforme classe do equipamento de medição utilizado (classe A ou S);

V_h – tensão harmônica de ordem h ;

V_1 – tensão fundamental medida.

$$DTT_p\% = (\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} (V_h^2)}) / V_1 \text{ [%]} \quad (7)$$

Onde:

h – todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3;

h_{\max} – máxima ordem harmônica par, não múltiplas de 3;

V_h – tensão harmônica de ordem h ;

V_1 – tensão fundamental medida.

$$DTT_i\% = (\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} (V_h^2)}) / V_1 \text{ [%]} \quad (8)$$

Onde:

h – todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3;

h_{\max} – máxima ordem harmônica ímpar, não múltiplas de 3;

V_h – tensão harmônica de ordem h ;

V_1 – tensão fundamental medida.

$$DTT_3\% = (\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} (V_h^2)}) / V_1 \text{ [%]} \quad (9)$$

Onde:

h – todas as ordens harmônicas múltiplas de 3;

h_{\max} – máxima ordem harmônica múltiplas de 3;

V_h – tensão harmônica de ordem h ;

V_1 – tensão fundamental medida.

Os valores limites dos indicadores das distorções harmônicas totais são obtidos com base no indicado na Tabela 2.

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

| Indicador | Tensão nominal (V_n) | | |
|-----------|---------------------------|--|---|
| | $V_n \leq 2,3 \text{ kV}$ | $2,3 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$ | $69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$ |
| DTT95% | 10,0% | 8,0% | 5,0% |
| DTTp95% | 2,5% | 2,0% | 1,0% |
| DTTi95% | 7,5% | 6,0% | 4,0% |
| DTT395% | 6,5% | 5,0% | 3,0% |

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2021)

3.1.4 Desequilíbrio de tensão

Um sistema trifásico equilibrado é definido por 3 componentes de tensão de mesmo módulo e defasados em 120° elétricos entre si. Assim o desequilíbrio de tensão ocorre quando há uma diferença entre os módulos das tensões de cada fase, ou defasagem angular distinta a nominal ou, ainda, ambas as condições simultâneas (FERREIRA FILHO, 2008).

O indicador relacionado a esse fenômeno é o FD95%, que é definido pelo valor do Fator de Desequilíbrio de Tensão – FD% que foi superado em 5% das leituras validas. O FD% pode ser obtido através da equação 10 ou 11 e os limites para o indicador FD95% apresentados na Tabela 3 (ANEEL, 2021).

$$FD\% = (V_- / V_+) * 100 [\%] \quad (10)$$

Onde:

V_- – magnitude da tensão eficaz de sequência negativa na frequência fundamental;

V_+ – magnitude da tensão eficaz de sequência positiva na frequência fundamental.

$$FD\% = 100 * (\sqrt{((1 - \sqrt{3 - 6\beta}) / (1 + \sqrt{3 - 6\beta}))}) [\%] \quad (11)$$

$$\beta = (V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4) / (V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2 + \quad (12)$$

Onde:

V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} – magnitudes das tensões eficazes de linha na frequência fundamental.

Tabela 3 – Limites para o indicador de desequilíbrio de tensão

| Indicador | Tensão nominal (V_n) | |
|-----------|---------------------------|---|
| | $V_n \leq 2,3 \text{ kV}$ | $2,3 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$ |
| FD95% | 3,0% | 2,0% |

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2021)

3.1.5 Flutuação de tensão

Fenômeno caracterizado pela cintilação e oscilação de fontes luminosas, do consumidor, ligadas a baixa tensão, que podem causar incomodo e, em certos casos, impossibilitar a realização de serviços. Essas oscilações ocorrem por conta de variações aleatórias, repetitivas ou esporádicas dos valores eficaz ou de pico na onda de tensão (ANEEL, 2021).

O método de análise apresentado pela norma caracteriza-se pela cintilação em fontes incandescentes, mas por conta da mudança de tecnologias utilizadas nas lâmpadas, novos estudos realizados apresentam problemas dessa abordagem nos sistemas elétricos modernos, assim torna-se necessário desenvolver um novo método de quantificação do fenômeno. Porém, atualmente essa quantificação é realizada com base no que é estipulado pela IEC, através de um sinal chamado de sensação instantânea de *flicker*, que se baseia na interação do sistema lâmpada/olho/cérebro (JUNIOR, 2014).

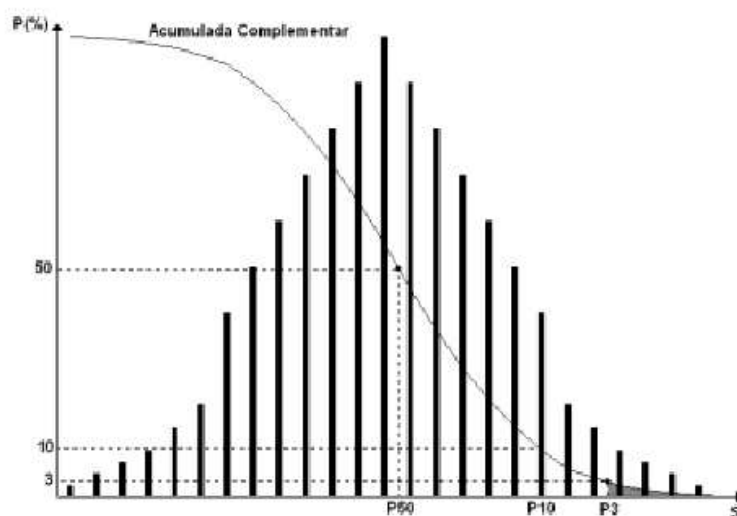
Para fins de análise são apresentados 3 indicadores para a flutuação de tensão, o P_{st} e o P_{it} representam a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados ao fenômeno num período contínuo de 10 minutos e 2 horas, respectivamente, e o $P_{st95\%}$ refere-se ao valor do indicador P_{st} que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas (ANEEL, 2021).

O valor do P_{st} é obtido através da equação 13, onde $P_{0,1}$, P_1 , P_3 , P_{10} e P_{50} correspondem ao nível de flutuação de tensão que foi ultrapassado durante uma determinada porcentagem do tempo (indicado no subscrito), obtido pela função de

distribuição acumulada complementar, como apresentado na norma IEC 61000-4-15 e representado na Figura 3, o P_{it} corresponde a um valor representativo de 12 amostras de P_{st} , e é obtido com a equação 14, e os limites referentes ao $P_{st95\%}$ são apresentados na Tabela 4 (ANEEL, 2021).

$$P_{st} = \sqrt{((0,0314 * P_{0,1}) + (0,0525 * P_1) + (0,0657 * P_3) + (0,28 * P_{10}) + (0,08 * P_{50}))} \quad (13)$$

Figura 3 – Distribuição acumulada complementar da sensação de cintilação



Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2021)

$$P_{it} = \sqrt{((1/12) * \sum_{i=3}^{12} (P_{sti}^3))} \quad (14)$$

Tabela 4 – Limites para flutuação de tensão

| Indicador | Tensão nominal (V_n) | | |
|--------------|---------------------------|--|---|
| | $V_n \leq 2,3 \text{ kV}$ | $2,3 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$ | $69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$ |
| $P_{st95\%}$ | 1,0 pu | 1,5 pu | 2,0 pu |

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2021)

3.1.6 Variação de frequência

A onda senoidal da energia elétrica, utilizada no sistema de distribuição, deve operar dentro dos limites de frequência entre 59,9 e 60,1 Hz, em condições normais e em regime permanente. Na ocorrência de perturbações é necessário garantir que

o sistema retorne para a faixa de operação entre 59,5 e 60,5 Hz, dentro de no máximo 30 segundos, para permitir que o equilíbrio do sistema seja reestabelecido (ANEEL, 2021).

Em casos de necessidade de corte de geração ou de carga com o objetivo de recuperar o equilíbrio, a frequência, não pode ser maior que 66 Hz ou inferior a 56,5 Hz, pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 segundos, acima de 63,5 ou abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 segundos e abaixo de 57,5 por no máximo 5 segundos (ANEEL, 2021).

3.1.7 Variação de tensão de curta duração

Também definidos como variações transitórias de curta duração, esses eventos são caracterizados por afundamentos ou elevações de tensão com duração de meio ciclo a alguns minutos, dependendo da norma considerada para a análise. Porém, não há normas que limitem o número de ocorrências desses eventos, pois a prevenção ou mitigação destes não são possíveis na grande maioria dos casos, como eventos climáticos ou manobras de cargas que não podem ser evitadas, ao invés disso focam em classifica-los, a fim de traçar correlações entre a sua ocorrência e o mau funcionamento de equipamentos e processos (DECKMANN, POMILIO, 2020).

Para o PRODIST um evento de variação de tensão de curta duração – VTCD, é definido por desvios significativos no valor eficaz da amplitude de tensão dentro de um intervalo de tempo de no máximo 3 minutos de duração. Com base no tempo de duração e amplitude da VTCD, os eventos são classificados no Quadro 2 (ANEEL, 2021).

Quadro 2 – Classificação das variações de tensão de curta duração - VTCD

| Classificação | Denominação | Duração da Variação | Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência |
|-------------------------------|--|--|---|
| Variação momentânea de tensão | Interrupção momentânea de tensão – IMT | Inferior ou igual a 3 segundos | Inferior a 0,1 p.u |
| | Afundamento momentâneo de tensão – AMT | Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos | Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u |
| | Elevação momentânea de tensão – EMT | Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos | Superior a 1,1 p.u |
| Variação temporária de tensão | Interrupção temporária de tensão – ITT | Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos | Inferior a 0,1 p.u |
| | Afundamento temporária de tensão – ATT | Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos | Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u |
| | Elevação temporária de tensão – ETT | Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos | Superior a 1,1 p.u |

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2021)

Os indicadores para avaliar um evento de VTCD são o V_e , que indica a amplitude da variação, o Δ_{te} , que indica o tempo de duração, o f_e , que indica a frequência ou quantidade de ocorrências. O registro dos eventos deve ser realizado seguindo as indicações do Quadro 3, preenchendo o número de ocorrências relacionadas a cada amplitude e duração (ANEEL, 2021).

Quadro 3 – Estratificação das VTCD com base nos níveis de sensibilidade das diversas cargas

| Amplitude (pu) | Duração | | | | | | |
|-----------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | [16,67ms – 100 ms] | [100ms – 300 ms] | [300ms – 600 ms] | [600ms – 1 seg] | [1 seg – 3 seg] | [3 seg – 1 min] | [1 min – 3 min] |
| > 1,15 | REGIÃO H | | | REGIÃO I | | | |
| (1,10 – 1,15) | REGIÃO H | | | REGIÃO I | | | |
| (0,85 – 0,90) | REGIÃO A | | | REGIÃO G | | | |
| (0,80 – 0,85) | REGIÃO A | | | REGIÃO G | | | |
| (0,70 – 0,80) | REGIÃO B | REGIÃO D | | REGIÃO G | | | |
| (0,60 – 0,70) | REGIÃO B | REGIÃO D | | REGIÃO G | | | |
| (0,50 – 0,60) | REGIÃO C | REGIÃO D | | REGIÃO G | | | |
| (0,40 – 0,50) | REGIÃO C | REGIÃO D | | REGIÃO G | | | |
| (0,30 – 0,40) | REGIÃO E | | | REGIÃO F | | | |
| (0,20 – 0,30) | REGIÃO E | | | REGIÃO F | | | |
| (0,10 – 0,20) | REGIÃO E | | | REGIÃO F | | | |
| ≤ 0,10 | REGIÃO E | | | REGIÃO F | | | |

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2021)

O Quadro 3 está dividido em nove regiões de sensibilidade, a fim de relacionar a importância de cada evento com os níveis de sensibilidade de diferentes tipos de carga presentes no sistema. Além disso, ela é usada para definir o fator de ponderação a ser utilizado, juntamente com o fator de impacto base, ambos indicados na Tabela 5, para realizar o cálculo do fator de impacto, indicador responsável por caracterizar a severidade da incidência do evento de VTCD, como mostra a equação 14 (ANEEL, 2021).

$$FI = (\sum_{i=A}^I (f_{ei} * f_{pondi})) / FI_{BASE} \quad (14)$$

Tabela 5 – Fator de ponderação e fator de impacto base de acordo com a tensão nominal (V_n)

| Região de sensibilidade | Fator de ponderação (fpond) | Fator de impacto base (FI_{BASE}) | |
|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| | | 2,3 kV < V_n < 69 kV | 69 kV ≤ V_n < 230kV |
| A | 0,00 | | |
| B | 0,04 | | |
| C | 0,07 | | |
| D | 0,15 | | |
| E | 0,25 | 2,13 | 1,42 |
| F | 0,36 | | |
| G | 0,07 | | |
| H | 0,02 | | |
| I | 0,04 | | |

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2021)

Durante o planejamento de um sistema de distribuição, é utilizado um valor de referência para realizar a comparação do indicador FI, para os casos de média e alta tensão utiliza-se 1,0 pu, apurados com medição apropriada em um período de 30 dias consecutivos. Para casos de sistema de baixa tensão não são definidos valores de referência (ANEEL, 2021).

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O registrador e analisador da qualidade da energia elétrica PowerNET P-600 G4 da IMS Power Quality foi o equipamento utilizado para a realização das medições.

O equipamento é recomendado para a geração de relatórios de qualidade de energia com base no módulo 8 do PRODIST, estudos de eficiência energética e medição de energia consumida e gerada em sistemas On Grid. Para isso o analisador faz a medição e registro de várias grandezas elétricas (IMS, 2020), sendo elas:

- Tensão e corrente True RMS;
- Potências e demandas de potência ativa, reativa e aparente;
- Fator de potência verdadeiro;
- Frequência instantânea;
- Energia ativa, reativa e aparente direta e reversa;
- Energia ativa, reativa e aparente líquida (direta - reversa);
- Energia ativa, reativa e aparente bruta (direta + reversa);
- Componentes harmônicos individuais até 41ª ordem;
- Distorção harmônica total (THD), par (THDE), ímpar (THDO) e de componentes múltiplos de 3 (THD3);
- Taxas de desequilíbrio de sequência zero e negativa de tensão e corrente;
- Registro em que o evento de variação de tensão ocorreu;
- Característica do evento (elevação, afundamento ou interrupção);
- Classificação do evento (momentâneo, temporário ou de longa duração);
- Canal em que ocorreu o evento.

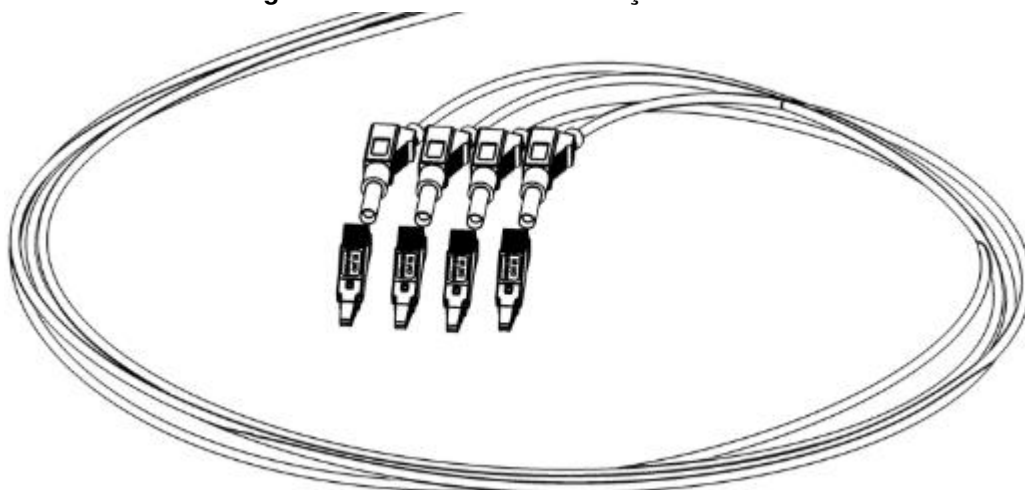
As seguintes indicações estão presentes no manual de instruções do equipamento desenvolvido pela IMS (2020), alertando sobre aspectos que deverão ser atendidos antes de se iniciar as medições:

- Tensão máxima de alimentação de 300 Vca;
- Faixa de medição de tensão direta a 4 fios entre 70 a 300 Vca;

- Faixa de medição de corrente de 10 a 1000 A, para transdutor flexível de 1000 A e;
- A ligação deve seguir a sequência de fase do sistema, caso contrário a sequência de fase ficara invertida e o equipamento realizara a medição de forma errada.

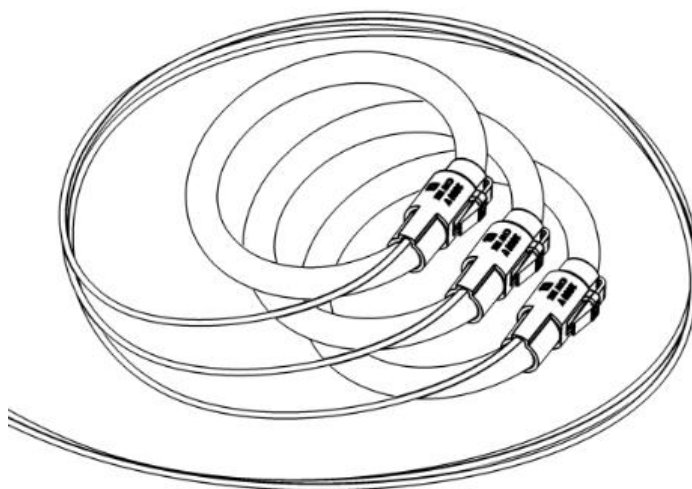
Na Figura 4 está representado as 4 garras do tipo jacaré utilizadas para a conexão dos pontos de medição de tensão e na Figura 5 estão representados os 3 sensores de corrente flexíveis, também conhecidos como sensores Rugowski, que possuem setas indicando o sentido da corrente (IMS, 2020).

Figura 4 – Conectores de medição de tensão



Fonte: IMS (2020)

Figura 5 – Sensores de corrente Rugowski

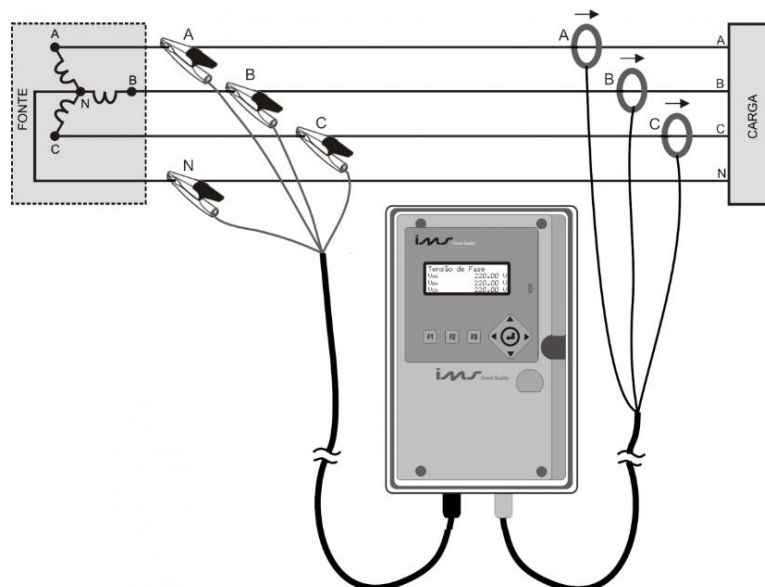


Fonte: IMS (2020)

O PowerNET P-600 possui a capacidade de ser instalado em sistemas elétricos monofásico, bifásico sem neutro, bifásico com neutro, estrela a 4 fios e

delta a 3 fios. Para este trabalho foi utilizado o esquema de estrela a 4 fios, e o esquema de ligação dos conectores de medição está representado na Figura 6, enquanto que para a alimentação do aparelho basta que os terminais de alimentação, FF e FN, estejam conectados em uma fonte de tensão mínima de funcionamento (IMS, 2020).

Figura 6 – Conexão do PowerNET P-600 G4 (Estrela a 4 fios)



Fonte: IMS (2020)

Para a realização das medições foi escolhido o bloco de laboratórios de computação, referente majoritariamente ao curso de ciências da computação. Essa escolha foi feita pois se trata de uma instalação com diversos computadores, equipamentos que possuem fontes de alimentação monofásica, o que possibilitaria uma maior ocorrência de ruídos e distúrbios nas ondas de tensão e corrente. O equipamento foi instalado no quadro da subestação, na saída referente ao bloco selecionado, onde a cada 10 minutos o aparelho gravava, em sua memória interna, o valor médio que as grandezas selecionadas apresentavam, dentro desse período de tempo.

Para a coleta e análise dos dados utilizou-se também o software PowerMANAGER desktop, que acompanha o equipamento permitindo fazer a leitura das medições, descarga de dados registrados na memória do equipamento e a geração de relatórios (IMS, 2020).

5 RESULTADOS OBTIDOS

Com o PowerNET P-600 G4 instalado na saída do quadro referente ao bloco designado para o estudo, foram realizados 3 ciclos de medição. Para os 3 ciclos foram determinados que as medições coletassem as informações de tensão, corrente, potência, frequência, fator de potência e harmônicas presentes nas 3 fases da instalação, assim, com o auxílio do PowerMANAGER desktop, foram gerados gráficos com comportamento dessas grandezas ao decorrer do tempo, sendo estes avaliados de acordo com cada ciclo de medição, nos tópicos a seguir.

5.1 Ciclo 1

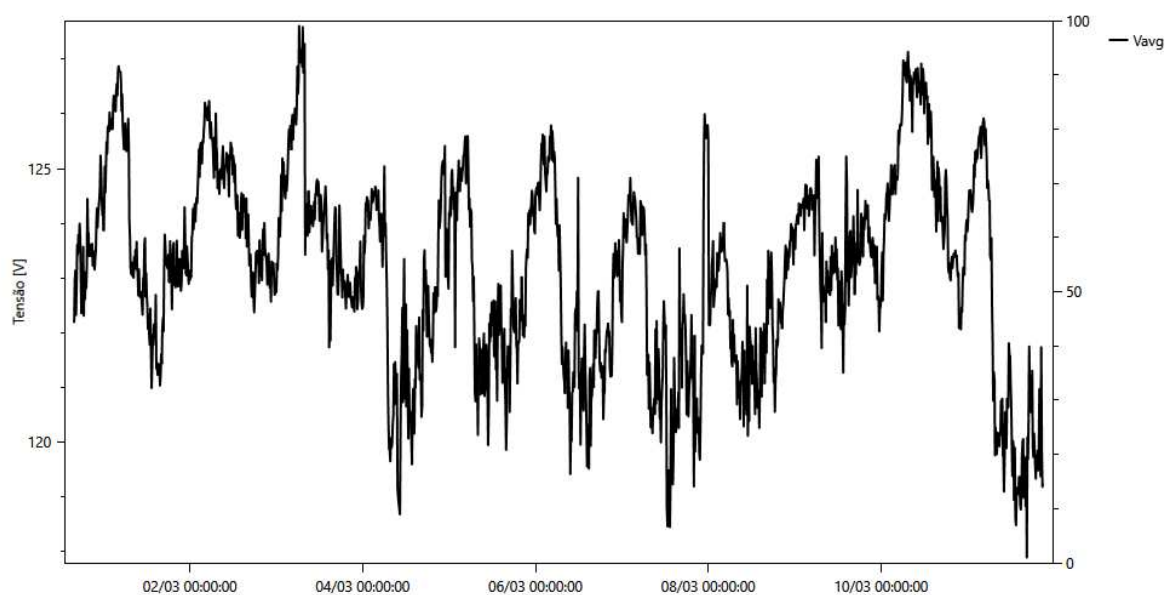
O primeiro ciclo de medição teve início no dia 29 de fevereiro de 2024 as 15:50 horas e termino no dia 11 de março de 2024 as 21:00 horas, tendo um total de 1616 registros.

5.1.1 Variação de tensão em regime permanente

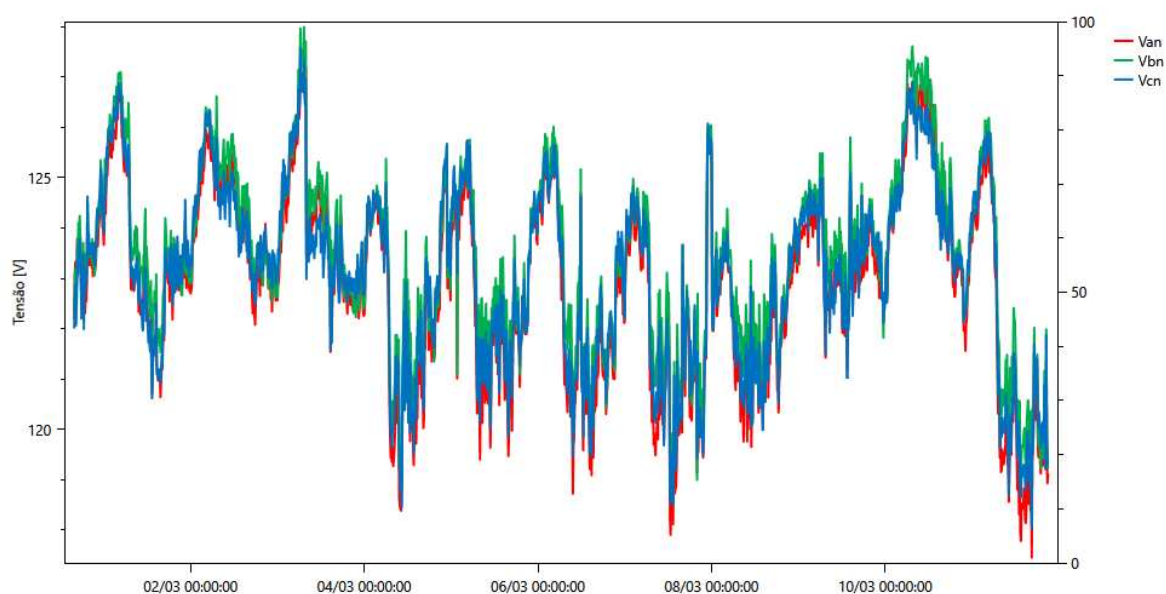
Os registros de tensão em regime permanente obtidos através do medidor estão dispostos nos Gráficos 1, 2, 3 e 4, apresentando respectivamente a tensão média de fase, as tensões individuais de fase, tensão média de linha e as tensões individuais de linha.

Os picos de medição apresentados no Gráfico 1, apresentam como o valor máximo o registro feito no dia 03 de março as 06:20 horas, com 127,611 V, e como valor mínimo o registro do dia 11 de março as 16:30 horas, com 117,886 V.

O eixo direito do Gráfico 1, de 0 a 100, não apresenta indicação de grandeza e unidade de medida, sendo esse apenas um eixo referencia que o software deixava fixo em determinados gráficos, o mesmo é desconsiderado para as análises. Da mesma forma, o eixo em questão pode ser desconsiderado para os demais gráficos a serem apresentados.

Gráfico 1 – Tensão média de fase no ciclo 1

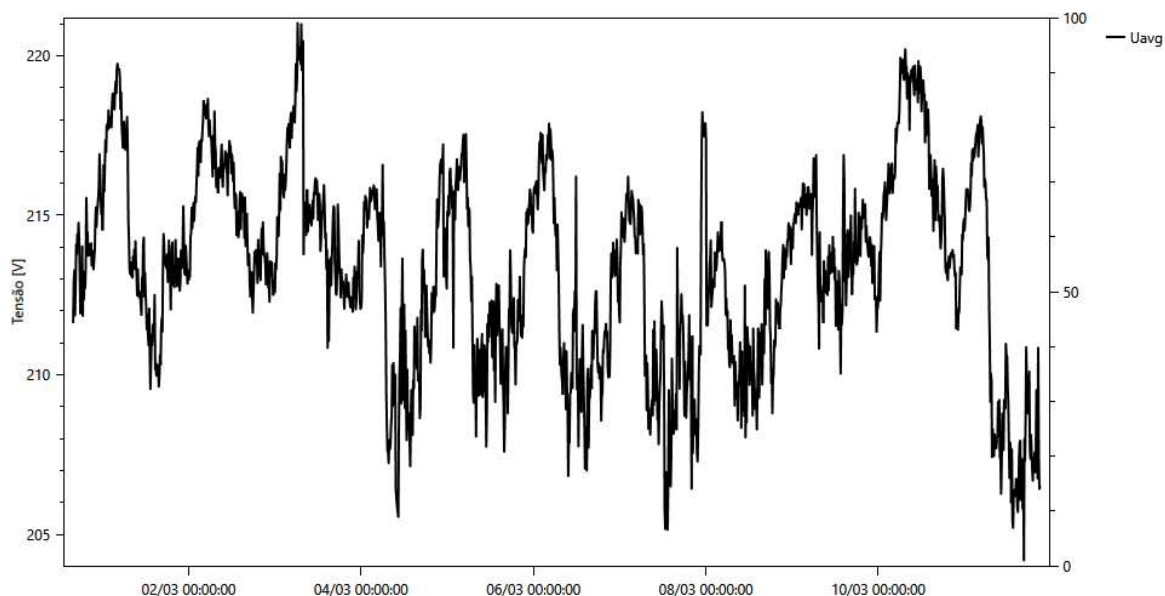
Fonte: Autoria Própria (2024)

Gráfico 2 – Tensões individuais de fase no ciclo 1

Fonte: Autoria Própria (2024)

No Gráfico 2 mostra-se que o registro máximo das fases A, B e C foram de 127,423 V, 127,998 V e 127,573 V, respectivamente, sendo que os registros da fase A e B foram obtidos no dia 03 de março as 07:20 horas, enquanto o da fase C foi obtido as 06:20 horas do mesmo dia. Para o mínimo foram obtidos os valores de 117,453 V, 118,156 V e 118,049 V para as fases A, B e C respectivamente, sendo todas as medições realizadas no dia 11 de março as 16:30 horas.

Gráfico 3 – Tensão média de linha no ciclo 1

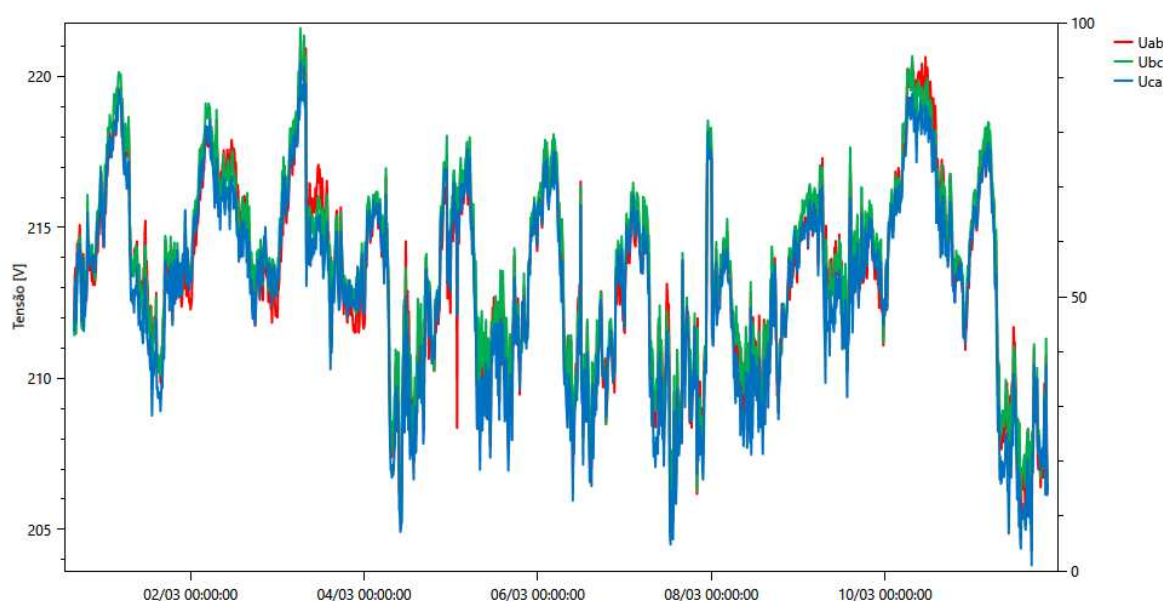


Fonte: Autoria Própria (2024)

Para os níveis de tensão média de linha, os registros máximo e mínimo foram indicados no mesmo momento que os da tensão média de fase, com valores de 221,028 V e 204,182 V, como apresentado no Gráfico 3.

Já as tensões individuais de linha, apresentadas no Gráfico 4, U_{ab} , U_{bc} e U_{ca} apresentaram valores máximos de 221,262 V, 221,609 V e 220,493 V, respectivamente, onde U_{bc} e U_{ca} máximos foram registrados no dia 03 de março às 06:20 horas e U_{ab} máximo às 07:20 horas do mesmo dia, e apresentaram valores mínimos de 204,308 V, 204,433 V e 203,805 V, respectivos a mesma ordem adotada para os valores máximos, em que todos os valores também foram registrados no dia 11 de março às 16:30 horas.

Gráfico 4 – Tensões individuais de linha no ciclo 1



Fonte: Autoria Própria (2024)

Tendo em vista que nenhum dos valores máximos e mínimos ultrapassou os valores limites apresentados na Tabela 5 para serem situados nas faixas críticas ou precárias, determina-se que 100% das medições realizadas estão situadas na faixa adequada de tensão em regime permanente, durante esse ciclo de medição.

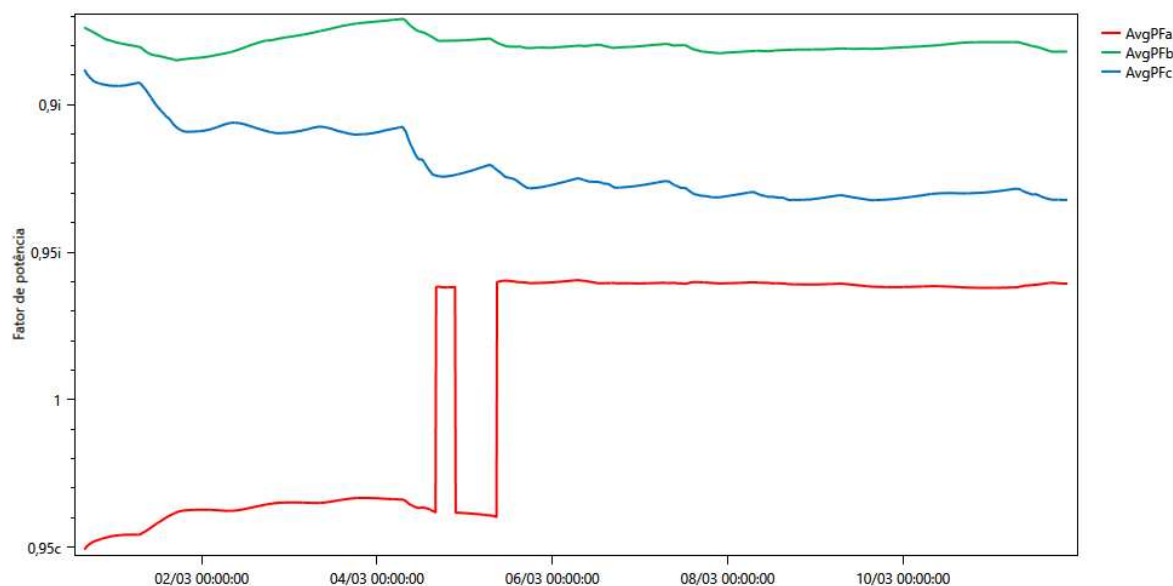
5.1.2 Fator de potência

Tendo como base para a análise de que o fator de potência não deve ser menor que os valores de 0,92, tanto indutivo como capacitivo, percebe-se pelos resultados apresentados no Gráfico 5 que a fase A esteve dentro da faixa adequada em todos os registros, que a fase B apresentou um valor menor que 0,92 indutivo em todas as medições e que a fase C iniciou abaixo de 0,92 indutivo, mas após às 13:00 horas do dia 04 de março se situou acima desse valor até o final do ciclo de medição.

No Gráfico 5 também é perceptível observar que houve um comportamento anormal, em que o fator de potência da fase A saiu de valores próximos de 0,94 capacitivo para próximos de 0,94 indutivos, em um curto intervalo de tempo, e oscilou entre esses 2 valores por mais 2 vezes, finalizando o ciclo com o fator de potência indutivo. As causas desse comportamento não puderam ser identificadas,

sendo erro de operação do banco de capacitores ou erro de medição do aparelho fenômenos que podem justificar as medidas apresentadas.

Gráfico 5 – Fator de potência por fase no ciclo 1



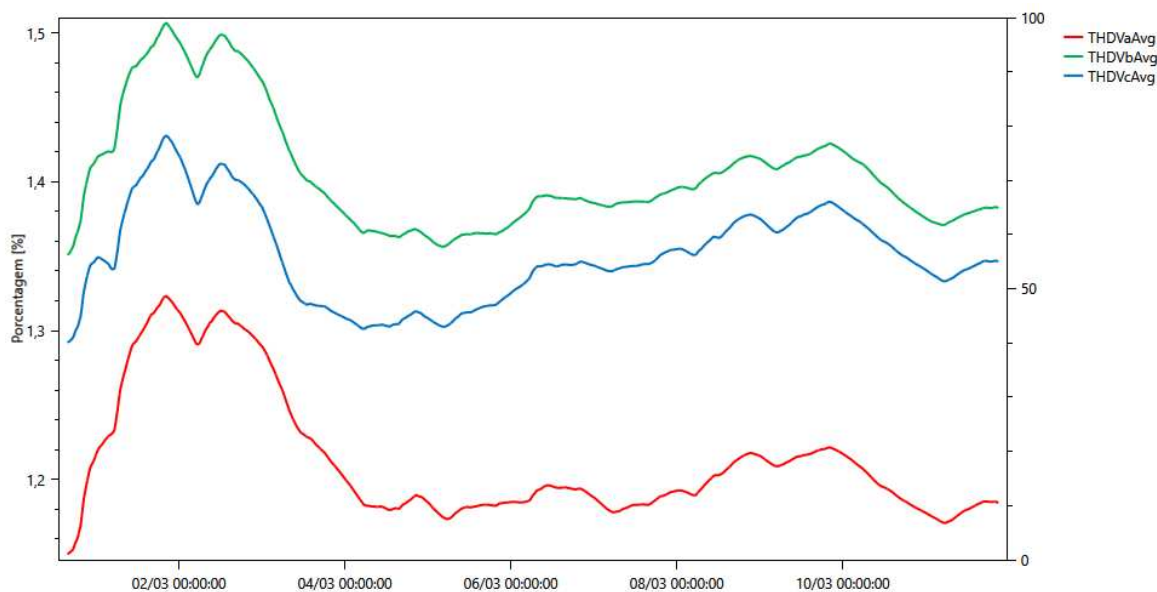
Fonte: Autoria Própria (2024)

5.1.3 Distorções harmônicas

Para a análise de distorções harmônicas de tensão, os dados coletados foram os indicadores THDV, THDoV, THDeV e THD3V, nos Gráficos 6, 7, 8 e 9, respectivamente. Esses indicadores podem ser relacionados aos apresentados no quadro 1, sendo THDV a mesma medida para DTT% e THD3V a mesma para DTT₃%, porém THDoV e THDeV não desconsideram as distorções de ordem múltiplas de 3, como se pede no PRODIST com relação as DTTi% e DTTp%, assim as análises feitas a partir desses indicadores podem não ser suficientes para a determinação da qualidade de energia através dos padrões nacionais, a depender do caso e dos valores apresentados. Esses pontos também são aplicados aos 2 ciclos de medição seguintes.

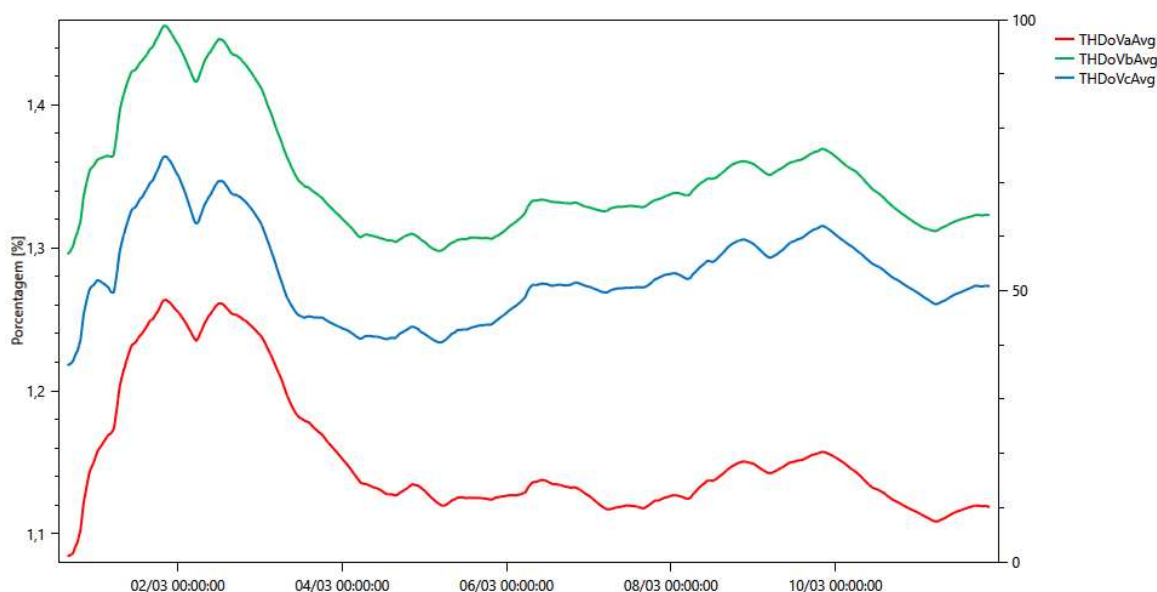
No Gráfico 6 observa-se que as maiores distorções totais de tensão para cada fase foram de 1,323% na fase A, 1,507% na fase B e 1,431% na fase C, todos registrados no dia 01 de março as 20:20 horas. Esses resultados apresentam que nenhuma das medidas foram superiores a 5%, assim o indicador DTT95%, citado no quadro 1, é nulo para todas as fases.

Gráfico 6 – Distorções harmônicas totais de tensão no ciclo 1



Fonte: Aatoria Própria (2024)

Gráfico 7 – Distorções harmônicas totais de tensão ímpares no ciclo 1



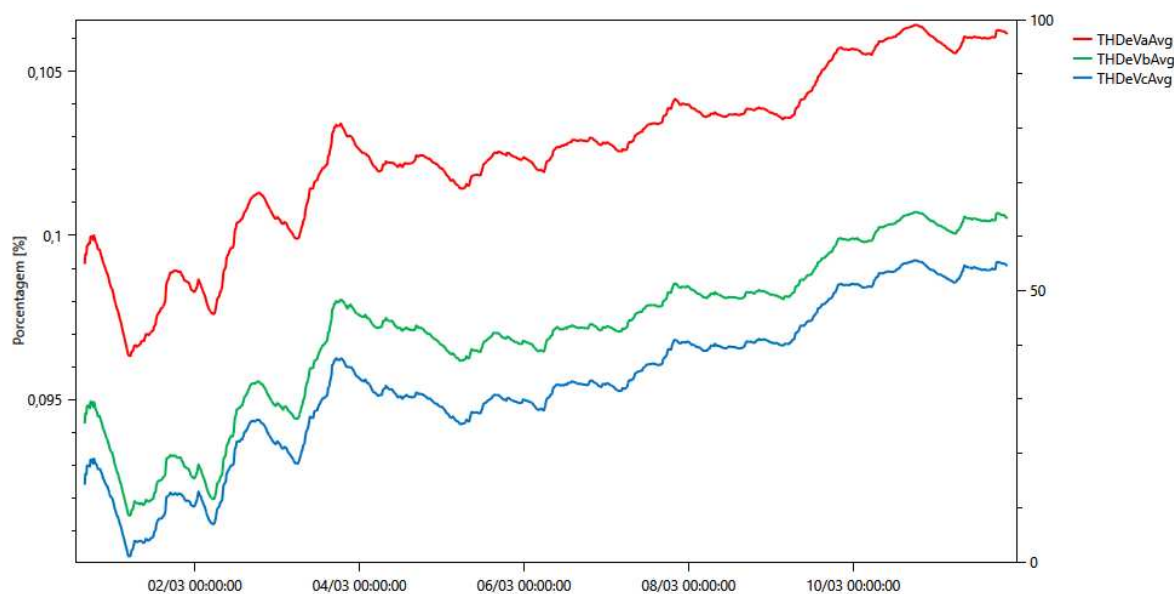
Fonte: Aatoria Própria (2024)

Observando os Gráficos 7 e 8, percebe-se que as distorções ímpares foram muito mais impactantes para o sistema em comparação com as pares, onde os valores máximos foram de 1,264% na fase A, 1,456% na fase B e 1,365% na fase C, para as componentes ímpares, todos também obtidos no dia 01 de março as 20:20 horas, e de 0,106% na fase A, 0,101% na fase B e 0,099% na fase C, para as

componentes pares, onde todos os picos foram registrados no dia 10 de março as 18:00 horas.

Mesmo não desconsiderando as ordens múltiplas de 3, todos os indicadores THDo e THDe não ultrapassaram a marca de 5% em nenhuma das medições, assim pode-se afirmar que os indicadores DTT_{i95%} e DTT_{p95%} são nulos.

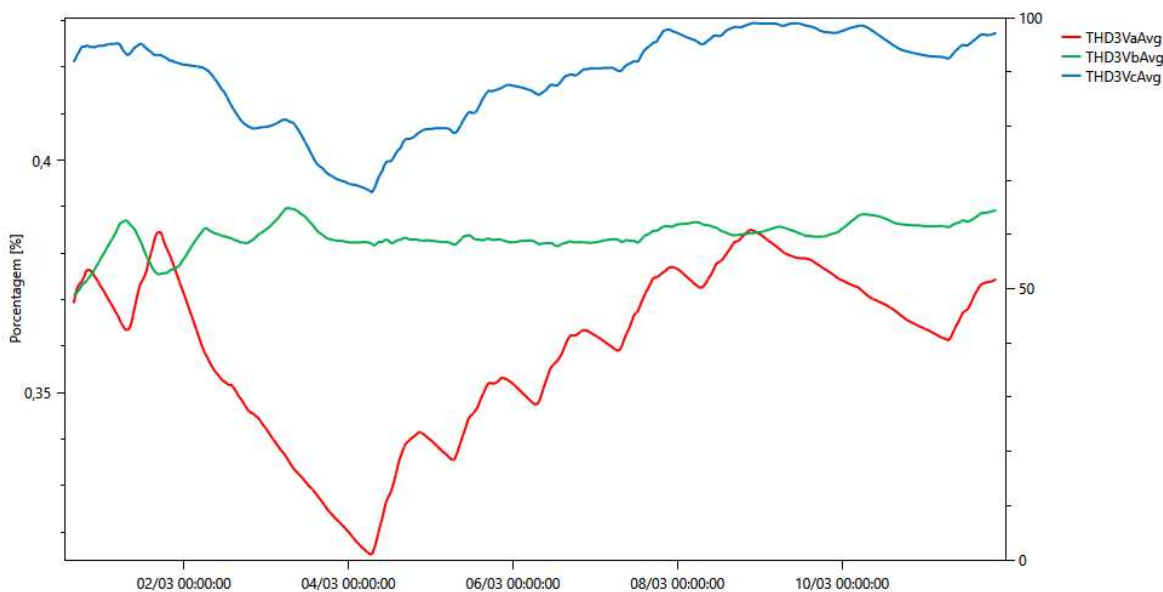
Gráfico 8 – Distorções harmônicas totais de tensão pares no ciclo 1



Fonte: Autoria Própria (2024)

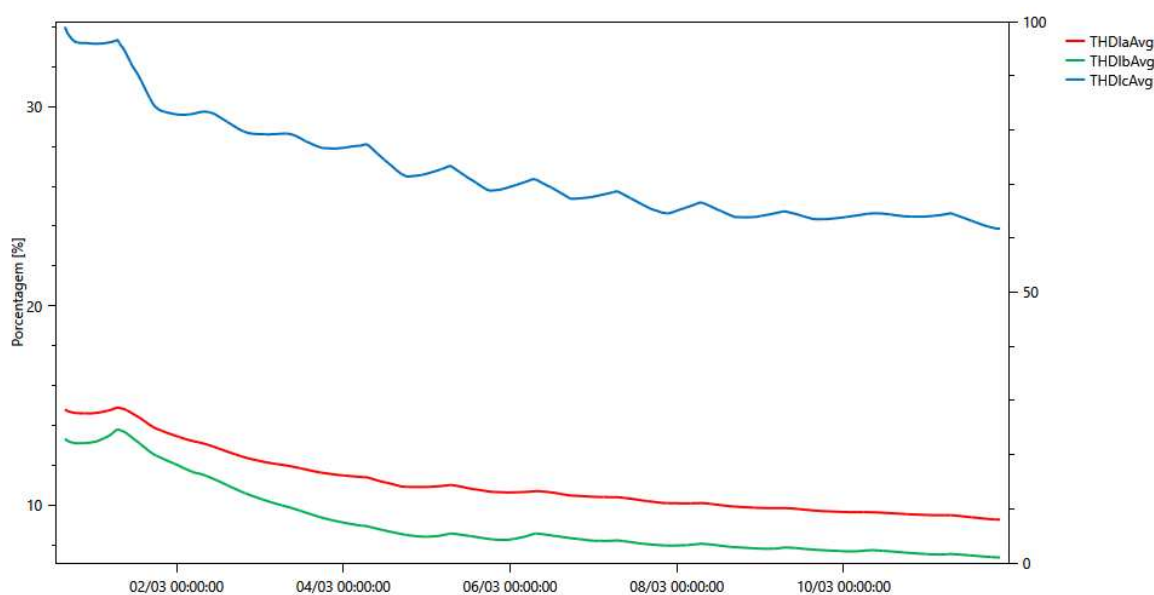
Para as componentes de ordem múltiplas de 3 temos que os valores máximos registrados são de 0,385% na fase A, 0,390% na fase B e 0,430% na fase C, sendo estes obtidos no dia 08 de março as 21:20 horas, no dia 03 de março as 06:30 horas e no dia 08 de março as 22:10 horas, respectivamente, como indica o Gráfico 9. Como apresentado nos demais casos, o indicador DTT_{395%} também apresentou valor nulo.

Com a nulidade de todos os indicadores de distorções harmônicas de tensão pode-se indicar que as ondas de tensão obtidas nas medições desse ciclo estão de acordo com as requisições da ANEEL.

Gráfico 9 – Distorções harmônicas totais de tensão múltiplas de 3 no ciclo 1

Fonte: Aatoria Própria (2024)

As harmônicas de corrente são citadas no modulo 8 do PRODIST juntamente com as harmônicas de tensão, porém não são definidos indicadores e valores que determinem a qualidade desse fenômeno, assim os seus valores de distorção estão apresentados, mas sem possibilitar a conclusão perante a norma usada como base.

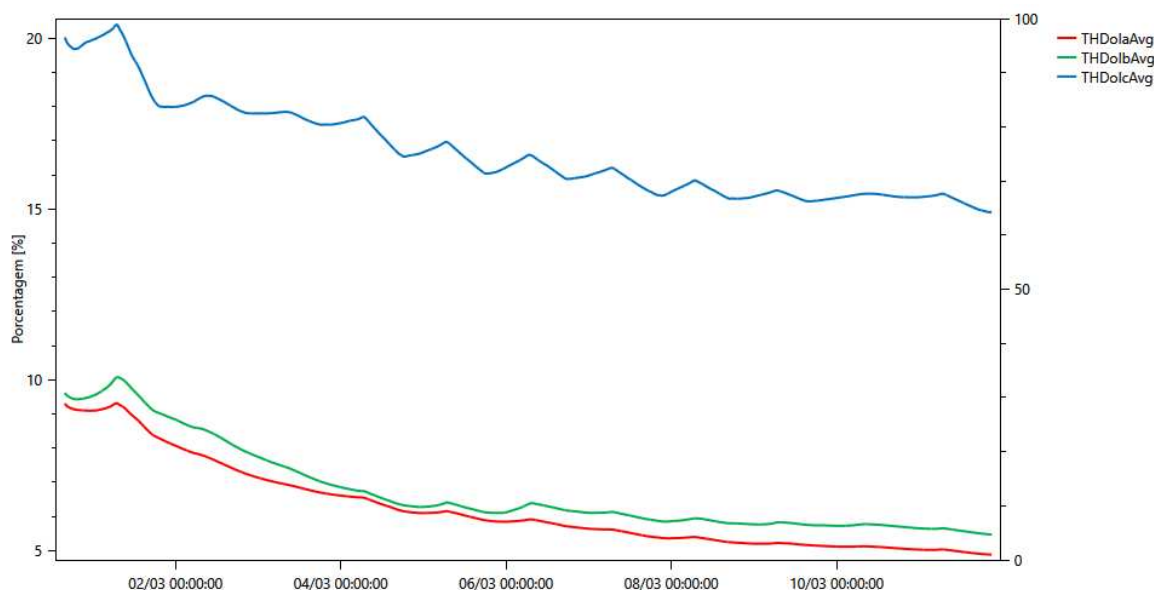
Gráfico 10 – Distorções harmônicas totais de corrente no ciclo 1

Fonte: Aatoria Própria (2024)

No gráfico 10 observa-se que houve um comportamento de queda do valor da distorção total, onde a fase A inicia o ciclo com um valor de 14,808%, atinge um pico

de 14,909% no dia 01 de março as 07:00 horas, e atinge o menor valor registrado na última medição do ciclo com 9,281%, a fase B apresenta um comportamento semelhante, começando com 13,336% atingindo o pico de 13,818% no mesmo momento que o da fase A e encerrando com 7,378%, como o menor valor apresentado, e por último a fase C apresentou seu valor máximo na primeira medição e seu mínimo na última, sendo eles 34,001% e 23,885% respectivamente.

Gráfico 11 – Distorções harmônicas totais de corrente ímpares no ciclo 1

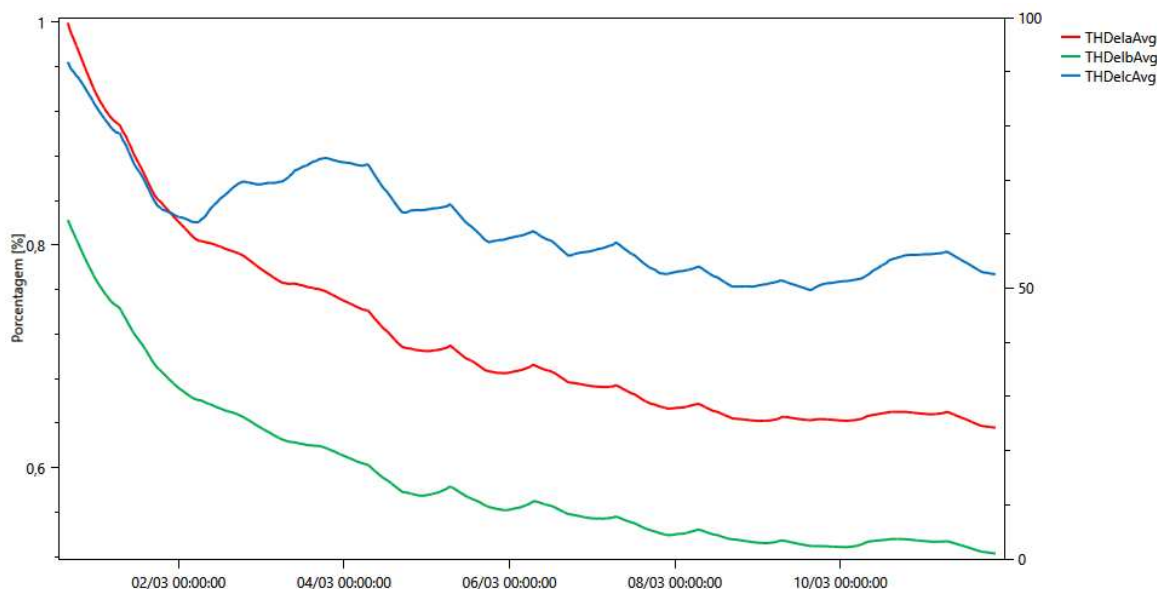


Fonte: Autoria Própria (2024)

No Gráfico 11, tem-se que as fases A, B e C iniciaram com os valores de distorções totais ímpares de 9,307%, 9,614% e 20,029% respectivamente, do mesmo modo apresentaram os valores máximos de 9,322%, 10,101% e 20,422%, todos no dia 01 de março as 07:00 horas, e se encerrou a medição com os valores mínimos de 4,887%, 5,475% e 14,917%, respectivamente.

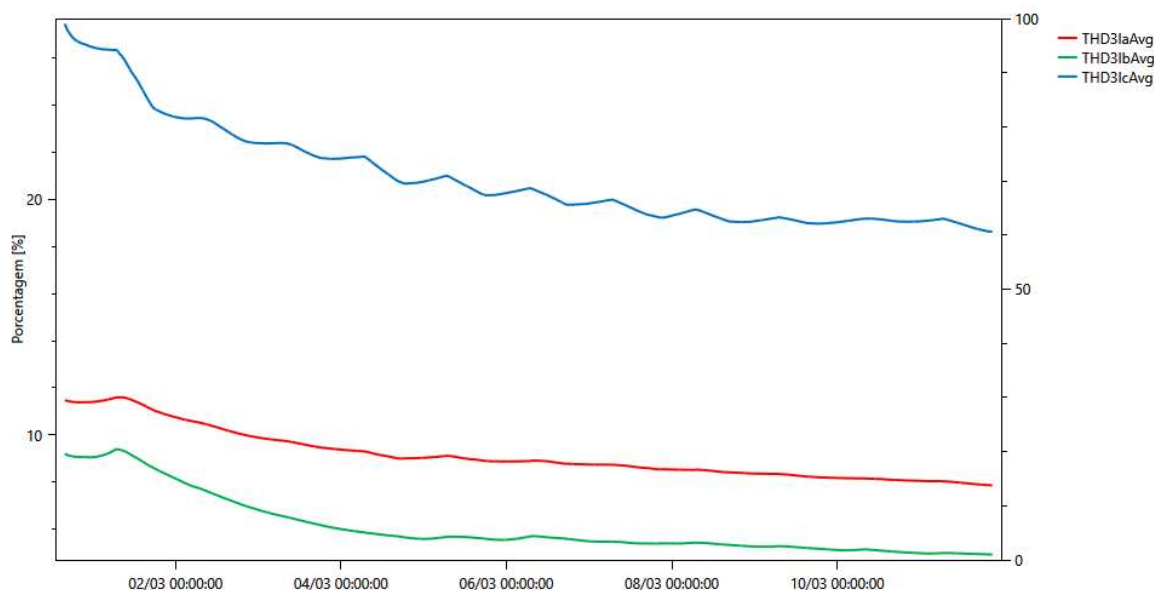
Para a distorção das componentes pares, pode-se observar no gráfico 12 que as 3 fases apresentaram o maior valor na primeira medição com 0,999% para a fase A, 0,823% para a fase B e 0,964% para a fase C, e terminaram com 0,636% para a fase A, 0,523% para a fase B e 0,774% para a fase C, sendo essa o menor valor apresentado pelas fases A e B durante o ciclo, enquanto que a fase C apresentou o valor mínimo de 0,759% no dia 09 de março as 15:20 horas.

Gráfico 12 – Distorções harmônicas totais de corrente pares no ciclo 1



Fonte: Aatoria Própria (2024)

Gráfico 13 – Distorções harmônicas totais de corrente múltiplas de 3 no ciclo 1



Fonte: Aatoria Própria (2024)

As distorções de corrente múltiplas de 3, representadas no Gráfico 13, da mesma forma que as distorções totais de corrente, apresentaram um comportamento em que a fase A inicia com 11,473%, atinge o máximo de 11,604% no dia 01 de março as 07:20 horas e encerra a medição apresentando o valor mínimo de 7,864%, a fase B inicia com 9,206%, atinge o máximo de 9,399% no dia 01 de março as 07:00 horas e encerra a medição apresentando o valor mínimo de

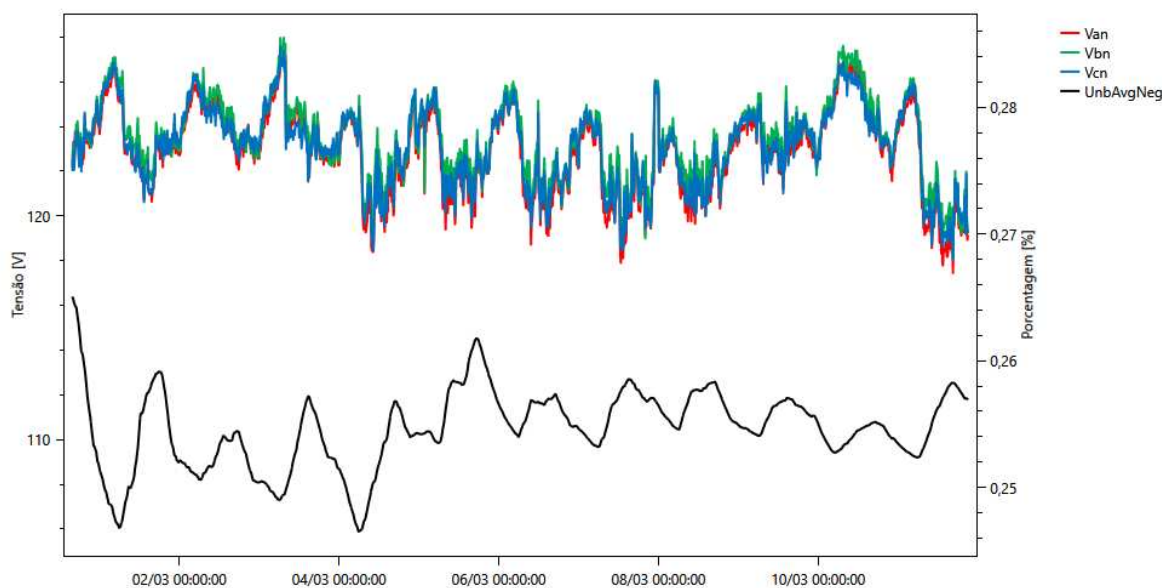
4,919%, já a fase C se inicia em seu máximo com um valor de 27,459% e se encerra com o valor mínimo de 18,638%.

Assim como nas distorções de tensão, nas distorções de corrente as componentes ímpares apresentaram uma maior relevância para o total que as correntes pares, mas em relação as distorções múltiplas de 3, o seu impacto foi mais significativo nas ondas de corrente do que nas de tensão. Outro ponto a ser apontado é que os valores de distorção apresentados para as correntes estão em uma escala consideravelmente maior que as de tensão.

5.1.4 Desequilíbrio de tensão

Para a análise de desequilíbrio de tensão, o Gráfico 14 apresenta em seu eixo direito, referente a linha em preto, a porcentagem de desequilíbrio entre as 3 fases, além dos valores das componentes de tensão de fase, referentes ao eixo esquerdo.

Gráfico 14 – Desequilíbrio de tensão no ciclo 1



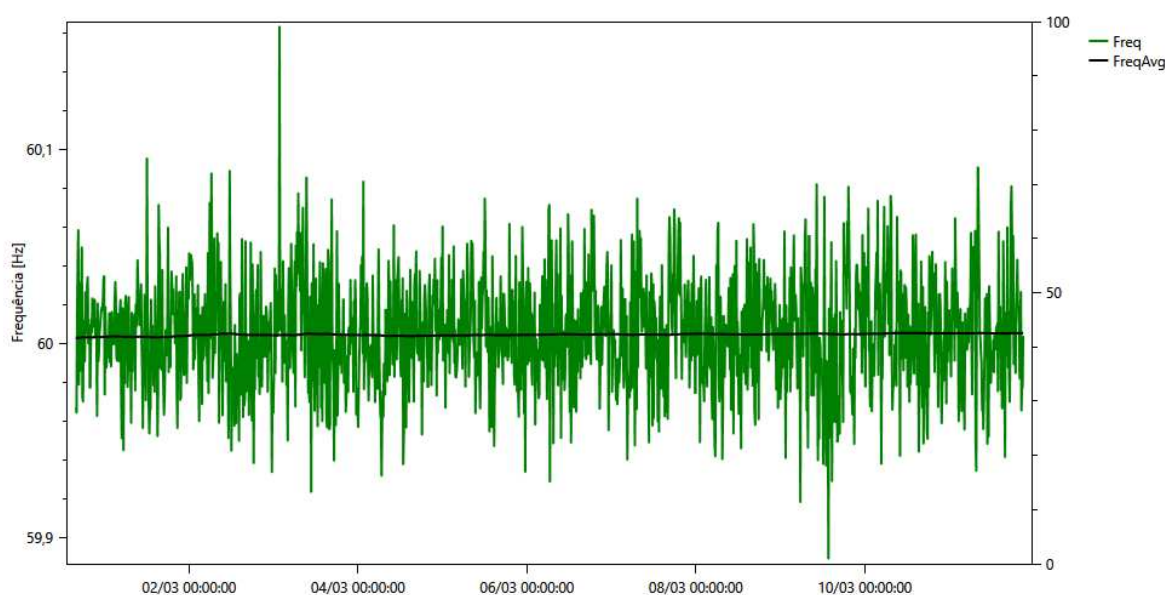
Fonte: Autoria Própria (2024)

O maior valor de desequilíbrio apresentado no Gráfico 14 foi de 0,265%, sendo esse registro obtido na primeira medição realizada, ficando bem abaixo do valor de 5% para se considerar um registro do indicador FD95%, assim o indicador em questão apresentou um valor nulo.

3.1.5 Variação de frequência

O comportamento da frequência no ponto de medição está registrado no Gráfico 15, onde pode-se observar que o maior valor obtido foi de 60,163 Hz e que o menor foi de 59,889 Hz, registrados no dia 03 de março as 01:40 horas e no dia 09 de março as 13:40 horas, respectivamente.

Gráfico 15 – Frequência no ciclo 1



Fonte: Autoria Própria (2024)

Com as faixas de normalidade da frequência sendo de 60,1 Hz e 59,9 Hz, como apresentado no item 3.1.2, é possível definir que tanto para o limite superior quanto o inferior, apenas os valores máximos e mínimos ultrapassaram os valores determinados, e tendo que os registros são medias dos valores registrados nos 10 minutos anteriores, não se pode afirmar a amplitude dessa variação com relação às outras análises requeridas pela norma, em que as frequências devem retornar a faixa nominal dentro de determinadas faixas de tempo iguais ou inferiores a 30 segundos. Apesar disso, cabe ressaltar que o registro em questão não ultrapassa 60,2 Hz ou 59,8 Hz, e que a frequência média no tempo, representada pela componente indicada pela cor preta no Gráfico 15, apresenta valores sempre muito próximos a 60 Hz.

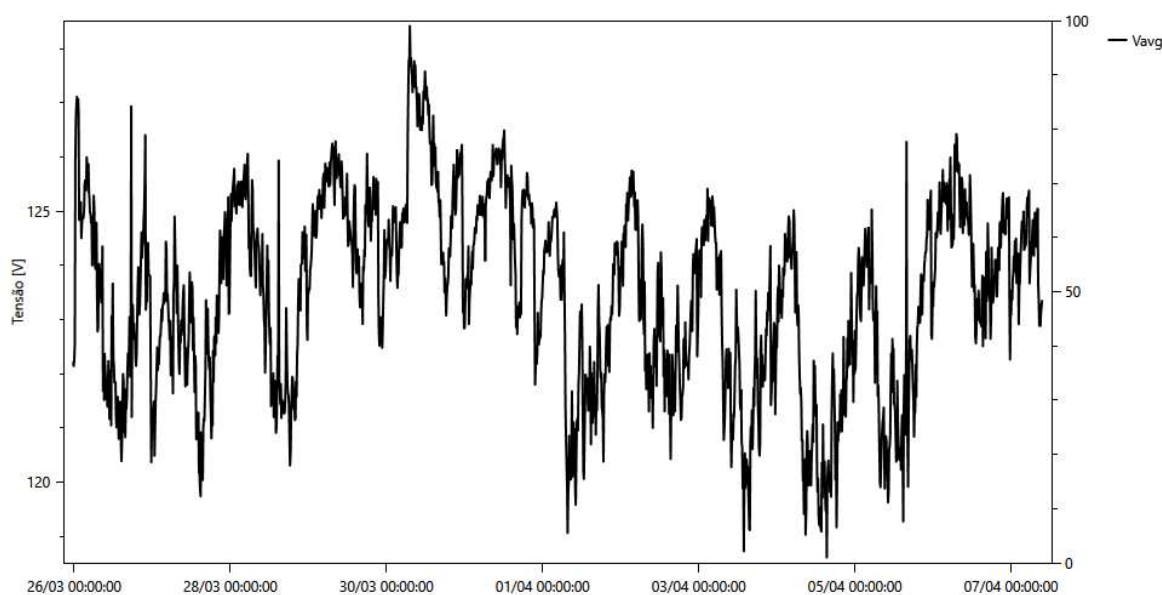
5.2 Ciclo 2

O segundo ciclo de medição teve início no dia 25 de março de 2024 as 23:40 horas e terminou no dia 07 de abril de 2024 as 09:30 horas, tendo um total de 1788 registros.

5.2.1 Variação de tensão em regime permanente

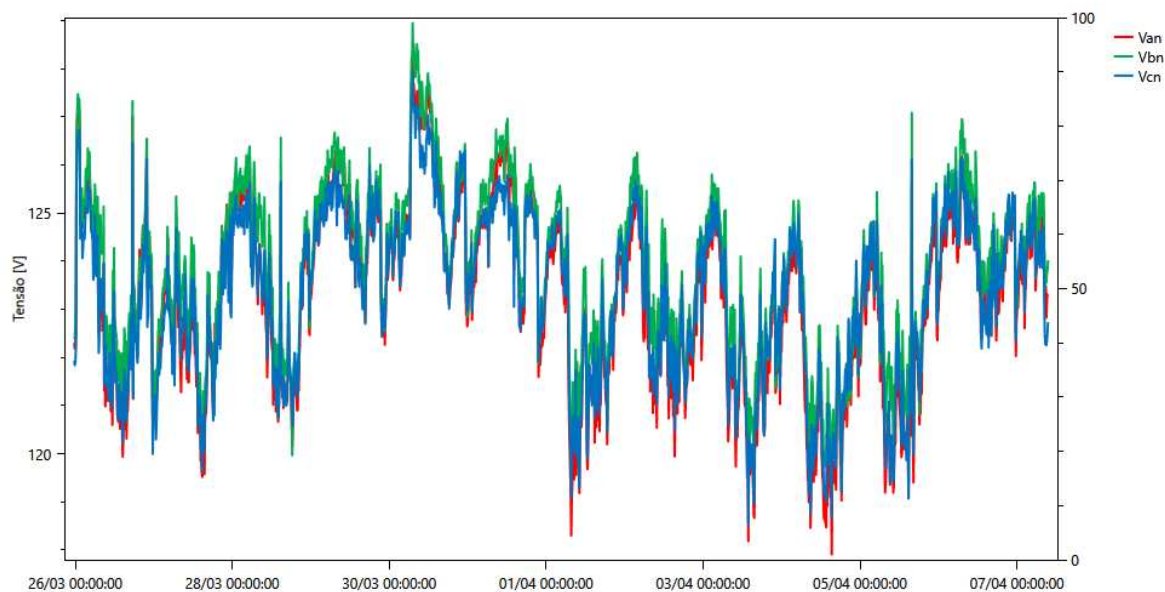
Os valores de tensão média de fase, desse ciclo, estão indicados no Gráfico 16, onde o valor máximo foi de 128,419 V, registrado no dia 30 de março as 07:10 horas, e o valor mínimo de 118,610 V, registrado no dia 04 de abril as 15:20 horas.

Gráfico 16 – Tensão média de fase no ciclo 2

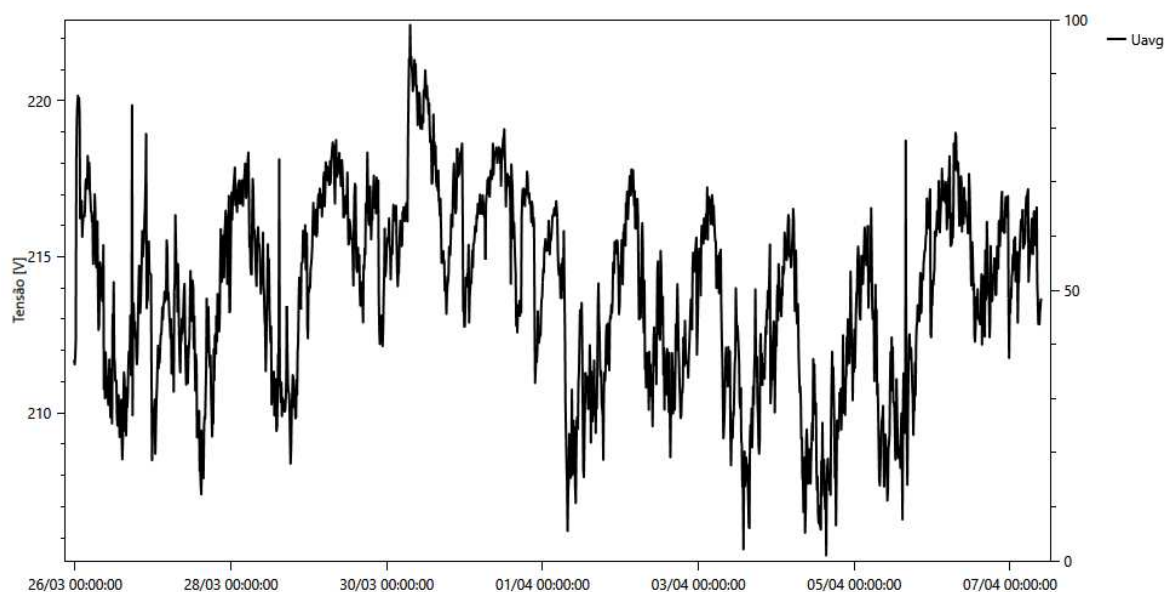


Fonte: Autoria Própria (2024)

Para as componentes individuais de fase foi observado que os valores máximos foram de 128,368 V para a fase A, 128,955 V para a fase B e 127,935 V para a fase C, onde as 3 medições foram registradas no mesmo momento que o máximo da tensão média de fase, como mostra o Gráfico 17, e que os valores mínimos foram de 117,909 V para a fase A, 119,243 V para a fase B e 118,529 V para a fase C, onde, para as fases A e B, o registro também ocorreu no mesmo momento que o mínimo da tensão média de fase, já a fase C apresentou essa medida no dia 03 de abril as 13:50 horas.

Gráfico 17 – Tensões individuais de fase no ciclo 2

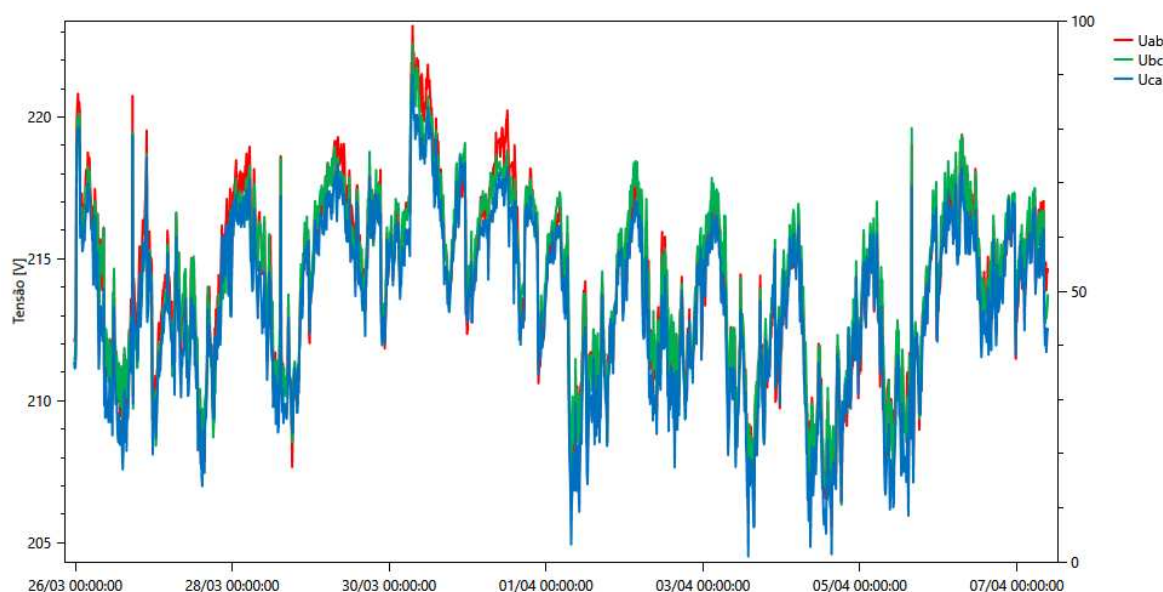
Fonte: Autoria Própria (2024)

Gráfico 18 – Tensão média de linha no ciclo 2

Fonte: Autoria Própria (2024)

Assim como no ciclo 1 os valores máximo e mínimo das tensões medias de linha foram registrados no mesmo momento que os de fase, citados anteriormente, apresentando valores de 222,429 V e 205,436 V, respectivamente.

Gráfico 19 – Tensões individuais de linha no ciclo 2



Fonte: Autoria Própria (2024)

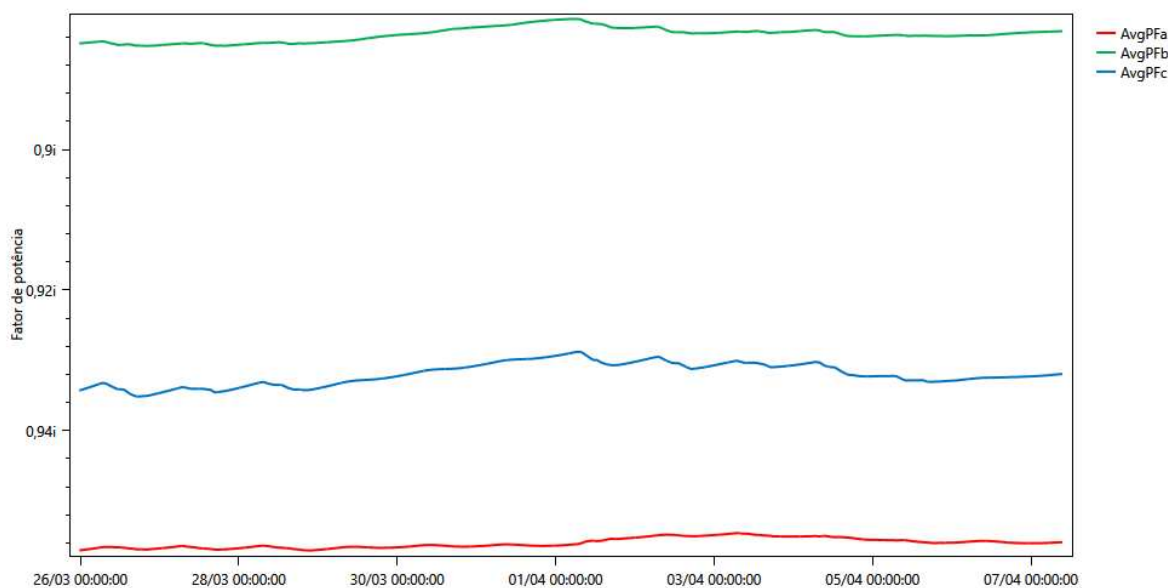
No Gráfico 19 estão representadas as medições das tensões individuais de linha, que apresentaram valores máximos de 223,211 V, 222,577 V e 221,499 V, para Uab, Ubc e Uca, respectivamente, e valores mínimos de 205,554 V, 206,160 V e 204,515 V, na mesma ordem. Os registros de Uab e Ubc foram feitos no mesmo momento que os de Van e Vbn, assim como os de Uca para com Vcn.

Da mesma forma que no ciclo 1, não foram registradas medidas que ultrapassem os limites da faixa adequada de tensão, assim os indicadores também são nulos para esse ciclo, caracterizando que a tensão em regime permanente permanece dentro dos padrões de qualidade de energia para esse período de medição.

5.2.2 Fator de potência

Os registros de fator de potência estão representados no Gráfico 20, onde as componentes da fase A e C permaneceram dentro dos valores estipulados com a fase A oscilando entre 0,957 indutivo e 0,955 indutivo, e a fase C oscilando entre 0,935 indutivo e 0,929 indutivo, já para a fase B o valor oscilou entre 0,885 e 0,881, também ambos indutivos, caracterizando uma fuga do valor limite estipulado.

Gráfico 20 – Fator de potência por fase no ciclo 2



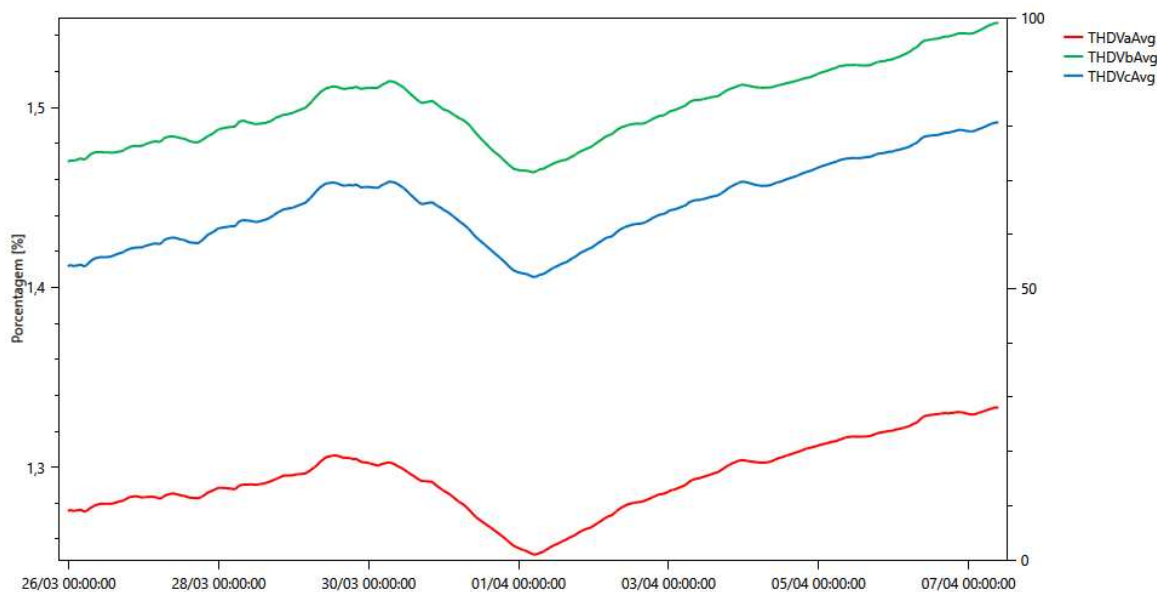
Fonte: Autoria Própria (2024)

Também é possível determinar que o comportamento das componentes de FT nesse ciclo de medição apresentou valores mais constantes durante todos os registros, quando comparados aos obtidos no ciclo 1.

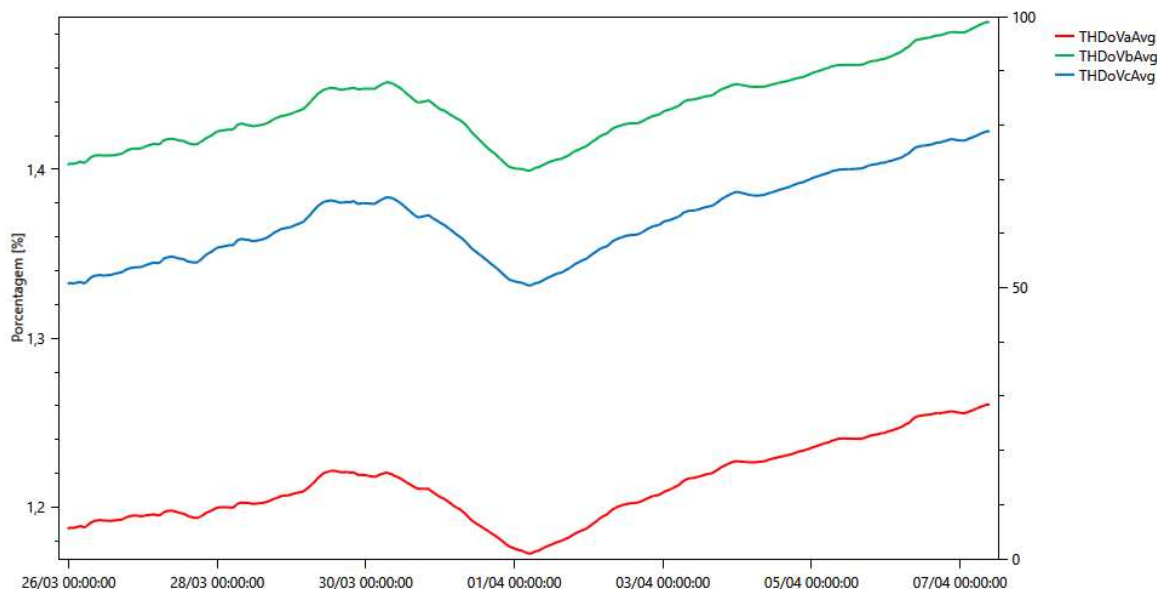
5.2.3 Distorções harmônicas

No Gráfico 21 estão apresentados os comportamentos das distorções harmônicas de tensão, onde os valores máximos registrados foram de 1,333% para a fase A, 1,547% para a fase B e 1,492% para a fase C, todos registrados na última medição realizada neste ciclo.

As distorções de tensão de ordem ímpar, também apresentaram seus máximos na última medição registrada, com valores de 1,261%, 1,487% e 1,422% para as fases A, B e C, respectivamente, como mostra o Gráfico 22.

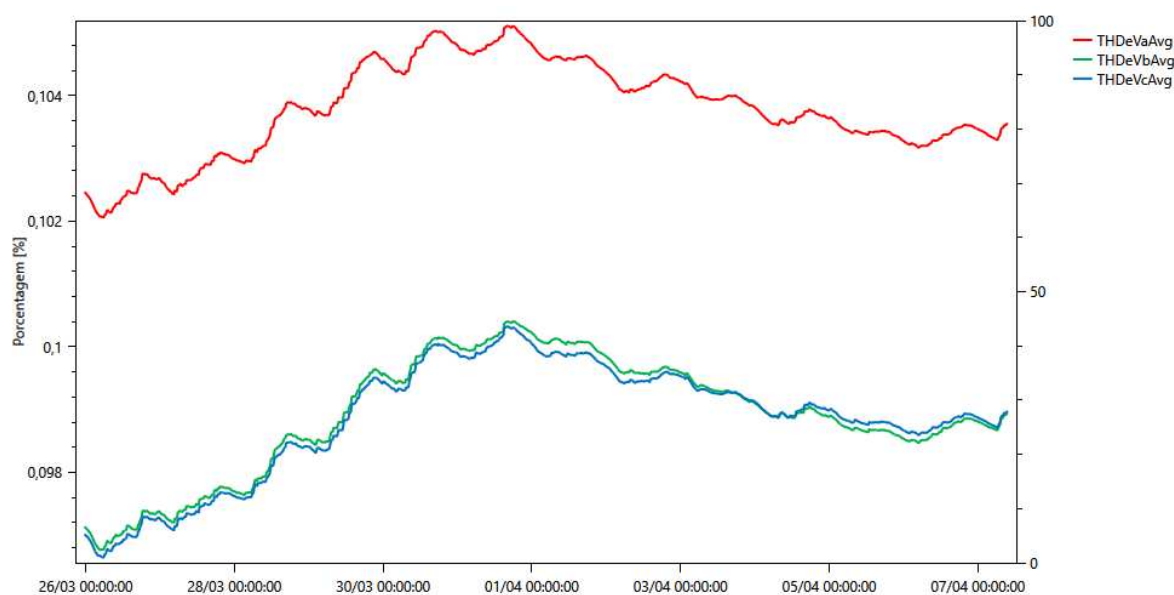
Gráfico 21 – Distorções harmônicas totais de tensão no ciclo 2

Fonte: Aatoria Própria (2024)

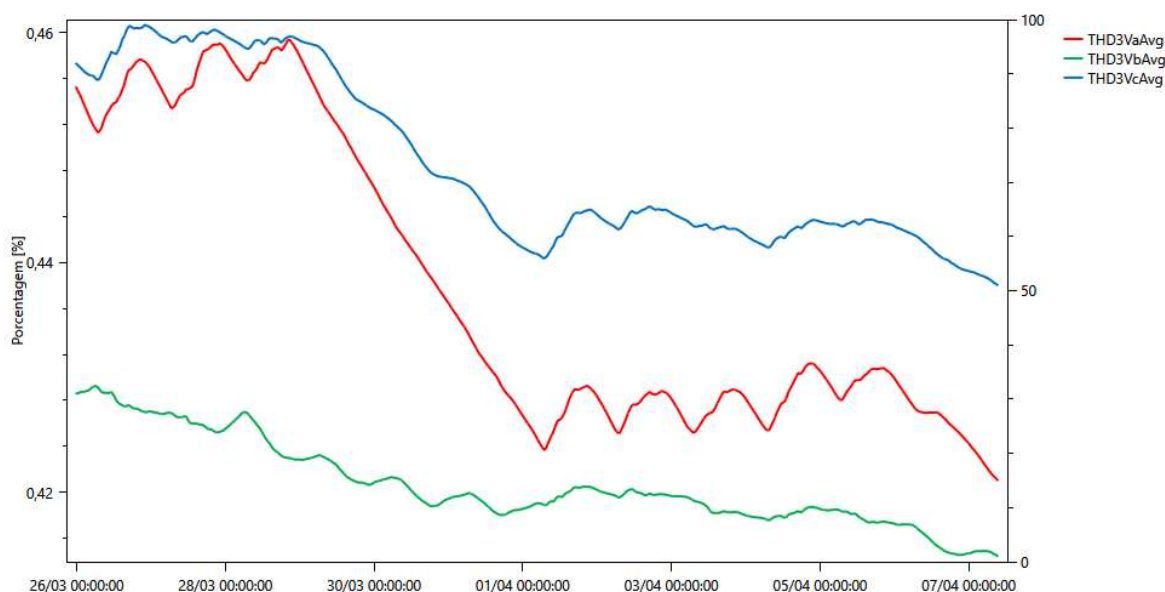
Gráfico 22 – Distorções harmônicas totais de tensão impares no ciclo 2

Fonte: Aatoria Própria (2024)

As distorções de tensão das componentes pares, apresentaram uma variação praticamente irrelevante durante todo o ciclo, isso é visível observando o Gráfico 23 através dos valores indicados no eixo esquerdo do mesmo, além disso os máximos foram todos registrados no dia 31 de março, sendo eles 0,105% para a fase A, registrado as 16:20 horas, 0,100% para a fase B, registrado as 18:00 horas, e também de 0,100% para a fase C, registrado as 16:20 horas.

Gráfico 23 – Distorções harmônicas totais de tensão pares no ciclo 2

Fonte: Aatoria Própria (2024)

Gráfico 24 – Distorções harmônicas totais de tensão múltiplas de 3 no ciclo 2

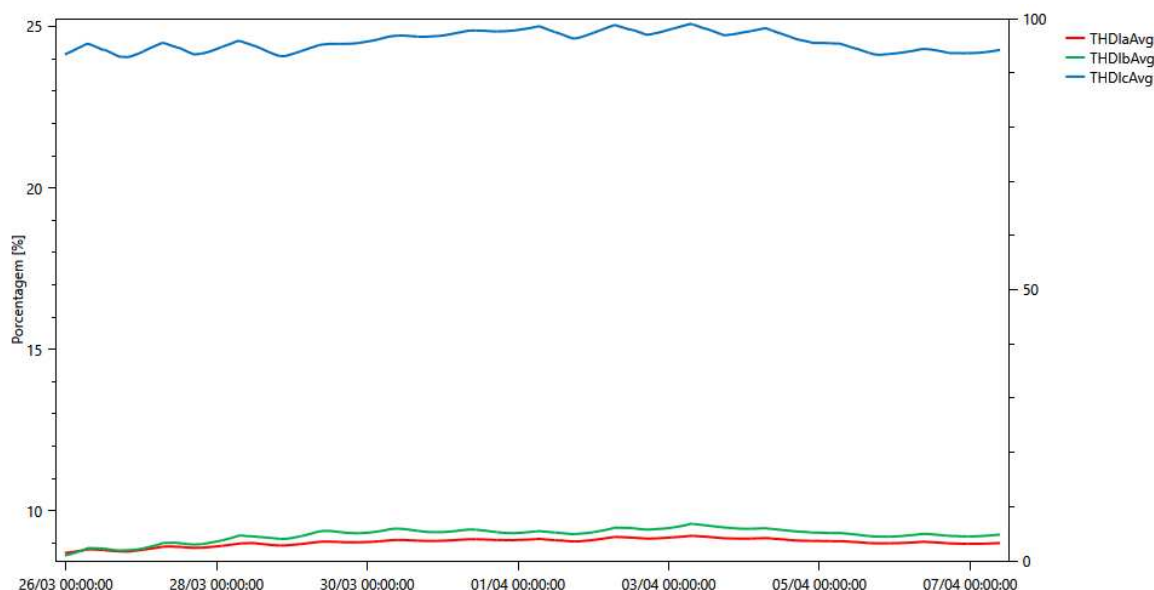
Fonte: Aatoria Própria (2024)

Com os valores máximos de 0,459% para a fase A, obtido no dia 28 de março as 20:40 horas, de 0,429% para a fase B, obtido no dia 26 de março as 06:10 horas, e de 0,461% para a fase C, obtido no dia 26 de março as 22:10 horas, como mostra o Gráfico 24, observa-se que, como no ciclo 1, a componentes múltiplas de 3 apresentaram um fator menos relevante para a componente total, quando

comparada as componentes ímpares, e mais relevantes com relação aos componentes pares.

Quanto aos indicadores definidos pela norma para determinar se as harmônicas atendem aos requisitos de qualidade, apresentaram todos valores nulos da mesma forma que no ciclo 1, assim, pela mesma lógica, pode-se afirmar que as ondas de tensão apresentaram valores que atendem os requisitos.

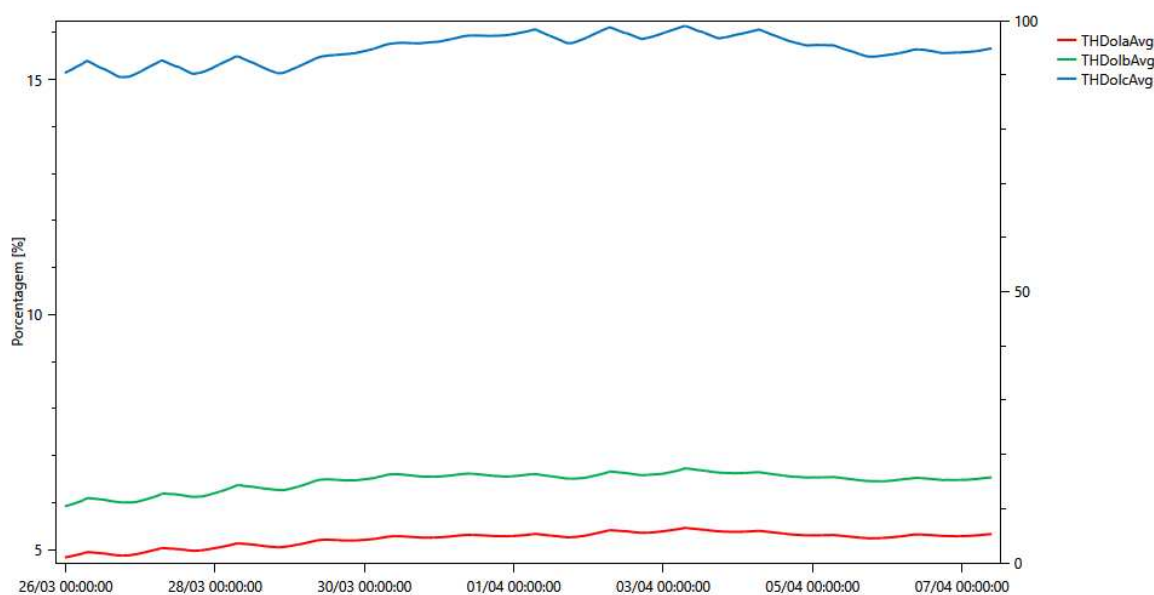
Gráfico 25 – Distorções harmônicas totais de corrente no ciclo 2



Fonte: Autoria Própria (2024)

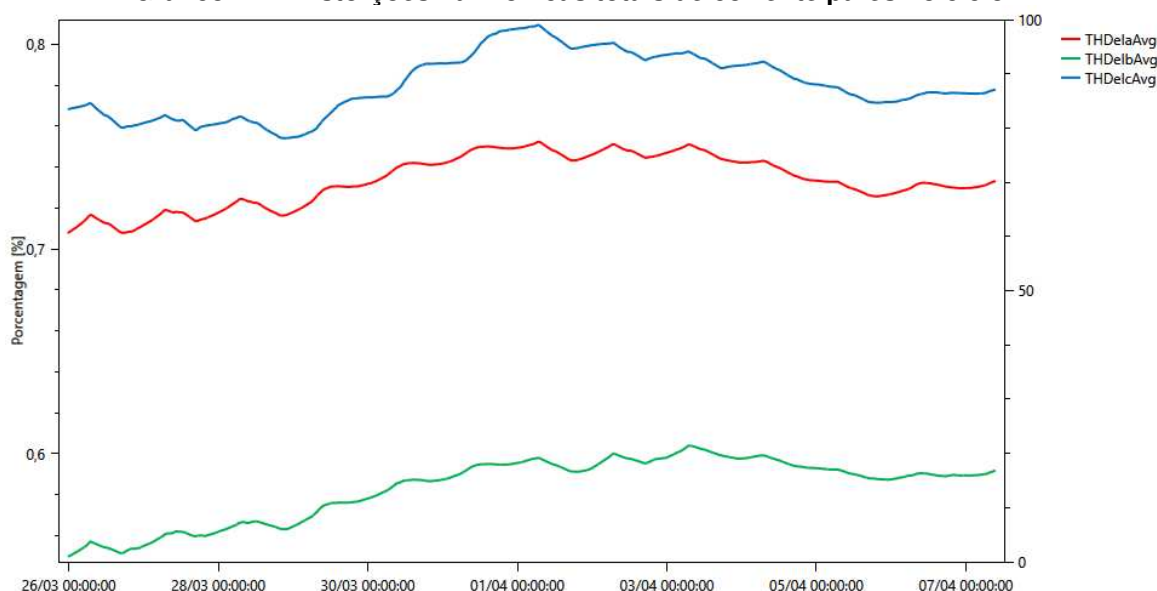
No Gráfico 25 estão representadas as componentes de distorção de corrente totais para cada fase, nele pode-se observar que as distorções presentes na fase C são consideravelmente maiores que das fases A e B, e que os máximos foram todos medidos no dia 03 de abril as 07:00 horas, apresentando valores de 9,229%, 9,601% e 25,081% para as fases A, B e C, respectivamente.

Para as componentes ímpares a fase C também apresentou uma maior incidência de distúrbios que as outras, mas percebe-se no Gráfico 26, que as fases A e B não apresentaram valores tão próximos uma da outra, quando comparado ao comportamento das mesmas para as distorções totais. Além disso, os valores máximos apresentados pelas fases A, B e C foram de 5,465%, 6,732% e 16,141%, respectivamente, e foram registrados no mesmo momento que os máximos das harmônicas totais, para as componentes A e B, já a fase C apresentou seu máximo 30 minutos antes, as 06:30 horas do mesmo dia.

Gráfico 26 – Distorções harmônicas totais de corrente ímpares no ciclo 2

Fonte: Autoria Própria (2024)

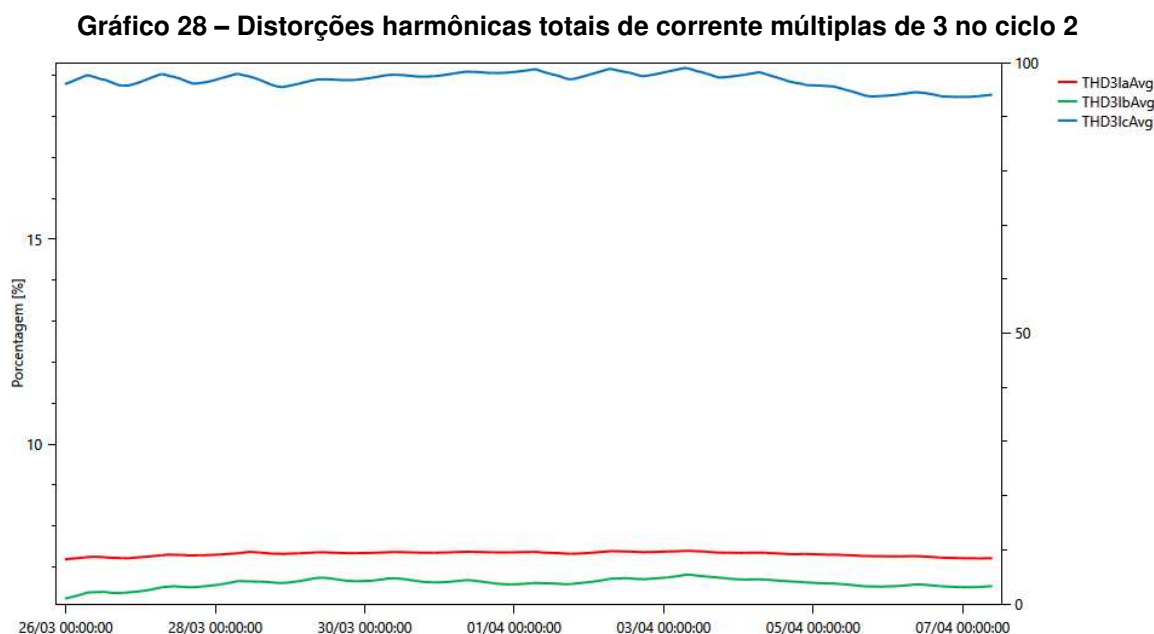
Para as distorções de corrente de ordem par temos que os valores máximos foram registrados no dia 01 de abril as 06:50 horas para a fase A, no dia 03 de abril as 07:00 horas para fase B e novamente no dia 01 de abril para a fase C, nesse caso 10 minutos antes do registro da fase A, com valores de 0,753%, 0,604% e 0,809% para as fases A, B e C, respectivamente, como mostra o Gráfico 27.

Gráfico 27 – Distorções harmônicas totais de corrente pares no ciclo 2

Fonte: Autoria Própria (2024)

Outro ponto que pode ser observado é que, diferentemente do que foi apresentado para os gráficos de distorções totais e de ordem ímpar, os valores da

fase A e C foram mais próximos entre si do que os da fase B, ainda assim as componentes pares apresentaram valores menos significativos que os ímpares.



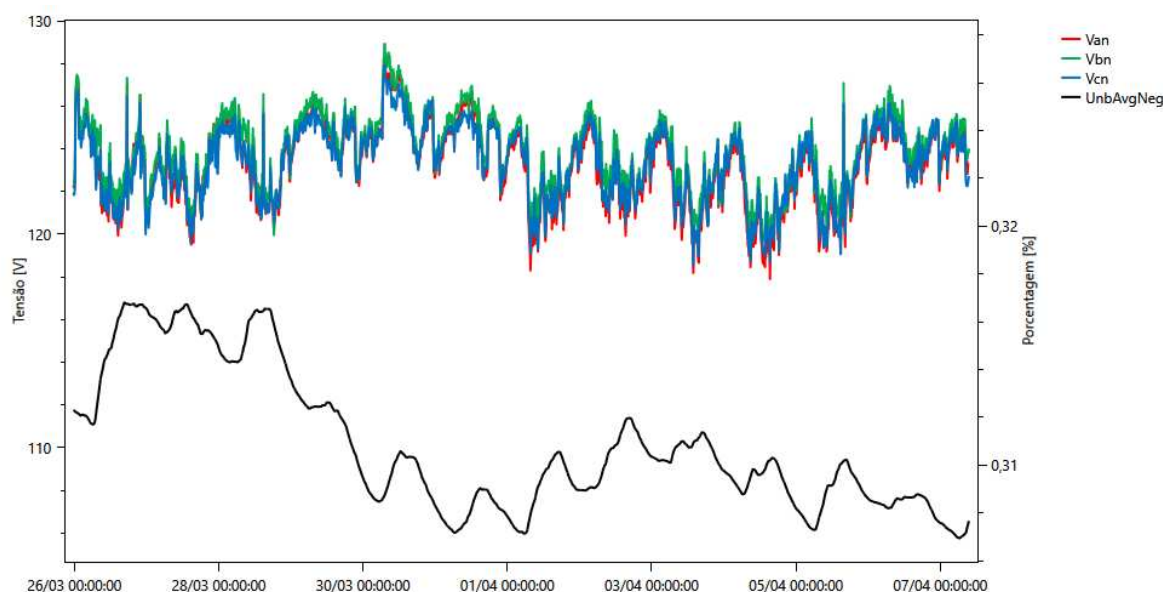
No Gráfico 28 são apresentados os valores das distorções múltiplas de 3, evidenciando uma maior influência nas distorções totais do que as outras apresentadas, também sendo possível observar que os registros máximos foram todos obtidos no dia 03 de abril, em que a fase A apresentou um valor de 7,399% as 07:30 horas, a fase B um valor de 6,818% as 07:00 horas, e no mesmo momento a fase C com um valor de 19,180%.

Com base nos gráficos 25, 26, 27 e 28, pode-se observar que os valores se mantiveram muito mais constantes do que quando comparados ao ciclo 1, mas que da mesma forma que no ciclo anterior, a fase C apresentou distorções mais significativas do que as fases A e B. além disso manteve-se a diferença entre as escalas apresentadas pelas distorções de tensão em comparação as distorções de corrente.

5.2.4 Desequilíbrio de tensão

O desequilíbrio de tensão entre as fases está representado no Gráfico 29, onde da mesma forma que no ciclo 1 está representado pela linha de cor preta e com seus valores indicados no eixo direito do gráfico.

Gráfico 29 – Desequilíbrio de tensão no ciclo 2

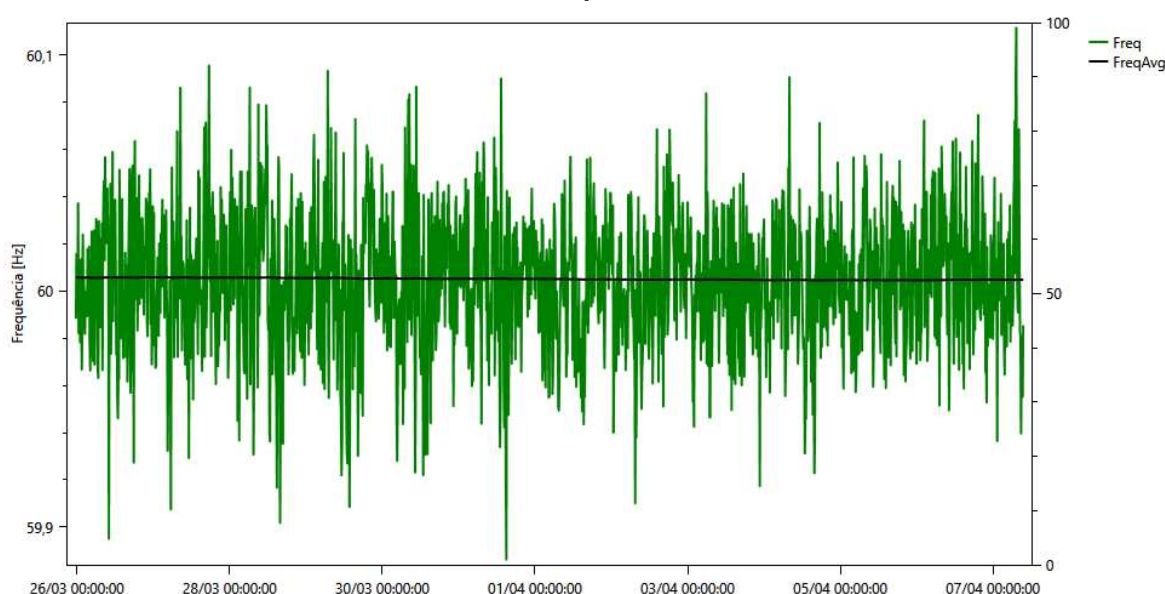


Fonte: Autoria Própria (2024)

Os valores apresentados nesse gráfico são um pouco maiores do que os apresentados no ciclo 1, mas ainda não apresentaram valores que sejam de fato significativos para indicar uma falha da qualidade de energia para esse caso, uma vez que o máximo de desequilíbrio foi de 0,317%, registrado no dia 26 de março as 16:40 horas, bem abaixo dos 5% definidos como limite, assim o indicador FD95% também foi nulo para esse caso.

3.2.5 Variação de frequência

O Gráfico 30 apresenta o comportamento da frequência para as medições obtidas no ciclo 2, onde houveram 3 registros com valores que ultrapassam a faixa de frequência aceitável, sendo o primeiro de 59,895 Hz, o segundo de 59,886 Hz e o terceiro de 60,111 Hz, registrados nos dias 26 de março as 10:00 horas, 31 de março as 15:00 horas e 07 de abril as 07:20 horas, respectivamente.

Gráfico 30 – Frequência no ciclo 2

Fonte: Autoria Própria (2024)

Assim como no ciclo 1, apesar da presença de medidas que situam fora da faixa determinada, os valores não apresentaram um desvio significativamente grande do valor esperado, além disso a frequência média no tempo possuiu valores muito próximos da frequência nominal.

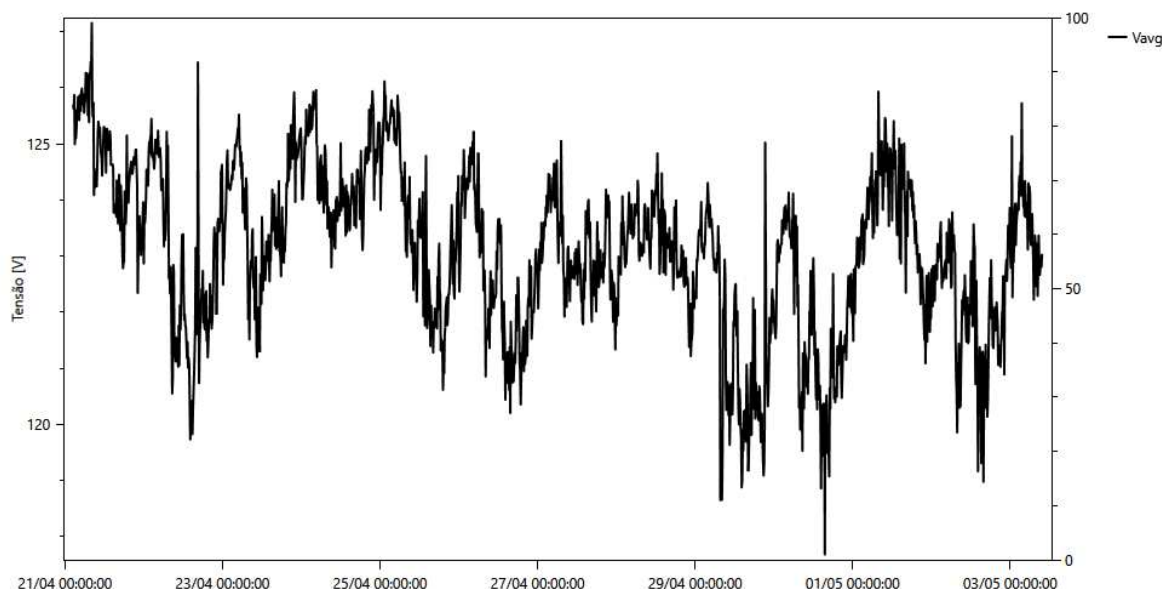
5.3 Ciclo 3

Por fim, o terceiro ciclo teve início no dia 21 de abril de 2024 as 02:30 horas e termino no dia 03 de maio de 2024 as 09:40 horas, tendo um total de 1772 registros.

5.3.1 Variação de tensão em regime permanente

No Gráfico 31 os valores máximos e mínimos da tensão média de fase foram de 127,159 V, registrado no dia 21 de abril as 08:10 horas, e 117,683 V, registrado no dia 30 de abril as 15:30 horas, respectivamente.

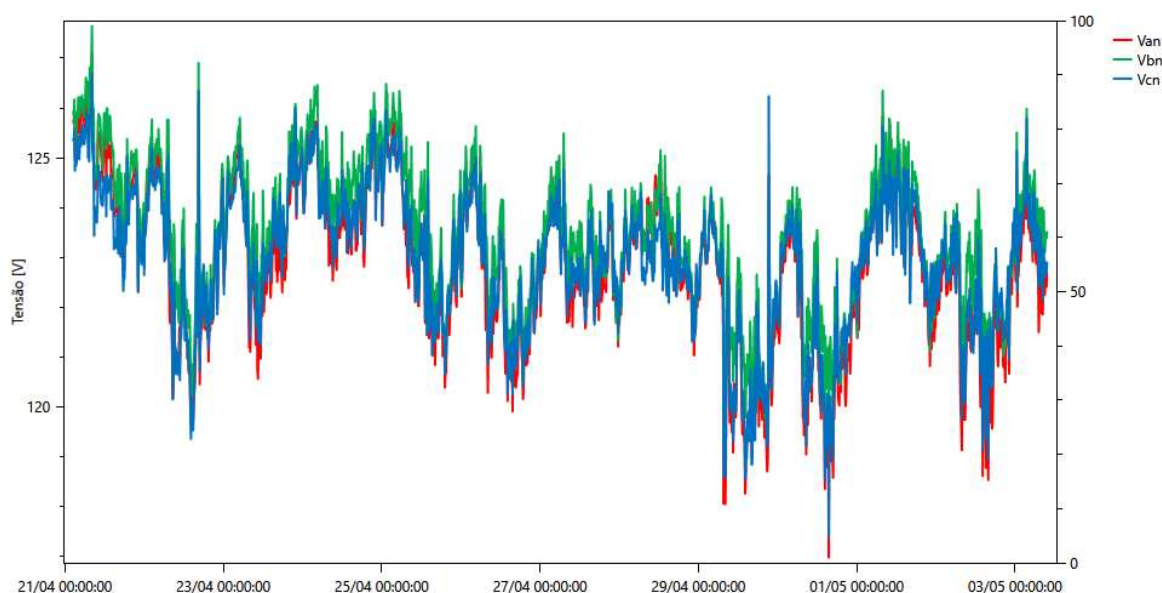
Gráfico 31 – Tensão média de fase no ciclo 3



Fonte: Autoria Própria (2024)

Para as componentes individuais da tensão de fase, os valores estão representados no Gráfico 32, onde os máximos e mínimos foram todos registrados no mesmo momento que os da tensão média de fase, sendo eles 127,120 V, 127,648 V e 126,708 V, respectivamente, os máximos de A, B e C, e 116,975 V, 118,680 V e 117,392 V, respectivamente, os mínimos de A, B e C.

Gráfico 32 – Tensões individuais de fase no ciclo 3

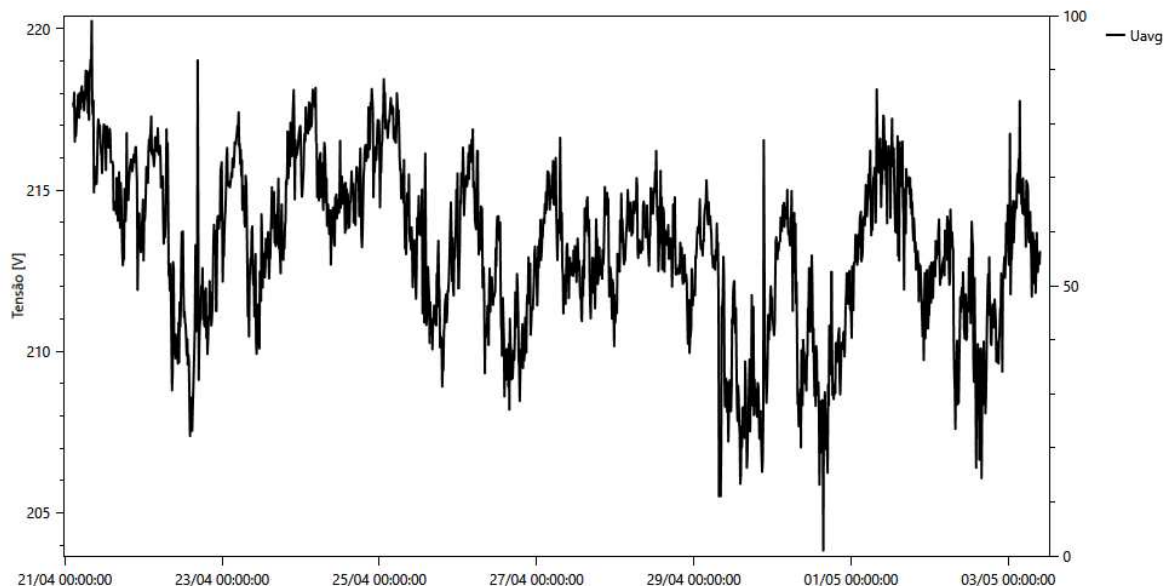


Fonte: Autoria Própria (2024)

Como nos ciclos anteriores, os máximos e mínimos da tensão média de linha também ocorreram no mesmo momento que os da tensão média de fase, como

mostra o Gráfico 33, e apresentam valores de 220,245 V e 203,831 V, respectivamente.

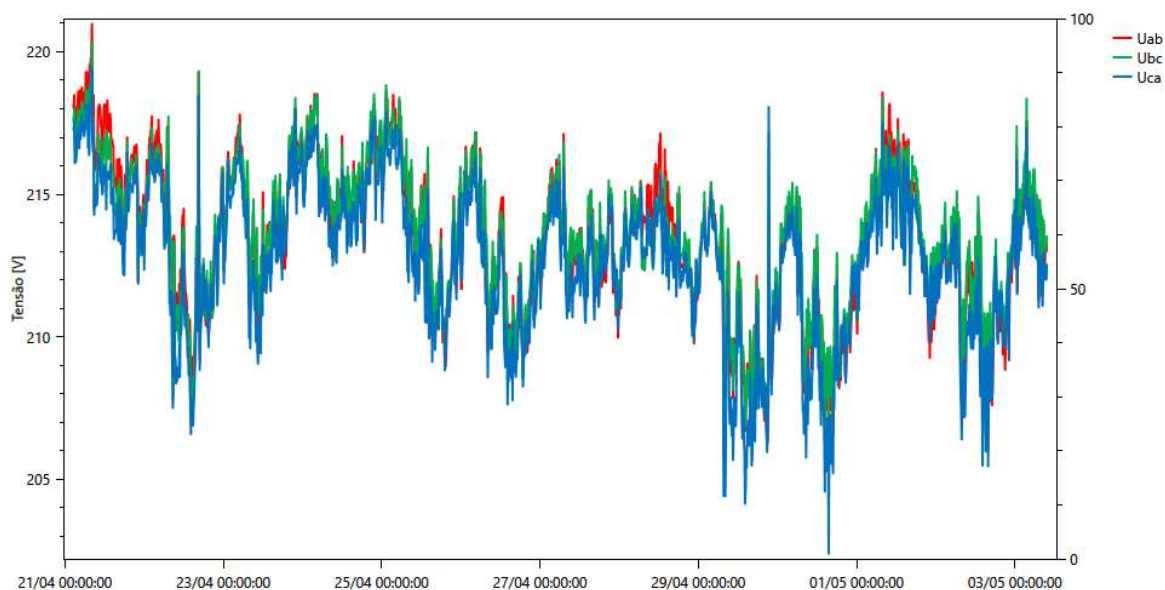
Gráfico 33 – Tensão média de linha no ciclo 3



Fonte: Autoria Própria (2024)

No Gráfico 34, observa-se que os registros de máximos e mínimos para as tensões individuais de linha também ocorreram no mesmo momento que os outros apresentados nesse ciclo, com valores máximos de 220,983 V, 220,330 V e 219,422 V, respectivamente para Uab, Ubc e Uca, e com valores mínimos de 204,389 V, 204,717 V e 202,387 V, na mesma ordem.

Gráfico 34 – Tensões individuais de linha no ciclo 3



Fonte: Autoria Própria (2024)

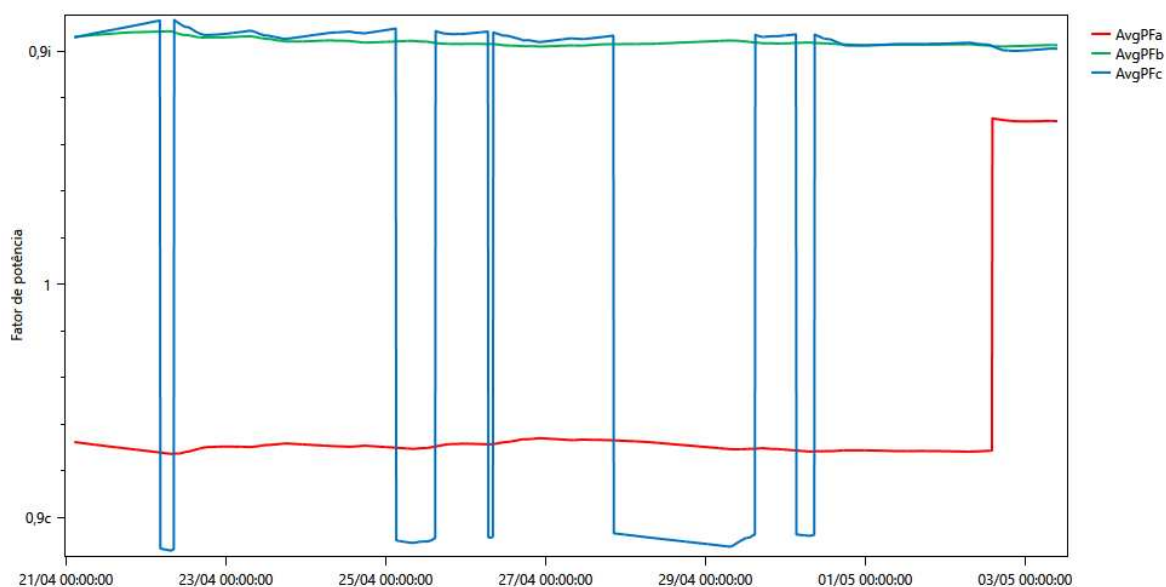
Diferentemente dos ciclos anteriores, onde todas as medidas apresentadas foram classificadas como adequadas, de acordo com os limites apresentados na tabela 1, nesse pode-se analisar que o registro de tensão de fase mínimo da fase C ultrapassou o limite inferior de 117 V. registrando assim 0.0564% das medidas na faixa precária de tensão, considerando todos os registros desse ciclo.

Com um registro na faixa precária de tensão pode-se determinar o indicador de DRP, sendo o valor de 0.0992% considerando os 1008 registros determinados pelo PRODIST, o que respeita o limite de 3% determinada pela mesma norma.

5.3.2 Fator de potência

O fator de potência médio de cada fase apresentou um comportamento distinto da outra, como representado no Gráfico 35, a fase A iniciou o ciclo em valores próximos a 0,93 capacitivo, se manteve com esse valor até o dia 02 de maio as 14:10 quando foi alterada para 0,93 indutivo, a fase B se manteve com valores próximos de 0,89 indutivo por todo o ciclo e a fase C iniciou e encerrou o ciclo apresentando valores próximos de 0,89 indutivo, mas apresentou oscilações para valores próximos a 0,89 capacitivo.

Gráfico 35 – Fator de potência por fase no ciclo 3



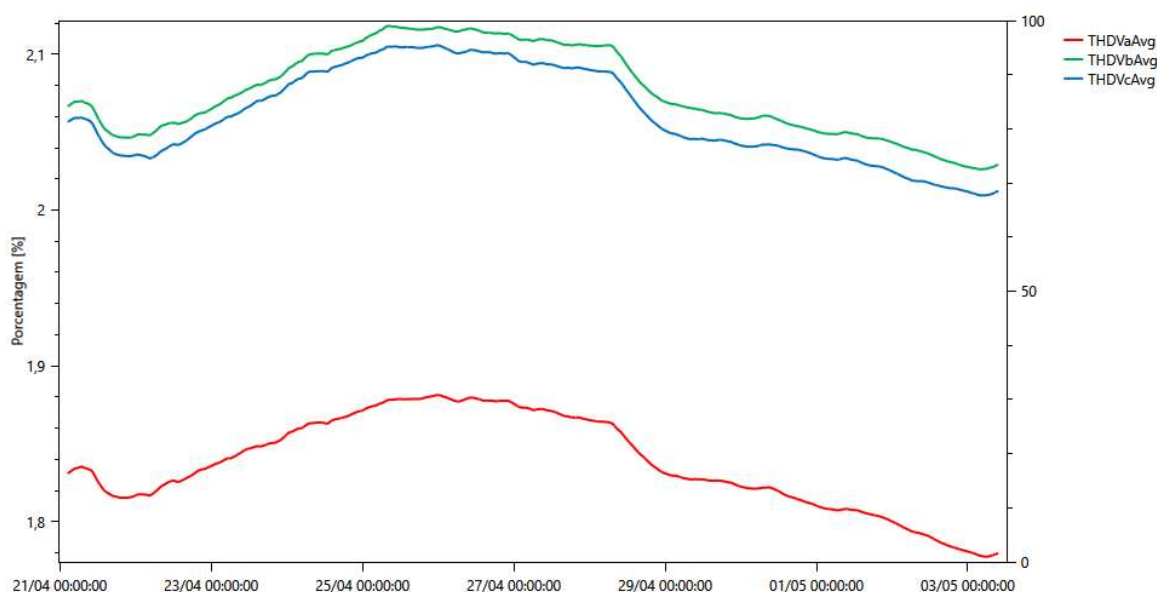
Fonte: Autoria Própria (2024)

Com relação aos limites previstos pela norma, a fase A foi a única que não o ultrapassou. Além disso, o comportamento apresentado pelas componentes de fase A e C, são semelhantes ao comportamento da fase A no ciclo 1, como mostra o Gráfico 5, porem com a fase C apresentando uma quantia considerável a mais de oscilações, no Gráfico 35, do que a fase A nos 2 casos, ainda assim, as mesmas considerações apontadas no ciclo 1 cabem para esse caso.

5.3.3 Distorções harmônicas

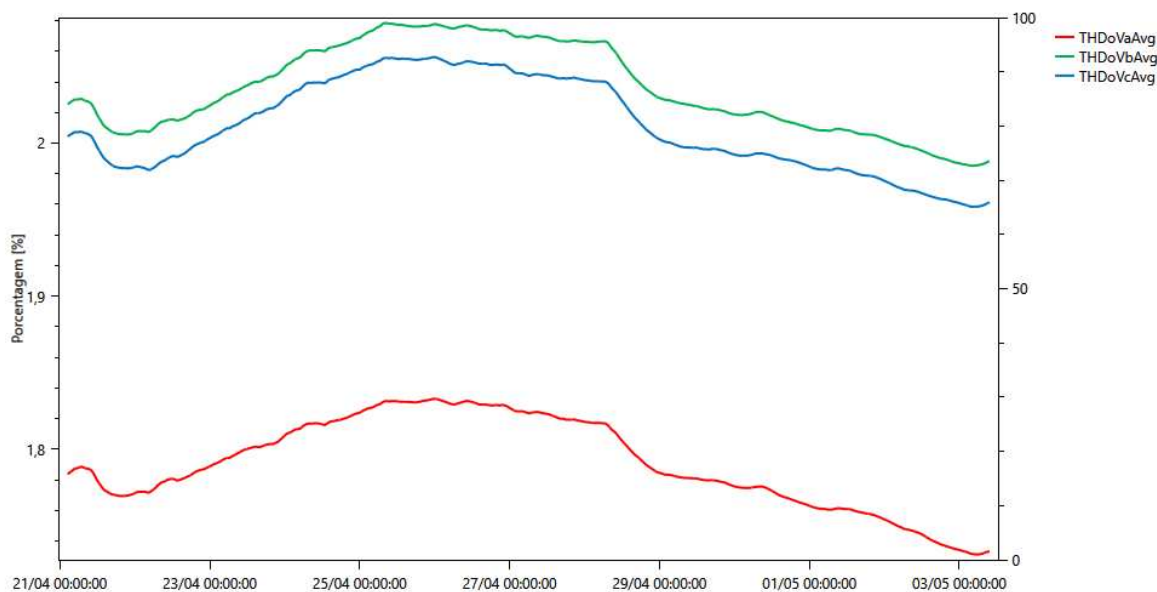
As distorções totais de tensão estão representadas no Gráfico 36, onde os valores máximos foram de 1,881% para a fase A, 2,118% para a fase B e 2,106% para a fase C, todos registrados no dia 25 de abril, as 08:10 horas para a fase B e as 23:50 horas para as fases A e C.

Gráfico 36 – Distorções harmônicas totais de tensão no ciclo 3



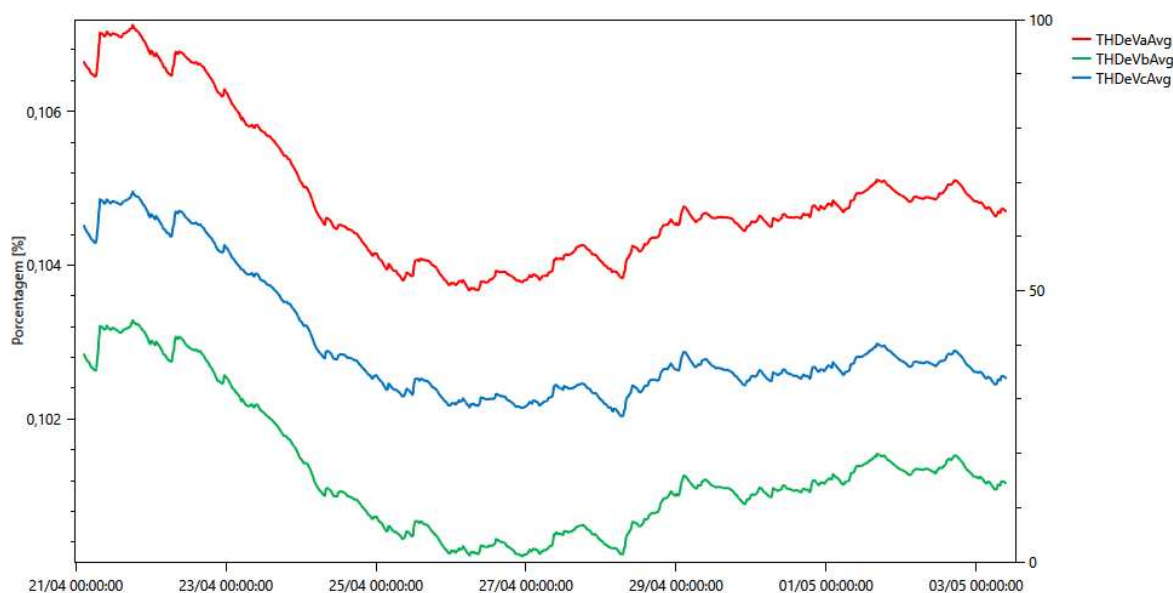
Fonte: Autoria Própria (2024)

Como nos ciclos anteriores o momento de máximo das distorções totais e das de componentes ímpares foram os mesmos para cada fase, como mostra o Gráfico 37, em que os valores máximos das componentes ímpares foram de 1,883%, 2,079% e 2,056% para as fases A, B e C, respectivamente.

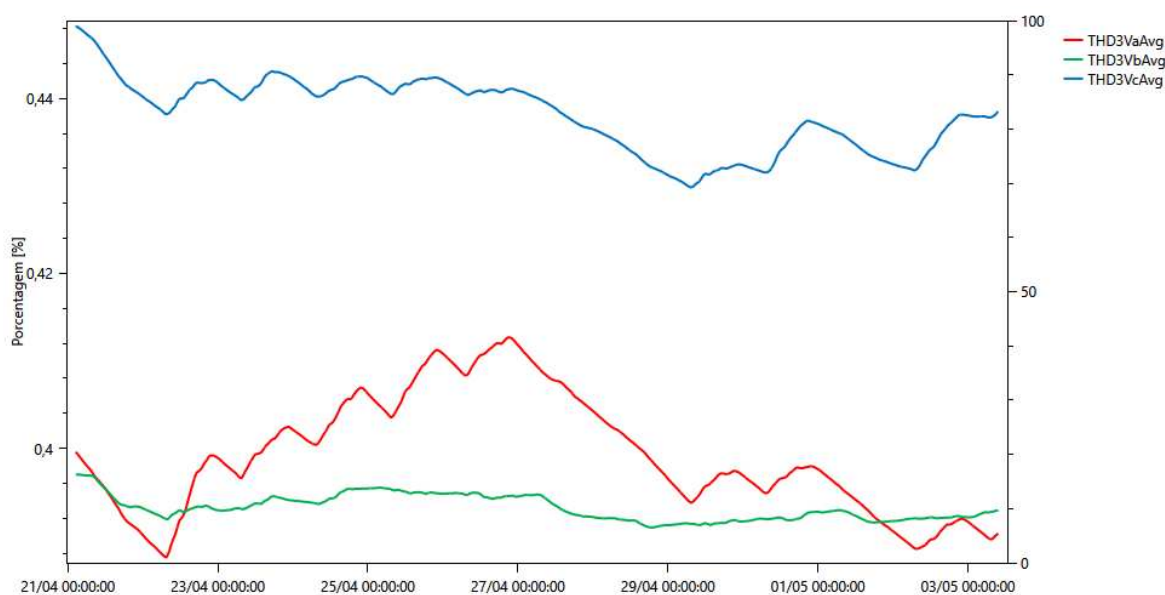
Gráfico 37 – Distorções harmônicas totais de tensão ímpares no ciclo 3

Fonte: Autoria Própria (2024)

Com relação aos componentes pares, apresentaram seus valores máximos para as fases A, B e C de 0,107%, 0,103% e 0,105%, respectivamente, sendo os 3 registros obtidos no dia 21 de abril as 18:10 horas, como mostra o Gráfico 38.

Gráfico 38 – Distorções harmônicas totais de tensão pares no ciclo 3

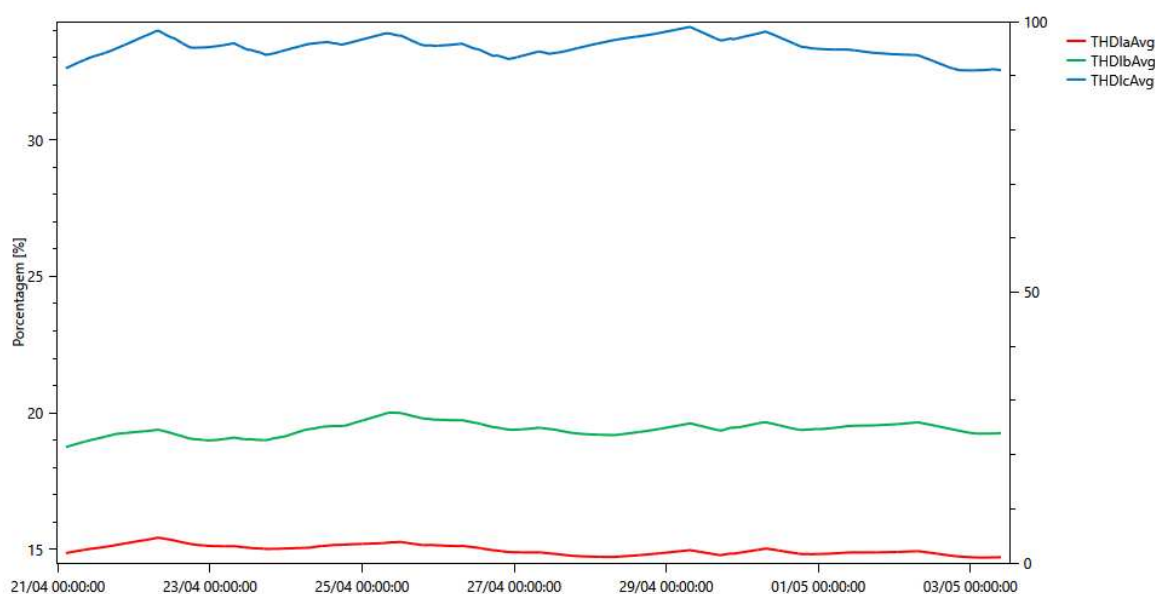
Fonte: Autoria Própria (2024)

Gráfico 39 – Distorções harmônicas totais de tensão múltiplas de 3 no ciclo 3

Fonte: Autoria Própria (2024)

No Gráfico 39, nota-se que, diferente dos que foi visto nos outros gráficos de distorções de tensão, o comportamento dos valores apresentados pelas fases não foi semelhante entre elas, onde os máximos registrados foram, para a fase A de 0,413%, no dia 26 de abril as 21:10 horas, para a fase B de 0,397%, no dia 21 de abril as 03:00 horas, e para a fase C de 0,448%, na primeira medição do ciclo.

Da mesma forma que nos ciclos anteriores, nenhuma das distorções de tensão não ultrapassou o valor de 5%, assim os indicadores também são nulos.

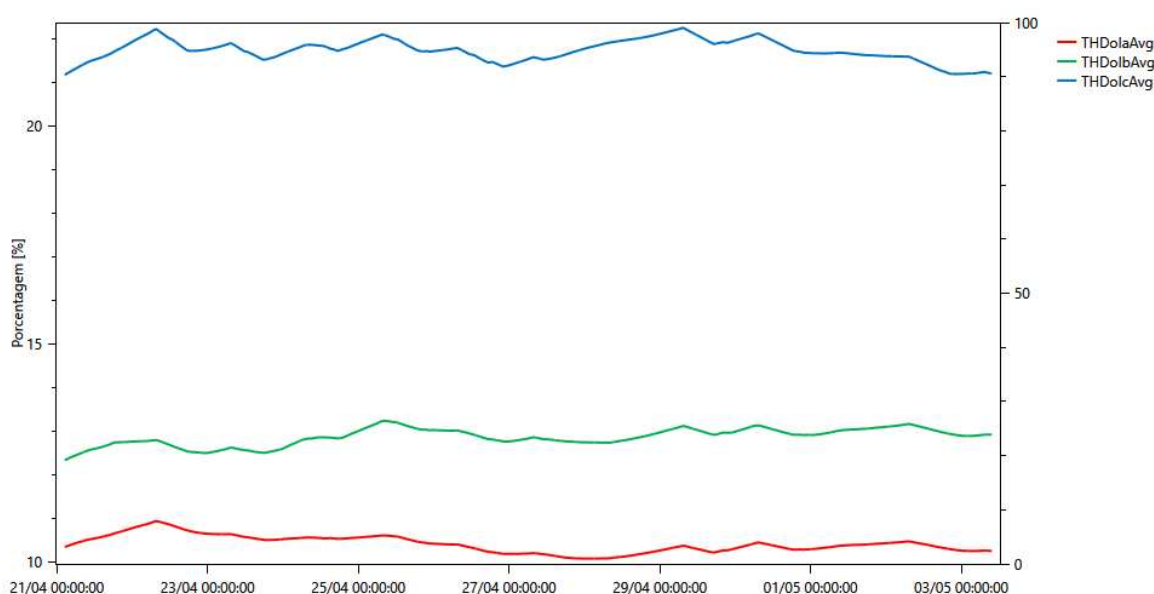
Gráfico 40 – Distorções harmônicas totais de corrente no ciclo 3

Fonte: Autoria Própria (2024)

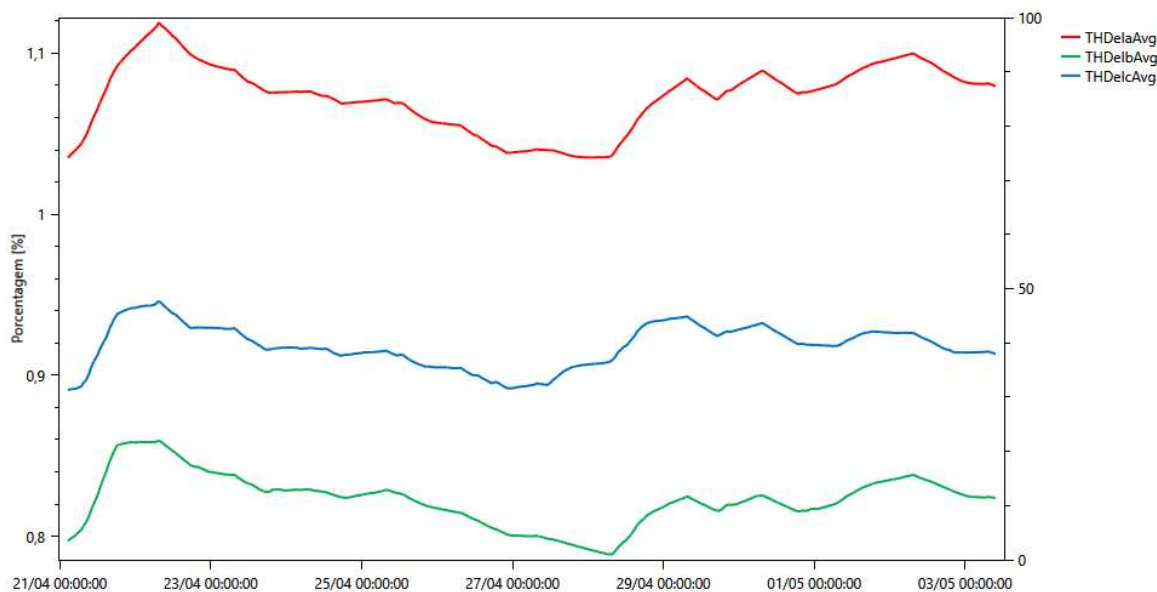
As distorções totais de corrente, assim como no ciclo 2, foram praticamente constantes por todo o tempo do ciclo de medição, como mostra o Gráfico 40, apresentando máximos de 15,434% para a fase A, registrado no dia 22 de abril as 7:30 horas, de 20,010% para a fase B, registrado no dia 25 de abril as 09:00 horas, e de 34,132% para a fase C, registrado no dia 29 de abril as 7:30 horas.

As distorções de corrente ímpares estão representadas no Gráfico 41, apresentando valores máximos de 10,936% para a fase A, registrado no mesmo momento que o máximo da distorção total da mesma fase, de 13,237% para a fase B, registrado no mesmo dia que o máximo da fase B para as distorções totais, mas as 08:10 horas, e de 22,256% para a fase C, que também apresentou o registro no mesmo dia que seu correlato das distorções totais de corrente, mas 10 minutos antes da mesma, ou no registro anterior.

Gráfico 41 – Distorções harmônicas totais de corrente ímpares no ciclo 3

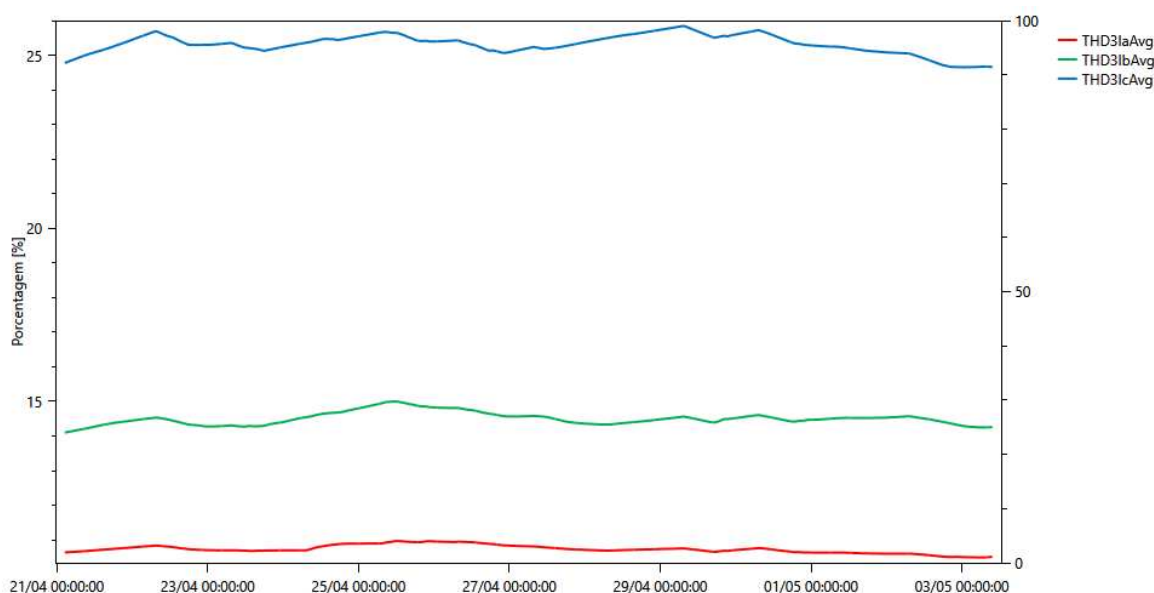


Fonte: Autoria Própria (2024)

Gráfico 42 – Distorções harmônicas totais de corrente pares no ciclo 3

Fonte: Autoria Própria (2024)

No Gráfico 42 estão representadas as distorções de corrente pares, onde os valores se mantiveram menores em relação as componentes impares, como verificado nos ciclos anteriores, tendo máximos de 1,119% para a fase A, 0,860% para a fase B e 0,946% para a fase C, todas registradas no dia 22 de abril as 07:30 horas.

Gráfico 43 – Distorções harmônicas totais de corrente múltiplas de 3 no ciclo 3

Fonte: Autoria Própria (2024)

Por fim, as componentes múltiplas de 3 das distorções de corrente, indicadas no Gráfico 43, também apresentaram um comportamento mais constante, como as

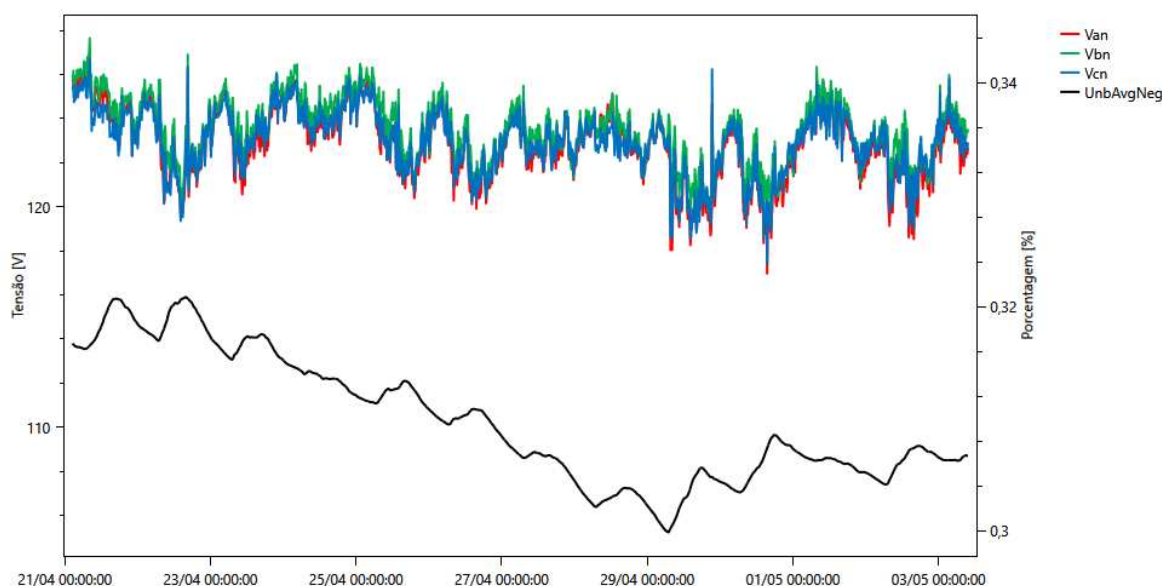
distorções totais e impares, possuindo valores máximos de 10,964%, 14,997% e 25,862%, para as fases A, B e C, respectivamente, sendo esses registrados no dia 25 de abril as 12:00 horas, para as fases A e B, e no dia 29 de abril as 07:30 horas, para a fase C

Com base no que se apresentou com relação as distorções de corrente, mantem-se os mesmos destaques apresentados no ciclo 2, onde os valores das distorções de corrente foram consideravelmente maiores que os de tensão, a componente C apresentou uma distorção mais significativa que as outras e que os valores de distorção se mantiveram relativamente constantes durante o ciclo de medição.

5.3.4 Desequilíbrio de tensão

Os níveis de desequilíbrio de tensão se mantiveram baixos, como nos ciclos 1 e 2, apresentando um valor máximo de 0,321% no dia 22 de abril as 15:50 horas, dessa forma, como nos casos anteriores, não foram registradas medições que ultrapassem 5%, mantendo o indicador FD95% com valor nulo.

Gráfico 44 – Desequilíbrio de tensão no ciclo 3



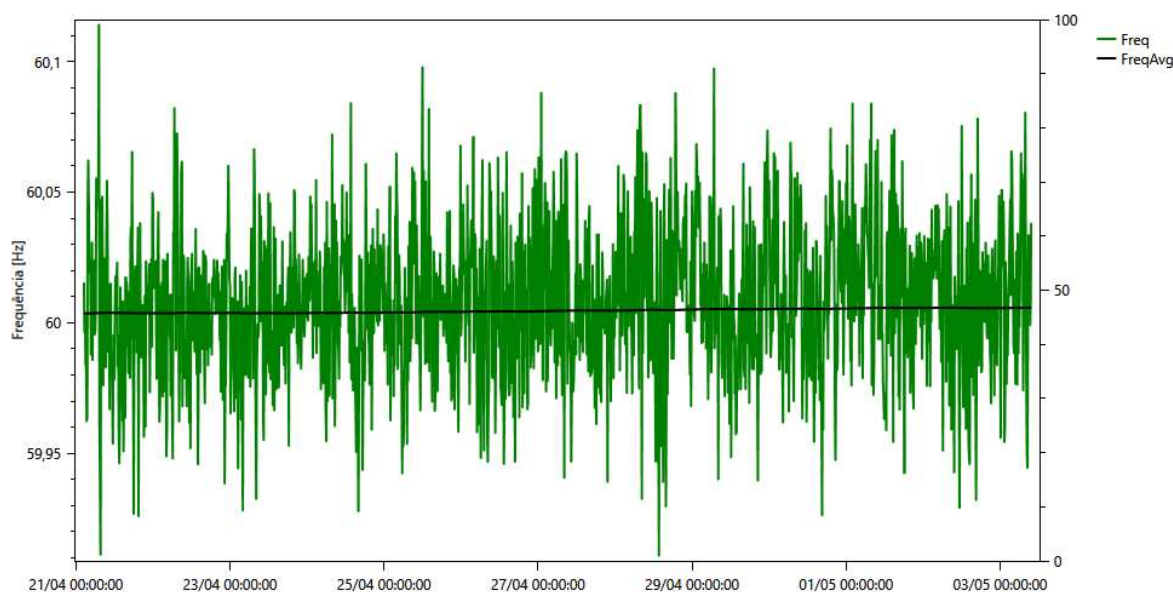
Fonte: Autoria Própria (2024)

3.3.5 Variação de frequência

Para a variação de frequência durante o ciclo pode-se observar que, no Gráfico 45, houve um aumento pequeno, porém constante, da indicação da frequência média com o tempo, que se inicia com valor de 60,004 Hz e finaliza com 60,006 Hz, como uma rampa suave. Já para os valores médios obtidos dos intervalos de medição são apresentados o valor máximo de 60,114 Hz, registrado no dia 21 de abril as 07:10 horas, e o valor mínimo de 59,911 Hz, registrado no dia 28 de abril as 13:40.

O valor máximo maior que 6,1 indica que pode ter havido uma violação leve do que se espera com relação ao valor da corrente, mas como nos casos dos ciclos anteriores os valores podem ser tratados como irrelevantes por conta do baixo valor de ultrapassagem.

Gráfico 45 – Frequência no ciclo 3



Fonte: Autoria Própria (2024)

5.4 Flutuações de tensão e variação de tensão de curta duração.

Os fenômenos de flutuação de tensão e VTCD não apresentaram registros na memória interna do equipamento, sendo este um forte indicio de que os níveis de

tensão não apresentaram oscilações significativas dentro de períodos curtos de tempo.

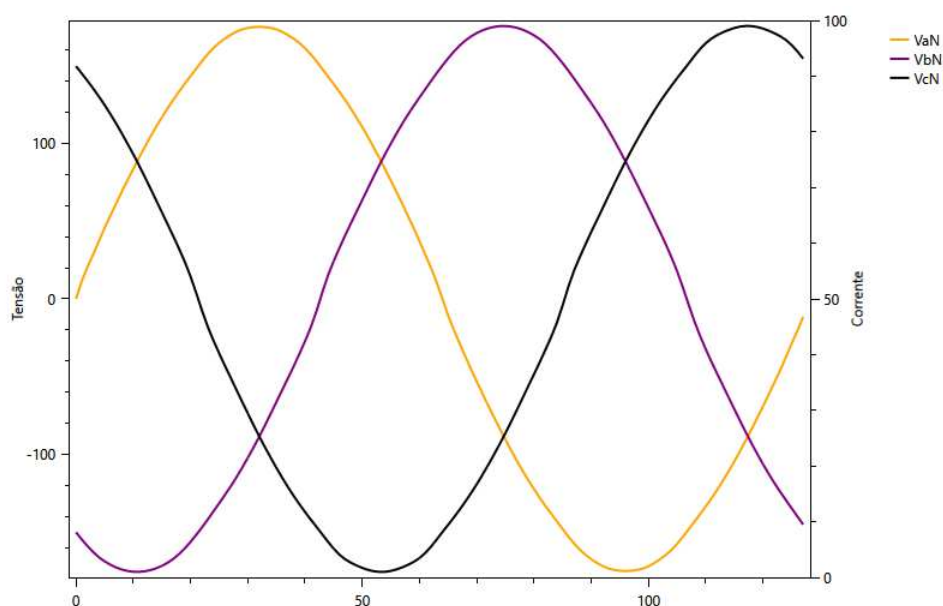
5.5 Efeitos de distorção

O software PowerMANAGER desktop também apresenta uma ferramenta de reconstrução da forma de onda, em que a média dos registros da forma de onda dos 10 minutos de cada medição, são representados em gráficos de 1 ciclo da onda. Esse recurso permite a visualização de como a forma de onda estava apresentada em determinado momento, possibilitando a análise de efeitos causados pelas distorções citadas anteriormente.

Outra ferramenta interessante para a análise das distorções é a geração de gráfico de barras dos níveis de distorção harmônica, destacando o nível de distorção por ordem harmônica e por fase.

A fim de definir um critério de seleção para os gráficos, serão apontados de acordo com o momento em que houve o maior valor de distorção harmônica, tanto para as ondas de tensão quanto para as de corrente, com o intuito de visualizar os efeitos de distorção mais relevantes ocorridos ao sistema.

Gráfico 46 – Reconstrução da forma de onda de tensão do ciclo 1 (01/03/2024 20:20 hrs)

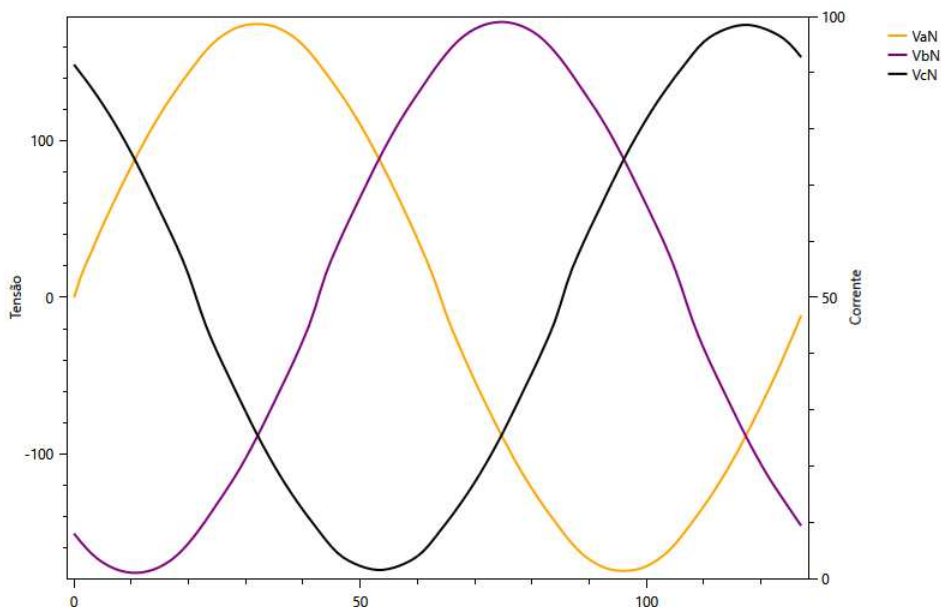


Fonte: Autoria Própria (2024)

Primeiramente, para a análise das ondas de tensão, os momentos que apresentaram o maior nível de distorção de tensão, citados nos tópicos anteriores,

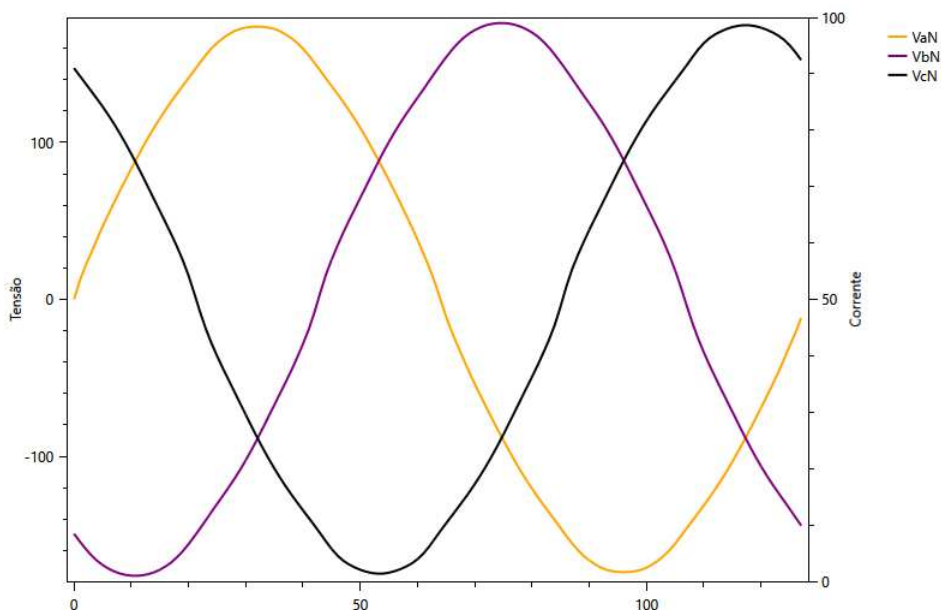
estão representados nos Gráficos 46, 47 e 48 para os ciclos 1, 2 e 3, respectivamente, em que a escala está representada no eixo esquerdo do gráfico. Seguindo a mesma ordem, estão representados nos Gráficos 49, 50 e 51 as harmônicas de tensão em gráfico de barras.

Gráfico 47 – Reconstrução da forma de onda de tensão do ciclo 2 (07/04/2024 09:30 hrs)



Fonte: Autoria Própria (2024)

Gráfico 48 – Reconstrução da forma de onda de tensão do ciclo 3 (25/04/2024 08:10 hrs)

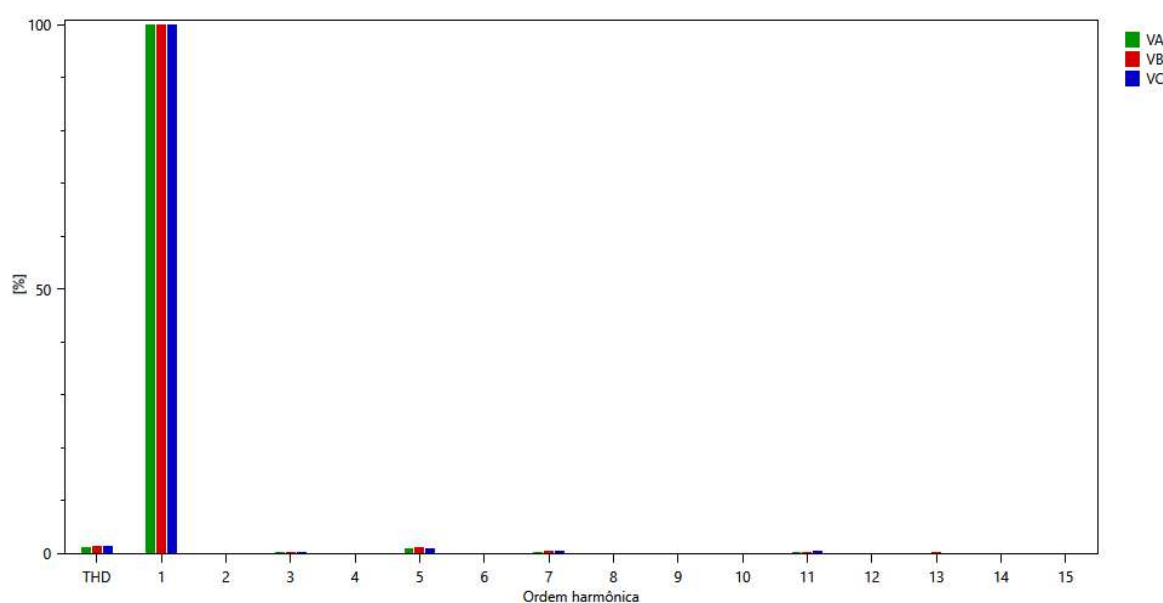


Fonte: Autoria Própria (2024)

Nota-se nos Gráficos 46, 47 e 48 que as ondas de tensão apresentam formatos muito semelhantes aos esperados em uma onda senoidal, tendo valores de pico praticamente idênticos, apresentando uma defasagem coerente com a que se espera e não evidenciando nenhum grande distúrbio no formato. Isso corrobora com os resultados apresentados anteriormente, onde todos os indicadores referentes a tensão apresentaram valores bastante próximos ao que se espera em condições normais.

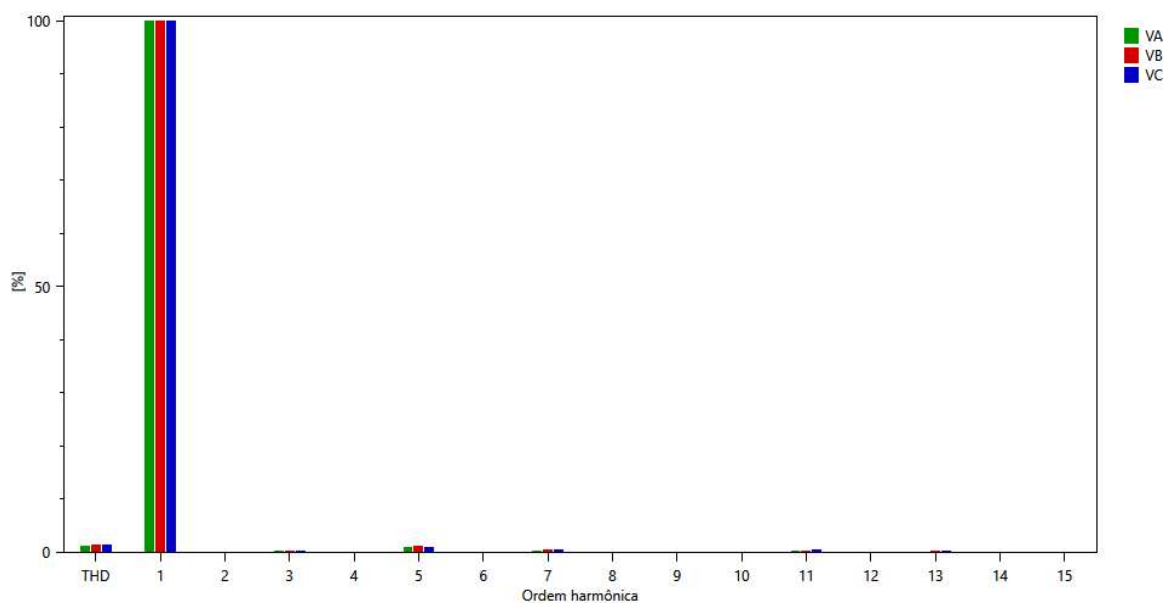
Outro ponto a ser ressaltado são os níveis, individualizados pelas ordens harmônicas, das distorções medidas nesses instantes, como pode-se observar nos Gráficos 49, 50 e 51, onde é visível que os efeitos de distorção total são ínfimos e que a sua maior parte se deve por harmônicas ímpares não múltiplas de 3, corroborando assim com os valores apresentados nos gráficos de distorções harmônicas de tensão pelo tempo como apresentado anteriormente.

Gráfico 49 – Harmônicos de tensão do ciclo 1 (01/03/2024 20:20 hrs)



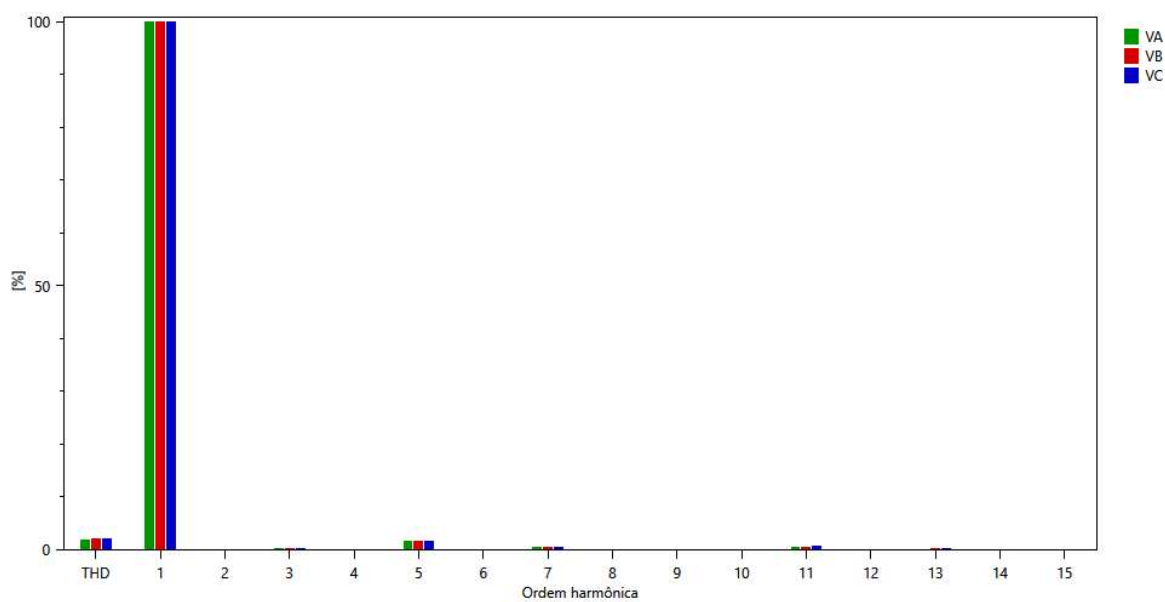
Fonte: Autoria Própria (2024)

Gráfico 50 – Harmônicos de tensão do ciclo 2 (07/04/2024 09:30 hrs)



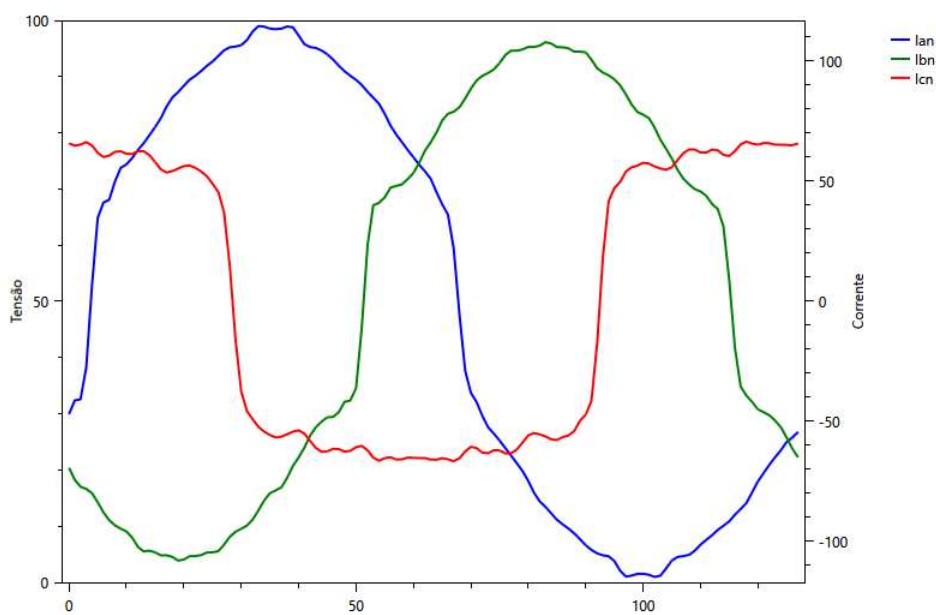
Fonte: Autoria Própria (2024)

Gráfico 51 – Harmônicos de tensão do ciclo 3 (25/04/2024 08:10 hrs)

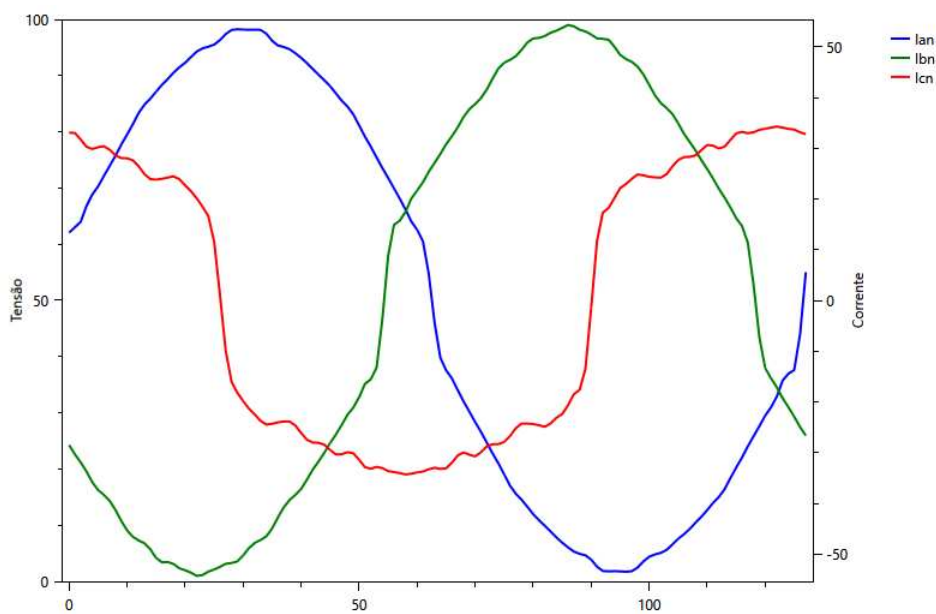


Fonte: Autoria Própria (2024)

Para as ondas de corrente foram gerados os Gráficos 52, 53 e 54, referentes ao ciclo 1, 2 e 3, respectivamente, em que os valores da escala estão representados no eixo direito.

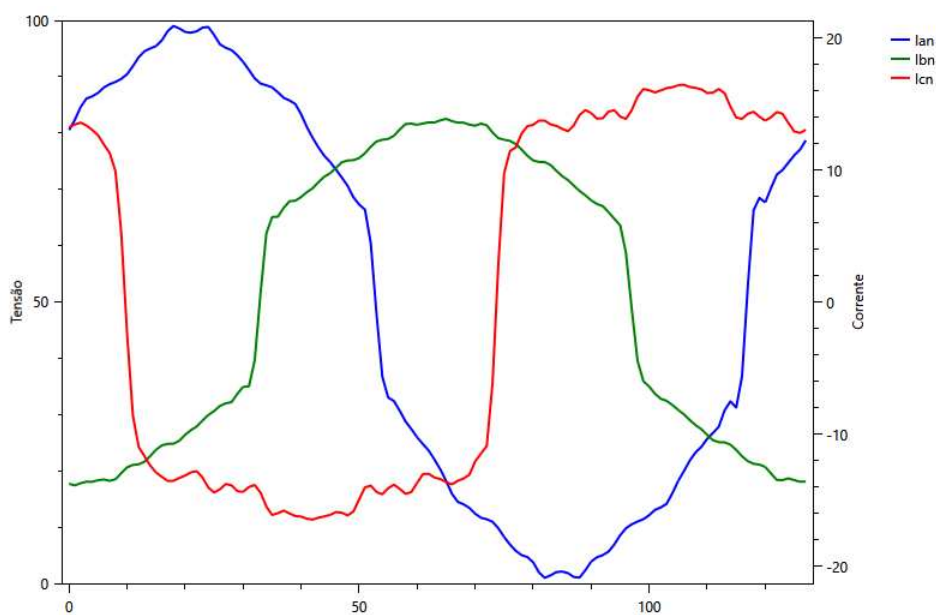
Gráfico 52 – Reconstrução da forma de onda de corrente do ciclo 1 (29/02/2024 15:50 hrs)

Fonte: Autoria Própria (2024)

Gráfico 53 – Reconstrução da forma de onda de corrente do ciclo 2 (03/04/2024 07:00 hrs)

Fonte: Autoria Própria (2024)

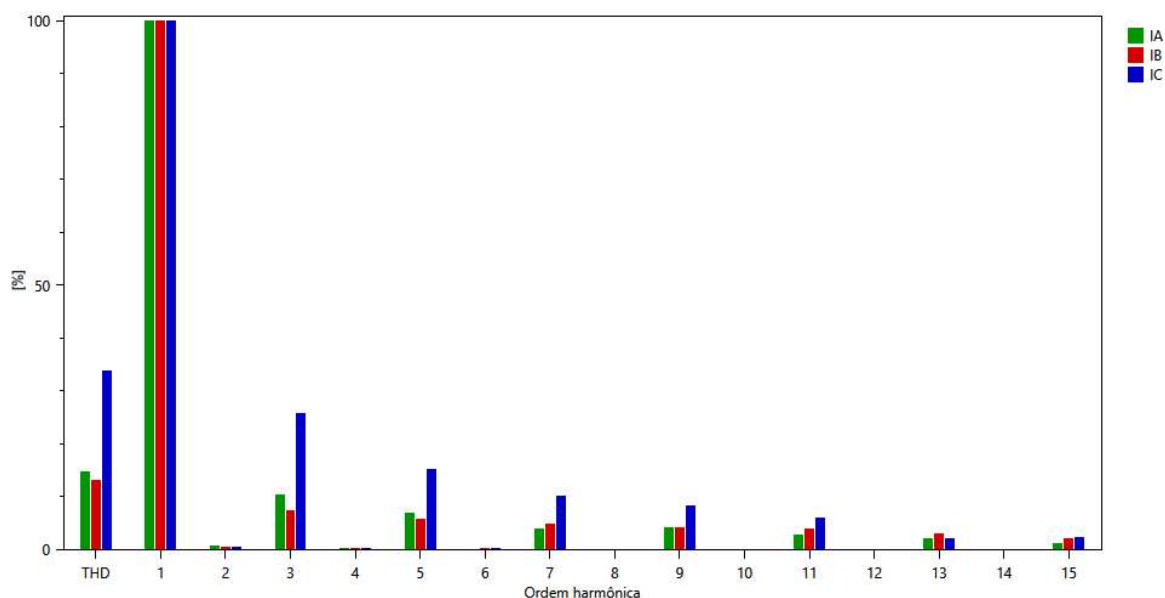
Gráfico 54 – Reconstrução da forma de onda de corrente do ciclo 3 (29/04/2024 07:30 hrs)



Fonte: Autoria Própria (2024)

Como esperado, por conta dos grandes valores de distorções harmônicas de corrente apresentados anteriormente para os 3 ciclos, o formato das ondas de corrente sofreu alterações bastante significativas, em específico para a fase C, que em alguns momentos apresenta um formato mais próximo de uma onda quadrada do que uma senoidal, já as fases A e B, apesar de manterem um formato mais próximo a de uma senoide, possuem claras distorções em todos os 3 ciclos.

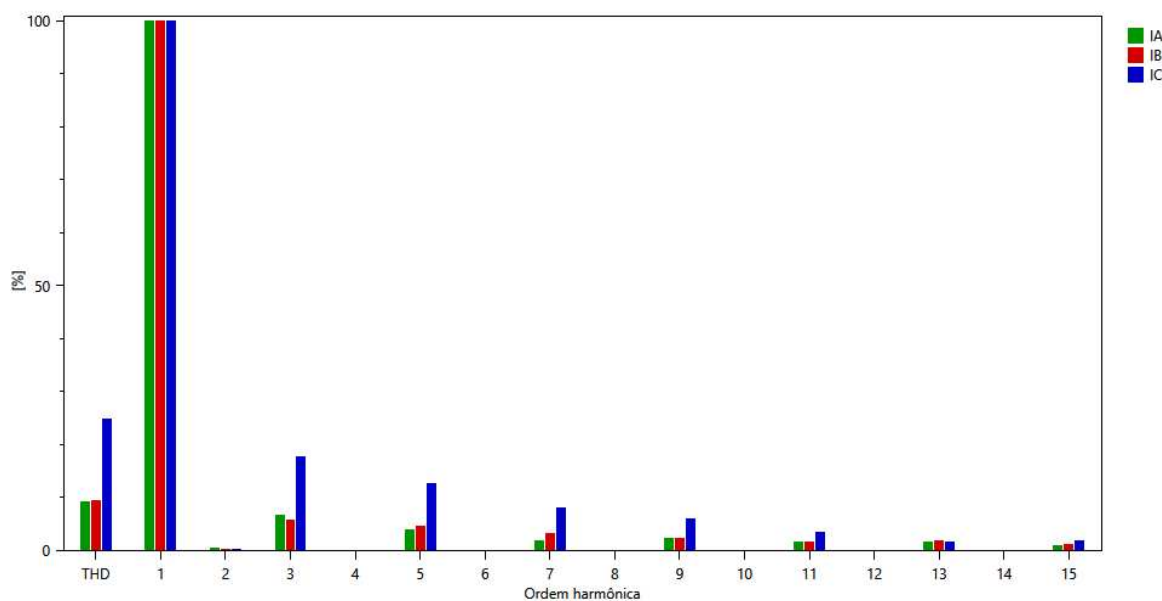
Gráfico 55 – Harmônicos de corrente do ciclo 1 (29/02/2024 15:50 hrs)



Fonte: Autoria Própria (2024)

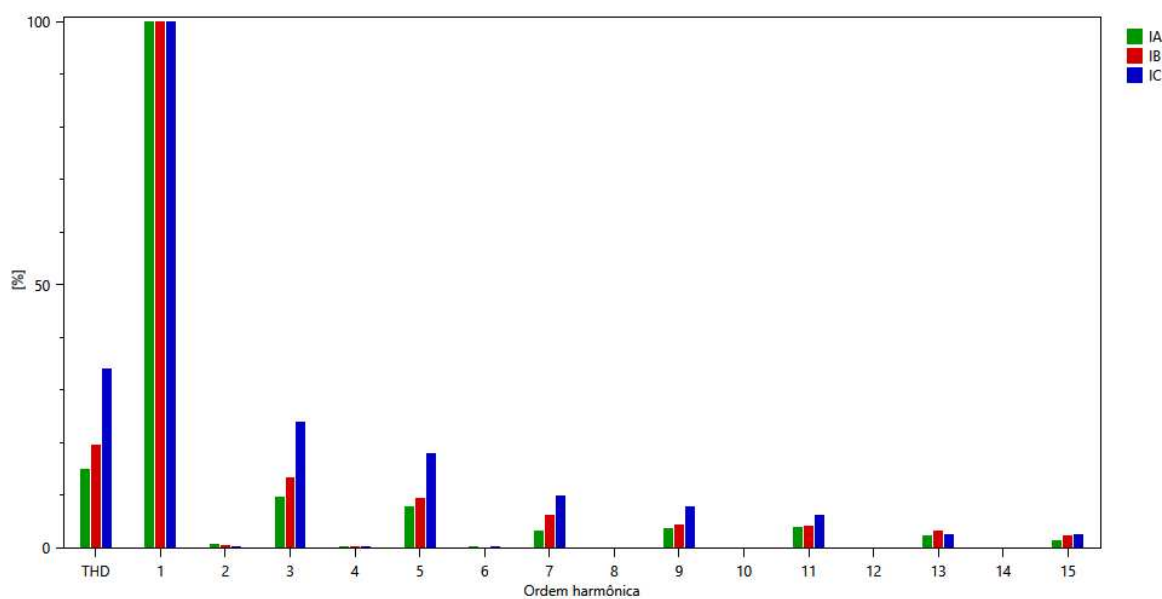
Nos Gráficos 55, 56 e 57, estão representados os níveis de distorção de corrente, apresentando as componentes de ordem harmônicas individuais, que mostram os valores bem maiores que os de distorção de tensão, principalmente com relação a componente de fase C, como já foi indicado pelas medições de harmônicas pelo tempo apresentadas anteriormente.

Gráfico 56 – Harmônicos de corrente do ciclo 2 (03/04/2024 07:00 hrs)



Fonte: Autoria Própria (2024)

Gráfico 57 – Harmônicos de corrente do ciclo 3 (29/04/2024 07:30 hrs)



Fonte: Autoria Própria (2024)

De forma semelhante as distorções de tensão, nas de corrente observa-se que as ordens harmônicas que mais contribuíram com a distorção total foram as de ordem ímpar, porém com a diferença, nesse caso, de que as componentes múltiplas de 3 também seguiram com a tendência do gráfico.

Assim, com o detalhamento dos valores das distorções harmônicas pode-se confirmar as diferenças de escala e quais ordens contribuíram mais para as distorções apresentadas, enquanto que com os gráficos de reconstrução das ondas, fica mais evidente os efeitos das distorções apontadas pelos indicadores obtidos através das medições, ressaltando que, mesmo em conformidade com os parâmetros definidos pela ANEEL, outras perturbações estão presentes no sistema, que podem causar uma falta de confiabilidade e eficiência.

6 CONCLUSÃO

A análise de qualidade de energia é uma metodologia, que permite observar de forma mais objetiva as grandezas elétricas que um sistema apresenta, indicando a conformidade dos valores obtidos através de medições com os valores nominais determinados pela norma regente.

Com a realização desse estudo pode-se determinar se a energia elétrica fornecida pela concessionária está de acordo com o que se é estipulado, possibilitando que o consumidor exija a correção de possíveis problemas apresentados, além de evidenciar possíveis problemas dentro da própria instalação, permitindo o ajuste do mesmo, o tornando mais confiável e eficiente.

Com relação aos dados obtidos através dos 3 ciclos de medição do bloco de computação, a maior parte dos fenômenos estudados apresentaram resultados bastante satisfatórios, referente ao que é determinado pelo PRODIST.

Para análise da variação de tensão em regime permanente foi observado que dentre todas os 5176 registros, dos 3 ciclos somados, apenas 1 apresentou um valor fora da faixa adequada de tensão para o sistema, atendendo aos indicadores determinados para a análise.

Com relação as distorções harmônicas de tensão, o maior valor obtido foi de 2,118%, bem abaixo dos 5% limites para a validação do indicador. Da mesma forma o maior valor obtido para o desequilíbrio de tensão foi de 0,321%, em que o limite previsto também é de 5%.

Já para a variação de frequência, alguns valores apresentados indicam uma possível irregularidade, mas por conta de a faixa de tempo utilizada na medição ser de 10 minutos, não é possível realizar uma análise mais aprofundada desse fenômeno perante a todas as exigências da norma, apesar disso, os valores indicam que, mesmo onde os resultados apresentaram valores fora dos limites determinados, as variações apresentaram valores baixos em eventos isolados.

Uma grande parte dos valores apresentados pelas medidas do fator de potência estiveram efetivamente fora dos limites definidos pela norma, onde apenas a fase A apresentou valores dentro do intervalo determinado por todas as medições, ao contrário da fase B em que todos ultrapassaram o limite indutivo, enquanto a fase C oscilou entre as duas faixas. Apesar disso, em se tratando do fator de potência, os

valores só são avaliados no ponto de alimentação da unidade consumidora, assim os valores apresentados não indicam um problema a ser solucionado, pois o ponto de medição não estava situado em tal ponto.

Por conta de não haver registros dos fenômenos de flutuação de tensão e de variação de tensão de curta duração, não foi possível realizar análise de tais eventos desse tipo.

Apesar do PRODIST não apresentar indicadores para a análise de distorções harmônicas de corrente, é perceptível que esse fenômeno apresentou efeitos significativos no sistema, comprometendo o formato das ondas de corrente, mais em específico para com a fase C, onde o seu valor máximo atingiu 34,132%. Apesar de não ser possível avaliar com base na norma referente ao estudo realizado, pode-se afirmar que esse foi o fenômeno que mais apresentou desvio de acordo com o que seria definido como o nominal do que se espera no sistema.

Com base no que é descrito pela ANEEL no módulo 8 do PRODIST, foi possível determinar quais os fenômenos deveriam ser analisados, bem como seus respectivos indicadores, assim, com o auxílio do equipamento PowerNET P-600 G4 e do software PowerMANAGER desktop, as grandes as determinadas foram registradas, de acordo com a norma, e salvas, permitindo que esses registros fossem comparados com os limites definidos, podendo assim realizar a análise de qualidade de energia do bloco de computação da universidade. Ao final foi perceptível que para os parâmetros nacionais as medidas foram satisfatórias, mas apresentou distorções harmônicas de correntes com valores bastante elevados.

Através dos resultados obtidos pode-se apontar a necessidade da realização de estudos mais aprofundados com relação as harmônicas de corrente, através da determinação da fonte dessas distorções, possíveis impactos que essas apresentam no sistema e formas de reduzi-las a fim de tornar a onda de corrente mais próxima a nominal. Outros trabalhos também podem ser feitos seguindo a metodologia apresentada para outros blocos ou conjuntos de blocos presentes na instalação do campus.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST**; Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica. [S.l.]: ANEEL, 2021.

CAPELLI, Alexandre. **Energia Elétrica: Qualidade e Eficiência para Aplicações Industriais**. 1.ed. São Paulo: Érica Ltda., 2013. 272p.

DECKMANN, Sigmar Maurer; POMILIO, José Antenor. **IT - 012: Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. 1.ed. Campinas: DSE/FEEC/UNICAMP., 2020. 198p.

DUGAN, Roger C.; MCGRANAGHAN, Mark F.; SANTORO, Surya; BEATY, H. Wayne. **Power Systems Quality**. 2.ed. McGraw-Hill., 2003. 521p.

FERREIRA FILHO, Anésio de Leles. **Análise do comportamento do fator de desequilíbrio frente a variação da amplitude e do ângulo da tensão**. 2008. 163f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

IMS. **PowerNET P-600 G4: Analisador Portátil de Grandezas Elétricas**. Porto Alegre: IMS, 2020, 140p.

JUNIOR, Arnaldo José Pereira Rosentino. **Uma Contribuição para Análise do Fenômeno das Flutuações de Tensão nos Sistemas Elétricos de Potência**. 2014. 157f. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia 2014.

KAGAN, Nelson. **Estimação de indicadores de qualidade da energia elétrica**. 6.ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 2009. 230p.

MARTINHO, Edson. **Distúrbios da Energia Elétrica**. 3.ed. São Paulo: Editora Érica Ltda., 2013. 142p.

MORENO, Hilton. **Como calcular filtros passivos de harmônicas**. São Caetano do Sul. 2021. E-book (22p.). Disponível em: <https://revistapotencia.com.br/e-books/>. Acesso em: 10 abr. 2024.