

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BEATRIZ KARINE ALVES DE OLIVEIRA

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DE QUALIDADE DE ENERGIA EM UM
SISTEMA FOTOVOLTAICO DA UFERSA *CAMPUS* PAU DOS FERROS**

CARAÚBAS/RN

2023

BEATRIZ KARINE ALVES DE OLIVEIRA

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DE QUALIDADE DE ENERGIA EM UM
SISTEMA FOTOVOLTAICO DA UFRSA *CAMPUS* PAU DOS FERROS**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof^a. Dra. Sâmara de Cavalcante Paiva

CARAÚBAS/RN

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

0048a Oliveira, Beatriz Karine Alves de.
Análise Estatística de Qualidade de Energia em
um Sistema Fotovoltaico da UFERSA Campus Pau dos
Ferro / Beatriz Karine Alves de Oliveira. - 2023.
80 f. : il.

Orientadora: Sâmara de Cavalcante Paiva.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Elétrica, 2023.

1. Qualidade de energia elétrica. 2. Sistemas
fotovoltaicos. 3. PRODIST. 4. Análises
estatísticas. 5. Kruskal-Wallis. I. Paiva, Sâmara
de Cavalcante , orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

BEATRIZ KARINE ALVES DE OLIVEIRA

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DE QUALIDADE DE ENERGIA EM UM
SISTEMA FOTOVOLTAICO DA UFERSA CAMPUS PAU DOS FERROS**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Elétrica.

CARAÚBAS/RN, 13 de Outubro de 2023:

Documento assinado digitalmente
 **SAMARA DE CAVALCANTE PAIVA**
Data: 18/10/2023 09:08:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª. Dra. Sâmara de Cavalcante Paiva

Documento assinado digitalmente
 **ANTONIO ALISSON ALENCAR FREITAS**
Data: 17/10/2023 09:50:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Antônio Alisson Alencar Freitas

Membro Examinador
Documento assinado digitalmente
 **CECILIO MARTINS DE SOUSA NETO**
Data: 13/10/2023 18:55:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Cecílio Martins de Sousa Neto

Membro Examinador
Documento assinado digitalmente
 **DENIS KEUTON ALVES**
Data: 14/10/2023 12:50:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Denis Keuton Alves

Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por tudo e por toda minha vida.

À minha família por todo apoio e amor, em especial aos meus pais, Benedito de Oliveira Neto e Francilene Alves da Costa. Agradeço também ao meu irmão, Bruno Fabrício Alves de Oliveira, obrigada por toda força.

Ao meu namorado, Joerdson Tiago Batista da Silva, por todo suporte emocional e paciência durante os momentos difíceis. Agradeço também a sua família, Jessica Murielly, Jacson Soares, Jailma Batista e Francisco de Assis.

À minha orientadora, professora Sâmara de Cavalcante Paiva pela dedicada orientação e o apoio em todas as etapas da realização desse trabalho.

Às minhas boas amigas Alicia Mayra, Erika Oliveira e Lorena Coringa, agradeço pela amizade sincera e toda ajuda durante a graduação.

Aos meus amigos Francisco Carlos e Marcio Dantas, obrigada pela amizade sincera e todo apoio.

RESUMO

No contexto atual, a integração cada vez mais ampla de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica tem experimentado um notável crescimento. Esse avanço tem gerado preocupações relacionadas ao possível impacto na qualidade da energia elétrica fornecida. Com base nesse cenário, o presente estudo tem como objetivo avaliar os parâmetros elétricos de uma central fotovoltaica, com capacidade de pico de 38.34 kWp, instalada em um edifício destinado a um almoxarifado localizado no *campus* da UFERSA, na cidade de Pau dos Ferros/RN. Para alcançar esse propósito, foram utilizados os indicadores descritos no módulo 8 do PRODIST para fins de comparação, além da aplicação de ferramentas estatísticas, como análises descritivas e o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis com *post hoc* de Dunn-Bonferroni. Os resultados obtidos permitiram identificar padrões e anomalias, sendo a alteração mais significativa observada no comportamento dos valores de tensão em regime permanente.

Palavras-chave: Qualidade de energia elétrica, Sistemas fotovoltaicos, PRODIST, Análises estatísticas, Kruskal-Wallis.

ABSTRACT

In the current context, the increasingly widespread integration of photovoltaic systems into the electrical grid has witnessed notable growth. This advancement has raised concerns regarding the potential impact on the quality of the supplied electrical energy. Against this backdrop, the present study aims to assess the electrical parameters of a photovoltaic plant with a peak capacity of 38.34 kWp, installed on a building designated as a warehouse located on the UFERSA campus in Pau dos Ferros/RN. To achieve this objective, indicators described in Module 8 of PRODIST were utilized for comparison, along with the application of statistical tools such as descriptive analyses and the non-parametric Kruskal-Wallis test with Dunn-Bonferroni post hoc analysis. The obtained results allowed for the identification of patterns and anomalies, with the most significant alteration observed in the behavior of voltage values under steady-state conditions.

Keywords: Electrical power quality, Photovoltaic systems, PRODIST, Statistical analyses, Kruskal-Wallis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Evolução do emprego global em energias renováveis, 2012-2022.	14
Figura 2.1 – Esquema simplificado da integração da geração distribuída com a concessionária.	19
Figura 2.2 – Diagrama para testes de hipóteses.	26
Figura 3.1 – Localização do prédio do Almoxarifado na UFERSA - Pau dos Ferros.	32
Figura 3.2 – Analisador PowerNET M-300.	33
Figura 3.3 – Terminais do PowerNET M-300.	34
Figura 3.4 – Instalação do PowerNET M-300.	34
Figura 3.5 – Pacote <i>Real Statistics</i> no Excel.	36
Figura 3.6 – Análise descritiva.	36
Figura 3.7 – Teste de Kruskal-Wallis com <i>post hoc</i> de Dunn-Bonferroni.	37
Figura 4.1 – Gráficos das tensões nas fases - Dia 08/08/2023.	40
Figura 4.2 – Gráficos das tensões nas linhas - Dia 08/08/2023.	43
Figura 4.3 – Fator de desequilíbrio de tensão - Dia 08/08/2023.	44
Figura 4.4 – Gráficos das correntes nas fases - Dia 08/08/2023.	45
Figura 4.5 – Gráficos das DHT das tensões nas fases - Dia 08/08/2023.	47
Figura 4.6 – Gráfico das frequências do sistema - Dia 08/08/2023.	49
Figura 4.7 – Gráfico das potências nas fases - Dia 08/08/2023.	50
Figura 4.8 – Gráficos das tensões mínimas nas fases - Dia 09/08 até 14/08.	54
Figura 4.9 – Gráficos das tensões RMS nas fases - Dias 09/08 até 14/08.	55
Figura 4.10–Gráficos das tensões máximas nas fases - Dias 09/08 até 14/08.	55
Figura 4.11–Gráficos das tensões mínimas nas linhas - Dia 09/08 até 14/08.	59
Figura 4.12–Gráficos das tensões RMS nas linhas - Dia 09/08 até 14/08.	59
Figura 4.13–Gráficos das tensões máximas nas linhas - Dias 09/08 até 14/08.	60
Figura 4.14–Fator desequilíbrio de tensão - Dia 09/08 até 14/08.	61
Figura 4.15–Gráficos das correntes mínimas nas fases - Dias 09/08 até 14/08.	64
Figura 4.16–Gráficos das correntes RMS nas fases - Dias 09/08 até 14/08.	64
Figura 4.17–Gráficos das correntes máximas nas fases - Dias 09/08 até 14/08	65
Figura 4.18–Gráficos das DHT das tensões RMS nas fases - Dias 09/08 até 14/08.	69
Figura 4.19–Gráficos das DHT das tensões máximas nas fases - Dias 09/08 até 14/08.	69
Figura 4.20–Gráficos das frequências do sistema - Dias 09/08 até 14/08.	72
Figura 4.21–Gráficos das potências ativas nas fases - Dia 09/08 até 14/08.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220)	21
Tabela 2.2 – Limites de distorção harmônica total	22
Tabela 2.3 – Limites para os desequilíbrios de tensão	23
Tabela 2.4 – Amostra fictícia de tensões nas linhas.	27
Tabela 2.5 – Ordenação dos valores em postos.	27
Tabela 2.6 – Definição dos postos em cada observação.	28
Tabela 2.7 – Parâmetros para o cálculo estatísticos do teste de Kruskal-Wallis.	28
Tabela 2.8 – <i>Post hoc</i> de Dunn-Bonferroni aplicado aos dados de tensões nas linhas.	31
Tabela 4.1 – Análise descritiva das tensões nas fases (V).	38
Tabela 4.2 – Teste de Kruskal-Wallis das tensões nas fases.	39
Tabela 4.3 – Teste de Dunn-Bonferroni das tensões nas fases.	40
Tabela 4.4 – Análise descritiva das tensões nas linhas (V).	41
Tabela 4.5 – Teste de Kruskal-Wallis tensões nas linhas.	42
Tabela 4.6 – Teste de Dunn-Bonferroni das tensões nas linhas.	42
Tabela 4.7 – Análise descritiva das correntes nas fases (A).	44
Tabela 4.8 – Teste de Kruskal-Wallis das correntes nas fases.	45
Tabela 4.9 – DHT das tensões nas fases (%).	46
Tabela 4.10–Teste de Kruskal-Wallis das DHTV nas fases.	47
Tabela 4.11–Análise descritiva das frequências no sistema (Hz).	48
Tabela 4.12–Teste Kruskal-Wallis das frequências.	48
Tabela 4.13–Teste de Dunn-Bonferroni das frequências.	48
Tabela 4.14–Análise descritiva das potências nas fases (W).	49
Tabela 4.15–Teste de Kruskal-Wallis das potências nas fases.	50
Tabela 4.16–Análise descritiva das tensões nas fases - Dias 09/08 até 14/08.	51
Tabela 4.17–Teste de Kruskal-Wallis das tensões nas fases - Dias 09/08 até 14/08.	52
Tabela 4.18–Teste de Dunn-Bonferroni das tensões nas fases - Dias 09/08 até 14/08.	53
Tabela 4.19–Análise descritiva das tensões nas linhas (V) - Dia 09/08 até 14/08.	56
Tabela 4.20–Teste de Kruskal-Wallis das tensões nas linhas - Dias 09/08 até 14/08.	57
Tabela 4.21–Teste de Dunn-Bonferroni das tensões nas linhas - Dias 09/08 até 14/08.	58
Tabela 4.22–Análise descritiva das correntes nas fases (A) - Dia 09/08 até 14/08.	62
Tabela 4.23–Teste de Kruskal-Wallis das correntes nas fases - Dias 09/08 até 14/08.	63
Tabela 4.24–Análise descritiva das DHT das tensões nas fases (%).	66
Tabela 4.25–Teste de Kruskal-Wallis das DHT das tensões nas fases - Dias 09/08 até 14/08.	67
Tabela 4.26–Teste Dunn-Bonferroni das DHT das tensões nas fases - Dias 09/08 até 14/08.	68
Tabela 4.27–Análise descritiva das frequências no sistema (Hz).	70
Tabela 4.28–Teste de Kruskal-Wallis das frequências - Dias 09/08 até 14/08.	71

Tabela 4.29–Teste de Dunn-Bonferroni das frequências - Dias 09/08 até 14/08.	71
Tabela 4.30–Análise descritiva das potências ativas nas fases (W).	73
Tabela 4.31–Teste de Kruskal-Wallis das potências ativas nas fases - Dias 09/08 até 14/08.	73

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANOVA	Análise de Variância
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CV	Coeficientes de Variação
DP	Desvio Padrão
DHT	Distorção Harmônica Total
FD	Fator de Desequilíbrio de Tensão
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IRENA	Agência Internacional de Energia Renovável
Med	Mediana
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PRODIST	Regulamentação e Procedimentos de Distribuição
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RN	Rio Grande do Norte
SIN	Sistema Interligado Nacional
TA	Tensão de Atendimento
TL	Tensão de Leitura
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
VTCD	Variações de Tensão de Curta Duração

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Nível de significância (Alpha)
β	Beta
C_H	Fator de correção
DHT_{Va}	Distorção harmônica Total de tensão na fase A
DHT_{Vb}	Distorção harmônica Total de tensão na fase B
DHT_{Vc}	Distorção harmônica Total de tensão na fase C
gl	Grau de liberdade
H_1	Hipótese alternativa
H_0	Hipótese nula
$H_{calculado}$	Estatística de Kruskal-Wallis calculada
$H_{corrigido}$	Estatística de Kruskal-Wallis corrigida
I_{an}	Corrente na fase A
I_{bn}	Corrente na fase B
I_{cn}	Corrente na fase C
n	Número de observações
N	Somas das observações nos grupos
P_a	Potência ativa na fase A
P_b	Potência ativa na fase B
P_c	Potência ativa na fase C
R_i	Soma dos postos
U_{ab}	Tensão na linha AB
U_{bc}	Tensão na linha BC
U_{ca}	Tensão na linha CA
V_{an}	Tensão na fase A

V_{bn}	Tensão na fase B
V_{cn}	Tensão na fase C
$\overline{X}$	Média
x_i	i-ésima observação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
1.3	METODOLOGIA DO TRABALHO	16
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO	18
2.1	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA INTEGRADA À REDE	18
2.1.1	Considerações sobre os Painéis Fotovoltaicos	19
2.1.2	Considerações sobre os Inversores	20
2.2	QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	20
2.2.1	Tensão em Regime Permanente	21
2.2.2	Distorções Harmônicas Totais	21
2.2.3	Desequilíbrio de Tensão	22
2.2.4	Variação de Frequência	23
2.3	TÉCNICAS PARA ANÁLISE DE DADOS	23
2.3.1	Análise Descritiva Quantitativa	24
2.3.2	Teste Estatísticos	25
3	ESTUDO DE CASO	32
3.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	32
3.2	LEVANTAMENTO E COLETA DOS DADOS	32
3.3	PROCESSAMENTO DOS DADOS	35
3.4	ANÁLISE DOS DADOS	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1	RESULTADOS DO PRIMEIRO DIA	38
4.1.1	Tensão em regime permanente (Fase-Neutro)	38
4.1.2	Tensão em regime permanente (Fase-Fase)	41
4.1.3	Avaliação do Desequilíbrio de Tensão	43
4.1.4	Comportamento das Correntes nas Fases	44
4.1.5	Distorções Harmônicas Totais das Tensões nas Fases	46
4.1.6	Frequências no Sistema Elétrico	47
4.1.7	Potência Ativa nas Fases	49
4.2	RESULTADOS DE SEIS DIAS DA SEMANA	50
4.2.1	Tensão em regime permanente (Fase-Neutro)	50
4.2.2	Tensão em regime permanente (Fase-Fase)	55

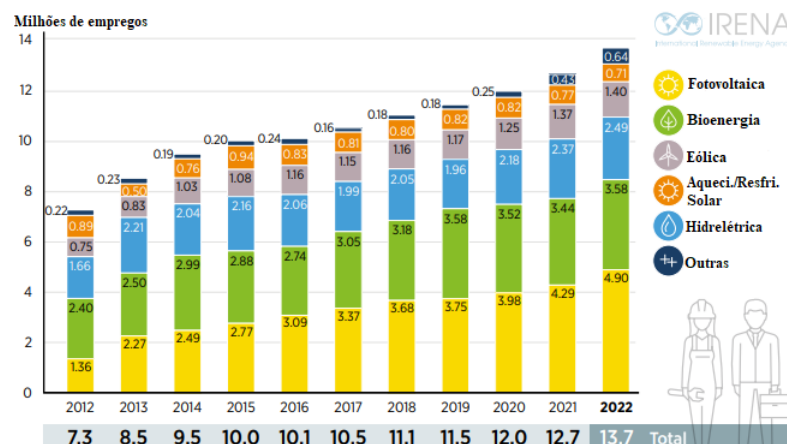
4.2.3	Avaliação do Desequilíbrio de Tensão	60
4.2.4	Comportamento das Correntes nas Fases	61
4.2.5	Distorção Harmônica Total das Tensões nas Fases	65
4.2.6	Comportamento das Frequências no Sistema Elétrico	70
4.2.7	Potências Ativas nas Fases	72
5	CONCLUSÃO	75
5.1	TRABALHOS FUTUROS	76
	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes de energia sustentáveis tem impulsionado a transição energética global em direção a um cenário fundamentado por fontes limpas e renováveis (OTONI, 2023). Conforme reportado pela ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), a ascensão da geração solar e eólica no Sistema Interligado Nacional (SIN) apresenta não apenas oportunidades promissoras, mas também desafios significativos (ONS, 2022).

No que diz respeito às oportunidades, destaca-se a projeção de expansão de empregos no setor de energias renováveis. Segundo dados da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), em 2022, esse setor alcançou um marco global de 13,7 milhões de empregos. Este crescimento expressivo concentra-se especialmente em países como China, Brasil e na União Europeia. No ano em questão, a energia solar fotovoltaica despontou como o segmento que mais contribuiu para o emprego, totalizando cerca de 4,9 milhões de postos de trabalho, conforme ilustrado na Figura 1.1 (IRENA, 2023).

Figura 1.1 – Evolução do emprego global em energias renováveis, 2012-2022.



Fonte: adaptado de IRENA (2023).

No entanto, apesar desses avanços, os desafios enfrentados estão intrinsecamente ligados à eficiente integração da geração solar e eólica no SIN. Com isso, torna-se imprescindível modernizar o setor elétrico, especialmente no que diz respeito à expansão da infraestrutura necessária para acomodar a crescente contribuição das fontes de energia renováveis, conforme relatado pela ONS (2022).

Uma das preocupações mais significativas está relacionada à qualidade da energia elétrica (QEE) fornecida pelos sistemas fotovoltaicos integrados à rede de distribuição. Isso decorre da necessidade de empregar conversores de potência para a conexão das usinas à rede elétrica. Estes conversores são compostos por dispositivos semicondutores, os quais, por sua vez, podem

introduzir distorções nas formas de onda de tensão e corrente, impactando negativamente a QEE fornecida (NUNES, 2017; ROCHA, 2015).

De acordo com Rocha (2015), as redes de distribuição de baixa tensão estão mais suscetíveis a problemas como perturbações nas amplitudes da tensão, variações na frequência, desequilíbrio de tensão e/ou correntes em sistemas trifásicos, distorções na forma de onda da corrente e/ou tensão, entre outros eventos. Diante desse cenário, é essencial que as concessionárias de cada região supervisionem atentamente se as gerações fotovoltaicas integradas à rede estão em conformidade com os requisitos estabelecidos pelas normas de regulação de QEE (NUNES, 2017).

Diversas normas estabelecem parâmetros e indicadores QEE, sendo que, conforme apontado por Nunes (2017), cada país tem a autonomia de escolher aquela que melhor se adequa. No caso do Brasil, o embasamento para tais critérios encontra-se no Módulo 8 da Regulamentação e Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Além disso, de acordo com a região do país, é necessário observar as normas específicas das concessionárias. No Rio Grande do Norte (RN), por exemplo, para a instalação de microgeração na rede de baixa tensão, segue-se a norma DIS-NOR-031 do grupo Neoenergia.

Diante desse cenário, à medida que a integração de fontes renováveis nas redes de distribuição de energia elétrica no Brasil cresce, torna-se necessário conduzir pesquisas relacionadas ao potencial impacto na qualidade, estabilidade e confiabilidade dessas gerações na energia elétrica fornecida.

1.1 JUSTIFICATIVA

A realização deste estudo sobre a QEE em um sistema fotovoltaico é motivada pela crescente relevância dessa fonte de energia renovável na matriz elétrica global. Com o aumento na adoção de sistemas fotovoltaicos, torna-se essencial compreender e otimizar a QEE gerada por esses sistemas. Assim, a QEE desempenha um papel importante no funcionamento eficiente e seguro de dispositivos eletrônicos, bem como de cargas em geral conectadas à rede. Dado que a QEE é importante para a operação normal dos equipamentos, a presença de fatores como variações de tensão, distorções harmônicas e interrupções pode ter impactos negativos não apenas na eficiência imediata, mas também na vida útil dos dispositivos. Este estudo busca, portanto, avaliar de forma abrangente a QEE fornecida por um sistema fotovoltaico ao longo de uma semana, com o intuito de observar o comportamento da usina integrada à rede elétrica.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O presente estudo objetiva desenvolver uma avaliação da QEE de uma central fotovoltaica, com capacidade de 38.34 kWp, conectada à rede de baixa tensão de um edifício localizado no *campus* da UFERSA, na cidade de Pau dos Ferros/RN.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar coleta de dados, durante um período de 7 dias, referente aos indicadores de qualidade de energia, utilizando o analisador da empresa IMS -*Power Quality*, modelo PowerNET M-300;
- Realizar o levantamento bibliográfico sobre os parâmetros analisados no estudo de QEE;
- Realizar o levantamento bibliográfico das normas e regulamentos sobre os limites aceitáveis de operação;
- Analisar os dados relacionados a tensão em regime permanente, distorções harmônicas totais de tensão, desequilíbrio de tensão, variação de frequência e potência ativa nas fases;
- Utilizar ferramentas computacionais para realizar testes estatísticos e análises gráficas, com o intuito de observar o comportamento dos parâmetros elétricos da usina fotovoltaica integrada à rede;
- Utilizando abordagens estatísticas, busca-se analisar os parâmetros elétricos diariamente ao longo de uma semana, com o propósito de identificar padrões, tendências e anomalias em cada dia analisado;
- Comparar os resultados obtidos com os limites dos indicadores estipulados no Módulo 8 do PRODIST e a norma DIS-NOR-031 da Neoenergia.

1.3 METODOLOGIA DO TRABALHO

O estudo proposto neste trabalho foi desenvolvida de acordo com a seguinte metodologia:

- Levantamento bibliográfico relacionado aos indicadores de QEE definidos em normas;
- Análise teórica do impacto das usinas fotovoltaicas integradas à rede na QEE.

- Especificação dos detalhes técnicos do sistema de geração fotovoltaica, objeto de estudo;
- Coleta, processamento e análise de dados relacionados aos parâmetros de QEE;
- Estudo teórico sobre as melhores metodologias estatísticas aplicadas a dados de QEE;

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- No segundo capítulo, são apresentados os conhecimentos acadêmicos relacionados a avaliação de QEE e as técnicas estatísticas aplicadas para esse fim;
- No terceiro capítulo, são abordados os aspectos metodológicos, apresentando uma breve descrição da usina fotovoltaica objeto de estudo, além de detalhar os procedimentos realizados durante a coleta de dados. O capítulo também apresenta como foi realizado o processamento e análise das informações obtidas;
- No quarto capítulo, são apresentados todos os resultados provenientes das análises gráficas e estatísticas realizadas;
- No quinto capítulo, são delineadas as considerações finais e conclusões, abordando a discussão dos resultados obtidos e apresentando sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO

Nas próximas seções, serão abordados os conceitos essenciais que contextualizam o trabalho. Será dada ênfase à integração da energia elétrica fotovoltaica na rede de distribuição, que representa a matriz elétrica principal deste estudo. Além disso, serão abordadas as normas e regulamentações que estabelecem os limites ou valores de referência para a QEE fornecida pelos sistemas de geração distribuída. Por último, serão discutidas às técnicas estatísticas que podem ser utilizadas para encontrar padrões e tendências, bem como quantificar o desempenho da QEE.

2.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA INTEGRADA À REDE

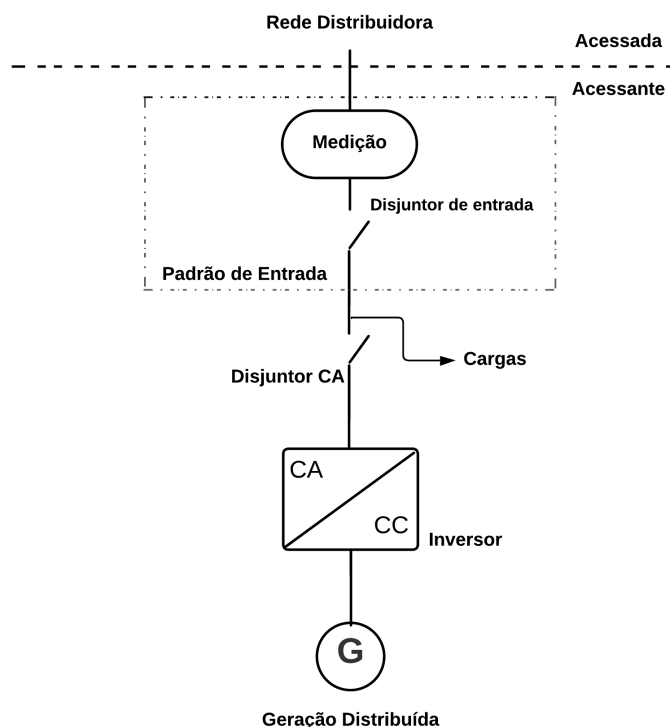
No Brasil, a energia solar está se tornando cada vez mais usual e a configuração predominante das usinas fotovoltaicas envolve a geração de energia solar conectada à rede de distribuição elétrica, conhecido como sistema *on-grid*. De acordo com Solar (2022), no ano de 2022, o Brasil alcançou a 8º posição no *ranking* mundial com 1.890, 095 usinas conectadas à rede. Segundo Federal (2021), estima-se que a participação das fontes renováveis na matriz elétrica deve chegar a 85% em 2050.

O sistema *on-grid* utiliza a conexão com a rede de transmissão para injetar a energia produzida em excesso, a qual será registrada pelo medidor de energia, quando não for consumida imediatamente pela carga. Para assegurar uma integração eficiente, é crucial seguir as normas e regulamentações das concessionárias nas quais as usinas fotovoltaicas serão instaladas. No Rio Grande do Norte (RN) a DIS-NOR-031 é a referência que fornece as orientações técnicas para as novas conexões para microgeradores.

A Figura 2.1 exibe um esquema simplificado que esclarece as conexões essenciais entre as usinas fotovoltaicas e a rede de distribuição, como mencionado em Neoenergia (2022). O consumidor, atuando como parte acessante, desempenha o papel de exportador de energia, cujas instalações se conectam ao sistema elétrico da parte acessada, que é a distribuidora de energia. Toda a energia não consumida imediatamente será injetada na rede e registrada pelo medidor de energia.

Diante do crescimento da utilização desse sistema, torne-se essencial realizar pesquisas voltadas para a análise da qualidade tanto dos materiais empregados quanto da energia gerada pelas usinas fotovoltaicas. No que diz respeito aos materiais, as centrais geradoras são tipicamente compostas por arranjos fotovoltaicos, formados por módulos fotovoltaicos organizados em diferentes configurações, juntamente com inversores. A integração do sistema fotovoltaico à rede ocorre por meio de dispositivos de proteção e montagem (BARTH, 2023).

Figura 2.1 – Esquema simplificado da integração da geração distribuída com a concessionária.



Fonte: adaptado de (NEOENERGIA, 2022).

2.1.1 Considerações sobre os Painéis Fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos, também conhecidos como módulos fotovoltaicos, desempenham um papel central nos sistemas fotovoltaicos. Eles têm a capacidade de converter a energia luminosa do sol em energia elétrica. Esses painéis são construídos a partir de materiais semicondutores que, ao interagirem com os fótons da luz solar, geram corrente contínua (CC) (VIEIRA, 2023).

Normalmente, os módulos são arranjados com o intuito de se aproveitar ao máximo a capacidade de fornecimento de potência do sistema fotovoltaico. Diante disso, o conjunto de painéis são habitualmente ligados em série, em que as tensões serão somadas e as correntes que irão circular nos dispositivos disporão de valores idênticos (MATIAS; CARDOSO, 2023).

A instalação de painéis fotovoltaicos pode ser realizada em diversas estruturas, incluindo telhados e terrenos. No entanto, é crucial garantir uma instalação adequada para assegurar o desempenho ideal. A proximidade de objetos que causam sombreamento, como árvores ou edifícios, pode prejudicar a geração e afetar a qualidade da energia, levando a variações nos parâmetros elétricos da usina (BARTH, 2023).

2.1.2 Considerações sobre os Inversores

No contexto das centrais de geração fotovoltaica, os inversores desempenham um papel essencial. Eles têm a responsabilidade fundamental de converter a CC gerada pelos painéis fotovoltaicos em corrente alternada (CA). Essa conversão é crucial, uma vez que a maioria dos equipamentos utilizados nas unidades consumidoras opera exclusivamente com CA. Portanto, a importância dos inversores nas instalações das centrais de geração fotovoltaica reside na capacidade de fazer a interface direta com a rede de distribuição, alimentando todas as cargas conectadas ao sistema de transmissão.

No mercado atual, existem diversos tipos de inversores, cada um com suas próprias vantagens. Quando se trata de QEE, os inversores de onda senoidal são considerados os mais eficazes (BARTH, 2023). De acordo com a pesquisa de Barth (2023), esses dispositivos produzem uma CA sem distorção harmônica significativa, apresentando uma forma de onda praticamente idêntica à da rede elétrica.

Em um estudo mencionado por Ferreira (2016), foi observado que os inversores trifásicos são projetados para manter uma corrente de sequência positiva, mesmo quando as tensões das fases estão desequilibradas. Isso significa que, nessas condições, os inversores conseguem continuar gerando correntes equilibradas nas três fases do sistema elétrico trifásico.

Atualmente, os inversores devem possuir a função anti-ilhamento que, segundo Neoenergia (2022), o dispositivo deve deixar de injetar energia na rede elétrica quando estiver fora dos indicadores de normalidade de tensão e/ou frequência. Esse recurso é necessário para garantir a segurança da unidade consumidora e de pessoas em serviços de manutenção na rede elétrica.

2.2 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Há muito tempo, a energia elétrica já desempenhava um papel crucial em todas as atividades do dia a dia da população, gerando uma crescente preocupação com a qualidade do produto fornecido. Como resposta a essa preocupação, tornou-se necessário o desenvolvimento de normas e regulamentações que estabelecessem indicadores e valores de referência para os parâmetros elétricos, com o objetivo de manter a QEE nas diversas gerações de eletricidade (MEHL, 2012).

Nesse contexto, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) desenvolveu regulamentos e procedimentos de distribuição, conhecidos como PRODIST. No entanto, este estudo se concentrará especificamente no Módulo 8, que trata dos indicadores de qualidade do fornecimento de energia elétrica. Logo, a análise da QEE de um sistema elétrico explora os seguintes parâmetros elétricos: tensão em regime permanente, fator de potência, distorção harmônica, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variação de frequência e variações de tensão de curta duração (VTCD).

Conforme discutido na seção anterior, a integração de energia solar na rede distribuidora tem crescido bastante nos últimos anos. Porém, por ser uma geração que depende do clima, as variações climáticas podem provocar alterações significativas na saída dos sistemas fotovoltaicos. A alteração da irradiação solar pode afetar a tensão e a corrente no ponto de conexão, afetando diretamente a QEE do sistema (RAHIMI; MOHAJERYAMI; MAJZOBI, 2016). Diante disso, é necessário realizar o monitoramento dos sistemas instalados como um método de prevenção para que o sistema atue de forma adequada. A seguir, serão apresentados alguns dos indicadores do Módulo 8 da PRODIST que serão analisados nesse estudo.

2.2.1 Tensão em Regime Permanente

Conforme indicado pela ANEEL (2022), a avaliação da tensão em regime permanente requer a coleta de dados ao longo de um intervalo de tempo específico. Essa medição deve ser efetuada no ponto de conexão entre a distribuidora de energia e a unidade consumidora. Após a coleta de dados, a análise deve ser conduzida, comparando os resultados com os valores de referência apresentados na Tabela 2.1. Nessa tabela, são destacados os limites para os níveis adequado, precário e crítico da Tensão de Leitura (TL) em regime permanente. Esses indicadores devem ser rigorosamente observados, e as medições devem ser realizadas de forma preventiva, com o objetivo de verificar a manutenção dos níveis adequados de tensão.

Tabela 2.1 – Pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(350 \leq TL \leq 399)/(220 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(331 \leq TL \leq 350 \text{ ou } 399 \leq TL \leq 403)$ $(191 \leq TL \leq 202 \text{ ou } 231 \leq TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403)/(TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: ANEEL (2022).

2.2.2 Distorções Harmônicas Totais

A distorção harmônica é responsável pela geração de correntes e tensões não senoidais devido à presença de cargas não lineares, como equipamentos eletrônicos, conectados à rede, conforme destacado por Kagan, Robba e Schmidt (2009). De acordo com Arcadepani (2021), essas deformações nas formas de onda das tensões e correntes podem desencadear consequências negativas, tais como o sobreaquecimento de capacitores, erros de medição e redução da vida útil dos equipamentos, entre outros.

O Módulo 8 do PRODIST e a norma DIS-NOR-031 da Neoenergia estabelecem os padrões para as condições normais de operação, sendo que os sistemas fotovoltaicos devem ser capazes de detectar qualquer desvio desses padrões e interromper o fornecimento de energia à

rede da distribuidora (ANEEL, 2022; NEOENERGIA, 2022). A Tabela 2.2 apresenta os valores de referência para as Distorções Harmônicas Totais (DHT) nas tensões e correntes.

Tabela 2.2 – Limites de distorção harmônica total

Distorção harmônica total	Valor de referência
Distorção harmônica total de tensão	$DHT_v < 10\%$
Distorção harmônica total de corrente	$DHT_i < 5\%$

Fonte: adaptado de ANEEL (2022), Neoenergia (2022).

2.2.3 Desequilíbrio de Tensão

Em termos gerais, o equilíbrio das tensões nas fases é caracterizado por fatores como amplitudes de valores iguais e uma defasagem de 120 graus entre elas. No entanto, a crescente integração da geração distribuída na rede elétrica nos últimos anos tem gerado preocupações significativas. De acordo com Gawlak (2017), as centrais geradoras fotovoltaicas devem monitorar rigorosamente a potência injetada em cada fase. A excedência da potência disponibilizada pela rede pode resultar em aumento da tensão, acarretando perdas no sistema e reduzindo a vida útil dos equipamentos residenciais, entre outros impactos negativos (DIEFENTHÄLER et al., 2017).

A Tabela 2.3 apresenta os limites relativos ao indicador de desequilíbrio de energia, e a Equação (2.1), conforme definida pela ANEEL (2022), permite o cálculo do Fator de Desequilíbrio de Tensão (FD) com base nos dados coletados no ponto de conexão entre a usina fotovoltaica e a rede elétrica de distribuição.

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}, \quad (2.1)$$

Sendo

$$\beta = \frac{U_{ab}^4 + U_{bc}^4 + U_{ca}^4}{(U_{ab}^2 + U_{bc}^2 + U_{ca}^2)^2}, \quad (2.2)$$

Sendo

- U_{ab} tensão de linha entre as fases A e B;
- U_{bc} tensão de linha entre as fases B e C;
- U_{ca} tensão de linha entre as fases C e A;

Tabela 2.3 – Limites para os desequilíbrios de tensão

Tensão nominal (V_n)	Valor de referência
$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$\text{FD}\% \leq 3,0\%$
$1,0 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$	$\text{FD}\% \leq 2,0\%$

Fonte: adaptado de ANEEL (2022).

2.2.4 Variação de Frequência

A variação de frequência diz respeito às oscilações nos valores da frequência fundamental. Em condições normais de operação e regime permanente, tanto o sistema de distribuição quanto a geração distribuída devem manter as frequências dentro dos limites estabelecidos no Módulo 8 do PRODIST pela ANEEL (2022), que variam de 59.9 Hz a 60.1 Hz.

Na eventualidade de distúrbios no sistema de distribuição, é essencial que as instalações de geração garantam a rápida restauração da frequência para a faixa compreendida entre 59,5 Hz e 60,5 Hz em um período não superior a 30 segundos após a ocorrência do evento. Essa medida é fundamental para viabilizar a recuperação do equilíbrio entre carga e geração no sistema, promovendo, assim, a estabilidade operacional (ANEEL, 2022).

2.3 TÉCNICAS PARA ANÁLISE DE DADOS

O entendimento da estatística é de suma importância tanto na engenharia quanto na pesquisa científica, especialmente ao lidar com conjuntos de dados. Segundo (RODRIGUES, 2011), através da interpretação adequada dos dados, é possível compreender relações entre variáveis, detectar padrões e, por fim, extrair conclusões significativas. No entanto, para que um estudo de análise de dados seja capaz de fornecer resultados confiáveis, é importante seguir algumas etapas essenciais:

- Na fase inicial do processo, o primeiro passo fundamental é identificar claramente o problema a ser analisado. Isso requer a formulação de perguntas precisas e relevantes, bem como a aplicação de um pensamento estruturado e estratégico para orientar o desenvolvimento da análise;
- Na segunda fase, é crucial adquirir uma compreensão profunda da geração dos dados e determinar a abordagem ideal para coletá-los de maneira eficaz e precisa;
- Na terceira fase, o processamento de dados desempenha um papel essencial. Isso envolve a compreensão das variáveis em questão e, quando necessário, a limpeza dos dados para garantir a qualidade e confiabilidade da análise;
- A quarta fase consiste na análise dos dados, sendo o momento em que o analista emprega ferramentas e técnicas estatísticas para identificar padrões, chegar a conclusões e, conseqüentemente, tomar decisões com base nos dados;

- Por último, na etapa final, as conclusões alcançadas na fase anterior são comunicadas por meio da criação de recursos visuais eficazes e da apresentação dos resultados de maneira clara e esclarecedora.

Esse pensamento estruturado se aplica de maneira valiosa à gestão da QEE, pois contribui para a identificação de padrões, tendências e anomalias nos dados relacionados à energia gerada pelo sistema fotovoltaico. Uma abordagem quantitativa se mostra ideal para este estudo, uma vez que envolverá a aplicação de técnicas voltadas à identificação de padrões e relações entre variáveis críticas, tais como tensão, corrente, frequência, distorção harmônica e potência. Nas próximas seções, serão apresentadas algumas das ferramentas estatísticas que serão empregadas nesta análise.

2.3.1 Análise Descritiva Quantitativa

Uma análise descritiva quantitativa é uma abordagem estatística bastante utilizada para resumir e descrever os dados numéricos de forma clara e objetiva. As medidas de tendência central como a média, mediana e moda oferecem informações sobre a centralização dos dados. A média ($\bar{X}$) é a medida mais conhecida e mais usada para resumo de dados, e pode ser calculada através da Equação (2.3). Em relação a mediana, pode ser definida como sendo o “valor do meio” do conjunto de dados analisado, classificados em ordem crescente. Por último, a moda é representada pelo valor mais frequente da variável estudada (REIS; REIS, 2002).

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i}{n}, \quad (2.3)$$

sendo x_i o valor da i -ésima observação do conjunto de dados e n é o número de indivíduos.

No entanto, a média é uma técnica estatística frequentemente afetada por valores discrepantes (*outliers*), ou seja, valores que são significativamente maiores ou menores em relação aos demais no conjunto de dados. Esses valores extremos têm o potencial de distorcer a média, levando-a a se deslocar da representação central do conjunto de dados. Isso é diferente da mediana, que é menos suscetível a essas influências, pois o cálculo baseia-se na ordenação das variáveis, o que a torna uma medida de tendência central mais robusta em presença de valores extremos (REIS; REIS, 2002).

As medidas discutidas são fundamentais para resumir e compreender os valores centrais de um conjunto de dados. No entanto, quando trabalha-se com múltiplos valores para uma mesma variável, é igualmente importante considerar medidas de dispersão, pois permite quantificar o grau de variabilidade presente em torno do valor médio do conjunto de dados. O desvio padrão e o coeficiente de variação são técnicas excelentes para avaliar a dispersão ou variabilidade dos dados.

O cálculo do desvio padrão (DP), representado pela Equação (2.4), permite quantificar o quão distantes os valores individuais de um conjunto de dados estão da média. Essa medida estatística é fundamental para avaliar as discrepâncias entre as variáveis de um mesmo conjunto de dados, mesmo quando essas variáveis possuem a mesma média, mas se apresentam de forma distinta em representação gráfica (REIS; REIS, 2002).

$$DP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n - 1}}. \quad (2.4)$$

É possível determinar o coeficiente de variação (CV) de um conjunto de dados em termos percentuais através da razão entre o desvio padrão e a média, como indicado na Equação (2.5). Conforme destacado por Reis e Reis (2002), um coeficiente de variação menor indica uma variabilidade mais reduzida em relação à média. Essa informação é crucial para avaliar a consistência e uniformidade dos dados sob análise.

$$CV = \frac{DP}{\bar{X}} 100. \quad (2.5)$$

A análise descritiva será bastante útil no estudo da QEE, pois oferece uma abordagem inicial para compreender e descrever os dados coletados dos parâmetros elétricos. No entanto, é importante notar que a análise descritiva é uma abordagem básica e, para obter um entendimento estatístico mais aprofundado dos dados de qualidade da energia, é necessário empregar técnicas estatísticas mais avançadas e complexas.

2.3.2 Teste Estatísticos

O teste de hipóteses é uma técnica estatística amplamente empregada para avaliar se uma observação é verdadeira, sujeitando-se a um risco controlado de erro. Tem por finalidade julgar a diferença entre dois resultados estatísticos, servindo como um critério para aceitar ou rejeitar uma hipótese com base nas informações obtidas a partir dos dados coletados (HIRAKATA; MANCUSO; CASTRO, 2019). Para compreender o funcionamento dos testes de hipóteses, é fundamental dominar conceitos essenciais, como o valor- p e o nível de significância.

Nos testes de hipóteses, é possível trabalhar com duas situações: a hipótese nula (H_0) e a hipótese alternativa (H_1), que refuta a hipótese nula. Nesse contexto, segundo Peres (2021), o valor- p desempenha um papel importante, uma vez que é uma métrica que avalia a probabilidade de observar os resultados de um estudo, ou resultados ainda mais extremos, sob a suposição de que a hipótese nula seja verdadeira.

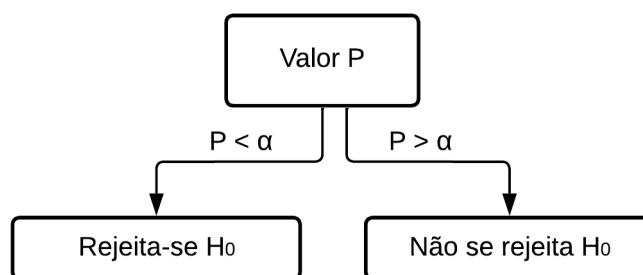
Em outras palavras, o valor- p indica a força das evidências contra a hipótese nula. No entanto, antes de tomar uma decisão sobre rejeitar ou não a H_0 , é crucial comparar o valor- p ao nível de significância (α). Essa comparação visa prevenir a ocorrência do erro tipo I, que

decorre quando se rejeita a H_0 , mas na realidade a H_0 era verdadeira. Logo, o valor de α deverá ser fixado antes da análise dos dados, já que o mesmo entra no processo de determinação da rejeição ou não da H_0 (FIRMINO, 2015; PERES, 2021).

De acordo com Firmino (2015) e Peres (2021), o valor de α mais comumente utilizado é de 5%, o que significa que o analista está disposto a aceitar uma probabilidade de 5% de cometer o erro do Tipo I. Isso é representativo de uma escolha conservadora que controla o risco de rejeitar erroneamente a hipótese nula quando ela é verdadeira. A Figura 2.2 ilustra o processo de teste de hipóteses com base no valor- p e no valor de α pré-definido.

Quando o valor- p calculado for menor do que o nível de significância α estabelecido (ou seja, $p < \alpha$), isso indica que há evidências estatísticas suficientes para rejeitar a hipótese nula (H_0) e considerar a hipótese alternativa (H_1). Por outro lado, se o valor- p for maior do que α (ou seja, $p > \alpha$), a análise fornece evidências estatísticas para não rejeitar a hipótese nula (H_0).

Figura 2.2 – Diagrama para testes de hipóteses.



Fonte: adaptado de Peres (2021).

Esses conceitos desempenham um papel fundamental na análise estatística e constituem a base para a aplicação eficiente do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Este teste é amplamente utilizado para avaliar diferenças entre três ou mais grupos independentes quando as amostras não satisfazem as pressuposições de normalidade e homogeneidade de variâncias (MCKIGHT; NAJAB, 2010).

O procedimento do teste de Kruskal-Wallis, também conhecido como análise de variância dos postos, envolve a ordenação crescente das n observações para cada variável na amostra em análise. Por exemplo, na Tabela 2.4, são apresentados os valores de tensões nas linhas de uma amostra com 5 observações.

Tabela 2.4 – Amostra fictícia de tensões nas linhas.

U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}
385.83	385.18	389.94
386.8	386.62	392.04
387.05	387.05	392.6
385.73	386.23	391.78
382.63	381.42	387.08

Fonte: Autoria própria (2023).

Para conduzir o teste de Kruskal-Wallis, todas as observações são reunidas em uma única coluna e então ordenadas em ordem crescente, como mostrado na Tabela 2.5. Em seguida, atribuem-se posições a cada uma das n observações, onde a primeira posição é designada para o menor valor observado e a última posição para o maior valor.

Note que existem dois valores iguais de 387.05 ocupando a posição 9.5. Essas posições intermediárias foram atribuídas às duas observações idênticas, uma vez que não faz sentido atribuir postos diferentes a valores iguais. Portanto, foi calculada a média das posições 9 e 10, resultando na atribuição do posto 9.5 para os valores repetidos.

Tabela 2.5 – Ordenação dos valores em postos.

Valores	Postos
381.42	1
382.63	2
385.18	3
385.73	4
385.83	5
386.23	6
386.62	7
386.8	8
387.05	9.5
387.05	9.5
387.08	11
389.94	12
391.78	13
392.04	14
392.6	15

Fonte: Autoria própria (2023).

A próxima etapa envolve a atribuição dos postos a cada uma das observações das variáveis em estudo. A Tabela 2.6 apresenta os grupos separados juntamente com as posições correspondentes de cada observação. Por exemplo, o valor de tensão 385.83, da variável de tensão de linha AB, ocupou a posição 5, conforme mostrado na Tabela 2.5. Assim, essa etapa determina os postos de cada observação para cada variável de tensão de linha.

Tabela 2.6 – Definição dos postos em cada observação.

U_{ab}	Postos	U_{bc}	Postos	U_{ca}	Postos
385.83	5	385.18	3	389.94	12
386.8	8	386.62	7	392.04	14
387.05	9.5	387.05	9.5	392.6	15
385.73	4	386.23	6	391.78	13
382.63	2	381.42	1	387.08	11

Fonte: Autoria própria (2023).

Para simplificar o cálculo da estatística no teste de Kruskal-Wallis, é necessário realizar alguns cálculos preliminares. Isso inclui o cálculo da soma dos postos individuais (R_i), a soma dos número de observações em cada grupo (n) e, por fim, o cálculo do valor da soma dos postos elevados ao quadrado dividido pelo número de observações (R_i^2/n) (PERES, 2022). Os valores calculados para o exemplo em questão são resumidos na Tabela 2.7, e é notável que o maior valor de R_i corresponde às tensões na linha CA, totalizando 65.

Tabela 2.7 – Parâmetros para o cálculo estatísticos do teste de Kruskal-Wallis.

Soma dos postos (R_i)	28.5	26.5	65	Total
n_i por grupo	5	5	5	15
R_i^2/n	162.45	140.45	845	1147.9

Fonte: Autoria própria (2023).

Após a definição de todos os parâmetros essenciais, é viável calcular a estatística do teste de Kruskal-Wallis usando a Equação (2.6). Vale ressaltar que N representa a soma das observações de cada grupo, totalizando 15 observações no conjunto. Com base nisso, foi possível obter a estatística H para o exemplo em questão, resultando em um valor de 9.3675.

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1), \quad (2.6)$$

$$H = \frac{12}{15(15+1)}(162.45 + 140.45 + 845) - 3(15+1),$$

$$H_{calculado} = 9.3975.$$

No entanto, o valor calculado da estatística de Kruskal-Wallis ($H_{calculado}$) é válido apenas quando o conjunto de dados não apresenta valores empatados, ou seja, valores idênticos. No exemplo em questão, ocorreram valores empatados, tornando necessário calcular o valor da estatística de Kruskal-Wallis corrigida ($H_{corrigido}$). Só que antes que calcular o valor corrigido, é fundamental obter o fator de correção para valores empatados, o qual é obtido por meio da aplicação da Equação (2.7).

$$C_H = 1 - \frac{\sum(t^3 - t)}{N^3 - N}, \quad (2.7)$$

Sendo t a quantidade de vezes que um mesmo valor aparece nas observações do conjunto de dados.

Para o exemplo analisado apareceram dois valores empatados, logo $t = 2$, com isso, o fator de correção apresentou um valor de 0.9982.

$$C_H = 1 - \frac{(2^3 - 2)}{15^3 - 15} = 0.9982.$$

A etapa subsequente envolve o cálculo da estatística corrigida utilizando a Equação (2.8). Vale observar que o valor de $H_{\text{corrigido}}$ não apresentou uma divergência significativa em relação ao $H_{\text{calculado}}$. Isso se deve ao fato de que houve poucos valores empatados no conjunto de dados. No entanto, em situações em que o conjunto de dados contém um grande número de observações empatadas, essa correção pode revelar diferenças mais substanciais.

$$H_{\text{corrigido}} = \frac{H_{\text{calculado}}}{C_H}, \quad (2.8)$$

$$H_{\text{corrigido}} = \frac{9.3975}{0.9982} = 9.4143.$$

Para prosseguir com a análise de Kruskal-Wallis, é necessário calcular o grau de liberdade (gl) da distribuição, o qual está relacionado ao número de variáveis ou grupos presentes no conjunto de dados e pode ser obtido por meio da aplicação da Equação (2.9). No exemplo em estudo, que envolve 3 variáveis (U_{ab} , U_{bc} e U_{ca}), o número de grupos (n_{grupos}) é igual a 3, portanto, o grau de liberdade (gl) é igual a 2.

$$gl = n_{\text{grupos}} - 1, \quad (2.9)$$

$$gl = 3 - 1 = 2.$$

Antes de calcular o valor- p na análise estatística e proceder à comparação com o valor α previamente estabelecido em 5%, é crucial estabelecer as hipóteses do teste de Kruskal-Wallis, que são as seguintes:

- H_0 : as variáveis de tensões nas linhas apresentam distribuições iguais (mesmas médias dos postos);
- H_1 : há pelo menos uma diferença nas distribuições das variáveis de tensões nas linhas (há pelo menos uma diferença entre as médias dos postos).

É possível calcular de maneira simples a métrica de comparação do teste, conhecida como valor- p . Como a estatística do teste segue uma distribuição *qui-quadrado*, podemos utilizar uma função no Excel específica para essa distribuição, chamada "DIST.QUIQUA.CD". Com essa função é possível avaliar a probabilidade associada à estatística *qui-quadrado*, facilitando a interpretação dos resultados do teste não-paramétrico. Nessa função, é preciso fornecer como argumentos primeiro o valor de $H_{\text{corrigido}}$ e, em seguida, o valor do grau de liberdade, calculados anteriormente. A função então retornará o valor- p correspondente.

$$p = \text{DIST.QUIQUA.CD}(H_{\text{corrigido}}; gl),$$

$$p = \text{DIST.QUIQUA.CD}(9.4143; 2).$$

Para o exemplo estudado, observe que o valor- p deu menor que α fixado em 0.05, logo rejeita-se a hipótese nula (H_0), e pode-se concluir que, pelo menos em um dos grupos de tensões nas linhas existe uma diferença estatisticamente significativa.

$$p = 0.00904.$$

Após a rejeição da hipótese nula (H_0) em um teste estatístico, uma série de opções de testes de comparações múltiplas torna-se disponível para determinar quais grupos ou variáveis apresentam diferenças significativas. O teste de Dunn é uma das ferramentas de *post hoc*, ou melhor, de pós-teste mais amplamente adotados como análise de comparações múltiplas após a avaliação de um teste de Kruskal-Wallis (PEREIRA; AFONSO; MEDEIROS, 2015).

O teste de Dunn realiza comparações em pares entre todos os grupos independentes no conjunto de dados analisado e oferece *insights* sobre quais grupos diferem estatisticamente uns dos outros. Essas comparações são conduzidas com base em métricas de avaliação, como o valor- p , com um nível de significância predefinido (α) que serve como critério para determinar a significância estatística das diferenças entre os grupos (DINNO, 2015).

Diversos *softwares* estatísticos, como R, SPSS, Excel, entre outros, oferecem ferramentas que simplificam o cálculo do teste de Dunn. De acordo com Zach (2020), raramente o pesquisador precisa realizar esse cálculo manualmente. No entanto, é fundamental compreender que o teste de Dunn com ajuste de Bonferroni adapta o valor de α levando em consideração o número de pares que estão sendo comparados, com o propósito de reduzir a taxa de erro do Tipo I (PEREIRA; AFONSO; MEDEIROS, 2015).

Para o exemplo fictício estudado, o teste de Dunn com ajuste de Bonferroni foi aplicado através do *software* Excel, e os resultados obtidos estão resumidos na Tabela 2.8. Observe que a única comparação com o valor- p maior do que α foi entre as variáveis de tensão nas linhas AB e BC ($p = 0.8874$), isso indica que não existe diferenças estatísticas significativas entre os pares comparados.

No entanto, as últimas comparações apresentaram valores- p menores que α , note que as comparações foram realizadas com a variável de tensão na linha CA. Além disso, durante o teste de Kruskal-Wallis, observou-se que este grupo apresentou o maior valor de posto. Portanto, pode-se concluir que a linha CA exibe níveis de tensão significativamente mais elevados, resultando em uma divergência de amplitude em comparação com as outras linhas analisadas.

Tabela 2.8 – *Post hoc* de Dunn-Bonferroni aplicado aos dados de tensões nas linhas.

Grupo 1	Grupo 2	α	Valor- p
U_{ab}	U_{bc}	0.05	0.8874
U_{ab}	U_{ca}	0.05	0.0097
U_{bc}	U_{ca}	0.05	0.0064

Fonte: Autoria própria (2023).

As vantagens do teste de Kruskal-Wallis em comparação com testes paramétricos, como a Análise de Variância (ANOVA), são evidenciadas pela menor dependência de pressupostos sobre a distribuição dos dados. Este teste é aplicável a dados ordinais e nominais, representando uma ferramenta valiosa na análise de testes de hipóteses para três ou mais grupos independentes. É especialmente útil em situações de amostras grandes, onde os pressupostos paramétricos, como normalidade e homogeneidade de variâncias, podem não ser atendidos. Além disso, o teste de Kruskal-Wallis é valioso para amostras muito pequenas e pesquisas que envolvem hipóteses com processos de medida ordinais (FIRMINO, 2015).

Entretanto, quando os dados da amostra atendem aos pressupostos dos testes paramétricos, a adoção do teste de Kruskal-Wallis não se mostra apropriada, uma vez que poderia resultar em conclusões pouco confiáveis ou distorcidas. Portanto, aconselha-se evitar a aplicação de testes não paramétricos em situações em que as condições ideais para testes paramétricos são predominantes. Essa precaução se justifica pela maior eficácia dos testes paramétricos quando as suposições necessárias são devidamente atendidas (FIRMINO, 2015).

Todas as técnicas abordadas nesta seção são valiosas para compreender os padrões e tendências em um banco de dados. No contexto deste trabalho, as ferramentas estatísticas oferecerão *insights* essenciais sobre o conjunto de dados de qualidade da energia elétrica, contribuindo significativamente para os objetivos e a análise em curso.

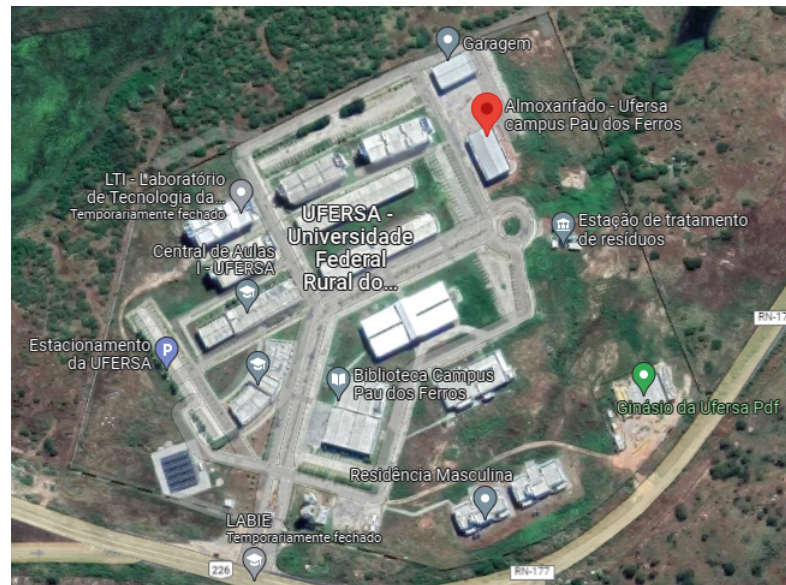
3 ESTUDO DE CASO

No decorrer deste capítulo, serão explorados de forma detalhada os aspectos metodológicos empregados na pesquisa. Serão abordados os métodos e técnicas utilizados para a coleta de dados relacionados à QEE, bem como as ferramentas empregadas para a análise desses dados.

3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

O *campus* da UFRSA na cidade de Pau dos Ferros/RN possui um sistema fotovoltaico conectado à rede trifásica de baixa tensão instalado no telhado do prédio destinado a almoxarifado, a Figura 3.1 mostra a localização do prédio dentro do *campus*. A usina fotovoltaica possui 71 painéis fotovoltaicos de 540 W cada, totalizando uma potência de pico de 38.34 kWp. A conexão com a rede é feita através de um inversor trifásico da marca *Growatt* e o modelo é o MID-33KTL3-X com potência de 33 kW e corrente máxima de saída de 55.5 A.

Figura 3.1 – Localização do prédio do Almoxarifado na UFRSA - Pau dos Ferros.



Fonte: (MAPS, 2023).

3.2 LEVANTAMENTO E COLETA DOS DADOS

Para realizar a coleta de dados, foi utilizado o analisador PowerNET M-300, representado na Figura 3.2. Este equipamento é capaz de medir grandezas elétricas, como tensão e corrente RMS (*Root Mean Square*), que representa o valor médio eficaz. Além disso, o analisador é capaz de registrar informações relacionadas à DHT, frequência, fator de potência, potência e diversas outras grandezas elétricas.

Os dados RMS são obtidos por meio da média dos valores registrados ao longo de um intervalo de tempo. No entanto, essa abordagem pode resultar na perda de informações importantes sobre valores extremos. Para mitigar esse problema, o dispositivo registra e armazena no banco de dados as informações relativas aos valores mínimos e máximos de todas as grandezas medidas (IMS, 2021).

Figura 3.2 – Analisador PowerNET M-300.



Fonte: Autoria própria (2023).

A coleta de dados para esta pesquisa foi realizada ao longo de um período de sete dias, durante o qual o analisador foi programado para medir os seguintes parâmetros elétricos:

- Valores de tensões mínimas, RMS e máximas nas fases (V_{an} , V_{bn} e V_{cn});
- Valores de tensões mínimas, RMS e máximas nas linhas (U_{ab} , U_{bc} e U_{ca});
- Valores de correntes mínimas, RMS e máximas nas fases (I_{an} , I_{bn} e I_{cn});
- Valores de DHT de tensões RMS e máximas nas fases (DHT_{Va} , DHT_{Vb} e DHT_{Vc});
- Valores de frequências mínimas, RMS e máximas;
- Valores de potências ativas nas fases (P_{an} , P_{bn} e P_{cn}).

A Figura 3.3 apresenta a parte traseira do *PowerNET* M-300. Nota-se que o dispositivo está equipado com vários terminais, com os pinos de 1 a 6 destinados à medição de tensão e os pinos de 7 a 12 designados para a medição de corrente. Quanto à alimentação do equipamento, os conectores correspondentes são inseridos nos terminais 13 e 14, referente as entradas V_{AUX} .

O analisador oferece duas portas de comunicação, Ethernet (porta LAN) e RS-485 (os pinos 20 e 21, respectivamente). Essas conexões permitem a interação do dispositivo com

o computador através do *software PowerMANAGER desktop*, facilitando a configuração e visualização em tempo real das grandezas analisadas. Além da transferência rápida dos dados armazenados em memória de massa para análise, a *IMS Power Quality* disponibiliza também aplicativos *web* que possibilitam o acesso ao equipamento, o *download* automático de dados, a manutenção do banco de dados de registros, entre outras funcionalidades (IMS, 2021).

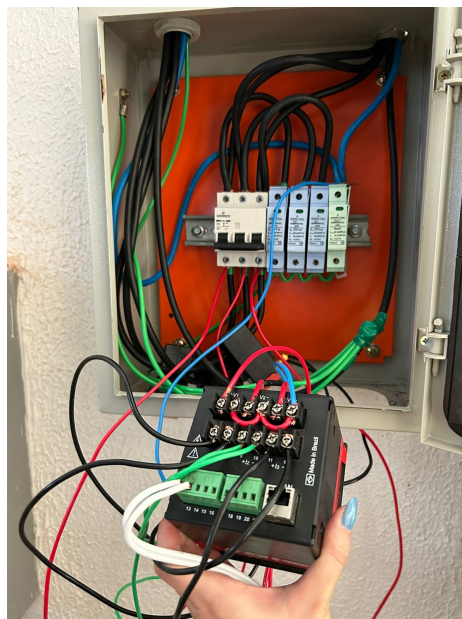
Figura 3.3 – Terminais do PowerNET M-300.



Fonte: Autoria própria (2023).

A instalação do analisador foi realizada no ponto de conexão entre a usina fotovoltaica e a rede de distribuição de energia, no quadro CA do sistema fotovoltaico, conforme demonstrado na Figura 3.4. O objetivo principal é a medição dos parâmetros elétricos que caracterizam a interação do sistema fotovoltaico com a rede elétrica. Essa abordagem visa, portanto, avaliar a QEE nesse ponto de conexão específico.

Figura 3.4 – Instalação do PowerNET M-300.



Fonte: Autoria própria (2023).

3.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS

A transcrição e interpretação dos dados ocorreu após um período de 7 dias, envolvendo tanto a análise das variáveis quanto a limpeza dos dados. No início do conjunto de dados, há uma coluna intitulada 'Registro' que fornece informações detalhadas sobre a data e a hora da coleta. As leituras das grandezas elétricas foram obtidas em intervalos consecutivos de 15 minutos, uma escolha feita para estar em conformidade com os padrões de medição estabelecidos pela COSERN (NEOENERGIA, 2022). As demais colunas apresentam informações das grandezas elétricas coletadas pelo analisador, acompanhadas das observações pertinentes.

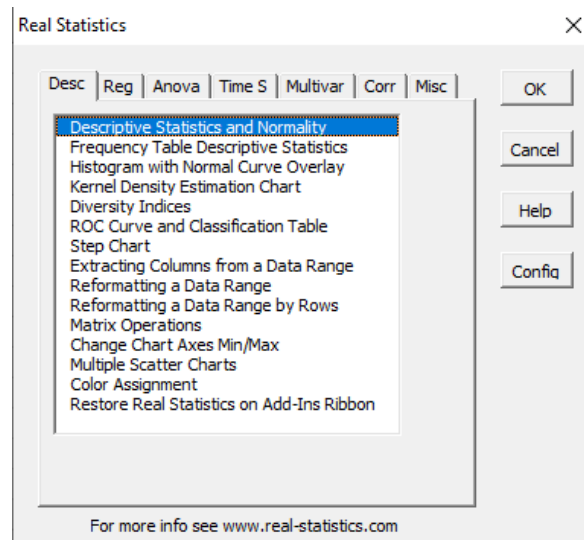
No entanto, para analisar individualmente cada dia da semana, procedeu-se à separação dos dados. Com o objetivo de aprofundar a compreensão de cada variável analisada, realizou-se a subdivisão de cada parâmetro elétrico, acompanhados dos respectivos valores mínimos, RMS e máximos.

O conjunto de dados originalmente contém observações para o intervalo de 00h até as 23h45. No entanto, com o objetivo de investigar o desempenho do sistema elétrico durante o período de geração fotovoltaica, foi aplicado um filtro aos dados correspondentes ao horário de início e término da produção de energia solar pela usina, que compreende das 06h15 até as 17h. É relevante mencionar que esse procedimento foi aplicado a todos os dias da semana em análise e a todas as grandezas elétricas estudadas.

3.4 ANÁLISE DOS DADOS

Na etapa de análise de dados, foram utilizadas ferramentas e técnicas estatísticas com o propósito de aprofundar o estudo da QEE. Isso inclui a identificação de padrões, tendências e anomalias nos dados associados à rede elétrica em conexão com um sistema fotovoltaico. Para esse fim, foi realizado o *download* e a instalação do pacote estatístico *Xrealstats*. Este pacote foi desenvolvido pelo Dr. Charles Zaiontz com o objetivo de possibilitar análises estatísticas avançadas dentro do ambiente do Excel. O pacote pode ser adquirido gratuitamente por meio do site '*Real Statistics*', conforme indicado na referência (ZAIONTZ, 2020).

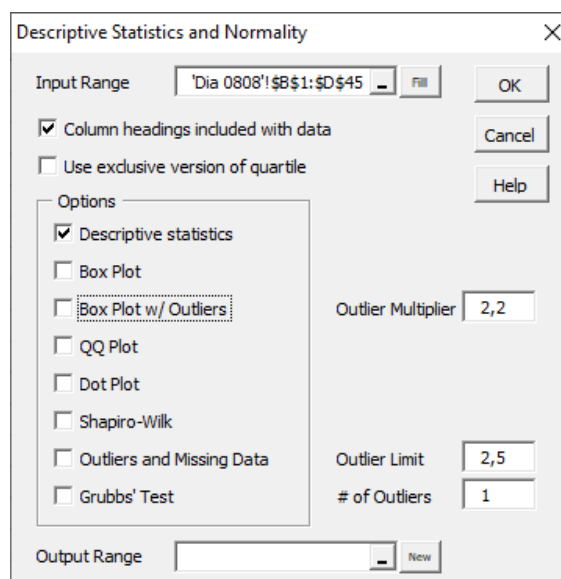
A Figura 3.5 exibe a interface do pacote *Real Statistics*, que foi instalado no Excel. É notável que esta ferramenta disponibiliza várias abas contendo uma ampla gama de recursos estatísticos, abrangendo desde funções fundamentais, como análise descritiva e tabelas de frequência, até análises mais avançadas, incluindo análise de variância (ANOVA) e modelos preditivos.

Figura 3.5 – Pacote *Real Statistics* no Excel.

Fonte: Autoria própria (2023).

Para conduzir a análise descritiva da pesquisa, utilizou-se a ferramenta *Descriptive Statistics and Normality*, conforme apresentado na Figura 3.6. Na seção *Input Range*, foi selecionado os dados a serem analisados e marcado a opção *Column headings included with data*, visto que os cabeçalhos das colunas foram incluídos na seleção dos dados. Em *Options*, selecionou-se a opção *Descriptive statistics* para obter as medidas de tendência central da amostra. Na seção *Output Range*, optou-se por criar uma nova planilha com os resultados, clicando no botão *New*.

Figura 3.6 – Análise descritiva.



Fonte: Autoria própria (2023).

A próxima etapa da análise de dados envolveu a realização do teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de Dunn com ajuste de Bonferroni. Para executar este teste utilizando a ferramenta *Real Statistics*, foi necessário seguir os passos a seguir:

1. Acessar a aba ANOVA na ferramenta.
2. Selecionar a opção *One Factor Anova*. Esta função mostra às técnicas estatísticas apresentadas na Figura 3.7.
3. Note que o nível de significância foi predefinido em *Alpha* com o valor de 0.05.
4. Na seção *Omnibus test options*, há várias opções de testes estatísticos disponíveis. No entanto, para este trabalho, foi selecionado o teste de Kruskal-Wallis.
5. Para obter os resultados das comparações múltiplas, escolheu-se a opção Dunn na seção *Kruskal-Wallis follow-up options*.
6. Por fim, para corrigir o valor de *Alpha*, marcou-se a opção de Bonferroni.

Esses passos permitiram a execução do teste de Kruskal-Wallis e do teste de Dunn com correção de Bonferroni, o que foi essencial para a análise estatística dos dados coletados.

Figura 3.7 – Teste de Kruskal-Wallis com *post hoc* de Dunn-Bonferroni.

ANOVA: Single Factor

Input Range: Dia 0808!\$B\$1:\$D\$45

☒ Column headings included with data

Alpha: 0,05

Input format: ☒ Excel format ☐ Standard (stacked)

Omnibus test options: ☐ ANOVA ☒ Kruskal-Wallis ☐ Welch's ☐ Brown-Forsythe ☐ Random Factor ☐ Levene's Test

ANOVA follow-up options: ☐ Contrasts ☐ Tukey HSD ☐ Games-Howell ☐ Dunnett's ☐ Scheffe ☐ REGWQ ☐ Hsu MCB Max ☐ Hsu MCB Min ☐ Pairwise t test

Kruskal-Wallis follow-up options: ☐ Contrasts ☐ Nemenyi ☒ Dunn ☐ Steel ☐ Schaich-Hamerle ☐ Conover ☐ Pairwise MW ☐ Pairwise MW exact

Alpha correction for contrasts: ☒ Bonferroni ☐ Dunn/Sidak # 1

Output Range:

Fonte: Autoria própria (2023).

Em relação as representações visuais dos parâmetros elétricos coletados, estas foram geradas utilizando o *software Scilab*. Após a fase de processamento dos dados para fins de limpeza e organização, foram elaborados *scripts* personalizados para a leitura das tabelas e a produção dos gráficos correspondentes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas próximas seções, serão abordados os resultados de uma pesquisa detalhada que se concentrou em avaliar o possível impacto de uma usina fotovoltaica na QEE. Este estudo foi conduzido com o intuito de observar se o sistema está funcionando dentro dos limites estabelecidos pelo regulamento da ANEEL (2022) e a norma da concessionária (NEOENERGIA, 2022). Para avaliar os indicadores de QEE foram empregadas técnicas estatísticas no dados coletados durante 7 dias e para cada dia foram analisados dados de tensão de linha e de fase, corrente nas fases, DHT das tensões nas fases, frequência do sistema e a potência ativa nas fases. Os resultados obtidos fornecerão *insights* valiosos sobre o comportamento da rede elétrica do prédio no período de geração da usina fotovoltaica.

4.1 RESULTADOS DO PRIMEIRO DIA

4.1.1 Tensão em regime permanente (Fase-Neutro)

Por meio da análise descritiva, foi possível obter *insights* sobre as medidas centrais do conjunto de dados das tensões mínimas, médias e máximas nas fases. A Tabela 4.1 apresenta as médias ($\bar{X}$), medianas (Med.), modas e coeficientes de variação (CV). Chama a atenção a proximidade entre as médias e medianas das fases A e C em todos os grupos analisados, em contrapartida à fase B, que exibe valores inferiores.

Tabela 4.1 – Análise descritiva das tensões nas fases (V).

Dia 08/08/2023				
	Média	Med.	Moda	CV
$V_{an \min}$	222.34	223.81	N.A	1.80%
$V_{bn \min}$	218.48	219.61	222.15	1.97%
$V_{cn \min}$	222.69	224.05	217.74	1.97%
$V_{an \ rms}$	224.75	226.24	N.A	1.50%
$V_{bn \ rms}$	221.37	223.09	223.63	1.60%
$V_{cn \ rms}$	225.12	226.62	226.69	1.46%
$V_{an \ max}$	226.73	227.52	227.35	1.36%
$V_{bn \ max}$	223.54	224.37	223.13	1.43%
$V_{cn \ max}$	227.08	228.10	228.22	1.34%

Fonte: Autoria própria (2023).

Importante mencionar que a moda, representando os valores mais frequentes no conjunto de dados, geralmente se aproxima mais da mediana do que da média. A exceção ocorre nas variáveis de tensões mínimas, onde a moda difere tanto da média quanto da mediana. Essa

particularidade pode ser explicada pelo CV, que quantifica, em termos percentuais, o afastamento dos valores individuais em relação à média. Notavelmente, os grupos de valores mínimos apresentaram a maior dispersão percentual em comparação aos demais grupos analisados. Nas circunstâncias em que não ocorrem repetições de valores, é indicado que o conjunto de dados não apresenta moda. Para representar essa ausência durante a análise em questão, optou-se por exibir o termo "N.A." (Não Aplicável).

Resumidamente, com base nos valores das medidas de tendência central obtidos, pode-se concluir que a fase B do sistema analisado se destoa em relação às fases A e C, demonstrando um maior grau de variabilidade entre os valores individuais do conjunto de dados estudado. Para analisar mais a fundo essas diferenças entre as fases foram aplicadas outras técnicas estáticas.

Utilizando o teste de Kruskal-Wallis, resumido na Tabela 4.2, investigou-se a presença de diferenças significativas entre os grupos que representam as tensões mínimas, médias e máximas em diferentes fases. Observou-se que todos os valores- p obtidos foram inferiores a α ($p < 0.05$) para todas as variáveis analisadas. Portanto, a H_0 é rejeitada, e pode-se concluir que, pelo menos em um dos grupos, existe uma diferença estatisticamente significativa na distribuição das variáveis em estudo.

Tabela 4.2 – Teste de Kruskal-Wallis das tensões nas fases.

Kruskal-Wallis	Dia 08/08/2023		
	Valor- p	α	Sig.
$V_{(an bn cn)} \min$	$2.75E^{-6}$	0.05	Sim
$V_{(an bn cn)} rms$	$6.94E^{-7}$	0.05	Sim
$V_{(an bn cn)} max$	$9.23E^{-9}$	0.05	Sim

Fonte: Autoria própria (2023).

Para identificar quais grupos específicos apresentam essas diferenças, foi realizado um teste de comparação múltipla, nomeadamente o teste de Dunn-Bonferroni. Esse teste desempenhou um papel fundamental na identificação das discrepâncias entre os grupos, permitindo uma análise mais aprofundada das variações observadas.

Com base nos resultados do teste de comparação múltipla, apresentados na Tabela 4.3, foi possível identificar diferenças significativas entre as tensões mínimas, médias e máximas na fase A quando comparadas à fase B ($p = 4.01E^{-5}$, $p = 2.11E^{-5}$ e $p = 1.01E^{-6}$, respectivamente). Portanto, pode-se rejeitar a hipótese nula que afirmava que não havia divergência entre essas duas fases.

No entanto, ao comparar a fase A com a fase C, não foram encontradas evidências estatísticas de diferenças significativas ($p = 0.61$, $p = 0.52$ e $p = 0.49$). Isso indica que, ao contrário da fase B, a fase A e a fase C não apresentam diferenças estatisticamente significantes. Além disso, ao avaliar a relação da fase B com a fase C, novamente foram observadas diferenças

significativas ($p = 3.95E^{-6}$, $p = 9.47E^{-7}$ e $p = 2.43E^{-8}$). Esses resultados sugerem que, estatisticamente, a fase B se diferencia das outras duas fases do sistema no dia em análise.

Tabela 4.3 – Teste de Dunn-Bonferroni das tensões nas fases.

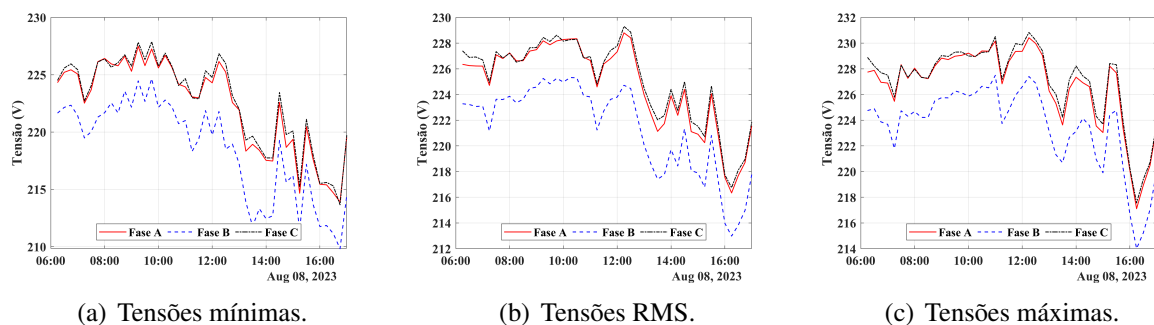
Teste Dunn		Dia 08/08/2023
Grupo 1	Grupo 2	Valor- p
$V_{an \min}$	$V_{bn \min}$	$4.01E^{-5}$
$V_{an \min}$	$V_{cn \min}$	0.61
$V_{bn \min}$	$V_{cn \min}$	$3.95E^{-6}$
$V_{an \text{ rms}}$	$V_{bn \text{ avg}}$	$2.11E^{-5}$
$V_{an \text{ rms}}$	$V_{cn \text{ avg}}$	0.52
$V_{bn \text{ rms}}$	$V_{cn \text{ avg}}$	$9.47E^{-7}$
$V_{an \text{ max}}$	$V_{bn \text{ max}}$	$1.01E^{-6}$
$V_{an \text{ max}}$	$V_{cn \text{ max}}$	0.49
$V_{bn \text{ max}}$	$V_{cn \text{ max}}$	$2.43E^{-8}$

Fonte: Autoria própria (2023).

Em resumo, com base nos valores- p obtidos no teste de comparação múltipla (*post hoc*), é possível concluir que a fase B apresenta diferenças significativas em relação às fases A e C, enquanto as fases A e C não demonstram diferenças significativas entre si. Isso sugere que a fase B se destoa das outras duas fases no sistema avaliado durante o período analisado. No entanto, é fundamental ressaltar que é necessário analisar dados de outros dias da semana com o objetivo de verificar se esse desequilíbrio é um padrão recorrente ou uma ocorrência específica do dia em análise.

A Figura 4.1 retrata o comportamento das tensões nas três fases referentes ao conjunto de dados de valores mínimos, médios (RMS) e máximos. É notável que as tensões nas fases A e C exibiram um comportamento semelhante, enquanto a fase B apresentou divergências significativas.

Figura 4.1 – Gráficos das tensões nas fases - Dia 08/08/2023.



(a) Tensões mínimas.

(b) Tensões RMS.

(c) Tensões máximas.

Fonte: Autoria própria (2023).

Uma observação crucial ao analisar os gráficos é a frequente ocorrência de variações nas tensões das fases. Na Figura 4.1(a) é evidente que as tensões mínimas começam a variar desde o

início da geração fotovoltaica, aproximadamente às 07h12. No caso das tensões RMS, conforme ilustrado na Figura 4.1(b), as variações se tornam mais proeminentes logo após as 10h48. Por fim, tanto as tensões máximas (Figura 4.1(c)) quanto as médias experimentam variações notáveis após as 10h48. Essas flutuações nas tensões das fases persistem até o final do dia, ocorrendo por volta das 18h, momento em que a usina interrompe a geração de energia.

Em resumo, a Figura 4.1 proporciona uma visão clara das variações nas tensões das fases ao longo do dia, destacando a divergência notável na fase B em relação às fases A e C. As flutuações são especialmente notáveis após as 10h48, permanecendo até o encerramento da geração de energia por volta das 17h.

4.1.2 Tensão em regime permanente (Fase-Fase)

Por meio da análise descritiva, foi possível obter *insights* sobre as medidas centrais do conjunto de dados das tensões mínimas, médias e máximas nas linhas. A Tabela 4.4 apresenta todos os valores obtidos na análise, e é notável a proximidade das médias e medianas entre as linhas AB e BC, contrastando com a linha CA, que apresentou valores centrais maiores.

Em relação aos valores de CV, os grupos de valores mínimos apresentaram a maior dispersão percentual em comparação aos demais grupos analisados. Quanto maior o coeficiente de variação, maior a variabilidade dos valores individuais em torno da média, esses números indicam que os dados das linhas AB e BC mostram uma dispersão um pouco mais ampla em comparação com a linha CA.

Tabela 4.4 – Análise descritiva das tensões nas linhas (V).

Dia 08/08/2023				
	Média	Med.	Moda	CV
$U_{ab \min}$	381.18	383.38	N.A	1.87%
$U_{bc \min}$	381.35	383.94	386.62	1.85%
$U_{ca \min}$	386.96	389.57	N.A	1.81%
$U_{ab \text{ rms}}$	385.65	388.38	N.A	1.54%
$U_{bc \text{ rms}}$	385.56	388.36	N.A	1.52%
$U_{ca \text{ rms}}$	391.21	394.09	395.83	1.49%
$U_{ab \max}$	389.36	390.72	389.63	1.38%
$U_{bc \max}$	389.04	390.66	389.95	1.38%
$U_{ca \max}$	394.60	396.03	392.36	1.36%

Fonte: Autoria própria (2023).

Em seguida foi aplicado o teste de Kruskal-Wallis, logo depois o teste de *post hoc* de Dunn, os resultados evidenciam uma diferença estatisticamente significativa nas tensões das linhas registradas durante o dia em questão, conforme apresentado nas Tabelas 4.5 e 4.6. A

aplicação do teste *post hoc* foi justificada pelo fato de que o teste inicial de Kruskal-Wallis produziu valores-*p* que foram inferiores ao nível de significância especificado de 5%.

Tabela 4.5 – Teste de Kruskal-Wallis tensões nas linhas.

Kruskal-Wallis	Dia 08/08/2023		
	Valor- <i>p</i>	α	Sig.
$U_{(ab bc ca) \min}$	$4.66E^{-5}$	0.05	Sim
$U_{(ab bc ca) rms}$	$3.51E^{-6}$	0.05	Sim
$U_{(ab bc ca) max}$	$5.26E^{-8}$	0.05	Sim

Fonte: Autoria própria (2023).

A análise de comparação múltipla revelou que as tensões nas linhas AB e BC não demonstram diferenças estatisticamente significativas em nenhum dos grupos analisados. No entanto, tanto as linhas AB quanto BC apresentam diferenças significativas nas tensões quando comparadas à linha CA. Esses resultados desempenham um papel crucial na identificação de desequilíbrios ou variações nas tensões entre as diferentes linhas do sistema elétrico.

Tabela 4.6 – Teste de Dunn-Bonferroni das tensões nas linhas.

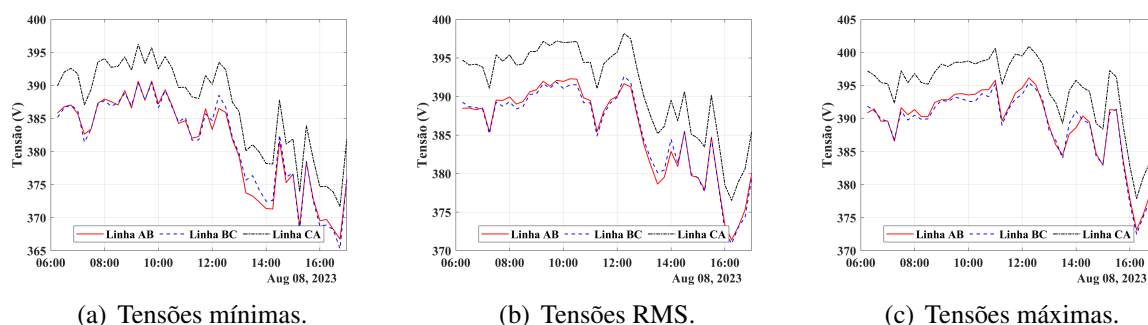
Teste Dunn		
Grupo 1	Grupo 2	Valor- <i>p</i>
$U_{ab \min}$	$U_{bc \min}$	0.92
$U_{ab \min}$	$U_{ca \min}$	$8.91E^{-5}$
$U_{bc \min}$	$U_{ca \min}$	0.0001
$U_{ab rms}$	$U_{bc rms}$	0.81
$U_{ab rms}$	$U_{ca rms}$	$2.52E^{-5}$
$U_{bc rms}$	$U_{ca rms}$	$8.28E^{-6}$
$U_{ab max}$	$U_{bc max}$	0.74
$U_{ab max}$	$U_{ca max}$	$1.28E^{-6}$
$U_{bc max}$	$U_{ca max}$	$2.34E^{-7}$

Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 4.2 ilustra o comportamento das tensões nas linhas AB, BC e CA, referentes ao conjunto de dados de valores mínimos, RMS e máximos. Observa-se que as linhas AB e BC exibem padrões semelhantes, enquanto a linha CA demonstra valores mais elevados. Consequentemente, a análise visual reforçou a evidência de um desequilíbrio de amplitude entre as fases, onde a fase B apresenta uma redução de tensão notavelmente mais acentuada em relação às outras. No entanto, para uma avaliação mais precisa, foi essencial realizar o cálculo do desequilíbrio de tensão, utilizando a Equação (2.4), com o propósito de determinar se o desequilíbrio identificado ultrapassa os limites estabelecidos pela regulamentação da ANEEL (2022).

Em relação às variações nos valores de tensões, é notável a ocorrência de flutuações frequentes ao longo do período analisado. O sistema estudado possui uma tensão nominal de 380 V e, em alguns momentos do dia, os grupos avaliados exibiram valores de tensão nas linhas significativamente abaixo desse valor. Um exemplo visual disso pode ser visto na Figura 4.2(a), onde, às 16h45, a tensão na linha BC chegou a 365.3 V, mas após 15 minutos, ela aumentou para 375.76 V, aproximando-se do valor nominal. No caso das tensões RMS, ilustrado na Figura 4.2(b), o valor mínimo observado foi de 370.9 V, retornando ao valor nominal somente após 45 minutos. Entretanto, em alguns momentos do dia, as tensões superaram o valor nominal, atingindo um pico de 400.93 V no grupo de valores máximos, como pode ser visto na Figura 4.2(c). Nesse intervalo de tempo, o sistema elétrico estava atuando de forma precária pois a tensão de leitura foi maior que 399 V.

Figura 4.2 – Gráficos das tensões nas linhas - Dia 08/08/2023.



Fonte: Autoria própria (2023).

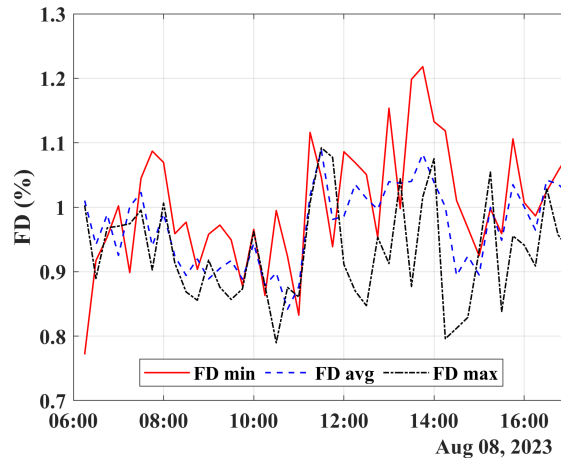
4.1.3 Avaliação do Desequilíbrio de Tensão

Por meio do cálculo do desequilíbrio de tensão, utilizando a Equação (2.4), foi possível analisar o FD ao longo do período de geração da usina fotovoltaica. Observa-se que esse fator apresenta variações significativas em todos os grupos analisados. No entanto, é notável que o grupo de tensões mínimas exibiu um percentual mais elevado, atingindo 1.22% às 13h45.

Como mencionado anteriormente, o limite estabelecido para o fator de desequilíbrio de tensão no Módulo 8 do PRODIST, conforme a referência ANEEL (2022), não deve exceder 3%. Através da Figura 4.3, é possível verificar que o FD permanece abaixo desse limite. No entanto, é importante destacar que a manutenção desse desequilíbrio, embora dentro dos limites aceitáveis, não significa que não haja variações de amplitudes entre as fases A, B e C do sistema avaliado.

Diante disso, é fundamental continuar monitorando o sistema de forma regular, com o objetivo de acompanhar qualquer tendência de aumento no desequilíbrio que possa, eventualmente, afetar a qualidade da energia fornecida.

Figura 4.3 – Fator de desequilíbrio de tensão - Dia 08/08/2023.



Fonte: Autoria própria (2023).

4.1.4 Comportamento das Correntes nas Fases

Por meio da análise descritiva, foi possível obter *insights* sobre as medidas centrais do conjunto de dados das correntes mínimas, médias e máximas nas linhas. A Tabela 4.7 apresenta as médias, medianas, modas e coeficientes de variações. É notável a proximidade das médias e medianas entre as fases A, B e C para cada grupo analisado.

Quanto à moda, destaca-se que nos grupos de correntes mínimas nas fases, todas as variáveis apresentaram um valor zero, o que é uma completa discrepância em relação às medidas centrais, como a média e a mediana. Além disso, outra observação relevante é o valor frequente de 12.41 A nos valores RMS na fase B, que também se diferencia dos valores centrais de medida.

Tabela 4.7 – Análise descritiva das correntes nas fases (A).

Dia 08/08/2023				
	Média	Med.	Moda	CV
$I_{an\ min}$	5.35	4.45	0	75.30%
$I_{bn\ min}$	5.39	4.44	0	73.93%
$I_{cn\ min}$	5.35	4.40	0	75.72%
$I_{an\ rms}$	11.88	13.17	N.A	52.23%
$I_{bn\ rms}$	11.90	13.18	12.41	52.07%
$I_{cn\ rms}$	11.93	13.23	N.A	52.33%
$I_{an\ max}$	16.36	18.14	N.A	51.43%
$I_{bn\ max}$	16.36	18.12	N.A	51.38%
$I_{cn\ max}$	16.41	18.24	N.A	51.45%

Fonte: Autoria própria (2023).

No que diz respeito ao CV, é evidente que todos os resultados apontam para uma alta variabilidade em relação à média dos conjuntos de dados analisados, com destaque para os

valores das correntes mínimas. Isso sugere que, no dia em questão, as correntes individuais nas fases do sistema fotovoltaico exibem uma dispersão considerável. Isso pode ser indicativo de que essas correntes estão sujeitas a variações frequentes.

Utilizando o teste de Kruskal-Wallis, conforme detalhado na Tabela 4.8, investigou-se a presença de diferenças entre os grupos que representam as correntes mínimas, médias e máximas em diferentes fases. Observou-se que todos os valores- p obtidos foram superiores ao nível de significância estabelecido ($p > 0.05$) para todas as variáveis analisadas. Portanto, a hipótese nula (H_0) não é rejeitada, e pode-se concluir que, não existem diferenças estatisticamente significativas nas distribuições das variáveis em estudo.

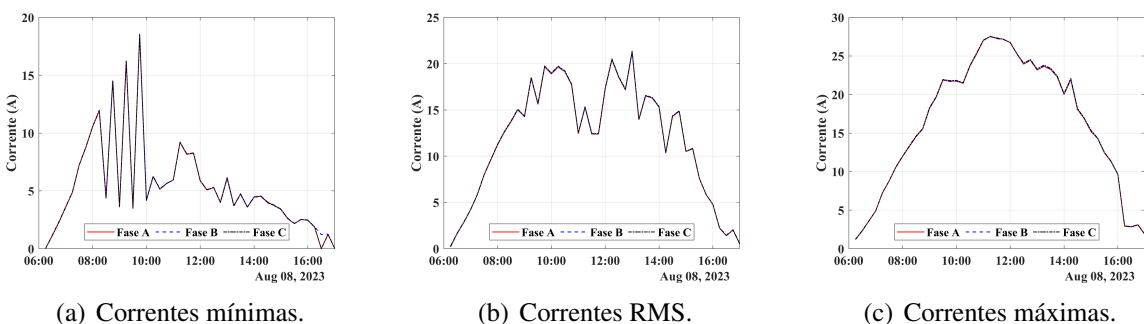
Tabela 4.8 – Teste de Kruskal-Wallis das correntes nas fases.

Kruskal-Wallis	Dia 08/08/2023		
	Valor- p	α	Sig.
$I_{(an bn cn)} \min$	0.98	0.05	Não
$I_{(an bn cn)} rms$	0.99	0.05	Não
$I_{(an bn cn)} max$	0.98	0.05	Não

Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 4.4 mostra o comportamento das correntes nas três fases com relação ao conjunto de dados de valores mínimos, RMS e máximos. É notável que as correntes nas três fases exibem um comportamento praticamente idêntico, com as curvas sobrepostas no gráfico. Isso indica que as correntes possuem valores muito próximos ou praticamente iguais durante o período analisado, sugerindo um alto grau de equilíbrio entre as fases. Portanto, não há desequilíbrio significativo de amplitudes entre elas. No entanto, ao analisar os gráficos, é crucial observar a frequente ocorrência de variações nas variáveis de correntes mínimas e médias.

Figura 4.4 – Gráficos das correntes nas fases - Dia 08/08/2023.



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 4.4(a) ilustra o comportamento dos valores mínimos das correntes nas fases durante o período analisado, destacando variações abruptas que se iniciam por volta das 08h15. Essas variações atingem um valor de pico de 18.55 A às 09h45, diminuindo para 4.17 A após um intervalo de 15 minutos. Em relação aos valores médios, representados na Figura 4.4(b), das

correntes nas fases durante o período analisado, é perceptível o início das variações por volta das 08h45. Essas variações atingem um pico de 21.35 A e, após um intervalo de 15 minutos, reduzem-se para 13.99 A .

Diferentemente das representações visuais dos valores mínimos e médios, o gráfico das correntes máximas nas fases, como mostrado na Figura 4.4(c), não apresentou variações abruptas. Ele alcançou um valor de pico de 27.53 A às 11h15 e, após 15 minutos, esse valor diminuiu ligeiramente para 27.35 A . Isso pode ser um indicativo que os valores das correntes máximas geralmente são mais estáveis e não variam tão rapidamente.

4.1.5 Distorções Harmônicas Totais das Tensões nas Fases

Por meio da análise descritiva, foram obtidos insights sobre as medidas centrais do conjunto de dados das DHT das tensões médias e máximas nas diferentes fases. Vale ressaltar que os valores mínimos não foram incluídos como objeto de estudo nessa análise. Na Tabela 4.9, é possível observar a proximidade dos valores centrais, em particular a média e a mediana.

Tabela 4.9 – DHT das tensões nas fases (%).

DHT	Dia 08/08/2023			
	Média	Med.	Moda	CV
$V_{an\ rms}$	1.86	1.87	1.81	6.22%
$V_{bn\ rms}$	1.83	1.78	1.73	7.37%
$V_{cn\ rms}$	1.84	1.87	1.87	5.57%
$V_{an\ max}$	1.98	1.98	1.89	6.07%
$V_{bn\ max}$	1.97	1.96	1.71	7.77%
$V_{cn\ max}$	1.95	1.96	1.94	5.36%

Fonte: Autoria própria (2023).

Na análise das fases, nota-se que a fase A apresentou a média mais alta em ambos os grupos analisados, seguida pela fase C e, por último, pela fase B. Quanto à mediana, a fase A e a fase C se igualaram nos valores RMS, mas divergiram nos valores máximos. Por outro lado, a fase B apresentou uma mediana igual à fase C para valores máximos.

Em relação a moda, os valores variaram entre as fases e, em alguns casos, não se aproximou nem da média nem da mediana. No entanto, para valores RMS na fase C, a moda se mostrou igual à mediana. Por fim, sobre os valores dos CV, a fase B apresentou a maior dispersão relativa, seguida pela fase A e, por último, a fase C. Esses resultados indicam que a fase B pode requerer atenção devido ao maior grau de variabilidade da distorção harmônica total das tensões.

Com o resultado do teste de Kruskal-Wallis, conforme detalhado na Tabela 4.10, investigou-se a presença de diferenças significativas entre os grupos que representam as DHT médias e máximas em diferentes fases. Observou-se que todos os valores- p obtidos foram superiores ao

nível de significância estabelecido (0.05) para todas as variáveis analisadas. Portanto, a hipótese nula (H_0) não é rejeitada, e pode-se concluir que, não existem diferenças estatisticamente significativas nas distribuições das variáveis em estudo.

Tabela 4.10 – Teste de Kruskal-Wallis das DHTV nas fases.

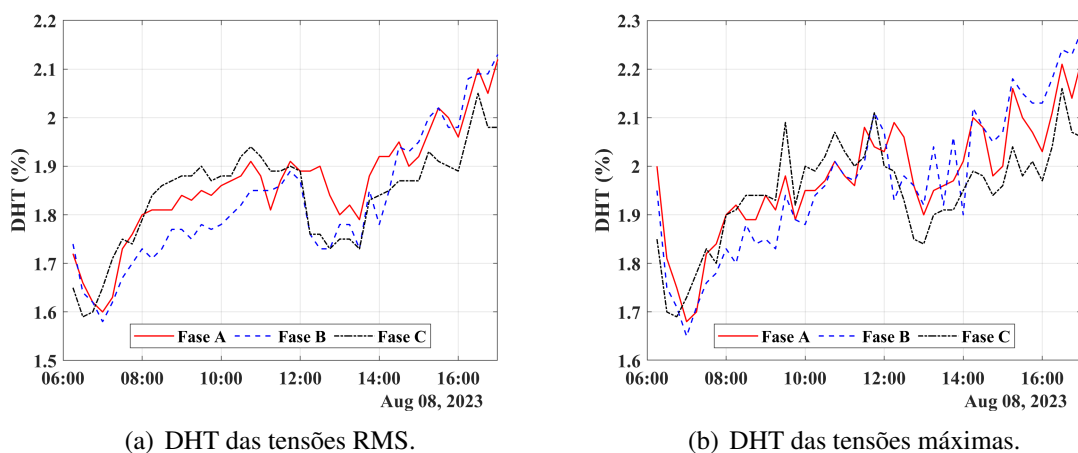
Kruskal-Wallis		Dia 08/08/2023	
DHT	Valor- p	α	Sig.
$V_{(an bn cn)}_{rms}$	0.16	0.05	Não
$V_{(an bn cn)}_{max}$	0.55	0.05	Não

Fonte: Autoria própria (2023).

Por meio da representação gráfica das DHT das tensões nas fases, conforme ilustrado na Figura 4.5, foi possível examinar o comportamento dos grupos médios e máximos. É evidente que ao longo do dia, há várias variações significativas em todos os grupos que foram analisados. Vale destacar que o grupo relacionado à DHT das tensões máximas exibe uma maior instabilidade nos valores, com flutuações mais pronunciadas.

Como mencionado anteriormente, os regulamentos estabelecem um limite estrito para a DHT das tensões nas fases, conforme definido pelo Módulo 8 do PRODIST e a norma DIS-NOR-031 da Neoenergia, como documentado em ANEEL (2022) e Neoenergia (2022). Esse limite é fixado em 10%. Ao observar a Figura 4.5, é possível verificar que o percentual de DHT permanece consistentemente abaixo desse limite em ambos os grupos estudados. O valor máximo registrado foi de apenas 2.28% na fase B do grupo de DHT das tensões máximas.

Figura 4.5 – Gráficos das DHT das tensões nas fases - Dia 08/08/2023.



Fonte: Autoria própria (2023).

4.1.6 Frequências no Sistema Elétrico

A Tabela 4.11 apresenta um resumo das estatísticas centrais dos dados de frequência do sistema em análise. É notável que, no dia em questão, a média, mediana e moda exibiram

uma proximidade notável entre si. Além disso, os valores individuais apresentaram coeficientes de variação baixos, o que sugere que os dados de frequência têm uma dispersão reduzida em relação à média. Em outras palavras, os valores na amostra estão relativamente próximos da média, indicando uma certa estabilidade ou consistência nos dados de frequência.

Tabela 4.11 – Análise descritiva das frequências no sistema (Hz).

Dia 08/08/2023				
	Média	Med.	Moda	CV
F_{min}	59.94	59.95	59.95	0.03%
F_{rms}	60	60	60	0.03%
F_{max}	60.05	60.05	60.04	0.03%

Fonte: Autoria própria (2023).

Com o resultado do teste de Kruskal-Wallis, conforme detalhado na Tabela 4.12, analisou-se a presença de diferenças significativas entre os grupos que representam as frequências mínimas, médias e máximas. Observou-se que todos os valores- p obtidos foram inferiores ao nível de significância estabelecido ($p < 0.05$) para todas as variáveis analisadas. Portanto, a hipótese nula (H_0) é rejeitada, e pode-se concluir que, há pelo menos uma diferença estatisticamente significativa nas distribuições das variáveis em estudo.

Tabela 4.12 – Teste Kruskal-Wallis das frequências.

Kruskal-Wallis	Dia 08/08/2023		
	Valor-p	α	Sig.
$F_{min rms max}$	$1.37E^{-25}$	0.05	Sim

Fonte: Autoria própria (2023).

Em seguida, foi aplicado o teste *post hoc* de Dunn para comparar os três grupos de frequências, conforme apresentado na Tabela 4.13. Surpreendentemente, os resultados revelaram diferenças estatisticamente significativas entre todas as variáveis. Isso é justificado pelos valores- p obtidos, que foram inferiores ao nível de significância α estabelecido.

Tabela 4.13 – Teste de Dunn-Bonferroni das frequências.

Teste Dunn		
Grupo 1	Grupo 2	Valor-p
F_{min}	F_{rms}	$1.56E^{-7}$
F_{min}	F_{max}	0
F_{rms}	F_{max}	$4.9E^{-8}$

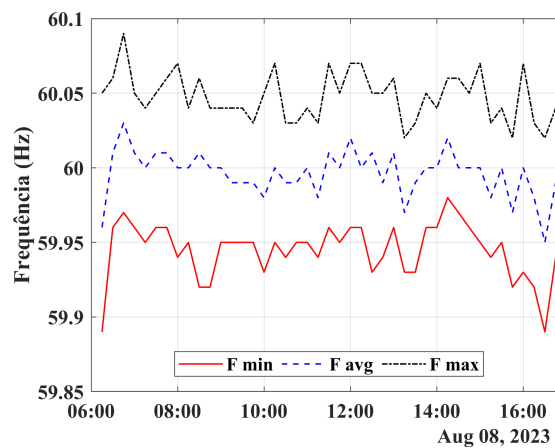
Fonte: Autoria própria (2023).

Portanto, apesar das medidas de tendência central obtidas na análise descritiva apresentarem semelhanças, o teste de Kruskal-Wallis apontou que existem variações significativas

na distribuição dos dados de frequência. Esse resultado é atribuído ao fato de que o teste de Kruskal-Wallis é uma técnica estatística mais sensível às diferenças na forma e na dispersão das distribuições, o que pode ser crucial para identificar variações que podem não ser evidentes apenas pelas medidas de tendência central.

Através da análise gráfica conforme representado na Figura 4.6, foi possível avaliar o comportamento dos grupos de frequências mínimas, médias e máximas do sistema sob estudo. É notável que ao longo do dia ocorrem diversas variações, no entanto, de maneira geral, o sistema manteve-se com valores de frequência dentro das faixas consideradas normais para operação. Com exceção dos horários de 06h15 e 16h30, nos quais foram registrados picos de frequências mínimas de 59.89 Hz, vale ressaltar que mesmo esses valores estiveram ligeiramente abaixo dos limites estipulados no Módulo 8 do PRODIST, não representam uma grande discrepância.

Figura 4.6 – Gráfico das frequências do sistema - Dia 08/08/2023.



Fonte: Autoria própria (2023).

4.1.7 Potência Ativa nas Fases

A última variável examinada neste estudo foi a potência ativa nas fases do sistema elétrico. A Tabela 4.14 apresenta os valores centrais obtidos na análise descritiva do conjunto de dados do dia 08/08. Nota-se que as médias e medianas divergem entre si, no entanto, os valores entre as fases são semelhantes.

Tabela 4.14 – Análise descritiva das potências nas fases (W).

Dia 08/08/2023				
	Média	Med.	Moda	CV
P_a	2681.1	2982.8	N.A	52.73%
P_b	2642.8	2935.6	N.A	52.72%
P_c	2693.6	2994.3	N.A	52.80%

Fonte: Autoria própria (2023).

Em relação à moda, a base de dados utilizada não forneceu valores frequentes para o dia em questão. Por último, o coeficiente de variação excede os 50%, indicando um alto grau de dispersão nos valores das potências ativas nas fases do sistema estudado.

Para avaliar a existência de diferenças entre as potências ativas nas fases, foi aplicado o teste de Kruskal-Wallis. Os resultados apresentados na Tabela 4.15 revelaram um valor-p superior ao nível de significância estabelecido de 5%, o que significa que a hipótese nula não pode ser rejeitada. Portanto, não há evidências estatísticas significativas de diferenças entre as potências ativas nas fases do sistema elétrico.

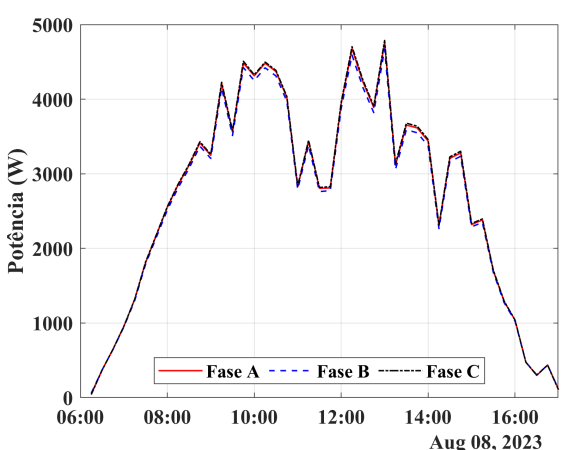
Tabela 4.15 – Teste de Kruskal-Wallis das potências nas fases.

Kruskal-Wallis		Dia 08/08/2023	
	Valor-p	α	Sig.
$P_{(an bn cn)}$	0.93	0.05	Não

Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 4.7 ilustra o comportamento da potência ativa em um sistema elétrico trifásico. É notável que as potências nas fases apresentaram valores semelhantes, demonstrando um comportamento de sobreposição. Entretanto, durante o período de geração da usina, notam-se flutuações significativas nas potências das fases. Essas variações podem ser explicadas pela alta oscilação observadas nas correntes elétricas.

Figura 4.7 – Gráfico das potências nas fases - Dia 08/08/2023.



Fonte: Autoria própria (2023)

4.2 RESULTADOS DE SEIS DIAS DA SEMANA

4.2.1 Tensão em regime permanente (Fase-Neutro)

A Tabela 4.16 apresenta as estatísticas centrais dos conjuntos de dados de tensões mínimas, RMS e máximas nas fases A, B e C do sistema em análise. De forma geral, é evidente

a proximidade entre os valores médios e as medianas das fases A e C em todos os dias da semana examinados.

Tabela 4.16 – Análise descritiva das tensões nas fases - Dias 09/08 até 14/08.

Dia 09/08/2023					Dia 10/08/2023				
	Média	Med.	Moda	CV		Média	Med.	Moda	CV
$V_{an\ min}$	222.48	223.37	222.99	1.78%	$V_{an\ min}$	223.09	223.97	N.A	1.75%
$V_{bn\ min}$	219.16	219.99	N.A	1.71%	$V_{bn\ min}$	219.74	220.42	N.A	1.85%
$V_{cn\ min}$	223.09	224.10	225.79	1.64%	$V_{cn\ min}$	223.44	224.15	226.23	1.73%
$V_{an\ rms}$	224.44	225.75	N.A	1.53%	$V_{an\ rms}$	224.40	224.92	224.93	1.64%
$V_{bn\ rms}$	221.39	222.59	N.A	1.48%	$V_{bn\ rms}$	221.47	221.87	222.12	1.70%
$V_{cn\ rms}$	225.04	226.21	226.75	1.40%	$V_{cn\ rms}$	224.80	225.11	N.A	1.61%
$V_{an\ max}$	225.85	226.92	227.04	1.42%	$V_{an\ max}$	225.55	225.92	226.76	1.58%
$V_{bn\ max}$	222.85	224.06	224.6	1.35%	$V_{bn\ max}$	222.71	222.70	227.47	1.63%
$V_{cn\ max}$	226.46	227.24	228.32	1.31%	$V_{cn\ max}$	225.99	226.27	N.A	1.55%
Dia 11/08/2023					Dia 12/08/2023				
	Média	Med.	Moda	CV		Média	Med.	Moda	CV
$V_{an\ min}$	221.15	222.03	N.A	1.57%	$V_{an\ min}$	223.99	224.08	225.72	1.10%
$V_{bn\ min}$	218.23	218.57	218.64	1.38%	$V_{bn\ min}$	221.08	221.29	220.49	1.22%
$V_{cn\ min}$	221.67	222.03	N.A	1.30%	$V_{cn\ min}$	224.84	224.75	N.A	1.12%
$V_{an\ rms}$	223.69	224.14	224.18	1.22%	$V_{an\ rms}$	225.87	226.45	226.45	1.13%
$V_{bn\ avg}$	220.64	221.04	222.02	1.32%	$V_{bn\ rms}$	222.97	223.61	220.94	1.24%
$V_{cn\ avg}$	224.01	224.31	N.A	1.24%	$V_{cn\ rms}$	226.68	227.17	226.67	1.13%
$V_{an\ max}$	226.26	226.88	228.55	1.37%	$V_{an\ max}$	227.55	227.8	N.A	1.32%
$V_{bn\ max}$	223.23	223.80	N.A	1.48%	$V_{bn\ max}$	224.70	225.05	226.24	1.44%
$V_{cn\ max}$	226.59	227.09	228.05	1.38%	$V_{cn\ max}$	228.37	228.57	N.A	1.33%
Dia 13/08/2023					Dia 14/08/2023				
	Média	Med.	Moda	CV		Média	Med.	Moda	CV
$V_{an\ min}$	226.26	227.06	230.8	1.8%	$V_{an\ min}$	223.59	224.18	N.A	1.90%
$V_{bn\ min}$	223.46	224.41	228.34	2%	$V_{bn\ min}$	220.74	221.35	N.A	1.98%
$V_{cn\ min}$	227.12	227.99	231.65	1.8%	$V_{cn\ min}$	224.58	224.77	229.08	2.01%
$V_{an\ rms}$	227.46	228.74	N.A	1.6%	$V_{an\ rms}$	225.29	226	227.97	1.58%
$V_{bn\ rms}$	224.75	226.28	227.29	1.82%	$V_{bn\ rms}$	222.74	223.70	N.A	1.67%
$V_{cn\ rms}$	228.33	229.64	231.01	1.66%	$V_{cn\ rms}$	226.43	227.29	223.2	1.60%
$V_{an\ max}$	228.55	229.95	231.48	1.4%	$V_{an\ max}$	226.51	227.33	228.62	1.43%
$V_{bn\ max}$	225.83	227.33	N.A	1.7%	$V_{bn\ max}$	224.01	225	226.66	1.5%
$V_{cn\ max}$	229.42	230.82	232.38	1.5%	$V_{cn\ max}$	227.64	228.52	N.A	1.45%

Fonte: Autoria Própria (2023).

Isso sugere a presença de um padrão de similaridade nas medidas de tendência central para essas duas fases. Por outro lado, a fase B se destaca ao exibir valores inferiores em comparação com as outras duas fases, evidenciando uma diferença estatística significativa.

Quanto à moda, os valores variam entre as fases e, em alguns casos, esses valores tendem a se alinhar mais com a mediana do que com a média.

Em relação aos valores de CV, é notável que o grau de variabilidade das tensões nas fases raramente ultrapassou a marca de 2%, com uma exceção notável no dia 14/08, que registrou a maior dispersão relativa no conjunto de tensões mínimas. No dia 13/08, por sua vez, os dados exibiram a maior dispersão no conjunto de tensões RMS, enquanto o dia 10/08 destacou-se pelo maior grau de variabilidade no grupo de tensões máximas. Já o dia 12/08, em contraste, apresentou os menores coeficientes de variações entre todos os grupos de tensões analisados.

Para avaliar as discrepâncias entre as fases A, B e C em relação às tensões mínimas, RMS e máximas ao longo de um período de seis dias, de 09/08/2023 a 14/08/2023, foi aplicado o teste de Kruskal-Wallis com análise de comparação múltipla usando o teste de Dunn. Os resultados da análise estatística estão resumidos na Tabela 4.17. Notavelmente, todos os valores- p obtidos foram menores que o nível de significância (α), indicando que as diferenças entre as fases são estatisticamente significativas em todos os dias estudados.

Tabela 4.17 – Teste de Kruskal-Wallis das tensões nas fases - Dias 09/08 até 14/08.

Kruskal-Wallis Dia 09/08/2023				Kruskal-Wallis Dia 10/08/2023			
	Valor- p	α	Sig.		Valor- p	α	Sig.
V_{min}	$1.06E^{-5}$	0.05	Sim	V_{min}	$6E^{-5}$	0.05	Sim
V_{rms}	$3.76E^{-6}$	0.05	Sim	V_{rms}	0.0003	0.05	Sim
V_{max}	$4.84E^{-7}$	0.05	Sim	V_{max}	0.0003	0.05	Sim
Kruskal-Wallis Dia 11/08/2023				Kruskal-Wallis Dia 12/08/2023			
	Valor- p	α	Sig.		Valor- p	α	Sig.
V_{min}	$3.17E^{-6}$	0.05	Sim	V_{min}	$8.39E^{-5}$	0.05	Sim
V_{rms}	$6.91E^{-7}$	0.05	Sim	V_{rms}	$3.11E^{-9}$	0.05	Sim
V_{max}	$6.27E^{-6}$	0.05	Sim	V_{max}	$1.10E^{-6}$	0.05	Sim
Kruskal-Wallis Dia 13/08/2023				Kruskal-Wallis Dia 14/08/2023			
	Valor- p	α	Sig.		Valor- p	α	Sig.
V_{min}	0.00025	0.05	Sim	V_{min}	0.00041	0.05	Sim
V_{rms}	$3.37E^{-5}$	0.05	Sim	V_{rms}	$4.21E^{-5}$	0.05	Sim
V_{max}	$1.83E^{-6}$	0.05	Sim	V_{max}	$3.91E^{-6}$	0.05	Sim

Fonte: Autoria própria (2023).

A análise de comparação múltipla utilizando o teste de Dunn-Bonferroni revelou uma diferença constante entre a fase B e as fases A e C, enquanto não foi encontrado uma diferença significativa entre as fases A e C. Esses resultados, mostrados na Tabela 4.18, sugerem consistentemente que a fase B do sistema demonstrou um desequilíbrio em relação à amplitude em comparação com as outras duas fases. Esse padrão persistiu ao longo de todos os dias avaliados.

Tabela 4.18 – Teste de Dunn-Bonferroni das tensões nas fases - Dias 09/08 até 14/08.

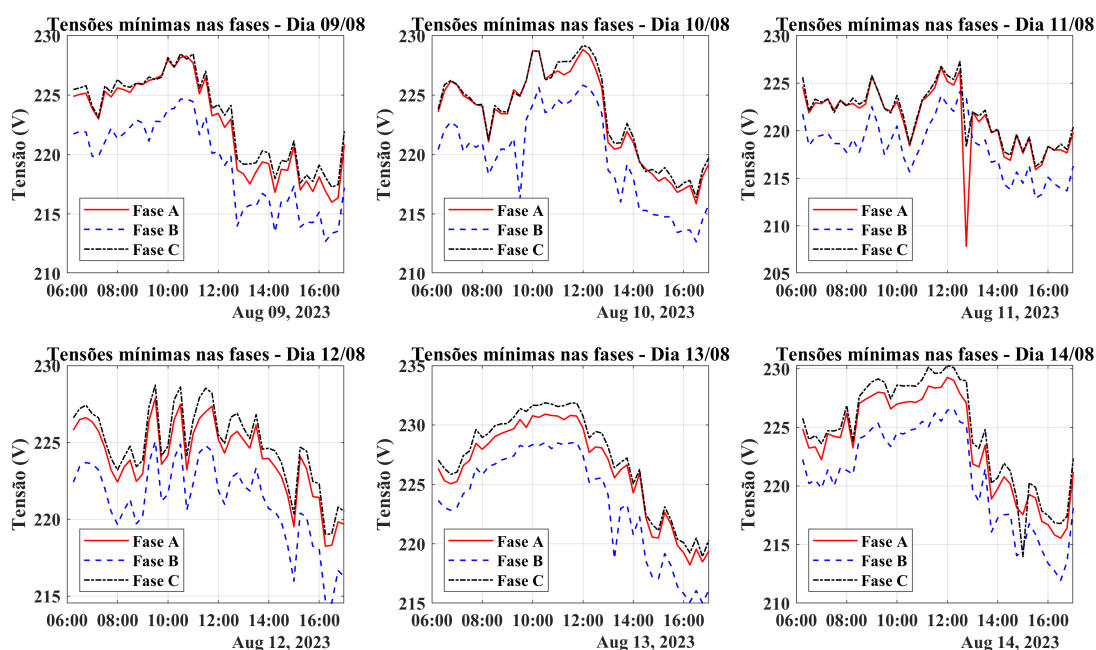
Dunn-Bonferroni Dia 09/08/2023			Dunn-Bonferroni Dia 10/08/2023		
Grupo 1	Grupo 2	Valor- <i>p</i>	Grupo 1	Grupo 2	Valor- <i>p</i>
$V_{an \min}$	$V_{bn \min}$	0.0002	$V_{an \min}$	$V_{bn \min}$	0.0003
$V_{an \min}$	$V_{cn \min}$	0.41	$V_{an \min}$	$V_{cn \min}$	0.68
$V_{bn \min}$	$V_{cn \min}$	$6.90E^{-6}$	$V_{bn \min}$	$V_{cn \min}$	$6.17E^{-5}$
$V_{an \text{ rms}}$	$V_{bn \text{ rms}}$	0.0002	$V_{an \text{ rms}}$	$V_{bn \text{ rms}}$	0.0013
$V_{an \text{ rms}}$	$V_{cn \text{ rms}}$	0.31	$V_{an \text{ rms}}$	$V_{cn \text{ rms}}$	0.59
$V_{bn \text{ rms}}$	$V_{cn \text{ rms}}$	$2.08E^{-6}$	$V_{bn \text{ rms}}$	$V_{cn \text{ rms}}$	0.0002
$V_{an \max}$	$V_{bn \max}$	$3.25E^{-5}$	$V_{an \max}$	$V_{bn \max}$	0.0015
$V_{an \max}$	$V_{cn \max}$	0.37	$V_{an \max}$	$V_{cn \max}$	0.58
$V_{bn \max}$	$V_{cn \max}$	$4.32E^{-7}$	$V_{bn \max}$	$V_{cn \max}$	0.0002
Dunn-Bonferroni Dia 11/08/2023			Dunn-Bonferroni Dia 12/08/2023		
Grupo 1	Grupo 2	Valor- <i>p</i>	Grupo 1	Grupo 2	Valor- <i>p</i>
$V_{an \min}$	$V_{bn \min}$	$4.01E^{-5}$	$V_{an \min}$	$V_{bn \min}$	$1.14E^{-5}$
$V_{an \min}$	$V_{cn \min}$	0.64	$V_{an \min}$	$V_{cn \min}$	0.14
$V_{bn \min}$	$V_{cn \min}$	$4.83E^{-6}$	$V_{bn \min}$	$V_{cn \min}$	$4.59E^{-9}$
$V_{an \text{ rms}}$	$V_{bn \text{ rms}}$	$1.51E^{-5}$	$V_{an \text{ rms}}$	$V_{bn \text{ rms}}$	$4.76E^{-6}$
$V_{an \text{ rms}}$	$V_{cn \text{ rms}}$	0.60	$V_{an \text{ rms}}$	$V_{cn \text{ rms}}$	0.16
$V_{bn \text{ rms}}$	$V_{cn \text{ rms}}$	$1.21E^{-6}$	$V_{bn \text{ rms}}$	$V_{cn \text{ rms}}$	$2.14E^{-9}$
$V_{an \max}$	$V_{bn \max}$	$8.31E^{-5}$	$V_{an \max}$	$V_{bn \max}$	0.0001
$V_{an \max}$	$V_{cn \max}$	0.58	$V_{an \max}$	$V_{cn \max}$	0.23
$V_{bn \max}$	$V_{cn \max}$	$7.17E^{-6}$	$V_{bn \max}$	$V_{cn \max}$	$5.27E^{-7}$
Dunn-Bonferroni Dia 13/08/2023			Dunn-Bonferroni Dia 14/08/2023		
Grupo 1	Grupo 2	Valor- <i>p</i>	Grupo 1	Grupo 2	Valor- <i>p</i>
$V_{an \min}$	$V_{bn \min}$	0.0045	$V_{an \min}$	$V_{bn \min}$	0.0080
$V_{an \min}$	$V_{cn \min}$	0.27	$V_{an \min}$	$V_{cn \min}$	0.23
$V_{bn \min}$	$V_{cn \min}$	$7.93E^{-5}$	$V_{bn \min}$	$V_{cn \min}$	0.0001
$V_{an \text{ rms}}$	$V_{bn \text{ rms}}$	0.0019	$V_{an \text{ rms}}$	$V_{bn \text{ rms}}$	0.0022
$V_{an \text{ rms}}$	$V_{cn \text{ rms}}$	0.19	$V_{an \text{ rms}}$	$V_{cn \text{ rms}}$	0.19
$V_{bn \text{ rms}}$	$V_{cn \text{ rms}}$	$9.86E^{-6}$	$V_{bn \text{ rms}}$	$V_{cn \text{ rms}}$	$1.23E^{-5}$
$V_{an \max}$	$V_{bn \max}$	$1.01E^{-6}$	$V_{an \max}$	$V_{bn \max}$	0.0009
$V_{an \max}$	$V_{cn \max}$	0.49	$V_{an \max}$	$V_{cn \max}$	0.11
$V_{bn \max}$	$V_{cn \max}$	$2.43E^{-8}$	$V_{bn \max}$	$V_{cn \max}$	$1.02E^{-6}$

Fonte: Autoria própria (2023).

Com base nos resultados das análises anteriores, fica evidente que existe um padrão nos conjuntos de dados avaliados, onde a fase B se destacou como significativamente divergente da fase A e da fase C, de acordo com os testes estatísticos aplicados aos dados de tensões nas fases. Além disso, a análise gráfica foi essencial para ilustrar esse desequilíbrio de amplitude entre as fases e as variações dos valores das tensões nas fases.

A Figura 4.8 representa o comportamento das tensões mínimas nas fases. É claramente visível que há um desequilíbrio de amplitude entre as fases. No entanto, é interessante notar que no dia 11/08, a fase A experimentou uma variação significativa na tensão. Por volta das 12:30, o valor de tensão coletado foi de 226.38 V, e após 15 minutos, a fase A apresentou queda acentuada para 207.83 V. Na medição seguinte, o valor da tensão já tinha normalizado, subindo para um valor de pico de 222 V às 13:00h. Esse evento específico merece atenção devido à natureza incomum em comparação com o padrão observado nos outros dias, onde a fase A geralmente apresenta valores de tensão semelhantes aos da fase C.

Figura 4.8 – Gráficos das tensões mínimas nas fases - Dia 09/08 até 14/08.



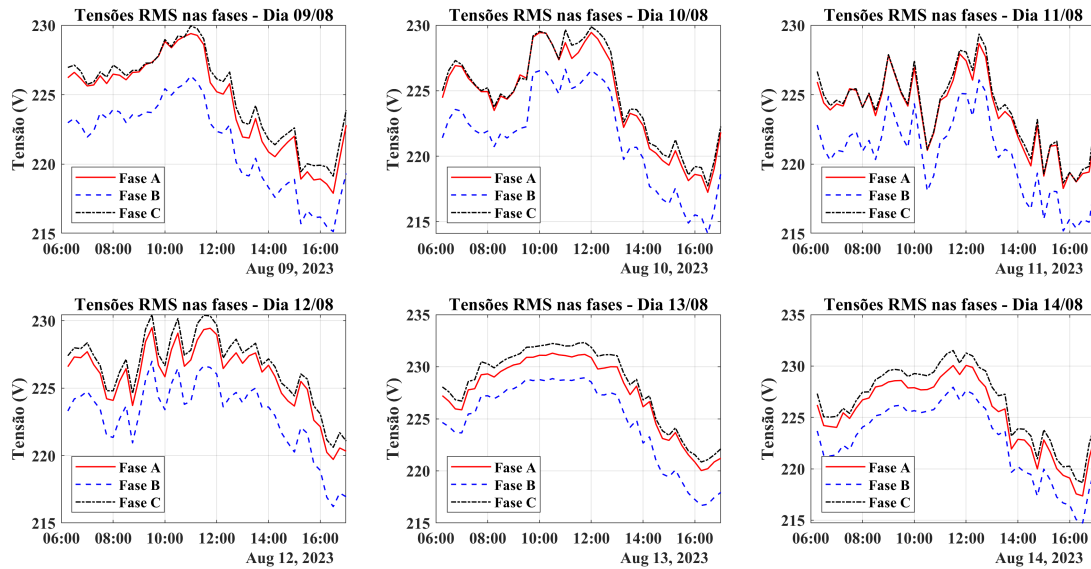
Fonte: Autoria própria (2023).

Em relação às flutuações nos valores de tensão, é possível observar através das representações visuais que todos os dias apresentaram variações. No entanto, o dia 13/08 se destacou como o dia com as variações mais suaves, tanto para as tensões mínimas quanto para as tensões RMS e máximas. Esse padrão pode ser justificado pelo fato de ser um domingo, um dia em que o prédio não está em operação, resultando na diminuição do consumo da energia gerada. Além disso, é importante notar que nos gráficos das tensões mínimas do dia 14/08, a fase C registrou valores de tensão particularmente elevados, atingindo até 230 V, o que é considerado alto para as tensões mínimas coletadas.

Por fim, as Figuras 4.9 e 4.10 ilustram o comportamento das tensões RMS e máximas coletadas. Exibindo um comportamento semelhante aos gráficos das tensões mínimas, porém com valores mais elevados, fazendo com que o sistema atue de forma precária. Como por exemplo, no dia 13/08, as tensões de leitura na fase A e C apresentaram valores maior do que 231 V desde às 07h45, atingindo um pico de 232.7 V às 11h45, antes de retornar para a faixa

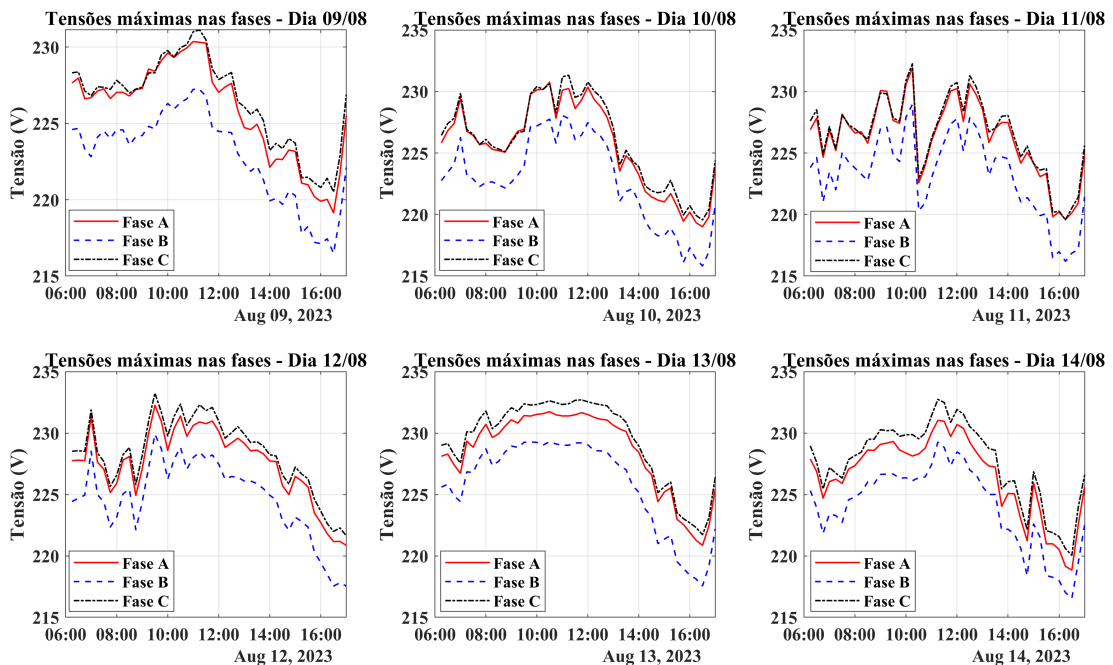
adequada de operação às 13h45, com uma tensão de 229.67 V. Isso significa que o sistema elétrico atuou de forma precária por um longo intervalo de tempo.

Figura 4.9 – Gráficos das tensões RMS nas fases - Dias 09/08 até 14/08.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 4.10 – Gráficos das tensões máximas nas fases - Dias 09/08 até 14/08.



Fonte: Autoria própria (2023).

4.2.2 Tensão em regime permanente (Fase-Fase)

A avaliação das tensões nas linhas AB, BC e CA ao longo de seis dias da semana é iniciada com a análise da Tabela 4.19, que exhibe os valores das medidas de tendências centrais.

Ao examinar esses dados, observou-se uma semelhança notável entre as médias e as medianas nas linhas AB e BC, contrastando com a linha CA, que se destaca ao apresentar tensões mais elevadas.

Tabela 4.19 – Análise descritiva das tensões nas linhas (V) - Dia 09/08 até 14/08.

Dia 09/08/2023					Dia 10/08/2023				
	Média	Med.	Moda	CV		Média	Med.	Moda	CV
$U_{ab \min}$	381.95	383.66	N.A	1.74%	$U_{ab \min}$	382.99	383.91	374.63	1.75%
$U_{bc \min}$	382.24	383.9	388.22	1.68%	$U_{bc \min}$	383.14	384.33	N.A	1.79%
$U_{ca \min}$	387.21	388.85	392.73	1.73%	$U_{ca \min}$	387.96	389.36	N.A	1.74%
$U_{ab \text{ rms}}$	385.51	387.56	388.23	1.48%	$U_{ab \text{ rms}}$	385.63	386.27	N.A	1.65%
$U_{bc \text{ rms}}$	385.67	387.77	N.A	1.43%	$U_{bc \text{ rms}}$	385.49	386.12	N.A	1.67%
$U_{ca \text{ avg}}$	390.59	392.51	386.32	1.49%	$U_{ca \text{ rms}}$	390.29	391.03	N.A	1.62%
$U_{ab \max}$	388.01	389.93	N.A	1.37%	$U_{ab \max}$	387.73	387.71	394.02	1.58%
$U_{bc \max}$	388.11	389.93	N.A	1.32%	$U_{bc \max}$	387.53	387.98	396.03	1.60%
$U_{ca \max}$	393.04	394.54	394.97	1.38%	$U_{ca \max}$	392.33	392.94	400.83	1.57%
Dia 11/08/2023					Dia 12/08/2023				
	Média	Med.	Moda	CV		Média	Med.	Moda	CV
$U_{ab \min}$	380.09	381.01	380.92	1.32%	$U_{ab \min}$	384.68	385.03	386.63	1.17%
$U_{bc \min}$	380.28	380.72	N.A	1.35%	$U_{bc \min}$	385.22	385.45	N.A	1.20%
$U_{ca \min}$	384.72	385.87	387.76	1.53%	$U_{ca \min}$	390.22	390.16	N.A	1.07%
$U_{ab \text{ rms}}$	384.24	384.99	N.A	1.29%	$U_{ab \text{ rms}}$	387.95	389.15	N.A	1.20%
$U_{bc \text{ rms}}$	384	384.60	383.71	1.28%	$U_{bc \text{ rms}}$	388.46	389.45	391.66	1.20%
$U_{ca \text{ rms}}$	389.14	389.79	389.79	1.21%	$U_{ca \text{ rms}}$	393.43	394.36	N.A	1.10%
$U_{ab \max}$	388.73	389.64	N.A	1.45%	$U_{ab \max}$	390.92	391.64	391.36	1.39%
$U_{bc \max}$	388.45	389.63	387.61	1.42%	$U_{bc \max}$	391.42	391.8	N.A	1.41%
$U_{ca \max}$	393.62	394.54	N.A	1.35%	$U_{ca \max}$	396.33	396.79	N.A	1.29%
Dia 13/08/2023					Dia 14/08/2023				
	Média	Med.	Moda	CV		Média	Med.	Moda	CV
$U_{ab \min}$	388.74	390.29	N.A	1.92%	$U_{ab \min}$	384.27	385.18	N.A	1.91%
$U_{bc \min}$	389.38	390.87	N.A	1.97%	$U_{bc \min}$	385.09	385.51	392.16	2.03%
$U_{ca \min}$	394.07	395.41	N.A	1.74%	$U_{ca \min}$	389.27	390.04	N.A	1.95%
$U_{ab \text{ rms}}$	390.87	393.34	N.A	1.72%	$U_{ab \text{ rms}}$	387.37	388.9	N.A	1.61%
$U_{bc \text{ rms}}$	391.50	394.04	398.24	1.79%	$U_{bc \text{ rms}}$	388.25	389.86	393.57	1.65%
$U_{ca \text{ rms}}$	396.14	398.26	401.99	1.57%	$U_{ca \text{ rms}}$	392.36	393.65	396.77	1.59%
$U_{ab \max}$	392.73	395.31	N.A	1.56%	$U_{ab \max}$	389.54	390.96	N.A	1.45%
$U_{bc \max}$	393.37	395.98	398.93	1.61%	$U_{bc \max}$	390.37	392.14	N.A	1.50%
$U_{ca \max}$	398.04	400.34	402.9	1.42%	$U_{ca \max}$	394.46	395.76	N.A	1.44%

Fonte: Autoria própria (2023).

Em relação à moda, os valores variam entre as diferentes linhas. Em geral, os valores moda tendem a se aproximar das medidas centrais calculadas. No entanto, em certos casos, esses valores mais frequentes podem divergir, mostrando valores mais elevados. Um exemplo disso ocorreu no dia 10/08, ao analisar o grupo de tensões máximas da linha CA. Nesse dia, a moda foi de 400.83 V, enquanto a média e a mediana estavam em torno de 392 V.

Em relação aos valores de CV, as tensões nas linhas exibiram valores semelhantes com as tensões nas fases. Onde o grau de variabilidade dos valores individuais raramente ultrapassou 2%, com uma exceção no dia 14/08, que registrou um CV de 2.03%, sendo a maior dispersão relativa no conjunto de tensões mínimas. No dia 13/08, por sua vez, os dados exibiram a maior dispersão no conjunto de tensões RMS, enquanto o dia 10/08 destacou-se pelo maior grau de variabilidade no grupo de tensões máximas. Já o dia 12/08, em contraste, apresentou os menores coeficientes de variações entre todos os grupos de tensões analisados.

Para investigar as diferenças nas linhas AB, BC e CA em relação aos grupos de tensões mínimas, RMS e máximas durante um período de seis dias, foi usado o teste de Kruskal-Wallis com uma análise de comparação múltipla usando o teste de Dunn. Os resultados da análise estatística estão resumidos na Tabela 4.20, na qual todos os valores- p obtidos foram menores do que α , indicando que as diferenças entre as variáveis são estatisticamente significativas.

Tabela 4.20 – Teste de Kruskal-Wallis das tensões nas linhas - Dias 09/08 até 14/08.

Kruskal-Wallis Dia 09/08/2023				Kruskal-Wallis Dia 10/08/2023			
	Valor- p	α	Sig.		Valor- p	α	Sig.
U_{min}	0.0001	0.05	Sim	U_{min}	0.0013	0.05	Sim
U_{rms}	0.0001	0.05	Sim	U_{rms}	0.0013	0.05	Sim
U_{max}	$1E^{-5}$	0.05	Sim	U_{max}	0.0014	0.05	Sim
Kruskal-Wallis Dia 11/08/2023				Kruskal-Wallis Dia 12/08/2023			
	Valor- p	α	Sig.		Valor- p	α	Sig.
U_{min}	$7.1E^{-5}$	0.05	Sim	U_{min}	$1.4E^{-7}$	0.05	Sim
U_{rms}	$5.7E^{-6}$	0.05	Sim	U_{avg}	$6.9E^{-8}$	0.05	Sim
U_{max}	$2.6E^{-5}$	0.05	Sim	U_{max}	$8.4E^{-6}$	0.05	Sim
Kruskal-Wallis Dia 13/08/2023				Kruskal-Wallis Dia 14/08/2023			
	Valor- p	α	Sig.		Valor- p	α	Sig.
U_{min}	0.0008	0.05	Sim	U_{min}	0.0005	0.05	Sim
U_{rms}	0.0001	0.05	Sim	U_{rms}	0.0005	0.05	Sim
U_{max}	$7.2E^{-6}$	0.05	Sim	U_{max}	$7.4E^{-5}$	0.05	Sim

Fonte: Autoria própria (2023).

A análise do pós-teste usando o teste de Dunn-Bonferroni revelou resultados interessantes, apresentados na Tabela 4.21. Houve uma diferença consistente entre a linha CA e as linhas AB e BC, enquanto que nenhuma diferença foi identificada entre as linhas AB e BC, já que os

valores- p foram maiores que α . Esses resultados fornecem mais evidências de que a fase B do sistema em estudo está experimentando um desequilíbrio de amplitude.

Tabela 4.21 – Teste de Dunn-Bonferroni das tensões nas linhas - Dias 09/08 até 14/08.

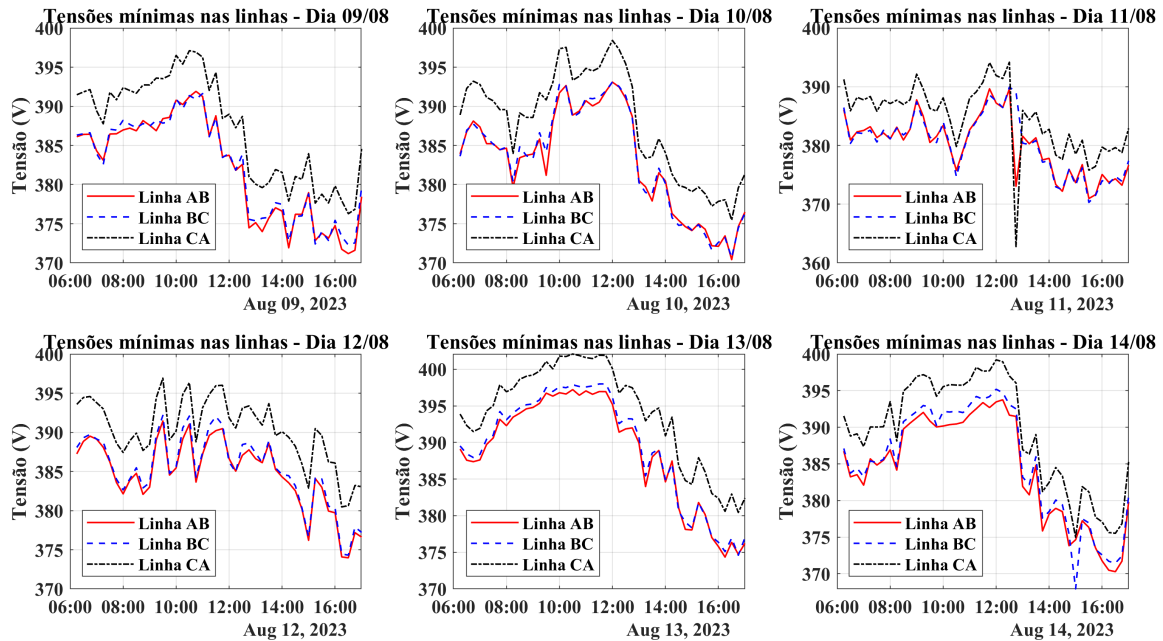
Dunn-Bonferroni Dia 09/08/2023			Dunn-Bonferroni Dia 10/08/2023		
Grupo 1	Grupo 2	Valor- p	Grupo 1	Grupo 2	Valor- p
$U_{ab \min}$	$U_{bc \min}$	0.8084	$U_{ab \min}$	$U_{bc \min}$	0.9035
$U_{ab \min}$	$U_{ca \min}$	0.0001	$U_{ab \min}$	$U_{ca \min}$	0.0013
$U_{bc \min}$	$U_{ca \min}$	0.0003	$U_{bc \min}$	$U_{ca \min}$	0.0020
$U_{ab \text{ rms}}$	$U_{bc \text{ rms}}$	0.8760	$U_{ab \text{ rms}}$	$U_{bc \text{ rms}}$	0.9157
$U_{ab \text{ rms}}$	$U_{ca \text{ rms}}$	0.0002	$U_{ab \text{ rms}}$	$U_{ca \text{ rms}}$	0.0019
$U_{bc \text{ rms}}$	$U_{ca \text{ rms}}$	0.0003	$U_{bc \text{ rms}}$	$U_{ca \text{ rms}}$	0.0014
$U_{ab \max}$	$U_{bc \max}$	0.9933	$U_{ab \max}$	$U_{bc \max}$	0.8815
$U_{ab \max}$	$U_{ca \max}$	$3.3E^{-5}$	$U_{ab \max}$	$U_{ca \max}$	0.0023
$U_{bc \max}$	$U_{ca \max}$	$3.2E^{-5}$	$U_{bc \max}$	$U_{ca \max}$	0.0014
Dunn-Bonferroni Dia 11/08/2023			Dunn-Bonferroni Dia 12/08/2023		
Grupo 1	Grupo 2	Valor- p	Grupo 1	Grupo 2	Valor- p
$U_{ab \min}$	$U_{bc \min}$	0.9101	$U_{ab \min}$	$U_{bc \min}$	0.5524
$U_{ab \min}$	$U_{ca \min}$	0.0001	$U_{ab \min}$	$U_{ca \min}$	$2.9E^{-7}$
$U_{bc \min}$	$U_{ca \min}$	0.0002	$U_{bc \min}$	$U_{ca \min}$	$5.7E^{-6}$
$U_{ab \text{ rms}}$	$U_{bc \text{ rms}}$	0.6810	$U_{ab \text{ rms}}$	$U_{bc \text{ rms}}$	0.5836
$U_{ab \text{ rms}}$	$U_{ca \text{ rms}}$	$5.4E^{-5}$	$U_{ab \text{ rms}}$	$U_{ca \text{ rms}}$	$1.8E^{-7}$
$U_{bc \text{ rms}}$	$U_{ca \text{ rms}}$	$8.7E^{-6}$	$U_{bc \text{ rms}}$	$U_{ca \text{ rms}}$	$2.9E^{-6}$
$U_{ab \max}$	$U_{bc \max}$	0.7570	$U_{ab \max}$	$U_{bc \max}$	0.6147
$U_{ab \max}$	$U_{ca \max}$	0.0001	$U_{ab \max}$	$U_{ca \max}$	$1E^{-5}$
$U_{bc \max}$	$U_{ca \max}$	$3.8E^{-5}$	$U_{bc \max}$	$U_{ca \max}$	$9.1E^{-5}$
Dunn-Bonferroni Dia 13/08/2023			Dunn-Bonferroni Dia 14/08/2023		
Grupo 1	Grupo 2	Valor- p	Grupo 1	Grupo 2	Valor- p
$U_{ab \min}$	$U_{bc \min}$	0.5045	$U_{ab \min}$	$U_{bc \min}$	0.4938
$U_{ab \min}$	$U_{ca \min}$	0.0004	$U_{ab \min}$	$U_{ca \min}$	0.0018
$U_{bc \min}$	$U_{ca \min}$	0.0039	$U_{bc \min}$	$U_{ca \min}$	0.0150
$U_{ab \text{ rms}}$	$U_{bc \text{ rms}}$	0.4368	$U_{ab \text{ rms}}$	$U_{bc \text{ rms}}$	0.4134
$U_{ab \text{ rms}}$	$U_{ca \text{ rms}}$	$5.6E^{-5}$	$U_{ab \text{ rms}}$	$U_{ca \text{ rms}}$	0.0002
$U_{bc \text{ rms}}$	$U_{ca \text{ rms}}$	$1.1E^{-3}$	$U_{bc \text{ rms}}$	$U_{ca \text{ rms}}$	0.0037
$U_{ab \max}$	$U_{bc \max}$	0.3137	$U_{ab \max}$	$U_{bc \max}$	0.4047
$U_{ab \max}$	$U_{ca \max}$	$3.7E^{-6}$	$U_{ab \max}$	$U_{ca \max}$	$3.7E^{-5}$
$U_{bc \max}$	$U_{ca \max}$	0.0003	$U_{bc \max}$	$U_{ca \max}$	$1.1E^{-3}$

Fonte: Autoria própria (2023).

As Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 oferecem uma representação visual do comportamento das tensões mínimas, RMS e máximas nas linhas AB, BC e CA. Por meio dessas representações visuais, é possível identificar claramente um desequilíbrio de amplitude entre as linhas, com a

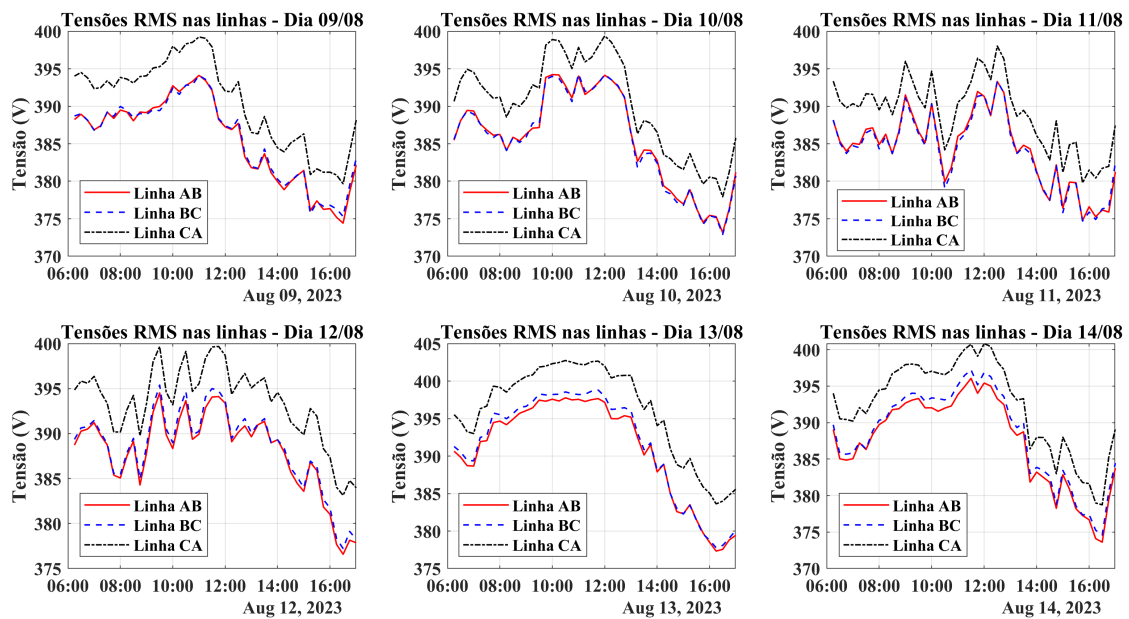
linha CA apresentando tensões mais elevadas em comparação com as linhas AB e BC. Essas discrepâncias nos valores de tensão podem se tornar preocupantes em certos intervalos de tempo, pois podem levar o sistema elétrico a operar de forma precária.

Figura 4.11 – Gráficos das tensões mínimas nas linhas - Dia 09/08 até 14/08.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 4.12 – Gráficos das tensões RMS nas linhas - Dia 09/08 até 14/08.

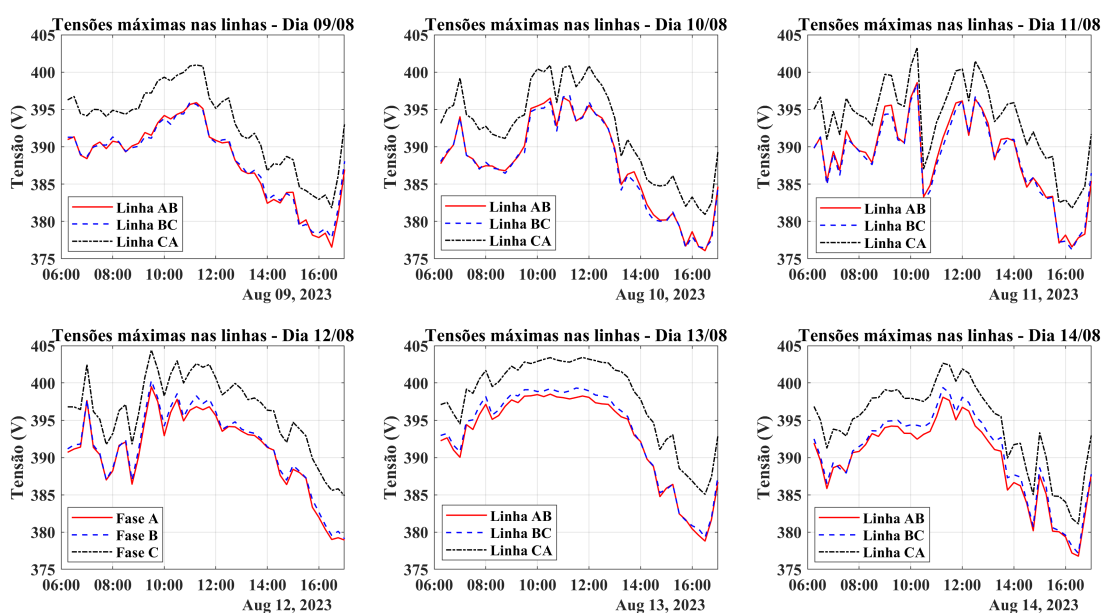


Fonte: Autoria própria (2023).

Por exemplo, no dia 13/08, notou-se que a tensão às 07h45 estava em $400.52V$, chegando a um pico de $403.43V$ às 11h45, antes de retornar à faixa adequada de operação por volta das 13h45, com uma tensão de $398.85V$. Isso indica que o sistema operou em uma faixa precária de tensão por aproximadamente 6 horas. Em outros dias da mesma semana, observou-se um padrão, revelando que o sistema em análise operava em uma condição precária por pelo menos 1 hora por dia. Essas flutuações prolongadas nas tensões podem ter implicações significativas na estabilidade e no desempenho do sistema elétrico, destacando a importância de monitorar e abordar adequadamente o desequilíbrio de amplitude para garantir um funcionamento seguro e eficiente do sistema.

No entanto, esses eventos podem ser devidamente explicados por meio do *datasheet* do inversor utilizado na usina fotovoltaica, que é o foco deste estudo. O referido dispositivo é projetado para operar em um sistema trifásico, conforme especificado em sua faixa de variação de $220V/380V$ ($340V-440V$). Dessa forma, o inversor é desenvolvido para uma tensão nominal entre fase e neutro de $220V$ e uma tensão nominal entre fases de $380V$, com a condição de que sua saída permaneça dentro da faixa estipulada, que varia de $340V$ a $440V$. Vale destacar que o dispositivo possui certificação do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), assegurando que o equipamento esteja em conformidade com as normas vigentes no Brasil.

Figura 4.13 – Gráficos das tensões máximas nas linhas - Dias 09/08 até 14/08.



Fonte: Autoria própria (2023).

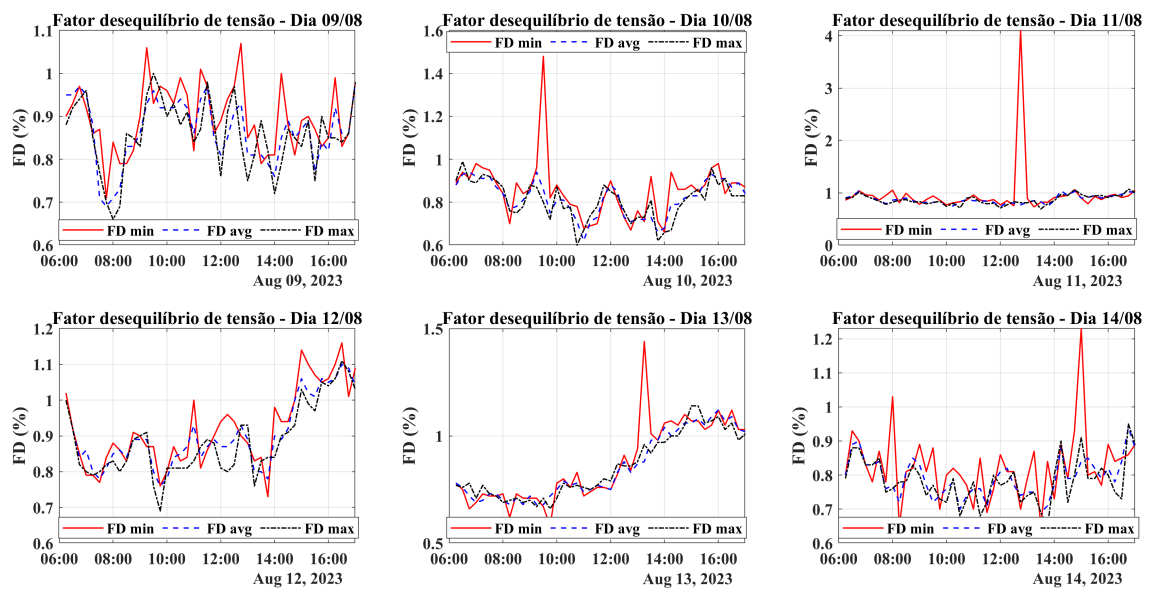
4.2.3 Avaliação do Desequilíbrio de Tensão

O desequilíbrio de tensão identificado nas análises anteriores levanta a preocupação quanto à possibilidade desses eventos estarem ultrapassando os limites estabelecidos no Módulo 8 do PRODIST, que especifica que o desequilíbrio não deve exceder 3%. Para avaliar essa

questão, foi realizado o cálculo do fator de desequilíbrio de tensão ao longo de um período de seis dias, considerando os valores mínimos, RMS e máximos.

A Figura 4.14 exibe o comportamento desse fator calculado, e, de maneira geral, todos os valores permanecem abaixo de 3%. A exceção ocorre no dia 11/08, quando esse fator ultrapassa ligeiramente os 4% devido a um evento esporádico nos valores mínimos da fase A. Por fim, ao analisar as flutuações do fator de desequilíbrio, torna-se evidente que os valores mínimos são mais suscetíveis a flutuações. Isso sugere que as tensões mínimas são mais instáveis quando comparadas ao comportamento gráfico das tensões RMS e máximas.

Figura 4.14 – Fator desequilíbrio de tensão - Dia 09/08 até 14/08.



4.2.4 Comportamento das Correntes nas Fases

A Tabela 4.22 apresenta um resumo das medidas de tendência central das correntes nas fases, durante um período de seis dias, obtidas por meio de uma análise descritiva dos dados. Os resultados revelam uma notável discrepância entre as médias, medianas e a moda. Em relação às correntes mínimas, observou-se que, em alguns dias da semana, as médias foram superiores às medianas, o que sugere que nesses dias ocorreram valores extremamente elevados na amostra, o suficiente para distorcer a média. Em contrapartida, para os grupos de correntes RMS e máximas, as medianas foram maiores.

Entretanto, é importante ressaltar a similaridade notável nos valores centrais entre as fases, com a ocorrência de valores idênticos em alguns dias da semana. Isso sugere que as correntes nas três fases estão em sincronia ou têm magnitudes muito semelhante, o que é um indicativo de equilíbrio entre as fases. No contexto fotovoltaico, esse equilíbrio é uma característica presentes nos inversores de frequência trifásicos, que agem de forma positiva em sistemas elétricos, contribuindo para a estabilidade da rede e a qualidade da energia fornecida.

No que diz respeito aos valores de CV, observa-se que o conjunto de dados referentes as correntes mínimas, RMS e máximas apontaram uma alta variabilidade em relação a média. Essa dispersão pode ser um indicativo de que as correntes nas fases do sistema fotovoltaico estudado estão sujeitas a flutuações irregulares ao longo do tempo.

Tabela 4.22 – Análise descritiva das correntes nas fases (A) - Dia 09/08 até 14/08.

Dia 09/08/2023					Dia 10/08/2023				
	Média	Med.	Moda	CV		Média	Med.	Moda	CV
$I_{an \min}$	7.88	5.18	0	76.19%	$I_{an \min}$	12.89	13.64	0	54.62%
$I_{bn \min}$	7.89	5.21	0	75.94%	$I_{bn \min}$	12.93	13.64	0	53.92%
$I_{cn \min}$	7.89	5.19	0	76.45%	$I_{cn \min}$	12.91	13.69	0	55.19%
$I_{an \text{ rms}}$	13.49	14.82	18.33	48.32%	$I_{an \text{ rms}}$	13.87	16.16	N.A	48.96%
$I_{bn \text{ rms}}$	13.50	14.83	20.15	48.18%	$I_{bn \text{ rms}}$	13.88	16.16	N.A	48.81%
$I_{cn \text{ rms}}$	13.54	14.89	18.40	48.40%	$I_{cn \text{ rms}}$	13.92	16.23	N.A	49.05%
$I_{an \max}$	15.47	16.71	N.A	47.57%	$I_{an \max}$	14.43	16.68	N.A	45.54%
$I_{bn \max}$	15.48	16.73	N.A	47.48%	$I_{bn \max}$	14.44	16.70	N.A	45.47%
$I_{cn \max}$	15.53	16.78	N.A	47.62%	$I_{cn \max}$	14.49	16.76	N.A	45.64%
Dia 11/08/2023					Dia 12/08/2023				
	Média	Med.	Moda	CV		Média	Med.	Moda	CV
$I_{an \min}$	5.12	4.98	0	52.04%	$I_{an \min}$	5.20	5.59	0	50.75%
$I_{bn \min}$	5.17	5.01	0	50.78%	$I_{bn \min}$	5.26	5.63	0	49.18%
$I_{cn \min}$	5.12	4.97	0	52.37%	$I_{cn \min}$	5.24	5.6	0	49.57%
$I_{an \text{ rms}}$	9.46	10.15	11.02	50.08%	$I_{an \text{ rms}}$	11.42	10.77	N.A	53.44%
$I_{bn \text{ rms}}$	9.48	10.16	11.04	49.86%	$I_{bn \text{ rms}}$	11.43	10.78	N.A	53.25%
$I_{cn \text{ rms}}$	9.49	10.18	11.84	50.24%	$I_{cn \text{ rms}}$	11.46	10.81	N.A	53.57%
$I_{an \max}$	17.72	19.93	27.07	51.80%	$I_{an \max}$	17.15	19.22	N.A	51.55%
$I_{bn \max}$	17.72	19.93	27.26	51.74%	$I_{bn \max}$	17.15	19.2	25.21	51.48%
$I_{cn \max}$	17.76	19.95	N.A	51.79%	$I_{cn \max}$	17.21	19.3	N.A	51.50%
Dia 13/08/2023					Dia 14/08/2023				
	Média	Med.	Moda	CV		Média	Med.	Moda	CV
$I_{an \min}$	10.01	8.87	0	68.98%	$I_{an \min}$	14.74	12.97	0	63.53%
$I_{bn \min}$	10.02	8.90	0	68.76%	$I_{bn \min}$	11.70	12.97	0	64.19%
$I_{cn \min}$	10.04	8.9	0	69.11%	$I_{cn \min}$	11.79	13.03	0	63.55%
$I_{an \text{ rms}}$	13.09	14.16	20.54	47.93%	$I_{an \text{ rms}}$	13.73	15.49	N.A	48.52%
$I_{bn \text{ rms}}$	13.10	14.16	19.09	47.79%	$I_{bn \text{ rms}}$	13.74	15.49	N.A	48.39%
$I_{cn \text{ rms}}$	13.14	14.22	N.A	48.01%	$I_{cn \text{ rms}}$	13.79	15.56	N.A	48.58%
$I_{an \max}$	14.97	17.04	N.A	45.73%	$I_{an \max}$	14.68	16.51	N.A	45.14%
$I_{bn \max}$	14.97	17.04	N.A	45.64%	$I_{bn \max}$	14.68	16.52	N.A	45.07%
$I_{cn \max}$	15.03	17.12	N.A	45.78%	$I_{cn \max}$	14.74	16.59	N.A	45.23%

Fonte: Autoria própria (2023).

Para analisar se de fato as correntes entre as fases não divergem entre si, foi aplicado o teste de Kruskal-Wallis. A Tabela 4.23 resume os resultados da análise estatística, na qual os valores- p obtidos foram menores do que o nível de significância fixado em 5%, confirmando que não existe diferenças estatísticas significativas entre as correntes nas fases dos três grupos avaliados.

Tabela 4.23 – Teste de Kruskal-Wallis das correntes nas fases - Dias 09/08 até 14/08.

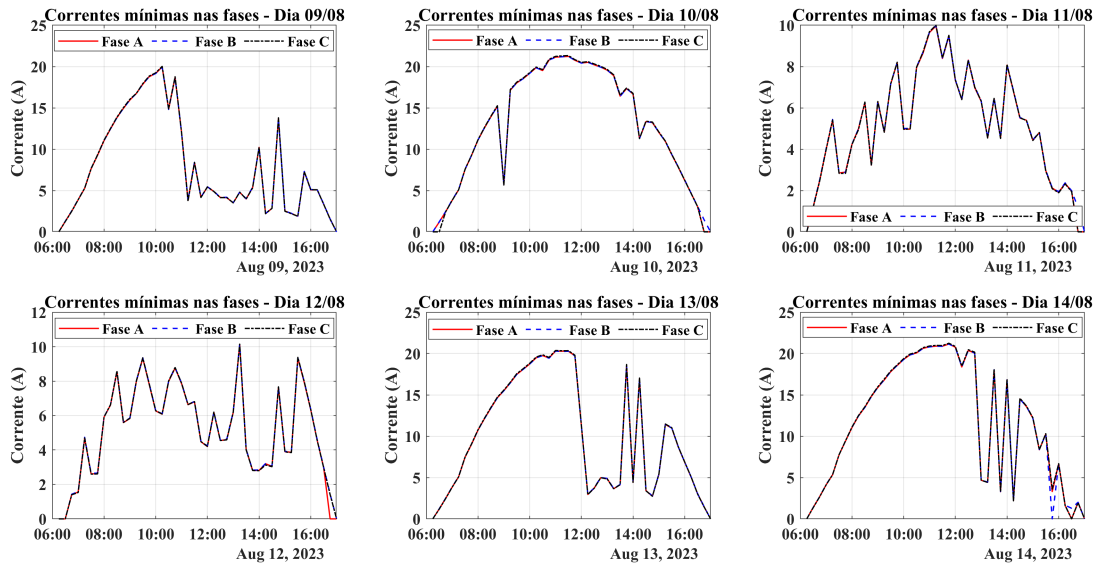
Kruskal-Wallis Dia 09/08/2023				Kruskal-Wallis Dia 10/08/2023			
	Valor- p	α	Sig.		Valor- p	α	Sig.
I_{min}	0.9914	0.05	Não	I_{min}	0.9867	0.05	Não
I_{rms}	0.9834	0.05	Não	I_{rms}	0.9819	0.05	Não
I_{max}	0.9847	0.05	Não	I_{max}	0.9812	0.05	Não
Kruskal-Wallis Dia 11/08/2023				Kruskal-Wallis Dia 12/08/2023			
	Valor- p	α	Sig.		Valor- p	α	Sig.
I_{min}	0.9957	0.05	Não	I_{min}	0.9947	0.05	Não
I_{rms}	0.9996	0.05	Não	I_{rms}	0.9995	0.05	Não
I_{max}	0.9864	0.05	Não	I_{max}	0.9850	0.05	Não
Kruskal-Wallis Dia 13/08/2023				Kruskal-Wallis Dia 14/08/2023			
	Valor- p	α	Sig.		Valor- p	α	Sig.
I_{min}	0.9928	0.05	Não	I_{min}	0.9834	0.05	Não
I_{rms}	0.9745	0.05	Não	I_{rms}	0.9735	0.05	Não
I_{max}	0.9794	0.05	Não	I_{max}	0.9740	0.05	Não

Fonte: Autoria própria (2023).

A representação visual deixou evidente que ocorreram variações abruptas significativas nas correntes mínimas e médias nas fases, conforme ilustrado nas Figuras 4.15 e 4.16. No contexto de um sistema fotovoltaico, esses eventos podem ser atribuídos a uma variedade de fatores, como flutuações nas condições climáticas, sombreamento parcial dos painéis solares ou outras situações imprevisíveis.

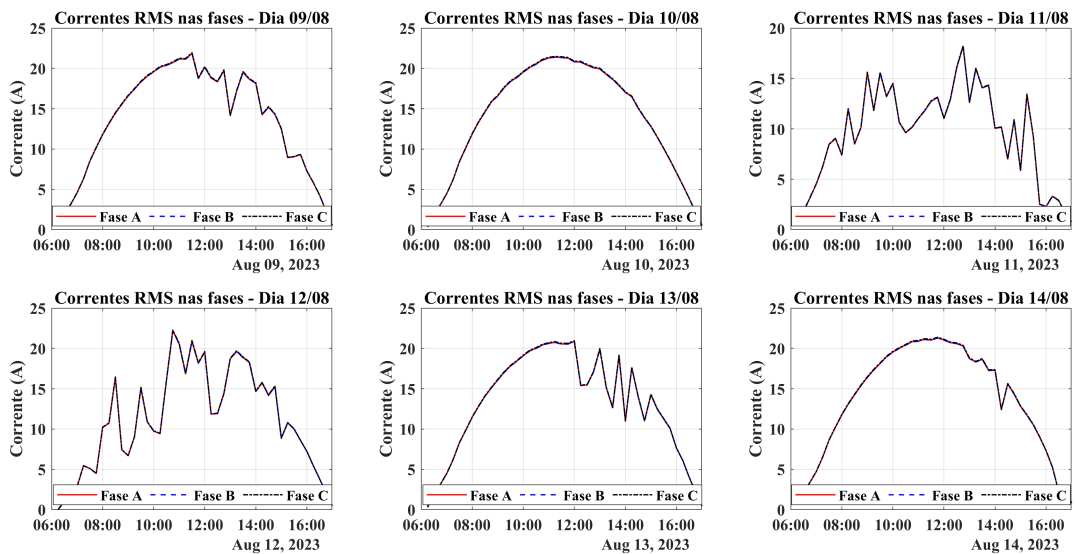
Diante dessa realidade, é necessário manter um monitoramento contínuo tanto do sistema elétrico do edifício quanto da usina fotovoltaica conectada à rede distribuidora. Com o intuito de observar se esses eventos de variabilidade irão aumentar com o tempo, pois essa instabilidade pode impactar negativamente a eficiência da geração de energia e, ao mesmo tempo, a qualidade da energia elétrica injetada na rede.

Figura 4.15 – Gráficos das correntes mínimas nas fases - Dias 09/08 até 14/08.



Fonte: Autoria própria (2023).

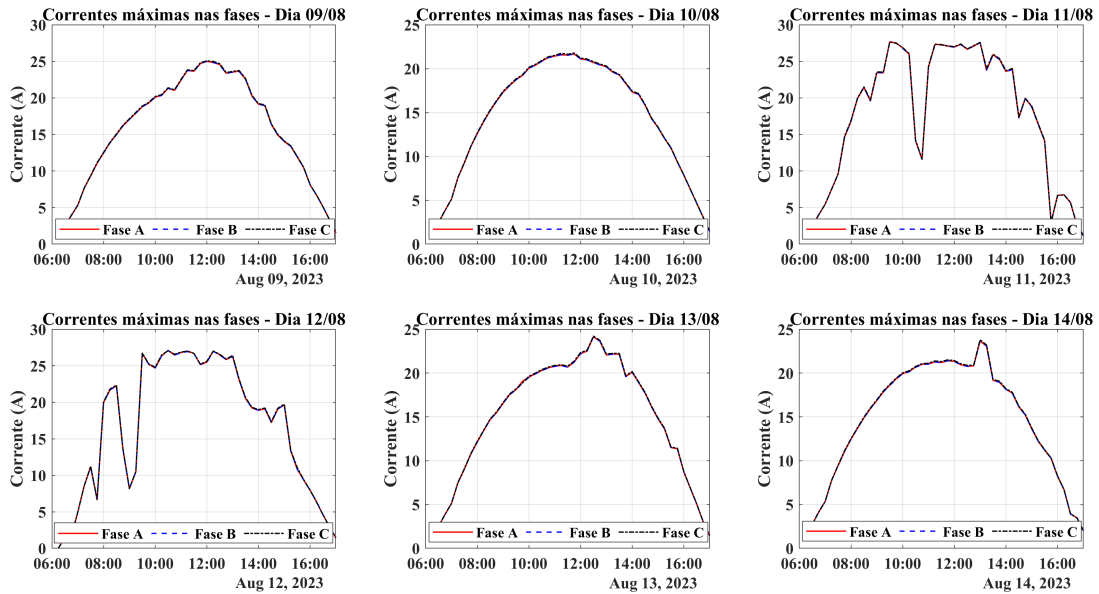
Figura 4.16 – Gráficos das correntes RMS nas fases - Dias 09/08 até 14/08.



Fonte: Autoria própria (2023).

Por outro lado, os gráficos das correntes máximas, como evidenciado na Figura 4.17, mostraram menos oscilações, com exceção dos dias 11/08 e 12/08, nos quais ocorreram algumas flutuações significativas durante o período de geração. No entanto, é notável que o dia 10/08 exibiu uma forma de onda que se assemelha a uma senoide perfeita. Isso pode indicar que os valores das correntes máximas tendem a ser mais estáveis e não flutuam tão rapidamente.

Figura 4.17 – Gráficos das correntes máximas nas fases - Dias 09/08 até 14/08



Fonte: Autoria própria (2023).

4.2.5 Distorção Harmônica Total das Tensões nas Fases

A Tabela 4.24 resume as medidas de tendência central calculadas para as DHT nas tensões RMS e nas tensões máximas das fases do sistema analisado ao longo de uma semana. Nela, é evidente a similaridade entre as médias e medianas nas fases A e B, que se diferenciam ligeiramente dos valores centrais da fase C. Chama-se a atenção para os dias 13/08 e 14/08, nos quais os valores foram notavelmente mais elevados em comparação com os demais dias.

Em relação à moda, todas as variáveis exibiram valores frequentes que variaram entre as fases e, em alguns casos, não se aproximaram nem da média nem da mediana. Por fim, no que diz respeito aos valores dos CV, nota-se que a fase C apresentou a maior dispersão relativa em todos os dias analisados, com exceção do dia 11/08 no grupo de tensões máximas.

Tabela 4.24 – Análise descritiva das DHT das tensões nas fases (%).

DHT Dia 09/08/2023					DHT Dia 10/08/2023				
	Média	Med.	Moda	CV		Média	Med.	Moda	CV
$V_{an\ rms}$	1.93	1.98	1.99	5.48%	$V_{an\ rms}$	1.96	2	1.97	6.80%
$V_{bn\ rms}$	1.93	1.96	1.95	5.72%	$V_{bn\ rms}$	1.95	1.99	2.03	7.18%
$V_{cn\ rms}$	1.87	1.90	1.92	7.59%	$V_{cn\ rms}$	1.89	1.94	1.98	8.30%
$V_{an\ max}$	2.04	2.07	2.08	5.26%	$V_{an\ max}$	2.06	2.08	2.08	6.82%
$V_{bn\ max}$	2.06	2.09	1.92	6.34%	$V_{bn\ max}$	2.08	2.12	2.11	7.34%
$V_{cn\ max}$	1.97	2.01	2.07	7.33%	$V_{cn\ max}$	1.99	2.03	2.05	8.03%
DHT Dia 11/08/2023					DHT Dia 12/08/2023				
	Média	Med.	Moda	CV		Média	Med.	Moda	CV
$V_{an\ rms}$	1.94	1.99	1.99	7.92%	$V_{an\ rms}$	1.93	1.93	1.96	3.52%
$V_{bn\ rms}$	1.96	1.99	1.97	8.73%	$V_{bn\ rms}$	1.93	1.94	1.92	4.10%
$V_{cn\ rms}$	1.88	1.95	1.95	8.94%	$V_{cn\ avg}$	1.81	1.84	1.86	5.07%
$V_{an\ max}$	2.07	2.11	2.11	9.89%	$V_{an\ max}$	2.05	2.05	2.04	4.74%
$V_{bn\ max}$	2.11	2.15	2.26	8.66%	$V_{bn\ max}$	2.07	2.07	2.09	6.15%
$V_{cn\ max}$	1.99	2.04	2.04	8.28%	$V_{cn\ max}$	1.94	1.93	1.93	6.99%
DHT Dia 13/08/2023					DHT Dia 14/08/2023				
	Média	Med.	Moda	CV		Média	Med.	Moda	CV
$V_{an\ rms}$	2.46	2.51	2.39	6.54%	$V_{an\ rms}$	2.36	2.36	2.32	5.80%
$V_{bn\ rms}$	2.48	2.52	2.55	6.24%	$V_{bn\ rms}$	2.36	2.39	2.39	5.24%
$V_{cn\ rms}$	2.25	2.29	2.29	7.13%	$V_{cn\ rms}$	2.27	2.3	2.27	6.19%
$V_{an\ max}$	2.57	2.62	2.63	6.27%	$V_{an\ max}$	2.47	2.49	2.53	5.70%
$V_{bn\ max}$	2.60	2.62	2.64	6.40%	$V_{bn\ max}$	2.50	2.52	2.51	5.34%
$V_{cn\ max}$	2.37	2.4	2.4	7.24%	$V_{cn\ max}$	2.37	2.39	2.37	6.64%

Fonte: Autoria própria (2023).

O teste de Kruskal-Wallis, aplicado ao conjunto de dados de DHT das tensões nas fases, revelou resultados interessantes. Diferentemente do que foi observado no dia 08/08/2023, conforme discutido na seção anterior, os resultados na Tabela 4.25 apontam que, nos dias seguintes da mesma semana, de 09/08/2023 a 14/08/2023, a análise estatística produziu valores- p menores que α . Como resultado, a hipótese nula foi rejeitada, indicando que pelo menos uma diferença significativa existe entre as variáveis analisadas.

Tabela 4.25 – Teste de Kruskal-Wallis das DHT das tensões nas fases - Dias 09/08 até 14/08.

Kruskal-Wallis				Dia 09/08/2023			
DHT	Valor- p	α	Sig.	DHT	Valor- p	α	Sig.
$V_{(an bn cn)}_{rms}$	0.0220	0.05	Sim	$V_{(an bn cn)}_{rms}$	0.0040	0.05	Sim
$V_{(an bn cn)}_{max}$	0.0056	0.05	Sim	$V_{(an bn cn)}_{max}$	0.0004	0.05	Sim
Kruskal-Wallis				Dia 11/08/2023			
DHT	Valor- p	α	Sig.	DHT	Valor- p	α	Sig.
$V_{(an bn cn)}_{avg}$	0.0350	0.05	Sim	$V_{(an bn cn)}_{rms}$	$1.2E^{-10}$	0.05	Sim
$V_{(an bn cn)}_{max}$	0.0009	0.05	Sim	$V_{(an bn cn)}_{max}$	$1.1E^{-9}$	0.05	Sim
Kruskal-Wallis				Dia 13/08/2023			
DHT	Valor- p	α	Sig.	DHT	Valor- p	α	Sig.
$V_{(an bn cn)}_{rms}$	$1.3E^{-11}$	0.05	Sim	$V_{(an bn cn)}_{rms}$	$3.4E^{-5}$	0.05	Sim
$V_{(an bn cn)}_{max}$	$1.5E^{-10}$	0.05	Sim	$V_{(an bn cn)}_{max}$	$3.2E^{-6}$	0.05	Não
Kruskal-Wallis				Dia 10/08/2023			
DHT	Valor- p	α	Sig.	DHT	Valor- p	α	Sig.
$V_{(an bn cn)}_{rms}$	$1.2E^{-10}$	0.05	Sim	$V_{(an bn cn)}_{rms}$	$3.4E^{-5}$	0.05	Sim
$V_{(an bn cn)}_{max}$	$1.1E^{-9}$	0.05	Sim	$V_{(an bn cn)}_{max}$	$3.2E^{-6}$	0.05	Não

Fonte: Autoria própria (2023).

Para uma investigação mais aprofundada dessas diferenças, recorreu-se ao teste de *post hoc* de Dunn-Bonferroni, com os resultados resumidos na Tabela 4.26. Observou-se um padrão consistente de diferenças, onde as DHT na fase A sempre se destacam das DHT na fase C, ou seja, apresentam valores- p menores que 5%. Essa tendência também é evidente nas comparações entre as DHT da fase B e C. No entanto, o pós-teste demonstrou que as DHT das tensões nas fases A e B não exibem evidências estatísticas significativas ($p > 0.05$), sugerindo que não há diferenças significativas entre elas. Isso nos permite concluir que as distorções harmônicas nas tensões das fases no dia 08/08/2023 se destacaram como atípicas em relação aos dias subsequentes.

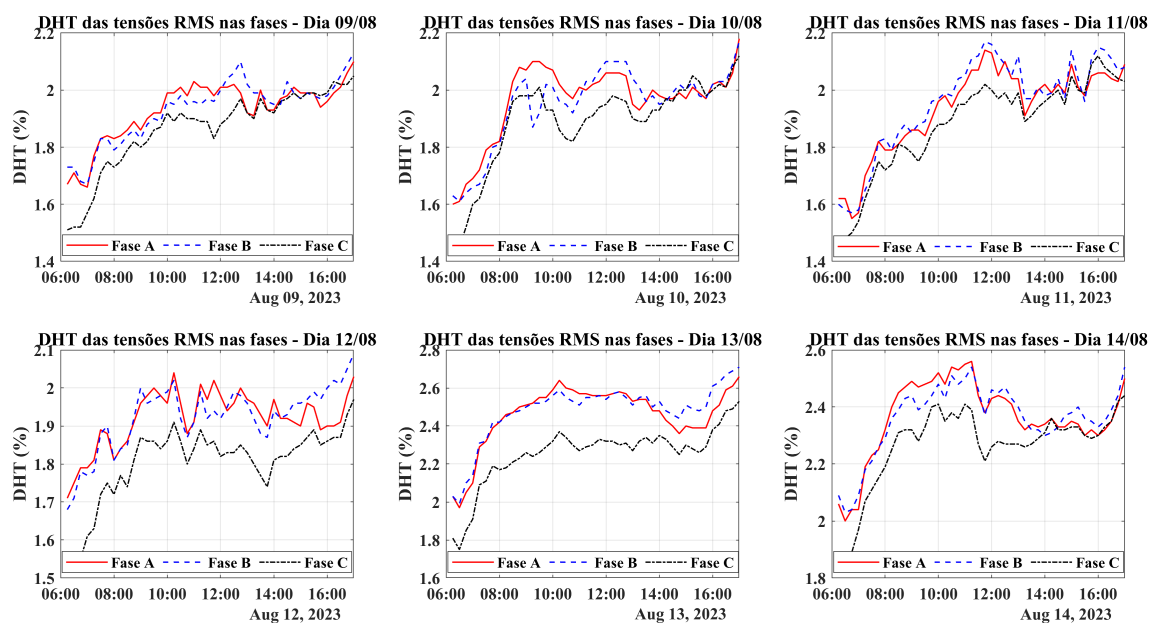
Tabela 4.26 – Teste Dunn-Bonferroni das DHT das tensões nas fases - Dias 09/08 até 14/08.

Dunn-Bonferroni			Dia 09/08/2023			Dunn-Bonferroni			Dia 10/08/2023		
Grupo 1			Grupo 2			Grupo 1			Grupo 2		
			Valor- <i>p</i>						Valor- <i>p</i>		
DHT $V_{an\ rms}$			DHT $V_{bn\ rms}$			DHT $V_{an\ rms}$			DHT $V_{bn\ rms}$		
DHT $V_{an\ rms}$			DHT $V_{cn\ rms}$			DHT $V_{an\ rms}$			DHT $V_{cn\ rms}$		
DHT $V_{bn\ rms}$			DHT $V_{cn\ rms}$			DHT $V_{bn\ rms}$			DHT $V_{cn\ rms}$		
DHT $V_{an\ max}$			DHT $V_{bn\ max}$			DHT $V_{an\ max}$			DHT $V_{bn\ max}$		
DHT $V_{an\ max}$			DHT $V_{cn\ max}$			DHT $V_{an\ max}$			DHT $V_{cn\ max}$		
DHT $V_{bn\ max}$			DHT $V_{cn\ max}$			DHT $V_{bn\ max}$			DHT $V_{cn\ max}$		
Dunn-Bonferroni			Dia 11/08/2023			Dunn-Bonferroni			Dia 12/08/2023		
Grupo 1			Grupo 2			Grupo 1			Grupo 2		
			Valor- <i>p</i>						Valor- <i>p</i>		
DHT $V_{an\ rms}$			DHT $V_{bn\ rms}$			DHT $V_{an\ rms}$			DHT $V_{bn\ rms}$		
DHT $V_{an\ rms}$			DHT $V_{cn\ rms}$			DHT $V_{an\ rms}$			DHT $V_{cn\ rms}$		
DHT $V_{bn\ rms}$			DHT $V_{cn\ rms}$			DHT $V_{bn\ rms}$			DHT $V_{cn\ rms}$		
DHT $V_{an\ max}$			DHT $V_{bn\ max}$			DHT $V_{an\ max}$			DHT $V_{bn\ max}$		
DHT $V_{an\ max}$			DHT $V_{cn\ max}$			DHT $V_{an\ max}$			DHT $V_{cn\ max}$		
DHT $V_{bn\ max}$			DHT $V_{cn\ max}$			DHT $V_{bn\ max}$			DHT $V_{cn\ max}$		
Dunn-Bonferroni			Dia 13/08/2023			Dunn-Bonferroni			Dia 14/08/2023		
Grupo 1			Grupo 2			Grupo 1			Grupo 2		
			Valor- <i>p</i>						Valor- <i>p</i>		
DHT $V_{an\ rms}$			DHT $V_{bn\ rms}$			DHT $V_{an\ rms}$			DHT $V_{bn\ rms}$		
DHT $V_{an\ rms}$			DHT $V_{cn\ rms}$			DHT $V_{an\ rms}$			DHT $V_{cn\ rms}$		
DHT $V_{bn\ rms}$			DHT $V_{cn\ rms}$			DHT $V_{bn\ rms}$			DHT $V_{cn\ rms}$		
DHT $V_{an\ max}$			DHT $V_{bn\ max}$			DHT $V_{an\ max}$			DHT $V_{bn\ max}$		
DHT $V_{an\ max}$			DHT $V_{cn\ max}$			DHT $V_{an\ max}$			DHT $V_{cn\ max}$		
DHT $V_{bn\ max}$			DHT $V_{cn\ max}$			DHT $V_{bn\ max}$			DHT $V_{cn\ max}$		

Fonte: Autoria própria (2023).

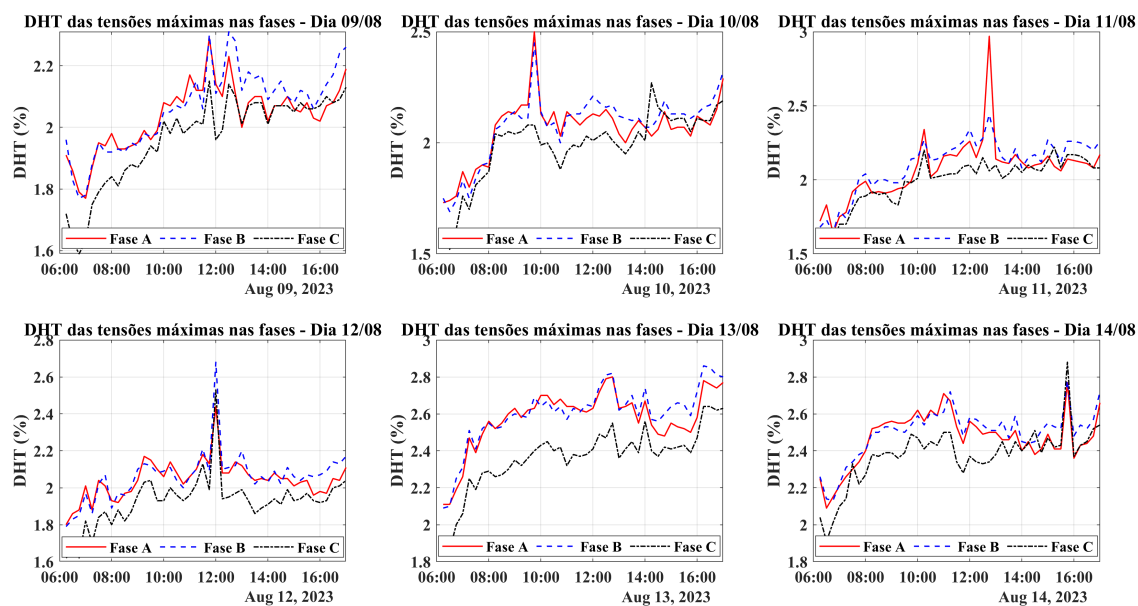
As Figuras 4.18 e 4.19 fornecem uma análise do comportamento das DHT das tensões RMS e máximas nas fases durante o período de 09/08/2023 a 14/08/2023. A partir dessas representações visuais, é possível observar que as diferenças nas DHT das tensões entre as fases não é muito expressiva, exceto pelos dias 12/08 e 13/08, onde os valores de DHT das tensões RMS nas fases A e B foram superiores aos valores da fase C.

Figura 4.18 – Gráficos das DHT das tensões RMS nas fases - Dias 09/08 até 14/08.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 4.19 – Gráficos das DHT das tensões máximas nas fases - Dias 09/08 até 14/08.



Fonte: Autoria própria (2023).

Vale destacar que os gráficos revelam uma série de variações ao longo do período analisado, especialmente nos grupos de DHT das tensões máximas. Por exemplo, em 11/08, houve um pico notável de 2.97%. No entanto, o aspecto mais crucial a ser observado é que esses valores permanecem dentro do limite estabelecido de 10%, conforme estipulado no Módulo 8 do PRODIST.

4.2.6 Comportamento das Frequências no Sistema Elétrico

A análise descritiva das frequências do sistema em estudo é apresentada de forma concisa na Tabela 4.27. Semelhantemente ao que foi observado no dia 08/08, conforme analisado na seção anterior, as medidas de tendência central revelam valores similares, com uma baixa dispersão em relação à média da amostra. Isso sugere a presença de um padrão de estabilidade nos dados de frequência do sistema elétrico sob avaliação.

Tabela 4.27 – Análise descritiva das frequências no sistema (Hz).

Dia 09/08/2023					Dia 10/08/2023				
	Média	Med.	Moda	CV		Média	Med.	Moda	CV
F_{min}	59.94	59.94	59.93	0.03%	F_{min}	59.95	59.95	59.95	0.02%
F_{rms}	60	60	60	0.02%	F_{rms}	60	60	60	0.02%
F_{max}	60.06	60.06	60.06	0.03%	F_{max}	60.06	60.06	60.05	0.03%
Dia 11/08/2023					Dia 12/08/2023				
	Média	Med.	Moda	CV		Média	Med.	Moda	CV
F_{min}	59.94	59.94	59.93	0.03%	F_{min}	59.94	59.94	59.93	0.03%
F_{rms}	60	60	60	0.02%	F_{rms}	60	60	60	0.02%
F_{max}	60.06	60.06	60.06	0.03%	F_{max}	60.06	60.06	60.06	0.03%
Dia 13/08/2023					Dia 14/08/2023				
	Média	Med.	Moda	CV		Média	Med.	Moda	CV
F_{min}	59.94	59.94	59.93	0.03%	F_{min}	59.94	59.94	59.93	0.03%
F_{rms}	60	60	60	0.02%	F_{rms}	60	60	60	0.02%
F_{max}	60.06	60.06	60.06	0.03%	F_{max}	60.06	60.06	60.06	0.03%

Fonte: Autoria própria (2023).

Através dos resultados obtidos no teste de Kruskal-Wallis, apresentados na Tabela 4.28, destacou-se que todos os valores- p , referentes a todas as amostras de seis dias da semana, foram inferiores ao valor de α . Isso claramente indica que existem diferenças estatisticamente significativas entre as variáveis em estudo. Em um passo subsequente, empregou-se o teste de comparação múltipla de Dunn-Bonferroni para investigar quais variáveis se distinguem umas das outras. Surpreendentemente, os resultados revelaram diferenças estatisticamente significativas entre todas as variáveis de frequência, conforme apresentado na Tabela 4.29.

Tabela 4.28 – Teste de Kruskal-Wallis das frequências - Dias 09/08 até 14/08.

Kruskal-Wallis		Dia 09/08/2023		Kruskal-Wallis		Dia 10/08/2023	
	Valor- <i>p</i>	α	Sig.		Valor- <i>p</i>	α	Sig.
$F_{(min rms max)}$	$6.81E^{-26}$	0.05	Sim	$F_{(min rms max)}$	$4.51E^{-26}$	0.05	Sim
Kruskal-Wallis		Dia 11/08/2023		Kruskal-Wallis		Dia 12/08/2023	
	Valor- <i>p</i>	α	Sig.		Valor- <i>p</i>	α	Sig.
$F_{(min rms max)}$	$1.18E^{-25}$	0.05	Sim	$F_{(min rms max)}$	$6.75E^{-21}$	0.05	Sim
Kruskal-Wallis		Dia 13/08/2023		Kruskal-Wallis		Dia 14/08/2023	
	Valor- <i>p</i>	α	Sig.		Valor- <i>p</i>	α	Sig.
$F_{(min rms max)}$	$4.25E^{-22}$	0.05	Sim	$F_{(min rms max)}$	$6.75E^{-21}$	0.05	Sim

Fonte: Autoria própria (2023).

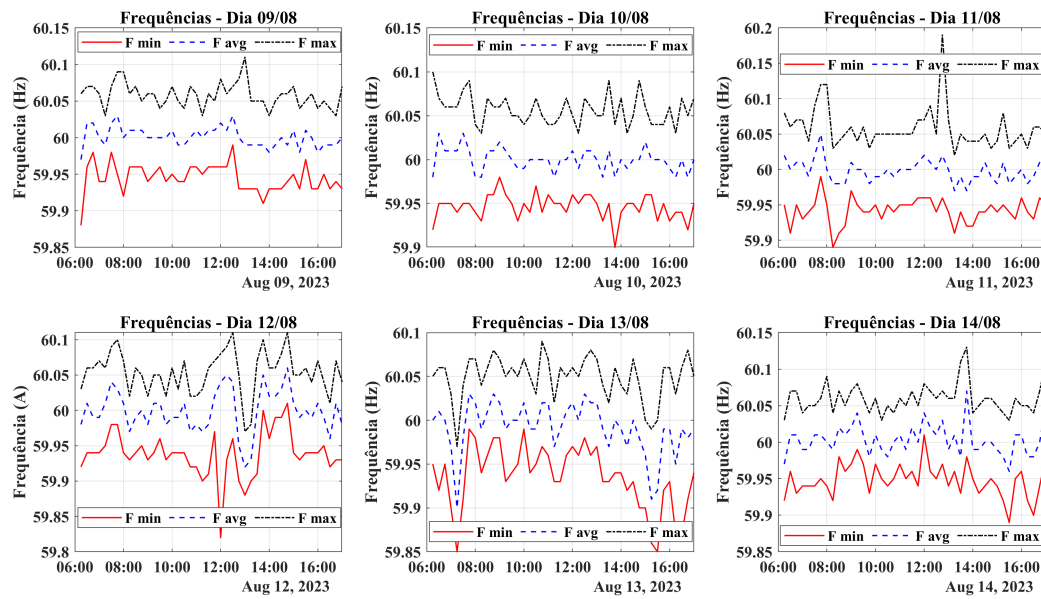
Tabela 4.29 – Teste de Dunn-Bonferroni das frequências - Dias 09/08 até 14/08.

Teste Dunn			Dia 09/08/2023			Teste Dunn			Dia 10/08/2023		
Grupo 1	Grupo 2	Valor- <i>p</i>				Grupo 1	Grupo 2	Valor- <i>p</i>			
F_{min}	F_{rms}	$9.58E^{-8}$				F_{min}	F_{rms}	$6.59E^{-8}$			
F_{min}	F_{max}	0				F_{min}	F_{max}	0			
F_{rms}	F_{max}	$5.61E^{-8}$				F_{rms}	F_{max}	$6.59E^{-8}$			
Teste Dunn			Dia 11/08/2023			Teste Dunn			Dia 12/08/2023		
Grupo 1	Grupo 2	Valor- <i>p</i>				Grupo 1	Grupo 2	Valor- <i>p</i>			
F_{min}	F_{rms}	$7.1E^{-8}$				F_{min}	F_{rms}	$1E^{-6}$			
F_{min}	F_{max}	0				F_{min}	F_{max}	0			
F_{rms}	F_{max}	$1E^{-7}$				F_{rms}	F_{max}	$2.1E^{-6}$			
Teste Dunn			Dia 13/08/2023			Teste Dunn			Dia 14/08/2023		
Grupo 1	Grupo 2	Valor- <i>p</i>				Grupo 1	Grupo 2	Valor- <i>p</i>			
F_{min}	F_{rms}	$2.9E^{-6}$				F_{min}	F_{rms}	$1E^{-6}$			
F_{min}	F_{max}	0				F_{min}	F_{max}	0			
F_{rms}	F_{max}	$1.6E^{-7}$				F_{rms}	F_{max}	$2.1E^{-6}$			

Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 4.20 oferece uma representação visual do comportamento das frequências mínimas, RMS e máximas ao longo de seis dias durante o período de geração da usina fotovoltaica. Observando os valores mínimos, destaca-se a ocorrência de eventos em determinados momentos do dia que levam a variações na frequência, resultando em valores que se situam abaixo dos limites definidos no Módulo 8 do PRODIST, chegando a valores inferiores a 59.9 Hz . No entanto, é importante observar que essas variações estão apenas ligeiramente abaixo do limite inferior, com exceção do dia 12/08, que registrou um valor de 59.82 Hz .

Figura 4.20 – Gráficos das frequências do sistema - Dias 09/08 até 14/08.



Fonte: Autoria própria (2023).

No que diz respeito ao comportamento das frequências RMS, é notável que os valores permaneceram dentro dos limites normais de operação em todos os dias analisados. No entanto, ao avaliar os valores máximos de frequência, torna-se evidente que em alguns dias o sistema excedeu o limite máximo estabelecido pela ANEEL (2022), que é de 60.1 Hz . Por exemplo, no dia 11/08, às 12h45, a frequência atingiu um pico de 60.19 Hz , um valor ligeiramente maior.

4.2.7 Potências Ativas nas Fases

O último parâmetro elétrico avaliado foi a potência nas fases. Os valores centrais calculados estão resumidos na Tabela 4.30. É evidente que as médias e medianas diferem entre si, no entanto, os valores entre as fases são comparáveis. Quanto à moda, a base de dados utilizada não forneceu valores frequentes para os seis dias em questão. Por fim, é importante notar que o coeficiente de variação revelou um alto grau de dispersão nos valores das potências ativas nas fases em relação à média, ultrapassando 48% em todos os dias analisados.

Tabela 4.30 – Análise descritiva das potências ativas nas fases (W).

Dia 09/08/2023					Dia 10/08/2023				
	Média	Med.	Moda	CV		Média	Med.	Moda	CV
P_a	3036.3	3310.9	N.A	48.96%	P_a	3121.1	3591.5	N.A	49.72%
P_b	2996.2	3267	N.A	48.79%	P_b	3083.3	3544.2	N.A	49.64%
P_c	3054.4	3332.6	N.A	49%	P_c	3138	3610.4	N.A	49.80%
Dia 11/08/2023					Dia 12/08/2023				
	Média	Med.	Moda	CV		Média	Med.	Moda	CV
P_a	2123.4	2267.5	N.A	50.75%	P_a	2586.2	2426.7	N.A	53.97%
P_b	2099.2	2239.6	N.A	50.6%	P_b	2556.1	2392.1	N.A	53.80%
P_c	2132.4	2276	N.A	50.9%	P_c	2603.7	2441.1	N.A	54.08%
Dia 13/08/2023					Dia 14/08/2023				
	Média	Med.	Moda	CV		Média	Med.	Moda	CV
P_a	2990.8	3199.7	N.A	48.71%	P_a	3104.7	3481.7	N.A	49.30%
P_b	2957.5	3159.1	N.A	48.65%	P_b	3071.9	3438.7	N.A	49.23%
P_c	3013.8	3223.3	N.A	48.81%	P_c	3133.3	3512	N.A	49.40%

Fonte: Autoria própria (2023).

Os resultados do teste de Kruskal-Wallis, destinados a avaliar possíveis diferenças entre as potências ativas RMS nas fases A, B e C, estão detalhados na Tabela 4.31. Os valores- p obtidos superam o nível de significância estabelecido de 5%, o que indica que a hipótese nula não pode ser rejeitada. Consequentemente, não se encontram evidências estatisticamente significativas de diferenças entre as potências ativas nas fases do sistema elétrico.

Tabela 4.31 – Teste de Kruskal-Wallis das potências ativas nas fases - Dias 09/08 até 14/08.

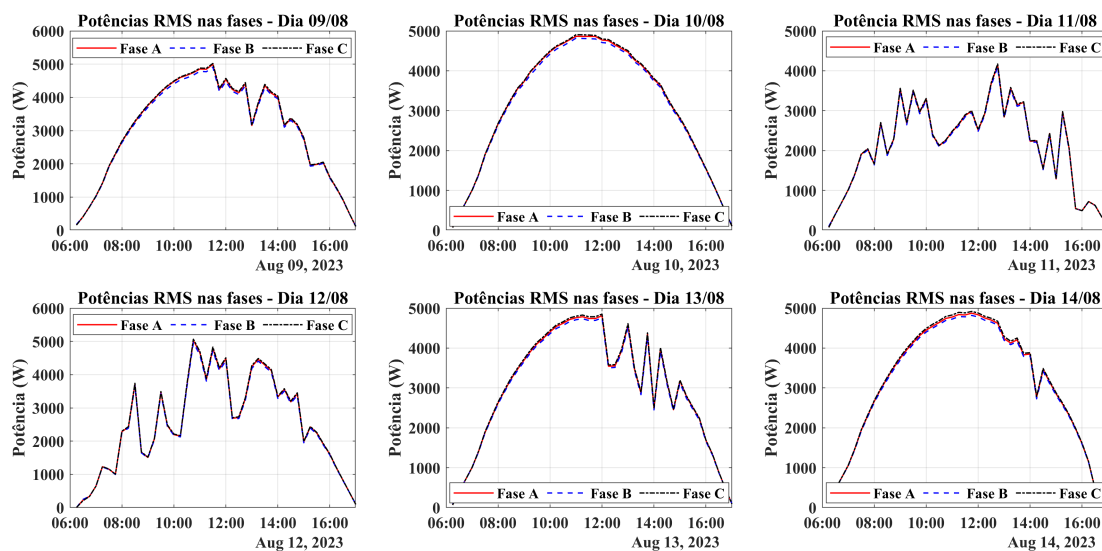
Kruskal-Wallis		Dia 09/08/2023			Kruskal-Wallis		Dia 10/08/2023		
	Valor- p	α	Sig.			Valor- p	α	Sig.	
P	0.9280	0.05	Não		P	0.9198	0.05	Não	
Kruskal-Wallis		Dia 11/08/2023			Kruskal-Wallis		Dia 12/08/2023		
	Valor- p	α	Sig.			Valor- p	α	Sig.	
P	0.9446	0.05	Não		P	0.9599	0.05	Não	
Kruskal-Wallis		Dia 13/08/2023			Kruskal-Wallis		Dia 14/08/2023		
	Valor- p	α	Sig.			Valor- p	α	Sig.	
P	0.8988	0.05	Não		P	0.8842	0.05	Não	

Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 4.21 exibe os gráficos das potências ativas nas fases do sistema trifásico, revelando que essas potências são muito semelhantes, com curvas praticamente sobrepostas. Entretanto, é importante destacar flutuações notáveis nos valores de potência, especialmente nos

dias 11/08 e 12/08. Coincidentemente, nesses mesmos dias, ocorreram oscilações significativas nas correntes elétricas, o que pode explicar as variações nas potências ativas nas fases.

Figura 4.21 – Gráficos das potências ativas nas fases - Dia 09/08 até 14/08.



Fonte: Autoria própria (2023).

5 CONCLUSÃO

Neste estudo, foi proposto uma análise da qualidade de energia e seu potencial impacto na rede elétrica de um edifício localizado na UFERSA. A pesquisa permitiu atingir com sucesso os objetivos específicos delineados, com foco especial na avaliação da qualidade de energia no ponto de conexão entre a usina fotovoltaica e a rede de distribuição. Vale ressaltar que os estudos estatísticos foram fundamentais para identificar padrões significativos.

Padrões, como, por exemplo, as tensões na fase B do sistema analisado apresentaram desequilíbrio de amplitude em comparação com as demais fases. Em relação às medidas de tendência central, tanto a média quanto a mediana demonstraram valores inferiores, indicando um grau de variabilidade mais pronunciado. Importante notar que esses fenômenos foram consistentes ao longo de todos os dias analisados. Adicionalmente, as representações gráficas implementadas confirmaram visualmente a existência desse desequilíbrio de amplitude.

Contudo, ao calcular o fator de desequilíbrio de tensão, conforme definido no módulo 8 do PRODIST, constatou-se que, apesar do desequilíbrio de amplitude entre as fases, não há um impacto significativo na qualidade da energia fornecida pelo sistema. Essa constatação sugere que o desequilíbrio identificado, embora presente, não atinge níveis críticos capazes de comprometer a eficiência e confiabilidade do fornecimento de energia.

Ao analisar as tensões nas fases e nas linhas ao longo do período estudado, observou-se flutuações recorrentes e esporádicas. É notável que, em alguns dias da semana, o sistema experimentou sobretensões, ultrapassando a faixa operacional padrão e permanecendo em uma zona precária por um período prolongado. Em outros casos, identificou-se variações abruptas, sendo evidente que flutuações na tensão podem ter um impacto direto na QEE, ocasionando cintilações luminosas no consumidor. Quanto aos demais parâmetros elétricos analisados, tais como corrente nas fases, frequências do sistema, DHT das tensões e potência ativa nas fases, evidenciaram-se variações notáveis ao longo dos sete dias de análise.

No contexto da geração fotovoltaica, essas variações podem estar vinculadas a diversos fatores, como sombreamento, mudanças climáticas e problemas elétricos. No entanto, é crucial destacar que a ausência de informações detalhadas sobre esses problemas, assim como a falta de dados meteorológicos, limita a formulação de conclusões definitivas nesse sentido.

No geral, o sistema analisado está em conformidade com os limites definidos pela ANEEL e a Neoenergia, onde todos os parâmetros elétricos avaliados não ultrapassaram os indicadores de QEE estipulado em norma. Contudo, é essencial realizar um monitoramento constante para assegurar que esses eventos permaneçam dentro dos limites estipulados pelas normas vigentes. Esse acompanhamento contínuo é fundamental para preservar os padrões de qualidade estabelecidos e prevenir possíveis problemas no fornecimento de energia no futuro.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Como extensão do estudo abordado neste trabalho de conclusão de curso, são apresentadas as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- Efetuar coletas de dados no quadro de distribuição do edifício com a usina fotovoltaica desativada para analisar o comportamento da rede elétrica na ausência da geração solar, e realizar um estudo comparativo como os resultados obtidos nessa análise;
- Expansão da pesquisa para as demais usinas fotovoltaicas localizadas no campus da UFERSA na cidade de Pau dos Ferros/RN, com o objetivo de identificar padrões e verificar se essas apresentam o mesmo comportamento observado no estudo em questão.
- Utilizar técnicas de regressão múltipla é uma abordagem eficaz para avaliar o impacto de variáveis externas, como dados meteorológicos, nos parâmetros elétricos. Essa análise poderá proporcionar uma compreensão mais aprofundada de como diversos fatores podem influenciar a qualidade do sistema elétrico;
- Utilização de modelos preditivos, incluindo algoritmos de aprendizado de máquina, para antecipar eventuais falhas no sistema fotovoltaico.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. *Regras e Procedimentos de Distribuição (Prodist): Módulo 8 – qualidade da energia elétrica*. [S.l.], 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodis>>. Acesso em: 05 setembro 2023. Citado 8 vezes nas páginas 21, 22, 23, 38, 42, 43, 47 e 72.
- ARCADEPANI, M. B. *Análise do impacto das distorções harmônicas de tensão nas componentes de corrente definidas pela cpt e cpc*. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2021. Citado na página 21.
- BARTH, A. F. *Impacto de sombreamento em sistemas fotovoltaicos: um estudo de caso utilizando software de simulação 3d*. 2023. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 20.
- DIEFENTHÄLER, A. T. et al. Equilíbrio de tensão em uma rede real de distribuição primária de energia elétrica. *energia*, v. 1, p. 2, 2017. Citado na página 22.
- DINNO, A. Nonparametric pairwise multiple comparisons in independent groups using dunn's test. *The Stata Journal*, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 15, n. 1, p. 292–300, 2015. Citado na página 30.
- FEDERAL, G. *Energia renovável chega a quase 50% da matriz elétrica brasileira*. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/08/energia-renovavel-chega-a-quase-50-da-matriz-eletrica-brasileira>>. Acesso em: 04 setembro 2023. Citado na página 18.
- FERREIRA, D. J. *Estudos dos Impactos da Contribuição de Geradores Fotovoltaicos na Proteção de Sobrecorrente dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. Tese (Doutorado) — Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016. Citado na página 20.
- FIRMINO, M. J. d. A. C. d. S. *Testes de hipóteses: Uma abordagem não paramétrica*. Tese (Doutorado), 2015. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 31.
- GAWLAK, A. Impact of microgeneration in a low-voltage network on the quality parameters of electrical energy. In: IEEE. *2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. [S.l.], 2017. p. 1–4. Citado na página 22.
- HIRAKATA, V. N.; MANCUSO, A. C. B.; CASTRO, S. M. de J. Teste de hipóteses: perguntas que você sempre quis fazer, mas nunca teve coragem. *Clinical and Biomedical Research*, v. 39, n. 2, 2019. Citado na página 25.
- IMS. *PowerNET M-300 - Multimetro IoT de Grandezas Elétricas e Utilidades*. 2021. Disponível em: <https://www.ims.ind.br/wp-content/uploads/2022/05/Manual_PowerNET_M-300.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- IRENA, I. Renewable energy and jobs: Annual review 2023. Abu Dhabi and International Labour Organization, Geneva, 2023. Citado na página 14.
- KAGAN, N.; ROBBA, E. J.; SCHMIDT, H. P. *Estimação de indicadores de qualidade da energia elétrica*. [S.l.]: Editora Blucher, 2009. Citado na página 21.

- MAPS, G. *Almoxarifado - Ufersa campus Pau dos Ferros · BR-226, s/n, Pau dos Ferros - RN, 59900-000, Brasil*. 2023. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/place/Almoxarifado+-+Ufersa+campus+Pau+dos+Ferros/@-6.104668,-38.1824302,734m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x7bb33a789b6a46f0:0x6caa72ae3f041e9!8m2!3d-6.1039231!4d-38.1826471!16s%2Fg%2F11td9_wj37?entry=tту>. Acesso em: 24 setembro 2023. Citado na página 32.
- MATIAS, D.; CARDOSO, L. S. Análise de viabilidade técnica-econômica sobre um sistema de geração solar fotovoltaica. 2023. Citado na página 19.
- MCKIGHT, P. E.; NAJAB, J. Kruskal-wallis test. *The corsini encyclopedia of psychology*, Wiley Online Library, p. 1–1, 2010. Citado na página 26.
- MEHL, E. L. Qualidade da energia elétrica. *UNIVERSIDADE FEDER-AL DO PARANÁ–UFPR*, p. 21, 2012. Citado na página 20.
- NEOENERGIA. *DIS-NOR-031 – Conexão de Microgeradores ao Sistema de Distribuição*. [S.l.], 2022. Citado 7 vezes nas páginas 18, 19, 20, 22, 35, 38 e 47.
- NUNES, E. A. d. F. *Análise de impactos na rede de distribuição de energia elétrica decorrentes da inserção de sistemas de geração fotovoltaicos*. Dissertação (Mestrado) — Brasil, 2017. Citado na página 15.
- ONS. Relatório anual 2022. Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2022. Citado na página 14.
- OTONI, L. P. A descarbonização ea importância do gás natural como fonte de energia no processo de transição energética. Universidade Federal de São Carlos, 2023. Citado na página 14.
- PEREIRA, D. G.; AFONSO, A.; MEDEIROS, F. M. Overview of friedman’s test and post-hoc analysis. *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, Taylor & Francis, v. 44, n. 10, p. 2636–2653, 2015. Citado na página 30.
- PERES, F. *As falácias do valor de p*. 2021. Disponível em: <<https://fernandafperes.com.br/blog/falacias-valor-de-p/>>. Acesso em: 11 setembro 2023. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- PERES, F. *Cálculo manual do teste de Kruskal-Wallis (não-paramétrico)*. 2022. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=6g3abeJBFj0&t=638s>>. Acesso em: 24 setembro 2023. Citado na página 28.
- RAHIMI, K.; MOHAJERYAMI, S.; MAJZOBI, A. Effects of photovoltaic systems on power quality. In: *IEEE. 2016 North American Power Symposium (NAPS)*. [S.l.], 2016. p. 1–6. Citado na página 21.
- REIS, E. A.; REIS, I. A. Análise descritiva de dados. *Relatório Técnico do Departamento de Estatística da UFMG*, v. 1, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- ROCHA, T. d. O. A. Contribuições para estratégia de controle aplicada à geração fotovoltaica interconectada à rede elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015. Citado na página 15.
- RODRIGUES, M. O tratamento e análise de dados. *Metodologia para a investigação social*, Escolar Editora, p. 179–230, 2011. Citado na página 23.

SOLAR, P. *Energia Solar no Brasil - Portal Solar - Tudo sobre Energia Solar Fotovoltaica*. 2022. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-no-brasil.html>>. Acesso em: 04 setembro 2023. Citado na página 18.

VIEIRA, K. D. Unidades de ensino potencialmente significativas para o estudo do efeito fotoelétrico e fotovoltaico. Cariacica, 2023. Citado na página 19.

ZACH. *Dunn's Test for Multiple Comparisons*. 2020. Disponível em: <<https://www.statology.org/dunns-test/>>. Acesso em: 24 setembro 2023. Citado na página 30.

ZAIONTZ, C. *Estatísticas reais usando Excel*. 2020. Disponível em: <www.real-statistics.com>. Citado na página 35.