

Avaliação da Qualidade de Energia de um Sistema Fotovoltaico na UFERSA: Uma Abordagem Estatística

1st Beatriz Karine Alves de Oliveira
dept. de Engenharia Elétrica
Univ. Federal Rural do Semi-Árido
Caraúbas, Brasil
beatriz.oliveira40447@alunos.ufersa.edu.br

2nd Sâmara de Cavalcante Paiva
dept. de Engenharias e Tecnologia
Univ. Federal Rural do Semi-Árido
Pau dos Ferros, Brasil
samara.paiva@ufersa.edu.br

Resumo—A integração de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica apresentaram um crescimento exponencial nos últimos anos. Esse avanço gerou preocupações relacionadas ao possível impacto na qualidade de energia elétrica fornecida pelas redes de distribuição. Nesse sentido, o presente estudo objetiva 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 isso, foram utilizados os indicadores descritos no módulo 8 do PRODIST para fins de comparação, além da aplicação de ferramentas estatísticas, como o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis com *post hoc* de Dunn-Bonferroni. Os resultados obtidos possibilitaram a identificação de padrões e anomalias, como o desequilíbrio de amplitude entre as fases da tensão em regime permanente.

Palavras-chave— Qualidade de energia elétrica, Sistemas fotovoltaicos, PRODIST, Kruskal-Wallis.

I. INTRODUÇÃO

A integração de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) vem crescendo exponencialmente nos últimos anos. De acordo com [1], no ano de 2022, o Brasil alcançou a 8^a posição no *ranking* mundial com 1.890.095 usinas conectadas à rede, com uma potência total 20.417,0 MW. O estudo presente em [2], aborda que dentro de 25 anos as fontes renováveis irão superar as hidroelétricas, que é a fonte predominante no Brasil. E estima-se que, entre 2020 e 2040, 96 GW de pequenos sistemas solares serão conectados à rede no país [3].

Diante do rápido crescimento, surgiram preocupações sobre o potencial impacto na Qualidade de Energia Elétrica (QEE) devido à constante inserção de SFCR. De acordo com [4], o impacto negativo na QEE está relacionado a qualquer anomalia fora das normas e padrões, que pode se manifestar por meio de: variações e desequilíbrio de tensão, corrente, frequência e distorções harmônicas.

No que diz respeito as normas no Brasil, a Resolução Normativa ANEEL n° 1.000/2021 desenvolvida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) determina as Regulações e Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), em que estabelece normas e padroniza o funcionamento e o desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. O Módulo 8 do

PRODIST apresenta os indicadores que são importantes para a análise da QEE [5].

Em relação as normas da concessionária do Rio Grande do Norte (RN), a NEOENERGIA desenvolveu a DIS-NOR-031, com o intuito de definir os requisitos técnicos para as novas conexões ou alterações das conexões existentes, das unidades consumidoras que possuem micro-geração conectadas ao sistema de distribuição de energia elétrica [6].

Nesse sentido, este estudo visa analisar diversos parâmetros elétricos relacionados à QEE. Essa análise será baseada nos indicadores do módulo 8 do PRODIST e nas normas estabelecidas pela concessionária de energia elétrica da região, em relação a um SFCR com potência de 38,34 kWp, instalado em um edifício destinado ao almoxarifado, situado no *campus* da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) na cidade de Pau dos Ferros/RN. A coleta de dados ocorreu no ponto de conexão entre a usina fotovoltaica e a rede elétrica, ao longo de um período de 6 dias. Além disso, foi empregado ferramentas estatísticas com o propósito de detectar padrões e possíveis anomalias na rede elétrica.

Para fins organizacionais, este trabalho possui uma fundamentação teórica, serão expostos de forma resumida os conhecimentos acadêmicos relacionados QEE e técnicas estatísticas. Em seguida, será realizada uma descrição breve sobre a usina fotovoltaica objeto de estudo, abrangendo todos os procedimentos executados durante a coleta de dados e o subsequente processamento e análise dessas informações. Na etapa de resultados e discussões, será apresentado de forma detalhada todos os resultados derivados das análises gráficas e estatísticas realizadas. Por fim, serão debatidos os principais pontos do trabalho, atentando-se a análise da QEE fornecida pelo SFCR.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Indicadores de Qualidade de Energia

1) *Tensão em regime permanente*: a avaliação da tensão em regime permanente requer a coleta de dados ao longo do tempo. Após a coleta de dados, a análise deve ser conduzida

comparando as tensões de leitura (TL) com os valores de referência apresentados na Tabela I [5].

TABELA I
FAIXA DE VARIAÇÃO DE TENSÃO (380/220)

Operação	Tensão de Leitura (V)
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	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403)/(TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

2) *Desequilíbrio de Tensão*: o desequilíbrio de tensão é uma condição indesejada em sistemas trifásicos, sendo caracterizada por qualquer variação na amplitude e/ou defasagem das tensões entre as fases. Geralmente, um desequilíbrio é considerado significativo quando excede o limite de 3%, conforme estabelecido na referência [5].

3) *Distorções Harmônicas Totais na Tensão*: as distorções harmônicas totais, responsáveis por gerar tensões não senoidais, têm o efeito de distorcer a forma de onda das tensões elétricas. Isso pode ter impactos adversos tanto na rede elétrica quanto nos equipamentos de uma unidade consumidora. Quando essas distorções ultrapassam o limite de 10%, conforme estipulado pela [5], os efeitos negativos tornam-se mais pronunciados e preocupantes.

4) *Variações de Frequências*: a variação na frequência se refere as oscilações nos valores da frequência fundamental, e para operar em condições normais o sistema de distribuição e o SFCR devem respeitar os limites estabelecidos de 59.9 Hz a 60.1 Hz [5].

B. Técnicas Estatísticas

O teste de hipóteses é uma ferramenta estatística amplamente empregada para avaliar a diferença entre dois resultados, com o objetivo de determinar se uma afirmação sobre um conjunto de dados é válida, tudo isso mantendo um risco controlado de erro. O analista enfrenta duas situações principais: a hipótese nula (H_0) e a hipótese alternativa (H_1), que refuta a hipótese nula [7].

Para analisar com qual hipótese se está trabalhando, é necessário compreender alguns conceitos essenciais, como o valor- p e o nível de significância (α). Sendo o valor- p uma métrica de comparação que avalia a suposição de que a H_0 seja verdadeira. Essa comparação é feita com o valor de (α) previamente estipulado, com o intuito de prevenir a ocorrência do erro tipo I, que decorre quando se rejeita a H_0 , mas na realidade a H_0 era verdadeira [8], [9].

Conforme citado nas referências [8] e [9], o valor de α mais comumente adotado é de 0.05, o que corresponde a uma probabilidade de cometer um erro do tipo I de 5%. Quando o valor- p é menor que o nível de significância α (ou seja, $p < 0.05$), isso indica evidência estatística suficiente para rejeitar a H_0 em favor da H_1 . Por outro lado, se o valor- p for maior do que α , não há evidência convincente para rejeitar H_0 .

Esses conceitos são importantes na área de análises estatísticas e são fundamentais na aplicação de ferramentas estatísticas mais avançadas. Neste trabalho optou-se utilizar o teste

não-paramétrico de Kruskal-Wallis com *post hoc* de Dunn-Bonferroni.

O teste de Kruskal-Wallis, também conhecido como análise de variância dos postos, avalia as diferenças entre três ou mais grupos independentes na amostra, e pode ser calculado através da Equação [1] e possui as seguintes hipóteses:

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

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

Sendo:

- R_i a soma dos postos individuais;
- n_i número de observações em cada variável;
- N número total de observações em todas as variáveis.

O valor H segue uma distribuição qui-quadrado com $k - 1$ graus de liberdade, onde k é o número de variáveis.

Caso H_0 seja rejeitado, pode utilizar testes de comparações múltiplas. O teste de Dunn-Bonferroni é uma ferramenta eficiente e realiza comparações em pares entre todos os grupos independentes no conjunto de dados estudados, oferecendo *insights* sobre quais grupos diferem estatisticamente uns dos outros [10].

O teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis possui vantagens em relação aos testes paramétricos, como a Análise de Variância (ANOVA), devido à menor dependência de pressupostos sobre a distribuição dos dados. É especialmente útil em situações de amostras grandes ou pequenas, onde os pressupostos paramétricos, como normalidade e homogeneidade de variâncias, podem não ser atendidos. No entanto, quando os dados atendem aos pressupostos dos testes paramétricos, a utilização do Kruskal-Wallis não é apropriada, pois pode levar a conclusões menos confiáveis [8].

Todas as técnicas abordadas anteriormente serão 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 QEE, contribuindo significativamente para a análise dos parâmetros elétricos do SFCR.

III. ESTUDO DE CASO

A. Descrição do Sistema Fotovoltaico

O *campus* da UFERSA 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 usina está equipada com 71 painéis fotovoltaicos, cada um com uma capacidade de 540 W, resultando em uma potência de pico total 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.

B. Análise de Dados

Para realizar a coleta de dados, foi utilizado o analisador PowerNET M-300, ilustrado na Fig. 1. Este equipamento é capaz de medir grandezas elétricas como tensão e corrente RMS, que vêm do inglês *Root Mean Square*, que representa o valor médio eficaz. Além disso, o dispositivo registra dados relacionados à distorção harmônica total e diversos outros parâmetros elétricos [11].

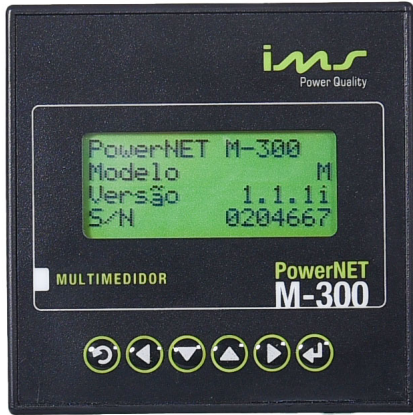


Fig. 1. Analisador PowerNET M-300.

A coleta de dados dessa pesquisa foi realizada durante um período de 6 dias, medindo parâmetros elétricos dos seguintes valores RMS:

- Tensões nas fases (V_{an} , V_{bn} e V_{cn});
- Tensões nas linhas (U_{ab} , U_{bc} e U_{ca});
- Correntes nas fases (I_{an} , I_{bn} e I_{cn});
- Distorções harmônicas totais nas fases (DHT_{Va} , DHT_{Vb} e DHT_{Vc});
- Frequências no sistema.

Após o período de 6 dias, procedeu-se a análise dos dados, e com o propósito de avaliar 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. É relevante mencionar que esse procedimento foi aplicado a todos os dias da semana, em todas as grandezas elétricas estudadas.

Por último, na etapa de análise dos dados em si, foram utilizados ferramentas e técnicas estatísticas através do pacote *Xrealstats*, que foi desenvolvido pelo Dr. Charles Zaiontz com o intuito de possibilitar análises estatísticas avançadas dentro do ambiente do Microsoft Excel. O pacote pode ser adquirido gratuitamente por meio de site '*Real Statistics*', presente na referência [12].

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Comportamento da Tensão em Regime permanente

Com o teste de Kruskal-Wallis foi possível determinar que existem diferenças significativas entre os grupos de tensões RMS nas fases. Notavelmente, todos os valores- p obtidos

foram menores que o nível de significância fixado em 5% ($p < \alpha$), conforme apresentado na Tabela II. Logo a H_0 foi rejeitada, indicando que as diferenças entre as fases são estatisticamente significativas nos 6 dias avaliados.

TABELA II
TESTE DE KRUSKAL-WALLIS DAS TENSÕES NAS FASES.

Dia 09/08/2023		Dia 10/08/2023		Dia 11/08/2023	
	Valor- p		Valor- p		Valor- p
V_{rms}	$3.76E^{-6}$	V_{rms}	0.0003	V_{rms}	$6.91E^{-7}$
Dia 12/08/2023		Dia 13/08/2023		Dia 14/08/2023	
	Valor- p		Valor- p		Valor- p
V_{rms}	$3.11E^{-9}$	V_{rms}	$3.37E^{-5}$	V_{rms}	$4.21E^{-5}$

Com a rejeição de H_0 no teste de Kruskal-Wallis, foi aplicado o teste Dunn-Bonferroni, que revelou uma diferença constante entre a fase B com as fases A e C, enquanto não foi encontrado diferenças significativas entre as fases A e C. Os resultados obtidos, resumidos na Tabela III, mostraram que existe um padrão nos dados de tensões RMS nas fases, onde a fase B do sistema demonstrou um desequilíbrio de amplitude em comparação com as outras duas fases.

Além disso, a análise gráfica foi essencial para ilustrar esse desequilíbrio de amplitude, conforme apresentado na Fig. 2. Note que além do desequilíbrio, os valores de tensões RMS apresentam muitas variações, e no contexto da geração fotovoltaica, essa variação pode estar atrelado a diversos fatores como sombreamento, variações climáticas, problemas elétricos, etc.

Ao analisar o gráfico do dia 13/08, observou-se que as tensões de leitura na fase A e C apresentaram valores maior do que 231 V. A fase C começou a atuar de forma precária após às 09:00h, atingindo um pico de 232,32 V às 11:45h, antes de retornar para a faixa adequada de operação às 12:15h, com uma tensão de 231,01 V. Isso significa que o sistema elétrico atuou de forma precária por um longo intervalo de tempo.

Esses eventos podem ser explicados pelo *datasheet* do inversor do SFCR. No qual, o dispositivo é projetado para operar em um sistema trifásico com tensão nominal entre fase e neutro de 220V e tensão nominal entre fases de 380V, dentro da faixa de 340V a 440V. Além disso, possui certificação do INMETRO, garantindo conformidade com as normas brasileiras.

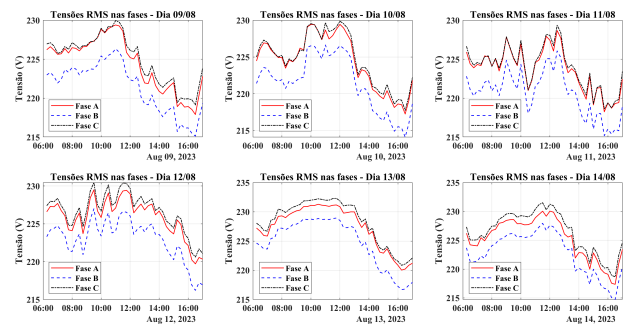


Fig. 2. Tensão RMS nas fases - Dia 09/08 até 14/08.

TABELA III
TESTE DE DUNN-BONFERRONI DAS TENSÕES NAS FASES.

Dia 09/08/2023			Dia 10/08/2023			Dia 11/08/2023		
Grupo-2	Grupo-1	Valor-p	Grupo-2	Grupo-1	Valor-p	Grupo-2	Grupo-1	Valor-p
$V_{an rms}$	$V_{bn rms}$	0.0002	$V_{an rms}$	$V_{bn rms}$	0.0013	$V_{an rms}$	$V_{bn rms}$	$1.51E^{-5}$
$V_{an rms}$	$V_{cn rms}$	0.31	$V_{an rms}$	$V_{cn rms}$	0.59	$V_{an rms}$	$V_{cn rms}$	0.60
$V_{bn rms}$	$V_{cn rms}$	$2.08E^{-6}$	$V_{bn rms}$	$V_{cn rms}$	0.0002	$V_{bn rms}$	$V_{cn rms}$	$1.21E^{-6}$
Dia 12/08/2023			Dia 13/08/2023			Dia 14/08/2023		
Grupo-2	Grupo-1	Valor-p	Grupo-2	Grupo-1	Valor-p	Grupo-2	Grupo-1	Valor-p
$V_{an rms}$	$V_{bn rms}$	$4.76E^{-6}$	$V_{an rms}$	$V_{bn rms}$	0.0019	$V_{an rms}$	$V_{bn rms}$	0.0022
$V_{an rms}$	$V_{cn rms}$	0.16	$V_{an rms}$	$V_{cn rms}$	0.19	$V_{an rms}$	$V_{cn rms}$	0.19
$V_{bn rms}$	$V_{cn rms}$	$2.14E^{-9}$	$V_{bn rms}$	$V_{cn rms}$	$9.86E^{-6}$	$V_{bn rms}$	$V_{cn rms}$	$1.23E^{-5}$

A análise de tensão RMS nas linhas não divergiu da análise de tensão RMS nas fases. Através do teste estatístico de Kruskal-Wallis com *post hoc* de Dunn-Bonferroni, apresentados nas Tabelas IV e V, observou-se uma diferença estatística significativa das linhas AB e BC com a linha CA. Esses resultados fornecem mais evidências de que a fase B do sistema estudado está experimentando um desequilíbrio de amplitude.

TABELA IV
TESTE DE KRUSKAL-WALLIS DAS TENSÕES NAS LINHAS.

Dia 09/08/2023		Dia 10/08/2023		Dia 11/08/2023	
U_{rms}	Valor-p	U_{rms}	Valor-p	U_{rms}	Valor-p
U_{rms}	0.0001	U_{rms}	0.0013	U_{rms}	$5.7E^{-6}$
Dia 12/08/2023		Dia 13/08/2023		Dia 14/08/2023	
U_{rms}	Valor-p	U_{rms}	Valor-p	U_{rms}	Valor-p
U_{rms}	$6.9E^{-8}$	U_{rms}	0.0001	U_{rms}	0.0005

Em relação a análise gráfica foi observado, através da Fig. 3, a diferença entre as linhas e as variações no valores de leitura de tensão RMS. Fica nítido que o dia 13/08, o sistema atuou de forma precária durante um intervalo de tempo, pois as tensões ultrapassaram o valor limite de 399 V determinado pela referência [5].

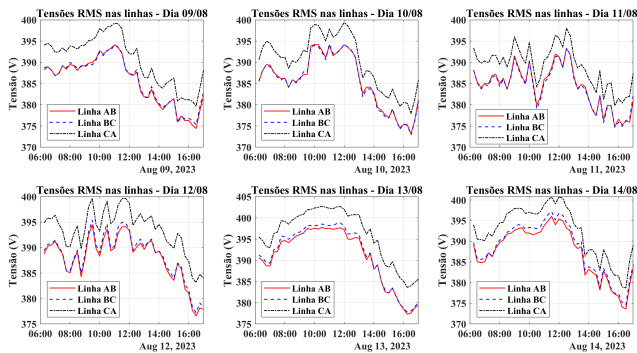


Fig. 3. Tensão RMS nas linhas - Dia 09/08 até 14/08.

B. 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 RMS das tensões nas linhas. A Fig. 4 exibe o comportamento desse fator calculado, e, de maneira geral, todos os valores permanecem abaixo de 3%. Logo, por mais que exista um desequilíbrio entre as tensões nas fases e nas linhas, os valores de leitura estão respeitando o limite estipulado na referência [5].

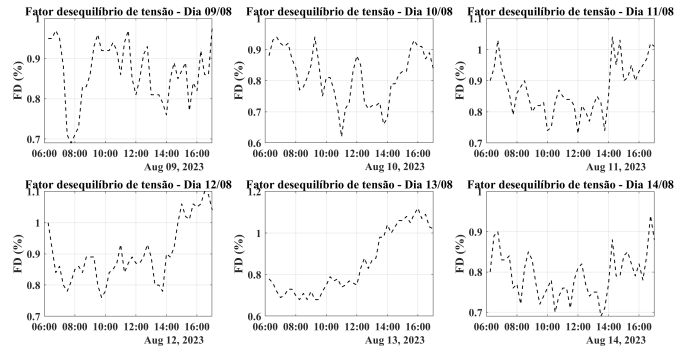


Fig. 4. Fator desequilíbrio da tensão RMS - Dia 09/08 até 14/08.

C. Comportamento da Corrente nas Fases

A análise estatística para o conjunto de dados de correntes RMS não apresentou diferenças significativas. Observou-se que todos os valores-p obtidos foram superiores que o nível de significância ($p > 0.05$), conforme apresentado na Tabela VI. Logo não rejeitou-se H_0 , e pode-se concluir que, não existem diferenças estatisticamente significativas nas distribuições das correntes RMS nas fases.

TABELA VI
TESTE DE KRUSKAL-WALLIS DAS CORRENTES NAS FASES.

Dia 09/08/2023		Dia 10/08/2023		Dia 11/08/2023	
I_{rms}	Valor-p	I_{rms}	Valor-p	I_{rms}	Valor-p
I_{rms}	0.9834	I_{rms}	0.9819	I_{rms}	0.9996
Dia 12/08/2023		Dia 13/08/2023		Dia 14/08/2023	
I_{rms}	Valor-p	I_{rms}	Valor-p	I_{rms}	Valor-p
I_{rms}	0.9995	I_{rms}	0.9745	I_{rms}	0.9735

TABELA V
TESTE DE DUNN-BONFERRONI DAS TENSÕES NAS LINHAS.

Dia 09/08/2023			Dia 10/08/2023			Dia 11/08/2023		
Grupo-2	Grupo-1	Valor-p	Grupo-2	Grupo-1	Valor-p	Grupo-2	Grupo-1	Valor-p
$U_{ab\ rms}$	$U_{bc\ rms}$	0.8760	$U_{ab\ rms}$	$U_{bc\ rms}$	0.9157	$U_{ab\ rms}$	$U_{bc\ rms}$	0.6810
$U_{ab\ rms}$	$U_{ca\ rms}$	0.0002	$U_{ab\ rms}$	$U_{ca\ rms}$	0.0019	$U_{ab\ rms}$	$U_{ca\ rms}$	$5.4E^{-5}$
$U_{bc\ rms}$	$U_{ca\ rms}$	0.0003	$U_{bc\ rms}$	$U_{ca\ rms}$	0.0014	$U_{bc\ rms}$	$U_{ca\ rms}$	$8.7E^{-6}$
Dia 12/08/2023			Dia 13/08/2023			Dia 14/08/2023		
Grupo-2	Grupo-1	Valor-p	Grupo-2	Grupo-1	Valor-p	Grupo-2	Grupo-1	Valor-p
$U_{ab\ rms}$	$U_{bc\ rms}$	0.5836	$U_{ab\ rms}$	$U_{bc\ rms}$	0.4368	$U_{ab\ rms}$	$U_{bc\ rms}$	0.4134
$U_{ab\ rms}$	$U_{ca\ rms}$	$1.8E^{-7}$	$U_{ab\ rms}$	$U_{ca\ rms}$	$5.6E^{-5}$	$U_{ab\ rms}$	$U_{ca\ rms}$	0.0002
$U_{bc\ rms}$	$U_{ca\ rms}$	$2.9E^{-6}$	$U_{bc\ rms}$	$U_{ca\ rms}$	$1.1E^{-3}$	$U_{bc\ rms}$	$U_{ca\ rms}$	0.0037

Através de representação visual, fica nítido que o comportamento das correntes é praticamente idêntico, com as curvas sobrepostas e sem desequilíbrio de amplitude, conforme ilustrado na Fig. 5.

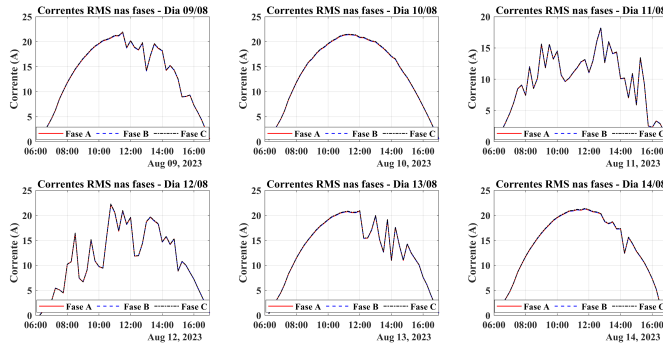


Fig. 5. Corrente RMS nas fases - Dia 09/08 até 14/08.

No entanto, observe que os dias 11/08 e 12/08 exibiram variações abruptas significativas. 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.

D. Comportamento da DHTV nas Fases

Os resultados estatísticos de Kruskal-Wallis obtidos no conjunto de dados das distorções harmônicas totais das tensões nas fases apresentaram valores- p menores que α ($p < 0.05$), conforme apresentados na Tabela VII. Como consequência, a H_0 foi rejeitada, indicando que há pelo menos uma diferença significativa entre as variáveis analisadas.

TABELA VII
TESTE DE KRUSKAL-WALLIS DAS DHT DAS TENSÕES NAS FASES.

Dia 09/08/2023		Dia 10/08/2023		Dia 11/08/2023	
DHT	Valor-p	DHT	Valor-p	DHT	Valor-p
V_{rms}	0.0220	V_{rms}	0.0040	V_{rms}	0.0350
Dia 12/08/2023		Dia 13/08/2023		Dia 14/08/2023	
DHT	Valor-p	DHT	Valor-p	DHT	Valor-p
V_{rms}	$1.2E^{-10}$	V_{rms}	$1.3E^{-11}$	V_{rms}	$3.4E^{-5}$

Por meio de múltiplas comparações utilizando o teste de Dunn-Bonferroni e com base nos resultados resumidos na Tabela VIII, foi identificado um padrão consistente de diferenças, onde a fase A sempre exibiu valores- p inferiores a α ($p < 0.05$) em comparação com a fase C. Essa tendência também é evidente nas comparações entre as fases B e C. No entanto, o *post hoc* demonstrou que as DHT das tensões nas fases A e B não exibem evidências estatísticas significativas ($p > 0.05$), sugerindo que não há diferenças entre elas.

De uma forma geral, as representações visuais das DHT das tensões RMS nas fases, conforme mostrado na Fig. 6, não apresentaram uma diferença 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. 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.

E. Comportamento da Frequência do Sistema

A análise das frequências RMS no sistema foi conduzida de maneira predominantemente visual, representado pela Fig. 7, na qual observou-se que, ao longo de todos os dias estudados, os valores de leitura coletados permaneceram consistentemente dentro dos limites normais de operação. Diante disso, não foi necessário a aplicação do teste de Kruskal-Wallis.

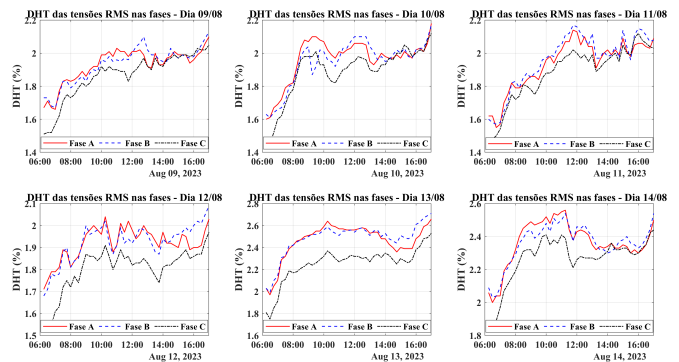


Fig. 6. DHT de tensão RMS nas fases - Dia 09/08 até 14/08.

TABELA VIII
TESTE DE DUNN-BONFERRONI DAS DHTV NAS FASES.

Dia 09/08/2023			Dia 10/08/2023		
Grupo-2	Grupo-1	Valor-p	Grupo-2	Grupo-1	Valor-p
DHT $V_{an} rms$	DHT $V_{bn} rms$	0.7791	DHT $V_{an} rms$	DHT $V_{bn} rms$	0.5769
DHT $V_{an} rms$	DHT $V_{cn} rms$	0.0117	DHT $V_{an} rms$	DHT $V_{cn} rms$	0.0018
DHT $V_{bn} rms$	DHT $V_{cn} rms$	0.0251	DHT $V_{bn} rms$	DHT $V_{cn} rms$	0.0105

Dia 11/08/2023			Dia 12/08/2023		
Grupo-2	Grupo-1	Valor-p	Grupo-2	Grupo-1	Valor-p
DHT $V_{an} rms$	DHT $V_{bn} rms$	0.4155	DHT $V_{an} rms$	DHT $V_{bn} rms$	0.7204
DHT $V_{an} rms$	DHT $V_{cn} rms$	0.0851	DHT $V_{an} rms$	DHT $V_{cn} rms$	$1.4E^{-8}$
DHT $V_{bn} rms$	DHT $V_{cn} rms$	0.0112	DHT $V_{bn} rms$	DHT $V_{cn} rms$	$1.6E^{-9}$

Dia 13/08/2023			Dia 14/08/2023		
Grupo-2	Grupo-1	Valor-p	Grupo-2	Grupo-1	Valor-p
DHT $V_{an} rms$	DHT $V_{bn} rms$	0.7369	DHT $V_{an} rms$	DHT $V_{bn} rms$	0.9978
DHT $V_{an} rms$	DHT $V_{cn} rms$	$2.6E^{-9}$	DHT $V_{an} rms$	DHT $V_{cn} rms$	$8.5E^{-5}$
DHT $V_{bn} rms$	DHT $V_{cn} rms$	$3E^{-10}$	DHT $V_{bn} rms$	DHT $V_{cn} rms$	$8.6E^{-5}$

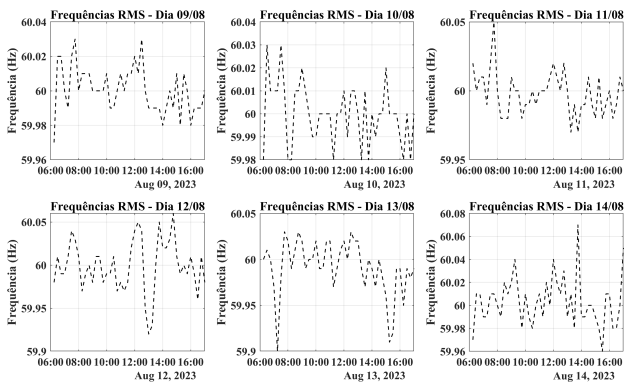


Fig. 7. Frequência RMS nas fases - Dia 09/08 até 14/08.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da elaboração deste estudo, foi possível concretizar os objetivos pretendidos, especialmente na avaliação da qualidade de energia no ponto de conexão entre a usina fotovoltaica e a rede de distribuição. É relevante ressaltar que os estudos estatísticos permitiram a identificação de padrões.

Padrões, como, por exemplo, as tensões na fase B do sistema estudado apresentaram desequilíbrio de amplitude em relação às demais fases. Este fenômeno foi consistente ao longo de todos os dias analisados. Além disso, as representações gráficas implementadas confirmaram visualmente a existência desse desequilíbrio de amplitude.

No entanto, ao calcular o fator de desequilíbrio de tensão conforme definido no módulo 8 do PRODIST, observou-se que, apesar do desequilíbrio de amplitude entre as fases, não há impacto significativo na qualidade da energia fornecida pelo sistema. Isso sugere que o desequilíbrio identificado, embora presente, não atinge níveis críticos que comprometam a eficiência e confiabilidade do fornecimento de energia.

Durante o período sob análise, destacaram-se variações recorrentes e esporádicas nos valores eficazes dos parâmetros elétricos coletados. Especificamente, as flutuações de tensão, que podem induzir cintilações luminosas no consumidor, impactando diretamente a qualidade da energia elétrica. Quanto

aos demais parâmetros elétricos, como corrente nas fases, foram identificadas variações significativas em apenas dois dias. No contexto da geração fotovoltaica, tais variações podem estar associadas a uma gama de fatores, incluindo sombreamento, mudanças climáticas, problemas elétricos, entre outros. No entanto, é importante salientar, que a falta de informações sobre esses problemas ou a carência de dados meteorológicos impede a formulação de conclusões definitivas nesse sentido.

REFERÊNCIAS

- [1] 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: 19 setembro 2023
- [2] TSURUDA, LEANDRO KAZUAKI et al. A importância da energia solar para o desenvolvimento sustentável e social. Ten Years Working Together For A Sustainable Future, São Paulo, v. 1, n. 6, p. 2-4, 2017.
- [3] 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: 27 setembro 2023.
- [4] SANTOSO, Surya et al. Electrical power systems quality. McGraw-Hill Education, 2012.
- [5] ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. 10 ed. Brasília: Aneel, 2017. 88 p.
- [6] NEOENERGIA. Companhia Energética do Rio Grande do Norte – COSERN. DIS-NOR-031: Conexão de Microgeradores ao Sistema de Distribuição. 1 ed. Natal: Cosern, 2020. 35 p.
- [7] HIRAKATA, Vânia Naomi; MANCUSO, Aline Castello Branco; DE JESUS CASTRO, Stela Maria. Teste de hipóteses: perguntas que você sempre quis fazer, mas nunca teve coragem. Clinical and Biomedical Research, v. 39, n. 2, 2019.
- [8] FIRMINO, Maria José de Almeida Caetano de Sousa. Testes de hipóteses: Uma abordagem não paramétrica. 2015. Tese de Doutorado.
- [9] PERES, F. As falácias do valor de p. 2021. Disponível em: <<https://fernandafperes.com.br/blog/falacias-valor-de-p/>>. Acesso em: 23 setembro 2023.
- [10] 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.
- [11] 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>.
- [12] ZAIONTZ, C. Estatísticas reais usando Excel. 2020. Disponível em: <www.real-statistics.com>.