

# ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA USINA SOLAR FOTOVOLTAICA NA QUALIDADE DE ENERGIA DO IFPE - CAMPUS PESQUEIRA, UTILIZANDO OS CRITÉRIOS DO MÓDULO 8 DO PRODIST

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE PHOTOVOLTAIC SOLAR PLANT ON THE POWER QUALITY AT IFPE - PESQUEIRA CAMPUS, USING THE CRITERIA FROM MODULE 8 OF PRODIST

**Alexandre Henrique Gouveia Farias**

ahgf@discente.ifpe.edu.br

**Prof. Dr. Manoel Henrique de Oliveira Pedrosa Filho**

manoel@pesqueira.ifpe.edu.br

---

## RESUMO

O Brasil está experimentando um crescimento acelerado na adoção da energia solar fotovoltaica. Os sistemas fotovoltaicos integrados à rede permitem que uma porção da energia gerada seja consumida instantaneamente pela unidade usuária, enquanto o excedente é transferido para a rede elétrica da concessionária, resultando em créditos energéticos. O presente trabalho investiga como a geração de energia solar fotovoltaica afeta a qualidade da energia elétrica em uma instituição de ensino, especificamente no IFPE - Campus Pesqueira. Utilizando os parâmetros definidos pelo Módulo 8 do PRODIST, o estudo avalia indicadores de qualidade como tensão, distorções harmônicas e fator de potência em diferentes cenários operacionais. A coleta de dados foi realizada entre março e agosto de 2024, totalizando 11.088 amostras. O software TopView foi empregado para tratar os dados medidos pelo analisador de rede, permitindo uma análise detalhada dos resultados. Os resultados revelaram variações significativas na qualidade da energia, com destaque para problemas de desequilíbrio de tensão e aumento das distorções harmônicas durante certos períodos de operação da usina fotovoltaica.

Palavras-chave: Analisador de rede. Qualidade da energia elétrica. Energia solar fotovoltaica.

## ABSTRACT

Brazil is experiencing rapid growth in the adoption of photovoltaic solar energy. Grid-integrated photovoltaic systems allow a portion of the generated energy to be consumed instantaneously by the user unit, while the excess is transferred to the utility grid, resulting in energy credits. This study investigates how photovoltaic solar

energy generation affects the quality of electrical energy in an academic environment, specifically at IFPE - Campus Pesqueira. Using the parameters defined by Module 8 of PRODIST, the study evaluates quality indicators such as voltage, harmonic distortions, and power factor in different operational scenarios. Data collection was carried out between March and August 2024, totaling 11,088 samples. The TopView software was used to process the data measured by the network analyzer, allowing for a detailed analysis of the results. The findings revealed significant variations in energy quality, with a focus on voltage imbalance issues and increased harmonic distortions during certain periods of photovoltaic plant operation.

Keywords: Network analyzer, Electrical energy quality, Photovoltaic solar energy.

---

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da participação de fontes renováveis na matriz energética global continua a ser um tema central nas discussões sobre sustentabilidade e redução do impacto ambiental. Diversos países se comprometem a diversificar suas matrizes energéticas para alcançar um desenvolvimento sustentável e reduzir a dependência de combustíveis fósseis. O Brasil, por exemplo, possui uma matriz elétrica que é majoritariamente renovável, destacando-se mundialmente nesse aspecto.

A matriz elétrica do Brasil, conforme dados atualizados de 2023, é composta por aproximadamente 63% de hidrelétricas, 20% de fontes eólicas, 9% de biomassa e biogás, e cerca de 9% de fontes solares (EPE, 2023). Além disso, a participação de fontes fósseis reduziu para cerca de 15%, refletindo o compromisso do país em aumentar a participação de fontes renováveis. Apesar dessa predominância de fontes renováveis, a dependência de recursos hídricos ainda apresenta desafios significativos para a segurança energética, especialmente durante períodos de seca prolongada. Para mitigar esses riscos, é essencial implementar estratégias que aumentem a diversificação da matriz energética sem recorrer significativamente a fontes não renováveis.

Entre as alternativas, a energia solar fotovoltaica, eólica e biomassa são destaques. A energia solar fotovoltaica, em particular, tem mostrado grande potencial para diversificar a matriz energética brasileira através da geração distribuída, que consiste em sistemas de geração de energia próprios conectados à rede de distribuição (ACKERMANN; ANDERSSON; SÖDER, 2001; PEPERMANS et al., 2005). A capacidade instalada de geração distribuída solar ultrapassou os 10 GW em 2023, com mais de 1 milhão de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (ANEEL, 2023).

A medição precisa dos parâmetros elétricos é essencial para garantir a operação eficiente de qualquer sistema elétrico. Com o aumento do uso de sistemas fotovoltaicos e bancos de baterias, a demanda por tecnologias capazes de monitorar e registrar indicadores de qualidade de energia (QEE) nesses sistemas cresce significativamente. Esses medidores devem ser capazes de identificar e registrar fenômenos como ripple e variações de tensão, que impactam diretamente na eficiência e durabilidade dos componentes conectados à rede (MENDONÇA, 2023).

No entanto, a medição da qualidade da energia não se limita apenas aos sistemas de c.c. Em ambientes industriais, onde a energia elétrica é fundamental

para o funcionamento dos equipamentos, problemas de qualidade da energia, como distorções harmônicas, podem causar falhas e reduzir a vida útil das máquinas. Esses problemas surgem geralmente de cargas não lineares, que distorcem a forma de onda senoidal da corrente e da tensão. Para mitigar esses efeitos, é essencial o uso de dispositivos de medição capazes de identificar e corrigir esses desvios, assegurando assim a eficiência operacional e a segurança dos equipamentos industriais (SILVA et al., 2023).

A crescente presença de inversores fotovoltaicos nas redes de distribuição apresenta desafios técnicos significativos, especialmente relacionados à qualidade da energia. A variação na irradiação solar, por exemplo, pode impactar os parâmetros de qualidade de energia, como a tensão de regime permanente e a distorção harmônica.

A tensão de regime permanente pode ser afetada pela desconexão de grandes cargas e pela injeção de potência da geração distribuída, potencialmente causando sobretensões. Essas sobretensões podem levar transformadores a operar próximos aos seus pontos de saturação, reduzindo a vida útil de equipamentos residenciais, como lâmpadas. Segundo o módulo 8 do Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) da ANEEL, a variação admissível para a tensão de regime permanente deve estar dentro de  $\pm 5\%$  da tensão nominal para redes de baixa tensão e  $\pm 10\%$  para redes de média tensão (ANEEL, 2021).

A distorção harmônica é caracterizada pela presença de frequências múltiplas da fundamental na onda de tensão e corrente. Isso pode aumentar as perdas em transformadores e motores, afetando o sistema elétrico devido à interação com a impedância dos circuitos e condutores, causando alguns problemas, dentre eles, o efeito pelicular, ressonâncias e sobretensões, interferências e ruídos, dentre outros. O módulo 8 da PRODIST define limites para a distorção harmônica total (THD) de tensão em 10% para redes de baixa tensão e 5% para redes de média tensão (ANEEL, 2021).

Equipamentos sensíveis como computadores e outros dispositivos eletrônicos, podem ser particularmente afetados pela distorção harmônica, levando a falhas prematuras e perda de dados.

Para assegurar a eficiência energética e a operação estável da rede, é fundamental realizar uma análise detalhada dos parâmetros de qualidade de energia em usinas solar fotovoltaica. Esta análise visa identificar as causas e responsabilidades por problemas de qualidade de energia e propor soluções para as anomalias encontradas. A coleta e avaliação desses dados são essenciais para melhorar a eficiência energética e resolver problemas no sistema de distribuição.

## **2 OBJETIVO DO ESTUDO**

O presente trabalho tem como objetivo analisar a qualidade da energia elétrica no IFPE – Campus Pesqueira, seguindo as diretrizes do Módulo 8 da PRODIST. A análise inclui medições e avaliações dos indicadores de qualidade da energia, como tensão em regime permanente e distorções harmônicas, em diferentes condições operacionais da usina fotovoltaica instalada no campus.

### 3 DESENVOLVIMENTO

Conforme os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 8 (PRODIST, 2024), a qualidade da energia elétrica é tratada sob três aspectos principais: qualidade do produto, qualidade do serviço prestado e qualidade do tratamento de reclamações. Esses aspectos são essenciais para garantir que os consumidores recebam energia elétrica de maneira eficiente e segura.

Qualidade de energia aborda fenômenos como a tensão em regime permanente, a variação de tensão de curta duração e as distorções harmônicas. A tensão em regime permanente é definida como a tensão medida em intervalos de tempo de dez minutos, durante os quais não ocorrem distúrbios elétricos capazes de invalidar a leitura (PRODIST, 2024). A variação de tensão de curta duração é o desvio significativo da amplitude do valor eficaz da tensão por um intervalo de tempo igual ou superior a 16,67 ms (1 ciclo) e inferior a 3 minutos (ANEEL, 2018). Já as distorções harmônicas são deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental (PRODIST, 2024).

#### 3.1 Níveis de tensão em regime permanente

O Módulo 8 da PRODIST (2024) estabelece limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente, além de indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão elétrica, critérios de medição e de registro, e prazos para compensação ao consumidor caso as medições de tensão excedam os limites dos indicadores. A conformidade de tensão elétrica refere-se à comparação do valor de tensão obtido por medição apropriada, no ponto de conexão, em relação aos níveis de tensão especificados como adequados, precários e críticos. A tensão em regime permanente deve ser monitorada em todo o sistema de distribuição, e as distribuidoras devem possuir recursos e técnicas modernas para garantir que a tensão mantenha um padrão adequado. A tensão nominal é de 220V, que usamos como referência para definir as três regiões:

- **Região crítica:** Nível de tensão inferior a 191V ou superior a 233V.
- **Região precária:** Nível de tensão entre 191V e 202V, ou entre 231V e 233V.
- **Região adequada:** Nível de tensão superior a 202V e inferior a 231V, com 220V sendo a tensão ideal de referência.

No mesmo documento, é fornecida a forma de calcular os Indicadores individuais de tensão em regime permanente.

Os indicadores individuais de tensão em regime permanente são a Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária – DRP e a Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica – DRC.

Para a composição dos indicadores individuais, deve-se considerar o registro de 1.008 leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos (período de integralização) de 10 minutos cada, equivalente há 168 horas.

Após a obtenção do conjunto de leituras válidas, devem ser calculados os indicadores DRP e DRC, conforme as seguintes equações:

$$DRP = \frac{nlp}{1.008} \times 100 [\%] \quad (1)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1.008} \times 100 [\%] \quad (2)$$

Em que:

nlp = maior valor entre as fases do número de leituras situadas na faixa precária;

nlc = maior valor entre as fases do número de leituras situadas na faixa crítica.

### 3.2 Distorções harmônicas

A frequência fundamental da rede elétrica no Brasil é de 60 Hz, também conhecida como o primeiro harmônico. As harmônicas são frequências múltiplas inteiras dessa frequência fundamental, que se misturam ao sinal de 60 Hz, causando distorções. Essas distorções podem afetar o desempenho dos equipamentos e a eficiência energética do sistema. O Módulo 8 da PRODIST estabelece limites para as distorções harmônicas totais, os quais devem ser observados no sistema de distribuição. Os limites para as distorções harmônicas totais são especificados na Tabela 1 do Módulo 8 da PRODIST (2021).

Tabela 1: Limites para as distorções harmônicas totais.

Indicador	Tensão nominal ( $V_n$ )		
	$V_n < 2,3 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} \leq V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT95%	10,0%	8,0%	5,0%
DTTp95%	2,5%	2,0%	1,0%
DTTi95%	7,5%	6,0%	4,0%
DTT <sub>3</sub> 95%	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: PRODIST (2021).

Na Tabela 1, os indicadores têm o seguinte significado:

- DTT95% - Distorção harmônica total de tensão.
- DTTp95% - Distorção Harmônica Total de Tensão para componentes pares não múltiplos de 3.
- DTTi95% - Distorção Harmônica Total de Tensão para componentes ímpares não múltiplos de 3.
- DTT<sub>3</sub>95% - Distorção Harmônica Total de Tensão para componentes múltiplos de 3.

Estes limites correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição, e são essenciais para garantir a qualidade da energia fornecida aos consumidores. Manter os níveis de distorção harmônica dentro desses limites ajuda a evitar problemas como aquecimento excessivo de equipamentos, perda de eficiência e falhas prematuras.

O módulo 8 do PRODIST dispõe das equações que serão utilizadas para o cálculo das distorções harmônicas, são elas:

$$DTT_p \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hp} V_h^2}}{V_1} \quad (3)$$

$$DTT_i \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{hp} V_h^2}}{V_1} \quad (4)$$

$$DTT_3 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{hp} V_h^2}}{V_1} \quad (5)$$

### 3.3 Fator de potência

O fator de potência (FP) é uma medida da eficiência com que a energia elétrica é utilizada em um sistema. Ele representa a relação entre a potência ativa (P), que é efetivamente utilizada para realizar trabalho, e a potência aparente (S), que é a combinação da potência ativa e da potência reativa (Q). A potência reativa é necessária para manter os campos magnéticos e elétricos em dispositivos como motores e transformadores, mas não realiza trabalho útil. O fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo, ou 1,00 e 0,92 capacitivo, conforme as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica.

O fator de potência pode ser calculado a partir dos valores registrados das potências ativa e reativa, ou das respectivas energias, utilizando a Equação 6.

$$fp = \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \quad (6)$$

Sendo:

$fp$  = fator de potência;  
 $EA$  = energia ativa;  
 $ER$  = energia reativa.

### 3.4 Desequilíbrio de tensão

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema.

O indicador de desequilíbrio de tensão a ser comparado com os limites é o FD95%, que representa o valor do Fator de Desequilíbrio de Tensão – FD% que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas. Para realizar o cálculo do desequilíbrio de tensão, utilizamos a equação 7 denominada equação alternativa indicada no módulo 8 do PRODIST.

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} [\%] \quad (7)$$

em que o valor de  $\beta$  é obtido pela equação 8.

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)} \quad (8)$$

Os limites para o indicador de desequilíbrio de tensão FD95% estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Limites para as distorções harmônicas totais.

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

Fonte: PRODIST (2024).

Os limites apresentados na Tabela 2 correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição.

## 4 METODOLOGIA

A metodologia inicialmente irá descrever o local de estudo, além de mostrar como foram obtidas as amostras para que fossem analisadas. Além disso, são mostrados os cenários de coleta das amostras, por fim, é mostrado como foi realizado o processamento dos dados para obtenção dos resultados.

### 4.1 local de estudo

O estudo foi conduzido no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE) – Campus Pesqueira, onde há uma usina fotovoltaica em operação. Atualmente, o Campus Pesqueira do IFPE possui aproximadamente 1.692 estudantes distribuídos em cursos Técnicos; cursos Superiores de Bacharelado e Licenciatura; cursos de Pós-graduação; cursos de Formação Inicial e Continuada (FIC) conveniados à modalidade de Educação de Jovens e Adultos (EJA), além de cursos de extensão periodicamente oferecidos pela Instituição (Plataforma Nilo Peçanha, 2020). Localizado no km 208 da BR 232, principal artéria

rodoviária de Pernambuco, o Campus Pesqueira do IFPE possui 20 mil metros quadrados de área construída e sua estrutura conta com quadra poliesportiva, mais de 30 salas de aula, três laboratórios de informática e dez laboratórios para práticas específicas de cada curso. O seu horário de funcionamento é das 07h às 22h de segunda à sexta, com exceção do sábado que funciona de 07h à 12h.

## 4.2 Coleta de dados

Os procedimentos adotados para a coleta e análise de dados seguem rigorosamente as normas estabelecidas no Módulo 8 da PRODIST (2021). A coleta de dados iniciou no dia 25 de março de 2024 e foi concluída em 1 de agosto de 2024. Durante esse período, foram realizadas coletas respeitando o número especificado de 1008 amostras, com intervalos de integração de 10 minutos, conforme as diretrizes estabelecidas no módulo 8 do PRODIST. No total, foram registradas 11.088 amostras.

Para a coleta de dados, foi utilizado o analisador de energia ET-5051C da Minipa, mostrado na Figura 1. O Analisador de Energia ET5051C da Minipa é um instrumento avançado projetado para a medição e análise detalhada de parâmetros elétricos em sistemas monofásicos e trifásicos, tanto em tempo real quanto em modo off-line, com tempos de integração configuráveis, que variam de 1 segundo a 60 minutos, essencial para o diagnóstico e otimização de sistemas de energia.

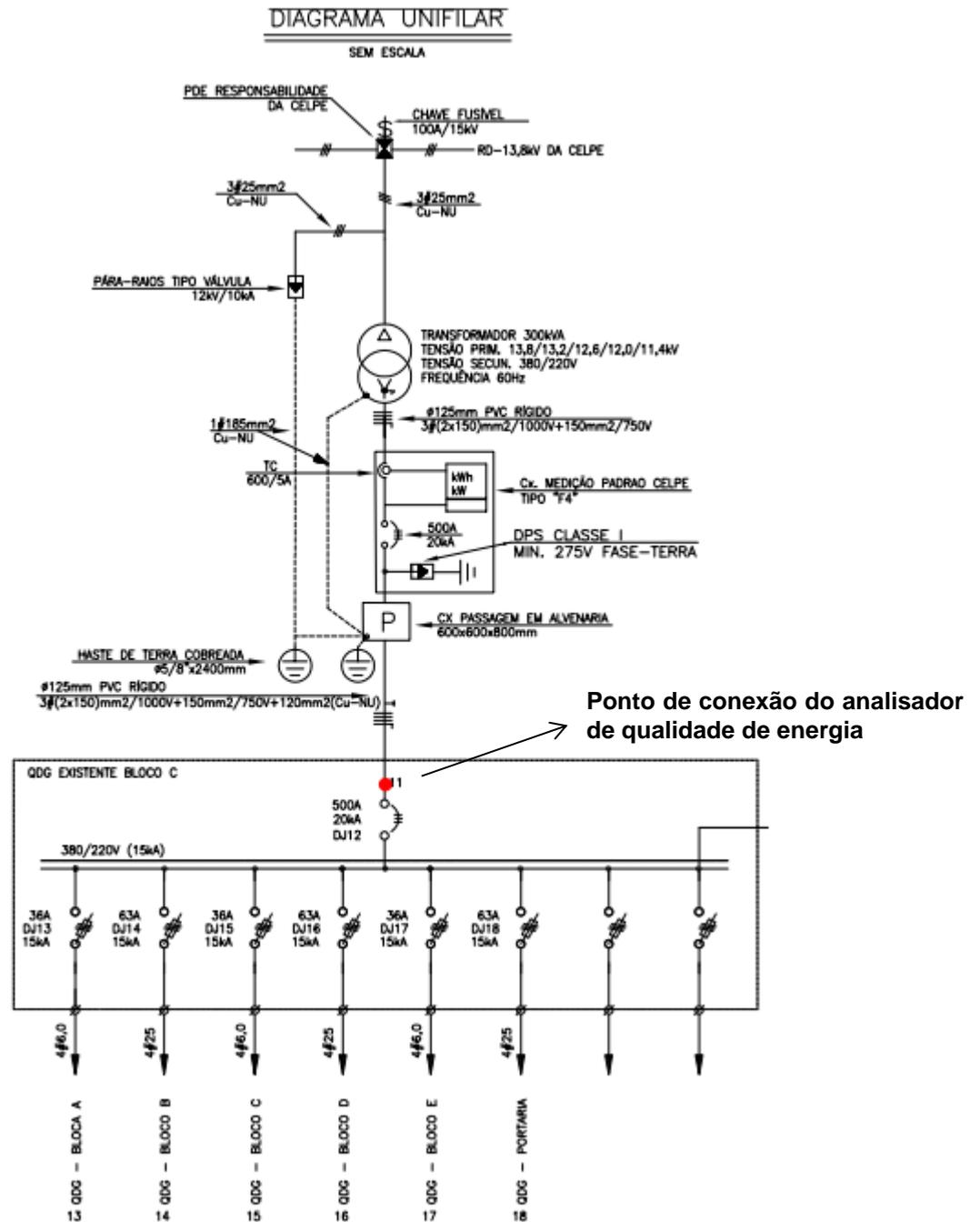
**Figura 1: Analisador de energia MINIPA ET-5051C.**



Fonte: Blog Minipaeducation (Acesso em 2024).

O equipamento foi colocado ao lado do disjuntor de 500A da entrada principal do quadro geral de baixa tensão (QGBT) conforme indicado na Figura 1, que representa o diagrama unifilar da instalação.

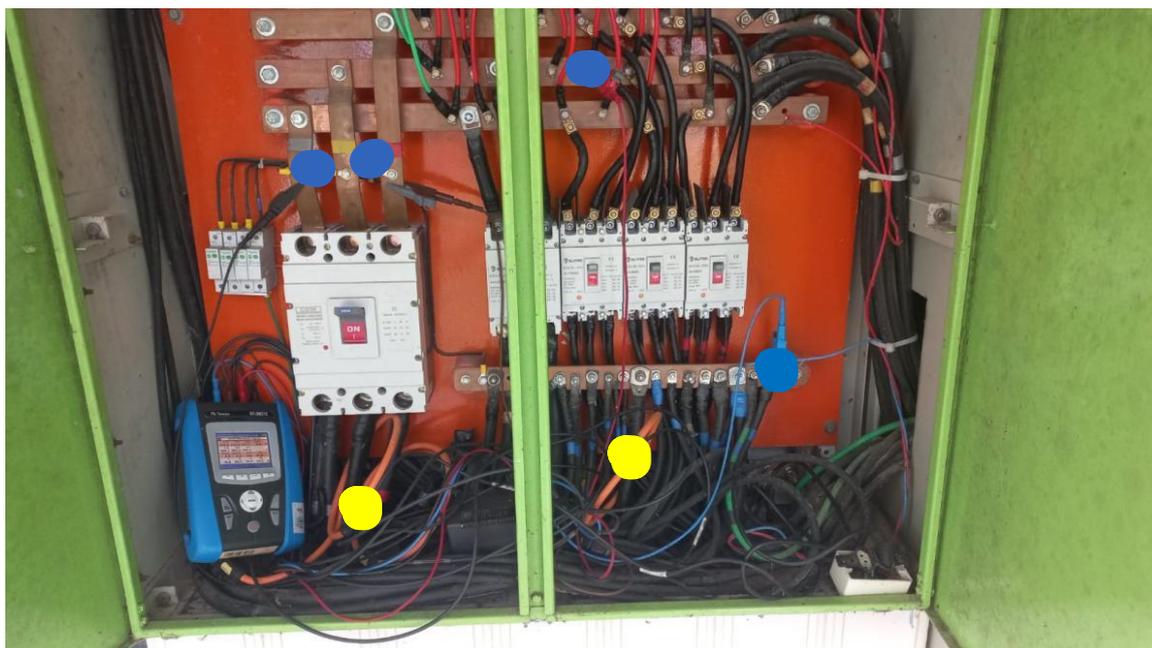
Figura 2: Diagrama unifilar geral.



Fonte: Autor.

Na Figura 3, é possível ver o equipamento instalado fisicamente no QGBT quadro do campus, que é o mesmo representado no unifilar, Figura 2:

**Figura 3: Analisador de Rede no QDG do IFPE – Campus Pesqueira.**



Fonte: Autor.

Conectou-se o analisador para que fosse realizadas coletas tanto de informações relacionadas à tensão quanto de corrente. Os pontos em azul indicam as ponteiras que foram conectadas com o intuito de obter dados da tensão, representando as três fases, fase 1, fase 2 e fase 3 e o barramento de neutro. Os pontos em amarelo indicam as ponteiras que foram conectadas para que fosse possível obter dados referentes à corrente.

A usina fotovoltaica do IFPE – Campus Pesqueira, Figura 4, possui 342 módulos fotovoltaicos, separados em inversores que possuem diferenças em modelo e potência nominal.

**Figura 4: Usina Fotovoltaica do IFPE – Campus Pesqueira.**



Fonte: Autor.

Os inversores e os módulos da usina solar fotovoltaica são organizados da seguinte forma:

- 6 inversores da marca SMA, modelo SB2000HFUS30, com potência de 2 kW, conectados a 102 módulos fotovoltaicos de 140 Wp.
- 11 inversores da marca PHB, modelo PHB3000-SS, com potência de 3 kW, que utilizam 200 módulos fotovoltaicos de 255 Wp.
- 1 inversor da marca Fronius, modelo Primo 8.2-1, com potência de 8,2 kW, associado a 40 módulos fotovoltaicos de 255 Wp.

Os módulos fotovoltaicos que estão contidos no retângulo na cor vermelha, Figura 4, estão conectados aos inversores da marca SMA. Os módulos que estão dentro do retângulo na cor amarela, Figura 4, estão conectados ao inversor da marca Fronius. Os demais módulos estão conectados aos inversores da marca PHB. O campus possui apenas um inversor fotovoltaico trifásico, todos os demais são monofásicos.

### 4.3 Cenários de coleta de dados

Para entender o impacto da usina fotovoltaica na qualidade da energia, as medições foram separadas em quatro cenários distintos. É importante frisar que, embora o campus estivesse em situação de greve, não é possível garantir que de fato todas as cargas estavam desligadas, entretanto, as principais, sim.

Cenário 1 - IFPE funcionando e usina fotovoltaica operando.

Este cenário representa as condições normais de operação do campus, com todas as cargas em funcionamento e a usina fotovoltaica ativa. As medições nesse

cenário permitem avaliar como a geração distribuída se comporta em conjunto com o consumo de energia do campus, incluindo variações de carga durante o dia.

**Cenário 2 - IFPE funcionando e usina fotovoltaica fora de operação.**

Neste cenário, todas as cargas estão em funcionamento normal, mas a usina fotovoltaica está desativada, permitindo a análise do impacto das cargas sem a geração distribuída. Este cenário é essencial para comparar as diferenças na qualidade da energia com e sem a contribuição da usina fotovoltaica.

**Cenário 3 - IFPE em greve e usina fotovoltaica operando.**

Aqui, todas as cargas essenciais do campus estão desligadas, enquanto a usina fotovoltaica permanece ativa. Este cenário permite a análise dos efeitos da geração distribuída isoladamente, sem a influência de outras cargas elétricas, facilitando a identificação dos impactos gerados exclusivamente pela usina fotovoltaica.

**Cenário 4 - IFPE em greve e usina fotovoltaica fora de operação.**

Neste último cenário, tanto as cargas essenciais quanto a usina fotovoltaica estão desligadas, servindo como referência para a análise comparativa dos outros cenários. Este cenário é crucial para estabelecer uma linha de base para as medições de qualidade da energia.

A Tabela 3 resume os períodos e as condições de coleta associadas a cada um dos cenários.

**Tabela 3: Períodos de Cenários de Coleta de Dados**

PERÍODO	CENÁRIOS DE COLETA DE DADOS
25/03 - 01/04	Cenário 1 - IFPE funcionando e usina fotovoltaica operando.
10/04 - 17/04	Cenário 3 - IFPE em greve e usina fotovoltaica operando.
10/05 - 17/05	Cenário 4 - IFPE em greve e usina fotovoltaica fora de operação.
21/05 - 28/05	Cenário 3 - IFPE em greve e usina fotovoltaica operando.
28/05 - 04/06	Cenário 3 - IFPE em greve e usina fotovoltaica operando.
05/06 - 11/06	Cenário 3 - IFPE em greve e usina fotovoltaica operando.
12/06 - 19/06	Cenário 3 - IFPE em greve e usina fotovoltaica operando.
21/06 - 28/06	Cenário 3 - IFPE em greve e usina fotovoltaica operando.
28/06 - 05/07	Cenário 3 - IFPE em greve e usina fotovoltaica operando.
18/07 - 25/07	Cenário 1 - IFPE funcionando e usina fotovoltaica operando.
25/07 - 01/08	Cenário 2 - IFPE funcionando e usina fotovoltaica fora de operação.

Fonte: Autor.

O objetivo principal com a definição dos cenários foi analisar o comportamento da instalação com a usina presente no campus injetando energia e o comportamento sem o sistema estar injetando energia na rede. Além disso, selecionamos períodos em que tanto o sistema quanto o IFPE – Campus Pesqueira estavam sem o devido funcionamento, foi o período em que a instituição esteve em greve.

#### 4.4 Processamento dos dados

Após a coleta das amostras com o analisador de energia, é necessário exportar o arquivo .hed através do próprio equipamento utilizado para analisar a energia, Figura 1. Foi utilizado o software TopView para abrir este arquivo. O TopView é um programa especializado na aquisição e análise de dados de instrumentos de medição e controle, como multímetros, osciloscópios e analisadores de energia. Ele permite a visualização, registro, armazenamento e exportação dos dados coletados pelos dispositivos Minipa, facilitando análises detalhadas e a geração de relatórios. Este software é amplamente utilizado em ambientes técnicos e de laboratório para monitorar e avaliar o desempenho de sistemas elétricos e eletrônicos. Com o TopView, extraímos os dados em um arquivo .xlsx, iniciando assim a análise dos indicadores.

Por conta da alta quantidade de volume de dados que o analisador foi parametrizado para obter, houve a necessidade do arquivo .xlsx ser subdividido em outros dois arquivos .xlsx. Para realizar a análise dos dados, foi necessário criar duas planilhas distintas para calcular os indicadores, sendo cada uma dessas planilhas, responsáveis por calcular os indicadores que estavam relacionados com os dados que possuíam, a Figura 5 traz uma amostra da estrutura da planilha desenvolvida.

**Figura 5 – Planilha utilizada para calcular indicadores FP, FD95% e Variação de tensão em regime permanente.**

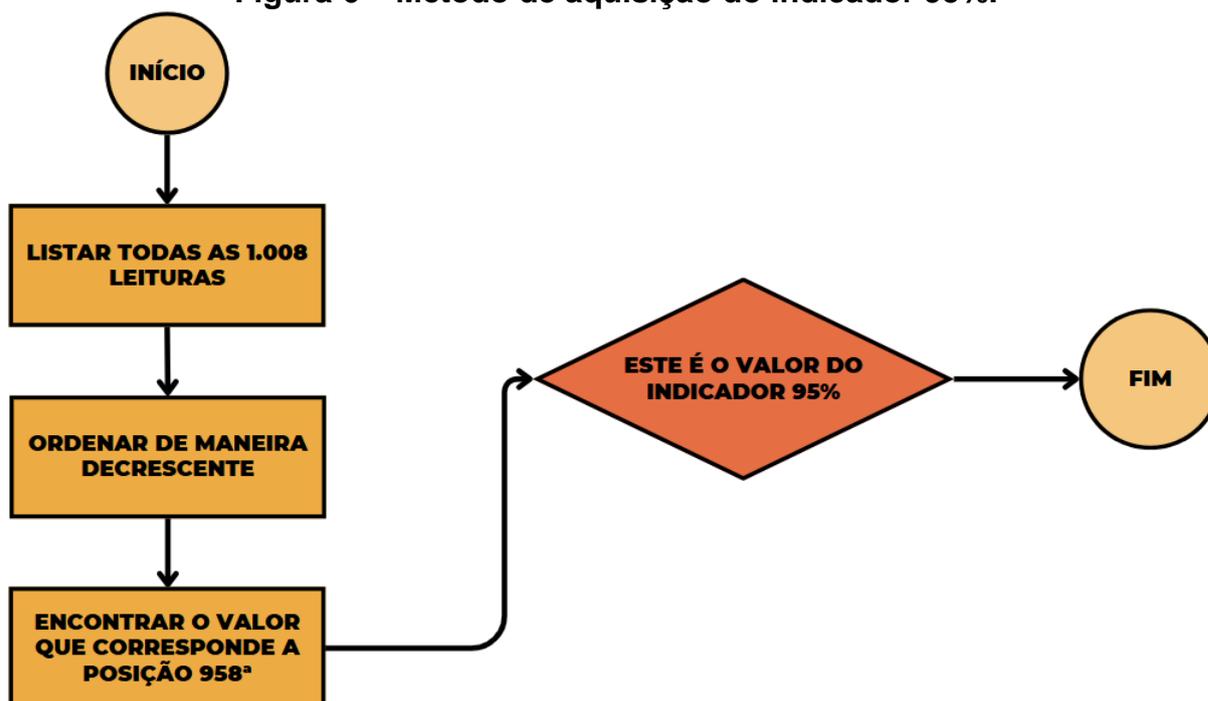
Time	V1_Avg [V]	V1_Max [V]	V1_Min [V]	V2_Avg [V]	V2_Max [V]	V2_Min [V]	V3_Avg [V]
25/07/2024 15:29:00	221,1	221,9	218,6	220,9	222	218,1	219,2
25/07/2024 15:39:00	220,3	221,3	218,1	221	222,2	219,8	219,4
25/07/2024 15:49:00	219,2	219,9	216,7	219,9	221,2	216,3	218,8

Fonte: Autor.

Conforme é possível observar na Figura 5, dividimos os dados obtidos de modo que uma planilha ficasse com os valores de tensões, potências, energias, entre outros, e uma segunda planilha ficasse com os dados de harmônicos da rede, mantendo a mesma estrutura de colunas. Deste modo, ao convertermos o arquivo .hed em um arquivo geral .xlsx, tornou-se possível dividir de forma mais prática os dados para que os indicadores fossem devidamente calculados.

O módulo 8 do PRODIST dispõe que devemos calcular os indicadores referentes a 95% das amostras, atendendo às necessidades. A Figura 6 traz a forma que foi utilizada para conseguir identificar qual seria esse valor.

Figura 6 – Método de aquisição do indicador 95%.



Fonte: Autor.

Para ilustrar o processo, considere a seguinte situação: a tensão em um sistema elétrico trifásico está sendo monitorada por um determinado período para obter o Fator de Desequilíbrio de Tensão (FD%) calculado pela equação 7. São feitas leituras da tensão a cada 10 minutos durante uma semana inteira. Isso resultará em 1.008 leituras válidas (144 leituras por dia durante 24 horas por 7 dias).

O primeiro passo é ordenar os 1.008 valores de FD% em ordem crescente, para verificar o valor do FD% que corresponde ao ponto onde 95% das leituras estão abaixo desse valor, para isto, a posição em que o valor corresponde a 95% das leituras é calculada multiplicando 1.008 por 0,95, o que dá aproximadamente 957,6, que será arredondada para 958<sup>a</sup>. O valor de FD% nesta posição corresponderá, portanto, ao FD95%.

A tabela 4 mostra um exemplo numérico deste processo.

**Tabela 4: Layout utilizado para obter FD95%.**

POSIÇÃO	FATOR DE DESEQUILÍBRIO	Vab4	Vbc4	Vca4	Vab2	Vbc2	Vca2	B
1	0,022942	17507011135	16945957602	16499546364	132314,1	130176,6	128450,6	0,333382
2	0,022978	17914811278	17229526252	16880298395	133846,2	131261,3	129924,2	0,333384
3	0,031248	17826832014	17324835256	16824171101	133517,2	131623,8	129708	0,333388
4	0,037521	17983464414	17642162511	17040088511	134102,4	132823,8	130537,7	0,333375
5	0,037602	18369579682	17758628049	17363069361	135534,4	133261,5	131769	0,333378

Fonte: Autor.

A estrutura da planilha em que é feito o cálculo do fator de disponibilidade é exibida na tabela 4. Essa foi uma amostra com o intuito de mostrar o layout

escolhido, mas a posição máxima é 1008, já que o módulo 8 do PRODIST especifica que a análise deve ser realizada com um total de 1008 leituras. Neste caso, o valor do indicador foi de 1,188474, o qual estava presente na 958ª posição.

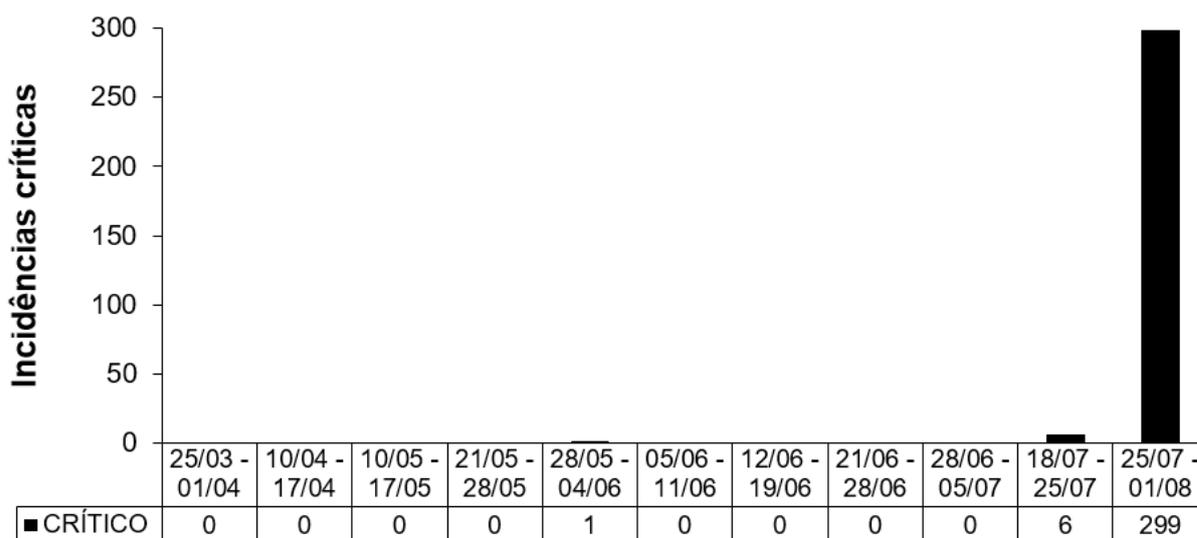
## 5 RESULTADOS E ANÁLISE

Seguindo a mesma ordem dos indicadores de qualidade descritos na seção 3, serão apresentados os resultados obtidos.

### 5.1 Nível de tensão em regime permanente

Para definir as três regiões, sendo elas, crítica, precária e adequada, utilizamos a tensão nominal de 220V. Os resultados apresentados na Figura 7 estão relacionados à região crítica do nível de tensão, tendo em vista os intervalos de tensão definidos pelo módulo 8 do PRODIST. Nela consta a incidência total por período para as três fases, sendo elas, fase 1, fase 2 e fase 3, sem fazer distinção.

**Figura 7 – Incidência crítica do nível de tensão em regime permanente.**

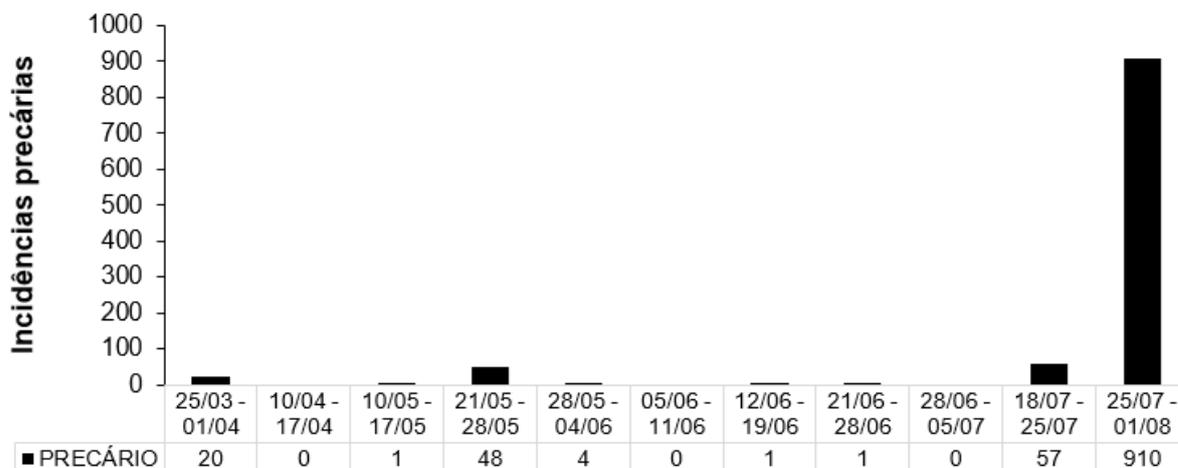


Fonte: Autor.

Conforme observado na Figura 7, houve apenas uma incidência da tensão na região crítica no período de 28/05 a 04/06, caracterizado como cenário 3. Além disso, no período de 18/07 a 25/07, ao qual é compreendido pelo cenário 1, foram encontradas seis incidências. No período de 25/07 a 01/08, caracterizado como cenário 2, foram encontradas 299 incidências.

Com isso, é possível identificar que, enquanto a usina fotovoltaica está operando, cenários 3 e 1, ocorreram poucas situações em que a tensão se encontrou na região crítica, diferentemente do período caracterizado como sendo do cenário 2, em que a usina solar fotovoltaica não está em operação.

Os resultados apresentados na Figura 8 estão relacionados à região precária do nível de tensão, tendo em vista os intervalos de tensão definidos pelo módulo 8 do PRODIST. Nela consta a incidência total por período para as três fases, sendo elas, fase 1, fase 2 e fase 3, sem fazer distinção.

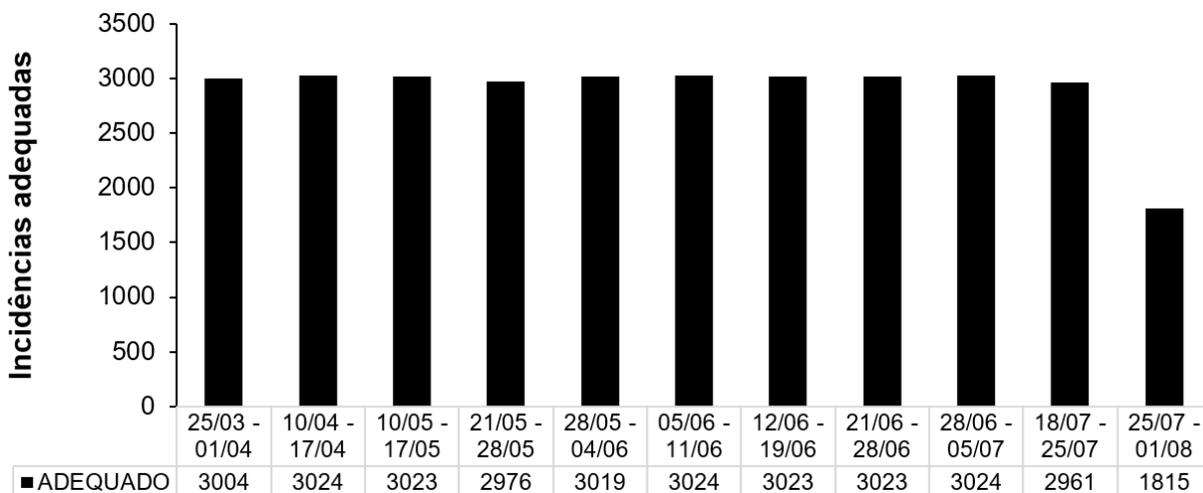
**Figura 8 – Incidência Precária do nível de tensão em regime permanente.**

Fonte: Autor.

A Figura 8 mostra que no período de 25/03 a 01/04, caracterizado pelo cenário 1, foram encontradas 20 incidências em que a tensão se encontrava na região precária. No período de 10/04 a 17/04, relacionado ao cenário 3, houve apenas uma incidência. Já no período de 21/05 a 28/05, relacionado ao cenário 3, ocorreram 48 incidências do nível de tensão na região precária, além disso, no período compreendido entre 28/05 e 04/06, cenário 3, foram encontradas apenas quatro ocorrências. Nos períodos de 12/06 a 19/06 e 21/06 a 28/06, que estão relacionados com o cenário 3, houve uma única ocorrência. No período de 18/07 a 25/07, que faz parte do conjunto de coletas feitas no cenário 1, foram encontradas 57 ocorrências no nível de tensão na região precária. No período de 25/07 a 01/08, que faz parte do grupo do cenário de coleta 2, ocorreu um aumento significativo das ocorrências do nível de tensão na região precária, com um total de 910.

As maiores incidências do nível de tensão na região precária se deram quando o IFPE estava em seu funcionamento cotidiano. Esse comportamento aponta a necessidade de realizar um estudo neste cenário em específico. De certa forma, é possível observar que no momento em que a usina solar fotovoltaica estava em operação, houve certo desequilíbrio de tensão.

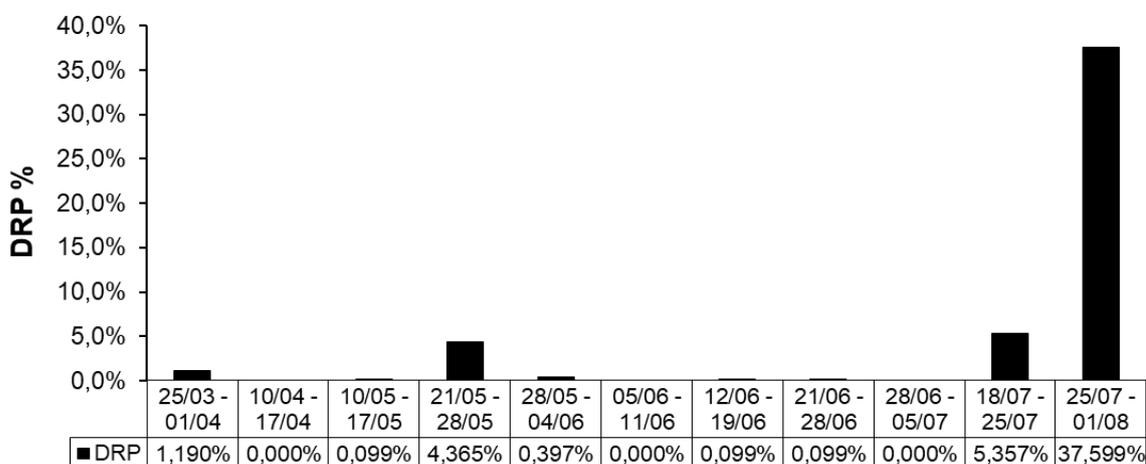
Os resultados apresentados na Figura 9 nos dão informações sobre a região adequada do nível de tensão. Nela consta a incidência total por período para as três fases, sendo elas, fase 1, fase 2 e fase 3, sem fazer distinção.

**Figura 9 – Incidência Adequada do nível de tensão em regime permanente.**

Fonte: Autor.

A Figura 9 indica que, embora ocorressem incidências do nível de tensão na região crítica e precária, existe uma alta incidência do nível de tensão na região adequada, que corresponde ao intervalo entre 202V e 231V, com 220V sendo a nossa tensão de referência. Esse alto quantitativo de incidências na região adequada indica uma boa estabilidade da tensão nas três fases, com a maioria dos valores medidos permanecendo dentro dos limites aceitáveis. No entanto, ocorreram incidências nas regiões crítica e precária, o que sugere a necessidade de monitoramento contínuo e possíveis ajustes para garantir a conformidade total com os padrões estabelecidos.

Como resultados obtidos através do uso da equação 1, apresentamos na Figura 10 os percentuais de transgressão precária para a tensão elétrica ao longo do período de coleta.

**Figura 10 – Duração relativa da transgressão de tensão precária (DRP).**

Fonte: Autor.

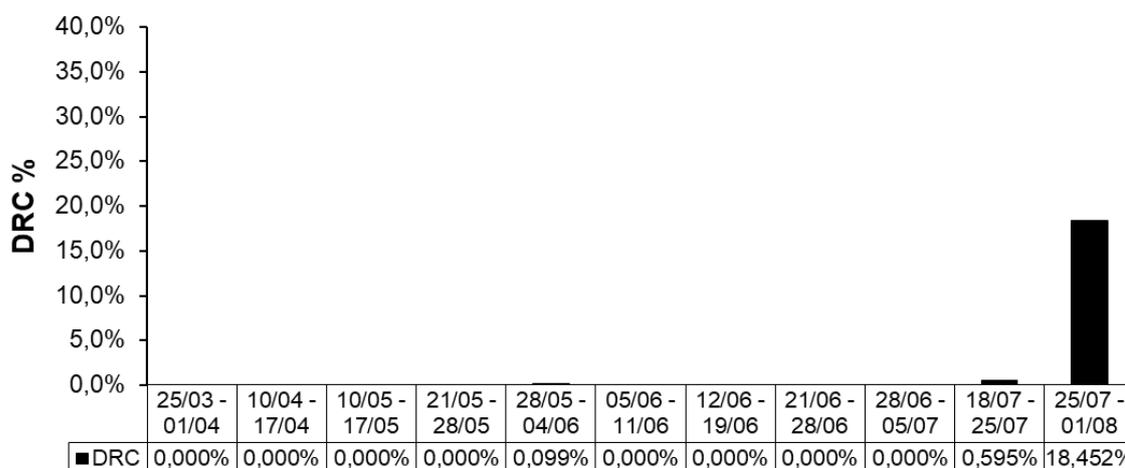
Durante a maioria do período monitorado, os percentuais de transgressão se mantiveram baixos. No entanto, houve uma exceção significativa no último período de coleta, cenário 2, de 25/07 a 01/08. Neste período, a usina fotovoltaica não estava operando e o campus estava com funcionamento cotidiano, com suas cargas ligadas, onde registramos um percentual de 37,599%. Este valor representa a proporção de tempo durante o qual a tensão elétrica esteve na região precária. Nos demais períodos, é possível observar que, mesmo havendo ocorrências em que o limite de tensão esteve na região precária, houve um padrão de normalidade.

A elevada transgressão registrada no período 25/07 a 01/08, compreendida pelo cenário 2, indica que a tensão elétrica frequentemente saiu dos limites considerados adequados (202V a 231V) e se manteve dentro da faixa de tensão precária (191V a 202V e 231V a 233V). Este aumento significativo pode sinalizar a ocorrência de um evento ou uma condição específica que afetou a estabilidade da tensão elétrica durante essa semana.

Essa análise reforça a importância do monitoramento contínuo e da implementação de medidas corretivas para garantir que a tensão elétrica se mantenha dentro dos parâmetros adequados, minimizando o tempo em que se encontra em regiões precárias ou críticas. A identificação de padrões ou anomalias em períodos específicos pode ajudar a direcionar ações para melhorar a qualidade do fornecimento de energia elétrica.

Já na Figura 11, observamos que a incidência de Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica (DRC) ocorreu apenas em três períodos: de 28/05 a 04/06, o qual é compreendido pelo cenário 3, de 18/07 a 25/07, compreendido pelo cenário 1 e de 25/07 a 01/08, compreendido pelo cenário 2. Esses valores indicam a proporção de tempo durante a qual a tensão elétrica esteve na região crítica (inferior a 191V ou superior a 233V) em cada período e cenário.

**Figura 11 – Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica (DRC).**



Fonte: Autor.

A ocorrência esporádica de DRC nos dois primeiros períodos analisados sugere que a tensão elétrica se manteve relativamente estável e dentro dos limites adequados na maior parte do tempo. No entanto, o aumento significativo para 18,452% no último período de 25/07 a 01/08, compreendido pelo cenário 2, neste período a usina fotovoltaica estava fora de operação e o campus estava funcionando normalmente, com suas cargas ligadas, é preocupante e indica um grave desvio da tensão para valores críticos.

Essa incidência elevada de DRC no último período destaca a necessidade de uma análise detalhada para identificar as causas subjacentes dessa instabilidade. Pode ser necessário investigar fatores como a demanda de energia, condições meteorológicas, falhas internas ou externas em equipamentos ou outros eventos que possam ter contribuído para essa variação crítica.

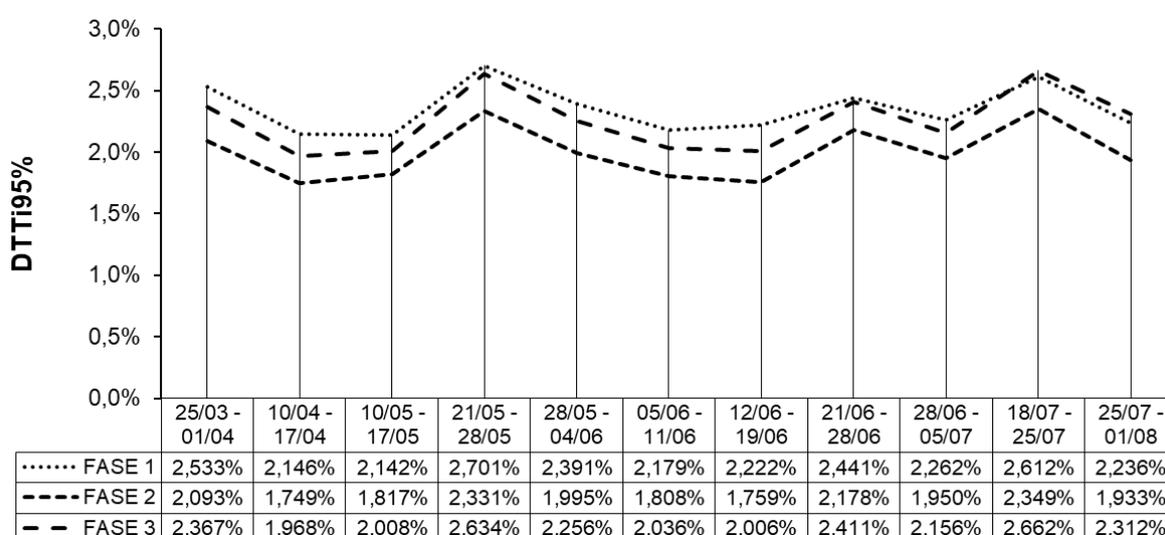
## 5.2 Distorções harmônicas

Foi realizada uma análise das distorções harmônicas de tensão e corrente, com o intuito de identificar a influência da usina solar fotovoltaica na rede, analisando os cenários de coleta, conforme tabela 3.

### 5.2.1 Distorções harmônicas de tensão

A Figura 12 traz os indicadores percentuais  $DTT_{i95\%}$  para cada uma das três fases: Fase 1, Fase 2 e Fase 3.

**Figura 12:  $DTT_{i95\%}$  componentes ímpares não múltiplos de 3.**



Fonte: Autor.

Conforme pode ser observado, os valores de  $DTT_{i95\%}$  variam ao longo dos períodos e cenários monitorados. Alguns períodos apresentam aumentos significativos. Destacamos alguns pontos importantes:

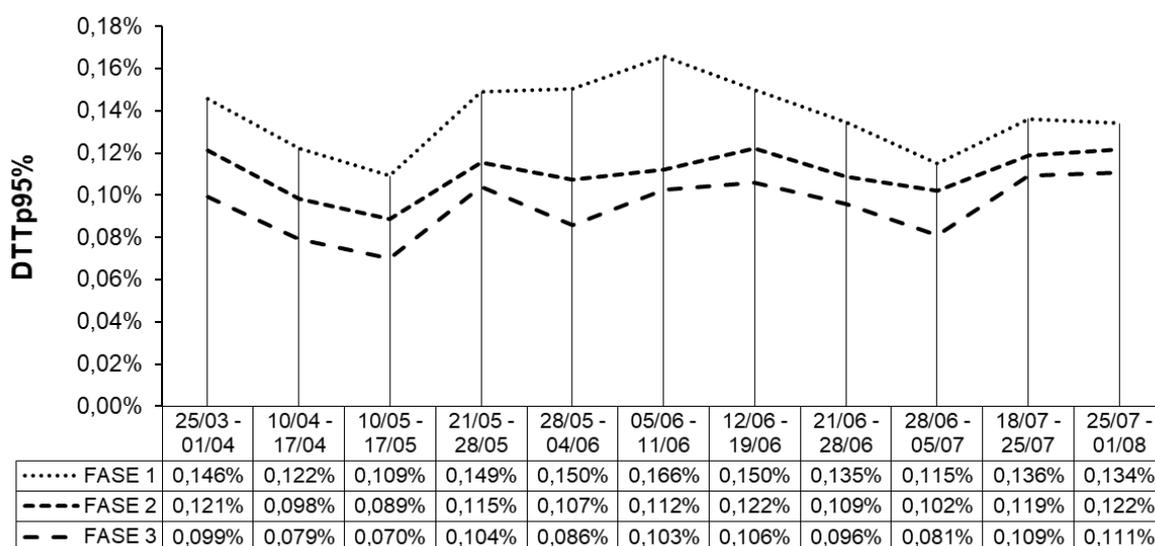
- A **fase 1** apresenta valores de  $DTT_{i95\%}$  variando entre 2,142% e 2,701%, com o pico mais alto registrado no período de 21/05 a 28/05, compreendido pelo cenário 3.
- A **fase 2** tem valores de  $DTT_{i95\%}$  variando entre 1,749% e 2,349%, com o maior valor observado no período de 18/07 a 25/07, compreendido pelo cenário 1.
- A **fase 3** mostra valores de  $DTT_{i95\%}$  variando entre 1,968% e 2,662%, com o pico mais alto também no período de 18/07 a 25/07, compreendido pelo cenário 1.

Em ambos os cenários, a usina fotovoltaica estava operando normalmente, com a diferença que no cenário 1 o IFPE estava em seu funcionamento cotidiano e no cenário 3 o IFPE estava em greve. Esse aumento caracteriza uma alta geração da usina fotovoltaica nesses períodos, conseqüentemente, uma injeção de energia maior, o que caracteriza o aumento do  $DTT_{i95\%}$ , já que o inversor injeta harmônicos na rede. Conforme o limite máximo desse indicador, tabela 1, o percentual obtido através das análises mostra um resultado satisfatório, se comparado com o máximo permitido.

O indicador analisado ( $DTT_{i95\%}$ ) reflete o desempenho e a estabilidade do sistema elétrico em diferentes cenários de operação, considerando a injeção de energia solar fotovoltaica e as condições de carga (funcionamento cotidiano ou greve).

Na Figura 13, é possível observar os indicadores percentuais que foram encontrados relacionados ao indicador  $DTT_{p95\%}$ , para as três fases: fase 1, fase 2 e fase 3.

**Figura 13:  $DTT_{p95\%}$  componentes pares não múltiplas de 3.**



Fonte: Autor.

Foi observado que o indicador  $DTT_{p95\%}$  varia ao longo dos períodos e cenários analisados. Para a fase 1, os valores oscilam entre 0,103% e 0,166%, com um pico no período de 05/06 até 11/06, compreendido pelo cenário 3. Na Fase 2, os valores variam entre 0,089% e 0,122%, com o menor valor no período de 10/05 até 17/05, caracterizado pelo cenário 4, e o maior valor no período de 25/07 até 01/08, ao qual está sendo caracterizado pelo cenário 2. Já na Fase 3, os valores oscilam entre

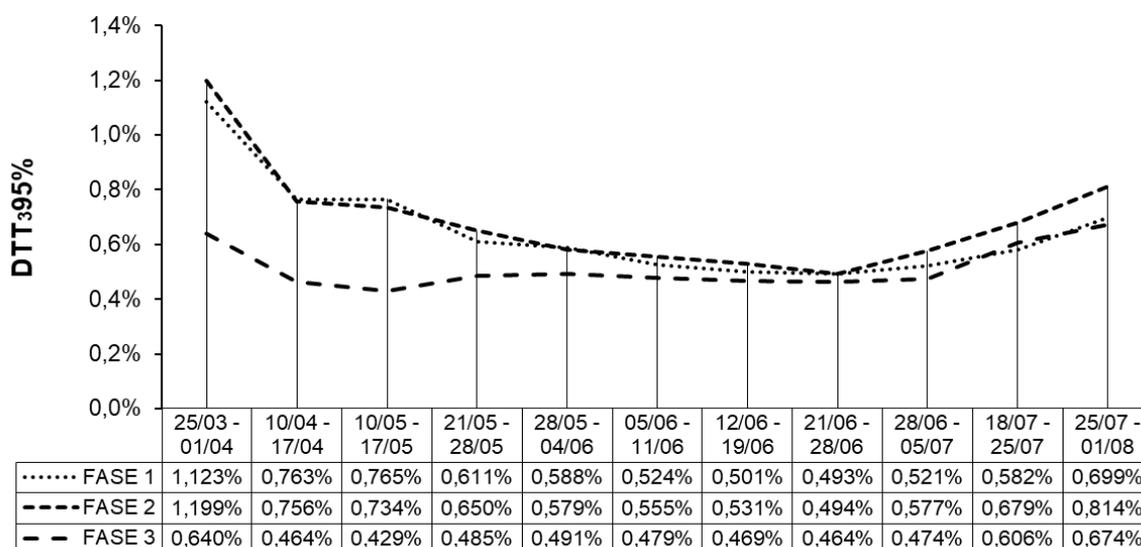
0,070% e 0,111%, com o menor valor no período de 10/05 até 17/05, compreendido pelo cenário 4, e o maior valor no período de 25/07 até 01/08, que faz parte do cenário 2.

No período de 05/06 até 11/06, caracterizado pelo cenário 3, a usina estava em operação e o IFPE estava em greve. Pelo fato de que a instituição estava sem cargas e a usina estava em operação, a injeção de energia na rede acabou sendo alta. Como o inversor injeta harmônicos na rede, esse comportamento já era esperado. O período de 10/05 até 17/05, que está relacionado com o cenário 4, possui um percentual abaixo, isso se dá pelo fato da usina não estar em operação e, com isso, o inversor não está injetando harmônicos na rede. O período de 25/07 até 01/08 faz parte do cenário 2. Com isso, a usina não estava em operação e o campus estava em seu funcionamento cotidiano. O percentual elevado neste cenário indica que houve uso de alguma carga não linear, como retificadores, inversores de frequência e outros equipamentos eletrônicos.

O indicador analisado ( $DTT_{P95\%}$ ) reflete o desempenho e a estabilidade do sistema elétrico em diferentes cenários de operação, considerando a injeção de energia solar fotovoltaica e as condições de carga (funcionamento normal ou greve).

A Figura 14 mostra o percentual referente ao indicador  $DTT_{395\%}$ , obtido por meio das amostras coletadas.

**Figura 14:  $DTT_{395\%}$  componentes múltiplos de 3.**



Fonte: Autor.

Podemos observar que o indicador  $DTT_{395\%}$  varia consideravelmente entre os períodos e cenários analisados, além de variar entre as diferentes fases do sistema. Na fase 1, os valores oscilam entre 0,493% e 1,123%, com um pico no período de 25/03 até 01/04, ao qual faz parte do cenário de análise 1. Como vimos nas análises feitas anteriormente, esse pico de distorção harmônica está relacionado ao fato de que a usina fotovoltaica estava em operação. Na fase 2, os valores variam entre 0,494% e 1,199%, com o menor valor no período de 21/06 até 28/06, que está

relacionado ao cenário 3. Mesmo com a usina operando, este é um período em que a geração de energia não é tão alta, por se tratar do solstício de inverno. Por esse motivo, a distorção harmônica não foi tão presente. O maior valor de distorção harmônica encontrado na fase 2 ocorreu no período entre 25/03 até 01/04, o qual faz parte do cenário de coleta 1, onde a geração da usina foi alta o suficiente para causar a distorção. Na fase 3, os valores oscilam entre 0,429% e 0,674%, com o menor valor no período de 10/05 até 17/05, compreendido pelo cenário 4, em que a usina solar fotovoltaica não estava operando, e o maior valor no período de 25/07 até 01/08, que está relacionado ao cenário 2.

No período de 25/03 até 01/04, a usina fotovoltaica estava em operação e o campus estava funcionando. No período de 25/07 até 01/08, a usina não estava em operação e o campus estava funcionando normalmente.

O aumento de ambas as fases no período de 25/03 até 01/04 e a similaridade no valor também na fase 3, se comparado com o período de 25/07 até 01/08, caracteriza a influência da usina fotovoltaica neste indicador, ocasionando um aumento. Como este período está no início do outono, ainda possui fortes características do verão, dessa forma, é possível apontar que a alta geração neste período acarretou aumento do indicador. No período de 25/07 até 01/08, a causa do aumento na terceira fase provavelmente se deu pelo uso de alguma carga não linear de maneira constante, já que a usina fotovoltaica não estava operando.

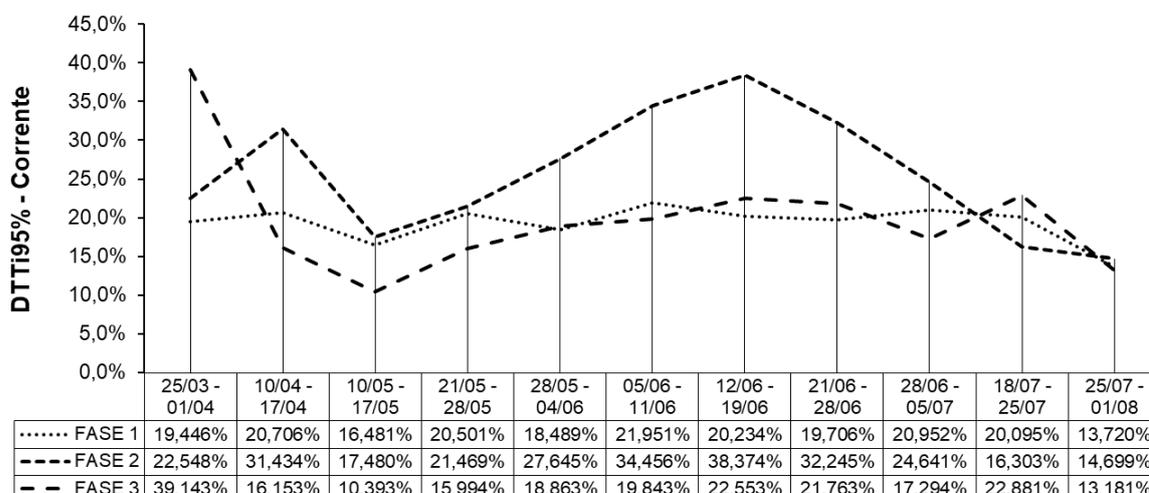
O indicador analisado ( $DTT_{395\%}$ ) reflete o desempenho e a estabilidade do sistema elétrico em diferentes cenários de operação, considerando a injeção de energia solar fotovoltaica e as condições de carga (funcionamento normal ou greve).

### **5.2.2 Distorções harmônicas de corrente**

Para analisar a distorção harmônica de corrente, fizemos o uso dos mesmos indicadores calculados para distorção harmônica de tensão,  $DTT_{p95\%}$ ,  $DTT_{i95\%}$  e  $DTT_{395\%}$ . Por meio dessa análise, é possível estudar a influência da usina fotovoltaica do IFPE Campus Pesqueira.

Os percentuais mostrados na Figura 15 são relacionados ao indicador  $DTT_{i95\%}$ , para as três fases: fase 1, fase 2 e fase 3.

**Figura 15: DTT<sub>95%</sub> componentes ímpares não múltiplos de 3.**



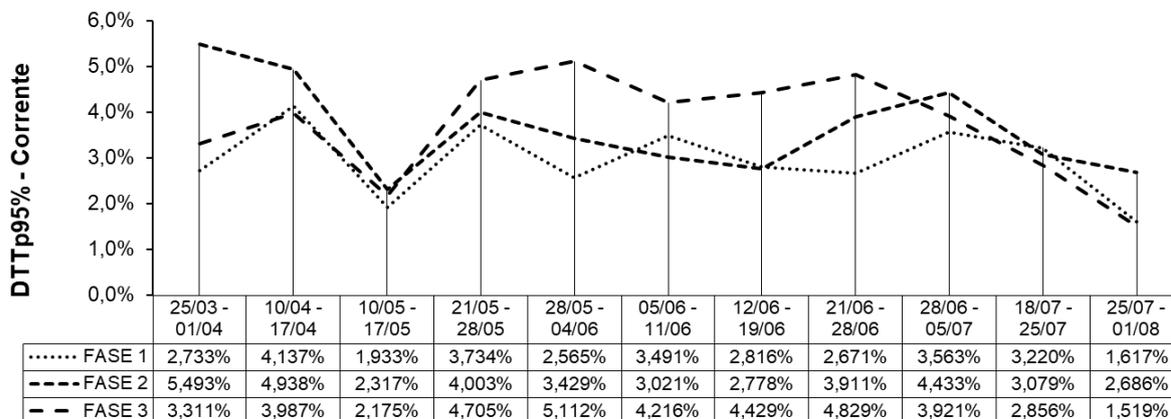
Fonte: Autor.

Como era esperado, o sistema comportou-se de forma prevista em todos os cenários em que a usina fotovoltaica estava operando, que são os cenários 1 e 3. Durante esses períodos, observou-se que a distorção harmônica de corrente estava mais pronunciada, corroborando a hipótese de que a geração solar fotovoltaica causa um aumento considerável. No entanto, é crucial destacar os cenários em que a usina não estava operando, sendo eles os cenários 4 e 2, os quais estão relacionados com os períodos de 10/04 a 17/04 e de 25/07 a 01/08, respectivamente. Durante esses cenários, o indicador DTT<sub>95%</sub> teve um percentual significativamente baixo, refletindo a ausência de injeção de energia no sistema da instituição. Isso evidencia que a distorção harmônica observada é diretamente associada ao fato da usina estar operando ou não.

A análise dos dados coletados nos diversos cenários proporciona uma visão mais clara sobre o impacto da geração solar fotovoltaica na qualidade da energia elétrica. Os dados mostram que, quando a usina está em operação, há uma alteração perceptível na qualidade da energia, elevando os percentuais obtidos, medida pela distorção harmônica de corrente. Por outro lado, quando o sistema não está operando, essa distorção é minimizada, indicando que o comportamento do sistema fotovoltaico é um fator significativo na variação da qualidade da energia.

Os resultados obtidos para o indicador DTT<sub>p95%</sub>, através da análise das amostras obtidas, são mostrados na Figura 16.

**Figura 16: DTT<sub>p95%</sub> componentes pares não múltiplos de 3.**

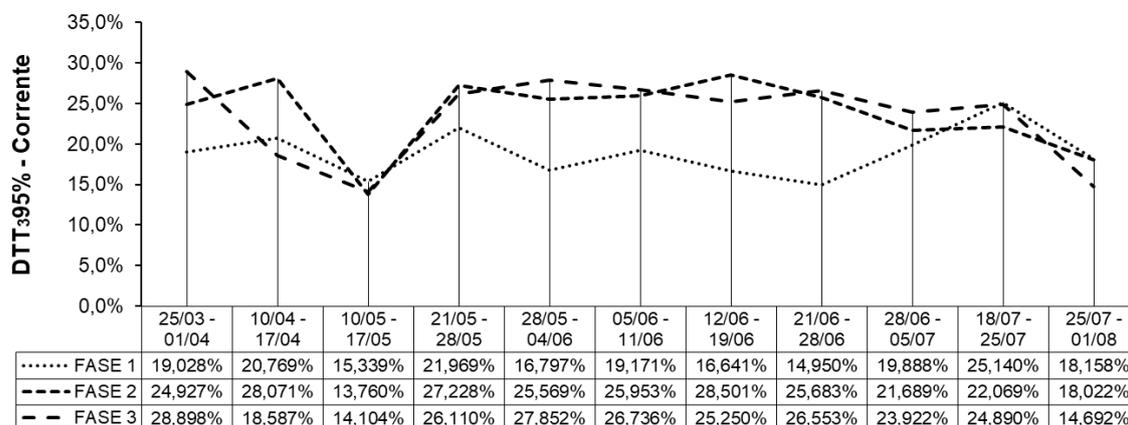


Fonte: Autor.

Os resultados apresentados na Figura 16, apontam que, assim como no indicador DTT<sub>i95%</sub>, ocorreu uma queda considerável nos cenários 4 e 2, aos quais estão relacionados com os períodos 10/04 a 17/04 e de 25/07 a 01/08, respectivamente, também no indicador DTT<sub>p95%</sub> se comparados aos cenários em que a usina estava operando em sua capacidade normal. O fato da usina estar em operação e o inversor estar injetando energia na rede acaba por impactar diretamente os percentuais encontrados para este indicador, indicando diretamente que a usina fotovoltaica possui um impacto considerável, como é possível ver na Figura 16.

Os percentuais encontrados para o indicador DTT<sub>395%</sub> são mostrados na Figura 16, onde é possível visualizar como a rede do campus se comportou em todos os cenários.

**Figura 17: DTT<sub>395%</sub> componentes múltiplas de 3.**



Fonte: Autor.

A análise dos dados revela que nos cenários 4 e 2, relacionados aos períodos 10/04 a 17/04 e 25/07 a 01/08, respectivamente, foram significativamente pelo fato

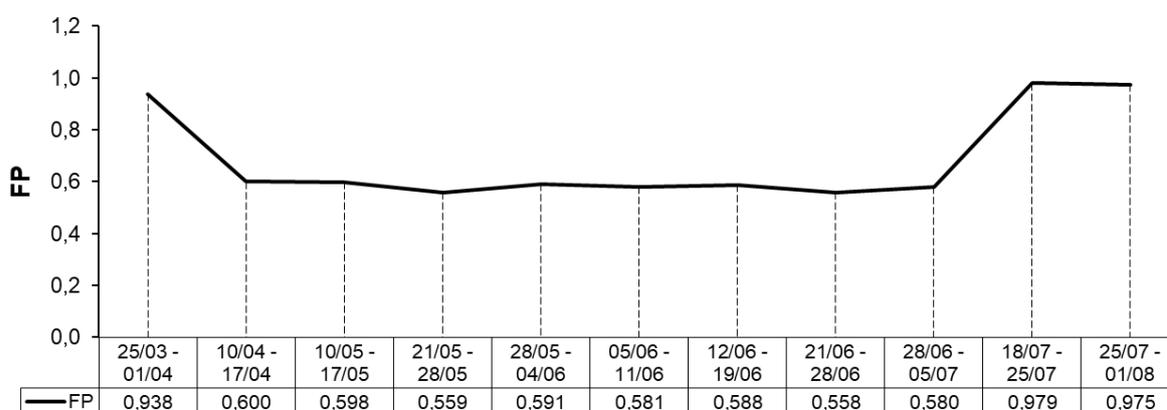
da usina fotovoltaica não estar operando, comparados aos cenários em que a usina estava operando em sua capacidade normal.

Esses indicadores são significativamente afetados pela injeção de energia elétrica feita através da usina solar fotovoltaica. A distorção harmônica de corrente, medida pelos indicadores como  $DTT_i95\%$ ,  $DTT_p95\%$  e  $DTT_395\%$ , tende a aumentar durante os períodos de operação da usina solar fotovoltaica. Quando a usina não está operando, a ausência dessas injeções de energia resulta em uma redução na distorção harmônica, mostrando que a operação ativa da usina solar é um fator determinante na variação das distorções harmônicas. Esta relação demonstra como a integração de fontes de energia renovável pode influenciar a qualidade da energia e ressalta a importância de monitorar e gerenciar os impactos associados à geração solar fotovoltaica na rede elétrica.

### 5.3 Fator de potência

Nesta análise, apresentaremos os resultados obtidos pela coleta de dados em diversos cenários e períodos. Ao examinar os dados coletados ao longo do tempo, foi possível compreender como diferentes condições operacionais, como a funcionalidade do sistema e eventos externos, influenciam a eficiência da geração e distribuição de energia. A Figura 18 traz desses resultados.

**Figura 18: Fator de Potência.**



Fonte: Autor.

No cenário 1, em que o IFPE estava funcionando e a usina estava em operação 25/03 a 01/04, o fator de potência encontrava-se atendendo ao intervalo que o módulo 8 do PRODIST dispõe, entretanto, houve uma queda do fator de potência entre o período de 25/03 a 01/04 e 10/04 a 17/04, sendo o período de 10/04 a 17/04 compreendido pelo cenário 3. Essa queda se deu pelo fato de que a usina estava injetando uma quantidade elevada de potência reativa na rede, uma vez que o campus não estava com cargas.

Durante os períodos compreendidos pelos cenários 3 e 4, respectivamente, de 10/04 a 17/04 e 10/05 a 17/05, os valores permaneceram bem próximos, mesmo com a usina fora de operação, no cenário 4. Essa similaridade pode ser justificada pelo excesso de energia reativa na rede, que pode ter sido causada pelo uso de

motores. Nos períodos em que estão relacionados ao cenário 3, a usina estava injetando mais energia na rede do que a carga estava consumindo. Isso pode ter levado a uma situação em que o inversor da usina fotovoltaica estava fornecendo potência ativa em grande quantidade, pois não havia cargas sendo utilizadas eficientemente em relação à energia injetada na rede. Em sistemas fotovoltaicos, se a geração de energia excede a demanda da carga e não há uma compensação apropriada, o fator de potência tende a ser reduzido.

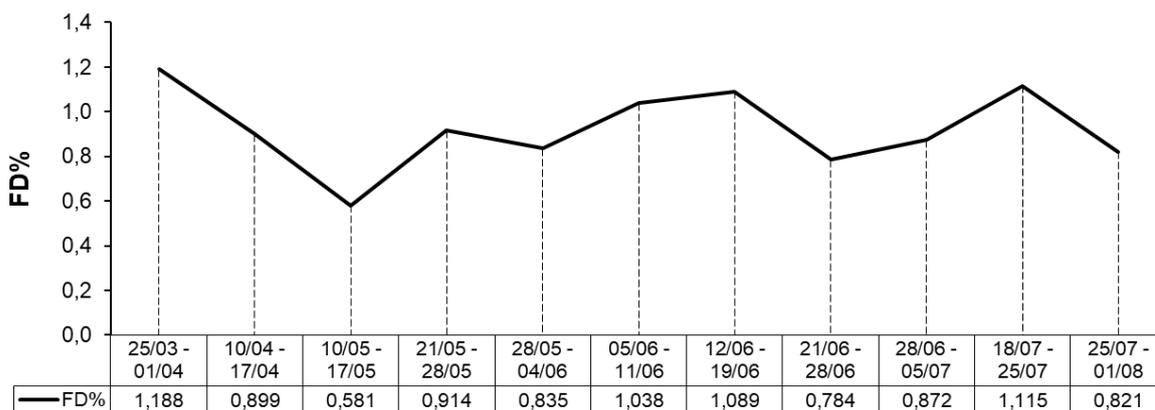
O período de 18/07 a 25/07, relacionado ao cenário 1, apresenta um fator de potência adequado, atendendo ao especificado pelo módulo 8 do PRODIST. Nesse cenário, a usina fotovoltaica estava operando, com a geração de energia mais alinhada com a carga, gerando potência ativa e reativa em alinhamento com a carga, resultando em um fator de potência mais alto. Isso indica que a energia gerada estava sendo utilizada de forma mais equilibrada em relação à demanda total incluindo a compensação necessária para a potência reativa..

O período 25/07 a 01/08, compreendido pelo cenário 2, possui um fator de potência que também atende ao especificado pelo módulo 8 do PRODIST, já que a usina solar fotovoltaica não estava realizando nenhum tipo de influência sobre a rede.

## 5.5 Fator de desequilíbrio de tensão

Após a análise do fator de potência, é importante também examinar o desequilíbrio de tensão do sistema, que pode influenciar significativamente a eficiência e o desempenho geral. O desequilíbrio de tensão pode reduzir a eficiência do sistema elétrico ao aumentar as perdas de energia, reduzir a capacidade de carga dos equipamentos, causar aquecimento excessivo e encurtar a vida útil dos componentes. Na Figura 19, são apresentados os resultados referentes ao desequilíbrio de tensão (FD%).

**Figura 19: Desequilíbrio de tensão**



Fonte: Autor

Os dados revelam variações significativas no desequilíbrio de tensão ao longo dos períodos e cenários analisados. Podemos notar que os valores de FD% variam entre 0,581% e 1,188%, com alguns picos notáveis, especialmente no cenário 3, durante os períodos de 25/03 a 01/04 e 18/07 a 25/07. Os períodos com maior

desequilíbrio de tensão, como 25/03 a 01/04 e 18/07 a 25/07, indicam uma instabilidade maior na distribuição de tensão, o que pode afetar negativamente a eficiência da geração e a operação do sistema isso ocorre porque o desequilíbrio de tensão pode causar aquecimento excessivo em motores, aumentar as perdas por efeito Joule nos condutores, e interferir no desempenho dos inversores e dispositivos de proteção. Além disso, pode reduzir a vida útil dos equipamentos e comprometer a qualidade da energia, resultando em menor eficiência e maior risco de falhas no sistema. Períodos com valores mais baixos de FD%, como 10/05 a 17/05, cenário 4, e 21/06 a 28/06, cenário 3, mostram um melhor equilíbrio na distribuição de tensão. O período de 21/06 a 28/06, por fazer parte do solstício de inverno, a geração de energia pela usina solar fotovoltaica tende a ser menor e mesmo que o cenário 3 aponte que a usina está em operação, por conta da baixa geração nesse período, o desequilíbrio de tensão se comporta da mesma forma do cenário 4, onde a usina solar não está em operação.

A usina fotovoltaica pode o equilíbrio das tensões no sistema elétrico. O principal fator causador do desequilíbrio de tensões em um sistema com geração distribuída, como uma usina fotovoltaica, é a distribuição desigual de carga e geração entre as fases.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS/ CONCLUSÕES**

O estudo realizado no IFPE – Campus Pesqueira evidenciou como a geração de energia solar fotovoltaica pode influenciar a qualidade da energia elétrica em ambientes acadêmicos. A análise dos parâmetros definidos pelo Módulo 8 do PRODIST revelou variações significativas na qualidade da energia, relacionadas ao desequilíbrio de tensão, além de variação de tensão em regime permanente, fator de potência e ao aumento das distorções harmônicas em determinados períodos de operação da usina fotovoltaica.

A análise dos níveis de tensão em regime permanente revelou que, durante a maioria dos períodos e cenários avaliados, os percentuais de transgressão se mantiveram baixos, indicando uma estabilidade relativa na qualidade da tensão fornecida. No entanto, períodos específicos mostraram desvios preocupantes, particularmente quando a usina fotovoltaica não estava em operação e o campus estava em funcionamento normal. Durante o intervalo de 25/07 a 01/08, que faz parte do cenário 2, registrou-se uma alta proporção de tempo em que a tensão esteve na região precária e um aumento significativo na Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica. A elevada transgressão sugere a necessidade urgente de medidas corretivas e monitoramento contínuo para assegurar que a tensão elétrica permaneça dentro dos parâmetros estabelecidos, garantindo a qualidade e a confiabilidade do fornecimento de energia.

A porcentagem de coletas na região adequada indica uma boa estabilidade da tensão nas três fases, com a maioria dos valores medidos permanecendo dentro dos limites aceitáveis.

A análise das distorções harmônicas no sistema elétrico revela uma clara influência da geração de energia solar fotovoltaica e das condições operacionais do campus nos indicadores  $DDT_{p95\%}$ ,  $DDT_{i95\%}$  e  $DDT_{395\%}$ . Períodos de alta geração

solar, como de 25/03 a 01/04 e de 18/07 a 25/07, caracterizados pelo cenário 1, mostraram picos significativos nesses indicadores, indicando que a injeção de energia solar contribui para maiores distorções harmônicas.

A análise do fator de potência e do desequilíbrio de tensão (FD%) no sistema elétrico do campus demonstra a influência significativa das condições operacionais e da geração de energia solar fotovoltaica na eficiência e estabilidade do sistema. Durante o cenário 3, observou-se que a geração de energia excedia a demanda, resultando em um fator de potência menor.

Os dados sobre o desequilíbrio de tensão (FD%) mostram variações significativas ao longo dos períodos analisados, com picos notáveis no cenário 3, durante os períodos de 25/03 a 01/04 e 18/07 a 25/07, quando o desequilíbrio de tensão atingiu valores mais altos, sugerindo maior instabilidade na distribuição de tensão. Períodos com menor desequilíbrio de tensão, como de 10/05 a 17/05 e de 21/06 a 28/06, indicam uma operação mais estável e eficiente do sistema. Esses resultados destacam a necessidade de um monitoramento contínuo e de estratégias de gestão da carga para manter a eficiência e estabilidade do sistema elétrico, minimizando o impacto de variações na demanda e na geração de energia solar fotovoltaica.

A análise dos indicadores  $DTT_{95\%}$ ,  $DTT_p95\%$  e  $DTT_395\%$  revela uma clara influência da geração solar fotovoltaica na distorção harmônica de corrente. Durante os cenários em que o sistema fotovoltaico estava operando, observou-se um aumento significativo na distorção harmônica, confirmando a hipótese de que a injeção de energia solar na rede elétrica, através dos inversores, contribui para uma maior geração de harmônicos. Em contraste, nos cenários em que o sistema estava desligado, a distorção harmônica foi notavelmente reduzida, indicando que a operação do sistema fotovoltaico é um fator crítico na variação da qualidade da energia elétrica.

Os resultados obtidos destacam a importância de um monitoramento contínuo e da implementação de medidas corretivas, como a instalação de filtros ativos de harmônicas e reguladores de tensão, para mitigar os impactos negativos da geração distribuída. Além disso, a integração de sistemas de armazenamento de energia pode contribuir para a estabilidade da rede, suavizando as flutuações decorrentes da intermitência solar.

Portanto, para garantir a eficiência energética e a durabilidade dos equipamentos conectados à rede, é essencial que os locais que possuem geração distribuída adotem estratégias para melhorar a qualidade da energia fornecida, seguindo rigorosamente as diretrizes estabelecidas pelo PRODIST.

## REFERENCIAS

ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. Distributed generation: A definition. *Electric Power Systems Research*, [s. l.], v. 57, n. 3, p. 195–204, 2001. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(01\)00101-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(01)00101-8)> Acesso em: 26 de março de 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8

– Qualidade da Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/modulo-8>>. Acesso em: 26 de dezembro de 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL: Variação de Tensão de Curta Duração - VTCD. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2024.

ANEEL. Capacidade de Geração do Brasil. [S. l.], 2020b.

BLOG MINIPAEDUCATION. Analisador de Qualidade de Energia ET5051C. Disponível em: <<http://blogminipaeducation.blogspot.com/2014/02/analizadordequalidade-de-energia.html>>. Acesso em: 07 de agosto de 2024.

CARTELLE BARROS, J. J. et al. Comparative analysis of direct employment generated by renewable and non-renewable power plants. *Energy*, [s. l.], v. 139, p. 542–554, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.025>.

DECKMANN, Sigmar Maurer; POMILIO, José Antenor. Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica. DSE/FEEC/UNICAMP, São Paulo, 17 mai. 2020. Disponível em: <<https://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a4.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2021.

EPE. Plano Nacional de Energia 2030. Ministério de Minas e Energia. Brasília: [s. n.], 2007. Available at: <https://doi.org/10.14430/arctic4596>.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO. Dados da Plataforma Nilo Peçanha de 2020. Disponível em: <<https://portal.ifpe.edu.br/pesqueira/o-campus/>>. Acesso em: 8 de agosto. 2024.

MENDONÇA, K. S. de. *Análise de qualidade de energia elétrica das subestações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba*. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, 2023.

ONS. Plano de Operação Energética 2019-2023. Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Gerência Executiva de Planejamento Energético. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2024.

SILVA, F. P. et al. *Estudo sobre qualidade da energia elétrica*. *Revista Brasileira de Engenharia Elétrica*, v. 24, n. 3, p. 45-59, 2023.