



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECMOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E BIOMÉDICA

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA QUALIDADE DE ENERGIA EM UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL**

BELÉM – PA

2025

RAÍ DE ALMEIDA GOMES

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA QUALIDADE DE ENERGIA EM UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica no Instituto de Tecnologia – ITEC da Universidade Federal do Pará – UFPA.

Orientador: Professor Dr. Reinaldo Corrêa Leite.

BELÉM – PA

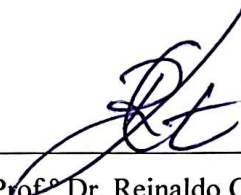
2025

RAÍ DE ALMEIDA GOMES

Título: AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA QUALIDADE DE ENERGIA EM UM SISTEMA FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica, FEEB, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção de Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Este trabalho foi julgado em 21/03/2025 adequado para obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista, e aprovado na sua forma final pela banca examinadora que atribuiu o conceito Excelente.



Prof.º Dr. Reinaldo Corrêa Leite
ORIENTADOR



Prof.º Dr. Allan Rodrigo Arrifano Manito
MEMBRO DA BANCA EXAMINADORA



Prof.º Dr. Robson do Nascimento Silva
MEMBRO DA BANCA EXAMINADORA

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu saúde e me abençoou durante toda a jornada na faculdade. Aos meus pais, Marly e Olímpio, que sempre me apoiaram e me incentivaram a seguir a vida acadêmica, principalmente a minha mãe por estar todos os dias ao meu lado me ajudando de todas as formas possíveis.

Aos meus amigos, que sempre me ajudaram na realização das atividades do curso, especialmente durante o período de pandemia onde estávamos todos aflitos com a situação, mas as atividades da graduação tinham que seguir.

A minha amiga Marie Clayre Freitas Ferreira que sempre me acompanhou durante toda a graduação. Companheira de todos os dias para ir e voltar da UFPA, de praticamente todos os trabalhos de grupo, dos laboratórios que passamos como estudantes de iniciação científica e no estágio realizado fora da universidade.

Aos meus amigos e professores do Grupo de Estudos para o Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE), que me acolheram nas etapas iniciais do processo.

Ao Professor e orientador Dr. Reinaldo Corrêa Leite, que me orientou na confecção desse trabalho, sendo sempre muito claro e direto.

Por fim, a todos os meus amigos e familiares que sempre acreditaram em mim e estiveram presentes de alguma forma.

MUITO OBRIGADO!

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade da energia elétrica em uma residência equipada com um sistema de geração fotovoltaica, localizada no município de São Domingos do Capim, Pará. Inicialmente, foi realizado um estudo conceitual sobre qualidade de energia, abordando seus principais fenômenos e distúrbios, em consonância com as normas estabelecidas pelo Módulo 8 do PRODIST. Posteriormente, foram realizadas medições práticas utilizando um analisador de qualidade de energia, permitindo a coleta e análise detalhada dos parâmetros de tensão em regime permanente, flutuação de tensão e frequência da rede elétrica. Os resultados obtidos revelaram que a residência apresentou níveis críticos de sobretensão, principalmente durante os períodos de maior geração fotovoltaica, resultando na redução significativa da eficiência operacional do sistema solar instalado. Apesar disso, observou-se estabilidade na frequência do sistema. O estudo destaca a importância de adequar a infraestrutura elétrica local para garantir o pleno desempenho dos sistemas de micro e minigeração distribuída.

Palavras-chaves: Qualidade de Energia; Sistemas Fotovoltaicos; Módulo 8 Prodist.

ABSTRACT

This work aimed to assess the electric power quality in a residential installation equipped with a photovoltaic generation system, located in São Domingos do Capim, Pará. Initially, a conceptual analysis of power quality was conducted, covering its main phenomena and disturbances in accordance with Module 8 of PRODIST standards. Subsequently, practical measurements were conducted using a power quality analyzer, allowing detailed data collection and analysis of parameters such as steady-state voltage, voltage fluctuation, and network frequency. The results revealed that the residence experienced critical voltage levels, particularly during periods of peak photovoltaic generation, significantly reducing the operational efficiency of the installed solar system. Nonetheless, frequency stability was observed throughout the analysis period. This study underscores the importance of improving local electrical infrastructure to ensure the optimal performance of distributed micro and mini-generation systems.

Keywords: Power quality; photovoltaic systems; Module 8 Prodist.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Níveis adequado, precário e crítico para TN = 220 V.....	18
Figura 2 – Distorção de corrente causado por resistor não linear	20
Figura 3 – Formas de onda com harmônicos de quinta ordem.....	20
Figura 4 – Desequilíbrio de tensão (p.u)	23
Figura 5 – Flutuação de tensão	24
Figura 6 – Função de Distribuição Acumulada Complementar	26
Figura 7 – Sistema fotovoltaico analisado.....	30
Figura 8 – Diagrama unifilar do sistema fotovoltaico analisado.....	31
Figura 9 – Analisador de energia.....	32
Figura 10 – Sensor de corrente	32
Figura 11 – Fluxograma	33
Figura 12 – Ponteiras e sensores de corrente.....	34
Figura 13 – Software HIOKI	34
Figura 14 – Portal eSolar	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixas de classificação de tensão.....	17
Tabela 2 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).....	22
Tabela 3 – Faixas de classificação de tensão.....	24
Tabela 4 – Limites para flutuação de tensão	26
Tabela 5 – Faixas de classificação de tensão.....	27
Tabela 6 – Classificação das variações de tensão de curta duração	27
Tabela 7– Fatores de ponderação e Fator de Impacto Base de acordo com a tensão nominal.	28

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Tensão de Regime Permanente (Analisador).....	38
Gráfico 2 – Potência e tensão CA (Inversor).....	40
Gráfico 3 – Potência e tensão CA do dia 16/01/2023 (Inversor).....	41
Gráfico 4 – Frequência (Analisador).....	43
Gráfico 5 – Valores de Pst para as fases A e B	45
Gráfico 6 – Distribuição normal e acumulada PST (fase A).....	46
Gráfico 7 – Distribuição normal e acumulada PST (fase B).....	47
Gráfico 8 – Plt para as fases A e B	48
Gráfico 9 – Potência e tensão CA (Inversor) dia 02/10/2023.....	50
Gráfico 10 – Potência e tensão CA (Inversor) dia 03/10/2023	51
Gráfico 11 – Energia gerada no mês de outubro de 2023	53
Gráfico 12 – Energia gerada no mês de outubro de 2024	54
Gráfico 13 – Primeira amostra de tensão do dia.....	55

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. JUSTIFICATIVA	12
1.2. OBJETIVO DO TRABALHO	12
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2. QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	14
2.1. INTRODUÇÃO	14
2.2. CONCEITOS INICIAIS	14
2.3. CONCEITOS TEÓRICOS SOBRE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	14
2.4. DISTÚRBIOS DA QUALIDADE DA ENERGIA E O MÓDULO 8 DO PRODIST 15	
2.4.1. Regime permanente	16
2.4.2. Regime transitório	27
3. DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO	29
3.1. INTRODUÇÃO	29
3.2. DESCRIÇÃO DO LOCAL E EQUIPAMENTO UTILIZADO NAS CAMPANHAS DE MEDIÇÃO	29
3.2.1. Local de medição	29
3.2.2. Cargas da residência	29
3.2.3. Descrição do sistema fotovoltaico	29
3.2.4. Analisador de energia	31
3.2.5. Sensor de corrente	32
3.3. METODOLOGIA DE ANÁLISE	33
4. RESULTADOS	36
4.1. TENSÃO EM REGIME PERMANENTE DO ANALISADOR	36
4.2. TENSÃO E POTÊNCIA DO INVERSOR	39
4.3. VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA	42

4.4.	FLUTUAÇÃO DE TENSÃO	44
4.5.	ANÁLISE DOS DIAS 02 E 03 DE OUTUBRO DE 2023.....	49
4.6.	ANÁLISE DOS MESES OUTUBRO DE 2023 E OUTUBRO DE 2024.....	52
5.	CONCLUSÃO.....	56
6.	TRABALHOS FUTUROS.....	57
	REFERÊNCIAS	58

1. INTRODUÇÃO

Em 2024, a micro e minigeração distribuída (MMGD) no Brasil atingiu um marco significativo, com 8,85 GW de potência instalada adicional, totalizando 35,6 GW. Esse crescimento resultou na conexão de 3,1 milhões de sistemas e no benefício direto a 4,7 milhões de unidades consumidoras (ANEEL, 2024). Dentre as fontes renováveis, a energia solar fotovoltaica se destaca, representando 99,86% das novas instalações.

Alinhado ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7 (ODS 7), o Brasil assumiu o compromisso de aumentar significativamente a participação de fontes renováveis em sua matriz energética até 2030 (Nações Unidas Brasil, 2015). No entanto, apesar do avanço expressivo da energia solar, observa-se a ausência de políticas legislativas e econômicas consistentes para incentivar a expansão da MMGD, o que pode limitar seu desenvolvimento a longo prazo.

O uso de módulos fotovoltaicos tem se consolidado como uma alternativa promissora devido às sucessivas reduções nos custos tecnológicos, à crescente conscientização ambiental e à necessidade de diversificação da matriz energética (Junior, Pereira e Lira, 2021). Ademais, compromissos internacionais, como aqueles assumidos na 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro da ONU sobre Mudança do Clima (UNFCCC), reforçam a urgência da transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis.

Entretanto, o sistema de geração de energia atual enfrenta desafios significativos. Enquanto o consumo de eletricidade cresce continuamente, há uma pressão global para reduzir as emissões de poluentes que agravam o aquecimento global. Paralelamente, torna-se essencial encontrar soluções que minimizem a dependência de fontes esgotáveis, como carvão, petróleo e gás natural (Silva; Araújo, 2022).

A relevância deste estudo reside na necessidade de compreender como desvios nos parâmetros de qualidade de energia, conforme normatizados pelo Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), impactam a operação de sistemas de geração distribuída. Além disso, o caso analisado ilustra um problema recorrente em regiões com infraestrutura elétrica precária, onde a interação entre a geração solar e a rede convencional ainda necessita de ajustes técnicos.

Diante desse contexto, foi realizada uma campanha de medição *in loco* utilizando um analisador de qualidade de energia, com o objetivo de avaliar parâmetros como tensão em regime permanente, flutuação de tensão e frequência da rede, comparando-os com os limites estabelecidos pela regulamentação vigente. Os resultados obtidos contribuirão para a

identificação de soluções que minimizem os impactos da intermitência da energia solar fotovoltaica na rede elétrica.

1.1. JUSTIFICATIVA

O aumento da geração distribuída pode ocasionar distúrbios nas redes de distribuição. A residência analisada possui um sistema fotovoltaico que possui problemas na sua capacidade de geração devido aos níveis de tensão fornecidos pela concessionária de energia.

Localizada no interior do Pará, a unidade consumidora deveria ser atendida por uma rede de baixa tensão com padrão bifásico de 220 V (tensão entre fases), onde o nível máximo de tensão deve ser de até 231 V (ANEEL, 2021). No entanto, a residência apresenta níveis de tensão acima de 240 V, como atestado pela concessionária após vistoria realizada.

Níveis de tensão acima do permitido são prejudiciais aos sistemas fotovoltaicos, visto que os inversores utilizados para a conversão da energia gerada pelos módulos fotovoltaicos em corrente contínua para corrente alternada, possuem uma faixa de tensão de operação. A tensão máxima suportada pelo inversor do sistema em estudo é de 280 V.

De acordo com Chaudhary et al., (2017) a sobretensão ocorre durante o período de máxima geração do sistema fotovoltaico em situações de baixa demanda das cargas. Portanto, como o nível de tensão da residência está acima do permitido, ao alcançar maior potência de geração nos períodos de maior incidência solar durante o dia, a tensão de saída do inversor alcança valores próximos do seu limite que é de 280 V. Assim, para que o inversor não seja danificado o dispositivo de proteção interna corta parte da geração, logo, o sistema fotovoltaico apresenta perdas em sua capacidade de geração de energia.

1.2. OBJETIVO DO TRABALHO

O presente trabalho tem como objetivo analisar os parâmetros de tensão em regime permanente, flutuação de tensão e frequência da rede baseados no MÓDULO 8 do PRODIST. Além dos dados de tensão, potência e energia gerada fornecidas pelo inversor de um sistema fotovoltaico instalado em uma residência que apresenta níveis de tensão acima do adequado fornecido pela concessionária de energia Equatorial Pará.

Dentre os objetivos específicos do trabalho estão:

- Realizar campanhas de medição no local do sistema fotovoltaico;
- Descrever os distúrbios da qualidade de energia;

- Analisar o Módulo 8 do PRODIST;
- Analisar os resultados das medições realizadas com o analisador de energia, baseado no Módulo 8 do PRODIST.
- Analisar os dados de tensão, potência e energia fornecidos pelo inversor.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Neste primeiro capítulo são apresentados uma contextualização a respeito da qualidade de energia em sistemas fotovoltaicos e o objetivo do trabalho. No capítulo 2, serão descritos os conceitos principais e os distúrbios da qualidade da energia elétrica, assim como os itens presentes no MÓDULO 8 PRODIST.

A descrição do local das campanhas de medição, do sistema fotovoltaico existente na residência, o modelo e características do analisador de energia, sensor de corrente utilizado e metodologia de análise utilizada serão descritos no capítulo 3.

No capítulo 4 e 5, serão apresentados respectivamente, os resultados das medições realizadas com o analisador de energia, os dados coletados do inversor e a conclusão.

2. QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

2.1. INTRODUÇÃO

Ao longo deste capítulo serão abordados os principais conceitos e fenômenos que influenciam na qualidade da energia elétrica, sendo estes classificados de acordo com o Módulo 8 do PRODIST.

2.2. CONCEITOS INICIAIS

Atualmente, a energia elétrica está muito presente na vida dos seres humanos e move diversos campos e setores como saúde e educação. Interrupções no fornecimento de energia, ou quaisquer outros problemas trazem consequências indesejáveis para os consumidores. Dessa forma, a regulação do fornecimento de energia, assim como a qualidade da energia fornecida são de extrema importância.

O termo qualidade da energia elétrica pode ser definido como qualquer problema de energia manifestado na tensão, corrente ou nas variações de frequência (REZENDE; SAMESIMA, 2009). Outrossim, pode ser descrita como todo desvio ocorrido na magnitude, forma de onda da tensão e/ou corrente elétrica que interfira no funcionamento de equipamentos elétricos (PAULILO, 2013).

2.3. CONCEITOS TEÓRICOS SOBRE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é uma das fontes de energia renovável mais promissoras devido ao seu vasto potencial de geração e seu baixo impacto ambiental. Ela converte diretamente a radiação solar em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico, que ocorre quando a luz solar é absorvida por materiais semicondutores, gerando uma diferença de potencial e permitindo o fluxo de elétrons. Esse princípio foi observado pela primeira vez por Edmond Becquerel em 1839 e, desde então, a tecnologia tem evoluído significativamente (ALMEIDA et al., 2015).

A aplicação da energia solar fotovoltaica no Brasil é especialmente atraente devido ao alto índice de radiação solar recebido em todo o território nacional, o que oferece uma grande oportunidade para diversificação da matriz energética do país. Entretanto, a adoção dessa tecnologia ainda enfrenta desafios, principalmente devido aos altos custos iniciais dos sistemas

fotovoltaicos. Além disso, a infraestrutura e a regulamentação necessárias para viabilizar a expansão da energia solar em grande escala ainda estão em desenvolvimento, o que limita seu acesso em muitas regiões do Brasil (FRANCO, 2013).

A tecnologia fotovoltaica utiliza células feitas principalmente de silício, sendo essas classificadas em diferentes gerações. As células de silício monocristalino, por exemplo, são mais eficientes, mas também mais caras. Já as células de silício amorfo, que possuem menor eficiência, têm custo reduzido e são uma opção mais acessível, embora sua eficiência seja inferior. A crescente demanda por essas tecnologias tem impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de novas soluções, com destaque para as células orgânicas e as células sensibilizadas por corante, que ainda estão em fase experimental (MACHADO E MIRANDA, 2015).

Em termos de viabilidade econômica, o preço dos módulos fotovoltaicos no Brasil é um dos fatores que dificultam sua popularização. Mesmo com a queda nos preços nos últimos anos, a instalação de sistemas fotovoltaicos ainda exige um investimento considerável. No entanto, o retorno financeiro desses sistemas tem sido progressivamente mais atraente, com períodos de payback entre 6 e 10 anos. Além disso, o mercado brasileiro tem se beneficiado de incentivos regulatórios, como a possibilidade de injetar energia solar na rede elétrica, o que tem contribuído para aumentar a adoção da tecnologia em áreas urbanas e rurais (MACHADO E MIRANDA, 2015).

2.4. DISTÚRBIOS DA QUALIDADE DA ENERGIA E O MÓDULO 8 DO PRODIST

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é o órgão brasileiro responsável por regulamentar e normatizar os serviços prestados pelas concessionárias desde a geração até a comercialização, afim de padronizar o funcionamento e o seu desempenho. A ANEEL em parceria com as entidades ligadas ao setor elétrico nacional implementou os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST).

O PRODIST está em vigência desde o ano de 2008 e teve a sua última revisão estabelecida pela Resolução Normativa Nº 956, de dezembro de 2021. O PRODIST é composto por 11 módulos, os quais serão listados a seguir:

Módulo 1 – Glossário de Termos Técnicos do PRODIST

Módulo 2 – Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição

Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição

Módulo 4 – Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição

Módulo 5 – Sistemas de Medição

Módulo 6 – Informações Requeridas e Obrigações

Módulo 7 – Cálculo de Perdas na Distribuição

Módulo 8 – Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica

Módulo 9 – Ressarcimento de Danos Elétricos

Módulo 10 – Sistema de Informação Geográfica Regulatório

Módulo 11 – Fatura de Energia Elétrica e Informações Suplementares

Considerando que o objeto de estudo deste trabalho é uma análise da qualidade de energia de uma residência com sistema fotovoltaico, será utilizada durante as análises as diretrizes contidas no Módulo 8 do PRODIST. Os procedimentos definidos na normativa devem ser observados por consumidores, centrais geradoras, distribuidoras, agentes importadores ou exportadores de energia, transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão (DIT) e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (ANEEL, 2021).

O Módulo 8 abrange os procedimentos referentes à qualidade do produto, à qualidade do serviço e à qualidade comercial. Quanto a qualidade do produto, são detalhados os fenômenos em regime permanente e transitório, instituindo os indicadores, valores de referência, metodologia e gestão de reclamações. A qualidade do serviço é relativa à continuidade do fornecimento de energia elétrica, já a qualidade comercial está associada ao atendimento telefônico e tratamento das reclamações (ANEEL, 2021).

O Módulo 8 do PRODIST avalia os seguintes fenômenos associados à qualidade da energia:

- Fenômenos de regime permanente:
 - Tensão em regime permanente;
 - Fator de potência;
 - Harmônicos;
 - Desequilíbrio de tensão;
 - Variação de frequência;
- Regime transitório:
 - Variações de tensão de curta duração – VTCD;

2.4.1. Regime permanente

2.4.1.1. Tensão em regime permanente

A Tensão em Regime Permanente (TRP) pode ser caracterizada como um parâmetro de referência o qual os níveis de tensão fornecidos pela concessionária de energia devem seguir, obedecendo os limites descritos por norma. Para Dugan et al. (2003) as variações de longa duração abrangem os valores dos desvios da raiz quadrática média (V_{rms}), estas podem ser de elevação ou afundamento dos níveis de tensão.

Em Lopez (2013), o aumento dos níveis de tensão quando comparadas a tensão de regime permanente são tidas como sobretensões. As sobretensões são distúrbios com duração de segundos ou horas. Já as subtensões são os distúrbios caracterizados pela diminuição dos níveis de tensão.

Segundo o Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2021) existem três classificações para os níveis de tensão obtidos por medição apropriada, sendo eles os adequados, precários e críticos. O valor nominal ou contratado como tensão de referência (TR) deve ser utilizado para comparação dos resultados obtidos nas medições realizadas nos pontos de conexão.

A Tabela 1 mostra as três categorias para o nível de tensão fornecida, adequada, precária e crítica, e seus respectivos intervalos baseados na tensão nominal. Como a residência analisada durante o estudo apresenta tensão nominal de 220 V, os níveis de tensão considerados adequados estão entre 231 V (1,05 TN) e 202 V (0,92 TN). Já os níveis precários situam-se respectivamente entre 191 V (0,87 TN) e 202 V (0,92 TN), 231 V (1,05 TN) e 233 V (1,06 TN). Para os níveis de tensão acima de 233 V (1,06 TN) e menores que 191 V (0,87 TN) a classificação é crítica. A Figura 1 mostra os níveis adequado, precário e crítico para a tensão nominal (220 V) da residência estudada.

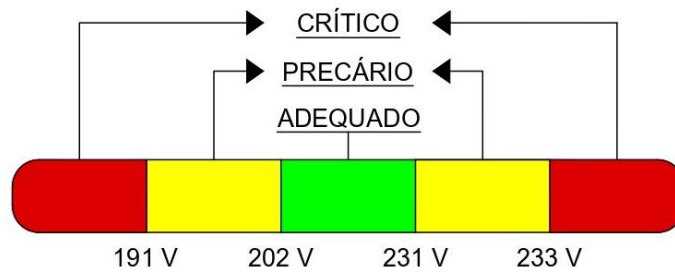
Tabela 1 – Faixas de classificação de tensão

Tensão Nominal (TN)	Tensão Fornecida		
	Adequada	Precária	Crítica
$TN \geq 230 \text{ kV}$	$0,95 \text{ TN} \leq TL \leq 1,05 \text{ TN}$	$0,93 \text{ TN} \leq TL \leq 0,95 \text{ TN}$ $1,05 \text{ TN} \leq TL \leq 1,07 \text{ TN}$	$TL < 0,93 \text{ TN}$ ou $TL > 1,07 \text{ TN}$
$69 \text{ kV} \leq TN \leq 230 \text{ kV}$	$0,95 \text{ TN} \leq TL \leq 1,05 \text{ TN}$	$0,90 \text{ TN} \leq TL \leq 0,95 \text{ TN}$ $1,05 \text{ TN} \leq TL \leq 1,07 \text{ TN}$	$TL < 0,90 \text{ TN}$ ou $TL > 1,07 \text{ TN}$
$1 \text{ kV} \leq TN \leq 69 \text{ kV}$	$0,93 \text{ TN} \leq TL \leq 1,05 \text{ TN}$	$0,90 \text{ TN} \leq TL \leq 0,93 \text{ TN}$	$TL < 0,90 \text{ TN}$ ou $TL > 1,05 \text{ TN}$
$TN \leq 1 \text{ kV}$	$0,92 \text{ TN} \leq TL \leq 1,05 \text{ TN}$	$0,87 \text{ TN} \leq TL \leq 0,92 \text{ TN}$ $1,05 \text{ TN} \leq TL \leq 1,06 \text{ TN}$	$TL < 0,87 \text{ TN}$ ou $TL > 1,06 \text{ TN}$

TL – Tensão de Leitura; TR – Tensão de Referência.

Autor: Adaptado de ANEEL (2021)

Figura 1 – Níveis adequado, precário e crítico para TN = 220 V



Fonte: Autoria própria.

A Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária (DRP) e a Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica (DRC) são os indicadores individuais de tensão em regime permanente (ANEEL, 2021). Esses indicadores são utilizados para identificar mudanças mais acentuadas na curva de tensão e possuem limites de 3% para o DRP e 0,5% para o DRC. Os dados registrados devem estar integralizados em intervalos de 10 minutos e somar 1.008 leituras válidas, posteriormente devem ser utilizados nas equações 2.1 e 2.2 para a obtenção da DRP e da DRC respectivamente.

$$DRP = \frac{nlp}{1.008} \times 100 [\%] \quad (2.1)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1.008} \times 100 [\%] \quad (2.2)$$

2.4.1.2. Fator de potência

O fator de potência (FP) pode ser definido como a relação entre as potências ativa e reativa presentes em um circuito. Em Creder (2007) o fator de potência é dado pelo cosseno do ângulo de defasagem entre a corrente e a tensão. Assim, o fator de potência assume valores que variam de 0 a 1, onde o valor 0 representa indutância e o valor 1, um circuito puramente resistivo.

Segundo Cotrim (2008) o fluxo de potência ocorre da fonte para a carga, onde a potência ativa é absorvida pela carga e a potência reativa circula no circuito elétrico sem ser absorvida. Deste modo, a potência ativa é responsável por realizar trabalho, ao passo que a

potência reativa além de não realizar trabalho “ocupa espaço” no sistema elétrico (ANICETO, 2016).

As equações 2.3 e 2.4 presentes no Módulo 8 do PRODIST mostram duas maneiras de se obter o fator de potência em posse das potências ativa (P) e reativa (Q) ou a energia ativa (EA) e reativa (ER) (ANEEL, 2021).

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (2.3)$$

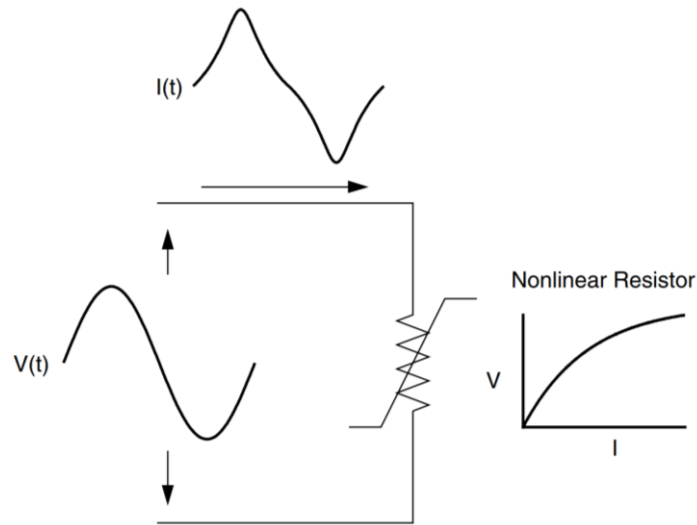
$$FP = \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \quad (2.4)$$

O fator de potência deve ser controlado permanentemente em unidade consumidoras atendidas por redes de distribuição de média ou alta tensão. Quando a unidade consumidora pertencer ao grupo A e possuir tensão inferior a 230 kV, o fator de potência deve ser superior a 0,92 indutivo ou capacitivo. Unidades consumidoras pertencentes ao grupo B, subgrupos B2, B3 e B4 não necessitam manter o fator de potência acima ou igual a 0,92.

2.4.1.3. Harmônicos

Com o avanço da tecnologia nos últimos anos, tornou-se maior o uso de cargas não lineares como equipamentos de eletrônica de potência e eletrônicos. Em uma carga não linear a corrente não é proporcional a tensão aplicada. Dessa forma, a utilização deste tipo de carga aumenta a preocupação com as distorções harmônicas presentes no sistema de distribuição (Dugan et al. 2003; BAGGINI, 2008; Monteiro, 2019). A Figura 2 mostra o efeito causado na curva de corrente quando uma tensão puramente senoidal é aplicada em um resistor não linear.

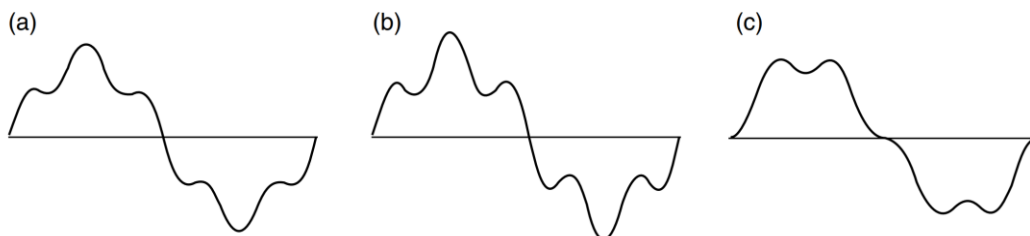
Figura 2 – Distorção de corrente causado por resistor não linear



Fonte: Dugan et. al (2003).

As distorções harmônicas podem ser descritas como deformações nas formas de onda das tensões ou correntes que apresentam componentes com uma frequência que é múltiplo inteiro da frequência fundamental (BAGGINI, 2008; ANEEL 2021). A frequência fundamental (50 ou 60 Hz) é considerada um harmônico de primeira ordem, o segundo harmônico é aquele cuja frequência tem o dobro da fundamental (100 ou 120 Hz), e assim por diante. A Figura 3 (a) e (b) mostram uma forma de onda com harmônicos de quinta ordem com amplitude de 0,15 e 0,3 respectivamente. A forma de onda da Figura 3 (c) contém harmônicos de quinta ordem com amplitude de 0,15 deslocados em 180° em relação à fase.

Figura 3 – Formas de onda com harmônicos de quinta ordem



Fonte: Baggini (2008).

A medição do valor efetivo das componentes harmônicas é dada pela THD (Total Harmonic Distortion – Distorção Harmônica Total) descrita pela equação 2.5. As equações 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9 mostram respectivamente a DTT (Distorção Harmônica Total de Tensão), DTTP%

(Distorção Harmônica Total de Tensão para as componentes pares não múltiplas de 3), DTTI% (Distorção Harmônica Total de Tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3) e a DTT3% (Distorção Harmônica Total de Tensão para as componentes múltiplas de 3).

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{\max}} M_h^2}}{M_1} \quad (2.5)$$

Sendo:

$h \rightarrow$ Ordem harmônica;

$h_{\max} \rightarrow$ Ordem harmônica máxima;

$M_h \rightarrow$ Tensão ou corrente harmônica de ordem h ;

$M_1 \rightarrow$ Tensão ou corrente na frequência fundamental.

$$\text{DTT} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.6)$$

Sendo:

$h \rightarrow$ Ordem harmônica;

$h_{\max} \rightarrow$ Ordem harmônica máxima;

$V_h \rightarrow$ Tensão harmônica de ordem h ;

$V_1 \rightarrow$ Tensão na frequência fundamental.

$$\text{DTT}_p\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.7)$$

Sendo:

$h \rightarrow$ Todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3;

$h_p \rightarrow$ Máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3;

$V_h \rightarrow$ Tensão harmônica de ordem h ;

$V_1 \rightarrow$ Tensão na frequência fundamental.

$$DTT_1\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_1} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.8)$$

Sendo:

$h \rightarrow$ Todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3;

$h_p \rightarrow$ Máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3;

$V_h \rightarrow$ Tensão harmônica de ordem h ;

$V_1 \rightarrow$ Tensão na frequência fundamental.

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.9)$$

Sendo:

$h \rightarrow$ Todas as ordens harmônicas múltiplas de 3;

$h_p \rightarrow$ Máxima ordem harmônica múltipla de 3;

$V_h \rightarrow$ Tensão harmônica de ordem h ;

$V_1 \rightarrow$ Tensão na frequência fundamental.

A Tabela 2 mostra os valores máximos desejáveis para os indicadores DTT95%, DTTp95%, DTTi95% e DTT395% que foram superados em apenas 5% das 1.008 leituras válidas.

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

Indicador	Tensão Nominal (V_n)		
	$V_n \leq 1$ kV	1 kV < V_n < 69 kV	69 kV $\leq V_n$ < 230 kV
DTT95%	10%	8%	5%
DTTp95%	2,5%	2%	1%
DTTi95%	7,5%	6%	4%
DTT395%	6,5%	5%	3%

Autor: ANEEL (2021).

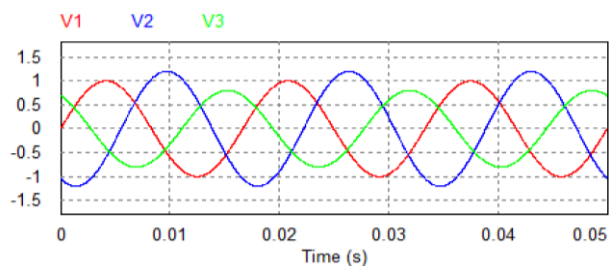
2.4.1.4. Desequilíbrio de tensão

Em Gosbell (2002) o desequilíbrio de tensão é caracterizado pela diferença nos níveis de tensão em módulo das fases ou na defasagem angular de 120° em um sistema elétrico

trifásico ou, ainda, as duas condições simultaneamente. A distribuição desorganizada de cargas monofásicas nas fases e o mal funcionamento de banco de capacitores estão entre as principais causas do desequilíbrio de tensão na rede.

O desequilíbrio de tensão pode por exemplo afetar o funcionamento de motores trifásicos, pois há uma elevação da temperatura do motor (REZENDE; SAMESIMA, 2009). A Figura 4 mostra um exemplo do desequilíbrio de tensão em um sistema trifásico, Mundins (2020).

Figura 4 – Desequilíbrio de tensão (p.u)



Fonte: Mundins (2020).

De acordo com o Módulo 8 PRODIST (ANEEL, 2021) os limites para o desequilíbrio de tensão são definidos pelo Fator de Desequilíbrio de Tensão (FD) que podem ser obtidos utilizando as equações 2.10 e 2.11.

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} 100\% \quad (2.10)$$

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (2.11)$$

Onde β é obtido pela seguinte equação:

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{ac}^4 + V_{bc}^4}{(V_{ab}^2 + V_{ac}^2 + V_{bc}^2)^2} \quad (2.12)$$

Sendo:

V_- = Magnitude da tensão eficaz de sequência negativa na frequência fundamental;

V_+ = Magnitude da tensão eficaz de sequência positiva na frequência fundamental;

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

Os limites para o indicador de desequilíbrio de tensão são comparados com o indicador FD95%, que foi superado por apenas 5% das 1008 leituras válidas. A Tabela 3 demonstra os limites para o desequilíbrio de tensão. Como o valor da tensão nominal da unidade consumidora avaliada durante o estudo é de 220 V, o limite para o desequilíbrio de tensão é de 3,0%.

Tabela 3 – Faixas de classificação de tensão

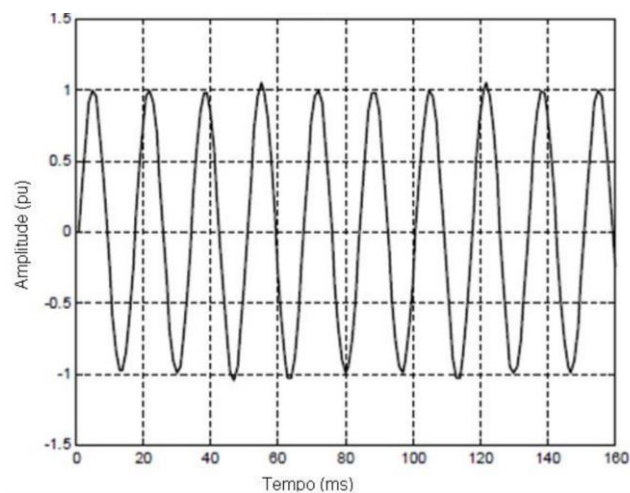
Indicador	Tensão Nominal (V_n)	
	$V_n < 2,3 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
FD95%	3,00%	2,00%

Autor: Adaptado de ANEEL (2021).

2.4.1.5. Flutuação de tensão

A flutuação de tensão pode ser definida como variações aleatórias, repetitivas ou esporádicas do valor eficaz, ou de pico da tensão, cuja magnitude não excedem em 10% as faixas de tensão especificadas (Dugan et al. 2003; BAGGINI, 2008). Esse distúrbio é causado por cargas que tenham variações repentinas de tensão como máquinas de soldas, grandes elevadores ou a partida de motores sem nenhum dispositivo de auxílio. A Figura 5 mostra um exemplo de flutuação de tensão.

Figura 5 – Flutuação de tensão



Fonte: Kern (2008).

A cintilação ou flicker é o principal efeito das flutuações de tensão, esse fenômeno é passível de ser visto a olho nu e provoca variações na luminância de lâmpadas, principalmente as incandescentes (REZENDE; SAMESIMA, 2009).

De acordo com o Módulo 8 PRODIST (ANEEL, 2021) os indicadores de flutuação de tensão são o Pst, Plt e Pst95%. Eles representam respectivamente a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão em um período de 10 minutos, 2 horas ou quando o indicador Pst foi superado em 5% das 1008 leituras válidas. As equações 2.13 e 2.14 representam o cálculo para se obter os indicadores Pst e Plt. A Tabela 4 mostra os limites para flutuação de tensão.

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (2.13)$$

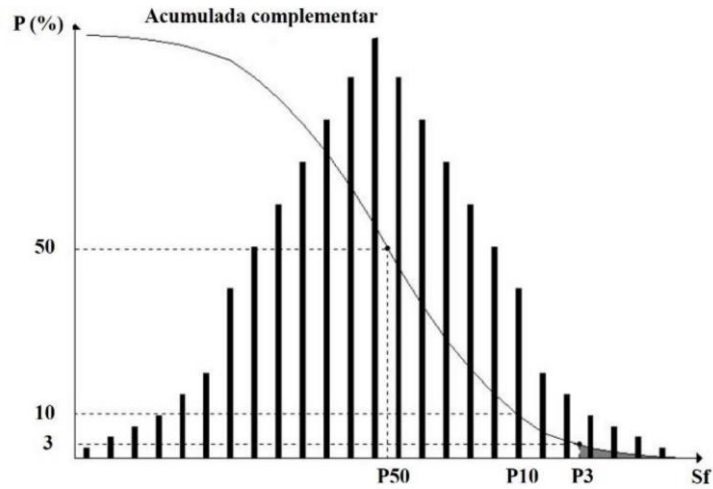
$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (P_{st_i})^3} \quad (2.14)$$

Pst → Severidade de flutuação de tensão de curta duração;

Plt → Severidade de Flutuação de tensão de longa duração;

Pi (i = 0,1; 1; 3; 10; 50) → corresponde ao nível de flutuação de tensão que foi ultrapassado durante i % do tempo, obtido a partir da função de distribuição acumulada complementar, conforme mostrado na Figura 6, de acordo com o procedimento estabelecido nas Normas IEC (International Electrotechnical Commission): IEC 61000-4-15. Flickermeter – Functional and Design Specifications.

Figura 6 – Função de Distribuição Acumulada Complementar



Fonte: ANEEL (2021).

Tabela 4 – Limites para flutuação de tensão

Indicador	Tensão Nominal (V_n)		
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} \leq V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
FD95%	1 pu	1,5 pu	2 pu

Fonte: ANEEL (2021).

2.4.1.6. Variação de frequência

A variação de frequência pode ser definida como o desvio do valor da frequência nominal do sistema (por exemplo 50 ou 60 Hz), e tem origem principal na geração de energia, falhas no sistema de transmissão ou na mudança da demanda de potência ativa (Vedam, 2008; Martinho, 2012).

Com a expansão da penetração dos sistemas de geração distribuída há um aumento da potência injetada nas redes de distribuição. Desse modo, variações abruptas como desligamentos em massa ou mudanças na injeção de energia podem causar perturbações na frequência da rede (Passey et al., 2011).

Quando a geração e o sistema de distribuição de energia estiverem em condições normais e em regime permanente o limite permitido para a frequência deve estar situado entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. Caso ocorra algum distúrbio no sistema de distribuição que provoque alteração na frequência, no intervalo de 30 segundos as instalações de geração devem garantir que a frequência retorne para a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz (ANEEL, 2021). A Tabela 5 mostra os valores de tempo de retorno e a faixa de frequência quando ocorrer algum distúrbio de frequência na rede.

Tabela 5 – Faixas de classificação de tensão

Tempo de Retorno	Faixa de Frequência	
	Mínima	Máxima
< 5s	56,5 Hz	66 Hz
5 s	< 58,5 Hz	> 63,5 Hz
10 s	-	> 62 Hz
30 s	< 57,5 Hz	-

Autor: Adaptado de ANEEL (2021)

2.4.2. Regime transitório

2.4.2.1. Variações de tensão de curta duração (VTCD)

As variações de tensão de curta duração (VTCD) são eventos que causam desvios na amplitude do valor eficaz da tensão. Esses eventos tem duração de até 3 minutos e podem ser classificadas como interrupções, afundamentos ou elevações do tipo momentâneos ou temporários (ANEEL, 2021). As variações podem ser causadas pela energização de grandes cargas como motores de alta potência que requerem grandes correntes de partida, conexões frouxas ou condições de falha. A Tabela 6 mostra a classificação das variações de tensão de curta duração (ANEEL, 2021).

Tabela 6 – Classificação das variações de tensão de curta duração

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

Autor: ANEEL (2021).

O Fator de Impacto (FI) caracteriza a severidade da incidência de eventos de VTCD e pode ser calculado com base em três variáveis, a frequência de ocorrência de eventos VTCD, o

fator de ponderação e o fator de impacto base. A equação 2.15 mostra o cálculo do fator de impacto (ANEEL, 2021).

$$FI = \frac{\sum_{i=A}^I (f_{ei} \times f_{pond_i})}{FI_{BASE}} \quad (2.15)$$

Sendo:

f_{ei} = frequência de ocorrência de eventos de VTCD, apurada por meio de medição apropriada, em um período de 30 dias consecutivos, para cada região de sensibilidade i , sendo $i = A, B, C, D, E, F, G, H$ e I ;

f_{pond_i} = fator de ponderação para cada região de sensibilidade i , estabelecido de acordo com a relevância do evento, correlacionando sua amplitude e duração;

FI_{BASE} = Fator de Impacto base, obtido do somatório dos produtos dos fatores de ponderação pelas frequências máximas de ocorrência em um período de 30 dias de VTCD para cada região de sensibilidade.

Em ANEEL (2021) não são estabelecidos valores de referência para o sistema de distribuição em baixa tensão (SDBT). Para o sistema de distribuição em média tensão ou em alta tensão, SDMT e SDAT respectivamente, uma medição apropriada deve ser realizada em um período de 30 dias consecutivos e o valor de referência do indicador Fator de Impacto é de 1,0 pu. A Tabela 7 mostra os fatores de ponderação e Fator de Impacto Base de acordo com a tensão nominal (V_n).

Tabela 7– Fatores de ponderação e Fator de Impacto Base de acordo com a tensão nominal (V_n)

Região de Sensibilidade	Fator de Ponderação (f_{pond})	Fator de Impacto Base (FI_{BASE})	
		$2,3 \text{ kV} \leq V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
A	0,00	2,13	1,42
B	0,04		
C	0,07		
D	0,15		
E	0,25		
F	0,36		
G	0,07		
H	0,02		
I	0,04		

Autor: ANEEL (2021).

3. DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO

3.1. INTRODUÇÃO

Ao longo deste capítulo serão abordados os tópicos referentes ao local onde o analisador de energia foi instalado, a descrição do sistema fotovoltaico existente na residência, o modelo e informações do analisador de energia e sensor de corrente utilizados durante as campanhas de medição.

3.2. DESCRIÇÃO DO LOCAL E EQUIPAMENTO UTILIZADO NAS CAMPANHAS DE MEDIÇÃO

3.2.1. Local de medição

As medições utilizadas no trabalho foram realizadas em uma residência localizada na comunidade Bom Jardim no município de São Domingos do Capim no estado do Pará. Ela é atendida por uma rede de baixa tensão bifásica com tensão entre fases de 220V fornecida pela Equatorial Pará. O padrão de entrada possui um disjuntor de 63 A com cabos de 10 mm² de cobre para as fases e alumínio para o neutro.

3.2.2. Cargas da residência

A residência em estudo é utilizada pelos moradores apenas durante os períodos de férias escolares e em visitas mensais para a realização de manutenção interna. Ela possui diversos equipamentos elétricos, como máquina de lavar roupas, geladeira, chuveiro elétrico, ventiladores, entre outros. No entanto, o único equipamento que permanece ligado ininterruptamente é a geladeira. Durante a campanha de medição, apenas a geladeira estava em funcionamento, portanto, as medições realizadas não foram influenciadas pelo acionamento de nenhuma das demais cargas presentes na residência.

3.2.3. Descrição do sistema fotovoltaico

A unidade consumidora em análise possui um sistema fotovoltaico on-grid de 9,24 kWp, composto por 28 módulos de 330 Wp da marca Yingli Solar, modelo YL330P-35B, com

corrente de potência máxima (I_{mp}) de 8,85 A e tensão de potência máxima (V_{mp}) de 37,3 V. Os módulos estão divididos em duas MPPTs: a primeira subdividida em duas strings, uma com dez e outra com nove módulos, e a segunda contém uma única string com nove módulos. Essas strings estão conectadas a um inversor da marca SAJ, modelo R5-8K-S2, com potência nominal de 8 kW. O inversor possui tensão nominal de 220 V monofásico (fase e neutro) e opera em uma faixa de tensões de 180 a 280 V. A Figura 7 mostra o sistema fotovoltaico analisado.

Figura 7 – Sistema fotovoltaico analisado

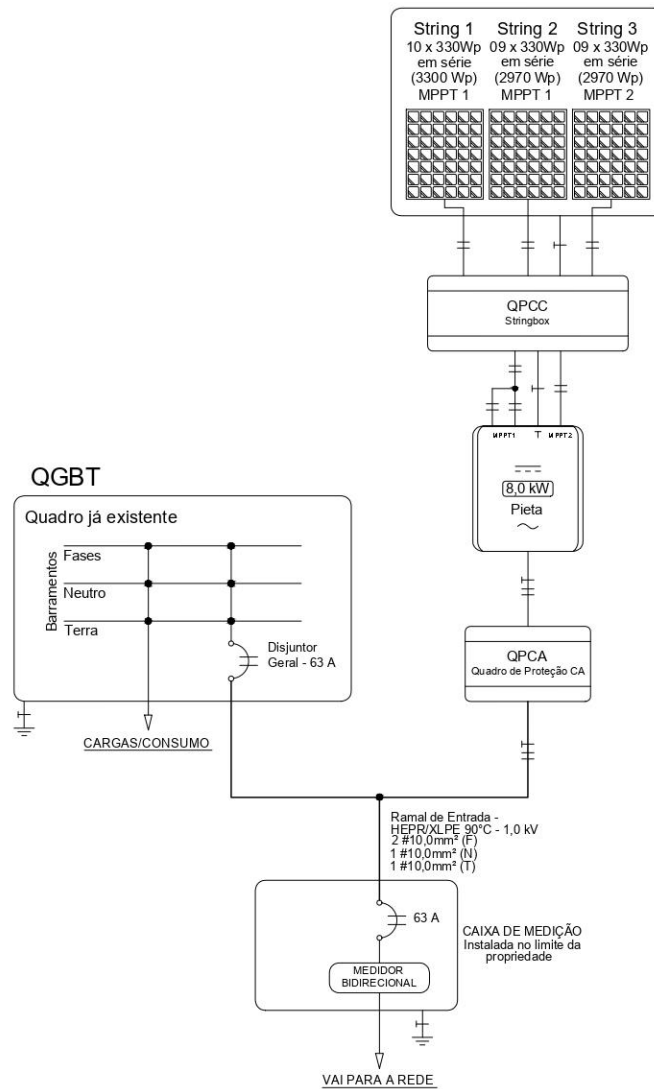


Fonte: Autoria própria.

Como a residência é atendida por uma rede bifásica com tensão de fase de 127 V e o inversor utilizado possui tensão nominal de 220V monofásico, é necessário que sejam utilizados duas fases e um condutor de aterramento. O item 7.6 b) da norma NT-020 Conexão de Micro e Minigeração Distribuída ao Sistema de Distribuição assegura que o inversor monofásico de 220V pode ser conectado em um sistema monofásico de 220V ou um sistema bifásico de 220V.

O sistema fotovoltaico está instalado em uma estrutura de solo voltada para o norte geográfico. A conexão com a rede da casa é realizada por meio de cabos de 10 mm² com isolamento de 1 kV e encontra-se em paralelo com a entrada do quadro de distribuição. A Figura 8 apresenta o diagrama unifilar do sistema fotovoltaico e o ponto de conexão com a rede da residência.

Figura 8 – Diagrama unifilar do sistema fotovoltaico analisado



Fonte: Autoria própria.

3.2.4. Analisador de energia

Durante as medições foi utilizado um analisador de qualidade de energia HIOKI modelo PW3198. Ele possui quatro canais de entrada e pode ser utilizado em sistemas monofásicos dois fios ou três fios, trifásicos três fios ou quatro fios. Suporta medições de tensão de 600 Vrms, 6 kVpico de transitório e medições em corrente alternada entre 500 mA e 5 kA (depende do sensor de corrente utilizado).

O equipamento apresenta alta precisão nas medições das variáveis elétricas, para os valores de tensão a variação pode ser de $\pm 0,1\%$ da tensão nominal, já os valores de corrente e

potência a variação é de $\pm 0,2\%$ rdg (valor lido) $\pm 0,1\%$ fs (valor máximo exibido) mais a variação do sensor de corrente utilizado.

O analisador de energia pode ser utilizado para a obtenção dos valores de tensão, corrente, potências aparente, ativa e reativa, fator de potência, transitórios, surtos de tensão, afundamentos, harmônicos e outros. A Figura 9 mostra o analisador de energia utilizado durante as medições.

Figura 9 – Analisador de energia

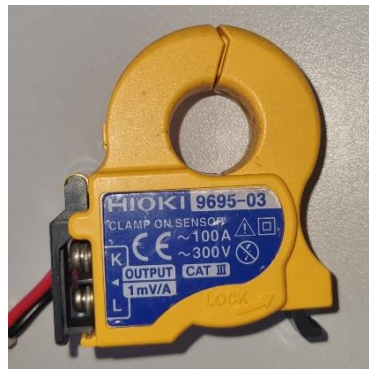


Fonte: Hioki.

3.2.5. Sensor de corrente

O sensor de corrente utilizado durante as medições é da marca HIOKI modelo 9695-03. Ele é capaz de medir correntes de até 100 A com precisão de $\pm 0,3\%$ rdg, $\pm 0,02\%$ fs e possui largura de banda de 40 Hz a 5 kHz. A Figura 10 mostra o sensor de corrente utilizado com o analisador de energia.

Figura 10 – Sensor de corrente



Fonte: Autoria própria.

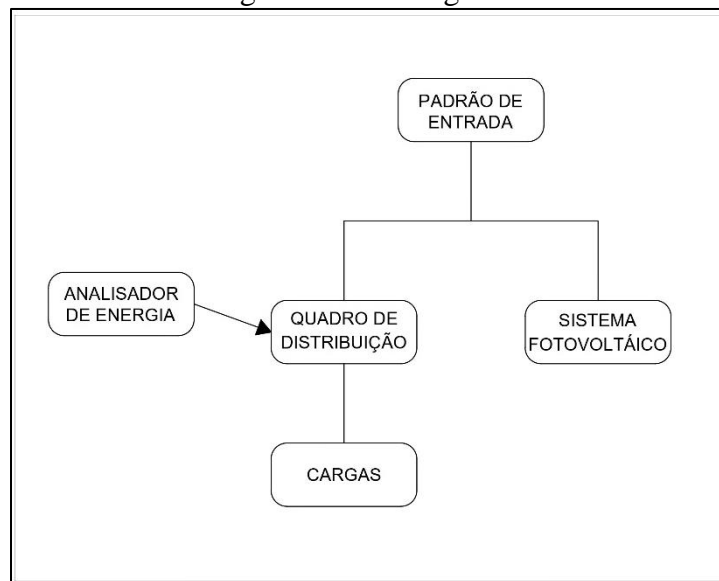
3.3. METODOLOGIA DE ANÁLISE

O analisador de energia foi instalado no dia 13 de janeiro de 2023 por volta de 16h e a retirada do equipamento ocorreu no dia 24 do mesmo mês as 10h. Por ser uma residência atendida por um padrão bifásico foram utilizados os canais 1 e 2 do analisador para medir a tensão em cada uma das fases e o canal 4 para a tensão entre o neutro e o terra.

Antes de realizar a instalação do analisador de energia é necessário configurar os seus parâmetros. Dessa forma, a tensão entre fases (V_{din}) selecionada foi de 220 V na configuração 2P3W (Wiring), o sensor de corrente (ClampSensor) 9695-03, com um alcance de até 100 A (IRange) e o intervalo de plotagem (Time Plot Interval) de dez minutos.

A medição de tensão é realizada por meio de cabos conectados ao analisador que possuem ponteira tipo jacaré. O analisador foi conectado no barramento principal do quadro de distribuição da residência. A Figura 11 ilustra um fluxograma com o local onde foi instalado dispositivo.

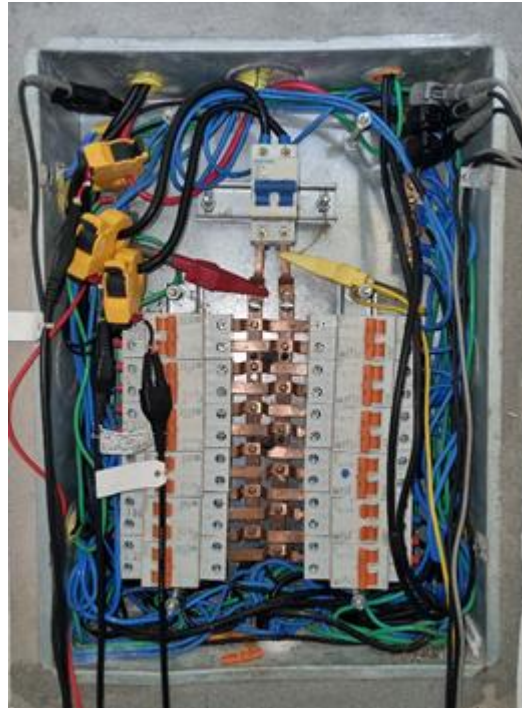
Figura 11 – Fluxograma



Fonte: Autoria Própria.

Foram utilizados três sensores de corrente, dois em cada uma das fases e um sensor no condutor neutro. A Figura 12 mostra os sensores de corrente e as ponteiros conectadas.

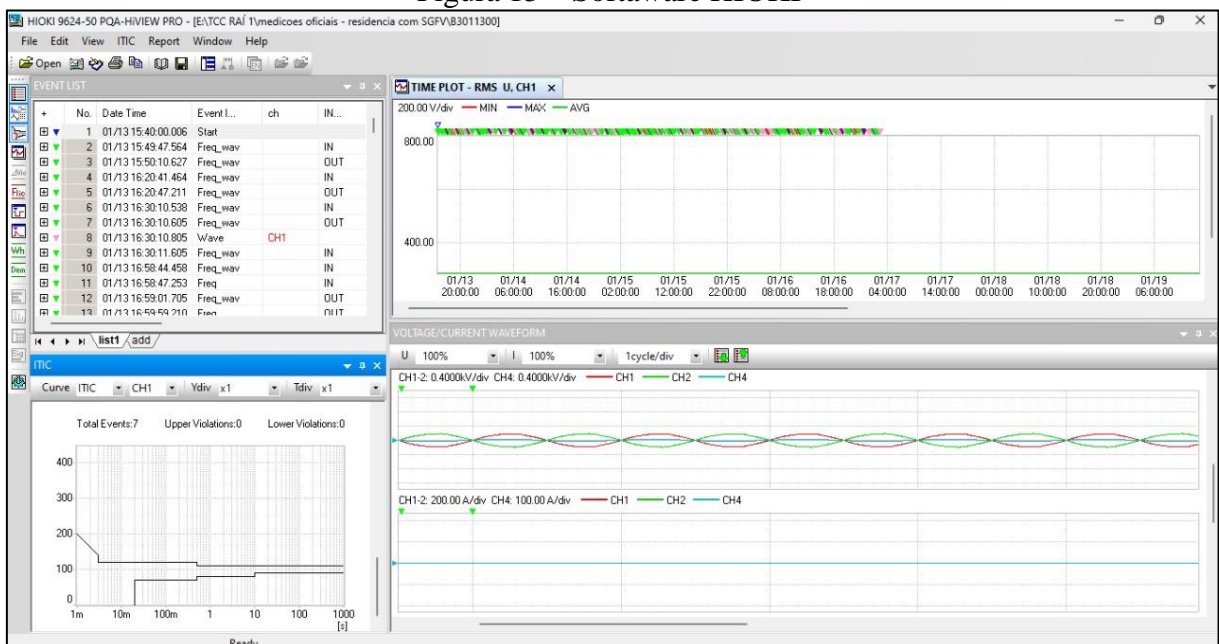
Figura 12 – Ponteiras e sensores de corrente



Fonte: Autoria Própria.

Após o término das medições o analisador foi retirado do local. Para visualizar os dados, a fabricante do analisador de energia, HIOKI, disponibiliza o software HIOKI 9624-50 PQA-HiVIEW PRO, mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Software HIOKI

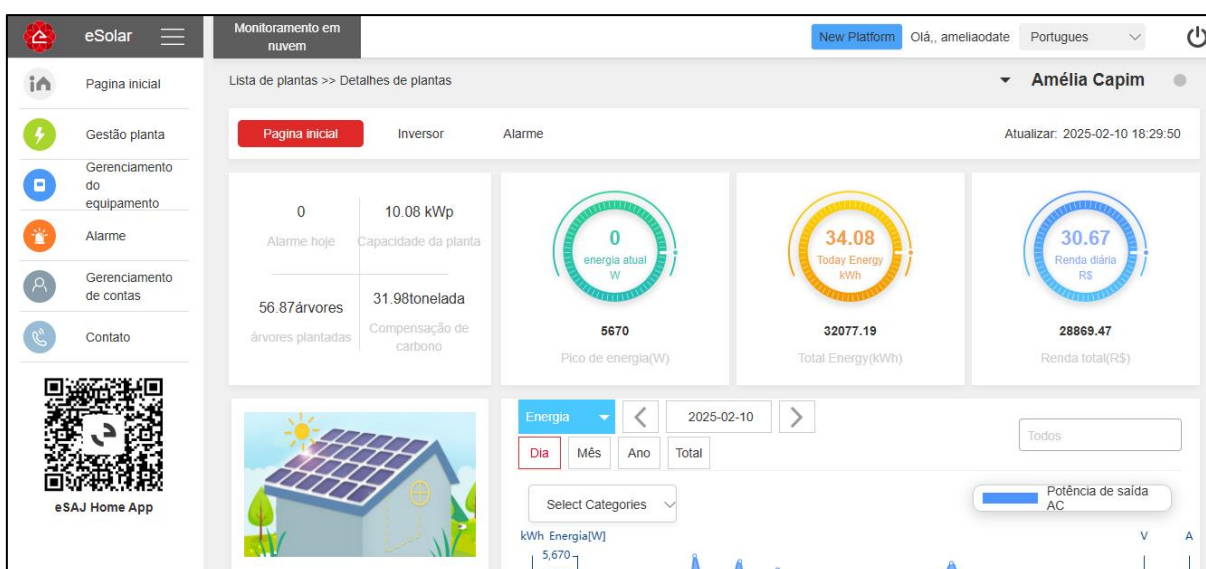


Fonte: Autoria Própria.

O analisador de energia armazena os dados em uma pasta em um cartão de memória instalado no equipamento que deve ser aberta utilizando o software da HIOKI. Com ele é possível exportar os dados para o Excel onde serão tratados e gerados os gráficos de tensão em regime permanente, flutuação de tensão e frequência da rede.

Por outro lado, para analisar a geração de energia do inversor, foi utilizado o portal de monitoramento eSolar, mostrado na Figura 14, que é o aplicativo que os inversores da SAJ utilizam.

Figura 14 – Portal eSolar



Fonte: Autoria Própria.

Através do eSolar é possível visualizar a geração de energia instantânea, acompanhar a produção de energia diária, mensal e anual. Além disso, é possível obter dados de tensão, corrente e potência gerada pelos painéis solares, tanto em corrente contínua quanto em corrente alternada. A plataforma também faz o armazenamento de dados históricos para análise de desempenho, e gera gráficos detalhados sobre a geração de energia.

Os dados disponibilizados pelo portal de monitoramento podem ser extraídos e tratados em um software. O Excel foi utilizado para tratar e gerar os gráficos que serão usados no capítulo 4.

4. RESULTADOS

Neste capítulo, será analisado o comportamento da tensão em regime permanente, a variação da frequência e a flutuação da tensão da rede elétrica, com base nos dados coletados pelo analisador de energia HIOKI PW3198. Além disso, serão analisados os dados de tensão CA, potência de saída e geração de energia fornecidos pelo inversor.

O período de análise ocorreu entre os dias 13 e 24 de janeiro de 2023, com início por volta das 16h do dia 13 e término às 10h do dia 24. No entanto, foram utilizados os dados coletados entre as 00h do dia 14 de janeiro e as 23h50 do dia 20 de janeiro de 2023. Ao todo, foram coletadas 1.008 leituras válidas, integralizadas a cada 10 minutos, totalizando 7 dias inteiros de medição, conforme exige o Módulo 8 do PRODIST.

4.1. TENSÃO EM REGIME PERMANENTE DO ANALISADOR

A partir da coleta dos dados do analisador de energia, foi possível gerar o gráfico de tensão em regime permanente. De acordo com o Módulo 8 do PRODIST, para que o fornecimento de tensão esteja em conformidade, o nível adequado para uma unidade com tensão nominal de 220V deve permanecer entre 202V e 231V.

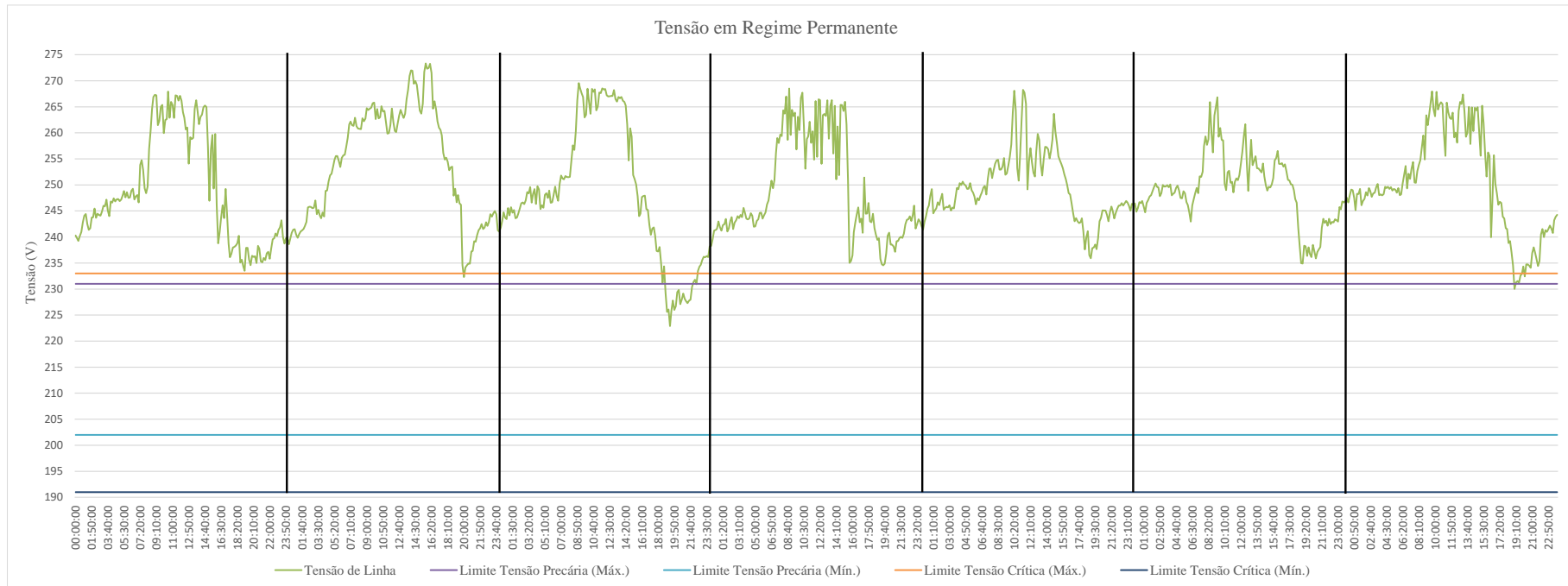
O Gráfico 1 mostra a curva de tensão de linha em regime permanente gerada pelo analisador de energia ao longo de uma semana. No gráfico, estão sinalizados os limites de tensão adequados, representados pelos valores entre as linhas azul e roxa; os limites de tensão precários, situados entre as linhas laranja e roxa, e entre as linhas preta e azul; e os limites de tensão críticos, correspondentes aos valores acima da linha laranja e abaixo da linha preta.

A partir do Gráfico 1, é possível verificar que a concessionária de energia não está fornecendo um nível de tensão adequado. No início e no final do dia, períodos em que o sistema de energia solar não está em funcionamento, o nível de tensão apresenta valores acima do limite crítico. Apenas no final da tarde do terceiro dia de medição, conforme apresentado no gráfico, os dados encontram-se dentro do limite adequado.

Outro aspecto importante a ser analisado ocorre quando o sistema fotovoltaico está em operação. É possível observar que, a partir das 6h, horário em que o inversor entra em funcionamento, o nível de tensão tende a se elevar progressivamente. Esse fenômeno ocorre simultaneamente ao aumento da injeção de potência pelo inversor no barramento onde foram realizadas as medições. A curva de tensão em regime permanente alcança valores acima de 260V, registrando seu valor máximo de 272V no segundo dia de medição.

O Módulo 8 do PRODIST cita os indicadores de Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária (DRP) e de Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica (DRC), cujos limites são de 3,0% e 0,5%, respectivamente. Das 1008 amostras coletadas, sabe-se que 21 estão dentro do limite de tensão adequada, 10 apresentam tensão precária e 977 apresentam tensão crítica. De posse dessas informações, é possível calcular o DRP e o DRC. Assim, o valor do DRP é de 0,99%, estando dentro do limite estabelecido pela norma. No entanto, o valor do DRC é de 96,92%, o que está muito acima do limite máximo permitido, que é de 0,5%.

Gráfico 1 - Tensão de Regime Permanente (Analisador)



Fonte: Autoria Própria

4.2. TENSÃO E POTÊNCIA DO INVERSOR

O inversor utilizado na instalação possui medição própria de parâmetros elétricos, dentre os quais estão a tensão e a potência de saída. O Gráfico 2 apresenta as curvas de tensão, representada pela linha azul, e de potência de saída, representada pela linha laranja, no período entre os dias 14 e 20 de janeiro de 2023.

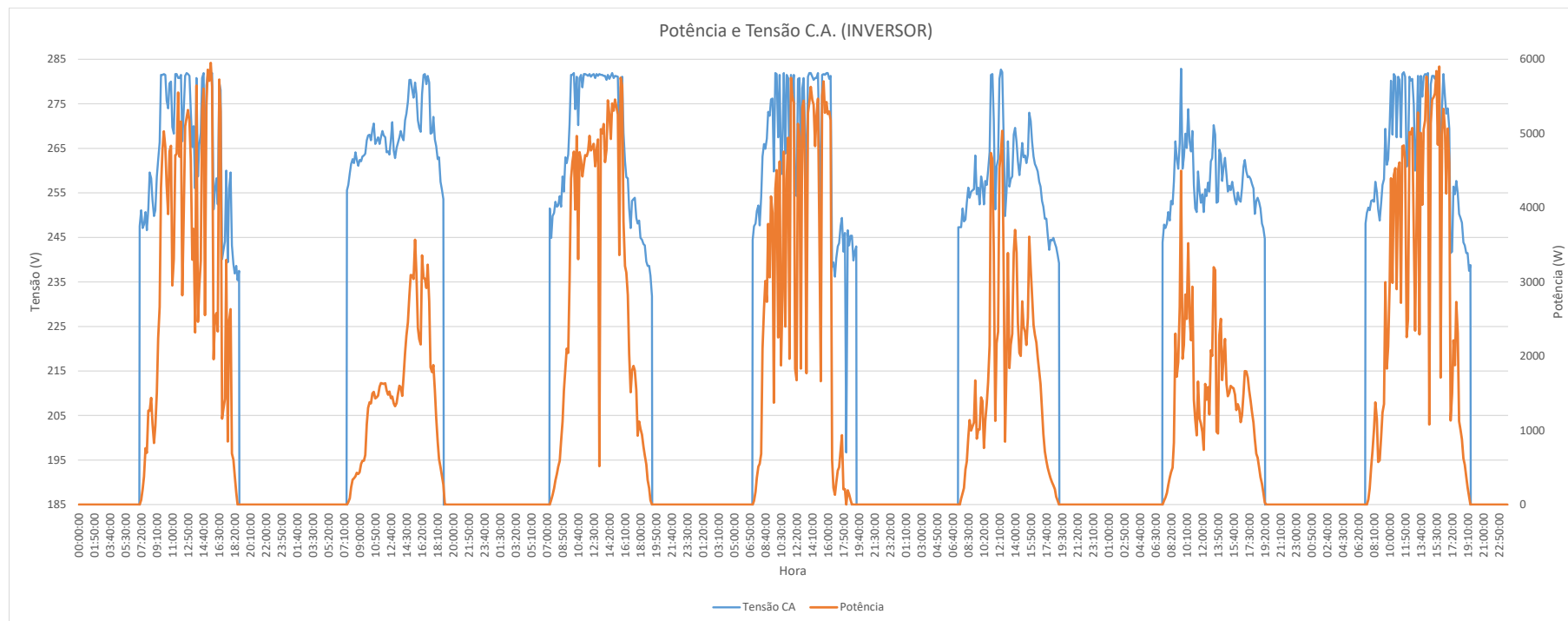
O sistema fotovoltaico possui uma potência instalada de 9,24 kW_p, enquanto o inversor tem uma potência nominal de 8 kW. Ao analisar as 1.008 amostras coletadas, conforme mostrado no Gráfico 2, verificou-se que o pico máximo de geração registrado ocorreu no primeiro e no último dia de medição, atingindo apenas 5,95 kW, o que representa aproximadamente 74,4% da potência nominal do inversor. Esse valor reduzido está diretamente relacionado ao nível de tensão no barramento CA do inversor, que atinge o limite máximo de 280V, impedindo um melhor desempenho da geração.

Outra análise importante a ser realizada diz respeito à curva de potência em um sistema fotovoltaico em pleno funcionamento. Essa curva tem como característica principal o aumento gradativo da potência de saída, atingindo o pico de geração por volta das 12h. No entanto, ao analisar o Gráfico 2, observa-se que a curva de potência tende a alcançar valores maiores após as 12h, o que indica a existência de um problema no funcionamento do sistema fotovoltaico. Paralelamente, verifica-se que a curva de tensão atinge o nível máximo de 280V, limite suportado pelo inversor, em diversos momentos. Esse fenômeno faz com que o inversor entre em modo de segurança e limite sua potência de saída.

O Gráfico 3 mostra a curva de potência e tensão de saída do inversor no terceiro dia de medição, 16 de janeiro de 2023. Nesse gráfico, verifica-se que, no início da geração, o nível de tensão na saída do inversor encontrava-se próximo de 250V.

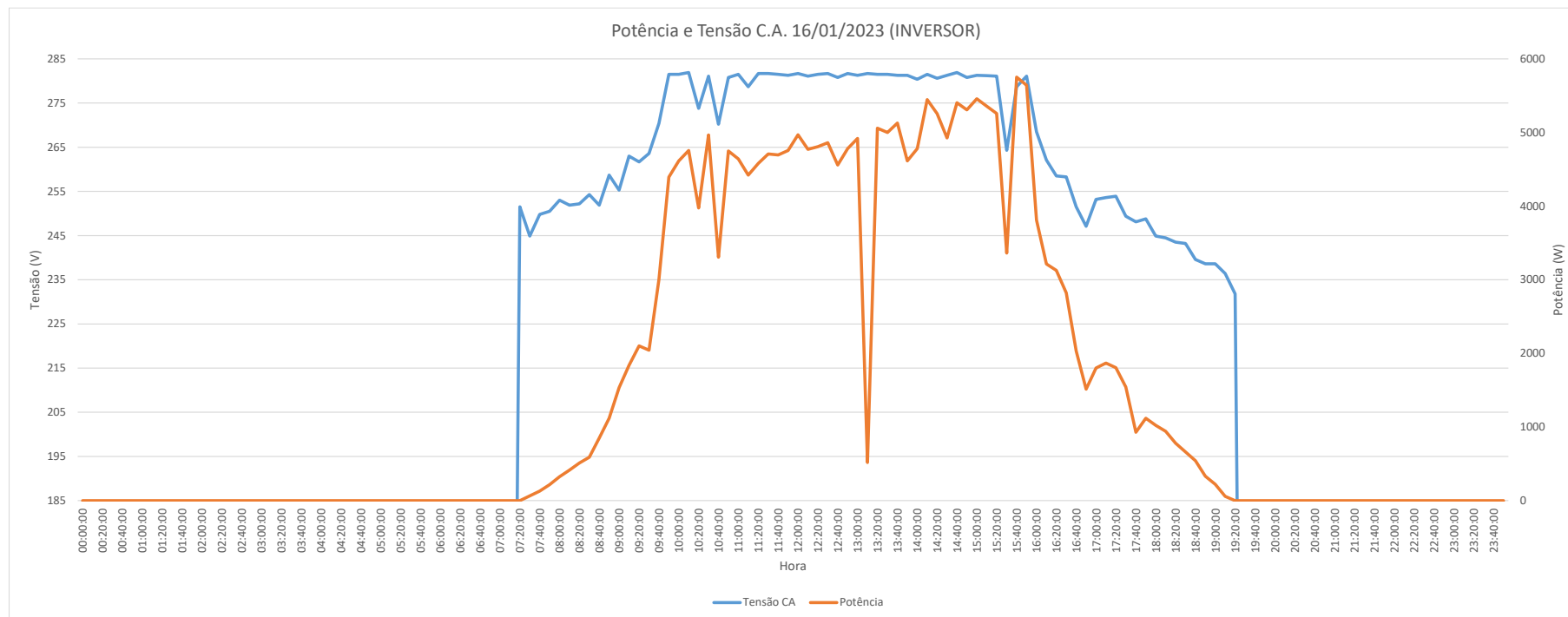
Por volta das 10h, à medida que o nível de irradiação solar aumenta, a tensão atinge 280V e a potência de saída passa a ser limitada. Essa situação persiste até as 16h, quando a incidência solar diminui e a curva de potência começa a cair gradativamente.

Gráfico 2 – Potência e tensão CA (Inversor)



Fonte: Autoria Própria.

Gráfico 3 – Potência e tensão CA do dia 16/01/2023 (Inversor)

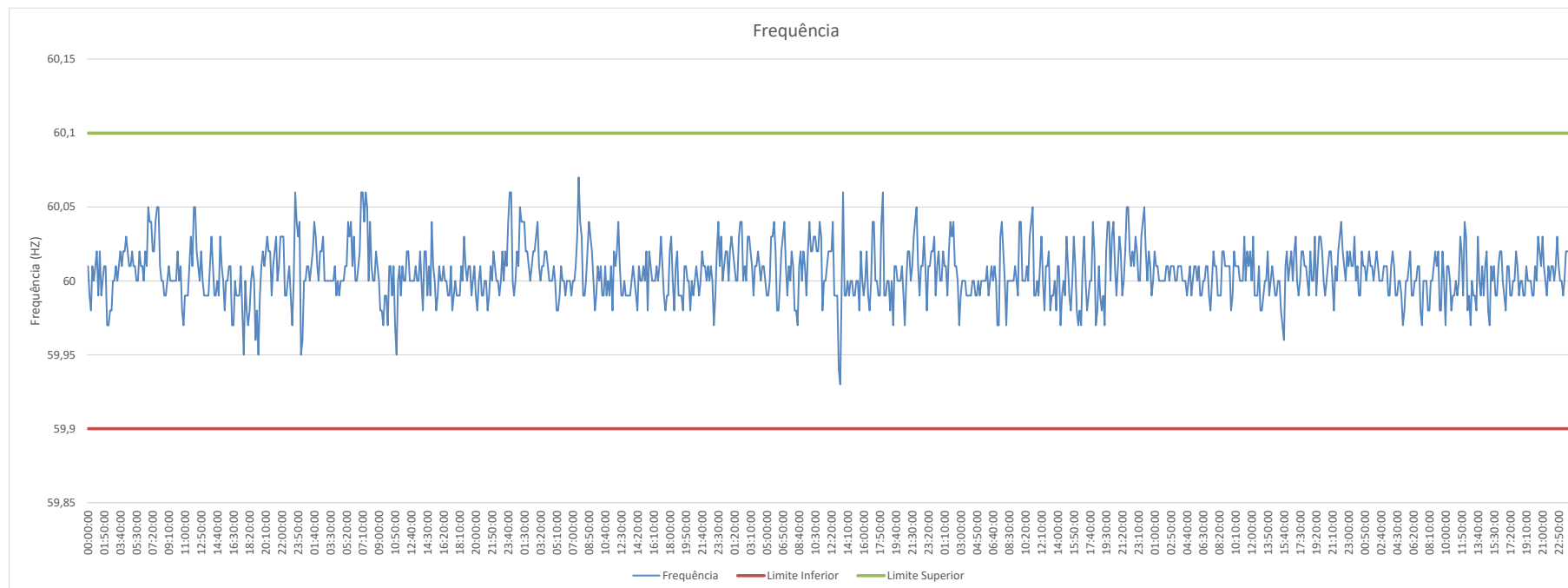


Fonte: Autoria Própria.

4.3. VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA

A variação de frequência é um parâmetro elétrico que também deve ser analisado. Segundo o Módulo 8 do PRODIST, os limites máximo e mínimo de frequência são 60,1 Hz e 59,9 Hz, respectivamente. Ao analisar o Gráfico 4, que ilustra a variação de frequência medida pelo analisador de energia, pode-se inferir que, em nenhuma das 1.008 amostras coletadas, houve ultrapassagem dos limites estabelecidos pela norma. Isso indica que, apesar das variações de tensão observadas, a frequência da rede permaneceu estável, sugerindo que seu funcionamento não foi comprometido pelo sistema fotovoltaico.

Gráfico 4 – Frequência (Analisador)



Fonte: Autoria Própria.

4.4. FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

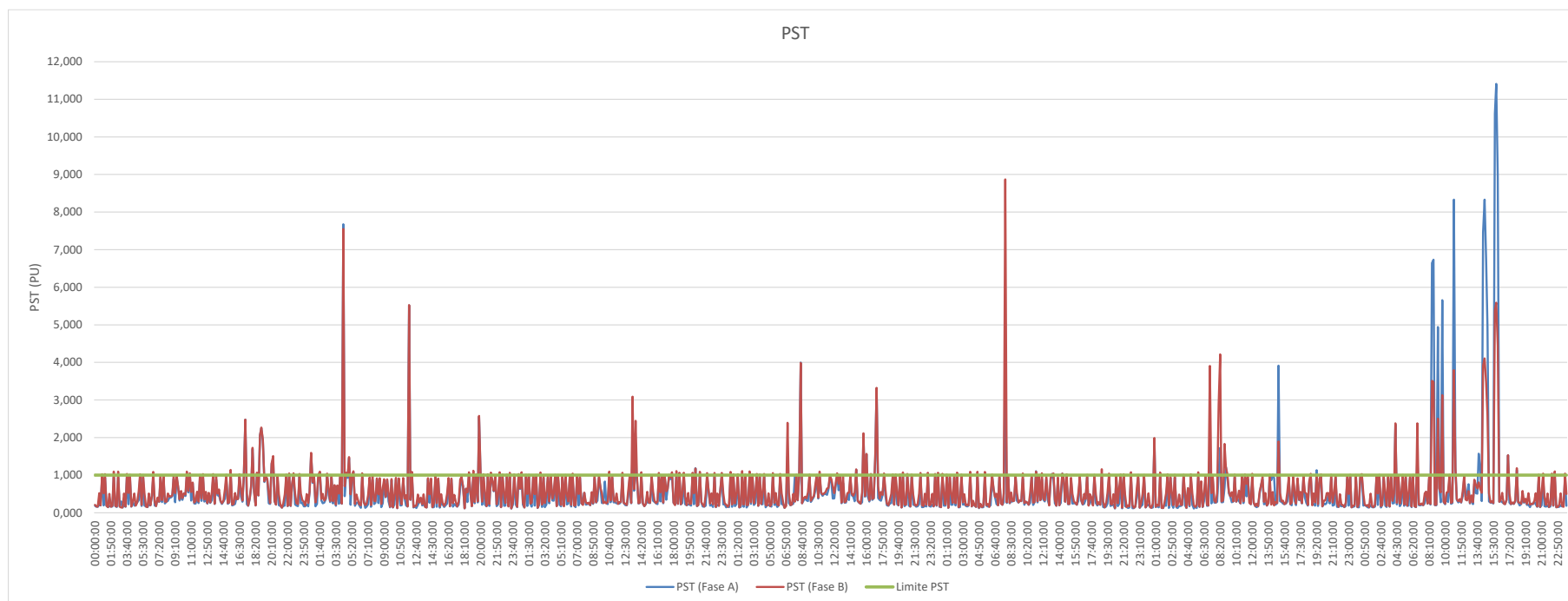
Os dados obtidos para a avaliação deste distúrbio foram coletados a partir do analisador de qualidade de energia elétrica utilizado no estudo, o qual já executa a medição dos indicadores Pst (Severidade de Flutuação de Tensão de Curta Duração) e Plt (Severidade de Flutuação de Tensão de Longa Duração). Ambos os indicadores são medidos em pu (por unidade) e são integralizados, respectivamente, a cada 10 minutos e a cada 2 horas.

O sistema em estudo possui tensão de linha nominal de 220 V. Nesse caso, o limite do indicador Pst95% (valor do indicador Pst superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas), segundo o Módulo 8 do PRODIST, é de 1 pu. O mesmo módulo menciona o indicador de severidade de flutuação de tensão de longa duração (Plt); no entanto, não especifica limites.

O Gráfico 5 apresenta os valores de Pst para as fases A e B, coletados pelo analisador de energia. Ao analisar o gráfico, verifica-se que algumas amostras ultrapassam o limite de 1 pu, sendo o último dia aquele que apresenta valores de maior magnitude. Os Gráficos 6 e 7 mostram, respectivamente, a distribuição normal e acumulada de Pst para as fases A e B. Para a fase A, 7,34% das amostras ultrapassaram o limite de 1 pu, enquanto para a fase B, esse valor foi de 19,2%. Portanto, as fases A e B estão fora do limite adequado de Pst estipulado pelo Módulo 8 do PRODIST, que permite um máximo de 5% das amostras válidas coletadas.

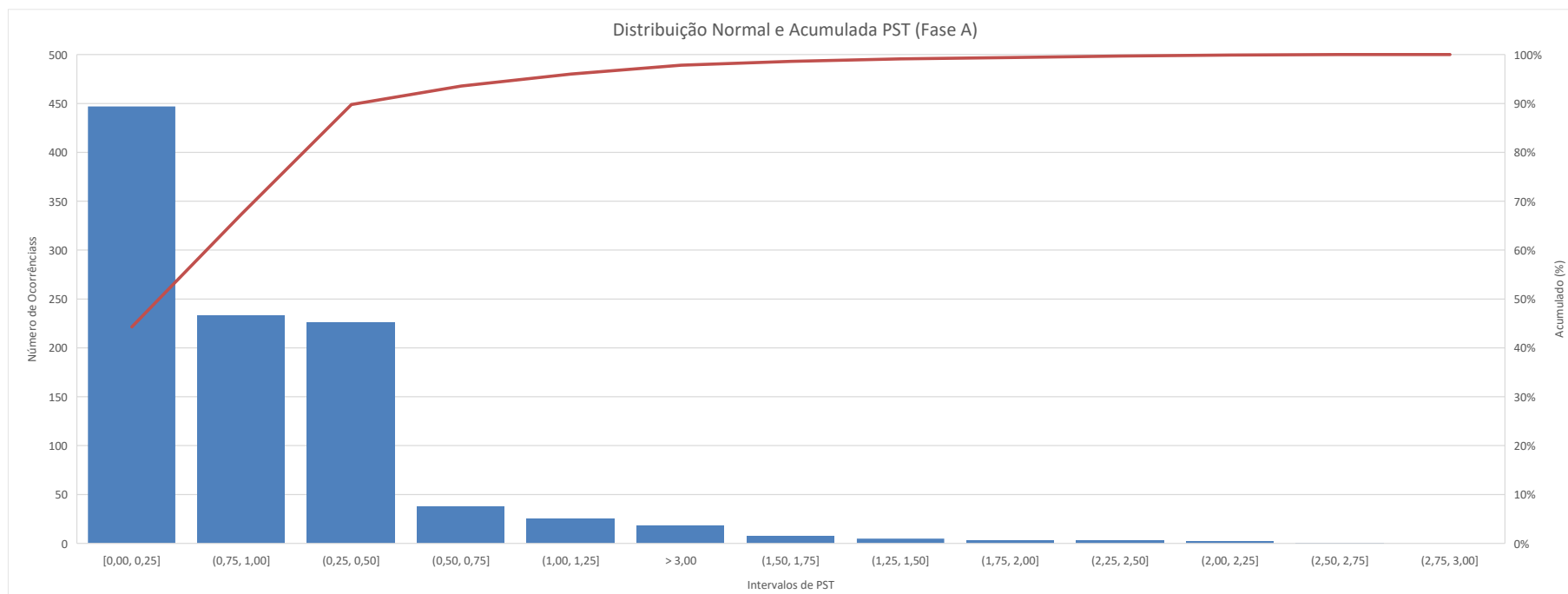
Os dados do indicador Plt para as fases A e B estão apresentados no Gráfico 8. Esses valores são proporcionais ao Pst; no entanto, não há um limite de referência definido na norma.

Gráfico 5 – Valores de Pst para as fases A e B



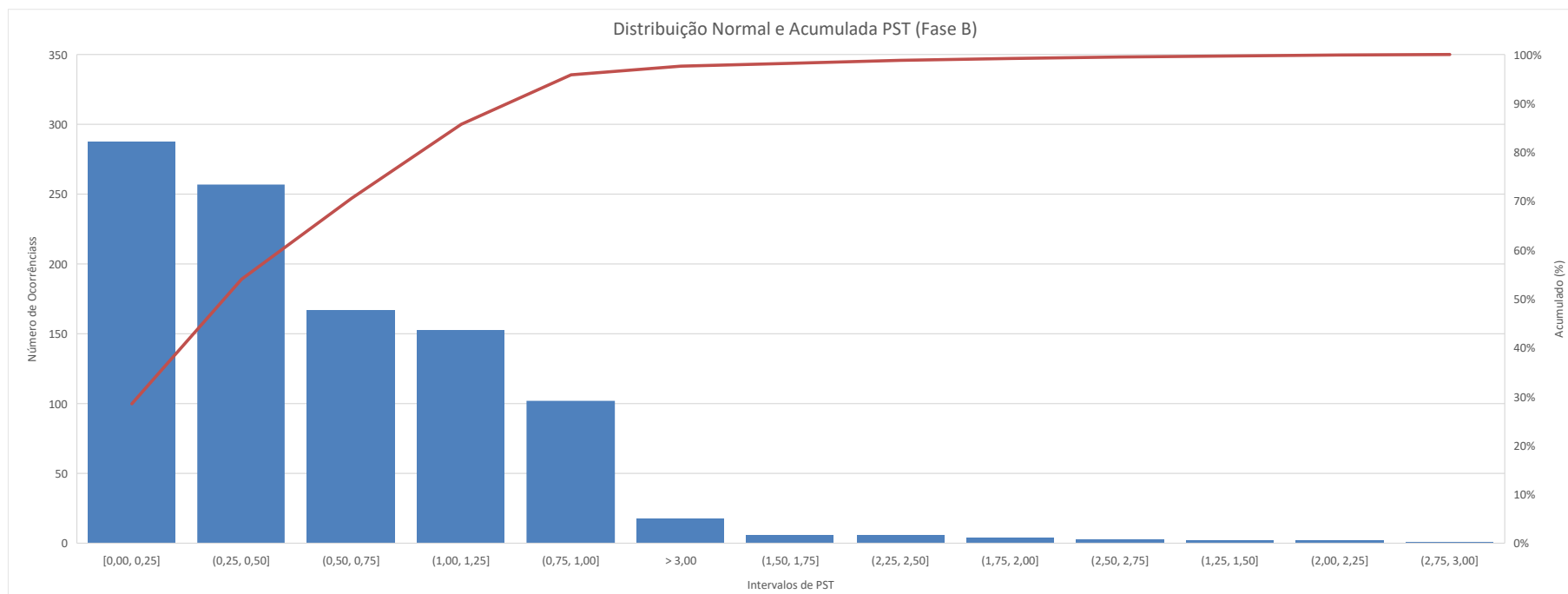
Fonte: Autoria Própria

Gráfico 6 – Distribuição normal e acumulada PST (fase A)



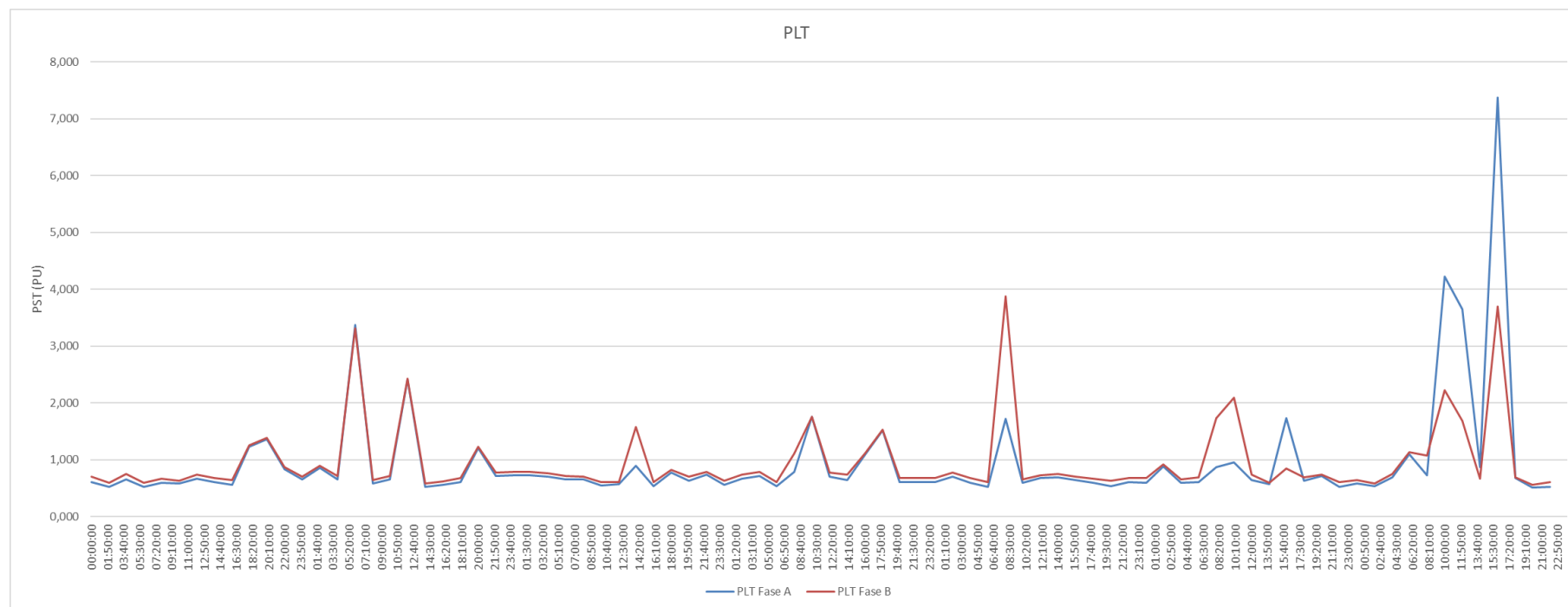
Fonte: Autoria Própria.

Gráfico 7 – Distribuição normal e acumulada PST (fase B)



Fonte: Autoria Própria.

Gráfico 8 – Plt para as fases A e B



Fonte: Autoria Própria.

4.5. ANÁLISE DOS DIAS 02 E 03 DE OUTUBRO DE 2023

Durante a análise dos dados e gráficos gerados na plataforma da eSolar, foi possível observar a influência dos níveis elevados de tensão na geração de energia do sistema em dias consecutivos. Os Gráficos 9 e 10 apresentam, respectivamente, a tensão e a potência geradas pelo inversor nos dias 02/10/2023 e 03/10/2023.

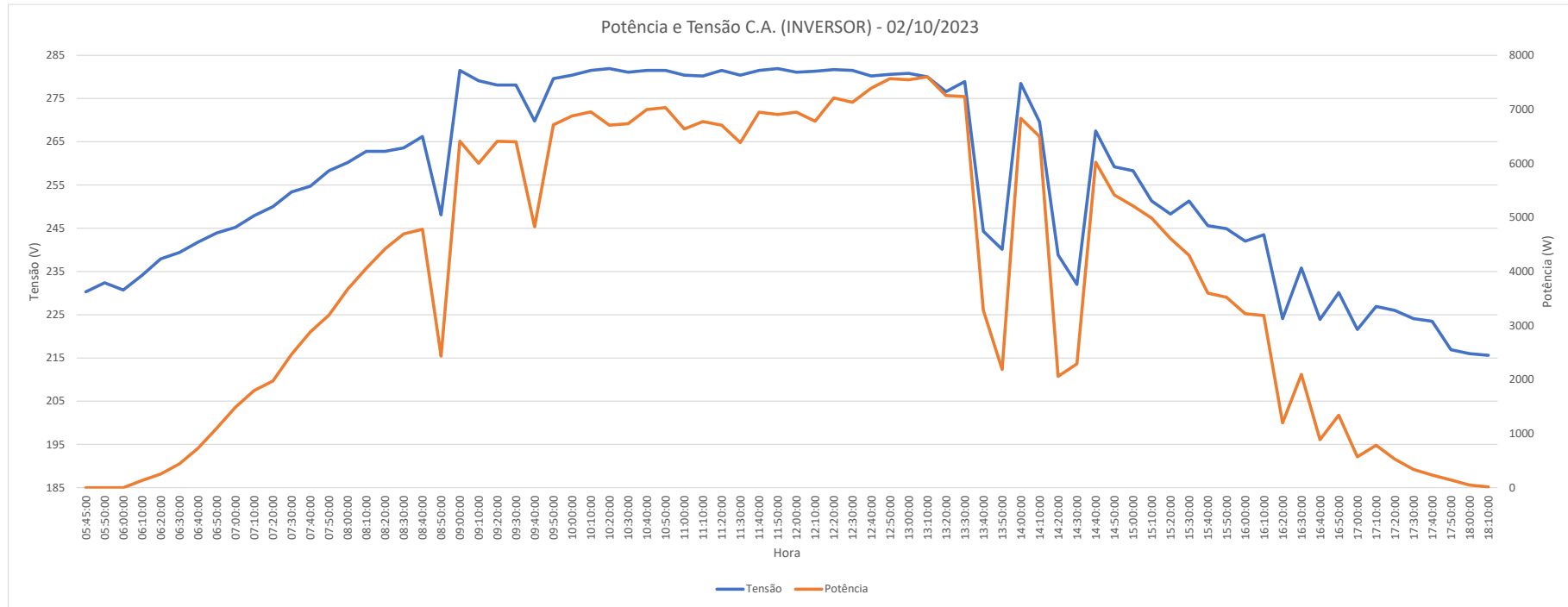
No Gráfico 9, observa-se que a primeira amostra de tensão, coletada às 5h45, registrou um valor de 230V, estando dentro do limite estabelecido, conforme citado no Capítulo 2. Esse cenário permitiu que o inversor alcançasse níveis mais elevados de potência injetada na rede antes de atingir o limite máximo de tensão suportado. Como consequência, a potência de saída máxima nesse dia foi de 7,6 kW, valor que corresponde a 95% da potência nominal do inversor (8 kW).

Já no Gráfico 10, a situação é bastante distinta. A primeira amostra de tensão, coletada às 5h45, apresentou um valor de 262V, significativamente superior ao registrado no dia anterior. Devido a esse nível elevado de tensão na rede, o inversor não conseguiu operar com mais de 50% da sua potência nominal ao longo do dia, pois, em grande parte do período, a tensão permaneceu próxima ao limite máximo suportado pelo equipamento.

Outro aspecto relevante é que o perfil da curva de geração no dia 02/10 é mais condizente com o esperado para um sistema fotovoltaico, com o pico de potência ocorrendo por volta das 12h. No entanto, no dia 03/10, essa tendência não se repetiu, e os valores mais elevados de potência foram registrados apenas por volta das 15h30.

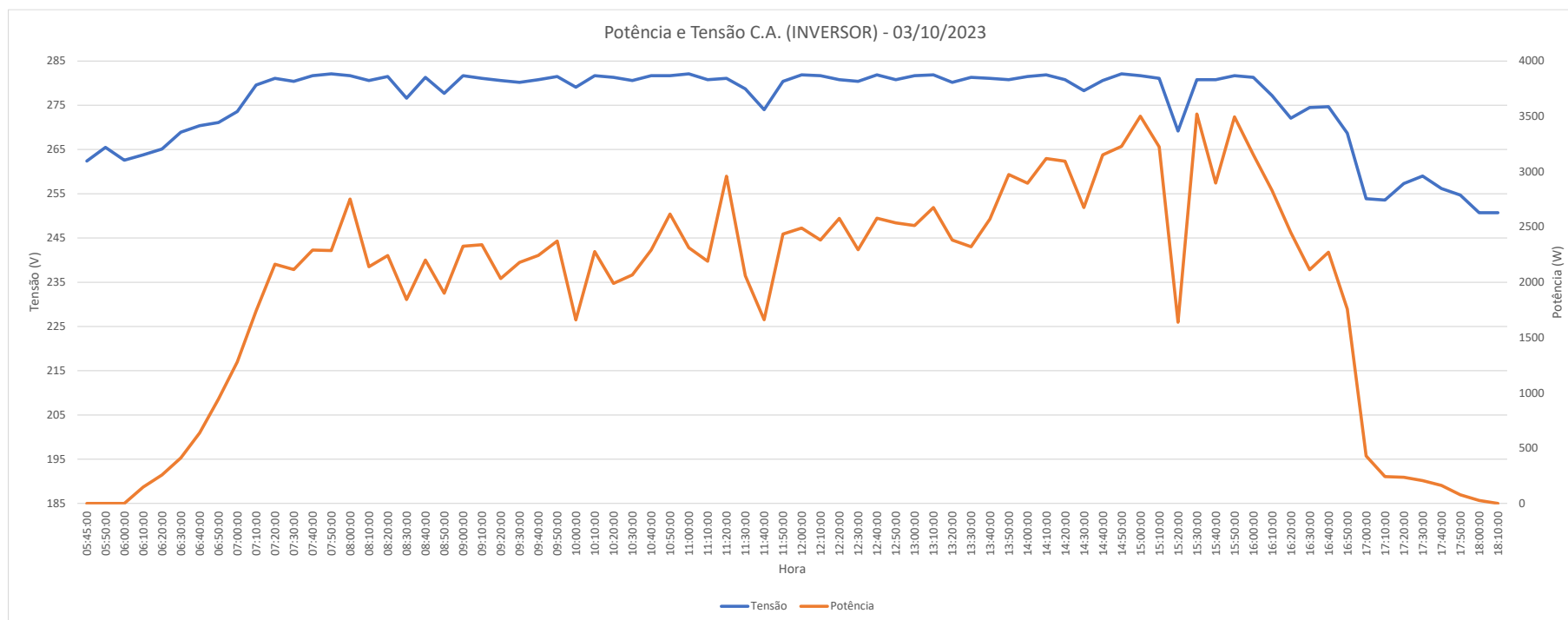
Esses dados evidenciam como a variação dos níveis de tensão pode impactar significativamente o desempenho do sistema fotovoltaico, influenciando tanto a capacidade de geração quanto o comportamento da curva de potência ao longo do dia. Prova disso é que a geração de energia no dia 02/10 foi de 51,91 kWh, enquanto no dia 03/10 foi de apenas 24,85 kWh.

Gráfico 9 – Potência e tensão CA (Inversor) dia 02/10/2023



Fonte: Autoria Própria.

Gráfico 10 – Potência e tensão CA (Inversor) dia 03/10/2023



Fonte: Autoria Própria.

4.6. ANÁLISE DOS MESES OUTUBRO DE 2023 E OUTUBRO DE 2024

O sistema fotovoltaico em estudo apresentou problemas de déficit de geração ao longo de todo o ano de 2023 e no início de 2024. No dia 1º de março de 2024, ocorreu um acidente na rede da concessionária de energia, deixando o sistema inoperante até o final do mês de maio. Após a realização de alguns reparos na rede, o sistema foi religado. Com o reinício da operação, observou-se uma melhora significativa na geração diária de energia em comparação ao período anterior ao incidente.

Para demonstrar a mudança na eficiência do sistema, foi escolhido o mês de outubro dos anos de 2023 e 2024, representando os períodos antes e depois das correções realizadas na rede da concessionária de energia. O mês de outubro foi selecionado por conter dados completos de geração diária ao longo do período.

A plataforma de monitoramento do inversor, eSolar, disponibiliza dados de geração diária, mensal e anual. Os Gráficos 11 e 12 apresentam os dados de geração diária do mês de outubro de 2023 e 2024, respectivamente. A geração mensal de outubro de 2023, representada no Gráfico 1, foi de 863,31 kWh, com uma média diária de 27,84 kWh. Nesse mês, apenas sete dias registraram uma geração superior a 30 kWh, sendo o dia 2 de outubro o de melhor rendimento. Esse desempenho pode ser atribuído ao nível de tensão mais baixo no início da operação do sistema, conforme demonstrado anteriormente.

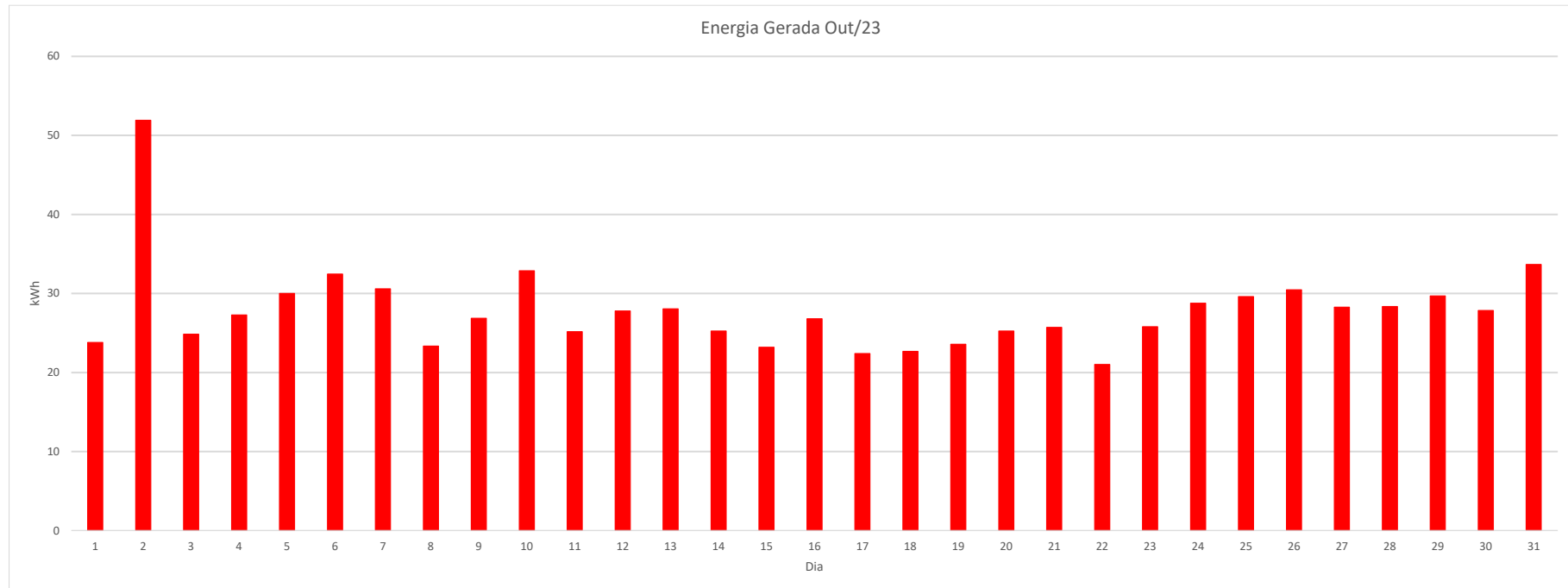
No mês de outubro de 2024, o cenário é significativamente diferente em comparação ao mesmo período do ano anterior. A geração total foi de 1.332,97 kWh, com uma média diária de 42,99 kWh, representando um aumento de 54,4%. Além disso, nesse mês, apenas seis dias registraram geração abaixo de 40 kWh.

O aumento na eficiência geral do sistema de um ano para o outro pode estar diretamente relacionado à melhoria nos níveis de tensão da rede. O Gráfico 13 apresenta a primeira amostra de tensão coletada pelo inversor ao longo do mês de outubro dos anos de 2023 e 2024.

Observa-se que, em outubro de 2023, os níveis de tensão estavam acima de 250V, com apenas dois dias registrando valores inferiores a esse limite. No entanto, em 2024, os dados de tensão coletados estão abaixo de 240V, com exceção de três dias em que o valor ultrapassou esse limite.

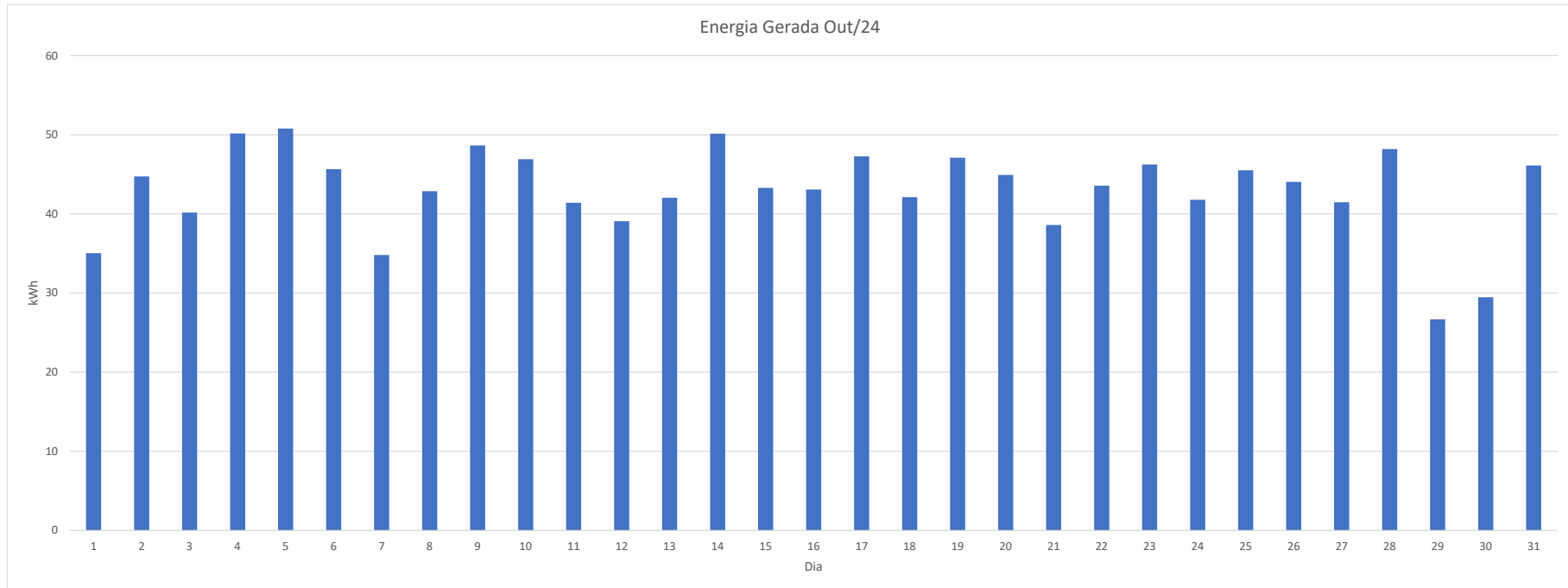
Portanto, como os níveis de tensão da rede no início do funcionamento do sistema fotovoltaico durante outubro de 2024 foram menores em comparação ao ano anterior, a geração de energia apresentou um desempenho significativamente melhor.

Gráfico 11 – Energia gerada no mês de outubro de 2023



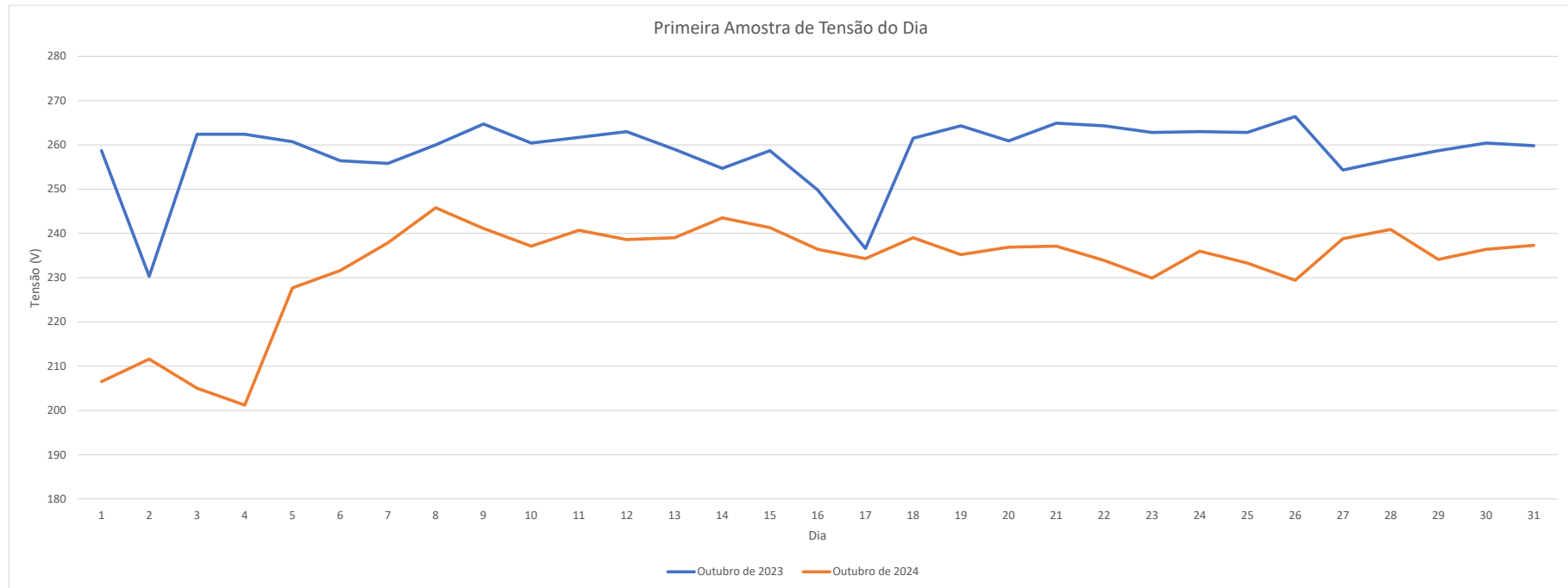
Fonte: Aatoria Própria.

Gráfico 12 – Energia gerada no mês de outubro de 2024



Fonte: Autoria Própria.

Gráfico 13 – Primeira amostra de tensão do dia



Fonte: Autoria Própria.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo analisar a o funcionamento de um sistema fotovoltaico, localizado no município de São Domingos do Capim, Pará. Para isso, buscou-se compreender e avaliar os parâmetros definidos no Módulo 8 do PRODIST, abordando conceitos como tensão em regime permanente, flutuação de tensão e frequência da rede.

Entre os objetivos específicos propostos inicialmente estavam a realização de medições práticas no local utilizando um analisador de qualidade de energia, a descrição dos principais distúrbios relacionados à qualidade da energia, o aprofundamento teórico sobre as diretrizes do Módulo 8 do PRODIST e a análise detalhada dos resultados obtidos durante as medições.

Com base nos resultados apresentados, conclui-se que a instalação do sistema fotovoltaico na residência estudada enfrenta desafios relacionados principalmente ao fornecimento inadequado dos níveis de tensão pela concessionária local. Observou-se claramente, através das medições realizadas com o analisador de energia e dos dados fornecidos pelo inversor fotovoltaico, que a tensão frequentemente ultrapassou os limites críticos estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST, chegando a valores próximos ao limite máximo suportado pelo inversor (280V). Este fato comprometeu significativamente o desempenho do sistema, levando o equipamento a operar em modo de segurança e, conseqüentemente, limitando a potência de geração.

Destaca-se ainda que a frequência da rede permaneceu estável durante o período analisado, indicando que o principal fator limitante para o desempenho do sistema fotovoltaico está relacionado exclusivamente às condições de tensão. A avaliação dos dados comparativos dos anos de 2023 e 2024 evidenciou que, após ajustes realizados na rede elétrica, houve uma significativa melhoria na geração de energia, reforçando a importância de adequar o fornecimento às normas estabelecidas pelo Módulo 8 do PRODIST.

Portanto, conclui-se que medidas técnicas, como ajustes e melhorias na infraestrutura elétrica fornecida pela concessionária, são essenciais para garantir não apenas a eficiência operacional do sistema fotovoltaico, mas também para promover uma maior expansão e confiabilidade da micro e minigeração distribuída na região estudada. Este trabalho reforça a relevância da aplicação das normas regulamentadoras na qualidade da energia para assegurar o pleno funcionamento e aproveitamento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica nacional.

6. TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que os desafios enfrentados pelo sistema analisado demandam pesquisas adicionais para otimizar o desempenho e mitigar os impactos negativos identificados.

Propõe-se, portanto, a realização de estudos futuros focados em:

- Fazer um estudo utilizando um autotransformador na saída do inversor para reduzir o nível de tensão e verificar se a capacidade de geração é melhorada.
- Fazer uma análise de todos os tópicos abordados no módulo 8 do PRODIST.
- Fazer o estudo com outros inversores e analisar o comportamento da geração.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Micro e minigeração distribuída de energia elétrica cresceu 8,84 GW em 2024**. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2025/micro-e-minigeracao-distribuida-de-energia-eletrica-cresceu-8-84-gw-em-2024>. Acesso em: 8 fev. 2025.

ALMEIDA et al. **Energia Solar Fotovoltaica: Revisão Bibliográfica**. Engenharias On-line, v. 1, n. 2, p. 21-33, 2015.

ANICETO, D. M. **Importância da Correção do Fator de Potência nas Instalações Elétricas Industriais**. In: Revista On-line IPOG - Especialize. Julho de 2016.

BAGGINI, A. **Handbook of Power Quality**. Wiley, 2008, 645 pages.

BRASIL. ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. 2021.

CHAUDHARY et al. **Voltage Regulation Mitigation Techniques In Distribution System With High Pv Penetration: A Review**. Setembro, 2017.

COTRIM, Ademaro A. M. B. **Instalações Elétricas**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2008.

CREDER, Hélio. **Instalações Elétricas**. 15. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

DA SILVA, Heitor Marques Francelino; ARAÚJO, Francisco José Costa. **Energia solar fotovoltaica no Brasil: uma revisão bibliográfica**. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, v. 8, n. 3, p. 859-869, 2022.

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. **Electrical Power Systems Quality**. Second Edition. McGraw-Hill, 2003, 528 pages.

FRANCO, Arthur P. **Sistemas Fotovoltaicos: Contextualização E Perspectivas Para Sua Massificação No Brasil**. Universidade Federal de Lavras. Lavras, Minas Gerais. 2015.

GOSBELL, V.; PERERA, S.; SMITH, V. **Voltage Unbalance**. Technical Note 06, Integral, Energy Power Quality Centre, University of Wollongong, School of Electrical, Computer & Telecommunications Engineering, 2002.

JUNIOR, J. D. S. L.; PEREIRA, John Icaro Matos; DE LIMA LIRA, Ricardo. **Sistema individual de Energia Elétrica com fonte intermitente fotovoltaico off grid implantada em uma habitação ribeirinha no Município de Manacapuru-AM**. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 12, p. 118458-118475, 2021.

KERN, Fernanda Gonzaga. **Análise da Qualidade de Energia Elétrica Utilizando Transformada Wavelet**. 2008. 106 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2008.

LOPEZ, R. A. **Qualidade Na Energia Elétrica. Efeitos dos Distúrbios, Diagnósticos e Soluções**. Artliber, 2013, 528 pages.

MACHADO, Carolina T.; MIRANDA, Fabio S. **Energia Solar Fotovoltaica: uma breve revisão**. Revista virtual de química, v. 7, n. 1, p. 126-143, 2015.

MARTINHO, Edson. **Distúrbios da Energia Elétrica**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2012.

MONTEIRO, F. P. **Estimação Do Impacto De Múltiplas Cargas Não-Lineares Na Distorção Harmônica De Tensão Na Rede Elétrica De Distribuição Utilizando Medições De Corrente True Rms**. 2019. Tese de Doutorado – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, 2019.

MUNDINS, C. W. **Análise Da Qualidade De Energia Elétrica Em Estabelecimento Assistencial De Saúde**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Elétrica) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2020.

PASSEY, Robert et al. **The potential impacts of grid-connected distributed generation and how to address them: a review of technical and non-technical factors**. Energy Policy, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 39, n. 10, p. 6280-6290, out. 2011.

PAULILO, G. **Conceitos gerais sobre qualidade da energia**. Revista O Setor elétrico, Edição 84, 2013.

REZENDE, Paulo Henrique Oliveira; SAMESIMA, Milton Itsuo. **Efeitos do Desequilíbrio de tensões de suprimento nos motores de indução**. 2009. 30 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

VEDAM, R. S.; SARMA, M. S. **Power Quality, VAR Compensation in Power Systems**. First Edition. CRC Press, 2008, 304 pages.