

Análise de aspectos em qualidade de energia em uma instalação para laboratórios de engenharias com geração fotovoltaica: um estudo qualitativo do ponto de vista do Módulo 8 - PRODIST

Augusto Morais Brito ^[1], Victor de Paula Brandão Aguiar ^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA; augusto.brito@alunos.ufersa.edu.br

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA; victor@ufersa.edu.br

Resumo: A crescente adoção de sistemas fotovoltaicos em instituições públicas de ensino traz desafios relacionados à qualidade da energia elétrica fornecida, consumida e gerada. Neste contexto, este estudo analisa os aspectos de qualidade de energia em um bloco de laboratórios de engenharia adaptado com uma geração fotovoltaica de 14 kWp e dois inversores ABB PV1-10.0-TL-OUTD, baseado nos critérios do Módulo 8 da PRODIST. A metodologia consistiu em medições contínuas, durante sete dias, utilizando um analisador de energia ET-5061C, avaliando distorções harmônicas, desequilíbrio de fase, variações de frequência e variações de tensão de curta duração (VTCD). Os resultados indicaram que a geração fotovoltaica não comprometeu a qualidade da energia durante sua geração. No entanto, identificou-se um elevado desequilíbrio de fase (69%) e recorrentes eventos de VTCD, principalmente devido ao uso de máquinas de solda e torno mecânico em um mesmo circuito, impactando a estabilidade elétrica do laboratório. Conclui-se que a redistribuição das cargas e ajustes na infraestrutura elétrica são necessários para mitigar os impactos observados e garantir conformidade com os padrões regulatórios. O estudo reforça a importância do monitoramento contínuo da qualidade da energia para assegurar a segurança e disponibilidade de energia em instalações acadêmicas com elevada demanda de energia.

Palavras-chave: qualidade de energia; distorções harmônicas; variações de tensão; geração fotovoltaica; Módulo 8 PRODIST.

Abstract: The increasing adoption of photovoltaic systems in public educational institutions presents challenges related to the quality of the supplied, consumed, and generated electrical energy. In this context, this study analyzes energy quality aspects in an engineering laboratory block adapted with a 14 kWp photovoltaic system and two ABB PV1-10.0-TL-OUTD inverters, based on the criteria of Module 8 of PRODIST. The methodology consisted of continuous measurements over seven days using an ET-5061C power analyzer, evaluating harmonic distortions, phase imbalance, frequency variations, and short-duration voltage variations (VTCD). The results indicated that photovoltaic generation did not compromise energy quality during its operation. However, a high phase imbalance (69%) and recurring VTCD events were identified, mainly due to the simultaneous use of welding machines and a mechanical lathe in the same circuit, impacting the laboratory's electrical stability. It is concluded that load redistribution and adjustments to the electrical infrastructure are necessary to mitigate the observed impacts and ensure compliance with regulatory standards. This study reinforces the importance of continuous monitoring of energy quality to ensure the safety and availability of energy in academic facilities with high energy demand.

Key-words: power quality; harmonic distortions; voltage variations; photovoltaic generation; Module 8 PRODIST.

1. INTRODUÇÃO

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), com o objetivo de promover o uso eficiente de energia elétrica em todos os setores da economia, criou o Programa de Eficiência Energética (PEE) através da Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000. De acordo com esta lei, concessionárias e permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica são obrigadas a aplicar anualmente um montante de sua receita líquida em pesquisa e desenvolvimento do setor elétrico. Assim, busca-se maximizar os benefícios públicos da energia economizada e da demanda evitada, promovendo a transformação do mercado de eficiência energética, estimulando o desenvolvimento de novas tecnologias e a criação de hábitos e práticas racionais de uso da energia elétrica [1].

O incentivo crescente de instituições públicas na aquisição de sistemas fotovoltaicos de geração vem surgindo como uma solução para questões econômicas e climáticas, bem como maximizar os benefícios públicos da eficiência energética. As instituições públicas de ensino superior brasileiras foram incentivadas a

implantar sistemas fotovoltaicos por meio do Projeto Prioritário de Energia e Pesquisa e Desenvolvimento Estratégico nº 001/2016 - PPEPDE nº001/2016 [2]. Paralelamente, com o mesmo objetivo da sustentabilidade o desenvolvimento estrutural e progresso de laboratórios em universidades também estão associados a estratégias de redução de custos, como, por exemplo, o aproveitamento de infraestruturas já existentes e que são adaptadas para a instalação de equipamentos e salas de pesquisa.

Com o objetivo de reduzir seus custos operacionais, essas instituições acabam enfrentando questões cruciais relacionadas à qualidade da energia elétrica gerada, distribuída e consumida. Isso ocorre à medida que seus espaços, como laboratórios, blocos administrativos e salas de aula, passam a ser equipados com sistemas fotovoltaicos e cargas de diversas naturezas, muitas vezes implantados com pouco ou nenhum planejamento de engenharia.

Os efeitos da distorção harmônica e demais grandezas elétricas de interesse no fornecimento de energia são vários, como sobreaquecimento que pode levar à redução de vida útil, o aumento de perdas elétricas da instalação com efeito sobre a fatura de energia, entre outros diversos pontos associados à qualidade de energia [3].

Em particular, para este estudo, trata-se de uma instalação adaptada para laboratórios de engenharia elétrica e mecânica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – *Campus* Mossoró, que exigem disponibilidade nos padrões da confiabilidade de fornecimento, demanda de energia e segurança em suas etapas de utilização, necessitando de uma avaliação detalhada para garantir que a integração de fontes renováveis não comprometa a estabilidade e eficiência de uma instalação elétrica.

Tendo em vista as motivações e contexto acima, este estudo visa analisar os aspectos de qualidade de energia em uma instalação adaptada para um laboratório de engenharia com geração fotovoltaica de 14kWp de potência instalada, oferecendo uma visão qualitativa fundamentada nas diretrizes do Módulo 8 da PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) que estabelece critérios e parâmetros para garantir a qualidade da energia elétrica e seu fornecimento [4].

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Qualidade de Energia Elétrica

A discussão sobre a qualidade da energia elétrica pode, em um primeiro momento, estar focada nas questões de continuidade do serviço. Todavia, a Qualidade de energia elétrica (QEE) é a condição do sinal elétrico de tensão e corrente que permite que, equipamentos, processos, instalações e sistemas elétricos operem de forma satisfatória, sem prejuízo de desempenho e de vida útil [3].

No Brasil, a Resolução Normativa ANEEL nº 956/2021 estabelece os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST [4]. Entrando em vigor em 1º de janeiro de 2022 revogando as resoluções anteriores sobre o tema. Esta resolução abrange os pontos e as metodologias para avaliar qualitativamente o que é uma energia de boa qualidade.

Define-se bem o problema de qualidade de energia como sendo “Qualquer problema de energia manifestado na tensão, corrente ou nas variações de frequência que resulte em falha ou má operação de equipamentos” [8].

2.2. Distorções Harmônicas

As distorções harmônicas são variações na forma de onda da tensão e da corrente elétrica causadas pela presença de componentes de alta frequência, geradas principalmente por cargas não lineares [4]. Dentre os indicadores de distorções harmônicas tratados neste trabalho:

Distorção Harmônica Total de Tensão:

$$DTT_h \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}}{V_1} \times 100 [\%] \quad (1)$$

Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3:

$$DTT_p \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hp} V_h^2}}{V_1} \times 100 [\%] \quad (2)$$

Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3:

$$DTT_i \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{hi} V_h^2}}{V_1} \times 100 [\%] \quad (3)$$

Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3:

$$DTT_3 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h3} V_h^2}}{V_1} \times 100 [\%] \quad (4)$$

Onde:

- h - número inteiro representando a ordem da harmônica;
- V_h - valor *rms* da componente de tensão harmônica de ordem h ;
- V_1 - valor *rms* da componente de tensão fundamental;
- h_p - número par inteiro não múltiplo de 3 representando a ordem da harmônica;
- h_i - número ímpar não múltiplo de 3 representando a ordem da harmônica;
- h_3 - número inteiro múltiplo de 3 representando a ordem da harmônica.

Os harmônicos são capazes de quantificar as distorções nas formas de onda de tensões e correntes elétricas, caracterizadas por sinais senoidais com frequências múltiplas e inteiras da frequência fundamental e sua presença pode ser feita através do tratamento individual ou total das mesmas [3].

Para avaliar qualitativamente os resultados dos cálculos das distorções harmônicas para sistemas com tensão nominal inferior à 2,3kV, utiliza-se de referência a Tabela 1:

TABELA 1. Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental). Adaptado de [4].

<i>Indicador</i>	<i>Tensão Nominal (Vn)</i>
	Vn < 2,3kV
<i>DTT_{h%}</i>	10,0%
<i>DTT_{p%}</i>	2,5%
<i>DTT_{i%}</i>	7,5%
<i>DTT_{3%}</i>	6,5%

2.3. Variação de Frequência

A frequência da rede elétrica deve ser mantida dentro de limites estreitos para garantir a estabilidade do sistema elétrico. Variações de frequência podem ocorrer devido a desequilíbrios entre geração e consumo de energia, impactando o desempenho de motores elétricos, geradores e outros dispositivos sensíveis.

O sistema de distribuição e as instalações de geração a ele conectadas devem operar, em condições normais e em regime permanente, dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz, onde em caso de distúrbios no sistema de distribuição, as instalações de geração devem garantir que a frequência retorne à faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz no intervalo de 30 segundos após a transgressão, permitindo assim a recuperação do equilíbrio carga-geração [4].

Manter a frequência elétrica da tensão senoidal de fornecimento é fundamental para garantir a operação confiável de máquinas rotativas, bem como a estabilidade do sistema elétrico entre fonte e carga, estabilidade na iluminação e componentes eletrônicos, bem como outra diversidade de aplicações e situações que dependem diretamente dessa característica elétrica da tensão de fornecimento.

2.4. Desequilíbrio de Fase

O desequilíbrio em um sistema elétrico é o fenômeno em que as três fases apresentam diferentes valores dos módulos das tensões ou defasagem angular entre fases diferentes de 120° elétricos [5]. A expressão para o cálculo do desequilíbrio de tensão é mostrada na equação 5:

$$FD_{\%} = \frac{V_-}{V_+} \times 100[\%] \quad (5)$$

Onde:

- $FD_{\%}$ - fator de desequilíbrio;
- V_- - tensão eficaz de sequência negativa;
- V_+ - tensão eficaz de sequência positiva.

Opcionalmente, pode se utilizar as expressões 6 e 7 para cálculo do fator de desequilíbrio:

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

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (7)$$

Em que V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} são tensões eficazes de linha. Para avaliar qualitativamente os resultados deste cálculo, utiliza-se de apoio a Tabela 2:

TABELA 2. Limites para o indicador de desequilíbrio de tensão [4].

Indicador	Tensão Nominal (Vn)	
	$V_n < 2,3\text{kV}$	$2,3\text{kV} \leq V_n \leq 230\text{kV}$
$FD_{95\%}$	3,0%	2,0%

Os limites correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição.

2.5. Variações de tensão de curta duração – VTCD

Variações de tensão de curta duração – VTCD são desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a 3 minutos [4]. Estas oscilações são classificadas conforme a Tabela 3:

TABELA 3. Classificação das variações de tensão de curta duração - VTCD [4].

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

As equações para o cálculo dos indicadores associados com as variações de tensão de curta duração – VTCD, são descritas nas equações 8, 9 e 10:

$$V_e = \frac{V_{res}}{V_{ref}} \quad (8)$$

Onde:

- V_e – amplitude do evento de VTCD [%];
- V_{res} – tensão residual do evento de VTCD;
- V_{ref} – tensão de referência.

$$\Delta t_e = t_f - t_i \quad (9)$$

Onde:

- Δt_e – duração do evento de VTCD [ms];
- t_f – tempo final do evento de VTCD;
- t_i – tempo inicial do evento de VTCD.

$$f_e = n \quad (10)$$

Onde:

- f_e – frequência de ocorrência de eventos de VTCD;
- n – número de ocorrências de eventos de VTCD.

Os indicadores mencionados, em conjunto com a Tabela 3, são ferramentas essenciais para classificar e avaliar os eventos de Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) ao longo de um intervalo de observação do fornecimento de energia elétrica. Essas variações, caracterizadas por afundamentos, elevações ou interrupções de tensão, impactam diretamente a qualidade do serviço prestado. A categorização desses eventos, conforme estabelecido no Módulo 8 do PRODIST, permite não apenas a análise do desempenho do sistema elétrico, mas também a identificação de possíveis pontos de vulnerabilidade que podem comprometer a disponibilidade do fornecimento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A análise da qualidade de energia elétrica na instalação adaptada para o laboratório de engenharias com geração fotovoltaica foi conduzida com base nos critérios estabelecidos pelo Módulo 8 da PRODIST. O bloco de laboratórios tem uma carga instalada aproximada de 52,7 kVA e está conectado à rede de distribuição própria da unidade consumidora. A instalação é atendida por um transformador de 13.800/380-220V e 75kVA de potência nominal.

O sistema fotovoltaico que equipa o laboratório possui 42 módulos fotovoltaicos do fabricante Canadian Solar, modelo CS6U325P, 325 Wp, totalizando uma potência instalada de 14 kWp. Para a conversão da corrente contínua para alternada são utilizados dois inversores de 10 kW de potência cada que tem suas informações descritas referente a parte de corrente alternada estão presentes na Tabela 4.

TABELA 4. Especificações Inversor ABB PV1-10.0-TL-OUTD. Autoria Própria

Inversor ABB PV1-10.0-TL-OUTD

<i>Potência Nominal de Saída AC</i>	<i>10kW</i>
<i>Potência Aparente Máx. de Saída</i>	<i>11,5kVA</i>
<i>Corrente Máxima de Saída</i>	<i>16,6A</i>
<i>Tensão Nominal de Saída</i>	<i>320-480V</i>
<i>Frequência Nominal</i>	<i>50Hz/60Hz</i>
<i>Distorção Harmônica Total</i>	<i><2%</i>
<i>Fator de Potência</i>	<i>>0,995 P/ 10kW</i>

Os indicadores de qualidade foram avaliados por meio de medições realizadas com o analisador de energia ET 5061C, sendo os dados subseqüente tratados e analisados no *software* TopView.

O procedimento experimental foi estruturado em etapas, conforme descrito a seguir:

- Instrumentação: O analisador de energia ET-5061C foi instalado nos pontos críticos da instalação elétrica (Quadro de Distribuição Geral de Baixa Tensão – QGBT), com medições realizadas de forma contínua durante um período de sete dias, capturando eventos de variações de tensão de curta duração (VTCD), distorções harmônicas, variações de frequência e desequilíbrio de tensão.



FIGURA 1. Analisador de Energia ET-5061C. Fonte: Adaptado de [6]

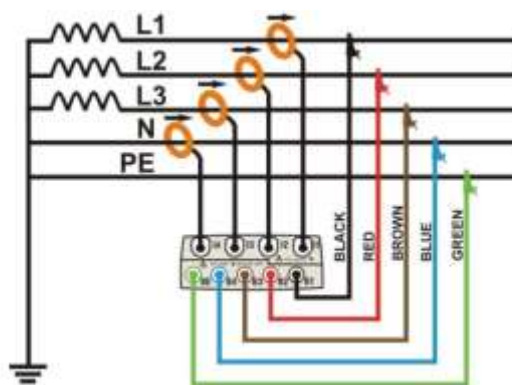
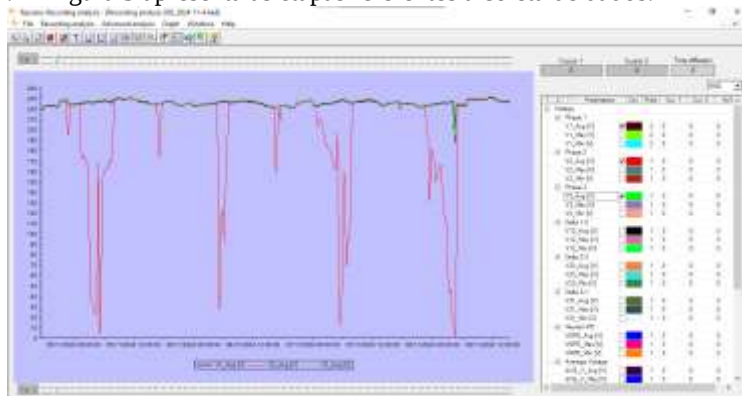


FIGURA 2. Conexão do analisador ET-5061C em sistemas trifásicos 4 fios. Fonte: Adaptado de [6]

- Coleta de Dados: Os registros foram extraídos em um intervalo amostral de cinco dias, abrangendo o funcionamento do laboratório com as atividades acadêmicas. Os dados foram importados para o *software* TopView, que possibilitou a organização e o tratamento dos dados de acordo com os limites e padrões estabelecidos pela ANEEL. A Figura 3 apresenta as etapas referentes a coleta de dados:



(a)



(b)

FIGURA 3. (a) Instalação do analisador de energia ET 5061C sobre o QGBT do bloco de engenharias; (b) Interface inicial do *software* TopView. Fonte: (Autoria Própria).

- **Análise e Classificação:** Os dados coletados foram analisados com base nas equações e tabelas descritas no Módulo 8 e também apresentadas e referências neste artigo na seção dois, permitindo a classificação dos eventos de VTCD, distorções harmônicas, variações de frequência e desequilíbrio de tensão, verificando o atendimento às condições de qualidade exigidas. Foram calculados os indicadores de distorções harmônicas ($DTT\%$, $DITp\%$, $DITi\%$, $DIT3\%$), bem como a frequência de ocorrência de eventos e a duração de cada variação de tensão.
- **Correlação com a Geração Fotovoltaica:** Com o intuito de compreender a influência da geração distribuída na qualidade de energia, correlacionaram-se os horários de maior irradiação solar com a ocorrência de eventos de VTCD e alterações nos níveis de distorção harmônica.

Essa abordagem possibilitou uma avaliação abrangente e fundamentada da qualidade de energia na instalação, proporcionando subsídios para a proposição de melhorias e ajustes que garantam o pleno atendimento aos padrões regulatórios.

4. RESULTADOS

4.1. Distorções Harmônicas

Os resultados obtidos a partir da análise das distorções harmônicas, calculadas com base no equacionamento apresentado no tópico 2.2, indicam que a maioria dos parâmetros avaliados se mantiveram dentro dos limites estabelecidos pela Tabela 1. No entanto, conforme demonstrado na Tabela 5, a distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3 $DTT_p\%$ ultrapassou os valores máximos permitidos para sistemas elétricos com tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV. Esse resultado evidencia a necessidade de um estudo mais aprofundado sobre a origem e os impactos dessas harmônicas, visto que sua presença pode comprometer a qualidade da energia elétrica fornecida ao sistema.

TABELA 5. Distorções harmônicas calculadas. Autoria Própria

	Distorções Harmônicas (%)		
	Fase R	Fase S	Fase T
$DTT_h\%$	4,56	1,27	1,19
$DTT_p\%$	4,29	0,03	0,02
$DTT_i\%$	1,31	1,26	1,18
$DTT_3\%$	0,84	0,13	0,14

As harmônicas pares não múltiplas de 3 geralmente têm origem em cargas não lineares assimétricas, falhas em equipamentos e dispositivos de comutação descontínua, como retificadores monofásicos e conversores eletrônicos [7,8]. Sua presença indica distorções assimétricas na forma de onda, podendo comprometer a qualidade da energia elétrica. Vale destacar, que durante a avaliação das amostras, as componentes harmônicas apresentadas no horário de geração do sistema não foram significativas.

4.2. Variação de Frequência

Conforme apresentado na Figura 4, as medições indicaram que não ocorreram variações de frequência fora dos limites estabelecidos pela norma PRODIST, que define a faixa aceitável entre 59,5 Hz e 60,5 Hz. Esse resultado evidencia que o sistema em análise mantém sua estabilidade dentro dos padrões exigidos, garantindo o funcionamento adequado dos equipamentos conectados.

A estabilidade da frequência é essencial para assegurar a operação confiável de máquinas rotativas, inversores e demais dispositivos elétricos que dependem de uma frequência constante para seu desempenho ideal. Dessa forma, a ausência de variações expressivas sugere que o sistema está operando de maneira satisfatória em termos de controle de frequência, sem impactos negativos sobre a qualidade da energia fornecida.

Entretanto, é importante considerar que, em cenários de aumento da carga instalada ou inserção de novas fontes de geração distribuída, o monitoramento contínuo da frequência se torna imprescindível. Isso garantirá que eventuais perturbações sejam detectadas e corrigidas antes que possam comprometer a estabilidade do sistema.

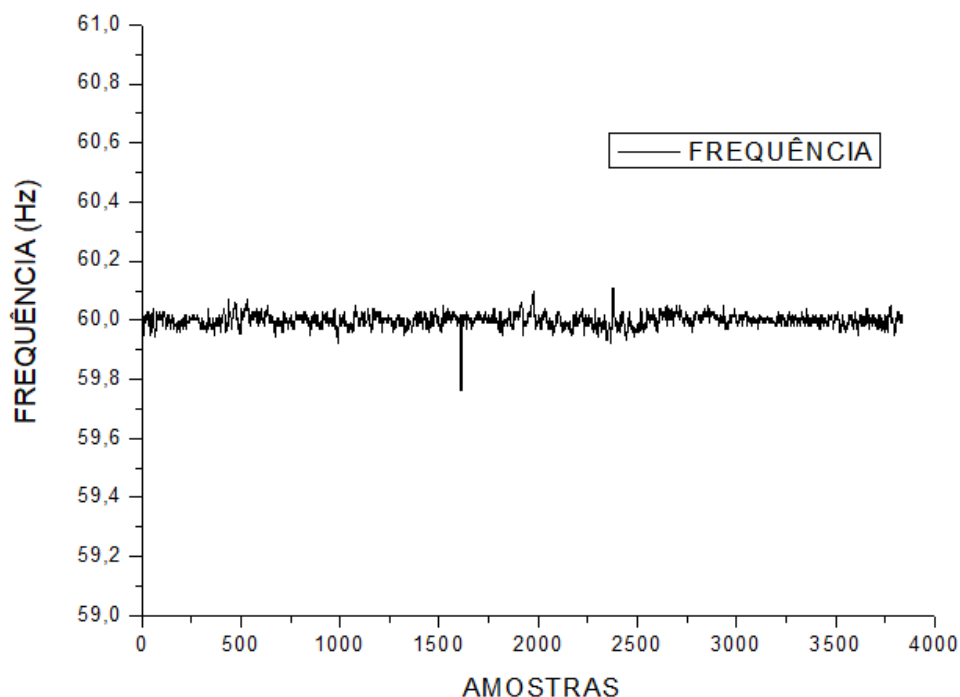


FIGURA 4. Frequência elétrica medida. Fonte: (Autoria Própria)

4.3. Desequilíbrio de Fase

O estudo realizado sobre o desequilíbrio de fase, conforme os cálculos apresentados nas equações (6) e (7), revelou resultados significativos em relação aos limites de desequilíbrio para sistemas com tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV, conforme especificado na Tabela 2, onde o limite considerado aceitável é de 3%. No entanto, os valores calculados, que podem ser vistos na Figura 5, ultrapassaram a marca de 69%, indicando um desequilíbrio desproporcional no sistema analisado. Esse elevado índice de desequilíbrio pode comprometer a eficiência e a estabilidade do fornecimento de energia elétrica, exigindo intervenções para mitigar os impactos durante a operação e uso do laboratório.

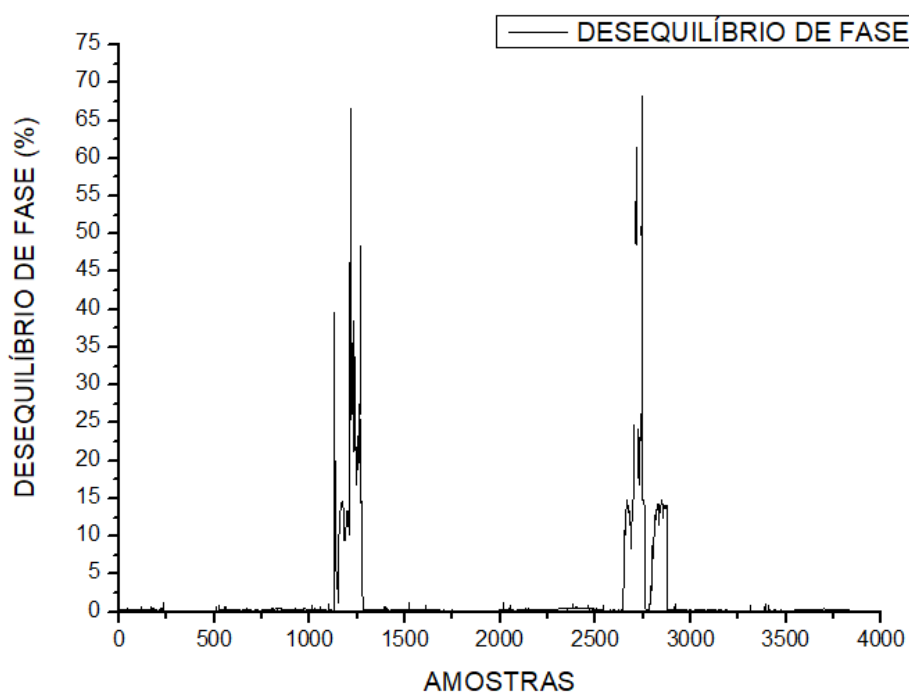


FIGURA 5. Desequilíbrio de fase calculado. Fonte: (Autoria Própria)



FIGURA 6. Máquina de solda *HandyArc 140i* 5,5kVA e 25A

Os picos de desequilíbrio observados foram ainda mais intensificados durante os eventos de VTCD, que ocorreram em momentos específicos de operação das máquinas de solda e do torno elétrico utilizados pelo laboratório de engenharia mecânica na execução de montagem de carros de competição *off-road* no período noturno após às 18h, gerando distúrbios que amplificaram os efeitos do desequilíbrio de fase. A relação direta entre o uso dessas máquinas foi evidenciada durante o período de coleta de dados, onde durante a vistoria do equipamento em seu ponto de instalação, foi observado os eventos a partir de medições do analisador, bem como com leitura de um alicate amperímetro, o aumento do desequilíbrio evidencia a necessidade da redistribuição das cargas do laboratório, bem como a revisão das tomadas de uso específico do laboratório que não estão sendo corretamente utilizadas. Segue na Figura 6 as especificações técnicas dos equipamentos envolvidos.



(a)



(b)

FIGURA 7. (a) Máquina de solda *Origo Tig 150HF* 5,3kVA e 36A; (b) Torno mecânico de bancada *Manrod MR-302* de 2 HP ou 1,49kW. Fonte: (Autoria Própria).

O torno trifásico, embora seja utilizado de forma esporádica, durante as medições estava operando periodicamente durante a necessidade de uma etapa específica do projeto, exigindo um uso mais contínuo. Por outro lado, as duas máquinas de solda estão conectadas a um circuito monofásico no mesmo ponto de alimentação caracterizado por uma tomada de 20A que alimenta uma extensão elétrica para alimentação das duas máquinas. Durante o uso, os operadores ajustam as faixas de corrente de cada máquina para evitar sobrecarga no sistema elétrico. De forma experimental, os usuários identificaram um limite de corrente adequado que garantisse a operação das máquinas sem provocar o desarme do interruptor, garantindo a estabilidade do circuito, além de que existem outros equipamentos como máquinas corte que operam no mesmo circuito.

4.4. Variações de tensão de curta duração – VTCD

Os eventos de Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD) foram observados exclusivamente durante os períodos de funcionamento e utilização das cargas especiais, máquinas de solda e o torno mecânico. Conforme registrado na Tabela 6, foram identificados um total de 21 eventos de interrupção temporária de tensão (ITT) e 313 interrupções temporárias de tensão. A recorrência dessas manifestações indica uma associação direta entre a operação dessas cargas e as oscilações na rede elétrica, o que pode comprometer a estabilidade do e disponibilidade da instalação elétrica.

Os ITT, em particular, apresentaram níveis de tensão inferiores a 0,1 P.U da tensão nominal, o que significa que, durante esses eventos, os equipamentos foram fornecidos com valores abaixo de 22V, chegando a medições de 0V com duração registrada superior a três minutos de duração, indicando interrupção de fornecimento naquele instante. Durante este evento de interrupção total, foi verificado durante o uso simultâneo das máquinas de solda, onde houve o desligamento dos equipamentos conforme relato dos os usuários do laboratório de engenharia mecânica.

Essa condição representa um risco significativo, pois compromete a segurança das pessoas que utilizam os equipamentos afetando o funcionamento adequado dos dispositivos e, em casos mais severos, causando danos permanentes nos equipamentos.

Corroborando os eventos coletados, no mesmo período das medições, o laboratório estava passando por um período de alta demanda nas ordens de serviço para reparos de placas dos equipamentos condicionadores de ar, onde estavam apresentando queima de componentes da parte de alimentação e tendo sua operação comprometida.

Como apresentado na Figura 7, os eventos ocorreram na fase R da instalação, esta que alimenta as máquinas de solda e também alimenta uma das fases do torno mecânico trifásico presente no laboratório.

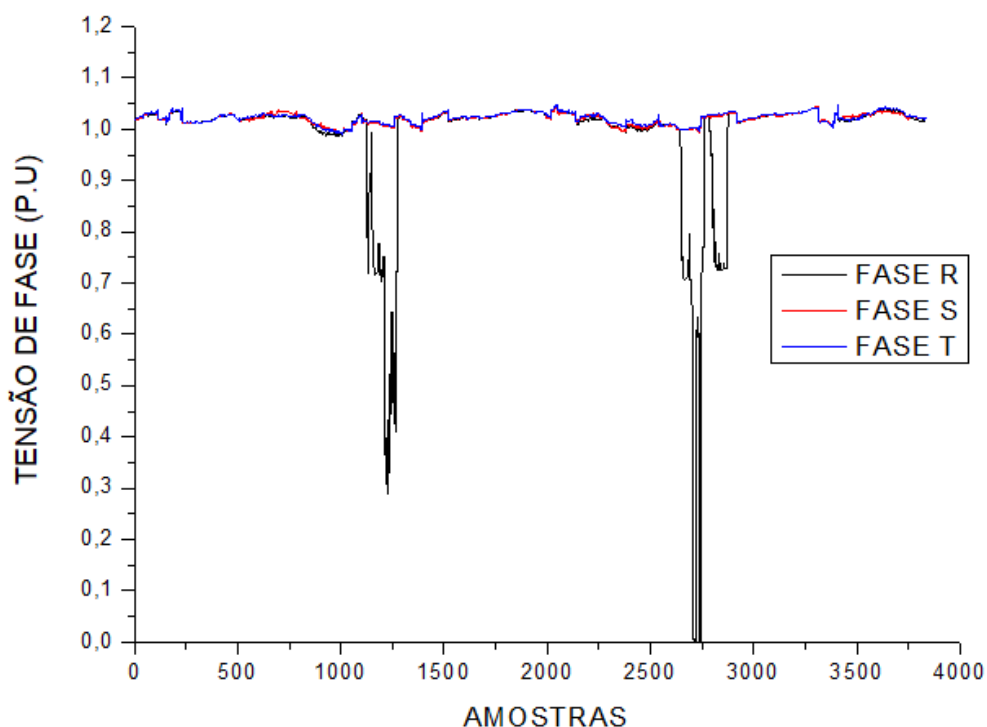


FIGURA 7. Comportamento da tensão de fase (P.U) durante as medições. Fonte: (Autoria Própria)

TABELA 6. Categorização das VTCD. Autoria Própria

<i>Variações Temporárias de Tensão</i>		
ITT	ATT	ETT
21	313	0

Na Figura 8, os gráficos apresentados realizam a sobreposição das amostras de desequilíbrio de fase com o comportamento da tensão da fase R, que se destaca como a principal responsável pela patologia elétrica observada no fornecimento de energia ao laboratório. A sobreposição das curvas tem o objetivo de facilitar a identificação de padrões e tendências nos eventos registrados.

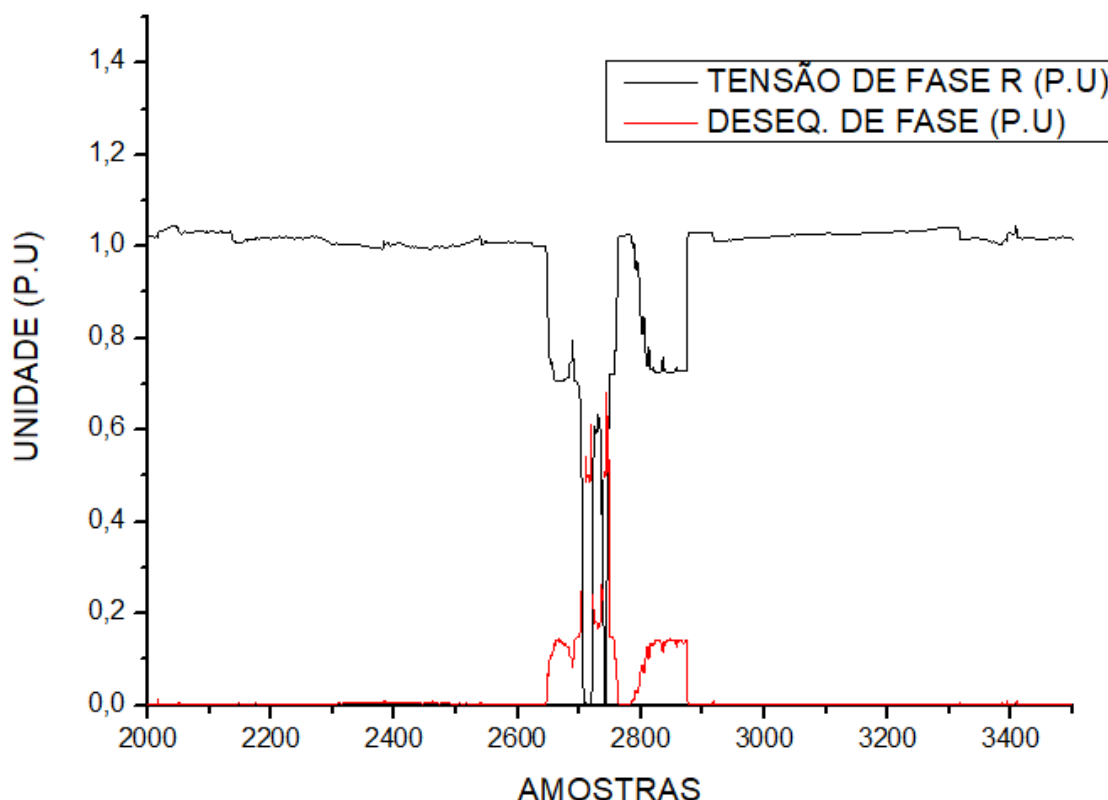


FIGURA 8. Análise comparativa entre os VTCD da Fase R e o desequilíbrio de fase do sistema durante estes eventos. Fonte: (Autoria Própria)

5. CONCLUSÃO

A partir da análise dos aspectos de qualidade de energia em uma instalação adaptada para um laboratório de engenharias com geração fotovoltaica, foi possível identificar diversos desafios relacionados à estabilidade e ao desempenho do sistema elétrico. Os resultados obtidos demonstram que a presença de distorções harmônicas, variações de frequência, desequilíbrio de fase e variações de tensão de curta duração (VTCD) impactam diretamente a confiabilidade do fornecimento de energia na instalação.

Observou-se que a influência da geração fotovoltaica na qualidade de energia do laboratório não foi percebida nos parâmetros analisados, como as distorções harmônicas e as VTCD. O problema identificado está na distribuição das cargas no laboratório, bem como na gestão de máquinas especiais, como as máquinas de solda e o torno elétrico, apresentados como agentes patológicos.

Em especial, verificou-se que a fase R apresentou as maiores variações e foi diretamente responsável por eventos de oscilação juntamente com suas cargas associadas. As medições realizadas evidenciaram que a operação das máquinas de solda e do torno mecânico foi um fator determinante para o surgimento de eventos de VTCD, resultando em interrupções temporárias de tensão e afundamentos significativos. Esses eventos podem comprometer a segurança dos usuários e a integridade dos equipamentos. Além disso, a análise do desequilíbrio de fase revelou valores significativamente superiores aos limites estabelecidos pelo PRODIST, indicando a necessidade de medidas corretivas, como a redistribuição das cargas e ajustes na infraestrutura elétrica do laboratório. Também foi observado que a presença das harmônicas pares não múltiplas de três está

associada aos eventos de desequilíbrio, onde, como proposta para mitigação dessa patologia a adequação elétrica do laboratório.

Dessa forma, com base na metodologia da PRODIST, o laboratório demanda de forma crítica e urgente um as built juntamente com uma reforma da instalação elétrica do laboratório. Este estudo reforça a importância de um monitoramento contínuo e de ações mitigadoras para garantir a qualidade e a segurança do fornecimento de energia elétrica em ambientes acadêmicos com elevada demanda. Como proposta para futuros trabalhos, sugere-se tratar da viabilidade da adequação elétrica desta ferramenta de desenvolvimento acadêmico.

REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Programa de Eficiência Energética*. 2000. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/eficiencia-energetica/pee>. Acesso em: 03 mar. 2025.
- [2] ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Chamada nº. 001/2016 projeto prioritário de eficiência energética e estratégico de P&D: “Eficiência energética e minigeração em instituições públicas de educação superior”. 2016. Disponível em: <http://energif.mec.gov.br/images/pdf/editais/edital-0012016.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2023.
- [3] R. P. S. Leão; R. F. Sampaio; F. L. M.. *Harmônicas em sistemas elétricos*, 1ª ed.; Editora: Elsevier Editora Ltda, Brasil, 2014; Volume 1, p. 01–338.
- [4] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução Normativa Aneel Nº 956, De 7 De Dezembro De 2021: Módulo 8 – Qualidade Do Fornecimento De Energia Elétrica*. Brasília: Aneel, 2021. 78 p. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist>. Acesso em: 03 mar. 2025.
- [5] P. H. O. Rezende, 2013. Samesima, M. I., 2013. *Efeitos do Desequilíbrio de Tensões de Suprimentos nos Motores de Indução*. Horizonte Científico, v. 6, n. 2.
- [6] MINIPA DO BRASIL LTDA. *Analizador de qualidade de energia Power Quality Analyzer Analizador de calidad de Energía ET-5051C/ET-5061C*. 1. ed. São Paulo, 2006.
- [7] CHAPMAN, David (org.). *Guia de Aplicação de Qualidade de Energia*. São Paulo: Pro Cobre Conects Life, 2002. Cap. 3.1, p. 1-12. Disponível em: <https://abccobre.org.br/wp-content/uploads/2021/11/qe07-guia-3-1-harmnicas-causas-efeitos.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2025.
- [8] F. R. Garcia, “Harmônicos Em Sistemas Elétricos De Potência,” 2010