



**INSTITUTO
FEDERAL**

Pernambuco

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco

Campus Garanhuns

Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica

MOISÉS ALVES CARDOSO

**ANÁLISE DOS INDICADORES DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA NO
IFPE *CAMPUS* GARANHUNS**

Garanhuns – PE

2025

MOISÉS ALVES CARDOSO

**ANÁLISE DOS INDICADORES DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA NO
IFPE CAMPUS GARANHUNS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica
do Instituto Federal de Pernambuco, *Campus*
Garanhuns, como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Mendonça Rocha
Barros

Garanhuns – PE

2025

C268a

Cardoso, Moisés Alves

Análise dos indicadores de qualidade de energia elétrica no IFPE
Campus Garanhuns / Moisés Alves Cardoso ; orientador Rafael
Mendonça Rocha Barros, 2025.
98f. : il.

Orientador: Rafael Mendonça Rocha Barros.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Federal
de Pernambuco. Pró-Reitoria de Ensino. Diretoria de Ensino. Campus
Garanhuns. Coordenação do Curso Superior em Engenharia. Curso de
Bacharelado em Engenharia Elétrica, 2025.

1. Energia elétrica - Brasil. 2. Energia elétrica - distribuição. 3.
Energia solar. 4. Energia - Fontes Alternativas - Pernambuco. I. Título.
II. Barros, Rafael Mendonça Rocha (orientador). III. Instituto Federal de
Pernambuco.

CDD 621.310981

Louise Machado Freire Dias – CRB4/2267

MOISÉS ALVES CARDOSO

**ANÁLISE DOS INDICADORES DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA NO
IFPE *CAMPUS* GARANHUNS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica
do Instituto Federal de Pernambuco, *Campus*
Garanhuns, como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado em: ____/____/____

Prof. Dr. Rafael Mendonça Rocha Barros (IFPE, *campus* Garanhus)
Orientador

Prof. Dr. Márcio Severino da Silva (IFPE, *campus* Garanhus)
Avaliador interno

Profa. Ma. Regina Maria de Lima Neta (IFPE, *campus* Pesqueira)
Avaliadora externa

Este trabalho é dedicado a D.Irene (*in memoriam*) que sonhou em ver seus netos graduados, mas que se foi antes de concretizar seu sonho.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo quero agradecer ao meu Deus que até aqui me sustentou, me guiou e firmou cada um dos meus passos. Sem a presença dele nada do que foi feito nesses anos de instituto seria possível, a ele seja toda honra, glória e louvor.

Abaixo de Deus, agradeço aos meus pais que embaixo de sol e chuva lutaram para criar a mim e aos meus irmãos, que foram os maiores incentivadores dessa jornada que está prestes a findar. Eles sim foram o alicerce emocional, espiritual e financeiro que me manteve por todo o período de graduação.

Agradeço aos meus irmãos pelo apoio, incentivo e por compartilhar comigo as alegrias das conquistas e as tristezas da derrota. Sei que estou sendo o primeiro de nós a graduar-se, mas sei que não serei o último.

Estendo também os agradecimentos a cada um dos meus amigos que viveram essa jornada comigo, aos da faculdade por dividirem os fardos, desprazeres e ansiedades de uma jornada que só quem está dentro pode entender, mas que ao mesmo tempo tornaram a jornada mais leve, alegre e emocionante com cada história e aprendizado. Aos amigos fora da faculdade eu agradeço por compreender que mesmo estando ocupado, distante e disperso nossa amizade manteve-se inabalável.

Por fim e não menos importante, agradeço a instituição que me fez apaixonar pela eletricidade, na qual eu posso dizer que sou filho desde julho/2016. Dentro do IFPE tornei-me técnico em eletroeletrônica, fator fundamental para as oportunidades de estágio que obtive e para graduar-me. Deixo meus agradecimentos na pessoa do professor Rafael Barros a todo o corpo docente que me guiou nesses anos e me fez o profissional que sou hoje.

“Humilhai-vos, pois, debaixo da potente mão de Deus, para que, a seu tempo vos exalte, lançando sobre ele toda a vossa ansiedade, porque ele tem cuidado de vós”

I Pedro 5:6-7 (KJA)

RESUMO

Neste trabalho é apresentado uma análise sobre a qualidade da energia elétrica no IFPE *Campus* Garanhuns, o qual possui um perfil de carga específico relacionado a sua finalidade acadêmica e que, paralelamente a isto, possui uma usina fotovoltaica instalada na sua rede interna. Para executar o estudo, foram realizadas medições em campo que reuniu dados sobre carga, tensão, potências, distorções harmônicas de tensão, potência de geração, fator de potência e frequência. A análise desses dados permitiu uma avaliação da qualidade de energia elétrica no *Campus*, a identificação de violações de limites em relação às normas vigentes e a descrição detalhada do funcionamento das instalações elétricas, incluindo a usina fotovoltaica. Para análise dos dados foi tomado como referência o Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, publicado pela Agência Nacional de Energia Elétrica, que trata da qualidade do fornecimento de energia em sistemas de distribuição. Foram analisados os indicadores de Variação de Tensão de Longa Duração, fator de potência, distorções harmônicas, desequilíbrio de tensão e variação de frequência. A análise dos dados revelou a presença de violações nos padrões de qualidade de energia do *Campus*, incluindo variações de tensão, baixo fator de potência e distorções harmônicas. Dessa forma, o estudo demonstrou a importância da avaliação da qualidade de energia em instalações com geração distribuída, como é o caso do IFPE Garanhuns. Os achados podem servir de base para a implementação de medidas que visam aprimorar o sistema elétrico do *Campus*, garantindo a qualidade do fornecimento de energia elétrica. Além disso, o estudo contribui para o avanço do conhecimento na área de qualidade de energia elétrica, especialmente no contexto de instituições de ensino com geração distribuída.

Palavras-chave: Qualidade de energia; Geração distribuída; IFPE *Campus* Garanhuns; PRODIST Módulo 8.

ABSTRACT

In this paper, an analysis is presented of the electric power quality at IFPE Garanhuns *Campus*, which has a specific load profile related to its academic purpose and, in parallel, a photovoltaic plant installed in its internal grid. To carry out the study, field measurements were taken that gathered data on load, voltage, power, harmonics, generation, power factor, and frequency. Analysis of these data enabled an assessment of power quality on the *campus*, the identification of limit violations with respect to current standards, and a detailed description of the operation of the electrical installations, including the photovoltaic plant. For the data analysis, Module 8 of the Procedures for the Distribution of Electric Energy (PRODIST) in the National Electric System, published by the National Electric Energy Agency (ANEEL), which addresses the quality of energy supply in distribution systems, was taken as a reference. The indicators of long-duration voltage variation, power factor, harmonic distortions, voltage imbalance, and frequency variation were analyzed. The data analysis revealed the presence of violations of the campus's power-quality standards, including voltage variations, low power factor, and harmonic distortions. Therefore, the study demonstrated the importance of evaluating power quality in installations with distributed generation, as is the case at IFPE Garanhuns. The outcomes can serve as groundwork for implementing measures aimed at enhancing the campus electrical system, ensuring the quality of electric power supply. Furthermore, the study contributes to the advancement of knowledge in the field of power quality, especially in the context of educational institutions with distributed generation.

Keywords: Power quality; Distributed Generation; IFPE Garanhuns, Module 8 PRODIST.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Faixas de tensão em relação à referência	21
Figura 3.1 - Diagrama Unifilar da Usina Fotovoltaica	33
Figura 3.2 - Planta baixa da usina solar do campus Garanhuns	35
Figura 3.3 - Vista ampliada do setor esquerdo da usina	36
Figura 3.4 - Degradação natural da potência do modulo Yingli YL255P-29b	37
Figura 3.5 - Diagrama unifilar do QDG do campus	38
Figura 3.6 - Analisador de energia MINIPA ET-5051C	47
Figura 3.7 - Diagrama multifilar usada no analisador de energia	48
Figura 3.8 - Montagem do analisador junto ao QGD	49
Figura 4.1 - Curva de potência ativa consumida (Rede)	52
Figura 4.2 - Curva da média do carregamento em dias úteis	54
Figura 4.3 - Curva da média do carregamento no final de semana	54
Figura 4.4 - Consumo diário de energia ativa no campus	56
Figura 4.5 - Curva de potência reativa consumida (Rede)	57
Figura 4.6 - Consumo diário de energia reativa no <i>Campus</i>	58
Figura 4.7 - Curva de geração injetada na rede de distribuição	59
Figura 4.8 - Energia injetada na rede da concessionária	61
Figura 4.9 - Curva média de injeção de energia	62
Figura 4.10 - Fator de Potência do Gerador	63
Figura 4.11 - Fator de Potência Diário da Usina Fotovoltaica	64
Figura 4.12 - Fator de Potência da Concessionária	65
Figura 4.13 - Curva de Comparação dos Fatores de Potências	66
Figura 4.14 - Fator de Potência Diário da Rede da Distribuidora	67
Figura 4.15 – Indicador de Tensão em Regime Permanente do <i>Campus</i>	68
Figura 4.16 - Recorte da Fatura de Dezembro/2023	70
Figura 4.17 - Recorte da Fatura de Janeiro/2024	70
Figura 4.18 - Recorte da Fatura de Fevereiro/2024	71
Figura 4.19 - Comportamento das Tensões no Período Avaliado	72
Figura 4.20 - Comportamento do Desequilíbrio da Rede Elétrica do <i>Campus</i>	73
Figura 4.21 - Fator de Desequilíbrio de Tensão Diário	74
Figura 4.22 - Comportamento da frequência do <i>Campus</i>	75
Figura 4.23 - Distorção harmônica total de tensão	76

Figura 4.24 - Distorção harmônica de tensão de 3ª ordem	78
Figura 4.25 - Distorção harmônica de tensão de ordem ímpar não múltipla de 3	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual a 127/220 V – 220/380 V	22
Tabela 2.2 - Limites das distorções harmônicas totais de tensão	28
Tabela 2.3 - Limites para o indicador de desequilíbrio de tensão	30
Tabela 3.1 - Especificações técnicas básicas do inversor PHB3000-SS	34
Tabela 3.2 - Especificações técnicas básicas do módulo YL255P-29b.....	36
Tabela 3.3 - Cargas conectadas ao QDCA da Biblioteca do campus	39
Tabela 3.4 - Cargas conectadas ao QGAC da Biblioteca do campus	40
Tabela 3.5 - Cargas conectadas ao QGBT do Bloco B do campus.....	41
Tabela 3.6 - Cargas conectadas ao QGBT do Bloco C do campus	42
Tabela 3.7 - Cargas conectadas ao QGBT da guarita do campus	43
Tabela 3.8 - Cargas conectadas ao QGBT do Bloco D do campus	44
Tabela 4.1 - Período diário de injeção de energia na rede da distribuidora	60
Tabela 4.2 - DHT Média das fases e neutro.....	77
Tabela 4.3 - DTT3 Média das fases e neutro	79
Tabela 4.4 - DTTi Média das fases e neutro	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
Cos	Cosseno do ângulo
DHT	Distorção Harmônica Total
DIT _h	Distorção harmônica individual de tensão de ordem h
DTT	Distorção harmônica total de tensão
DTT _i	Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3
DTT _P	Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3
DTT ₃	Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3
DRC	Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica
DRP	Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária
EA	Energia Ativa
ER	Energia Reativa
EUSD	Encargo de Uso do Sistema de Distribuição
FD	Fator de Desequilíbrio
GD	Geração Distribuída
fp	Fator de Potência
IFPE	Instituto Federal de Pernambuco
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
QDCA	Quadro de Distribuição de Corrente Alternada
QGAC	Quadro Geral de Ar-condicionado
QGD	Quadro Geral de Distribuição
RMS	<i>Root Mean Square</i>

Sen	Seno do ângulo
SIN	Sistema Interligado Nacional
STC	<i>Standard Testing Conditions</i>
T _R	Tensão de Referência
TL	Tensão de Leitura
VTLD	Variação de Tensão de Longa Duração

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Âmpere
Hz	Hertz
I_m	Corrente Máxima
kg	kilograma
kV	kilo-Volt
kW	kilo-Watt
kVA	kilo volt-ampere
kWp	kilo-Watt pico
kWh	kilo-Watt hora
MWh	Mega Watt hora
m^2	Metro quadrado
mm^2	Milímetro quadrado
mm	Milímetro
P	Potência ativa
Q	Potência reativa
R	Resistência
S	Potência aparente
t	Tempo
V	Volt
V_1	Tensão fundamental medida
V_h	Tensão harmônica de ordem h medida
V_m	Tensão Máxima
V_n	Tensão Nominal
V_-	Tensão de Sequência Negativa
V_+	Tensão de Sequência Positiva
W	Watt
X	Reatância
θ	Ângulo de defasagem entre tensão e corrente
ω	Velocidade angular

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivo Geral	17
1.2. Objetivos Específicos	18
1.3. Estrutura do Trabalho.....	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1. Variação de Tensão de Longa Duração – VTLD	20
2.2. Fator de Potência	24
2.3. Distorções Harmônicas	25
2.4. Desequilíbrio de Tensão.....	29
2.5. Variação de Frequência.....	31
3. MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1. Usina Solar do Campus Garanhuns	32
3.1.1. Inversor Fotovoltaico	33
3.1.2. Módulo Fotovoltaico	35
3.2. Rede Elétrica do <i>Campus</i>	37
3.3. Analisador de Energia	47
3.3.1. Conexão do Analisador de Energia.....	47
3.3.2. Tratamento dos Dados	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
4.1. Perfil de Consumo de Energia	52
4.2. Geração de Energia	59
4.3. Fator de Potência.....	63
4.3.1. Fator de Potência da Instalação com Exportação	63
4.3.2. Rede da Instalação	65
4.4. Tensão em Regime Permanente	68
4.5. Desequilíbrio de Tensão.....	72
4.6. Variação de Frequência.....	75
4.7. Harmônicas	76
4.7.1. Distorção Harmônica Total	76
4.7.2. Distorção Harmônica de 3º Ordem	78
4.7.3. Distorção Harmônica de Ordem Impar não Múltipla de 3.....	80
5. CONCLUSÕES	82

REFERÊNCIAS.....84

APÊNDICE.....85

ANEXOS95

1. INTRODUÇÃO

O fornecimento de energia elétrica no Brasil tem sido objeto de debates e propostas de regulamentação, com o objetivo de assegurar que o consumidor final receba o produto com qualidade e continuidade, dentro de limites técnicos e normativos que garantam a sua segurança e evitem danos às pessoas e bens.

Com o objetivo de promover o desenvolvimento equilibrado e eficiente do setor elétrico brasileiro, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL criou, por meio da Resolução Normativa ANEEL nº 956/2021, os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Essa normativa estabelece as regras e procedimentos para a distribuição de energia elétrica, buscando garantir a qualidade e a continuidade do serviço aos consumidores, além de promover a competição entre os agentes do setor (BRASIL, 2025).

O PRODIST é composto por onze módulos e oferece uma estrutura abrangente para a regulação do segmento de distribuição. Dentre esses módulos, o módulo 8 se destaca por estabelecer os procedimentos que asseguram a qualidade do fornecimento de energia elétrica na distribuição, no que se refere à qualidade do produto, à qualidade do serviço e à qualidade comercial (ANEEL, 2021).

O problema com a qualidade de energia fornecida pode ser definido como qualquer desvio manifestado na tensão, corrente ou frequência que resulte em falha ou operação incorreta das cargas do consumidor final (DUGAN; MCGRANAGHAN; SANTOSO; BEATY, 2002).

Considerando o contexto na qual esse estudo está inserido, pode ser encarado como fundamental a análise da qualidade de energia elétrica em instituições de ensino conectadas à rede de distribuição em média tensão e que possuem sistemas de geração distribuída em suas instalações. Por que, concomitante a demanda social cada vez mais constante por instituições de ensino públicas e privadas aumenta-se também a necessidade por energia elétrica para que esses prédios funcionem adequadamente, dessa forma, para diminuir os custos operacionais com as distribuidoras de energia elétrica, tem-se optado pela energia fotovoltaica como uma solução plausível e de fácil implantação. Assim, é necessário entender o impacto que essa modalidade de geração, associado a esse perfil de

carga específico, poderá alterar no que diz respeito aos indicadores de qualidade de energia e avaliar seus impactos a rede da concessionária e as outras cargas conectadas ao mesmo barramento.

Merkle (2018) traz que os fenômenos que afetam a qualidade de energia elétrica, são as harmônicas, as variações de tensão de curta duração, a flutuação de tensão, os transitórios, os desequilíbrios de tensão, o fator de potência e a variação de tensão de longa duração. Todos esses fenômenos se não monitorados e mitigados quando necessário podem trazer prejuízos financeiros e educacionais para a instituição de ensino.

Especificamente, o *Campus* do IFPE Garanhuns, atende a essa descrição, com sua localização próxima a uma subestação da concessionária local, possuindo em suas dependências uma usina fotovoltaica e constando em sua rede elétrica interna equipamentos eletroeletrônicos sensíveis que dependem de uma qualidade de energia elétrica adequada para que funcionem corretamente. A inoperabilidade dessas cargas pode tornar-se um desafio para a rotina didática da instituição haja visto que muitas dessas cargas estão envolvidas diretamente com o funcionamento dos laboratórios, com o desenvolvimento de pesquisas científicas e com a administração do *Campus*.

Os resultados obtidos a partir desse estudo poderão fornecer subsídios para a realização de novas pesquisas, contribuindo para o avanço do conhecimento na área de qualidade de energia elétrica, além de fornecer indicadores que subsidiarão a administração e o corpo docente do *Campus* na tomada de decisão sobre possíveis problemas que a instituição deverá mitigar – quando for sua responsabilidade – ou que deverá cobrar a concessionária de energia para resolver tais problemas – quando for responsabilidade da distribuidora de energia.

1.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo principal obter e analisar os principais indicadores de qualidade de energia elétrica nas instalações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco – *Campus* Garanhuns. Uma instituição acadêmica, que possui uma curva de carga específica e que possui em suas dependências uma usina fotovoltaica de 97,92 kWp.

1.2. Objetivos Específicos

- Realizar a coleta de dados em campo para obter as curvas de carga, tensão, potência, harmônicos, geração de energia, fator de potência e frequência. Esses elementos são necessários para a construção dos indicadores de qualidade de energia do *Campus*.
- Realizar análises para avaliar a qualidade da energia elétrica do *Campus* e identificar possíveis desvios em relação aos padrões estabelecidos pela legislação vigente.
- Descrever o sistema elétrico do *Campus*, incluindo a subestação de entrada, a usina fotovoltaica e a distribuição de cargas em cada quadro de distribuição.

1.3. Estrutura do Trabalho

Neste primeiro capítulo, são apresentadas as informações iniciais sobre o tema e a justificativa para a escolha do assunto, juntamente com os objetivos que esse trabalho pretende alcançar.

O segundo capítulo possui o objetivo de apresentar uma revisão bibliográfica sobre os fenômenos que afetam a qualidade de energia elétrica, bem como o arcabouço legal que regulamenta essa temática no Brasil. Essa fundamentação teórica é essencial para a realização de uma análise criteriosa dos indicadores de qualidade de energia no *Campus*, permitindo a identificação de possíveis desvios em relação aos padrões estabelecidos.

O terceiro capítulo dedica-se à apresentação de informações detalhadas acerca da usina fotovoltaica, bem como das infraestruturas elétricas e das cargas conectadas ao sistema elétrico do *Campus*. Além disso, serão descritos os equipamentos utilizados para a coleta de dados utilizados nas análises subsequentes, além de apresentar quais foram os dados colhidos e analisados no capítulo 4 deste trabalho.

O quarto capítulo tem como cerne apresentar os resultados obtidos após a análise dos dados coletados na instalação elétrica do *Campus*, pois com a coleta dos dados e o devido tratamento matemático, foi possível obter os indicadores de qualidade de energia. Além dos indicadores também é apresentado os casos de violações de limite e sugeridas medidas de mitigação.

O quinto e último capítulo tem como objetivo apresentar as principais conclusões do estudo, bem como as implicações dos resultados encontrados. Além disso, neste capítulo serão propostas sugestões para futuras pesquisas que contribuam para o aprofundamento do tema.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A qualidade de energia elétrica é uma área crucial da engenharia elétrica, focada no estudo e na proposição de parâmetros técnicos que visam garantir a operação eficiente e segura dos sistemas elétricos. O objetivo principal é assegurar que a energia fornecida atenda aos padrões estabelecidos, como tensão, frequência e forma de onda. Quando esses parâmetros se desviam dos limites recomendados, podem surgir diversos problemas, impactando tanto a qualidade do serviço para o consumidor final quanto a estabilidade e a eficiência das redes das distribuidoras de energia. Para embasar as análises feitas neste trabalho será utilizado o módulo 8 do PRODIST que trata sobre a qualidade de energia elétrica a nível da distribuição.

2.1. Variação de Tensão de Longa Duração – VTLD

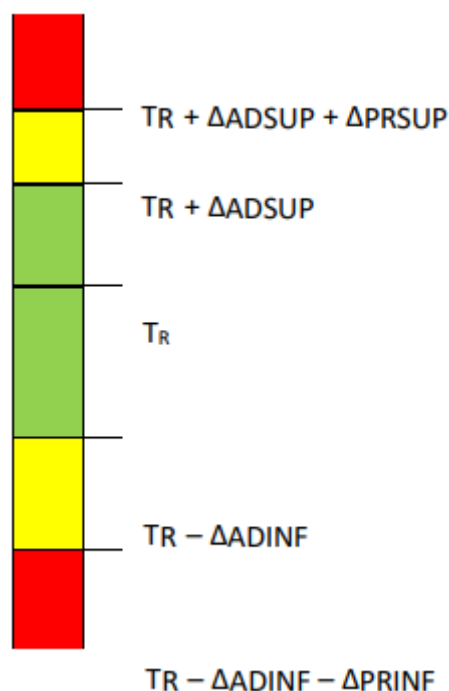
Segundo Oleskovicz (2007), são considerados VTLDs, tensões RMS que atingem o patamar de sobre ou subtensão por um período superior a 1 minuto de forma ininterrupta, ao que o PRODIST em sua norma é menos rigoroso quando indica que são considerados VTLDs distúrbios de tensão ocorridos por um período superior a 3 minutos. Além do tempo de distúrbio, o item 26.2 do módulo 8 do PRODIST determina que para a composição dos indicadores individuais deve-se considerar o registro de 1.008 leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos (período de integralização) de 10 minutos cada, equivalente a 168 horas, para assim ser possível calcular os indicadores das VTLDs.

Motivados pelo fenômeno citado acima, Dugan, McGranaghan, Santoso e Beaty, (2002) apresentam algumas das possíveis maneiras de controlar a variação da tensão: Usar bancos de capacitores nas subestações ou variar o *tap* do transformador. Essas estratégias podem ser aplicadas de forma autônoma ou manual e já são praticadas pelas distribuidoras em suas subestações para o controle de tensão e de reativos nas suas redes de distribuição.

Segundo a ANEEL (2021), a tensão a ser contratada nos pontos de conexão com tensão nominal de operação 127/220 V ou 220/380 V deve situar-se entre 92% e 105% da tensão nominal de operação do sistema no ponto de conexão.

A Figura 2.1 apresenta a classificação a respeito das faixas de tensão em relação à tensão nominal.

Figura 2.1 - Faixas de tensão em relação à referência



Fonte: ANEEL (2021)

T_R = Tensão de Referência;

Faixa Adequada de Tensão = Intervalo entre $(T_R - \Delta ADINF)$ e $(T_R + \Delta ADSUP)$;

Faixas Precárias de Tensão = Intervalo entre $(T_R + \Delta ADSUP)$ e $(T_R + \Delta ADSUP + \Delta PRSUP)$ ou intervalo entre $(T_R - \Delta ADINF - \Delta PRINF)$ e $(T_R - \Delta ADINF)$;

Faixas Críticas de Tensão = Valores acima de $(T_R + \Delta ADSUP + \Delta PRSUP)$ ou abaixo de $(T_R - \Delta ADINF - \Delta PRINF)$.

Na Figura 2.1 é possível visualizar as classificações de tensão crítica e precária, baseado nestas classificações, é apresentado na Tabela 2.1 os limites nominais que cada nível de tensão deve apresentar para que assim seja classificada entre tensão adequada, precária e crítica. Em que o nível crítico de tensão é o pior cenário possível.

Tabela 2.1 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual a 127/220 V – 220/380 V

Tensão de Atendimento	Para tensões – 127/220 V	Para tensões – 220/380 V
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231)/(117 \leq TL \leq 133)$	$(350 \leq TL \leq 399)/(202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)/$ $(110 \leq TL < 117 \text{ ou } 133 < TL \leq 135)$	$(331 \leq TL < 350 \text{ ou } 399 < TL \leq 403)/$ $(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 191 \text{ ou } TL > 233)/(TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403)/(TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: ANEEL (2021)

A ANEEL (2021) estabelece que o indicador responsável por acumular os valores da transgressão de tensão precária é o DRP. Da mesma forma, o responsável pela transgressão de tensão crítica é o DRC.

Para a construção dos indicadores de tensão crítica e precária é necessário após a medição das 1008 amostras de tensão para cada uma das fases, identificar em qual das fases houve a maior tensão medida durante o mesmo período das amostras. Com a identificação dessas tensões será comparado com os valores contidos na Tabela 2.1 e agrupar entre adequada, precária e crítica. Após isso é possível calcular os indicadores relativos as transgressões.

Para calcular os indicadores de tensão crítica e precária são aplicadas as Equações (1) e (2).

$$DRP = \frac{nlp}{1008} * 100\% \quad (1)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} * 100\% \quad (2)$$

Em que o numerador da fração é o maior valor entre as fases do número de leituras situadas na faixa precária, para o DRP, e na faixa crítica, para o DRC. Ao aferir esses indicadores, devemos comparar com os limites estabelecidos pela norma, que são:

$$DRP_{limite} = 3\%$$

$$DRC_{limite} = 0,5\%$$

Assim, após a totalização das amostras que ficaram localizadas na região crítica não deve haver mais do que 5 medições que atingiram esse limite e na região precária não deve haver mais do que 30 medições.

Caso haja alguma extrapolação dos valores limites permitidos para o DRC e DRP, a concessionária, seguindo as diretrizes estabelecidas em norma, deverá pagar ao consumidor final um valor de compensação em reais, calculado através da Equação (3).

$$Compensação_{tensão} = \left[\left(\frac{DRP - DRP_{limite}}{100} \right) * k_1 + \left(\frac{DRC - DRC_{limite}}{100} \right) * k_2 \right] * EUSD \quad (3)$$

Em que:

- k_1 é a constante de correção da tensão precária, sendo 0 quando não houver transgressão do limite estabelecido ou 3 quando houver transgressão.
- k_2 é a constante de correção de tensão crítica que assumirá diversos valores de acordo com a tensão de operação do sistema avaliado. Como o objeto desse trabalho utiliza a tensão de 220/380V a constante pode assumir dois valores: 0 quando não haver transgressão e 7 quando haver violação dos limites.
- EUSD é o valor do Encargo de Uso do Sistema de Distribuição correspondente ao mês de referência da última medição.

A norma fundamenta como deve ser realizado o pagamento, e como cada um dos casos deve ser analisado de forma individualizada. Além disso, informa que todos os clientes ligados ao alimentador onde houve a ultrapassagem do indicador deverão receber a compensação pela tensão inadequada.

2.2. Fator de Potência

O fator de potência, em suma, é a relação que se estabelece entre as potências ativa e reativa, e por isso, pode-se controlar o fator de potência (fp) injetando ou retirando energia reativa do sistema, através de bancos de capacitores e outros mecanismos que atuam na regulação do fator de potência.

Para a ANEEL (2021), existem duas formas de obter o indicador de fator de potência: a partir dos valores registrados das potências ativa e reativa (Equação 4) ou das respectivas energias (Equação 5). Para o cálculo do indicador do fator de potência pode ser utilizado as seguintes equações:

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (4)$$

$$fp = \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \quad (5)$$

Na Equação (4), são utilizadas as potências médias registradas durante o tempo de avaliação do sistema elétrico. A norma regulamentadora coloca tal equação como principal para o cálculo do indicador de fator de potência. Já a Equação (5) utiliza a energia ativa e a energia reativa média consumida pela instalação elétrica durante o período de aquisição dos dados e é tida como uma forma alternativa para a aquisição deste indicador.

É estabelecido pelo PRODIST (ANEEL, 2021) que o fator de potência no ponto de conexão entre cliente e distribuidora deve estar compreendido entre:

0,92 e 1 indutivo, ou 1 e 0,92 capacitivo.

Além dos limites para esse indicador, é estabelecido que apenas clientes do grupo A e pontos de conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV têm a obrigação de manter o controle permanente do fator de potência.

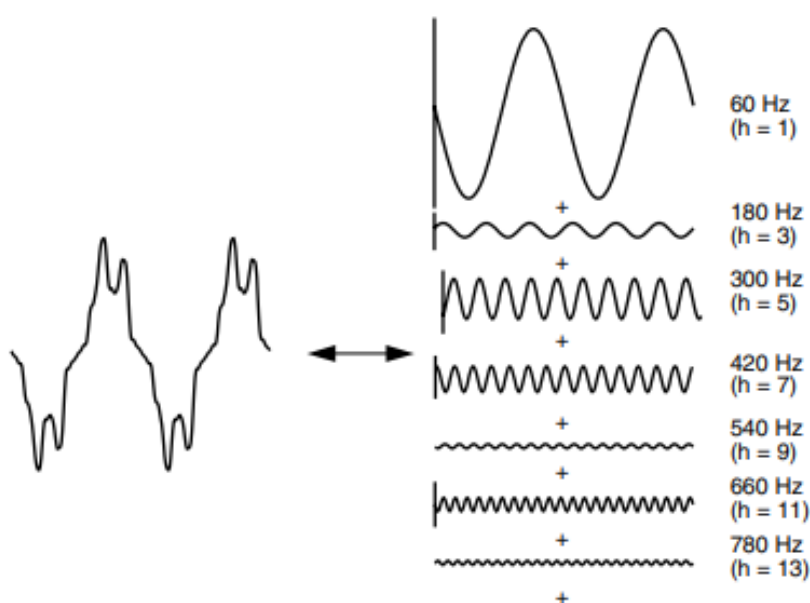
2.3. Distorções Harmônicas

Santos (2023) define que os harmônicos são componentes dos sinais de tensão e/ou corrente com frequências múltiplas inteiras da frequência na qual o sistema de alimentação foi projetado para operar. No Brasil, os harmônicos são múltiplos da frequência de 60 Hz.

O princípio de surgimento de correntes harmônicas no sistema elétrico é a inserção de cargas não-lineares na rede elétrica. Segundo Silva (2008), a circulação das correntes harmônicas geram tensões harmônicas através das impedâncias da rede, e então uma deformação na tensão de alimentação.

Segundo Dugan *et. al.* (2002), uma forma de onda distorcida pode ser expressa como uma soma de senoides, como é apresentada na Figura 2.2:

Figura 2.2 - Decomposição das ondas harmônicas



Fonte: Dugan *et al.* (2002)

Em que se tem a tensão/corrente distorcida após passar por uma carga não-linear. Os harmônicos da Figura 2.2 foram decompostos em sua fundamental de 60 Hz, e nas harmônicas de 3ª, 5ª, 7ª, 9ª, 11ª e 13ª ordem. Provando que todo sinal de tensão/corrente harmônica pode ser decomposta em sinais com a frequência múltipla da fundamental.

A avaliação da intensidade de cada uma das harmônicas produzidas pela carga é de suma importância, haja vista a influência que essas distorções podem gerar nas cargas conectadas no alimentador da distribuidora. Souza e Tavares (2014) apresenta a harmônica de primeira ordem (fundamental) como sendo de sequência positiva, a de segunda ordem como de sequência negativa, a de terceira ordem como de sequência zero, a de quarta ordem é novamente de sequência positiva, e assim por diante. Isso acaba implicando nas seguintes afirmações:

- Sendo h a ordem da distorção, todas as harmônicas dadas por $3h - 2$ terão características da sequência positivas;
- Igualmente, todas as harmônicas dadas por $3h - 1$ terão características de sequência negativa;
- Por consequência, todas as harmônicas dados por $3h$ terão características de sequência zero.

O surgimento das correntes de sequência negativa e zero influenciam negativamente a rede elétrica, pois as harmônicas de sequência zero contribuem com o surgimento de corrente no condutor neutro, que pode possuir amplitude maior do que a corrente nominal das fases, o que acaba necessitando de uma seção transversal maior para o neutro para que não haja o aquecimento do condutor e um consequente rompimento. Já as harmônicas de sequência negativa causam o aquecimento de equipamentos como o motor, pois essa categoria de harmônicos induz um campo magnético no sentido contrário a rotação do motor e geram o fenômeno da frenagem para esse tipo de equipamento.

No que diz respeito à regulação por parte da ANEEL a respeito dos harmônicos na rede da concessionária, é proposto a avaliação de nove indicadores de distorção harmônica. São eles:

$DIT_h\%$: Podemos entender esse indicador como sendo a relação percentual entre a amplitude da componente harmônica de ordem h e a amplitude da componente fundamental. A norma apresenta a Equação (6) para esse indicador:

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} * 100[\%] \quad (6)$$

Normalmente esse indicador é apresentado explicitamente pelo *software* que faz a coleta dos dados.

DTT%: O entendimento baseado na norma brasileira que o estabelece é que esse indicador é a relação percentual entre o somatório quadrático do valor de todas as componentes harmônicas e o valor da componente fundamental. Utilizando a Equação (7) fornecida pelo PRODIST tem-se:

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} * 100[\%] \quad (7)$$

DTT_p%: Esse indicador realiza um filtro que considera apenas as componentes harmônicas pares que não são múltiplos de 3, ($h = 2,4,8,10,14,16,20,22,26, \dots$) excluindo assim os harmônicos com características de sequência zero. Para este caso, a norma apresenta a Equação (8) como forma de calcular o indicador DTT_p%.

$$DTT_p\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} * 100[\%] \quad (8)$$

Ocasionalmente pode ser necessário aplicar manualmente a Equação (8), haja vista que existem equipamentos que não fazem esse cálculo automaticamente.

DTT_i%: O indicador em questão utiliza apenas as harmônicas ímpares que contribuem para as características de sequência positiva e negativa ($h = 5,7,11,13,17,19,23,25, \dots$). O PRODIST trás a equação (9) para o cálculo deste indicador:

$$DTT_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_h^2}}{V_1} * 100[\%] \quad (9)$$

Para a aquisição dessa métrica pode ser necessário a aplicação manual da Equação (9) para encontrar o indicador em questão.

DTT₃%; Este indicador possibilita filtrar todas as harmônicas múltiplas de 3 ($h = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, \dots$). Dessa forma, podemos quantificar com mais precisão a contribuição das harmônicas do sistema que geram a circulação de corrente no condutor neutro. Para a aquisição desse indicador utiliza-se a Equação (10):

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} * 100[\%] \quad (10)$$

Não há limite para esse indicador e, além disso, para a aquisição dessa métrica pode ser necessário a aplicação manual da Equação (10) para encontrar o indicador proposto.

DTT95%; DTT_p95%; DTT_i95% e DTT₃95%: Estes indicadores estatísticos determinam que apenas 5% das amostras podem ultrapassar o limite previsto na Tabela 2.2. Esse limite é estabelecido de acordo com o nível de tensão na qual o harmônico acontece.

Tabela 2.2 - Limites das distorções harmônicas totais de tensão

	Vn ≤ 2,3 kV	2,3 kV < Vn < 69 kV	69 kV ≤ Vn < 230kV
DTT95%	10%	8%	5%
DTT _p 95%	2,5%	2%	1%
DTT _i 95%	7,5%	6%	4%
DTT ₃ 95%	6,5%	5%	3%

Fonte: ANEEL (2021)

2.4. Desequilíbrio de Tensão

Em toda rede trifásica, é necessário realizar o levantamento do quão desequilibrada a rede está para que seja possível identificar possíveis fases sobrecarregadas. A ANEEL (2021) define que o desequilíbrio de tensão é o fenômeno caracterizado por qualquer diferença nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema.

A inserção de cargas monofásicas nos sistemas de distribuição é uma das principais causas de desequilíbrio de tensão. A predominância de cargas monofásicas em baixa tensão dificulta o equilíbrio de cargas pelas concessionárias. Consequentemente, o PRODIST define metodologias para calcular e estabelecer limites para o desequilíbrio de tensão nos sistemas de distribuição das concessionárias.

A Equação (11) é o método principal utilizado para calcular o indicador de desequilíbrio de tensão (ANEEL, 2021). Esse cálculo baseia-se na razão entre a magnitude da tensão eficaz de sequência negativa e a magnitude da tensão eficaz de sequência positiva, ambas medidas na frequência fundamental.

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} * 100[\%] \quad (11)$$

Quando a medição das tensões de sequência positiva e negativa não for viável, a norma permite o cálculo do desequilíbrio de tensão utilizando as tensões de linha do sistema. A Equação (12) é a alternativa indicada pelo PRODIST (2021) para este cálculo do indicador de desequilíbrio de tensão.

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (12)$$

Em que β é dado pela Equação (13).

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (13)$$

Para o indicador de desequilíbrio de tensão, a norma estabelece que apenas 5% das amostras podem exceder o limite definido na Tabela 2.3. Este limite varia de acordo com o nível de tensão em que o desequilíbrio ocorre.

Tabela 2.3 - Limites para o indicador de desequilíbrio de tensão

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

Fonte: ANEEL (2021)

Se mais de 5% das amostras excederem o limite estabelecido, a concessionária deve implementar medidas para corrigir a situação e reestabelecer a tensão adequada, evitando interrupções em cargas sensíveis e impactos negativos em outros indicadores com DRC e DRP.

2.5. Variação de Frequência

A Resolução Normativa ANEEL nº 1030/2022, aplicável a fontes despacháveis, estabelece que a frequência do sistema é influenciada pela variação das cargas conectadas as redes do Sistema Interligado Nacional – SIN. Em termos práticos, a frequência diminui com o aumento da carga de forma que o oposto é verdadeiro.

Para centrais geradoras que não são despacháveis utiliza-se o PRODIST como balizador para o tema. Nele afirma-se que, o sistema de distribuição e as instalações de geração devem operar entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. Em casos de distúrbios, a legislação permite que a frequência deva retornar à faixa de 59,5 Hz à 60,5 Hz em até 30 segundos. Devido à necessidade de reestabelecer o equilíbrio carga-geração durante os distúrbios, pode ser necessários cortes de geração ou carga, com a frequência máxima de 66 Hz e mínima de 56,5 Hz em condições extremas. Além disso, a frequência pode exceder 62 Hz por até 30 segundos e 63,5 Hz por até 10 segundos, ou ficar abaixo de 58,5 Hz por até 10 segundos e 57,5 Hz por até 5 segundos.

O monitoramento em tempo real da frequência do sistema elétrico brasileiro é realizado pelo ONS, sendo ele o responsável por controlar o despacho das fontes de energia firmes, como termelétricas, hidroelétricas e nucleares.

Dessa forma, fica a cargo da distribuidora o controle da frequência, usando como base o Esquema Regional de Alívio de Carga – ERAC que é regido pelos Procedimentos de rede – Módulo 5 – Submódulo 5.12. Quanto aos consumidores finais não vos cabem responsabilidade de controlar as variações de frequência que ocorrem constantemente no SIN..

3. MATERIAL E MÉTODOS

O presente capítulo tem como objetivo detalhar a metodologia empregada na aquisição de dados, bem como apresentar as características intrínsecas das instalações elétricas e da usina solar fotovoltaica do IFPE *Campus* Garanhuns. Além disso, será descrita como foi realizada a coleta de dados. A fim de garantir a reprodutibilidade e a validação dos resultados obtidos, cada um dos tópicos mencionados será explorado de forma detalhada a seguir.

3.1. Usina Solar do Campus Garanhuns

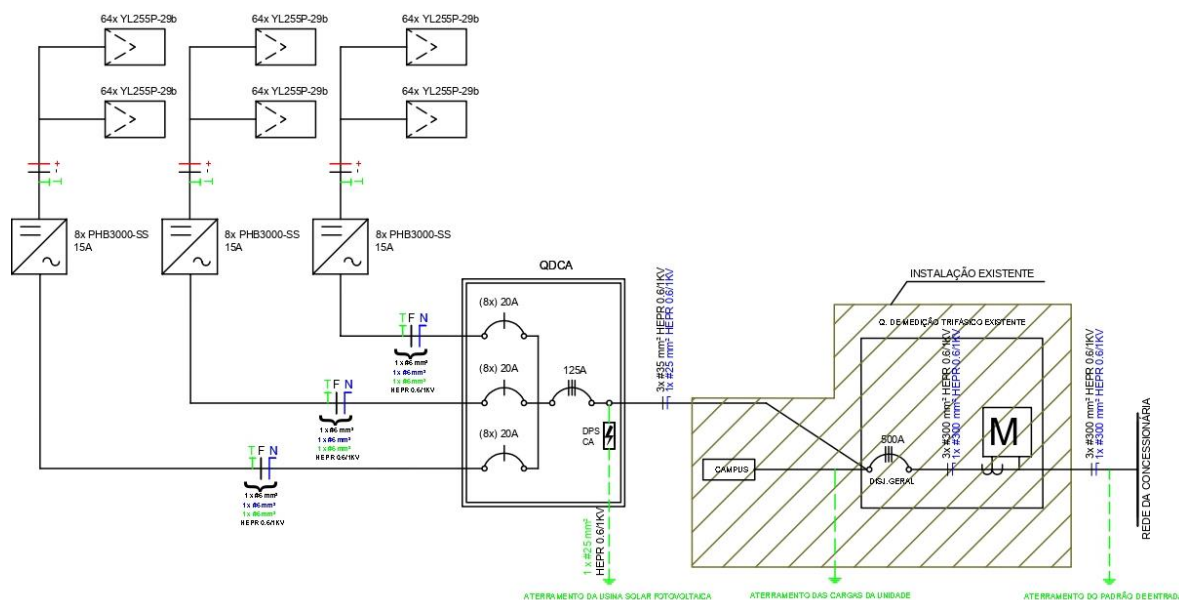
A usina solar do *Campus* Garanhuns foi conectada à rede pela concessionária de energia local em 29 de março de 2021. Além de suprir parte da demanda energética do *Campus*, essa iniciativa visa fornecer subsídios valiosos para pesquisas e atividades acadêmicas. A usina funciona como um laboratório a céu aberto, proporcionando aos estudantes conhecimentos práticos sobre energias renováveis, sistemas elétricos, instalações elétricas e sustentabilidade.

O curso de graduação em Engenharia Elétrica, assim como os cursos técnicos em Eletroeletrônica e Meio Ambiente, são diretamente beneficiados por essa infraestrutura. Na comunidade, a usina exerce um papel social relevante, contribuindo para a redução da pegada de carbono e promovendo uma cultura de responsabilidade ambiental e inovação tecnológica. Esses pilares são fundamentais para formar profissionais comprometidos com o desenvolvimento sustentável da sociedade.

Com uma capacidade instalada de 97,92 kWp e com a geração sendo limitada pelos inversores que possui uma potência total de 72 kW, a usina se enquadra na categoria de microgeração distribuída segundo a lei nº 14300 (BRASIL, 2022). Sua potência total é proveniente de 24 inversores monofásicos de 3 kW cada, operando em paralelo à rede elétrica. Cada inversor é alimentado por duas *strings*, compostas por oito módulos fotovoltaicos conectados em série. A usina ocupa uma área aproximada de 627 m².

O diagrama unifilar apresentado na Figura 3.1 ilustra a conexão da usina solar à rede elétrica da concessionária.

Figura 3.1 - Diagrama Unifilar da Usina Fotovoltaica



Fonte: Autoria Própria

Essa configuração em paralelo com a rede de distribuição permite que os 24 inversores sincronizem suas saídas com a tensão da concessionária. O sinal de tensão da rede serve como referência para os sistemas de controle dos inversores, assegurando a estabilidade da operação e prevenindo a ocorrência de ilhamento do sistema fotovoltaico.

3.1.1. Inversor Fotovoltaico

Para converter a energia gerada pelos painéis solares em corrente alternada e injetá-la na rede elétrica de forma sincronizada, a usina utiliza inversores monofásicos PHB3000-SS, fabricados pela empresa brasileira PHB. A Tabela 3.1 apresenta as especificações técnicas básicas do inversor utilizado pela usina do *Campus*.

Tabela 3.1 - Especificações técnicas básicas do inversor PHB3000-SS

Máxima Potência CC	3200 W
Máxima Potência CA	3000 W
Máxima Tensão CC	500 V
Faixa de Operação (MPPT)	125~450 V
Máxima Corrente CC	18 A
Máxima Corrente CA	15 A
Número de <i>Strings</i> em Paralelo	2
Saída Nominal CA	60Hz; 220Vca
Faixa de Operação CA	57.5~62Hz; 176~242Vca
THD	<5%
Fator de Potência	1
Comunicação	USB2.0 e RS485

Fonte: PHB Eletrônica (2021)

O inversor PHB3000-SS apresenta um *overload* de 6,67%. Além disso, o inversor possui a capacidade de variar sua tensão de saída entre 80% e 110% da tensão nominal, permitindo acompanhar as flutuações da tensão e frequência da rede elétrica, bem como ajustar a potência de entrada das *strings*. Hoje, no mercado já é possível encontrar inversores que suportam um *overload* de 100% e uma variação de tensão da rede elétrica de $\pm 20\%$, isso tudo com uma taxa de distorção harmônica <3%.

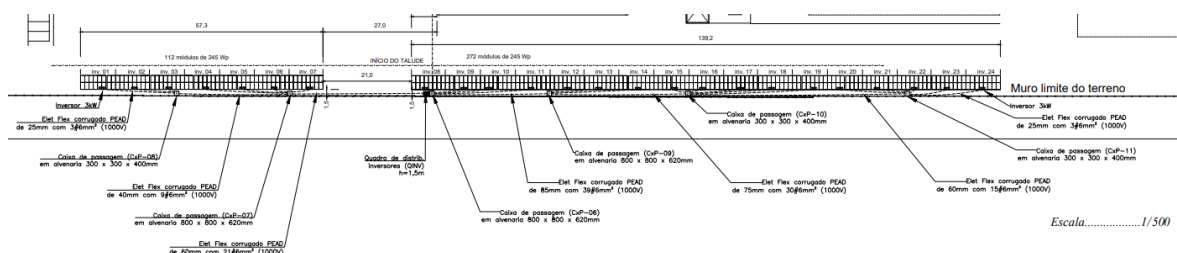
Quanto à comunicação e monitoramento, o inversor dispõe de uma porta USB2.0, possibilitando a conexão a um computador para visualização e configuração dos parâmetros de operação de forma local. Além disso, o inversor é compatível com o protocolo Modbus RS485, permitindo a integração de múltiplos inversores em uma rede de comunicação local. No entanto, a ausência de compatibilidade com protocolos Ethernet e Wi-Fi limita a possibilidade de monitoramento remoto da usina em tempo real por meio de uma plataforma específica, dificultando a identificação de falhas e a otimização da manutenção.

Para maiores informações a respeito do inversor, é apresentado um link no anexo do trabalho que direciona para o *datasheet* completo do equipamento.

3.1.2. Módulo Fotovoltaico

A usina fotovoltaica, com capacidade total de 97,92 kWp, utiliza 384 módulos solares Yingli YL255P-29b de 255 Wp cada. Esses módulos estão instalados em uma estrutura de aço galvanizado e dividido em dois setores, como ilustra a Figura 3.2. Em conjunto com os inversores (apresentados anteriormente), os módulos convertem a energia solar em eletricidade.

Figura 3.2 - Planta baixa da usina solar do campus Garanhuns

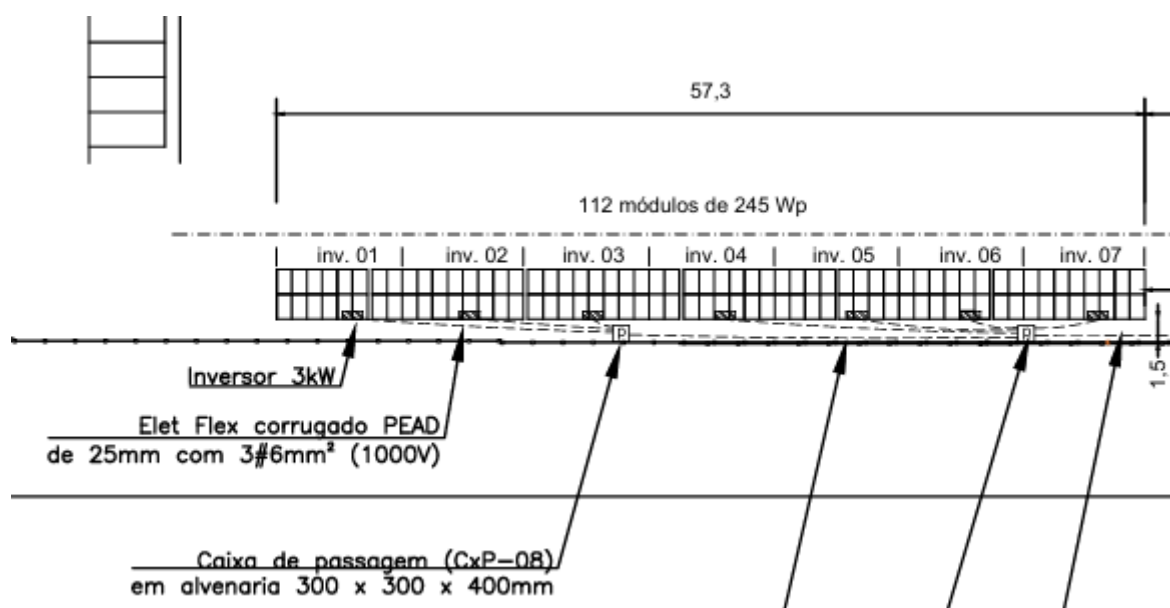


Fonte: Adaptação de Pedrosa Filho (2017)

- O setor a esquerda, conta com 112 módulos que alimentam 7 inversores, ocupando uma área de 182,95 m².
- O setor a direita, conta com 272 módulos que alimentam 17 inversores ocupando uma área de 444,31 m².

A divisão da usina em dois setores distintos proporciona maior facilidade de acesso para a realização de manutenções na parte elétrica e mecânica da usina, além de otimizar a realização de atividades didáticas, como aulas práticas sobre energia solar, que ocorrem regularmente no local. Na Figura 3.3, em complemento a Figura 3.2, mostra em detalhe como foi projetado um dos setores da usina do *Campus*.

Figura 3.3 - Vista ampliada do setor esquerdo da usina



Fonte: Adaptação de Pedrosa Filho (2017)

A Tabela 3.2 apresenta as especificações técnicas básicas do módulo fotovoltaico utilizado na usina, considerando as condições padrão de teste (STC). É importante ressaltar que qualquer alteração nessas condições resultará em valores de desempenho diferentes.

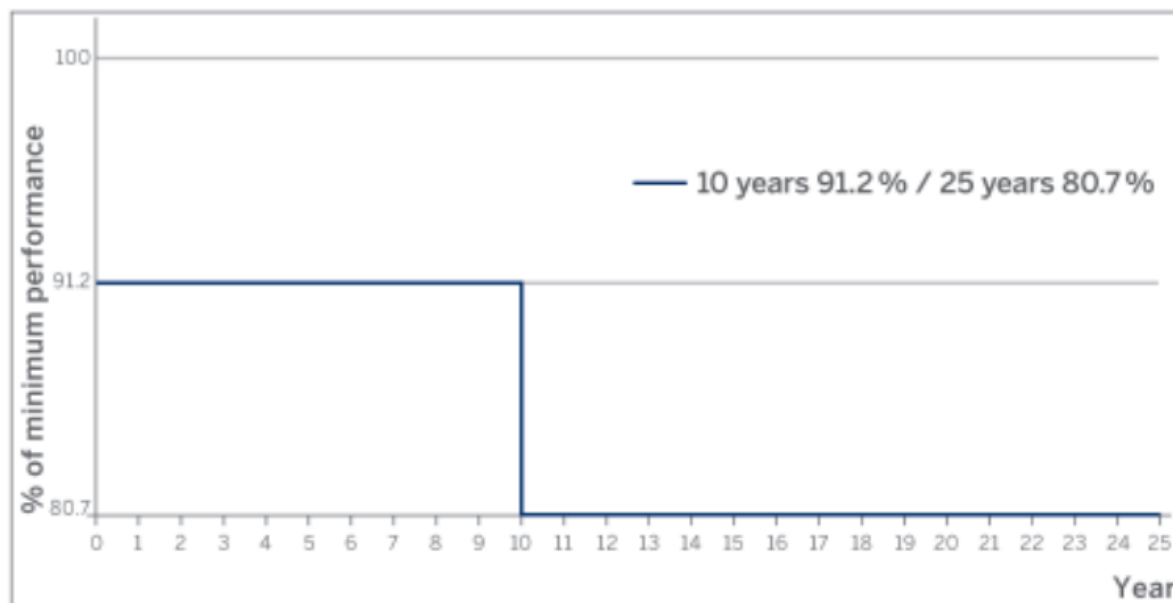
Tabela 3.2 - Especificações técnicas básicas do módulo YL255P-29b

Tensão Nominal	30,6 V
Tensão de Circuito Aberto	38,7 V
Corrente Nominal	8,32 A
Corrente de Curto-Circuito	8,88 A
Eficiência do Módulo	15,6 %
Dimensões	40x990x1650 mm
Peso	19,1 Kg

Fonte: Yingli Corporation (2013)

Conforme o *datasheet* do módulo em anexo, a curva de desempenho mínimo esperado ao longo da vida útil do equipamento é apresentada abaixo. Essa curva considera a degradação natural da potência de geração, estimada em 0,772% ao ano. A Figura 3.4 ilustra a curva de degradação da potência do módulo.

Figura 3.4 - Degradação natural da potência do modulo Yingli YL255P-29b



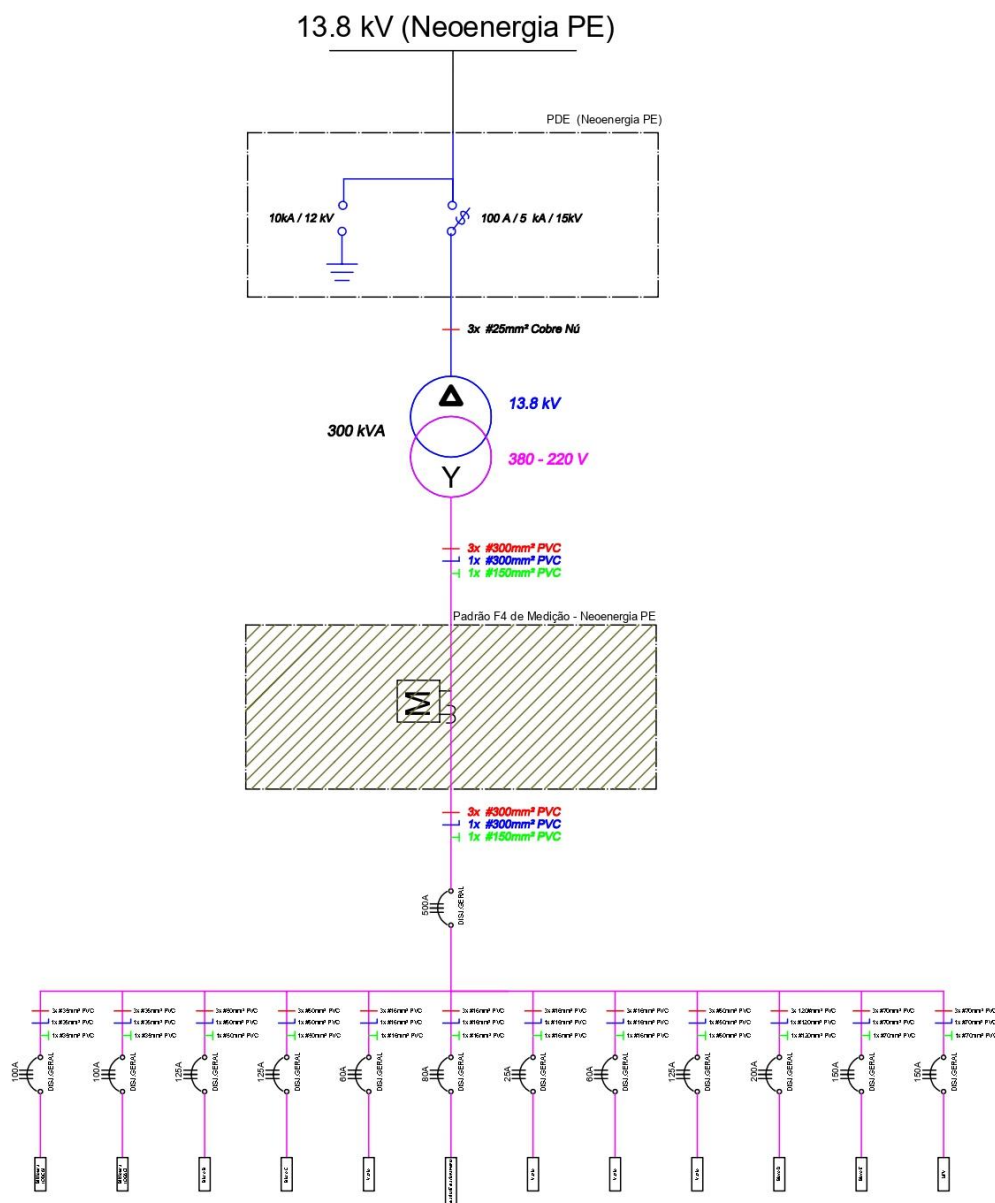
Fonte: Yingli Corporation (2013)

Analisando a Figura 3.4 e sabendo que os módulos já funcionam há 4 anos, pode-se estimar uma perda de cerca de 3,1% na potência máxima, considerando as condições de teste padrão.

3.2. Rede Elétrica do *Campus*

O *Campus* Garanhuns possui um transformador de 300 kVA, atualmente ele é suficiente para atender toda demanda energética da instituição. A instalação conta com um sistema de telemedição indireta, típico em sistemas dessa potência, e possui uma demanda contratada de 80 kW junto à concessionária de energia. A proteção geral do quadro geral de distribuição (QGD) é constituída por um disjuntor do tipo caixa moldada de 500 A, a partir do qual se ramificam 12 circuitos que alimentam os diversos pontos de consumo dentro do *Campus*. A Figura 3.5 apresenta o diagrama unifilar do sistema elétrico, ilustrando a conexão entre a concessionária de energia e o *Campus* por meio de uma linha aérea de 13,8 kV.

Figura 3.5 - Diagrama unifilar do QDG do campus



Fonte: Autoria própria

O diagrama mostra a transformação da tensão para níveis de baixa tensão e a alimentação de todas as cargas do *Campus*. A seguir, serão detalhados os 12 circuitos apresentados no diagrama unifilar da Figura 3.5.

Circuito 1 – Biblioteca (QDCA): Este barramento alimenta os circuitos de iluminação de todos os ambientes da biblioteca, incluindo a iluminação externa e dos postes da praça do *campus*, além das tomadas de uso geral. O circuito é protegido por um disjuntor tripolar do tipo caixa moldada de 100 A no QGD e por um mini

disjuntor tripolar de 80 A no QDCA da biblioteca, que alimenta 26 circuitos. A Tabela 3.3 detalha os circuitos, suas respectivas cargas e os ambientes atendidos.

Tabela 3.3 - Cargas conectadas ao QDCA da Biblioteca do campus

Circuito	Carga	Ambiente
1	Iluminação	Bibliotecário Reunião
2	Iluminação	WC Fun Masc/Fem DML Copa Arquivo Corredor 1
3	Iluminação	Proc Hig Deposito Info Arandela Corredor 2
4	Iluminação	Corredor 3
5	Iluminação	Acervo Multimídia Acervo Geral
6	Iluminação	WC Aluno Masc/Fem Sala de Grupos 1 – 4
7	Iluminação	Cabines Individuais Sala de Leitura Exibição
8	Tomadas	Auditório
9	Tomadas	WC Fun Masc/Fem DML Copa
10	Tomadas	Bibliotecário Reunião Arquivo Corredor 1
11	Tomadas	Processamento Higienização Deposito
12	Tomadas	Corredor 2 Corredor 3
13	Tomadas	Informática
14	Tomadas	Acervo Multimídia Acervo Geral
15	Tomadas	WC Aluno Masc/Fem
16	Tomadas	Salas de Grupos 1 – 4
17	Tomadas	Sala de Exibição
18	Tomadas	Sala de Leitura
19	Tomadas Teto	Arquivo Sala de Áudio e Vídeo Info GR Corr 2 e 3
20	Tomadas	Corredores 1 e 3
21	Tomadas	Câmeras
22	Tomadas	Postes (Iluminação Interna)
23	Tomadas	Iluminação de Emergência
24	Tomadas	Cabines Individuais
25	Tomadas	Acervo Multimídia
26	Tomadas	Rack

Fonte: Autoria própria

Circuito 2 – Biblioteca (QGAC): A biblioteca possui um barramento exclusivo (QGAC) para alimentar seus sistemas de ar-condicionado. Este circuito é protegido no QGD por um disjuntor do tipo caixa moldada de 100 A e um disjuntor geral localizado no QGAC de 80 A, a partir do qual se ramificam 24 circuitos. A Tabela 3.4 apresenta o detalhamento desses circuitos, a carga que o respectivo circuito alimenta e o ambiente onde está localizada a carga.

Tabela 3.4 - Cargas conectadas ao QGAC da Biblioteca do campus

Circuito	Carga	Ambiente
1	Evaporadora	Atendimento
2	Condensadora	Acervo Geral
3	Evaporadora	Sala de Estudos Individuais
4	Condensadora	Acervo Geral
5	Condensadora	Sala de Leitura
6	Condensadora	Acervo Geral
7	Condensadora	CRAT
8	Condensadora	Sala dos Professores
9	Evaporadora	Sala de Estudos em Grupo 4
10	Evaporadora	Sala de Estudos em Grupo 3
11	Evaporadora	Sala de Estudos em Grupo 2
12	Condensadora	Sala de Estudos em Grupo 3
13	Evaporadora	Sala de Estudos em Grupo 1
14	Evaporadora	Acervo Multimídia
15	Condensadora	Auditório
16	Condensadora	Sala de Estudos Individuais
17	Condensadora	Sala de Estudos em Grupo 4
18	Evaporadora	Recepção
19	Evaporadora	Higienização
20	Condensadora	Auditório
21	Condensadora	Bibliotecário
22	Evaporadora	Diretoria Reunião
23	Evaporadora	Bibliotecário
24	Condensadora	Acervo Multimídia

Fonte: Autoria própria

Circuito 3 – Bloco B: O barramento deste bloco é responsável pela alimentação dos circuitos elétricos que suprem a iluminação, as tomadas de uso geral e as tomadas de uso específico deste bloco. A proteção de desse barramento é feita por um disjuntor geral em seu QDCA de 125 A e outro, de mesmo valor, no QGD do *campus*. A partir do QDCA, são alimentados 30 circuitos, detalhados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Cargas conectadas ao QGBT do Bloco B do campus

Circuito	Carga	Ambiente
1	Iluminação	Salas de Aula 1 à 3
2	Vazio	-
3	Iluminação	Salas de Aula 4 à 6
4	Iluminação	Salas de Aula 7 à 9
5	Tomadas	Salas de Aula 4 à 9
6	Tomadas	Salas de Aula 1 à 3
7	Iluminação	Emergência
8	Ar-Condicionado	Sala de Aula 3
9	Ar-Condicionado	Sala de Aula 2
10	Tomadas	Laboratório 4 – Circuito 1
11	Tomadas	Laboratório 4 – Circuito 2
12	Tomadas	Laboratório 4 – Circuito 3
13	Tomadas	Laboratório 4 – Circuito 4
14	Tomadas	Laboratório 4 – Circuito 5
15	Bomba d'água	Caixa d'água
16	Ar-Condicionado	Sala de Aula 1
17	Vazio	-
18	Vazio	-
19	Tomadas	Sala de Aula 10 à 12
20	Ar-Condicionado	Sala de Aula 4
21	Ar-Condicionado	Sala de Aula 5
22	Ar-Condicionado	Sala de Aula 6
23	Ar-Condicionado	Sala de Aula 7
24	Ar-Condicionado	Sala de Aula 8

25	Ar-Condicionado	Sala de Aula 9
26	Ar-Condicionado	Sala de Aula 10
27	Ar-Condicionado	Sala de Aula 11
28	Ar-Condicionado	Sala de Aula 12
29	Vazio	-
30	Iluminação	Circulação

Fonte: Autoria própria

Circuito 4 – Bloco C: As salas do bloco administrativo são alimentadas por um barramento que supre os circuitos de iluminação, tomadas de uso geral e específico de seus ambientes. A proteção desse circuito é feita por um disjuntor do tipo caixa moldada de 125 A no QGD e outra, de mesmo valor, no QDCA do prédio. A partir do QDCA, a energia elétrica é distribuída para 32 circuitos, detalhados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Cargas conectadas ao QGBT do Bloco C do campus

Circuito	Carga	Ambiente
1	Iluminação	Data Center Ponto AUDI GDCG Copa WC DGCG Sala de Reunião
2	Iluminação	WC Servidores Copa DAP CCLI CTMA CGPE CGTI
3	Iluminação	DEN NAPNE Sala dos Servidores
4	Iluminação	CAEE
5	Iluminação	Circulação WC Alunos
6	Tomadas	Data Center Ponto AUDI GDCG Copa WC DGCG Sala de Reunião
7	Tomadas	DAP CCLI CTMA CGPE CGTI
8	Tomadas	Copa
9	Tomadas	DEN NAPNE Sala dos Servidores
10	Tomadas	Sala de Pesquisa DPESQ CAEE PSIC
11	Ar-Condicionado	Sala de Reunião GDCG
12	Vazio	-
13	Tomadas	Sala de Pesquisa
14	Tomadas	Sala de Pesquisa
15	Ar-Condicionado	Data Center
16	Ar-Condicionado	Data Center
17	Ar-Condicionado	Data Center

18	Ar-Condicionado	DPESQ
19	Ar-Condicionado	ASPE
20	Ar-Condicionado	ASCE
21	Chuveiro	DGCG
22	Ar-Condicionado	Data Center
23	Ar-Condicionado	CGTI
24	Ar-Condicionado	CGPE
25	Ar-Condicionado	CTMA
26	Ar-Condicionado	CCLI
27	Ar-Condicionado	DAP
28	Ar-Condicionado	DEN
29	Ar-Condicionado	PSIC
30	Ar-Condicionado	CAEE
31	Ar-Condicionado	Sala dos Servidores
32	Ar-Condicionado	DIEX

Fonte: Autoria própria

Circuito 5 – Guarita/Estacionamento: Este barramento alimenta a iluminação externa do *campus* e as tomadas da guarita. A proteção é feita por um disjuntor do tipo caixa moldada de 80 A e a jusante no QDCA na guarita, outro de 63A. Do QDCA saem 9 circuitos, detalhados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Cargas conectadas ao QGBT da guarita do campus

Circuito	Carga	Ambiente
1	Tomadas	Guarita
2	Iluminação	Entrada Guarita
3	Iluminação	Lateral Direita – Circuito 1
4	Iluminação	Lateral Esquerda – Circuito 1
5	Iluminação	Estacionamento Externo
6	Iluminação	Lateral Esquerda – Circuito 2
7	Iluminação	Lateral Direita – Circuito 2
8	Iluminação	Passarela
9	Vazio	-

Fonte: Autoria própria

Circuito 6 – Bloco D: O bloco dos laboratórios é alimentado por um barramento que supre os circuitos de iluminação, tomadas de uso geral e específico. A proteção deste circuito é garantida por um disjuntor do tipo caixa moldada de 200A, localizado no QDCA do respectivo bloco, encontra-se um disjuntor de 125 A, que atua como disjuntor geral. A partir do QDCA, a energia é distribuída por 37 circuitos, detalhados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Cargas conectadas ao QGBT do Bloco D do campus

Circuito	Carga	Ambiente
1	Iluminação	Almoxarifado CPMA Sala dos Terceirizados
2	Iluminação	Laboratório 5 e 8
3	Iluminação	Laboratório 6 e 7
4	Iluminação	Laboratório 9 e 10
5	Iluminação	Laboratório 1 e 11
6	Iluminação	Laboratório 2 e 3
7	Iluminação	Circulação Luzes de Emergências
8	Tomadas	CPMA
9	Tomadas	CPMA
10	Tomadas	CPMA
11	Tomadas	Laboratório 8 CPMA
12	Tomadas	Laboratórios 4 a 7
13	Tomadas	Laboratórios 4 a 7
14	Tomadas	Laboratório 9
15	Tomadas	Laboratório 10
16	Tomadas	Laboratório 11
17	Tomadas	Laboratório 4
18	Tomadas	Laboratório 4
19	Tomadas	Laboratório 5
20	Tomadas	Laboratório 5
21	Tomadas	Laboratório 6
22	Tomadas	Laboratório 6

23	Ar-Condicionado	Laboratório 7
24	Vazio	-
25	Ar-Condicionado	Laboratório 8
26	Ar-Condicionado	CPMA
27	Ar-Condicionado	CPMA
28	Ar-Condicionado	CPMA
29	Ar-Condicionado	Laboratório 2
30	Ar-Condicionado	Laboratório 1
31	Ar-Condicionado	Laboratório 11
32	Ar-Condicionado	Laboratório 10
33	Ar-Condicionado	Laboratório 9
34	Ar-Condicionado	Laboratório 4
35	Ar-Condicionado	Laboratório 5
36	Ar-Condicionado	Laboratório 6
37	Ar-Condicionado	Laboratório 3

Fonte: Autoria própria

Circuito 7 - Bloco E: Devido a modularidade do prédio, que se adapta às necessidades do *Campus*, a identificação precisa dos circuitos não é possível. Porém, o barramento do QDCA tem um disjuntor de 125 A e no QGD encontra-se outro disjuntor do tipo caixa moldada de 150 A. Dessa forma é possível alimentar os 15 circuitos que existem nesse quadro.

Circuito 8 – Usina Solar: Esse barramento é responsável por injetar a energia gerada pela usina à rede elétrica do *campus*. Ele é protegido por um disjuntor de 150 A no QGD. No QDCA da usina, um disjuntor de 125 A protege os circuitos dos inversores.

Circuitos vazios: O QGD apresenta 4 circuitos ainda não utilizados, o que possibilita futuras ampliações das instalações elétricas sem a necessidade de realizar adaptações ou expansões no próprio quadro.

No apêndice B deste trabalho encontram-se as fotografias dos quadros de distribuição do *Campus*, incluindo o QGD com o analisador de energia. É importante destacar que podem ocorrer discrepâncias entre os dados apresentados nas tabelas

dos circuitos e as informações contidas nas etiquetas dos QDCAs, devido a modificações na ocupação dos espaços e realocações de ambientes.

3.3. Analisador de Energia

A fim de coletar os dados para o cálculo dos indicadores de qualidade de energia, detalhados no capítulo 4 deste trabalho, foi utilizado o analisador de energia MINIPA ET-5051C. A Figura 3.6 apresenta o equipamento utilizado.

Figura 3.6 - Analisador de energia MINIPA ET-5051C



Fonte: MINIPA (2014)

Este analisador permite a medição de tensão, corrente, potências ativa, aparente e reativa, energias ativas e reativa, harmônicos, registra eventos transitórios como quedas de tensão, sobretensões e interrupções. Além disso, é compatível com sistemas elétricos monofásicos, bifásicos e trifásicos. As especificações técnicas detalhadas do equipamento encontra-se no anexo do trabalho.

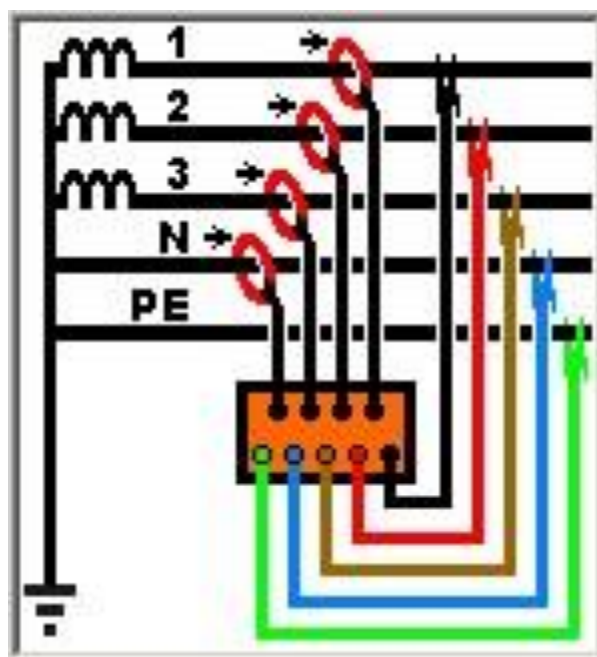
Esse equipamento permite a amostragem de todo escopo de anomalias de qualidade de energia elétrica indicadas no PRODIST, necessitando para isso de uma quantidade de memória considerável. Por se tratar de um equipamento cedido, tinha uma quantidade de memória já usada por medições de terceiros e dessa forma limitou o espaço disponível para a aquisição dos dados.

3.3.1. Conexão do Analisador de Energia

O analisador em questão dispõe de uma variedade de modos de medição e emprega um conjunto de até cinco garras para a aquisição dos dados de tensão. A medição de corrente é realizada por meio de até quatro anéis transdutores, os quais podem ser conectados ao equipamento. Com base no diagrama unifilar apresentado

na Figura 3.5, que ilustra a alimentação do *Campus* em baixa tensão através de um sistema trifásico em estrela com o neutro aterrado, foi escolhida a configuração de ligação detalhada no diagrama multifilar da Figura 3.7.

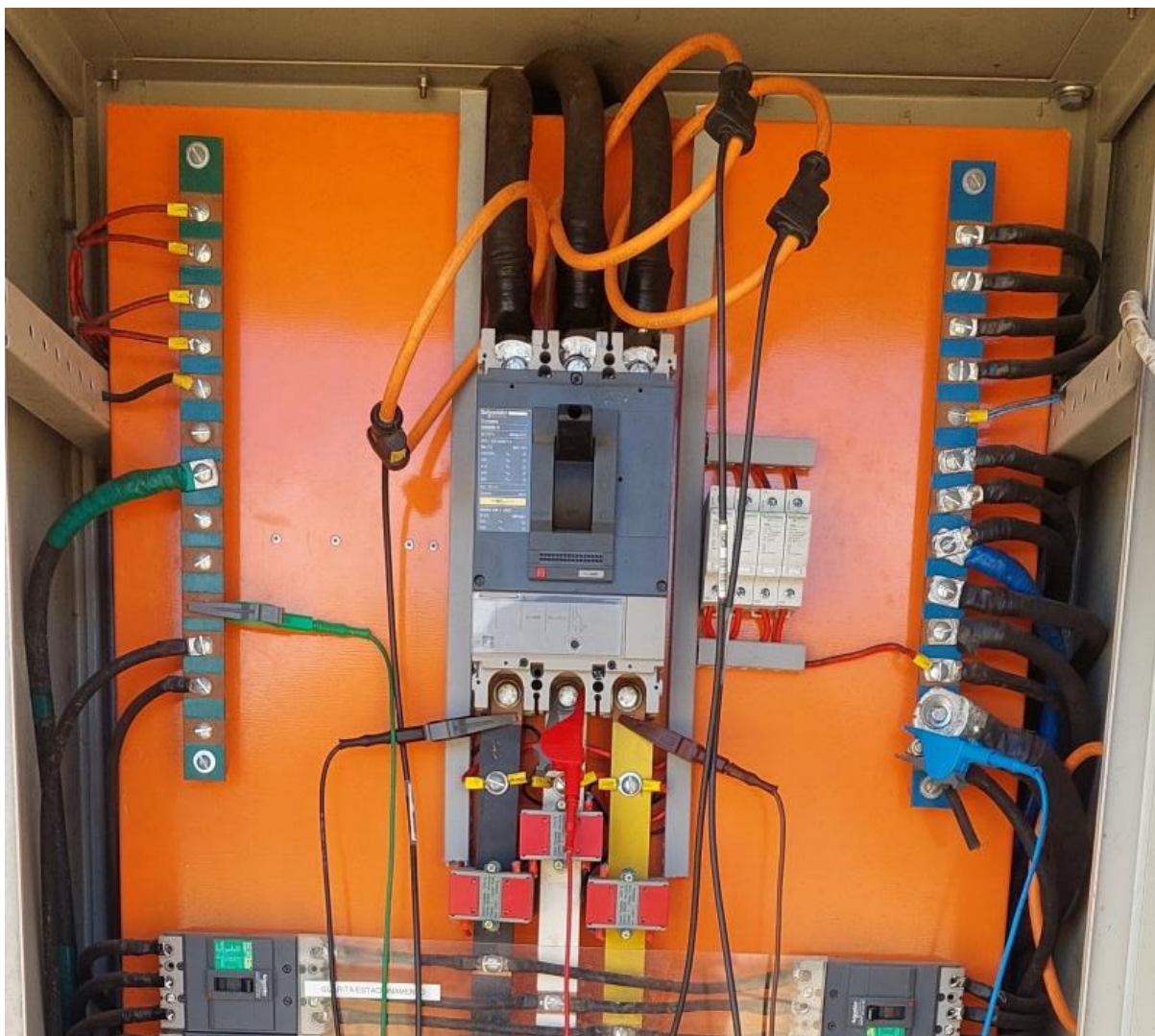
Figura 3.7 - Diagrama multifilar usada no analisador de energia



Fonte: MINIPA (2014)

A configuração de medição selecionada possibilitou a coleta de todos os dados indispensáveis para a avaliação dos indicadores de qualidade de energia. A imagem da Figura 3.8 apresenta, de forma destacada, a conexão das garras de tensão e dos anéis transdutores de corrente, seguindo o diagrama multifilar apresentado na Figura 3.7.

Figura 3.8 - Montagem do analisador junto ao QGD



Fonte: Autoria própria

Após a instalação do analisador, houve a aquisição dos primeiros dados às 15h50min do dia 07/12/2023. Em conformidade com a norma técnica vigente, foi utilizado um período de integração de 10 minutos para a coleta de 1008 amostras, necessárias para o cálculo de todos os indicadores de qualidade de energia. A última amostra foi coletada às 15h50min do dia 14/12/2023.

Em virtude da instalação do analisador de energia no QGD do *Campus*, foi possível capturar apenas o fluxo de energia excedente injetado na rede da concessionária. A instalação do analisador de energia no QDCA da usina, que permitiria a análise da geração total antes do consumo simultâneo das cargas do *Campus*, não foi viabilizada devido à indisponibilidade de um local adequado para proteger o analisador. Além disso, a análise dos indicadores de qualidade de energia

com a usina desligada, a fim de realizar uma comparação com a usina ligada, não foi possível devido às implicações financeiras envolvidas.

3.3.2. Tratamento dos Dados

A análise dos dados adquiridos pelo analisador de energia foi realizada por meio do *software Topview*, disponibilizado pelo fabricante do equipamento. Foram coletadas um total de 1008 amostras dos seguintes dados:

- Tensão: de linha, de fase e média, além da frequência da rede. Com base nesses dados, foram calculados os indicadores DRC e DRP através de uma planilha e a variação de frequência que foi dada pelo *software* do fabricante do analisador.
- Corrente: em cada fase e no neutro. Esses dados foram utilizados para avaliar o carregamento das fases e a corrente no neutro.
- Potência/Energia Ativa: potência e energia ativa consumida pela carga, potência e energia ativa injetada pela usina e o balanço energético do sistema carga-geração.
- Potência/Energia reativa: potência e energia reativa indutiva e capacitiva, tanto da carga conectada ao sistema quanto da energia injetada pela usina, além do balanço de energia reativa média.
- Potência/Energia aparente: Os dados desse conjunto englobam a potência e energia aparentes da carga e da usina solar.
- Harmônicos de Tensão: Para análise dos harmônicos de tensão foi utilizado uma planilha que realizou o cálculo da distorção harmônica total (DHT) para cada fase e para o neutro, bem como das distorções individuais de ordem ímpar até a 50^a harmônica, devido à limitação de memória do equipamento. Com base nos dados, foram calculados também por planilha os indicadores: DHT, DHT95%, DTT₃, DTT₃95%, DTT_i e DTT_i95%.
- Harmônicos de Corrente: Foram coletados os dados dos harmônicos de corrente até a 50^a harmônica ímpar. Os harmônicos pares não foram coletados devido à limitação de memória do equipamento. Esses dados foram utilizados para caracterizar a carga, mas não entraram nos cálculos dos indicadores.

- Desequilíbrio de Tensão: O indicador de desequilíbrio de tensão foi determinado automaticamente pelo *software* do fabricante do equipamento, utilizando para isso os dados da tensão de sequência positiva e negativa calculado internamente pelo analisador, assim seguindo a determinação principal do PRODIST para aquisição desse indicador.
- Fator de Potência: Para a aquisição desse indicador, o analisador foi configurado para que fosse medido o fator de potência da rede da distribuidora, e da usina fotovoltaica. O equipamento utilizado permitiu a aquisição direta deste indicador sem a necessidade da aplicação das equações indicadas no PRODIST, porém internamente o analisador utiliza as potências ativa e reativa medida nos cenários citados para trazer os indicadores com a devida precisão.

Para cada um dos dados coletados, foram obtidos os valores médio, mínimo absoluto e máximo absoluto durante o período de integração. Para os cálculos dos indicadores e para a apresentação dos dados por gráfico foram utilizados os valores médios dos dados.

O *software* possibilitou a organização dos dados coletados que puderam ser exportados para um arquivo .csv e dessa forma foi possível realizar os cálculos e a visualização das curvas e limites dos indicadores, como será apresentado no capítulo 4, dessa forma permitindo uma análise visual da evolução temporal desses dados.

Para o cálculo dos indicadores foram aplicadas as equações previstas em norma e utilizado os respectivos conjuntos de dados para a obtenção dos resultados esperados. Na seção seguinte são apresentados e discutidos os resultados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

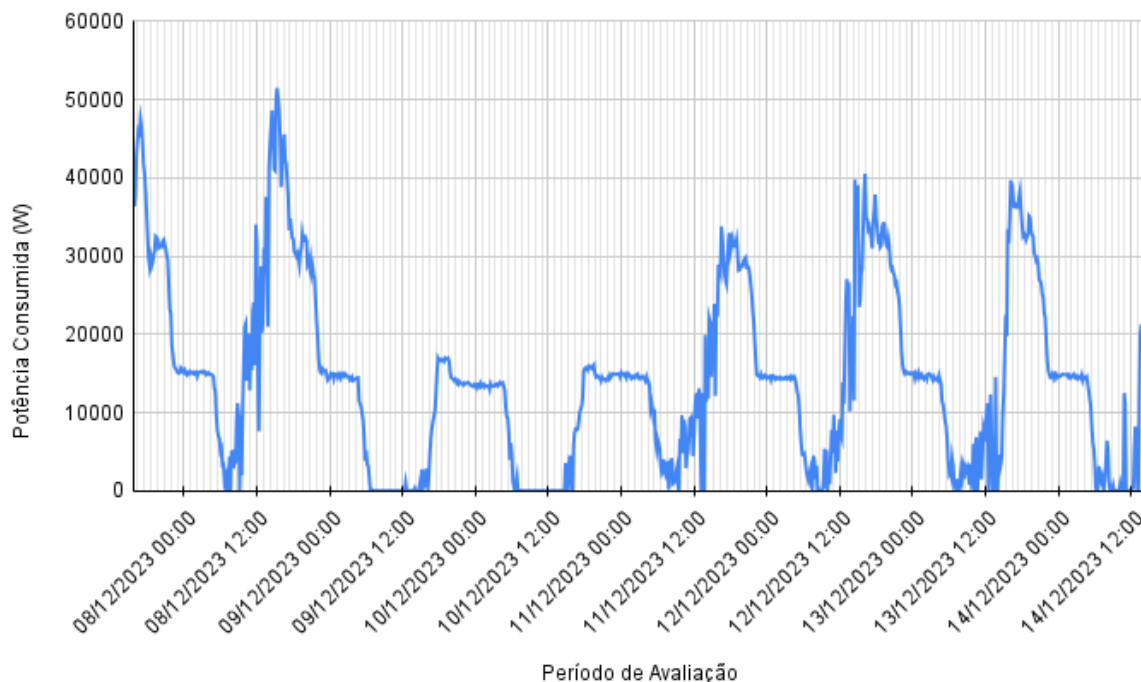
Nesta seção, são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir dos procedimentos apresentados na seção 3. Material e Métodos.

4.1. Perfil de Consumo de Energia

Após a aquisição dos dados coletados pelo analisador de energia, procedeu-se à análise das curvas de potências ativa e reativa da carga no período em estudo. Iniciou-se por esse ponto, dado que o comportamento da carga exerce influência sobre o sistema elétrico da distribuidora, sendo fundamental compreendê-lo antes de analisar a geração (a ser detalhada na seção 4.2).

Na Figura 4.1 é apresentada a curva de carga referente ao consumo de potência ativa da rede da distribuidora.

Figura 4.1 - Curva de potência ativa consumida (Rede)



Fonte: Autoria própria

A curva da Figura 4.1 representa a demanda de potência ativa absorvida da rede de distribuição pela carga. Observa-se que, durante os dias 09 e 10 de

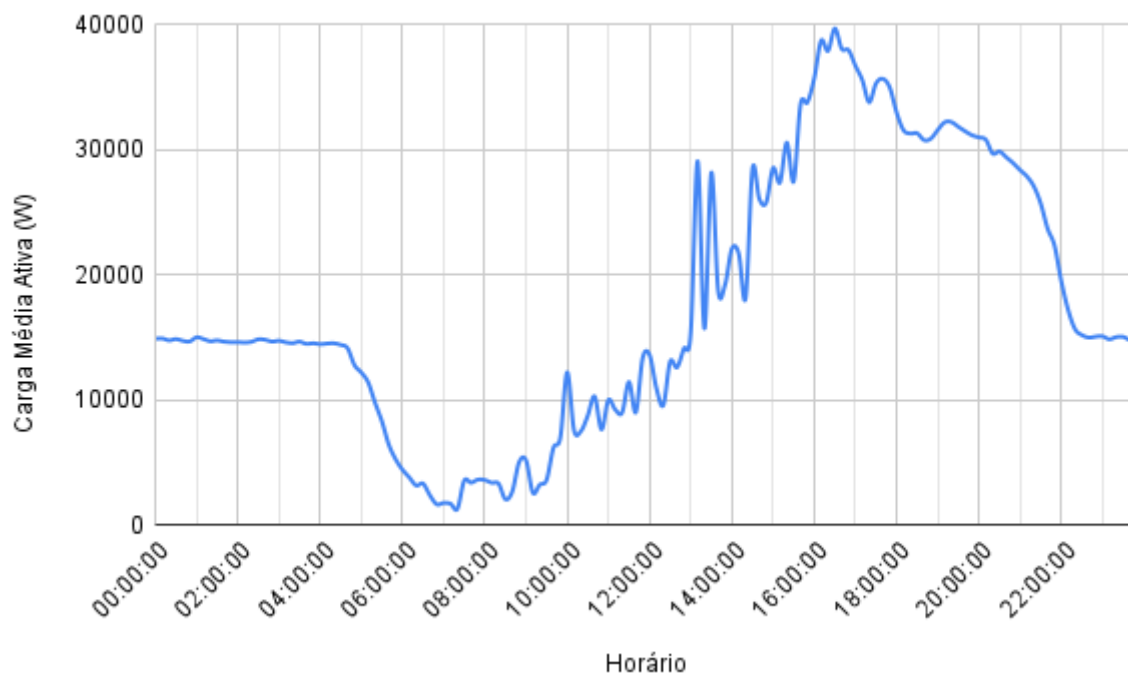
dezembro (sábado e domingo), não houve demanda da rede no período diurno. A explicação mais plausível é que a geração da usina fotovoltaica foi suficiente para suprir todas as cargas durante nesse período.

No período da madrugada, o consumo se manteve praticamente constante devido as cargas que ficaram em atividade, como iluminação e servidores de internet. Já no período noturno, a redução do consumo observados nos dias após 08 de dezembro (último dia letivo) indica uma menor utilização de laboratórios e salas de aula, provavelmente devido ao menor fluxo de alunos.

Durante os dias úteis, foram observadas variações mais intensas no consumo de energia proveniente da rede de distribuição durante o dia, principalmente em momentos de menor geração de energia. Isso ocorre devido à intermitência da energia solar, que exige o suprimento da rede elétrica da distribuidora para atender a demanda das cargas.

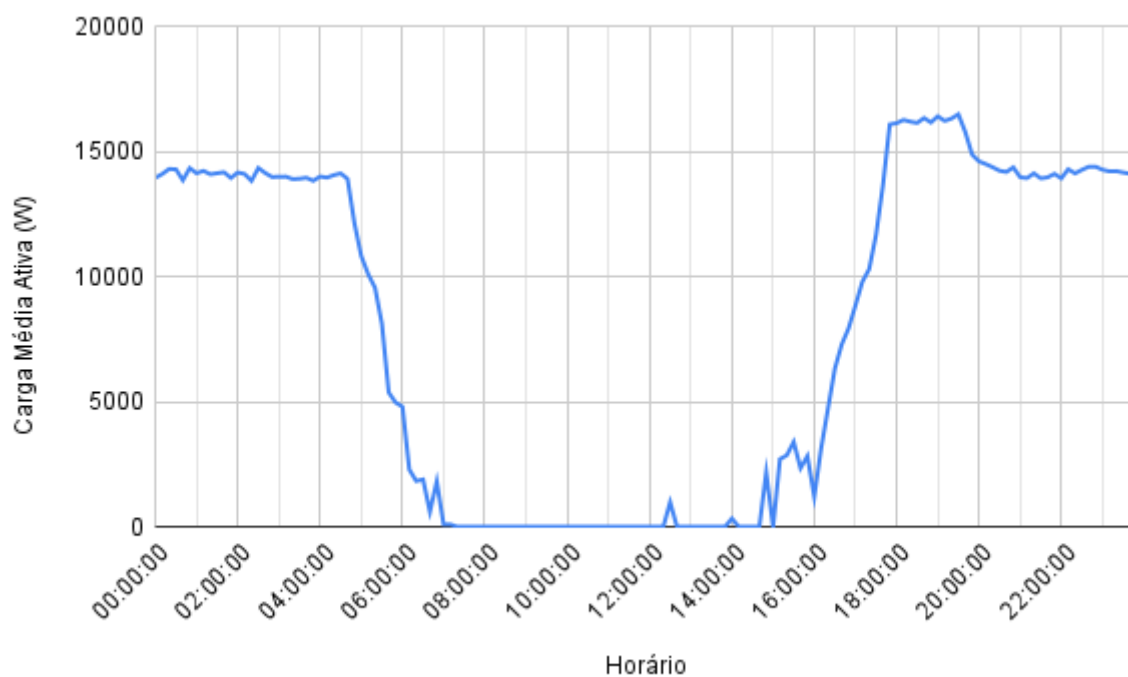
Para além da curva que mostra o comportamento do consumo de energia durante o período avaliado, foi levantado a curva média de potência consumida da rede de distribuição. As curvas apresentadas foram divididas em dias úteis (figura 4.2) e final de semana (figura 4.3). Essa divisão foi necessária, pois por se tratar de um ambiente escolar, durante a semana o consumo de energia fica maior por conta das diversas atividades que ocorrem no local, ao passo que nos finais de semana esse consumo cai drasticamente, pois não há atividades no local.

Figura 4.2 - Curva da média do carregamento em dias úteis



Fonte: Autoria própria

Figura 4.3 - Curva da média do carregamento no final de semana

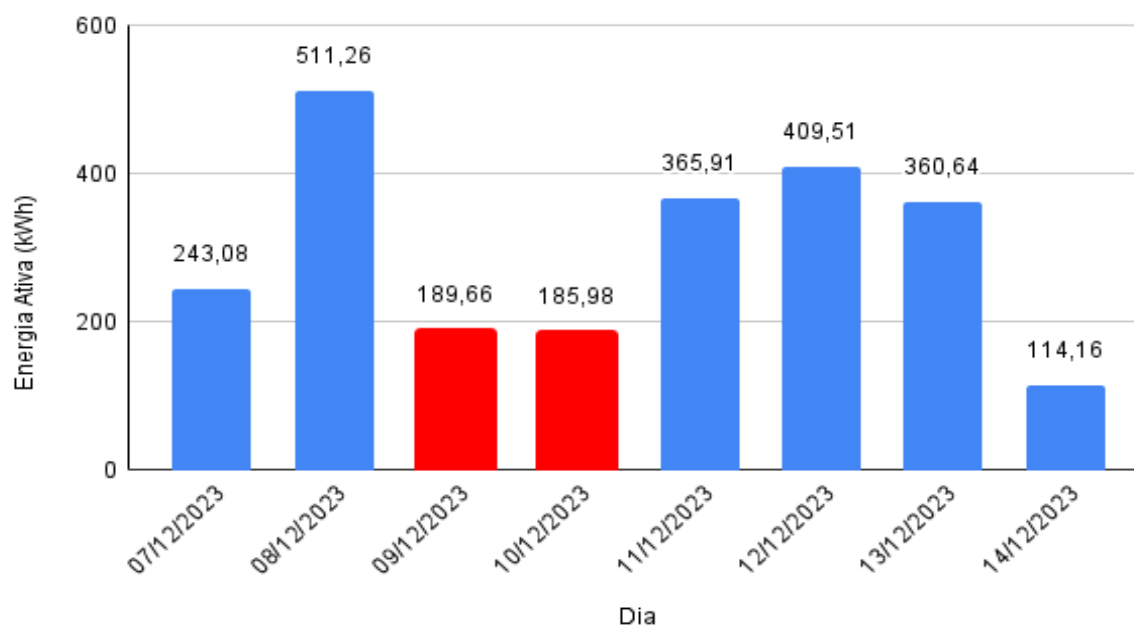


Fonte: Autoria própria

Analisando o perfil de carregamento do *Campus* podemos notar que tanto em dias úteis quanto em finais de semana o período da madrugada mantém um consumo estável que diminui consideravelmente por volta das 4h30 da manhã. No final de semana esse carregamento chega a zero por volta da 7h da manhã e mantém-se até perto das 15h, esse comportamento se dar pelo fato que a usina do *Campus* possui capacidade suficiente para suprir a demanda de energia nesse espaço de tempo. Porém, quando observamos a curva de carregamento da rede para os dias úteis podemos observar que para o mesmo período a potência exigida da rede não chega a zero, apresenta uma redução e após isso começa um aumento gradativo. Nos úteis é notável que o carregamento da rede apresenta muitas variações durante o período em que há geração de energia. Essas variações são resultado da necessidade da rede de compensar a energia necessária para suprir a carga e que a geração de energia não tem capacidade de manter sua estabilidade pois não trata de uma energia firme.

A partir dos valores de energia ativa medida, foi possível avaliar o consumo diário de energia ativa da instituição. Os resultados indicam uma redução considerável no consumo de energia ativa no final de semana – dias 09/12 e 10/12, como esperado devido à menor atividade no *Campus*. A Figura 4.4 apresenta tais informações, corroborando essa análise. Com destaque para o fim de semana em vermelho.

Figura 4.4 - Consumo diário de energia ativa no campus

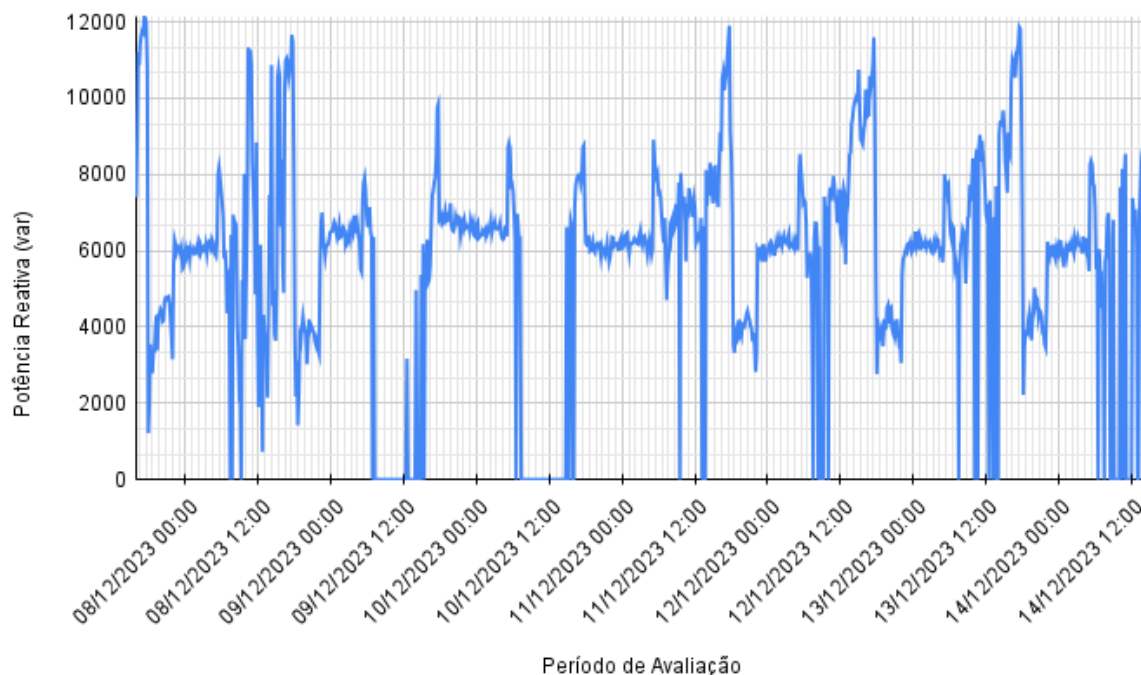


Fonte: Autoria própria

Quanto ao consumo de energia reativa, observou-se um padrão nos dias úteis e nos finais de semana. Nos dias úteis, durante os períodos de geração de energia, as variações de reativos foram mais intensas, como mostra a Figura 4.5. Nos finais de semana, o perfil de consumo de reativos apresentou um pico no início da noite e no final da madrugada. Embora seja mais difícil identificar as causas exatas, devido ao menor fluxo de pessoas, é possível que equipamentos eletrônicos e as luzes externas do *Campus* contribuam para esse padrão.

Na Figura 4.5 é apresentada a curva de carga referente ao consumo de potência reativa da rede da distribuidora.

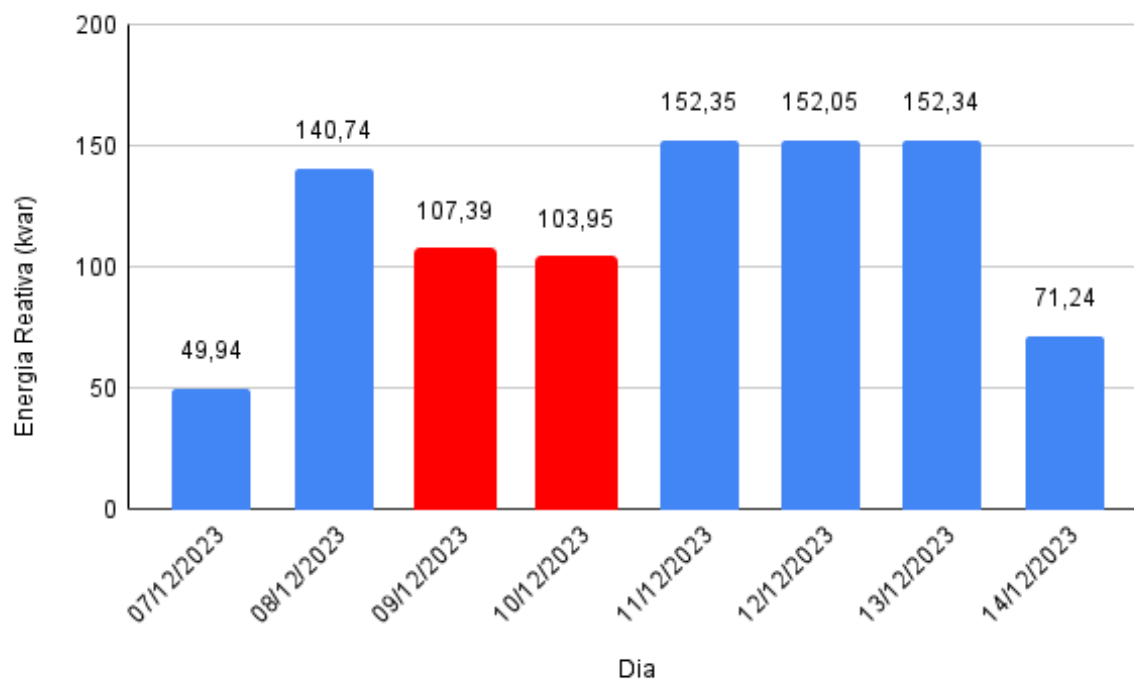
Figura 4.5 - Curva de potência reativa consumida (Rede)



Fonte: Autoria própria

Ao analisar o gráfico apresentado na Figura 4.5 é percebido que nos períodos diurnos, onde há geração de energia e consequentemente um menor uso da rede de distribuição, há uma diminuição do consumo de energia reativa vinda da rede externa. Tal fenômeno é a explicação da inexistência de consumo de reativos em alguns períodos dos dias 09 e 10 de dezembro (final de semana), pois nesse período a usina fotovoltaica foi capaz de suprir qualquer demanda de reativos das cargas em atividade no *Campus*.

O consumo de energia reativa proveniente da rede de distribuição apresentou um padrão relativamente estável, com valores médios de 150 kVArh nos dias úteis e 100 kVArh nos finais de semana, como ilustra a Figura 4.6.

Figura 4.6 - Consumo diário de energia reativa no *Campus*

Fonte: Autoria própria

Em conclusão, o perfil de consumo de energia do *Campus* apresenta uma periodicidade característica de instituições educacionais, com picos de consumo em períodos com atividade acadêmica, o que o torna um caso de estudo relevante para pesquisas sobre o comportamento de cargas. Essa compreensão detalhada do perfil de consumo pode auxiliar no planejamento de futuras expansões do sistema elétrico do *Campus*, otimizando a gestão energética e os custos associados.

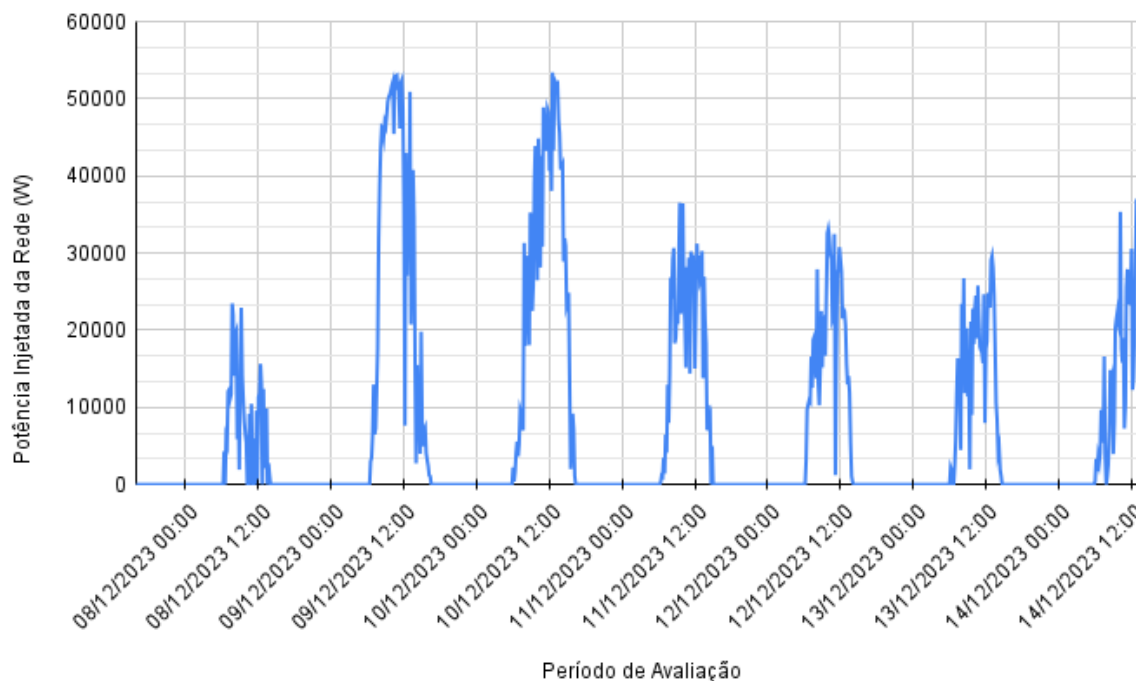
4.2. Geração de Energia

No tópico 3.1, foi abordado a capacidade de geração da usina fotovoltaica do *Campus*, que é limitada a 72 kW devido à potência nominal dos inversores utilizados, caracterizando-a como uma usina de microgeração distribuída.

Diante da ausência de monitoramento da geração total da usina, realizou-se o levantamento da curva de potência injetada na rede. O analisador de qualidade de energia, instalado no quadro geral de distribuição, permitiu capturar apenas a energia injetada na rede da concessionária quando a potência instantânea de geração era superior a potência instantânea da carga. Para obter a geração total, seria necessário instalar um medidor no quadro principal da usina, antes do consumo local.

A Figura 4.7 apresenta a curva de potência injetada na rede de distribuição da concessionária.

Figura 4.7 - Curva de geração injetada na rede de distribuição



Fonte: Autoria própria

A Figura 4.7 apresenta a variação na energia injetada na rede ao longo do tempo. Essa variação reflete as influências que a energia solar está sujeita por não se tratar de uma energia firme, além do mais, está sujeita as variações de carga da unidade consumidora. Por esse motivo, é possível observar que no final de semana (09/12 e 10/12) há uma injeção de energia maior que é motivada pela baixa atividade acadêmica neste período. É possível inferir também que durante o final de semana a largura da curva, ou seja, a duração do período de injeção de energia na rede é maior, mostrando que a carga do *Campus* exigiu menos energia e facilitou a injeção de energia por mais tempo.

Considerando as afirmações feitas na análise da Figura 4.7, foi realizado o levantamento dos períodos em que a geração excedeu o consumo local. A Tabela 4.1 apresenta os horários em que houve injeção de energia na rede.

Tabela 4.1 - Período diário de injeção de energia na rede da distribuidora

Data	Início da Injeção na rede	Final da Injeção na rede
07/12/2023	-	-
08/12/2023	6h20	13h50
09/12/2023	6h30	16h20
10/12/2023	6h	16h10
11/12/2023	6h20	14h50
12/12/2023	6h20	14h
13/12/2023	6h	14h30
14/12/2023	6h	14h20

Fonte: Autoria própria

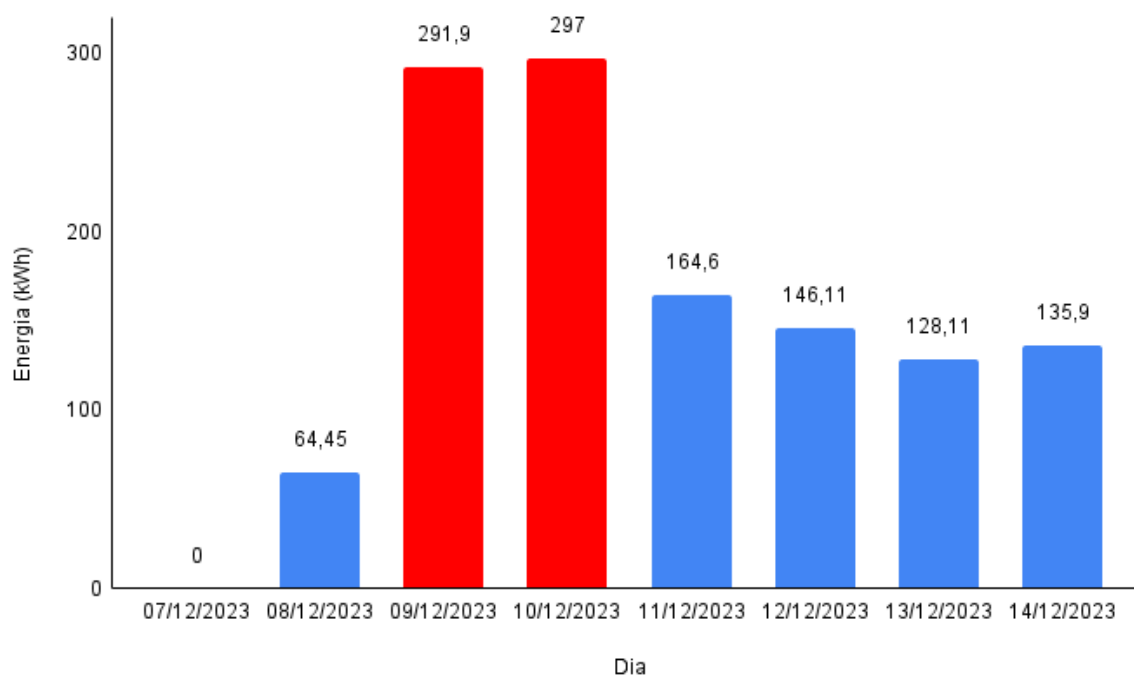
Após o levantamento do horário de início e término da injeção de energia mostrada pela Tabela 4.1 conseguimos demonstrar que no final de semana houve de fato uma duração maior de injeção energia na rede.

Em média, a usina opera por mais de 8h gerando mais energia do que a carga necessita e por isso acaba injetando na rede a energia excedente. Nos dias úteis, o excedente de energia injetado na rede diminui gradualmente até cessar por volta das 14h, quando a demanda da carga supera a geração. Essa dinâmica explica a ausência de dados de geração no dia 07/12/2023, uma vez que o

equipamento de medição foi instalado às 15h50, após o término do período de injeção de energia.

A Figura 4.8 apresenta a quantidade de energia, em kWh, que foi injetada na rede da concessionária.

Figura 4.8 - Energia injetada na rede da concessionária

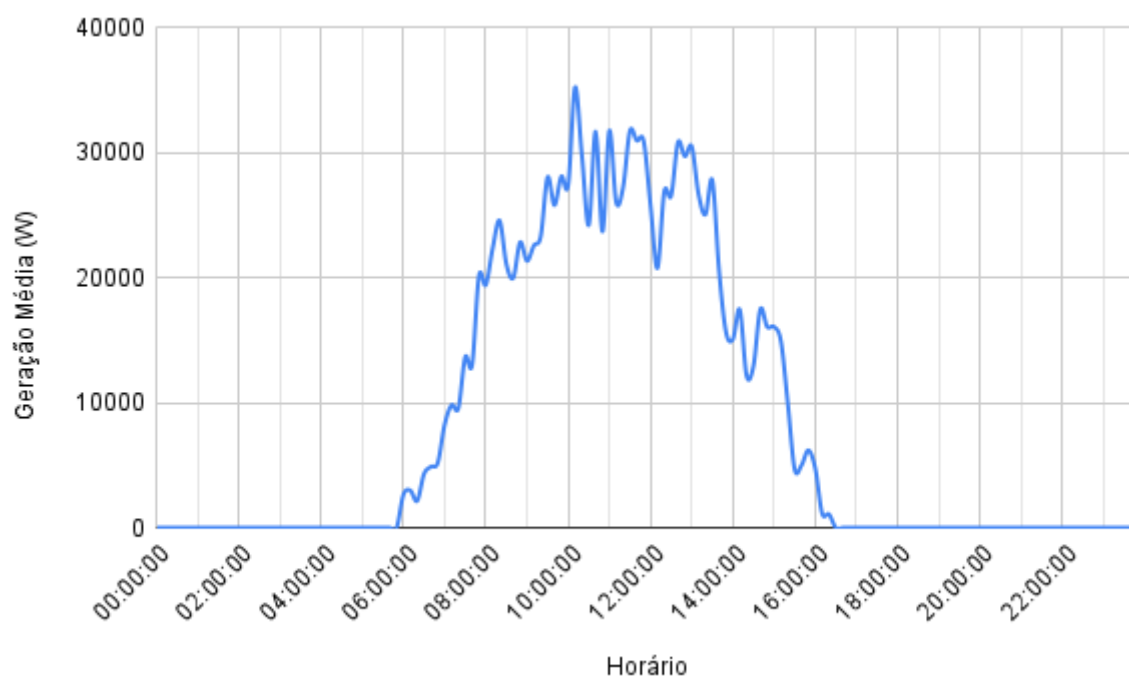


Fonte: Autoria própria

O excedente de energia injetado na rede da concessionária é utilizado para compensar a energia que a carga consome da concessionária em momentos onde não há geração, sendo esse o princípio do Sistema de Compensação de Energia Elétrica – SCEE.

Adicionalmente a curva mostrada na Figura 4.7 que aponta a injeção de energia na rede durante o período avaliado, foi levantado a curva média de injeção para o período como é possível observar na Figura 4.9, abaixo.

Figura 4.9 - Curva média de injeção de energia



Fonte: Autoria própria

Na curva apresentada, pode-se observar o início de injeção começando em média às 6h da manhã e durando até às 16h com maior injeção acontecendo entre às 10h e 13h. Para essa curva não levou em consideração a divisão em dia útil e final de semana.

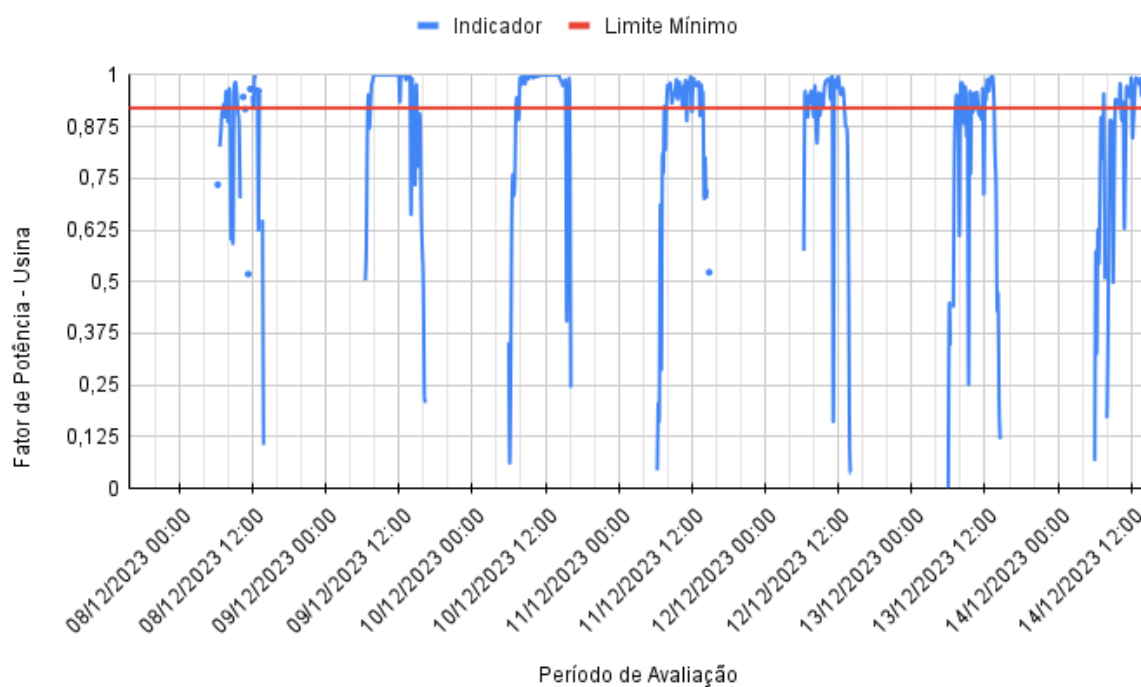
4.3. Fator de Potência

Para esse indicador, o analisador de energia foi configurado de tal forma que fosse capaz de medir o fator de potência da rede de distribuição e do gerador fotovoltaico. Por isso que esta sessão será apresentada em duas partes para melhor compreensão. Dessa forma, ao analisar cada conjunto de indicadores individualmente, será possível quantificar e compreender como a rede elétrica do *Campus* reage nos cenários a qual ela é submetida diariamente.

4.3.1. Fator de Potência da Instalação com Exportação

Será iniciada a análise dos dados do fator de potência considerando a energia exportada pelo gerador fotovoltaico. Conforme mencionado no tópico 4.2, não há dados de geração para o primeiro dia de avaliação, portanto, esta análise abrangerá apenas 7 dias. Na Figura 4.10 será possível visualizar o comportamento da curva do fator de potência da exportação de energia do gerador.

Figura 4.10 - Fator de Potência do Gerador



Fonte: Autoria própria

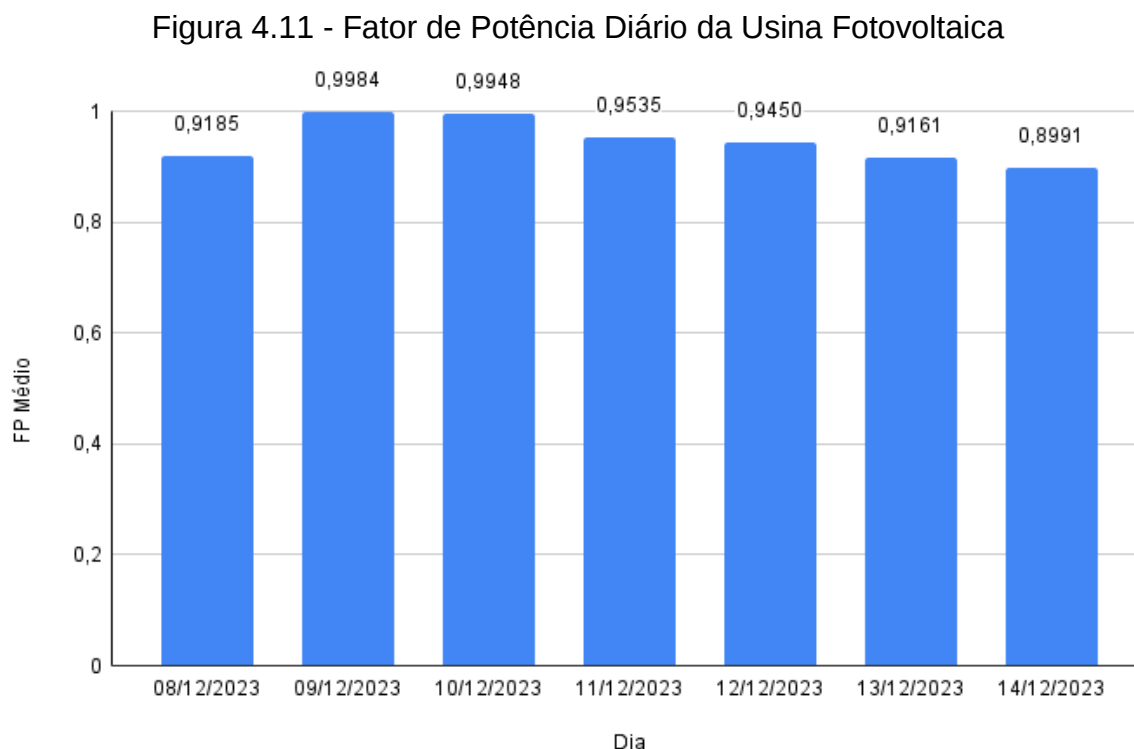
As lacunas que são observadas na Figura 4.10 são provenientes dos momentos em que não houve geração. Assim, não haverá dados desse indicador nos períodos noturnos. Já durante o período diurno houve momentos que não foram captados dados sobre esse indicador, levando a crer que o consumo instantâneo foi superior a geração e dessa forma não houve exportação, consequentemente sem dados para analisar.

Através dos dados utilizados para compor a curva da Figura 4.10, foi possível levantar o valor médio do fator de potência que o gerador exportou, e assim avaliar a conformidade do indicador com os limites estabelecidos em norma. Os resultados obtidos indicam que:

$$fp_{Gerador} = 0,9462$$

Portanto, podemos concluir que o indicador está acima do limite estabelecido pela norma. Como foi observado na Figura 4.10, existem diversos momentos em que o indicador extrapola o limite permitido (curva destacada em vermelho) e por isso foi levantado os indicadores diários do fator de potência.

Analisando o indicador dia a dia, temos:



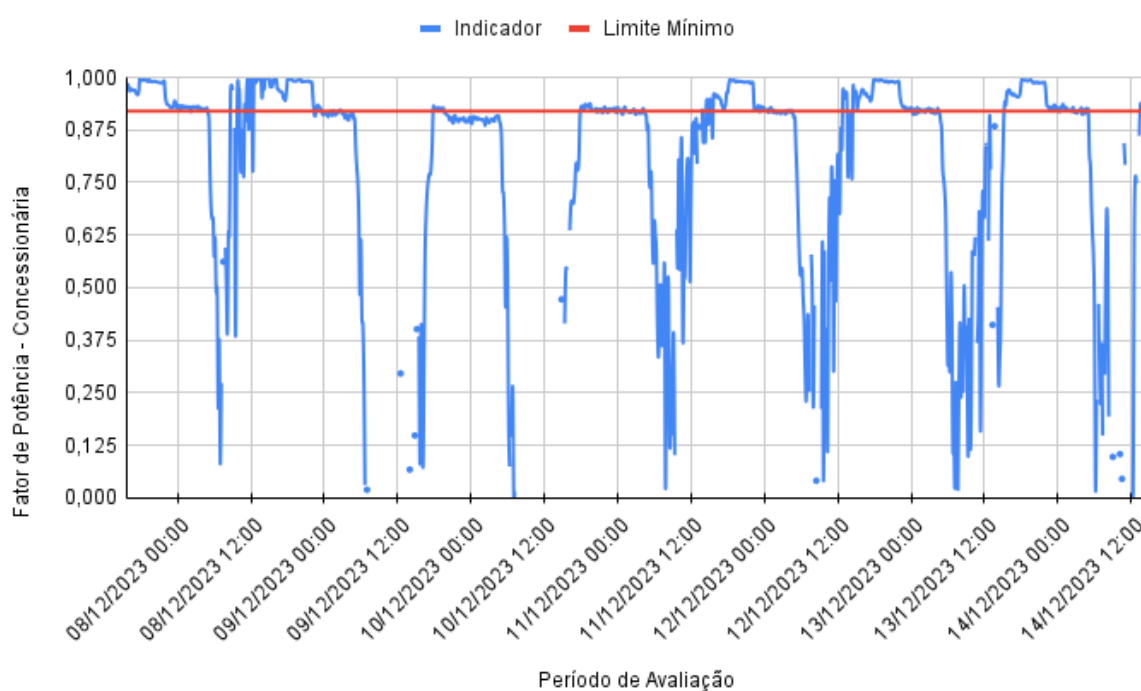
Fonte: Autoria própria

A análise diária do fator de potência evidenciou que, em determinados dias, os valores médios ultrapassaram os limites estabelecidos. Assim, para confirmar se essas ultrapassagens foram eventuais ou se de fato consiste em um problema de fator de potência, pode ser refeita as medições aumentando o tempo de amostragem, se de fato houver a repetição desses dados pode ser avaliado a melhor solução de mitigação para o contexto no qual o estudo está sendo aplicado.

4.3.2. Rede da Instalação

Neste tópico, iremos avaliar como decorreu o comportamento do fator de potência do ponto da vista da rede da concessionária conforme observado na Figura 4.12. Para essa avaliação, foi possível analisar os dados do dia 07/12 até o dia 14/12, compreendendo assim todo o período de análise dos dados.

Figura 4.12 - Fator de Potência da Concessionária

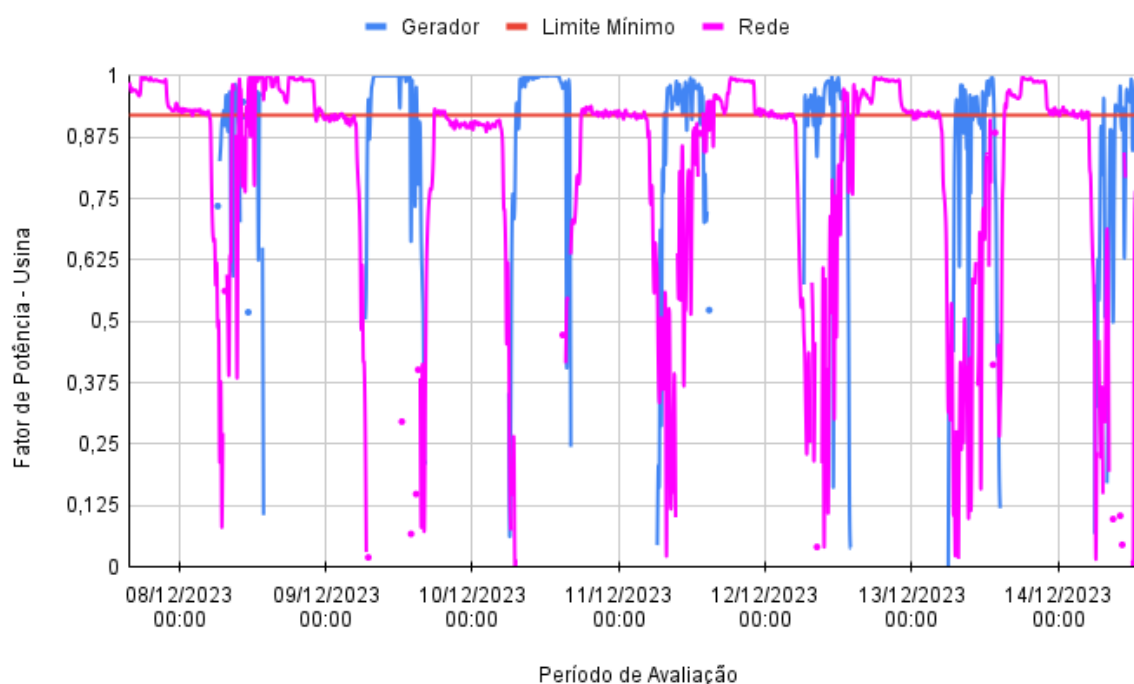


Fonte: Autoria própria

Para compreender melhor o gráfico, é importante destacar que as lacunas na curva da Figura 4.12 são decorrentes dos momentos em que a geração fotovoltaica do *Campus* supriu toda a necessidade das cargas fazendo com que não houvesse

consumo de energia proveniente da rede de distribuição, o que de fato prova-se verdadeiro considerando que tais lacunas coincidem com o período de injeção de energia da usina fotovoltaica na rede da distribuidora, como é possível observar na Figura 4.13.

Figura 4.13 - Curva de Comparação dos Fatores de Potências



Fonte: Autoria própria

De forma análoga ao item anterior, foi levantado o fator de potência médio para esse indicador, a fim de avaliar se o indicador se encontra dentro dos limites estabelecidos em norma. Foi verificado que:

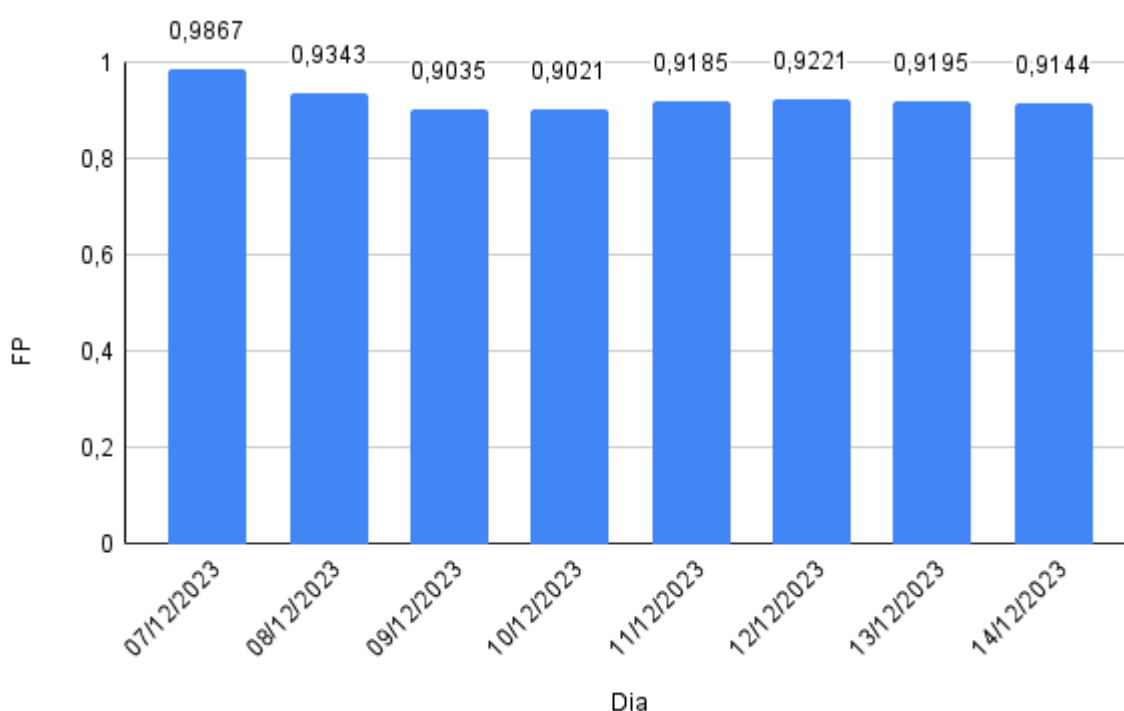
$$fp_{rede} = 0,9201$$

Portanto, pode-se concluir que o valor médio do fator de potência da rede está no mínimo estabelecido pela norma. Considerando a proximidade com o limite, mostra-se necessário o monitoramento deste indicador com mais rigor para avaliar a necessidade de possíveis mitigações de acordo com as demandas que o *Campus* apresentar, de modo que a extrapolação deste indicador pode acarretar multas para

o instituto já que segundo o PRODIST, os clientes do Grupo A devem manter um controle permanente deste indicador.

De acordo com o que foi observado na Figura 4.12, existem diversos momentos em que o indicador viola o limite permitido (curva destacada em vermelho) e por isso foi levantado os indicadores diários do fator de potência da rede que poderá ser visto na Figura 4.14 abaixo.

Figura 4.14 - Fator de Potência Diário da Rede da Distribuidora



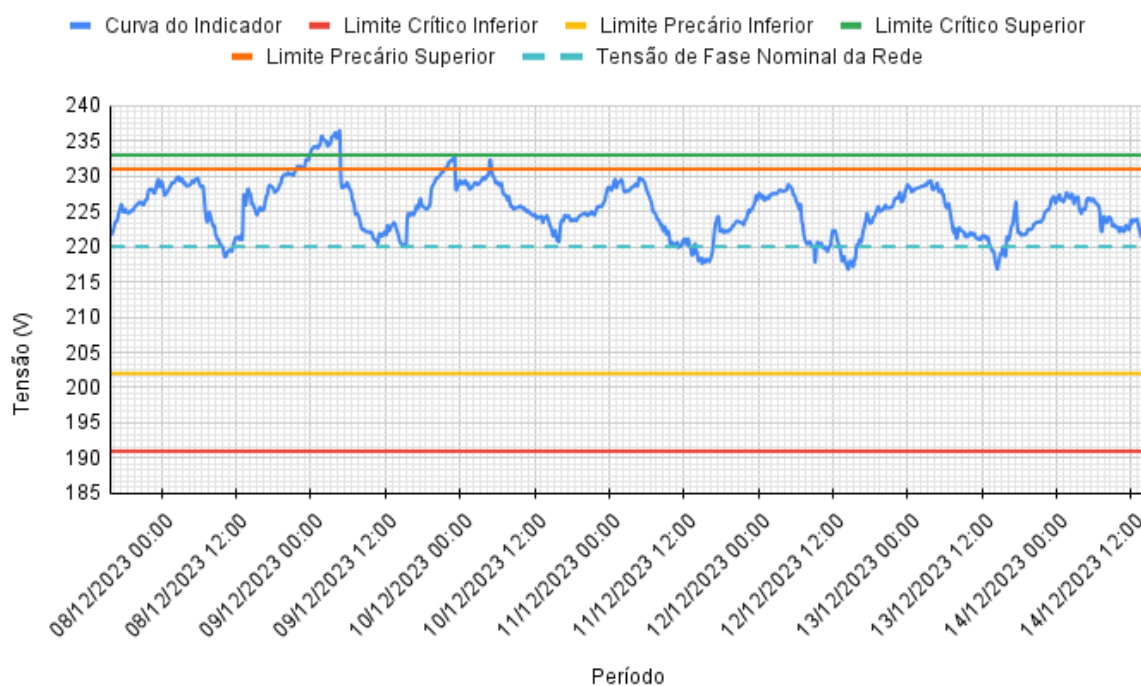
Fonte: Autoria própria

A análise dos dados informa que, em média, cinco dos dias avaliados apresentaram um fator de potência inferior ao limite estabelecido. Essa constatação indica que, independentemente da ocorrência de geração de energia no sistema, o *Campus* enfrenta uma questão recorrente de consumo excessivo de reativos, o que resulta em um fator de potência abaixo do ideal.

4.4. Tensão em Regime Permanente

Após a coleta e análise dos valores de tensão em cada condutor fase, no neutro e no barramento de equipotencialização do sistema, foi possível construir a curva do indicador de tensão em regime permanente no período avaliado. Com base nessa curva, foram calculados os indicadores de tensão precária e crítica – DRP e DRC, respectivamente. A seguir, apresenta-se a curva do indicador de tensão em regime permanente:

Figura 4.15 – Indicador de Tensão em Regime Permanente do *Campus*



Fonte: Autoria própria

Antes de analisar os indicadores DRC e DRP com base nos dados coletados, é importante observar que a tensão da rede apresentou um padrão característico: durante os períodos diurnos, os valores de tensão foram mais baixos, enquanto os valores mais altos ocorreram durante o período noturno, sendo seu ápice no período da madrugada, trazendo à tona a relação entre o alívio da carga na rede com a elevação da tensão.

Ao analisar os valores de tensão, constatou-se que não houve ocorrência de subtensão, ou seja, os valores de tensão permaneceram acima dos limites mínimos estabelecidos. No entanto, foram observadas ocorrências de sobretensão, com valores de tensão ultrapassando os limites máximos permitidos em norma.

Dentre as 1008 amostras de tensão coletadas, 25 foram classificadas como tensão precária. Com base nesse dado, o DRP calculado foi de:

$$DRP(\%) = 2,48\%$$

Com base no valor do DRP calculado, conclui-se que o sistema elétrico do *Campus*, composto pela carga e pela geração fotovoltaica, atendeu aos limites estabelecidos para a duração de tensão precária, não ultrapassando o valor máximo de 3%.

O mesmo procedimento foi utilizado para o cálculo do indicador referente à tensão crítica. Dentre as 1008 amostras de tensão coletadas, 29 foram classificadas como tensão crítica. Com base nesse dado, o cálculo do DRC resultou em:

$$DRC(\%) = 2,88\%$$

Os resultados obtidos para o DRC evidenciam um problema de qualidade de energia no sistema elétrico do *Campus*, com um indicador de tensão crítica superior ao limite aceitável de 0,5%. Diante da violação do indicador de tensão crítica, a concessionária é responsável pelo pagamento de uma compensação aos clientes conectados ao ramal de alimentação, conforme é previsto em norma. No entanto, para estimar o valor total devido ao *Campus*, seria necessário realizar medições do indicador durante todo mês de dezembro, a fim de identificar todas as ocorrências de tensão precária e crítica.

Foi verificado nas faturas referentes a Dezembro (mês da ocorrência) e nos dois meses subsequentes a ocorrência como determina a norma, e foi verificado que em nenhum dos meses foram pagos valores correspondentes a compensação pela transgressão do DRC. Essas informações podem ser confirmadas através dos recortes das faturas correspondentes nas Figuras 16, 17 e 18. Foi deixada amostra apenas os valores correspondentes aos descontos dos tributos federais que o *Campus* recebe para mostrar que a concessionária de energia não discriminou nenhum valor de compensação.

Figura 4.16 - Recorte da Fatura de Dezembro/2023

NOME DO CLIENTE: INSTITUTO FEDERAL DE E. C. T. PERNAMBUCO CNPJ: 10.767.239/0008-11 ENDEREÇO: AV PE AGOABAR VALENCA 01671 IFPE GARANHUNS HELIOPOLIS/GARANHUNS 55299-390 GARANHUNS PE			CÓDIGO DA INSTALAÇÃO CÓDIGO DO CLIENTE										
REF-MES/ANO 12/2023		TOTAL A PAGAR R\$ [REDACTED]		VENCIMENTO [REDACTED]									
CLASSIFICAÇÃO: A4 Horo-sazonal Verde PODER PÚBLICO – FEDERAL							TIPO DE FORNECIMENTO: Trifásico						
Cadastra-se e receba a sua fatura por e-mail, utilizando o QR code no verso da fatura.													
DATAS DE LEITURAS		LEITURA ANTERIOR 30/11/2023		LEITURA ATUAL 31/12/2023		N° DE DIAS 31		PRÓXIMA LEITURA 31/01/2024					
ITENS DA FATURA	UNID.	QUANT.	PREÇO UNIT. COM TRIB (R\$)	VALOR (R\$)	PS/ COFINS(R\$)	BASE CALC. ICMS(R\$)	ALÍQUOTA ICMS(%)	ICMS (R\$)	TARIFA UNIT(R\$)	TRIBUTOS	BASE DE CÁLCULO (R\$)	ALÍQUOTA (%)	VALOR (R\$)
Demanda Ativa	KV									PIS			
Demanda Restiva Exc.	KVAR									COFINS			
Consumo-TUSD N.Ponta	kWh									ICMS			
Consumo-TUSD F.Ponta	kWh												
BANDEIRA VERDE													
Consumo-TE Na Ponta	kWh												
Consumo-TE F.Ponta	kWh												
Cons. Rest.Exc. N.Ponta	KVARh												
Cons. Rest.Exc. F.Ponta	KVARh												
ICMS-CDE NF285009086													
Dados Med.Mem. Massa													
Trib.Federal(5.85%)				326,79-									
Trib.Federal(9.45%)				317,33-									
TOTAL													
GRANDEZAS CONTRATADAS Demanda Contratada 80													

Fonte: Autoria própria

Figura 4.17 - Recorte da Fatura de Janeiro/2024

NOME DO CLIENTE: INSTITUTO FEDERAL DE E. C. T. PERNAMBUCO CNPJ: 10.767.239/0008-11		CÓDIGO DA INSTALAÇÃO											
ENDERECO: AV PE AGOBAR VALENCA 01671 IFPE GARANHUNS HELIOPOLIS/GARANHUNS 55299-390 GARANHUNS PE		CÓDIGO DO CLIENTE											
REF. MÊS/ANO 01/2024		TOTAL A PAGAR R\$											
		VENCIMENTO											
CLASSIFICAÇÃO: A4 Hora-sazonal Verde PODER PÚBLICO – FEDERAL				TIPO DE FORNECIMENTO: Trifásico									
Cadastra-se e receba a sua fatura por e-mail, utilizando o QR code no verso da fatura.													
DATAS DE LEITURAS		LEITURA ANTERIOR 31/12/2023		LEITURA ATUAL 31/01/2024		Nº DE DIAS 31		PRÓXIMA LEITURA 29/02/2024					
ITEMS DA FATURA	UNID.	QUANT.	PREÇO UNIT. COM TRIB (R\$)	VALOR (R\$)	PIS/ COFINS(R\$)	BASE CALC. ICMS(R\$)	ALÍQUOTA ICMS(%)	ICMS (R\$)	TARIFA UNIT(R\$)	TRIBUTOS	BASE DE CÁLCULO (R\$)	ALÍQUOTA (%)	VALOR (R\$)
Demanda Ativa	kW									PIS			
Demanda Reativa Exc.	kVar									COFINS			
Consumo-TUSD NPonta	kWh									ICMS			
Consumo-TUSD F.Ponta	kWh												
BANDEIRA VERDE													
Consumo-TE Na Ponta	kWh												
Consumo-TE F.Ponta	kWh												
Cons.Reat.Exc.NPonta	kVarh												
Cons.Reat.Exc.FPonta	kVarh												
ICMS-CDE NF289137436													
Trib.Federal(9.45%)				234,57-									
Trib.Federal(5.85%)				181,55-									
TOTAL													
GRANDEZAS CONTRATADAS													
Demanda Contratada											80		

Fonte: Autoria própria

Figura 4.18 - Recorte da Fatura de Fevereiro/2024

NOME DO CLIENTE: INSTITUTO FEDERAL DE E. C. T. PERNAMBUCO CNPJ: 10.767.239/0008-11 ENDEREÇO: AV PE AGOBAR VALENCA 01671 IFPE GARANHUNS HELIOPOLIS/GARANHUNS 55298-390 GARANHUNS PE		CÓDIGO DA INSTALAÇÃO [REDACTED]											
REF. MÊS/ANO 02/2024		TOTAL A PAGAR R\$ [REDACTED]			VENCIMENTO [REDACTED]								
CLASSIFICAÇÃO: A4 Horo-sazonal Verde PODER PÚBLICO – FEDERAL			TIPO DE FORNECIMENTO: Trifásico										
Cadastra-se e receba a sua fatura por e-mail, utilizando o QR code no verso da fatura.													
DATAS DE LEITURAS		LEITURA ANTERIOR 31/01/2024	LEITURA ATUAL 29/02/2024	N° DE DIAS 29	PRÓXIMA LEITURA 31/03/2024								
ITENS DA FATURA Demanda Ativa Demanda Reativa Exc. Consumo-TUSD NPonta Consumo-TUSD F.Ponta BANDEIRA VERDE Consumo-TE Na Ponta Consumo-TE F.Ponta Cons.Reat.Exc.NPonta Cons.Reat.Exc.FPonta ICMS-CDE NF293061627 Trib.Federal(5.85%) Trib.Federal(9.45%)	UNID. kW kVar kWh kWh kWh kWh kVarh kVarh kWh kWh	QUANT. [REDACTED]	PREÇO UNIT. COM TRIB. (R\$) [REDACTED]	VALOR (R\$) [REDACTED]	PIS/ COFINS(R\$) [REDACTED]	BASE CALC. ICMS(R\$) [REDACTED]	ALIQUOTA ICMS(%) [REDACTED]	ICMS (R\$) [REDACTED]	TARIFA UNIT(R\$) [REDACTED]	TRIBUTOS PIS COFINS ICMS [REDACTED]	BASE DE CÁLCULO (R\$) [REDACTED]	ALIQUOTA (%) [REDACTED]	VALOR (R\$) [REDACTED]
GRANDEZAS CONTRATADAS													
TOTAL													

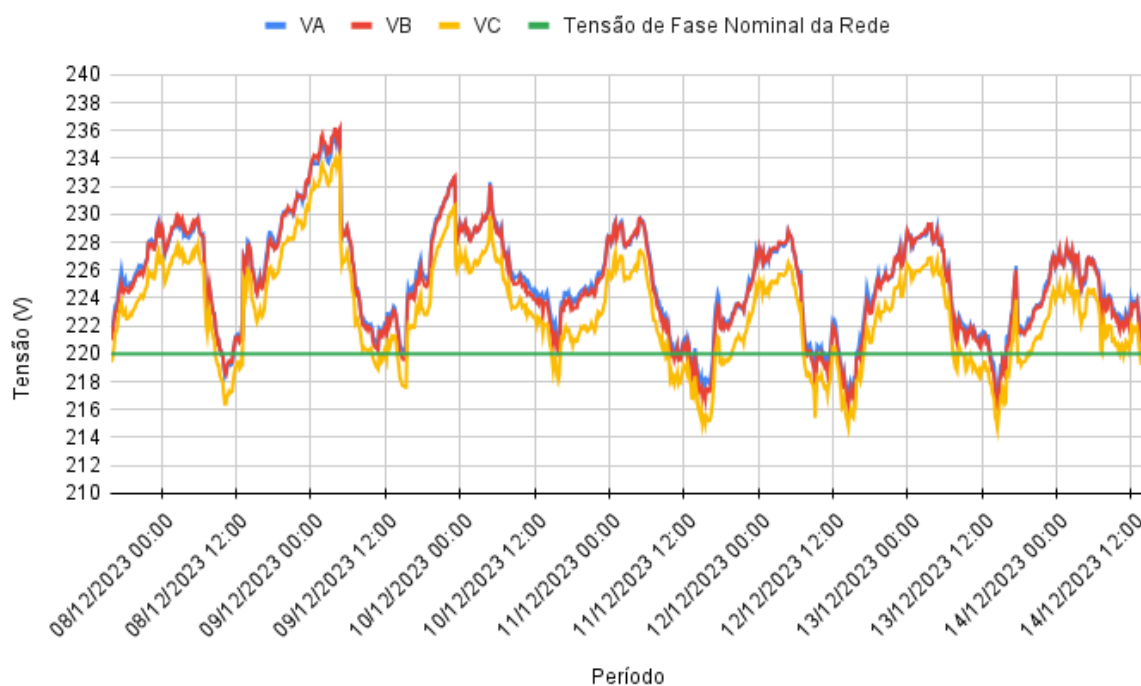
Fonte: Autoria própria

Sugere-se, portanto, que seja averiguado junto a concessionária o motivo do não pagamento da compensação e tomado as devidas providências em conformidade com a legislação em vigência.

4.5. Desequilíbrio de Tensão

Devido à natureza trifásica da rede elétrica do *Campus*, foi realizada a medição das tensões de fase e consequentemente o desequilíbrio de tensão entre as fases, conforme exigido pela norma técnica. O equipamento utilizado possui a funcionalidade de calcular o desequilíbrio diretamente, dispensando o cálculo manual. A figura 4.19 apresenta a variação de tensão ao longo dos oito dias de monitoramento.

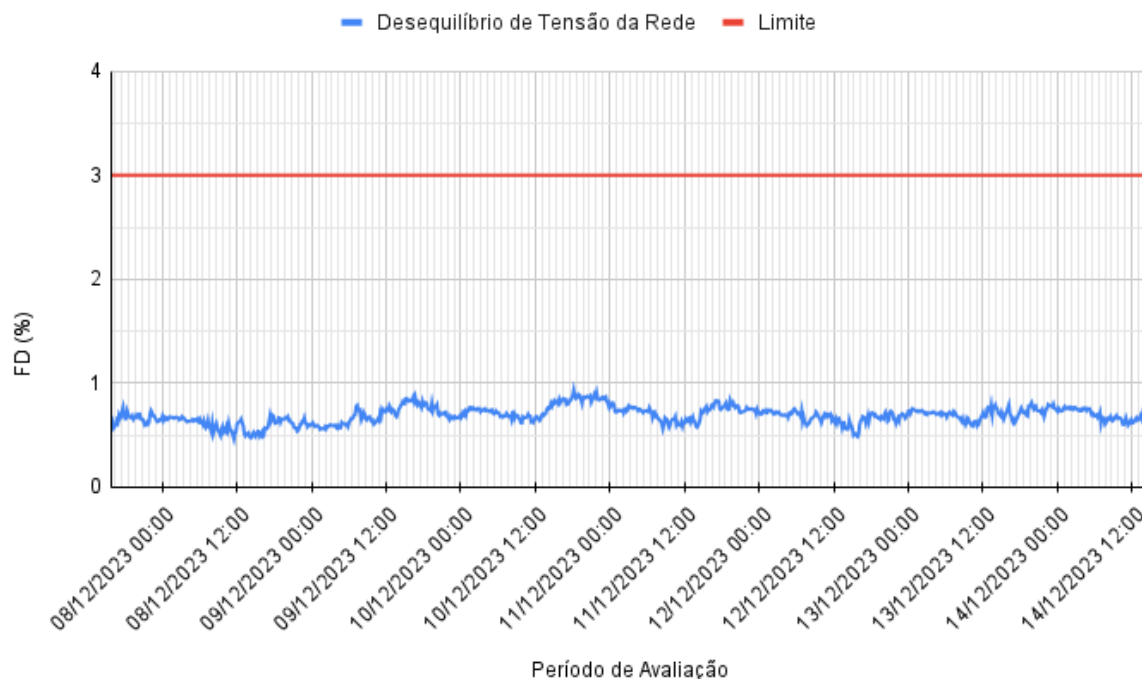
Figura 4.19 - Comportamento das Tensões no Período Avaliado



Fonte: Autoria própria

Nota-se ao observar a Figura 4.19 que a fase C apresenta valores relativamente menores quando comparados com as fases A e B, levando a entender que a fase C apresenta um carregamento maior do que as outras fases. Para quantificar o quão desequilibrado é a rede do *Campus* foi levantada a curva de desequilíbrio de tensão conforme apresentado na Figura 4.20.

Figura 4.20 - Comportamento do Desequilíbrio da Rede Elétrica do *Campus*



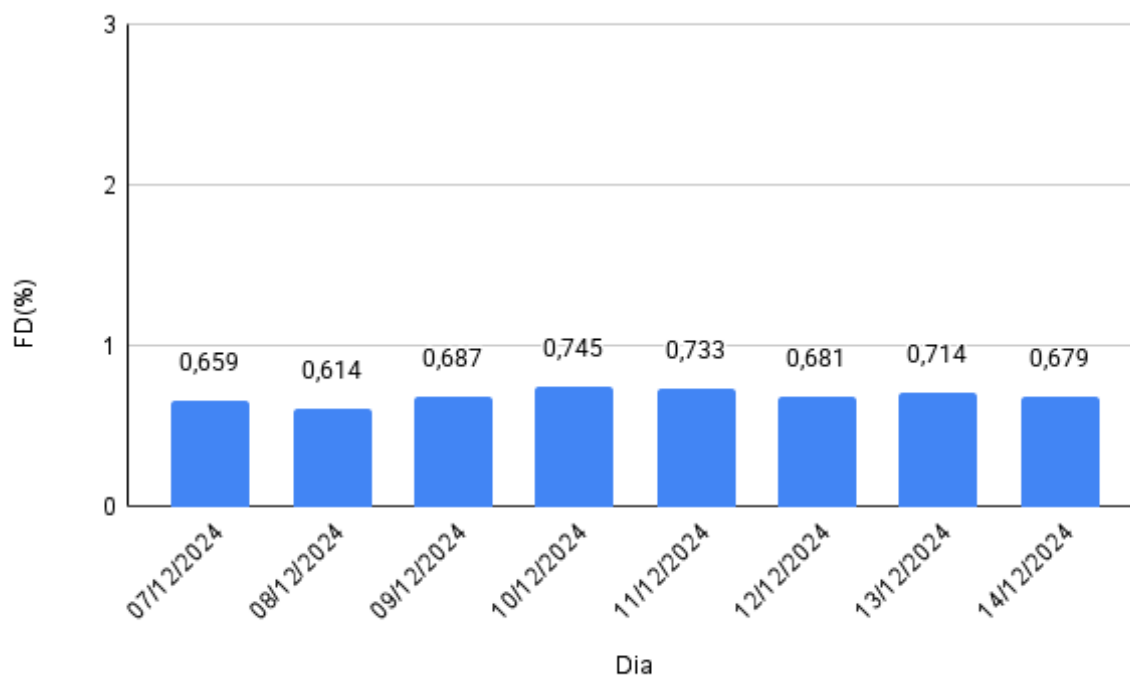
Fonte: Autoria própria

Conforme demonstrado na Figura 4.20, os valores de desequilíbrio de tensão da rede elétrica do *Campus* permaneceram abaixo do limite estabelecido de 3% para o indicador FD95%. Portanto, as instalações elétricas do *Campus* estão em conformidade com os limites de desequilíbrio de tensão, não apresentando violações. A média do desequilíbrio de tensão durante o período analisado foi de:

$$FD\% = 0,688\%$$

Além disso, foram levantados os valores diários médios do desequilíbrio de tensão no *Campus* e organizado na Figura 4.21.

Figura 4.21 - Fator de Desequilíbrio de Tensão Diário



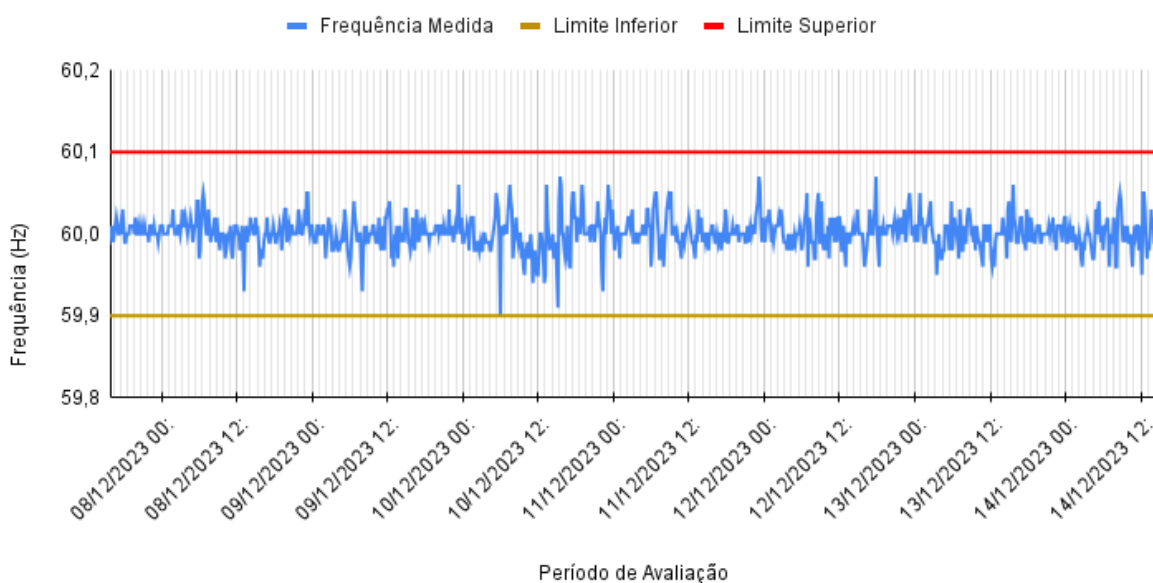
Fonte: Autoria própria

Como observado anteriormente, os valores de desequilíbrio de tensão permaneceram dentro dos limites estabelecidos pela norma. Esse resultado positivo pode ser atribuído ao projeto elétrico inicial do *Campus*, que seguiu as recomendações da NBR 5410:2004. A norma orienta que as cargas devem ser distribuídas de forma equilibrada entre as fases, a fim de minimizar o desequilíbrio de tensão.

4.6. Variação de Frequência

A variação da frequência da rede elétrica é um importante indicador de qualidade de energia, especialmente em instalações com equipamentos eletrônicos sensíveis à frequência, como inversores fotovoltaicos. A Figura 4.22 apresenta o perfil da variação de frequência da rede do *Campus* durante o período analisado.

Figura 4.22 - Comportamento da frequência do *Campus*



Fonte: Autoria própria

Conforme os dados analisados, a variação de frequência da rede elétrica do *Campus* manteve-se dentro dos limites estabelecidos pela norma. Isso indica que a qualidade da energia em relação à frequência foi adequada para o funcionamento dos equipamentos eletrônicos, incluindo os inversores fotovoltaicos. A frequência média registrada foi de 60 Hz, com pequenas variações na segunda casa decimal. Portanto, pode-se concluir que a rede elétrica do *Campus* operou dentro dos padrões de qualidade de energia esperados.

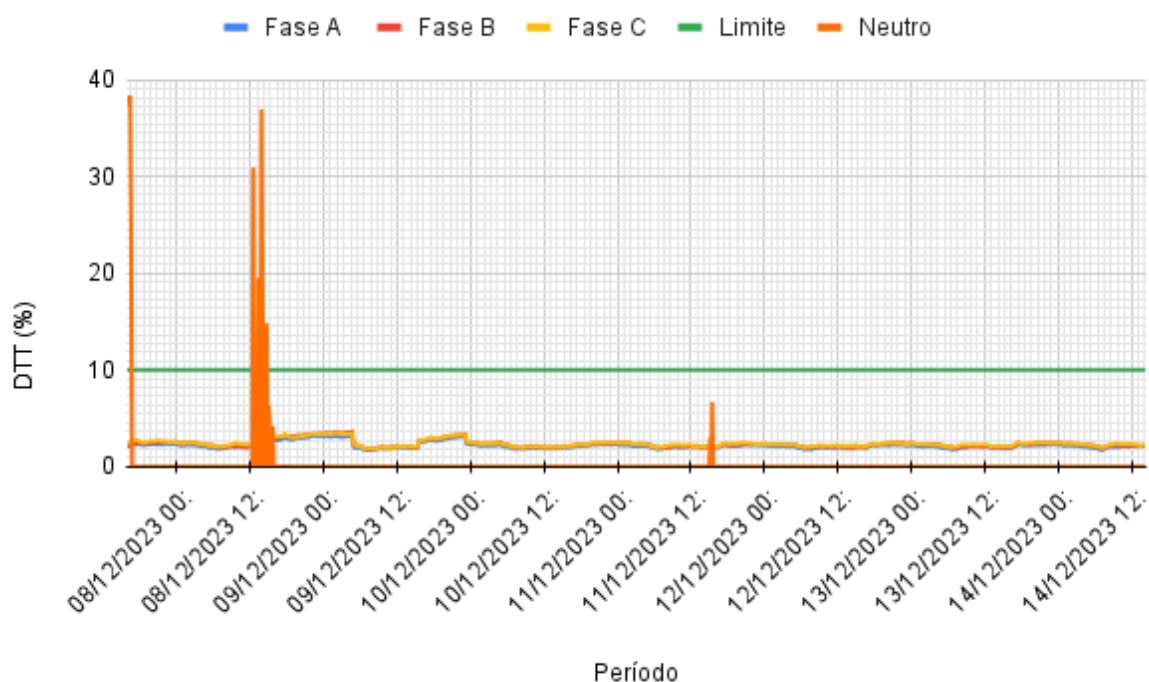
4.7. Harmônicas

Devido à abrangência do tema, este tópico foi dividido em três partes para uma análise mais aprofundada. É importante ressaltar que, devido à limitação de memória do analisador de energia utilizado, não foi possível coletar dados sobre a distorção harmônica total para as componentes pares não múltiplas de 3. Dessa forma, este estudo se concentrará nos seguintes indicadores: Distorção harmônica total (DHT e DHT95%), distorção harmônica de 3ª ordem (DTT3 e DTT395%) e a distorção harmônica de ordem ímpar não múltipla de 3 (DTTi e DTTi95%).

4.7.1. Distorção Harmônica Total

A análise será iniciada apresentando a distorção harmônica total de tensão (DHT), um indicador global que quantifica a presença de distorções harmônicas de tensão. Os dados da DHT foram obtidos diretamente do analisador de energia, que monitorou continuamente a rede elétrica e calculou o valor do indicador para cada período amostral. A figura 4.23 ilustra a variação da DHT ao longo do tempo.

Figura 4.23 - Distorção harmônica total de tensão



Fonte: Autoria própria

A análise dos dados revelou que apenas o condutor neutro apresentou DHT superior ao limite de 10% estabelecido pela regulamentação durante o dia 08/12. Para uma análise mais detalhada, foi elaborada a Tabela 4.2 que apresenta a DHT média por condutor (fases e neutro).

Tabela 4.2 - DHT Média das fases e neutro

Fase	DHT
A	2,12%
B	2,27%
C	2,3%
Neutro	0,35%

Fonte: Autoria própria

A análise da DHT revelou que a fase A apresentou os menores valores dentre as fases, indicando menor presença de cargas não lineares nessa fase. Por outro lado, a fase C apresentou os maiores valores de DHT, sugerindo a presença de cargas com maior potencial de gerar distorções harmônicas. No neutro foi observado que 12 amostras tiveram valores diferentes de 0%, pelo horário de ocorrência onde a geração de energia tinha pouca ou nenhuma performance, acredita-se que a anomalia tenha vindo da rede da concessionária, provavelmente motivado pelo chaveamento de algum banco de capacitores na subestação da distribuidora.

Considerando os dados obtidos, pode-se afirmar que, apesar da anomalia identificada no condutor neutro, a maior parte do sistema operou dentro dos limites estabelecidos. Como os condutores não apresentaram DHT superior ao limite permitido, logo:

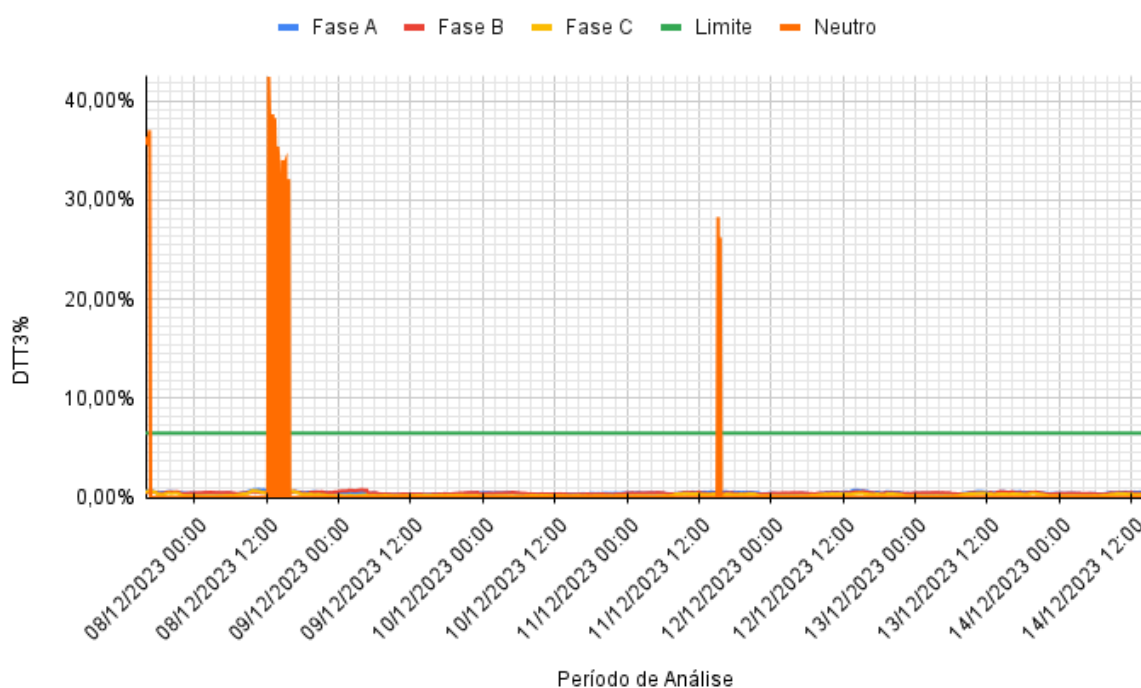
$$DHT_{95\%}(A/B/C/N) = 0\%$$

Por fim, não houve fatos que configurassem problemas significativos de distorção harmônica de tensão, que afetassem de maneira contundente as instalações elétricas do *Campus Garanhuns*.

4.7.2. Distorção Harmônica de 3º Ordem

Nesta seção, será apresentada a distorção harmônica de terceira ordem da tensão (DHT3), um indicador diretamente relacionado às componentes de sequência zero do sistema, que intensifica o fluxo de corrente no neutro. A DHT3 foi calculada indiretamente a partir dos dados de distorção harmônica, obtidos por meio do monitoramento das harmônicas múltiplas de 3. A Figura 4.24 apresenta as curvas da DHT3 para as fases e o neutro, obtidas após a aplicação da equação normalizada.

Figura 4.24 - Distorção harmônica de tensão de 3ª ordem



Fonte: Autoria própria

De forma similar ao item 4.7.1, observou-se que somente o condutor neutro apresentou DHT3 superior ao limite de 6,5% estabelecido em norma em algum momento durante os dias avaliados. Para uma análise mais detalhada sobre o impacto da distorção harmônica de 3ª ordem foi elaborada a Tabela 4.3 que apresenta a DHT3 média para cada condutor.

Tabela 4.3 - DTT3 Média das fases e neutro

Fase	DTT3
A	0,45%
B	0,44%
C	0,19%
Neutro	1,88%

Fonte: Autoria própria

A análise das informações da Tabela 4.3 indica que a fase C apresenta a menor DTT3, sugerindo menor contribuição das cargas conectadas nessa fase para as correntes de sequência zero e, conseqüentemente, menor impacto no condutor neutro. Por outro lado, a fase A apresenta os maiores valores de DTT3, indicando maior presença de cargas não lineares que geram correntes harmônicas de terceira ordem.

Com base nos dados analisados, pode-se concluir que, apesar das ultrapassagens momentâneas observadas no condutor neutro, o sistema, de forma geral, operou dentro dos limites estabelecidos. Para os condutores não houve nenhuma ultrapassagem do limite, logo:

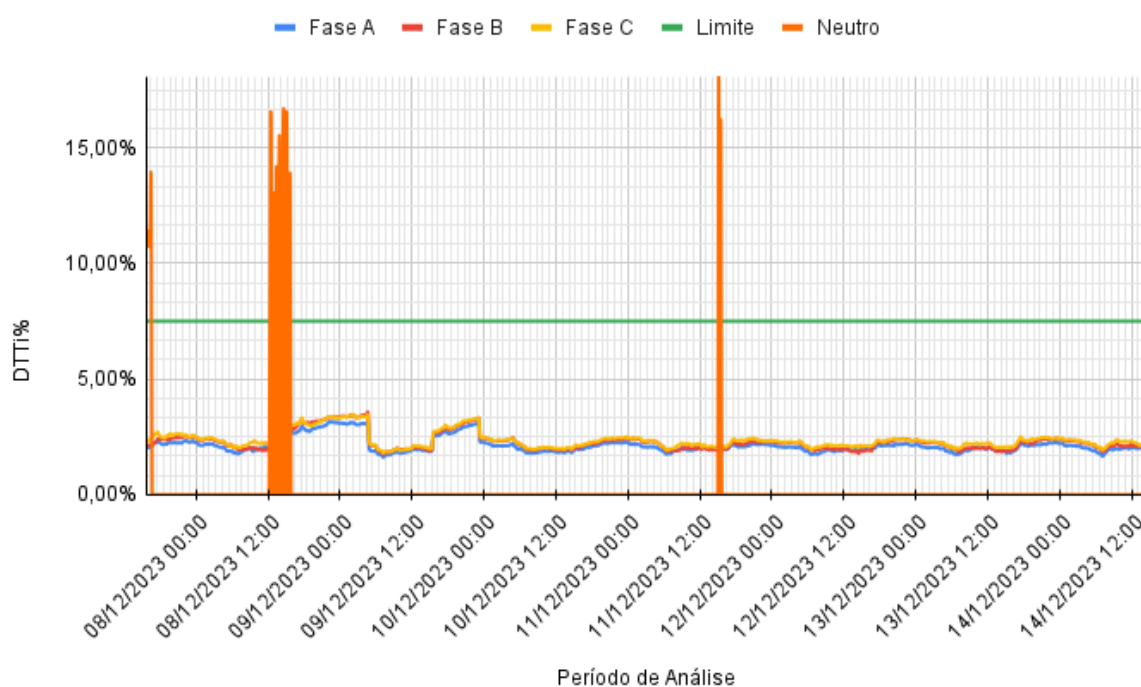
$$DTT3_{95\%}(A/B/C/N) = 0\%$$

Para o indicador $DTT3_{95\%}$ não foram observados problemas significativos que afetassem de forma contundente as instalações elétricas do *Campus Garanhuns*.

4.7.3. Distorção Harmônica de Ordem Impar não Múltipla de 3

Na seção a seguir, será apresentado os resultados e a análise da distorção harmônica total da tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 (DTTi). A DTTi foi calculada indiretamente a partir dos dados de distorção harmônicas ímpares não múltiplas de 3. A Figura 4.24 apresenta as curvas da DTTi para as fases e o neutro, obtidas após a aplicação da equação que consta em norma.

Figura 4.25 - Distorção harmônica de tensão de ordem impar não múltipla de 3



Fonte: Autoria própria

Pode-se observar que, do mesmo modo dos outros indicadores de distorção harmônica, apenas o indicador medido no condutor neutro apresentou alterações que ultrapassaram o limite de 7,5%, imposto pela regulação vigente em determinados momentos dos dias avaliados. Também, foi realizada a média da DTTi em cada um dos condutores, como é possível observar na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - DTTi Média das fases e neutro

Fase	DTT3
A	2,05%
B	2,23%
C	2,29%
Neutro	1,88%

Fonte: Autoria própria

Analizando as informações da Tabela 4.4 acima, fica nítido que a fase A possui a menor DTTi, já a fase C possui as cargas com as maiores contribuições para o indicador DTTi.

Com as informações obtidas na Tabela 4.4, pode-se afirmar que mesmo com as alterações vistas no condutor neutro, percentualmente, o sistema ficou submetido a condições consideradas normais de operação, segundo a norma atual. Para os condutores, não houve nenhuma ultrapassagem do limite, logo:

$$DTTi_{95\%}(A/B/C/N) = 0\%$$

Dito isto, não houve fatos que configurassem problemas significativos de distorção harmônica de ordem ímpar não múltipla de 3, que afetassem de maneira contundente as instalações elétricas do *campus* Garanhuns.

5. CONCLUSÕES

Em suma, este estudo logrou êxito em identificar e quantificar os desvios dos padrões de qualidade de energia no *Campus* que por ventura ocorreram no período avaliado mostrando sua aplicabilidade para o cenário que foi idealizado.

Constatou-se a necessidade de monitorar e se necessário controlar o consumo dos reativos haja visto que quando a carga do *Campus* opera exclusivamente com a alimentação da rede da distribuidora o fator de potência tende ao limite aceitável estabelecido em norma. No que diz respeito ao fator de potência do *Campus* na presença da usina fotovoltaica constatou-se que nesse cenário há uma operação dentro dos limites aceitáveis. Se o monitoramento do consumo de reativos indicar, sugere-se a condução de um estudo de viabilidade para a implementação de um sistema de controle de reativos no *Campus* que leve em consideração o fator de potência da instalação com todas as suas qualidades operativas.

Foi descoberto ao investigar os indicadores DRC e DCP que, a tensão em regime permanente apresentou extrapolações no nível de tensão que supriu o *Campus*, tal extrapolação exige um pagamento por parte da concessionária como compensação aos consumidores conectados ao barramento, porém ao investigar as faturas do mês correlato a extrapolação e os meses subsequentes foi observado que não há nenhuma indicação do pagamento da compensação. Assim, é indicada a administração do *Campus* buscar meios de esclarecer esse acontecimento junto à distribuidora. Ademais, as oscilações de tensões que ocorreram no período noturno podem estar associadas a ajustes indevidos no *tap* do transformador porém pode haver outras causas que podem provocar esse comportamento.

Os outros indicadores que foram apresentados nesse estudo encontraram-se dentro dos limites estabelecidos pela legislação. Além desses resultados vale a pena resgatar que esse estudo não proveu dados quanto a geração de energia mas sim da injeção de energia para a rede da concessionária.

Também é sugerido uma análise com foco na identificação e correção dos possíveis problemas que podem afetar o funcionamento da usina, tal como: Sujeira, módulos fotovoltaicos danificados, problemas com a isolação dos condutores na parte CC e CA, folgas nos conectores MC4, no sistema de aterramento e SPDA e nas condições de operação dos inversores podendo desenvolver um sistema de

monitoramento inteligente para o *Campus*. Colhendo os dados do pré estudo com as condições em que a usina encontra-se hoje e como ela irá responder após os testes e adequações.

Ressalta-se que os dados apresentados neste estudo consideram a usina do *Campus* com parte integrante do sistema elétrico local. Para uma avaliação precisa de suas contribuições nos indicadores de qualidade de energia, seria necessário, em um estudo futuro, coletar dados no QDCA da usina. Essa foi uma limitação que impactou a análise completa da geração e carga neste trabalho.

Pode-se concluir que os resultados deste estudo fornecem uma base sólida para aprofundar a compreensão da qualidade de energia no *campus* Garanhuns. Além disso, os dados coletados são de extrema relevância para o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação de potenciais problemas e para a otimização da eficiência energética da instituição.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Módulo 8 – Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica**: Anexo VIII da Resolução Normativa nº 956, de 7 de dezembro de 2021 Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Brasília: Diário Oficial da União, 2021.

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. . **Missão, Visão e Valores**. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/aceso-a-informacao/institucional/missao-visao-valores>. Acesso em: 25 jan. 2025.

BRASIL, 2022. **Lei nº 14.300/2022**. Diário Oficial da União.

DUGAN, Roger C.; MCGRANAGHAN, Mark F.; SANTOSO, Surya; BEATY, H. Wayne. **Electrical Power Systems Quality**. 2. ed. New York: McGraw Hill, 2002.

E cient allrounder. [s.l: s.n.]. Disponível em: https://barghnews.com/files/fa/news/1397/8/14/69337_335.pdf. Acesso em: 5 mar. 2025.

MERKLE, Anne. **Análise da Qualidade de Energia**. 2018. 75 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Unifacvest, Lages, 2018.

PEDROSA FILHO, Manoel Henrique de Oliveira. **Projeto Elétrico Instalação Sistema de Geração Solar Fotovoltaica de 72 kW**. Nov. 2017. Planta baixa.

Proposta Técnica. [s.l: s.n.]. Disponível em: https://www.minipa.com.br/images/proposta_tecnica/ET-5061C-1303-BR.compressed.pdf. Acesso em: 5 mar. 2025.

OLESKOVICZ, Mário. **Qualidade da Energia Elétrica**. São Carlos: USP, 2007.

SANTOS, Maísa Lauriane Ferreira dos. **Análise de Distúrbios na Qualidade da Energia Elétrica Empregando a Decomposição Variacional de Modos**. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, IFPB, João Pessoa, 2023.

SILVA, Luiz Carlos Evangelista da. **Efeitos das Distorções Harmônicas (Tensões e Correntes) e Desequilíbrios (Tensões) em Medidores Eletrônicos Trifásicos de Energia Elétrica Ativa**. 203 f. Dissertação - Curso de Engenharia Elétrica, Unesp, Ilha Solteira, 2008.

SOUZA, Arthur Costa de; TAVARES, Carlos Eduardo. **Análise das Distorções Harmônicas Geradas pelas Cargas não-lineares através do Aplicativo Computacional PQA**. Uberlândia: Ufu, 2014.

TOPVIEW. 2.2.0.0. São Paulo: Minipa do Brasil LTDA, 2014. CD-ROM.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Resumo dos Indicadores de Qualidade de Energia do *Campus* Garanhuns

$fp_{Gerador} = 0,9462$ – Indicador dentro do limite esperado.

$fp_{rede} = 0,9201$ – Indicador no limite determinado.

$DRP(\%) = 2,48\%$ – Indicador dentro do limite esperado.

$DRC(\%) = 2,88\%$ – Indicador fora do limite esperado.

$FD\% = 0,688\%$ – Indicador dentro do limite esperado.

$f = 60 \text{ Hz}$ – Indicador dentro do limite esperado.

$DHT_{95\%}(A/B/C/N) = 0\%$ – Indicador dentro do limite esperado.

$DTT3_{95\%}(A/B/C/N) = 0\%$ – Indicador dentro do limite esperado.

$DTTi_{95\%}(A/B/C/N) = 0\%$ – Indicador dentro do limite esperado.

APÊNDICE B – Quadros de Distribuição do *campus* GaranhunsQGD – *Campus* Garanhuns

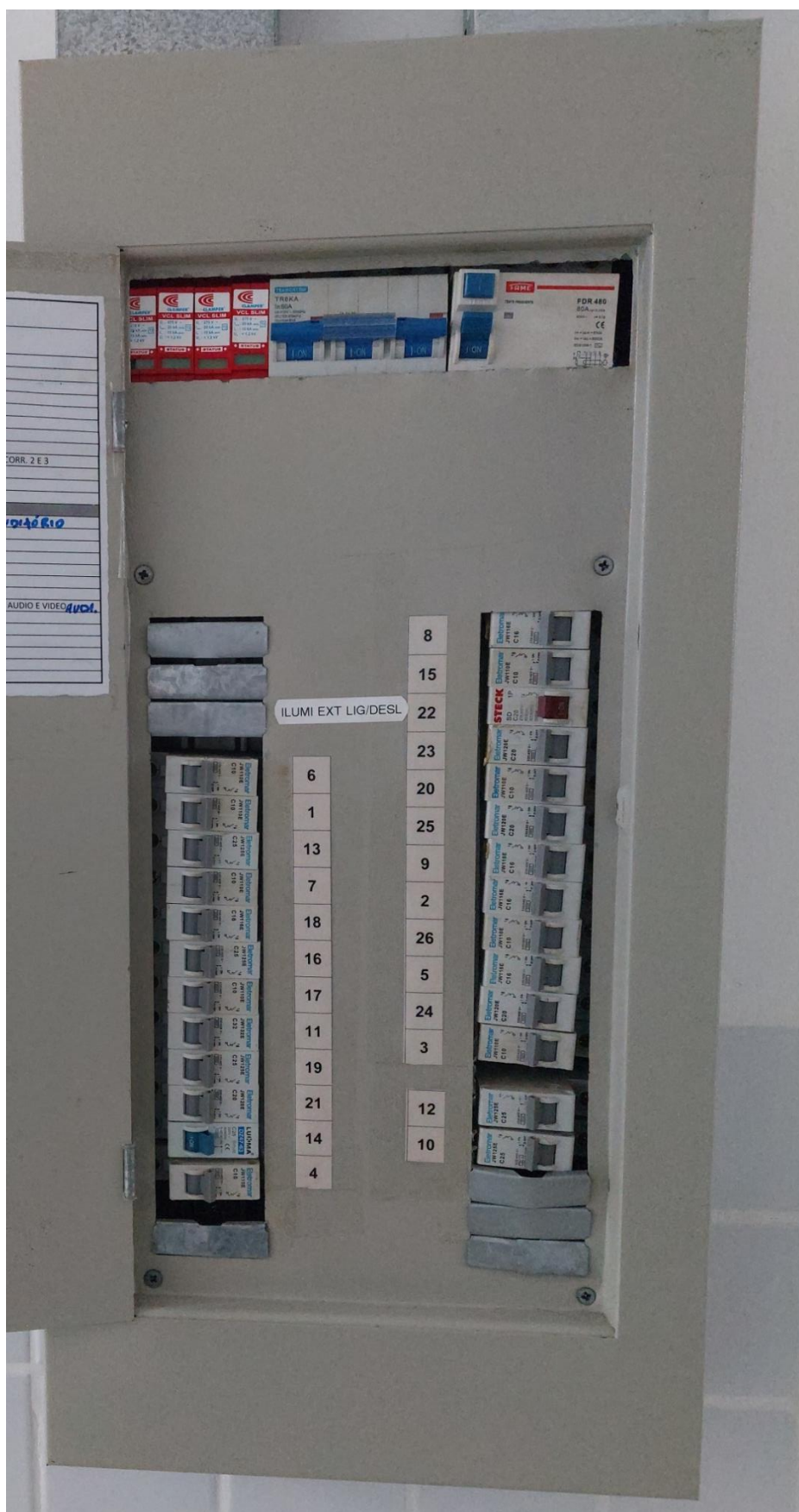
QDCA - Guarita/Estacionamento/Área Externa



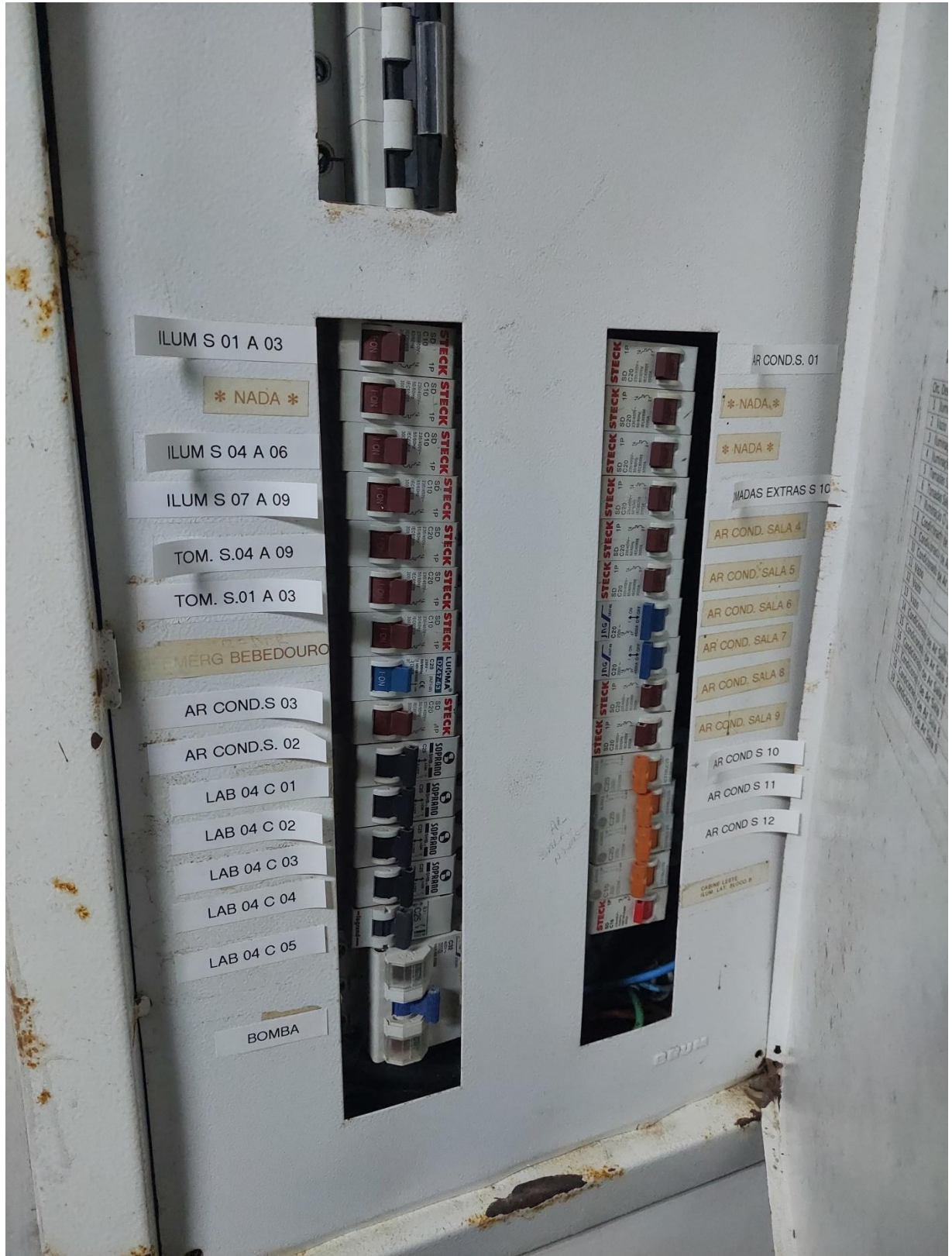
QGAC – Biblioteca



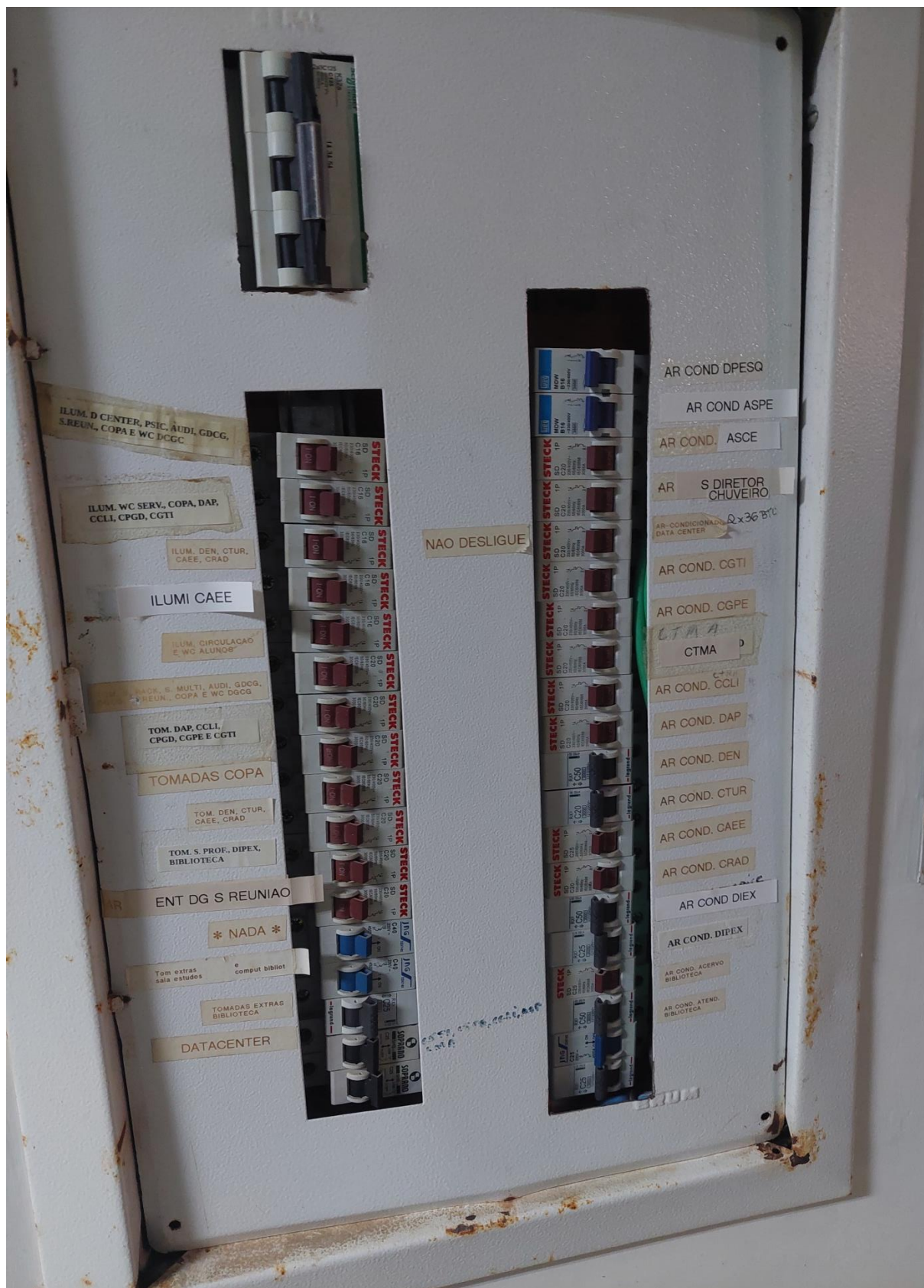
QDCA – Biblioteca



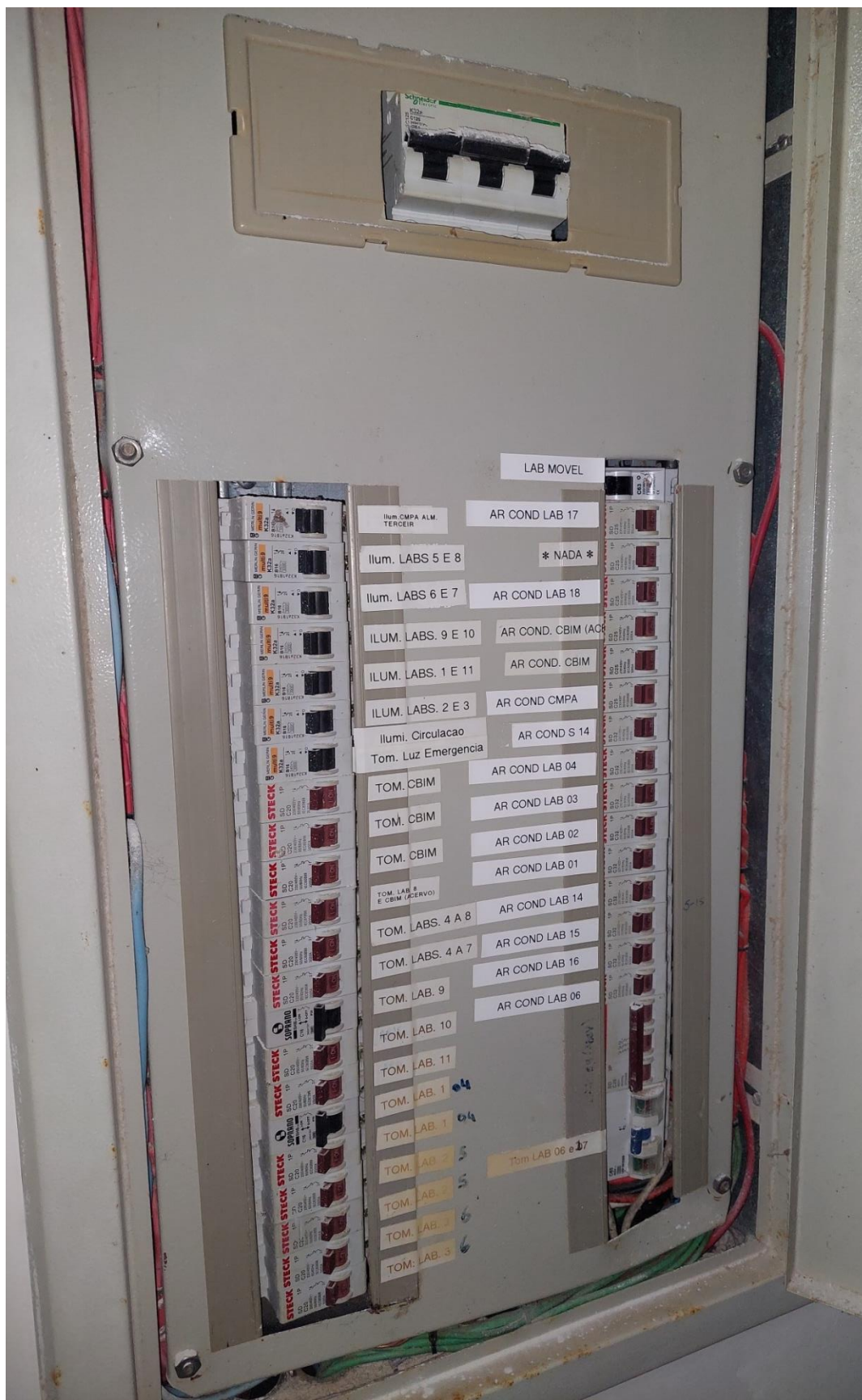
QDCA – Bloco B



QDCA – Bloco C



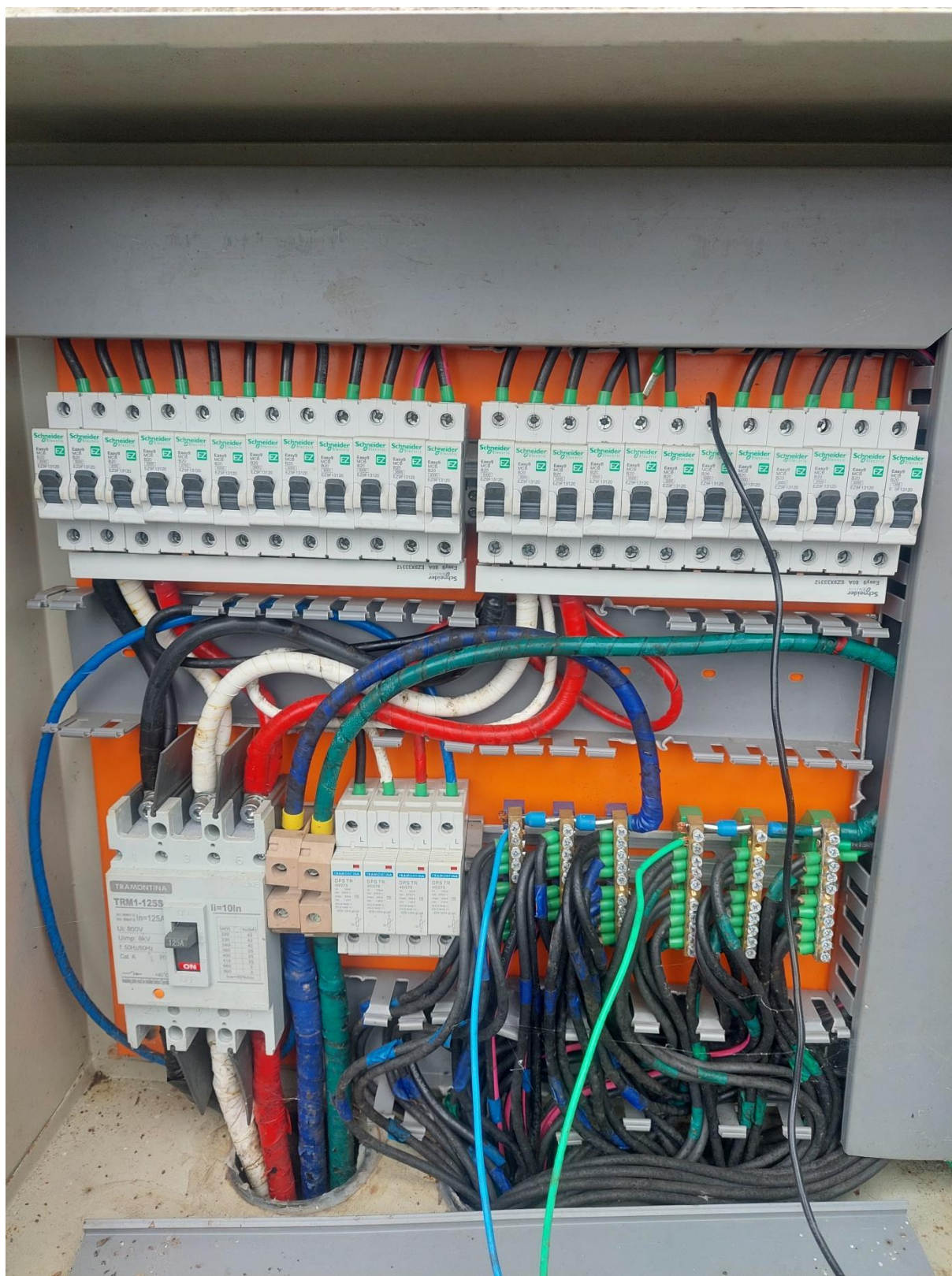
QDCA – Bloco D



QDCA – Bloco E



QDCA – Usina Solar Fotovoltaica do campus



ANEXOS

Especificações Técnicas dos equipamentos utilizados no trabalho:

Analizador de qualidade: Datasheet do equipamento

Inversor PHB3000SS: Datasheet

Módulo fotovoltaico YL255P-29b: Datasheet