

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS GOIÂNIA - DEPARTAMENTO IV
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GUSTAVO HENRIQUE CARDOSO MIRANDA

**ESTUDOS DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA NO IFG CAMPUS
GOIÂNIA**

Goiânia, 2022.

GUSTAVO HENRIQUE CARDOSO MIRANDA

**ESTUDOS DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA NO IFG CAMPUS
GOIÂNIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Goiás como requisito parcial para a obtenção do título
de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Dra. Alana da Silva Magalhães

Goiânia, 2022.

M672e Miranda, Gustavo Henrique Cardoso.
Estudos da qualidade da energia elétrica no IFG Câmpus Goiânia / Gustavo Henrique Cardoso Miranda. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2023.
72f.: il.

Orientador: Prof. Dra. Alana da Silva Magalhães.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Bacharelado em Engenharia Elétrica, Departamento de Áreas Acadêmicas IV, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

1. Energia elétrica – IFG Câmpus Goiânia – GO. I. Magalhães, Alana da Silva (orientadora). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. III. Título.

CDD 621.319

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Alisson de Sousa Belthodo Santos CRB1/ 2.266
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Gustavo Henrique Cardoso Miranda

Matrícula: 20161011060384

Título do Trabalho: Estudos da Qualidade da Energia Elétrica no IFG Campus Goiânia

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

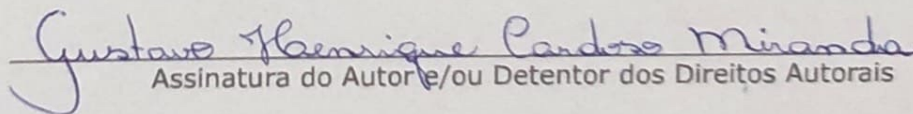
- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 22/12/2022.


Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

GUSTAVO HENRIQUE CARDOSO MIRANDA

ESTUDOS DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA
IFG CÂMPUS GOIÂNIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, como parte das exigências para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista.

Goiânia, 22 de dezembro de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Profª. Drª. Alana da Silva Magalhães
Orientador - IFG/Câmpus Goiânia

Prof. Me. Berthie de Castro Furtado
Membro Externo da Banca Examinadora - SENAI

Prof. Dr. Marcos Antônio Cardoso de Lima
Membro Interno da Banca Examinadora - IFG/Câmpus Goiânia

Documento assinado eletronicamente por:

- Berthiê de Castro Furtado, Berthiê de Castro Furtado - Docente - Senai (03783850000100), em 04/01/2023 16:41:29.
- Alana da Silva Magalhaes, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 22/12/2022 16:18:04.
- Marcos Antonio Cardoso de Lima, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 22/12/2022 16:16:59.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 22/12/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 359808
Código de Autenticação: 856c817475



AGRADECIMENTOS

Agradecer primeiramente a Deus, possibilitando transcorrer por todas as etapas para alcançar esse momento na vida.

A todos que ajudaram a percorrer a caminhada até a graduação, amigos, familiares e a todos os professores que passaram desde o início das atividades escolares.

A Profa. Dra. Alana da Silva Magalhães que direcionou no desenvolvimento deste trabalho, pela dedicação e atenção durante nossas reuniões.

Um agradecimento em especial aos meus pais que sempre incentivaram em todos os momentos no curso de graduação em Engenharia Elétrica.

RESUMO

Um dos principais motivos para a análise da qualidade da energia elétrica está em virtude da crescente utilização de cargas sensíveis à variação nos parâmetros da rede elétrica, ocasionando prejuízos aos usuários e a aplicação de dispositivos não lineares, que são responsáveis pela injeção de componentes harmônicas de corrente na rede, ocasionando distúrbios que afetam, sobretudo, em casos mais graves, a falha total destes. Neste contexto, o trabalho tem como principal objetivo realizar um estudo de caso e compará-lo com uma das campanhas de medição de outro estudo realizado no IFG – Campus Goiânia, que na oportunidade ocorreu em período com baixo consumo de energia em virtude da paralisação das atividades letivas devido à pandemia do Covid-19 (FURTADO, 2021). A metodologia adotada consiste em caracterizar as distorções harmônicas de corrente, as distorções harmônicas de tensão, a variação de frequência, o fator de potência, a tensão em regime permanente e o desequilíbrio de tensão, através da campanha de medições com a utilização de um analisador de energia produzido pela Embrasul Indústria Eletrônica, com o intuito de verificar se as instalações elétricas do local comportam-se em conformidade aos limites estabelecidos pelas normas vigentes. Realizou-se a campanha de medição nas instalações elétricas do local de estudo, considerando todas as cargas instaladas juntamente com o sistema fotovoltaico. Os resultados mostram que os fenômenos da qualidade do produto mantiveram-se dentro dos limites estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST e a Norma IEEE 519 – 2014. Entretanto, identificou-se níveis consideráveis de componentes harmônicas de corrente na rede, embora no outro estudo se justificava devido a utilização de carga reduzida.

Palavras-chave: PRODIST. Qualidade da Energia Elétrica. Harmônicas.

ABSTRACT

One of the main reasons for analyzing the quality of electrical energy is due to the increasing use of loads that are sensitive to variations in the parameters of the electrical network, causing damage to users and the application of non-linear devices, which are responsible for the injection of harmonic components of current in the network, causing disturbances that affect, especially in more serious cases, the total failure of these. In this context, the work has as main objective to carry out a case study and compare it with one of the measurement campaigns of another study carried out at the IFG - Campus Goiânia, which at the time took place in a period with low energy consumption due to the stoppage of the teaching activities due to the Covid-19 pandemic (FURTADO, 2021). The adopted methodology consists in characterizing the current harmonic distortions, the voltage harmonic distortions, the frequency variation, the power factor, the steady-state voltage and the voltage unbalance, through the measurement campaign with the use of an analyzer of energy produced by Embrasul Indústria Eletrônica, with the aim of verifying whether the electrical installations at the site behave in accordance with the limits established by current regulations. The measurement campaign was carried out in the electrical installations of the study site, considering all loads installed together with the photovoltaic system. The results show that the product quality phenomena remained within the limits established by PRODIST Module 8 and the IEEE 519 - 2014 Standard. However, considerable levels of current harmonic components were identified in the network, although in the other study it was identified justified due to the use of reduced load.

Keywords: PRODIST. Quality of Electric Power. Harmonics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Módulos do PRODIST.	19
Figura 2.2 – Faixas de tensão em relação à de referência.	21
Figura 2.3 – Triângulo das potências.	23
Figura 2.4 – Séries de Fourier para uma onda de tensão distorcida.....	24
Figura 2.5 – Tensões de linha de um sistema trifásico desequilibrado.....	29
Figura 2.6 – Relação entre a perda de vida útil do motor e o desequilíbrio de tensão.	30
Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia.	34
Figura 3.2 – Diagrama elétrico da subestação abrigada do IFG – Campus Goiânia.	35
Figura 3.3 – Analisador de Energia RE7000.....	36
Figura 3.4 – Ligação do RE7000 à rede elétrica.	37
Figura 4.1 – Transformador 1, P=500 kVA, 13,8/0,38 Kv.....	43
Figura 4.2 – Disposição dos circuitos no QGF-1.	43
Figura 4.3 – QGF-1: Quadro Geral de Força 1.	43
Figura 4.4 – Disposição de 6 inversores do IFG Campus Goiânia.	44
Figura 4.5 – Inversor 7 do IFG Campus Goiânia.	44
Figura 4.6 – Vista aérea da usina solar fotovoltaica do IFG Campus Goiânia.	45
Figura 4.7 – Detalhe das medições realizadas no ponto de medição M no QGF-1/ Transformador 1.	45
Figura 4.8 – Seleção do intervalo de registro para análise.	46
Figura 4.9 – Relatório de falta de energia.....	46
Figura 4.10 – Comportamento do nível de tensão em regime permanente (tensão entre fase e neutro).	47
Figura 4.11 – Comportamento do nível de tensão em regime permanente (tensão entre fase e fase).	48
Figura 4.12 – Comportamento do nível de desequilíbrio de tensão.....	49
Figura 4.13 – Comportamento da frequência.	50
Figura 4.14 – Potências médias por fase e trifásica no intervalo (kW, kVAr, kVA e FP).	51
Figura 4.15 – Comportamento das distorções harmônicas totais de tensões (DHT-V) nas fases A, B e C.	51
Figura 4.16 – Comportamento das distorções harmônicas de tensões individuais de 3ª, 5ª, 7ª, 9ª e 11ª ordem na fase A.	53

Figura 4.17 – Comportamento das distorções harmônicas de tensões individuais de 3 ^a , 5 ^a , 7 ^a , 9 ^a e 11 ^a ordem na fase B.....	54
Figura 4.18 – Comportamento das distorções harmônicas de tensões individuais de 3 ^a , 5 ^a , 7 ^a , 9 ^a e 11 ^a ordem na fase C.....	55
Figura 4.19 – Comportamento das distorções harmônicas totais de corrente (DHT-I) nas fases A, B e C.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Fenômenos da qualidade do produto em regime permanente ou transitório.	20
Tabela 2.2 – Faixa de tensão em regime permanente, igual ou inferior a 1kV (380/220 V). ...	21
Tabela 2.3 – Limite dos Indicadores de QEE para Tensão em Regime Permanente.....	22
Tabela 2.4 – Terminologia.....	25
Tabela 2.5 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).	27
Tabela 2.6 – Limites de distorção harmônica de tensão.	27
Tabela 2.7 – Limites de distorção harmônica de corrente para sistemas classificados de 120 V a 69 kV.....	28
Tabela 2.8 – Limites para os desequilíbrios de tensão.....	31
Tabela 2.9 – Variação de frequência em relação ao tempo permitido de interrupção.	32
Tabela 4.1 – Dados de curto-circuito no ponto de entrega da UC.	42
Tabela 4.2 – Valores dos indicadores do nível de tensão em regime permanente (tensão entre fase e neutro).	47
Tabela 4.3 – Valores dos indicadores do nível de tensão em regime permanente (tensão de linha).	48
Tabela 4.4 – Valores dos indicadores de desequilíbrio de tensão.	49
Tabela 4.5 – Valores dos indicadores de frequência.....	50
Tabela 4.6 – Valores das distorções harmônicas totais de tensões (DHT-V) nas fases A, B e C.	52
Tabela 4.7 – Valores das distorções harmônicas individuais de tensões (DHI-V) nas fases A, B e C.	52
Tabela 4.8 – Valores de corrente nas fases A, B e C no secundário do transformador 1.	55
Tabela 4.9 – Valores das distorções harmônicas totais de corrente (DHT-I) nas fases A, B e C.	57
Tabela 4.10 – Valores das distorções harmônicas individuais de corrente (DHI-I) nas fases A, B e C.....	57
Tabela 4.11 – Valores dos indicadores médio do nível de tensão em regime permanente (primeira campanha de medição / segunda campanha de medição).	59
Tabela 4.12 – Variações de desequilíbrio de tensão (primeira campanha de medição / segunda campanha de medição).....	60
Tabela 4.13 – Valores dos indicadores de fator de potência (primeira campanha de medição / segunda campanha de medição).	60

Tabela 4.14 – Valores dos indicadores de variação de frequência (primeira campanha de medição / segunda campanha de medição).....	61
Tabela 4.15 – Valores das distorções harmônicas totais de tensão (DHT-V) e individuais nas fases A, B e C (primeira campanha de medição / segunda campanha de medição).	61
Tabela 4.16 – Valores das distorções harmônicas totais de corrente (DHT-I) e individuais nas fases A, B e C (primeira campanha de medição / segunda campanha de medição).	63

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CELG – Companhia Energética de Goiás

DITH% – Distorção harmônica individual de tensão de ordem h

DTT% – Distorção harmônica total de tensão

DTTp% – Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3

DTTI% – Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3

DTT3% – Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3

DRC – Índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica

DRP – Índice de duração relativa da transgressão para tensão precária

IEC – International Electrotechnical Commission

IEEE – Institute of Electrical and Electronic Engineers

IFG – Instituto Federal de Goiás de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás

LED – Diodo Emissor de Luz (Light Emitting Diode)

MPPT – Rastreamento do Ponto de Máxima Potência

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PAC – Ponto de Acoplamento Comum

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

QEE – Qualidade de Energia Elétrica

QGF-1 – Quadro Geral de Força 1

rms – root mean square (valor eficaz)

SE – Subestação

SIN – Sistema Interligado Nacional

SFV – Sistema Fotovoltaico

SFCR – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

TA – Tensão de Atendimento

TC – Transformador de corrente

TL – Tensão de leitura

TP – Transformador de potencial

TR – Tensão de referência

UC – Unidade Consumidora

UFC – Universidade Federal do Ceará

USCA – Unidade de Supervisão de Corrente Alternada

VTCD – Variação de tensão de curta duração

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativa	17
1.2 Objetivo geral	18
1.3 Objetivos específicos	18
1.4 Estrutura da dissertação	18
2 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	19
2.1 Normas	19
2.1.1 O Módulo 8 do PRODIST	19
2.1.2 IEEE Std 519-2014	20
2.2 Grandezas da qualidade do produto	20
2.2.1 Tensão em regime permanente	20
2.2.2 Fator de potência	22
2.2.3 Harmônicos	24
2.2.3.1 Transformada de <i>Fourier</i>	25
2.2.3.2 Distorções harmônicas de tensão	25
2.2.3.3 Distorções harmônicas de corrente	28
2.2.3.4 Reduções das distorções harmônicas	29
2.2.4 Desequilíbrio de tensão	29
2.2.5 Variação de frequência	31
2.3 Considerações finais	32
3 METODOLOGIA	33
3.1 Fluxograma	33
3.2 Escolha do sistema com a geração solar fotovoltaica	34
3.3 Escolha do instrumento de medição	35
3.4 Escolha das grandezas a serem coletadas	36
3.5 Medições	36
3.6 Coleta dos resultados	38
3.7 Análise dos dados	38
3.8 Estudo dos dados do sistema	39
3.8.1 Desequilíbrio de tensão	39
3.8.2 Distorções harmônicas de corrente	39

3.8.3 Distorções harmônicas de tensão	39
3.8.4 Frequência	40
3.8.5 Tensão em regime permanente	40
3.9 Considerações finais	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1 Características elétricas do local de estudo	42
4.2 Transformador 1 e QDF-1	42
4.2.1 QDF-1	43
4.3 Sistema Fotovoltaico.....	44
4.4 Ponto de medição	45
4.5 Leitura das amostras	46
4.6 Tensão em regime permanente.....	46
4.7 Desequilíbrio de tensão.....	49
4.8 Variação de frequência	49
4.9 Fator de potência	50
4.10 Distorção harmônica de tensão total	51
4.10.1 Distorção harmônica de tensão individual	52
4.11 Distorção harmônica de corrente total	55
4.11.1 Distorção harmônica de corrente individual	57
4.12 Análise comparativa das campanhas de medição	58
4.12.1 Tensão em regime permanente	59
4.12.2 Desequilíbrio de tensão	59
4.12.3 Fator de potência.....	60
4.12.4 Variação de frequência	60
4.12.5 Distorção harmônica de tensão	61
4.12.6 Distorção harmônica de corrente	62
4.13 Considerações finais	64
5 CONCLUSÃO	66
5.1. Recomendações para trabalhos futuros.....	66
6 REFERÊNCIAS	68
ANEXO A – RELATÓRIO DOS VALORES MÉDIOS DIÁRIOS DA CAMPANHA DE MEDIÇÃO DE 09/09 A 16/09/2022	71

1 INTRODUÇÃO

A qualidade da energia (QEE) tornou-se uma importante área de pesquisa de engenharia nos últimos anos e tem chamado a atenção de consumidores comerciais e industriais, pois algumas das questões relacionadas a esse tema têm impactado esses usuários (LU et al., 2016). A organização *International Electrotechnical Commission* (IEC), define o termo qualidade da energia elétrica (QEE) como uma série de características da eletricidade, em um dado ponto do sistema elétrico, que são comparadas com um conjunto de parâmetros técnicos de referência (IEC, 2015).

Para padronizar os parâmetros avaliados em termos de QEE e definir as responsabilidades dos usuários e licenciados do sistema, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) elaborou os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica - Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica (FREITAS, 2018).

As principais causas para pesquisar este tema são: a) o crescente interesse pelo tema qualidade da energia; b) aumento significativo de harmônicos introduzidos na rede elétrica causado por dispositivos eletrônicos de potência de instalações comerciais, industriais e residenciais. Além do grande número de instalações de sistemas fotovoltaicos, causando efeitos indesejáveis na instalação elétrica, no que diz respeito à qualidade da energia elétrica; c) aumento da interligação de processos industriais onde a falha de qualquer componente, equipamento e/ou máquina leva a uma paralisação da linha de produção exigindo horas de reinício, resultando em prejuízo financeiro (DUGAN et al. 2004).

O trabalho feito por Jannuzzi (2007), apresentou uma proposta expondo a qualidade da energia elétrica fornecidas às unidades consumidoras do Brasil. A abordagem é analisada e tratada prioritariamente sob o foco do consumidor, isto é, considerando as suas reais necessidades técnicas, os seus direitos e deveres e ainda, em estrita consonância com a verdadeira missão da concessionária e do órgão regulador: prestar um serviço adequado.

No início da distribuição de energia elétrica a preocupação dos consumidores e agentes do setor (concessionárias, permissionárias e operador nacional do sistema elétrico), foi respectivamente, “ter energia elétrica” e “disponibilizar energia elétrica”. As preocupações sinalizaram atenção mais centrada na qualidade da energia elétrica.

Conforme Deckmann e Pomílio (2010), existem estudos que mostram os custos relacionados com perda da QEE. Além dos valores atualmente serem elevados, estima-se que tais custos aumentem se não forem adotadas soluções em curto prazo. Isso se deve aos efeitos cumulativos que a baixa QEE pode impor, seja por meio da redução da vida útil de

equipamentos, limitação da capacidade efetiva dos equipamentos, mau funcionamento de máquinas além das perdas elétricas em si. Ganhos mínimos com relação ao desempenho de métodos de monitoramento da qualidade da energia podem ser traduzidos em considerável redução de custos.

Além disso, a conexão de cargas não lineares à rede de distribuição aumentou significativamente nos últimos anos, graças aos componentes eletrônicos como iluminação, monitores de TV, computadores, dentre outros, sendo estes elementos os responsáveis pela injeção de harmônicas na rede.

A análise dessas harmônicas que são inseridas por esses componentes eletrônicos na rede elétrica é feita através de uma ferramenta matemática chamada Transformada de *Fourier*. A aplicação em um determinado sinal resulta na decomposição do mesmo em infinitos sinais com frequências múltiplas de sua frequência natural. A frequência padrão utilizada no sistema de distribuição brasileiro é 60 Hz, porém, devido a inúmeros fatores relacionados ao sistema de geração e transmissão de energia, ocorrem desvios de problemas que alteram os principais parâmetros, que são amplitude e frequência (RODRIGUES, 2009).

Em estudos realizados por Ragesh, Bharaneetharan e Vengadesh (2017), diversas técnicas de filtragem de corrente, correção do afundamento de tensão e correção do fator de potência são apresentadas para minimizar os efeitos. Entre eles estão os compensadores estáticos, chamados na literatura DSTATCOM (Distribution Static Compensators), que funcionam introduzindo corrente em um ponto de conexão comum entre a carga e a rede para fornecer compensação de potência reativa, correção do fator de potência e redução das distorções harmônicas de corrente.

Os estudos de Javadi (2016) apresentaram filtros de potência ativa, que possuem configuração e modo de operação complexo. Funcionam especialmente em caso de problemas devido às características da carga, como correção de assimetria de corrente, compensação de potência reativa e redução de harmônicos de corrente.

Em estudos de Fernandes (2009), outra alternativa apresentada é o DVR (Dynamic Voltage Restoration), que atua especificamente em problemas relacionados à rede. Este dispositivo, conectado em série com o sistema de distribuição e através de um transformador de injeção de fase, corrige quedas, assimetrias e interrupções de curta tensão.

Outro fator que contribui para distúrbios na rede é a presença de geração distribuída através da utilização de painéis fotovoltaicos cada vez mais evidente nos sistemas elétricos. A quantidade da energia produzida e inserida na rede por esses equipamentos depende da irradiação solar cuja variação é um dos fatores que pode impactar consideravelmente nos

parâmetros da qualidade da energia. Os painéis fotovoltaicos necessitam de inversores para injetar a energia produzida na rede. Esses inversores funcionam a partir de circuitos de eletrônica de potência responsáveis por injetar correntes harmônicas na rede de distribuição interferindo na qualidade da energia elétrica.

Os estudos sobre os impactos na QEE mostram os principais distúrbios eletromagnéticos inseridos pela geração distribuída, especialmente a geração fotovoltaica. Outro aspecto importante são os elementos necessários para integração do gerador distribuído com o sistema elétrico. Pode-se perceber que o inversor de frequência tem papel importante nos distúrbios inseridos no sistema elétrico, principalmente nas distorções harmônicas.

No artigo de Bogila et al. (2018), os autores apresentam um estudo da qualidade da energia elétrica no Campus da FACENS - Faculdade de Engenharia de Sorocaba micro usina fotovoltaica, onde analisam a frequência e as distorções harmônicas de corrente e tensão. Os resultados mostram que os valores atendem às recomendações da Norma IEEE 519-2014 e do Módulo 8 do PRODIST, 2018. No entanto, o estudo recomenda a necessidade de realizar testes adicionais de inversores fotovoltaicos para sistemas fotovoltaicos de micro instalação, considerando principalmente os aspectos da qualidade da corrente de entrada e o desenvolvimento tecnológico dos inversores.

O estudo realizado por Vieira (2019), propôs mostrar os valores de fator de potência em um sistema fotovoltaico conectado à rede, além de discutir a sua influência sobre o sistema. Realizado por meio da análise dos dados coletados pelo analisador de energia com o intuito de verificar consumo de energia ativa e reativa, bem como, a energia injetada pelo sistema de microgeração. Os dados foram transcritos para ferramentas de planilhas a fim de gerar gráficos e facilitar o estudo. De acordo com os resultados apresentados, percebeu-se que o fator de potência está diretamente relacionado com a eficiência do SFCR uma vez que, em dias com maior irradiância e, por consequência, maior geração de energia, o fator de potência mantém-se mais alto do que em dias com menor geração.

O estudo realizado por Balbino (2017) teve como objetivo identificar, medir e analisar o comportamento do SFCR de 3 kWp da UFERSA, na cidade de Mossoró-RN, a fim de se verificar os possíveis impactos à qualidade da energia elétrica associados aos SFCR's. Através da utilização de um analisador de energia, procurou-se medir os parâmetros da energia elétrica proveniente da rede elétrica, bem como os parâmetros da energia elétrica gerada pelo SFCR, com o intuito de fazer uma análise de impactos e propor correções para os mesmos. Concluiu-se que os parâmetros estão dentro das normas vigentes, porém os altos índices de taxa de distorção harmônica fizeram necessária a elaboração de um filtro passa-baixa para atenuar as

frequências indesejadas. Com a simulação do filtro no Simulink, constatou-se uma atenuação de até mais de 60%, melhorando assim a qualidade da energia gerada pelo sistema.

No trabalho realizado por Melo (2019), foi analisado as campanhas de medição da qualidade da energia elétrica em redes de distribuição, uma das etapas para a entrada de cargas ou fontes não lineares ao sistema, descrevendo as recomendações, análises, etapas e resultados obtidos com estas medições. Com a necessidade de utilização de analisador de energia para a realização das campanhas de medição, onde comprovaram a conformidade das redes quanto aos limites dos principais distúrbios da QEE. Onde os resultados analisados podem ser usados para a confecção de laudos técnicos que confirmem a não interferência da geração no sistema elétrico.

Furtado (2021), propôs avaliar a qualidade da energia nas instalações do IFG Campus Goiânia e verificar se os mesmos se comportavam em conformidade com os limites estabelecidos pelas normas vigentes. Foi permitida essa análise através da campanha de medição por meio do uso de um analisador de energia que foram instalados em três pontos do sistema. As medições ocorreram em três etapas: antes da implantação do projeto de eficiência energética, em seguida no ponto que inclui o ponto de modernização da iluminação e, por fim com a implantação do sistema fotovoltaico. A partir dos resultados obtidos e comparando a primeira campanha com a segunda, observou-se que em ambas as situações os fenômenos de qualidade do produto se mantiveram dentro dos limites estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST e a Norma IEEE 519-2014. Entretanto, nos resultados da terceira campanha observou-se considerável contribuição de distorções harmônicas de corrente provenientes do sistema fotovoltaico e demais cargas instaladas.

No geral, a pesquisa apresentada visa identificar, estudar o comportamento do sistema elétrico e analisar as causas desses distúrbios.

1.1 Justificativa

Diante do cenário atual, muitas medidas para melhorar o consumo de energia foram incentivadas, entretanto, podem reduzir significativamente a qualidade do produto. Entre as principais iniciativas do Instituto Federal de Goiás Campus Goiânia foi a implantação do sistema fotovoltaico. Assim, o trabalho se justifica em realizar medições e um estudo da qualidade da energia do sistema em plena carga, que não foi possível em campanhas de medições anteriores em virtude da paralisação das atividades letivas devido a pandemia do Covid-19 (FURTADO, 2021).

1.2 Objetivo geral

Avaliar e diagnosticar efeitos que possam estar afetando na qualidade da energia elétrica e o comportamento do sistema utilizado no Instituto Federal de Goiás Campus Goiânia, relacionados à qualidade do produto. O contexto dessa análise é detectar possíveis distúrbios, avaliar se estão enquadrados como problemas de qualidade de energia conforme o Módulo 8 do PRODIST e a Norma IEEE 519-2014.

1.3 Objetivos específicos

- a) realizar medições, por meio de um analisador de energia elétrica, conectado à rede elétrica do IFG - Campus Goiânia;
- b) quantificar o nível de tensão em regime permanente, fator de potência, distorções harmônicas de tensão e corrente, desequilíbrio de tensão e variação de frequência;
- c) comparar os resultados com a campanha de medição em estudo realizado no IFG - Campus Goiânia no período de 09/08 a 15/08/2021 com o baixo consumo de energia em virtude da paralisação das atividades letivas devido a pandemia do Covid-19 (FURTADO, 2021).

1.4 Estrutura da dissertação

Para a obtenção das informações necessárias e que os objetivos propostos sejam realizados, essa dissertação será descrita nos próximos capítulos com a seguinte organização:

- a) o capítulo 2 é apresentado a revisão bibliográfica das grandezas elétricas e a normatização que são aplicáveis à qualidade do produto. Demonstrando a maneira de se analisar os parâmetros para cada fenômeno;
- b) o capítulo 3 demonstra a metodologia para o desenvolvimento do trabalho, onde define os fenômenos da qualidade do produto a serem analisados, definição dos pontos para a coleta dos dados e escolha do instrumento adequado para a realização dessas medições conforme a normatização;
- c) o capítulo 4 apresenta os resultados e discussões referente aos fenômenos da qualidade do produto decorrente das medições realizadas;
- d) o capítulo 5 com a conclusão deste trabalho.

2 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

A qualidade da energia elétrica se compreende da avaliação do sistema elétrico, para que cumpram os parâmetros recomendados pela normatização vigente de maneira a ser utilizada de forma segura por seus usuários.

Nesse capítulo, serão apresentados à normatização, as grandezas elétricas que se aplicam e os valores recomendados.

2.1 Normas

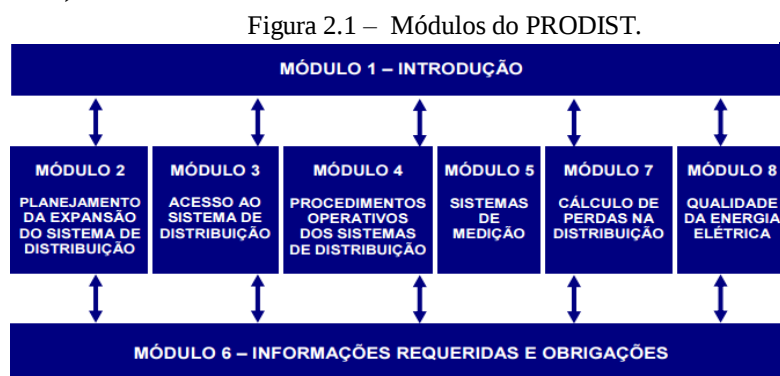
A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é uma autarquia em regime especial, sendo responsável pela fiscalização e controle da geração, transmissão, distribuição e a comercialização de energia elétrica.

No que compete ao âmbito em benefício da sociedade, faz a mediação entre os agentes do setor elétrico com os consumidores, atendendo as diversas reclamações visando à garantia da qualidade do produto.

Assim, a ANNEEL estabeleceu diretrizes para orientar os consumidores e as concessionárias por meio dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) descrito em seu Módulo 8, onde são apontados os métodos relacionados a qualidade do produto, do serviço prestado e no tratamento de reclamações.

2.1.1 O Módulo 8 do PRODIST

Os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) são documentos expedidos pela ANEEL desde a Resolução Normativa nº 345/2008, sendo responsável pela normatização no que compete ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. A Figura 2.1, ilustra oito módulos, onde o módulo oito apresenta os parâmetros e procedimentos inerentes a qualidade da energia elétrica (SILVÉRIO, 2016).



Fonte: PRODIST (2018).

O módulo 8 aborda a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado, estabelecendo os indicadores da QEE. Também define critérios e responsabilidades sobre as causas e efeitos de possíveis interrupções na qualidade do serviço prestado. Os procedimentos devem ser adotados por produtores, distribuidores, importadores ou exportadores de energia elétrica e detentores de outras transmissões instaladas (ANEEL, 2018).

2.1.2 IEEE Std 519-2014

As regulamentações nacionais não avaliam alguns fenômenos, como limites de distorções harmônicas de corrente.

Desta forma, como as normas e resoluções nacionais não descrevem limites de distorções harmônicas de corrente para unidades consumidoras; utiliza-se a Norma IEEE Std 519, que estabelece limites harmônicos tanto para tensão, quanto para corrente (IEEE, 2014).

2.2 Grandezas da qualidade do produto

Para análise da Qualidade de Energia Elétrica (QEE), são utilizadas as grandezas em regime permanente ou transitório, apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Fenômenos da qualidade do produto em regime permanente ou transitório.

Regime permanente	Regime transitório
Tensão em regime permanente	Variação de tensão de curta duração – VTCD
Fator de potência	
Harmônicos	
Desequilíbrio de tensão	
Flutuação de tensão	
Variação de frequência	

Fonte: Adaptado de ANEEL (2018).

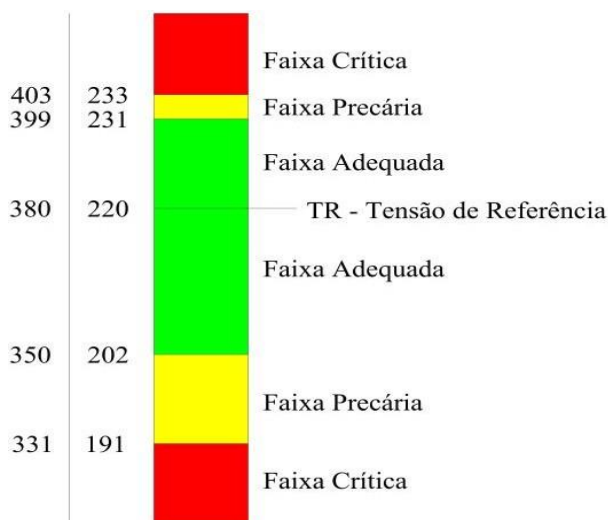
2.2.1 Tensão em regime permanente

As cargas elétricas foram criadas para funcionarem há um nível de tensão pré-estabelecido, de modo a manter um bom desempenho. Em situações com operação fora da faixa de tolerância irão, conseqüentemente, afetar o seu funcionamento, causando a diminuição de sua vida útil, dentre outros aspectos desagradáveis (ROCHA, 2016).

Os níveis de tensão são obtidos através de medições e comparados à tensão de referência, a qual deve ser a tensão nominal ou a contratada, de acordo com o nível de tensão do ponto de conexão (ANEEL, 2018).

Na Seção 2 do Módulo 8 do PRODIST, estabelece limites adequados, precários e críticos para níveis de tensão em regime permanente, definida na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Faixas de tensão em relação à de referência.



Fonte: Adaptado de ANEEL (2018).

Na Tabela 2.2, estabelece limites que constituem as faixas de tensão adequada, precária e crítica, onde mostra a faixa de tensão em regime permanente, igual ou inferior a 1 kV e a tensão de referência no secundário do transformador sendo de 380 V entre fase e fase (FF) e 220 V entre fase e neutro (FN).

Tabela 2.2 – Faixa de tensão em regime permanente, igual ou inferior a 1 kV (380/220 V).

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de variação da tensão de leitura TL (Volts)
Adequada	$(350 \leq TL \leq 399) / (202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(331 \leq TL < 350 \text{ ou } 399 < TL \leq 403)$ $(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403) / (TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: ANEEL (2018).

No que se refere aos procedimentos de medições, deve-se seguir um conjunto de leituras estabelecidas para a geração dos indicadores individuais de modo satisfatório, envolvendo o registro de 1008 (mil e oito) leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos, ou seja, com período de integralização de 10 minutos (ANEEL, 2018).

Diante das leituras válidas, são expressos em porcentagem, por quanto tempo o usuário ficou com níveis de tensão precário e crítico através do índice de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) e para tensão crítica (DRC), conforme as expressões (2.1) e (2.2).

$$DRP(\%) = \frac{nlp}{nlv} \cdot 100 = \frac{nlp}{1008} \cdot 100 \quad (2.1)$$

$$DRC(\%) = \frac{nlc}{nlv} \cdot 100 = \frac{nlc}{1008} \cdot 100 \quad (2.2)$$

Sendo: nlp o número de leituras situadas na faixa precária; nlc o número de leituras situadas na faixa crítica e nlv o número de leituras válidas.

O limite máximo para DRP foi especificado em 3% (três por cento) e o limite máximo observado para DRC foi estabelecido em 0,5% (cinco décimos por cento) demonstrados na Tabela 2.3.

Caso os indicadores DRP ou DRC sejam violados, a concessionária fará uma compensação financeira ao consumidor e o valor da compensação será creditado na fatura do consumidor.

Tabela 2.3 - Limite dos Indicadores de QEE para Tensão em Regime Permanente.

Indicadores de QEE	Limites dos Indicadores
DRP (%)	3
DRC (%)	0,5

Fonte: PRODIST (2018).

2.2.2 Fator de potência

O fator de potência é um indicador que representa a relação da energia ativa em razão da energia total (aparente) consumidas por um equipamento, máquina, dentre outras cargas, de maneira que as formas de ondas de tensão e corrente sejam periódicas, com variação entre 0 zero) e 1 (um) indutivo ou capacitivo (CODI, 2004).

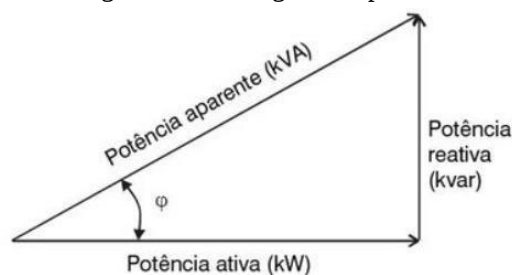
O fator de potência (FP) é calculado a partir dos valores das potências ativa e reativa (P e Q), através da expressão (2.3).

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

Sendo: P a potência ativa (kW); Q a potência reativa (kVAr) e S a potência aparente (kVA).

A Figura 2.3 apresenta o triângulo das potências, demonstrando a relação entre as três componentes da potência elétrica.

Figura 2.3 – Triângulo das potências.



Fonte: ROLIM (2015).

O Módulo 8 do PRODIST (2018) estabelece que o valor do fator de potência no ponto de conexão têm que estar entre 0,92 e 1,00 indutivo ou 1,00 e 0,92 capacitivo, em unidade consumidora que apresente tensão inferior a 230 kV.

Em situações que estiverem fora desses limites, conforme estabelecidas nos arts. 96 e 97 da Resolução Normativa 414/2010, implicará na inserção de cobranças ao faturamento regular de unidades consumidoras do grupo A¹ (ANEEL, 2010).

De acordo com Mamede (2010), várias são as causas que podem resultar em um baixo fator de potência.

- a) motores de indução trabalhando a vazio durante um longo período de operação;
- b) motores superdimensionados para as máquinas a eles acoplados;
- c) transformadores em operação a vazio ou em carga leve;
- d) grande número de reatores de baixo fator de potência suprimindo lâmpadas de descarga (lâmpadas fluorescentes, vapor de mercúrio, vapor de sódio etc.);
- e) fornos a arco;
- f) fornos de indução eletromagnética;
- g) máquinas de solda a transformador;
- h) equipamentos eletrônicos;
- i) grande número de motores de pequena potência em operação durante um longo período (MAMEDE, 2010).

Outro motivo responsável pelo baixo fator de potência é a presença de componentes harmônicos nas formas de onda da tensão e corrente (MARTINS et al. 2012).

A importância na correção do baixo fator de potência se justifica pelo fato de reduzir o aquecimento nos condutores, prologando a vida útil dos equipamentos, melhorando a eficiência da energia elétrica para a produção de trabalho útil, não se submeter aos acréscimos na fatura junto à concessionária, dentre outros aspectos (COPEL, 2020).

¹ Grupo A: Subgrupo A4 – tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV (ANEEL, 2010).

A instalação de bancos capacitores geralmente é a solução mais aplicada para a correção de baixos fatores de potência, em virtude de ser um sistema mais simples e com um ótimo custo benefício. Ressaltar a importância em dimensionar corretamente máquinas, motores e equipamentos; contratar mão de obra qualificada quanto ao estudo da correção do fator de potência, utilizar de maneira correta os equipamentos, dentre outros (CHESP, 2020).

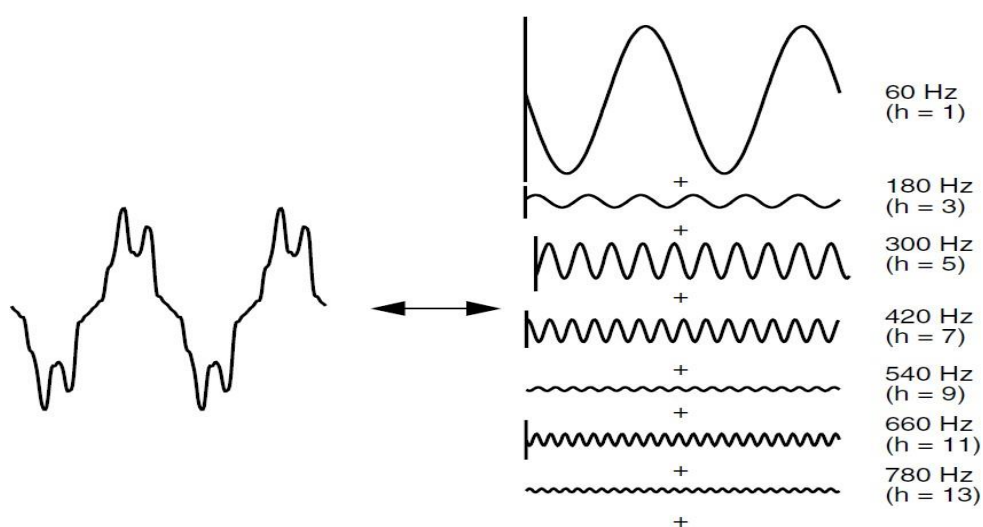
2.2.3 Harmônicos

Segundo Bonatto (1999), para considerar um sistema elétrico trifásico ideal, o comportamento dos sinais de corrente e tensão devem ser constantes, perfeitamente senoidal, balanceado entre as fases e ter frequência e amplitude de maneira invariável. Qualquer mudança nesse comportamento é considerada uma perturbação na rede elétrica.

As distorções harmônicas são fenômenos associados com deformações na forma de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental de acordo com o Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2018). Atualmente, devido aos sistemas elétricos de distribuição apresentar um elevado número de dispositivos eletrônicos de potência, tendo em vista sua característica não linear, ocasiona a distorção da forma de onda da tensão e corrente (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2016).

A Figura 2.4 demonstra a sobreposição de inúmeras distorções harmônicas individuais presente em uma instalação elétrica com a onda de frequência fundamental de 60 Hz, resultando na distorção.

Figura 2.4 – Séries de Fourier para uma onda de tensão distorcida.



Fonte: DUGAN et al. (2004).

2.2.3.1 Transformada de *Fourier*

Devido à propriedade de separar a soma das ondas de diferentes harmônicos, torna o conceito da série de *Fourier* aplicável na análise desses problemas. Essa ferramenta analisa cada componente individualmente e determinar a distorção resultante sobrepondo os vários componentes constituintes do sinal distorcido. Isso permite que a resposta do sistema seja analisada para cada frequência, produzindo a resposta geral com a soma das contribuições individuais da resposta de cada harmônico.

A decomposição de uma determinada função periódica é dada a partir da expressão (2.4).

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cdot \cos(h \cdot w_1 \cdot t) + b_h \cdot \sin(h \cdot w_1 \cdot t)] \quad (2.4)$$

Sendo: a_0 como a componente contínua; a_h e b_h as amplitudes ou valor de pico da componente de ordem h da série; h é a ordem harmônica; w_1 é a frequência angular fundamental de $f(t)$. O w_1 corresponde à frequência angular, sendo encontrada a partir da expressão (2.5).

$$f = \frac{1}{T} = \frac{w_1}{2 \cdot \pi} \rightarrow w_1 = \frac{2 \cdot \pi}{T} \quad (2.5)$$

Sendo: f como a frequência (Hz); T é o período (segundos); w_1 é a frequência angular fundamental (rad/s).

2.2.3.2 Distorções harmônicas de tensão

Ao se tratar dos indicadores de qualidade harmônica, inicialmente será abordada as recomendações descritas no Módulo 8 do PRODIST. Na Tabela 2.4, apresenta os termos utilizados para a determinação das distorções de tensão.

Tabela 2.4 – Terminologia.

Identificação da grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTTp\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTTi\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DTT3\%$
Tensão harmônica de ordem h	V_h
Ordem harmônica	h

Ordem harmônica máxima	$h_{\text{máx}}$
Ordem harmônica mínima	$h_{\text{mín}}$
Tensão fundamental medida	V_1
Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT95%
Valor do indicador DTTp% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTTp95%
Valor do indicador DTTi% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTTi95%
Valor do indicador DTT3% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT395%

Fonte: ANEEL (2018).

As expressões para o cálculo dos indicadores da distorção harmônica DITH%, DTT%, DTTp%, DTTi% e DTT3% são dadas pelas equações (2.6), (2.7), (2.8), (2.9) e (2.10), respectivamente.

$$DITH\% = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100 \quad (2.6)$$

Sendo: h como a ordem harmônica individual;

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\text{máx}}} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (2.7)$$

Sendo: h como todas as ordens harmônicas de 2 até $h_{\text{máx}}$;

$$DTTp\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (2.8)$$

Sendo: h como todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3 ($h = 2, 4, 8, 10, 14, 16, 20, 22, 26, 28, 32, 34, 38, \dots$) e que h_p é a máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3;

$$DTTi\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (2.9)$$

Sendo: h como todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3 ($h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37, \dots$) e h_i como a máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3;

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (2.10)$$

Sendo: h como todas as ordens harmônicas múltiplas de 3; (h = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39, ...) e h₃ como a máxima ordem harmônica múltipla de 3.

Com base nas expressões acima, o Módulo 8 do PRODIST estabelece o limite para as distorções harmônicas. Tais limites correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição.

Os limites das distorções harmônicas de tensão são apresentados na Tabela 2.5, onde são especificados considerando que 95% das amostras coletadas estão em conformidade. De modo que essas medições devem conter o total de 1008 leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada.

Tabela 2.5 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

Indicador	Tensão Nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT _{95%}	10,0%	8,0%	5,0%
DTT _{p95%}	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _{i95%}	7,5%	6,0%	4,0%
DTT _{395%}	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: ANEEL (2018).

Para instalações elétricas trifásicas, as medições de distorção harmônica devem ser feitas de acordo com o tipo de conexão do usuário, ou seja, entre tensões fase-neutro (FN) no ponto de conexão, e se não houver neutro disponível no ponto de conexão, a medição deve ser feita entre tensões fase-fase (FF).

Já a Norma IEEE Std 519 (2014), estabelece que seus proprietários ou operadores do sistema, limitarem as distorções harmônicas de tensão em seu ponto de acoplamento comum (PAC) de acordo com os parâmetros descritos na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Limites de distorção harmônica de tensão.

Tensão no PAC	DHI (%)	DHT (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5	8
$1 \text{ kV} \leq V \leq 69 \text{ kV}$	3	5
$59 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < V$	1	1,5

Fonte: IEEE (2014).

Nota-se que há diferenças entre os valores adotados pelo PRODIST e o IEEE Std 519, onde os valores do IEEE são inferiores comparados aos que são estabelecidos pela ANEEL.

2.2.3.3 Distorções harmônicas de corrente

Visto que a normativa nacional não avalia a distorção harmônica da corrente, podem-se recorrer às recomendações da Norma IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014), que estabelece os limites dos componentes harmônicos no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), localizado entre o consumidor e as concessionárias de energia elétrica. Para unidades comerciais (universidades, shopping centers, dentre outras) alimentadas por meio de um transformador, o Ponto de Acoplamento Comum (PAC) é comumente do lado da baixa tensão.

A Tabela 2.7, apresenta os limites das componentes harmônicas de corrente no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), para consumidores conectados a sistemas de 120 V a 69 kV, sendo que os limites dependem do nível de corrente de curto-circuito e da componente fundamental de corrente medida no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) (IEEE, 2014).

Tabela 2.7 - Limites de distorção harmônica de corrente para sistemas classificados de 120 V a 69 kV.

Distorção harmônica máxima da corrente em porcentagem de I_L						
h : Ordem das harmônicas ímpares ^{a, b}						
I_{cc} / I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	DDT
< 20	4,00	2,00	1,50	0,60	0,30	5,00
$20 < 50$	7,00	3,50	2,50	1,00	0,50	8,00
$50 < 100$	10,00	4,50	4,00	1,50	0,70	12,00
$100 < 1000$	12,00	5,50	5,00	2,00	1,00	15,00
> 1000	15,00	7,00	6,00	2,50	1,40	20,00

^a As harmônicas pares são limitadas a 25% do limite da harmônica ímpar imediatamente superior;

^b Não é permitido componente contínua, por exemplo, conversores de meia-onda;

^c Todos os equipamentos de geração de energia são limitados a esses valores de distorção de corrente, independentemente da capacidade de curto-circuito I_{cc} / I_L .

Sendo:

I_{cc} : Corrente de curto-circuito máxima no Ponto de Acoplamento Comum (PAC);

I_L : Corrente máxima demandada pela carga na componente da frequência fundamental no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), em condições normais de operação de carga, sendo recomendada a soma das correntes. Correspondentes à demanda máxima em cada um dos doze meses anteriores divididos por 12.

Fonte: Adaptado de IEEE Std 519-2014 (2014).

E assim, na medida em que aumenta a relação da corrente de curto-circuito com a corrente de demanda da carga, acarretará na elevação do limite da distorção harmônica.

2.2.3.4 Reduções das distorções harmônicas

Duas estratégias podem ser usadas para resolver problemas harmônicos. A primeira é a seleção de dispositivos, onde os efeitos negativos das correntes harmônicas aumentam com a impedância cumulativa dos cabos e fontes, assim a solução mais simples seria limitar a impedância total para reduzir tanto a distorção de tensão quanto a elevação de temperatura. (SCHNEIDER ELETRIC, 2015).

O segundo método é usar filtros passivos e ativos. O filtro LC passivo é sintonizado na frequência desejada para amenizar a banda. Os sistemas de recombinação harmônica (ponte dupla, comutação de fase) também se enquadram nesta categoria. Os filtros ativos eliminam os harmônicos injetando correntes harmônicas iguais onde ocorrem. Este tipo de filtro atua nos harmônicos existentes em tempo real para eliminá-los (SCHNEIDER ELETRIC, 2015).

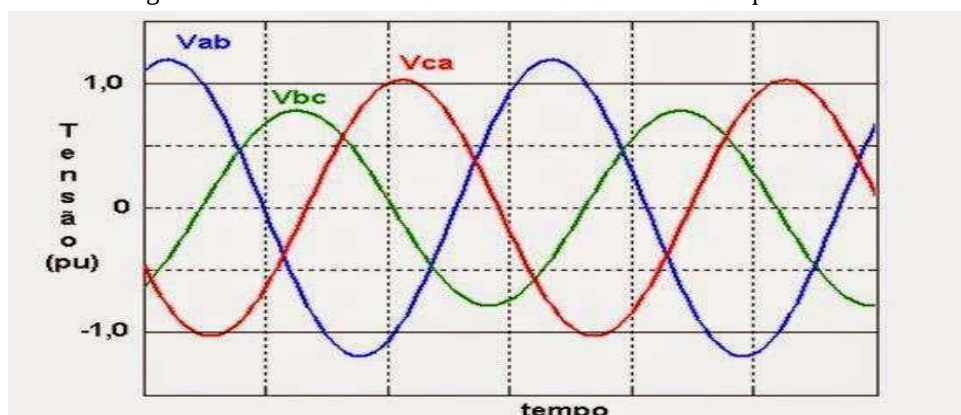
Dentre as possibilidades para a diminuição desses efeitos, essas soluções são as mais viáveis em virtude da complexidade dos problemas apresentados na rede elétrica.

2.2.4 Desequilíbrio de tensão

A ANEEL define o desequilíbrio de tensão como um fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as tensões de um determinado sistema trifásico e/ou um deslocamento de fase de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema.

Em condições normais, os sistemas trifásicos apresentam tensões senoidais de valores iguais e um deslocamento de fase de 120° . No entanto, diversas situações podem levar à assimetria das tensões existentes no sistema de distribuição e nas instalações de baixa tensão. Um exemplo de um sistema trifásico é ilustrado na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Tensões de linha de um sistema trifásico desequilibrado.



Fonte: MARTINHO (2010).

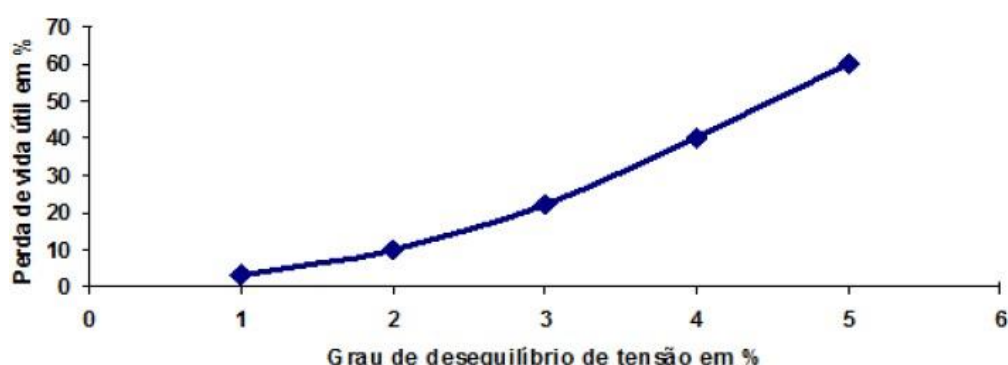
O caso mais comum é a assimetria na distribuição de cargas monofásicas, o que leva ao desequilíbrio de corrente e consequentemente o desequilíbrio de tensão. Inicialmente, durante a fase de projeto, as cargas são instaladas de forma sustentável, mas seu uso varia conforme a necessidade, sendo ligados e desligados durante o dia. Portanto, as correntes nas fases ficam desequilibradas, gerando desequilíbrio de tensão devido a diferentes quedas de tensão em cada fase (ROCHA, 2016).

A situação é diferente para linhas de transmissão aéreas. As capacidades intrínsecas entre os condutores de diferentes fases não são iguais devido ao arranjo geométrico dos condutores de fase. Portanto, as fases terão parâmetros diferentes, causando inúmeras quedas de tensão no fluxo de corrente elétrica, assim gerando desequilíbrio. Para reduzir este problema, o método de transposição de fase é geralmente utilizado.

As consequências dos desequilíbrios de tensão são inúmeras e, portanto, esse fenômeno é considerado um sério problema de qualidade de energia. A circulação de sequência negativa no sistema elétrico pode causar perdas adicionais de energia, redução da capacidade de transferência, aquecimento adicional do equipamento e deterioração dos motores de indução. Nesses motores, além de diminuir a vida útil, há redução de eficiência e aumento da temperatura (ROCHA, 2016).

A Figura 2.6 mostra o comportamento exponencial da perda de vida útil do motor de indução com a elevação do desequilíbrio de tensão.

Figura 2.6 – Relação entre a perda de vida útil do motor e o desequilíbrio de tensão.



Fonte: ROCHA (2016).

Para determinar o grau de desequilíbrio de tensão, o Módulo 8 do PRODIST apresenta o método das componentes simétricas. Que através deste, o grau de desequilíbrio é determinado pela relação dos módulos da tensão de sequência negativa e da tensão de sequência positiva, conforme a expressão (2.11).

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100 \quad (2.11)$$

Sendo: $FD\%$ o fator de desequilíbrio de tensão; V_- a magnitude da tensão eficaz de sequência negativa e o V_+ a magnitude da tensão eficaz de sequência positiva da frequência fundamental.

A solução abrange cálculos vetoriais, que não são práticos, entretanto há métodos elaborados para a simplificação desses cálculos, como o desenvolvido pelo CIGRÉ (*Congress Internationale des Grand Réseaux Électriques a Haute Tension*), utilizando as tensões de linha conforme a expressão (2.12) (TEODORO, 2005).

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (2.12)$$

Sendo: β calculado pela expressão (2.13).

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (2.13)$$

Sendo: V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} as magnitudes das tensões eficazes de linha na frequência fundamental.

Os limites correspondentes aos valores máximos desejados do índice de desequilíbrio de tensão são apresentados na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 - Limites para os desequilíbrios de tensão.

Indicador	Tensão nominal	
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$
FD%	3,0%	2,0%

Fonte: ANEEL (2018).

Não há parâmetros para definir o nível de desequilíbrio de corrente no PRODIST, mas no caso do uso do analisador de rede, permite-se calcular através das componentes simétricas e obter valores de desequilíbrio de tensão e da corrente.

2.2.5 Variação de frequência

Idealmente, a frequência seria a mesma em todo o sistema elétrico, mas na prática esse comportamento não ocorre. De acordo com Deckmann e Pomilio (2018), as flutuações de

frequência são justificadas por desequilíbrios temporários que ocorrem entre produção e demanda, o que implica em mudanças na velocidade dos geradores e turbinas que são essencialmente síncronas. Devido ao equilíbrio entre produção e consumo de energia, as flutuações de frequência são reduzidas independentemente da distância geográfica.

Mesmo levando em consideração à variabilidade da frequência da rede e um indicador de qualidade elétrica menos problemática, torna-se necessário monitorar e de controlar o equilíbrio entre a produção e o consumo dessa energia.

Assim, o módulo 8 do PRODIST prevê que em condições normais de operação e em regime permanente, instalações de produção ligadas à distribuição devem estar entre as faixas de 59,9 Hz e 60,1 Hz. No âmbito da presença desses distúrbios no sistema de distribuição, o tempo de recuperação deverá ser de 30 (trinta) segundos para que a geração retorne a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz (ANEEL, 2018).

Caso a geração ou carga precise ser interrompido, devem ser seguidos os requisitos da Tabela 2.11, que mostra a variação da frequência permitida com o tempo máximo de interrupção. Deve-se notar que a Tabela 2.9 especifica apenas o tempo de recuperação do balanceamento de geração de carga em função da variação de frequência e o desvio máximo permitido desses limites.

Tabela 2.9 – Variação de frequência em relação ao tempo permitido de interrupção.

Variação de frequência	Tempo máximo de interrupção
$f > 66 \text{ Hz}$	Não permitido
$f < 56,5 \text{ Hz}$	Não permitido
$f > 62 \text{ Hz}$	30 segundos
$f > 63,5 \text{ Hz}$	10 segundos
$f < 58,5 \text{ Hz}$	10 segundos
$f < 57,5 \text{ Hz}$	5 segundos

Fonte: Adaptado de ANEEL (2018).

2.3 Considerações finais

Este capítulo foi produzido com o intuito de fornecer informações sobre os fenômenos que influenciam na qualidade da energia. Onde permite verificar se as instalações elétricas do local funcionam dentro dos limites estabelecidos pelas normas vigentes. No próximo capítulo será apresentada a metodologia.

3 METODOLOGIA

Esse capítulo destina-se à apresentação dos processos metodológicos adotados no desenvolvimento deste trabalho para a análise da QEE e obter todas as informações relevantes do sistema elétrico a ser investigado.

3.1 Fluxograma

O Módulo 8 do PRODIST (2018), regulamentações elaboradas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Norma IEEE Std 519 (2014) serão utilizadas para tratar dos indicadores da qualidade da energia elétrica do IFG Campus Goiânia.

A metodologia está apresentada por meio de um fluxograma na Figura 3.1. Esse procedimento consiste nas seguintes etapas:

- a) escolha do sistema com a geração solar fotovoltaica;
- b) escolha do instrumento de medição que permite monitorar as grandezas elétricas em estudo;
- c) definição do ponto do sistema para a instalação do instrumento de medição;
- d) escolha das grandezas elétricas que serão analisados;
- e) monitoramento do sistema elétrico;
- f) coletar os dados monitorados;
- g) análise dos dados coletados conforme o Módulo 8 do PRODIST e a Norma IEEE 519-2014;
- h) por fim, realizar um estudo sobre os dados coletados na medição.

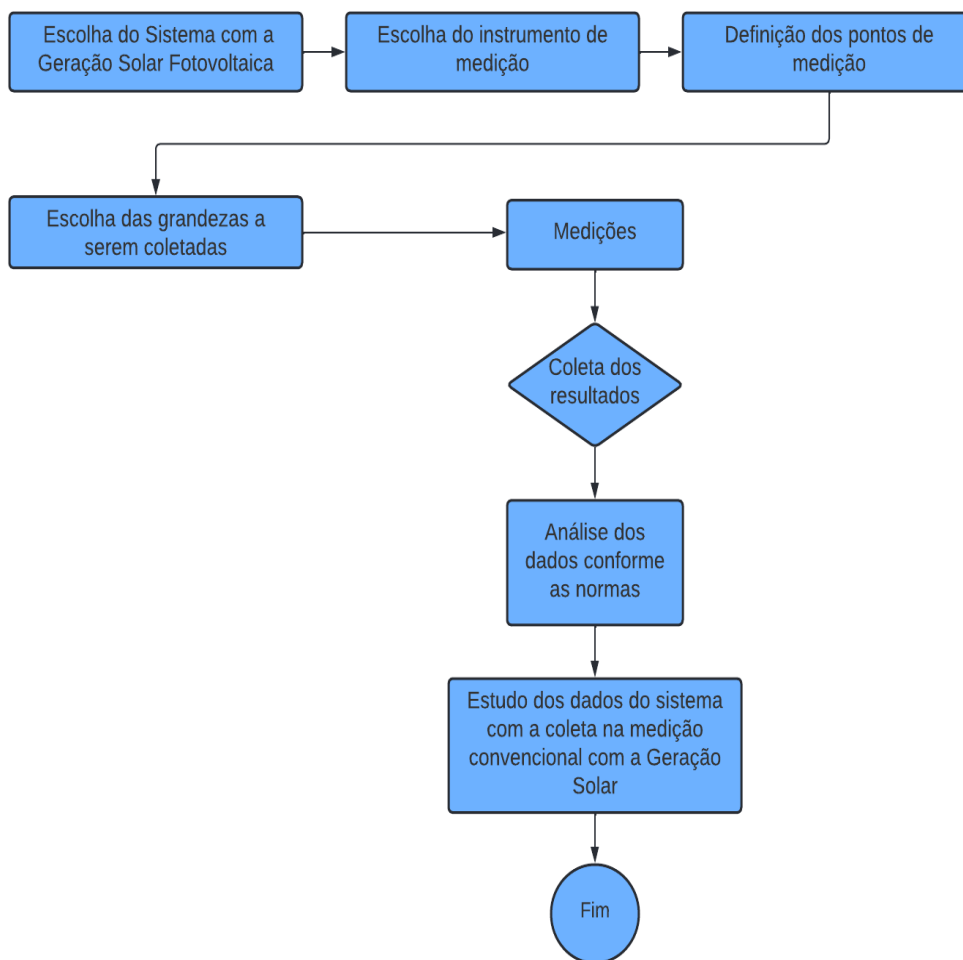


Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia.

3.2 Escolha do sistema com a geração solar fotovoltaica

Para o estudo do sistema elétrico do IFG Campus Goiânia, se fez necessário criar um plano de medição. Desse modo, estabelecido os dias de realização e o Quadro de Distribuição e Força (QDF) que o instrumento de medição seja instalado.

O IFG Campus Goiânia possui um sistema elétrico com uma variedade de cargas distribuídas a partir de dois transformadores. Para a análise, foi preciso escolher um desses transformadores para aplicar os procedimentos de análise da QEE. Sendo escolhido o transformador 1 com a classe de tensão igual a 13,8/0,38 kV de 500 kVA. O ponto de medição (M) foi definido tomando como base a carga instalada e a contribuição do sistema fotovoltaico para o sistema elétrico, conforme apresentado no diagrama elétrico na Figura 3.2.

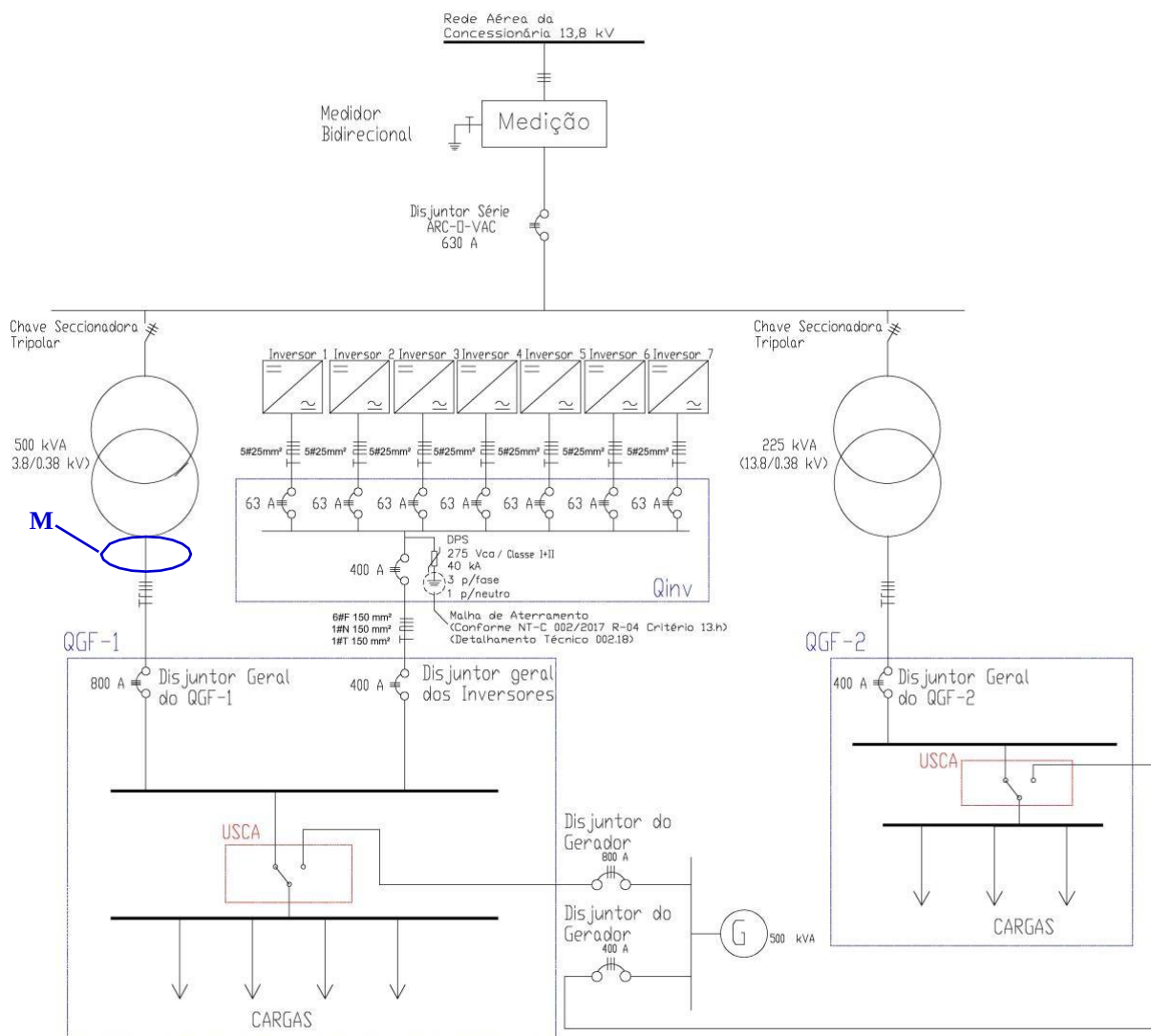


Figura 3.2 – Diagrama elétrico da subestação abrigada do IFG – Campus Goiânia.

3.3 Escolha do instrumento de medição

O Analisador de Energia é um equipamento que possui de três a cinco garras voltimétricas e bobinas amperimétricas, responsáveis por registrar tensões, correntes, harmônicos, sequência de fase, além das potências: ativa, reativa e aparente, dentre outras grandezas elétricas. O modelo RE7000 foi projetado pela EMBRASUL INDÚSTRIA ELETRÔNICA e oferece diversas ferramentas para análise de sistemas elétricos. Equipado com relógio de tempo real, onde permite leituras instantâneas e registros de grandezas para análises futuras. (EMBRASUL, 2018).

Pode ser utilizado nas mais variadas configuração de sistemas trifásicos, possuindo três entradas para tensão e corrente, atendendo amplitudes de até 3000 A. A medição de tensão suporta níveis de até 300 VAC entre fase e neutro (FN), permitindo que o instrumento se energize diretamente pelo canal de medição (EMBRASUL, 2018). A Figura 3.3 apresenta o

painel frontal do Analisador de Energia RE7000 e os demais acessórios que o compõem, sendo esse o instrumento de utilização no estudo.



Figura 3.3 – Analisador de Energia RE7000.

3.4 Escolha das grandezas a serem coletadas

Neste trabalho serão analisadas as seguintes grandezas elétricas:

- a) desequilíbrio de tensão;
- b) distorções harmônicas de corrente;
- c) distorções harmônicas de tensão;
- d) frequência;
- e) tensão em regime permanente.

3.5 Medições

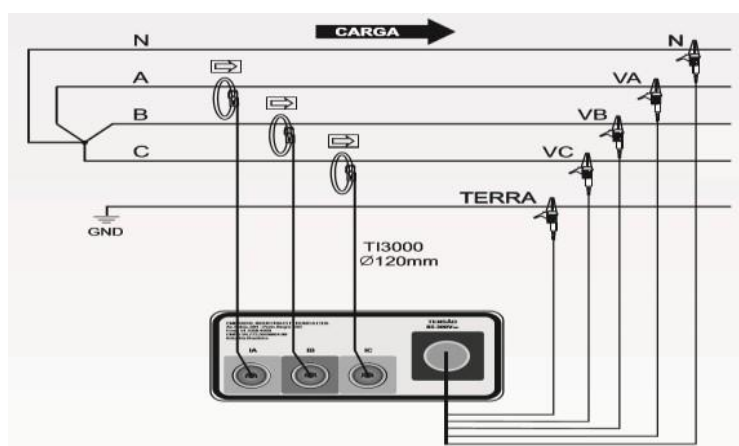
O item 9.1.6 do Módulo 8 do PRODIST determina que o conjunto de leituras para gerar os indicadores da qualidade do produto de regime permanente deve compreender o registro de 1008 (mil e oito) leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos, salvo em casos de desequilíbrio de tensão que o tempo de leitura deve ser alterado. No intuito de se obter 1008 (mil e oito) leituras válidas, intervalos adicionais devem ser agregados, sempre consecutivamente. Este período corresponde a uma semana de medição ininterrupta no ponto de interesse ao qual se deseja verificar a qualidade da energia (ANEEL, 2018). Além disso, estes instrumentos devem atender aos seguintes requisitos mínimos:

a) protocolos estabelecidos pelas normas vigentes da International Electrotechnical Commission (IEC) 61000 série ou normas técnicas brasileiras (NBR);

b) método de medição Classe A² ou S³, conforme norma vigente da IEC 61000-4-30. (ANEEL, 2018).

O esquema de ligação do medidor de energia à rede elétrica é indicado no manual do equipamento, conforme apresentado na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Ligação do RE7000 à rede elétrica.



Fonte: Embrasul, 2018.

A instalação do instrumento de medição consiste nas seguintes etapas:

- a) para cada fase deve ser instalada uma espira para medição da corrente elétrica, respeitando o sentido das setas indicadas nas mesmas. O sentido da seta indica a polaridade do sinal, evitando a medição de valores negativos. Deve ser observado se as espiras foram completamente abraçadas ao redor dos condutores;
- b) colocar as garras do tipo “jacaré” de tensão seguindo o padrão: primeiro o aterramento e depois N, A (L1), B (L2) e C (L3) sucessivamente.

² Medidor Classe A: Aplicado em situações, onde a precisão da medição é fundamental. Sugere-se medidores do tipo Classe A no setor elétrico nacional em questões judiciais ou em processos de mediação junto à ANEEL onde envolve concessionárias e consumidores (ANEEL, 2014).

³ Medidor Classe S: Aplicado no setor elétrico nacional em campanhas de medição, em medições amostrais. Utilizado para verificação da procedência de reclamações por parte de consumidores, quanto aos fenômenos da qualidade da energia elétrica (ANEEL, 2014).

- c) para cada fase deve ser instalada uma espira para medição da corrente elétrica, respeitando o sentido das setas indicadas nas mesmas. O sentido da seta indica a polaridade do sinal, evitando a medição de valores negativos. Por fim, observar se estão completamente abraçadas ao redor dos condutores;
- d) colocar as garras do tipo “jacaré” de tensão seguindo o padrão: primeiro o aterramento e depois N, A (L1), B (L2) e C (L3) sucessivamente.

3.6 Coleta dos resultados

Após o término do período de medição, os dados ficam salvos automaticamente no equipamento. Em seguida, é necessário salvar o arquivo em um dispositivo de memória. Aconselha-se, neste caso, a transferência dos dados para um PC ou *laptop* utilizando o cabo de interface óptica para USB, fornecido junto com o analisador. Para a visualização dos dados no PC ou *laptop*, utiliza-se o *software* ANL7000. Esse programa é utilizado para gerar os gráficos temporais, além de outras funções para analisar QEE. O mesmo ainda permite que os dados possam ser extraídos em arquivos de texto para que possam ser usados em *software* de gráficos mais complexos.

Desenvolvido pela EMBRASUL INDÚSTRIA ELETRÔNICA LTDA, o *software* ANL7000 oferece ao usuário de Analisadores de Energia uma ferramenta de análise de sistemas de potência completa possibilitando a leitura de dados armazenados na memória dos registradores para a análise e tratamento dessas grandezas elétricas registradas. Possibilitam escalas com configurações flexíveis, diversidade e liberdade na escolha de cores no vídeo, facilitam seu uso ao passo que propiciam um alto nível de qualidade nos relatórios e gráficos gerados, aumentando assim a qualidade de apresentação final (EMBRASUL, 2018).

3.7 Análise dos dados

Inicialmente deve-se fazer o download dos dados registrados no Analisador de Energia junto ao computador, com auxílio do *software* ANL7000. Em seguida converter esses dados em planilha eletrônica e ajustar as medições, de forma que contemple o registro de 1008 (mil e oito) leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos com o período de integração de 10 minutos, totalizando o registro de 7 dias consecutivos.

Esse procedimento é comum para todas as grandezas medidas. No final do período, os resultados são comparados com os limites estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST e a Norma IEEE 519-2014. Se os indicadores forem excedidos, determina que o local medido

apresentam problemas com a QEE. Caso contrário, se a incidência das perturbações não ultrapassarem esses limites, a instalação elétrica apresenta desempenho adequado.

3.8 Estudo dos dados do sistema

Para cada grandeza elétrica, serão adotadas algumas particularidades para o alcance satisfatório do tratamento desses dados.

3.8.1 Desequilíbrio de tensão

Para tratar os dados do desequilíbrio de tensão é necessário:

- a) obter os resultados das medições das tensões eficazes entre fase e fase e entre fase e neutro;
- b) gerar gráficos e/ou tabelas com auxílio do *software* matemático e as expressões (2.11), (2.12) e (2.13) referente ao desequilíbrio de tensão entre fase e fase e entre fase e neutro;
- c) determinar o fator de desequilíbrio de tensão (FD);
- d) analisar os resultados, de acordo os limites estabelecidos na Tabela 2.8.

3.8.2 Distorções harmônicas de corrente

Para tratar os dados de distorções harmônicas de corrente é necessário:

- a) obter os resultados das medições das distorções harmônicas totais e individuais da corrente;
- b) gerar gráficos e/ou tabelas com auxílio do *software* matemático, relativo às distorções harmônicas totais de corrente nas fases A, B, C e as distorções harmônicas individuais de corrente nas fases A, B e C;
- c) determinar a relação entre ICC/IL, nesse caso, a corrente de curto-circuito (ICC) no PAC (Ponto de Acoplamento Comum) dividida pela corrente de demanda da carga (IL). Para obter a corrente média anual de demanda máxima (IL) é necessário somar as correntes correspondente a demanda máxima durante cada um dos doze meses anteriores e dividir por 12. Porém como o valor de IL não é conhecido, esse valor pode ser estimado a partir da corrente de plena carga do transformador como aproximação da corrente de demanda máxima, obtido durante a campanha de medição.
- d) analisar os resultados, de acordo os limites estabelecidos na Tabela 2.7.

3.8.3 Distorções harmônicas de tensão

Para tratar os dados de distorções harmônicas de tensão é necessário:

- a) obter os resultados das medições das distorções harmônicas totais e individuais da tensão;
- b) gerar gráficos e/ou tabelas com auxílio do *software* matemático, relativo as distorções harmônicas totais de tensões nas fases A, B e C e as distorções harmônicas individuais das tensões nas fases A, B e C;
- c) determinar o número de amostras que ultrapasse os limites estabelecido na Tabela 2.5 ou Tabela 2.6, referente à distorção harmônica total de tensão e distorção harmônica individual, que estabelecem os limites permitido, respectivamente, do Módulo 8 do PRODIST e da Norma IEEE Std 519, 2014;
- d) analisar os resultados, de acordo os limites estabelecidos na Tabela 2.5 ou Tabela 2.6.

3.8.4 Frequência

Para realizar o tratamento dos dados da variação de frequência é necessário:

- a) obter os resultados das medições da frequência;
- b) gerar gráficos e/ou tabelas com auxílio de *software* matemático;
- c) determinar os valores médio, máximo e mínimo de frequência;
- d) determinar o número de amostras que contrariam as condições normais de operação, isto é, que não estejam no intervalo de 59,90 Hz a 60,10 Hz; e analisar os resultados, de acordo os limites estabelecidos para as condições normais de operação.

3.8.5 Tensão em regime permanente

Para realizar o tratamento dos dados do nível de tensão em regime permanente é necessário:

- a) inicialmente, estar munido dos resultados das medições das tensões eficazes entre fase e fase e entre fase e neutro;
- b) gerar gráficos e/ou tabelas com auxílio de *software* matemático, relativo aos níveis de tensão em regime permanente da tensão eficaz entre fase e fase e fase e neutro;
- c) determinar os valores de DRP – Duração relativa da transgressão de tensão precária e DRC – Duração relativa da transgressão de tensão crítica com auxílio das expressões (2.1) e (2.2);
- d) determinar os valores médio, máximo e mínimo das tensões eficazes entre fase e fase e entre fase e neutro;

e) analisar os resultados, de acordo os limites estabelecidos na Tabela 2.2 ou Tabela 2.3, que mostram as faixas de tensões adequada, precária e crítica em relação à tensão de referência.

3.9 Considerações finais

A metodologia foi desenvolvida para a avaliação do desempenho do sistema elétrico do IFG Campus Goiânia. Inicialmente foi preciso buscar métodos de investigação e informação do sistema elétrico a ser analisado para facilitar na busca de qual ponto possui influência fotovoltaica e realizar a medição. Além disso, foi essencial realizar o planejamento da medição, seguindo as diretrizes de instalação e segurança aos usuários.

A análise computacional permite uma melhor interação com os dados. Dessa forma, as ferramentas do *software* possibilitam análises estatísticas para o tratamento dos dados e gráficos. E por fim, permitindo o estudo do sistema elétrico a partir desses resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados os resultados das medições adquiridas pelo Analisador de Energia RE7000. Os resultados são apresentados a partir do ponto do sistema elétrico que foi instalado o instrumento e feito o monitoramento. As medições e as análises dos dados foram realizadas conforme a metodologia descrita no capítulo 3 deste trabalho. Além de ressaltar a compreensão das características do local de estudo.

4.1 Características elétricas do local de estudo

O IFG Campus Goiânia é atendido por uma subestação abrigada, que é alimentada por uma rede aérea da ENEL DISTRIBUIÇÃO GOIÁS com classe de tensão igual a 13,8 kV, conforme apresentado no diagrama elétrico da Figura 3.2 na metodologia.

A subestação é composta por:

- a) um transformador de 500 kVA e outro de 225 kVA;
- b) grupo gerador interligado com os dois transformadores através da USCA (Unidade de Supervisão de Corrente Alternada);
- c) dispositivos de proteção dos circuitos das cargas conectados no barramento secundário do transformador de 500 kVA, o disjuntor onde alimenta os sete inversores, que são interligados aos módulos fotovoltaicos e seus respectivos dispositivos de proteção.

A Tabela 4.1 apresenta os níveis de curto-circuito no ponto de entrega da UC - Unidade Consumidora.

Tabela 4.1 – Dados de curto-circuito no ponto de entrega da UC.

Curto-circuito	Corrente elétrica (A)
Trifásico	5591,662
Bifásico (Fase-Fase)	4842,522
Monofásico (Fase-Terra) máx	2991,123
Monofásico (Fase-Terra)mín.	273,075

Fonte: 3E ENGENHARIA (2020).

4.2 Transformador 1 e QDF-1

O transformador 1 possui potência equivalente a 500 kVA, classe de tensão igual a 13,8/0,38 kV conforme apresentado na Figura 4.1.



Figura 4 1 – Transformador 1, P=500 kVA, 13,8/0,38 kV.

4.2.1 QDF-1

Os circuitos são distribuídos no QDF-1, conectado ao secundário do transformador 1 com a distribuição de quatorze circuitos conforme apresentado na Figura 4.2 e na Figura 4.3.



Figura 4 2 – QGF-1: Quadro Geral de Força 1.

QUADRO DE DISTRIBUIÇÃO DE CIRCUITOS	
Nº	DESCRIÇÃO
1	Data Center - Reserva
2	Bloco 200
3	Livre
4	Livre
5	Bloco 100 - Hall do Teatro
6	Força do Blco 500 - Mecânica - ar bloco 200
7	Sala de Manutenção
8	Teatro - Bloco 100 - iluminação do pátio externo
9	Bloco 600 - Data Center - Biblioteca - Auditório Demartin - Sala dos Servidores -
10	Bloco 400 - Laboratório de Informática
11	Circuito sem carga - Parado na caixa ao lado do bloco 500
12	Livre
13	Bloco 300
14	Livre

Figura 4.3 – Disposição dos circuitos no QGF-1.

4.3 Sistema Fotovoltaico

A sua conexão junto à rede elétrica fica através do barramento do secundário do transformador 1 ($P=500$ kVA, 13,8/0,38 kV), que a partir de um disjuntor de 400A alimenta os sete inversores do sistema fotovoltaico.

A Usina Solar Fotovoltaica do IFG Campus Goiânia são compostas por sete inversores *string* SIW500H ST030 WEG, com potência nominal individual de 30 kW, conforme apresentado na Figura 4.4 e 4.5.

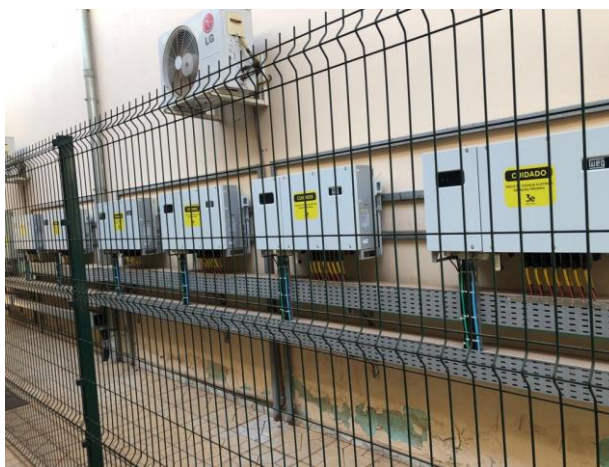


Figura 4.2 – Disposição de 6 inversores do IFG Campus Goiânia.



Figura 4.3 – Inversor 7 do IFG Campus Goiânia.

Com potência instalada em módulos fotovoltaicos de 251,875 kWp, constituída de 775 módulos de silício policristalino, com potência individual de 325 Wp. O arranjo desses 775 módulos ficaram dispostos conforme apresentado na Figura 4.6.



Figura 4.4 – Vista aérea da usina solar fotovoltaica do IFG Campus Goiânia.

4.4 Ponto de medição

A definição do ponto de medição para o monitoramento dos indicadores da QEE no IFG Campus Goiânia foi seguindo as diretrizes informadas na metodologia. Apresentando o critério de escolha do ponto do sistema elétrico a ser instalado o instrumento de medição e obedecendo às prescrições do Módulo 8 do PRODIST. O período da medição e o ponto de medição escolhido do sistema elétrico são apresentados a seguir.

O monitoramento foi realizado no período de 09/09 a 21/09/2022, com intervalos entre as leituras de 10 minutos, resultando ao mínimo o registro de 1008 (mil e oito) leituras utilizáveis para cada grandeza elétrica.

O Analisador de Energia RE7000 foi conectado no secundário do transformador 1 ($P=500$ kVA, 13,8/0,38 kV), definido como ponto de medição M conforme apresentado na Figura 4.7.



Figura 4.5 – Detalhe das medições realizadas no ponto de medição M no QGF-1/ Transformador 1.

4.5 Leitura das amostras

O *download* das amostras foi realizado via cabo ethernet entre o instrumento de medição e o computador. Para fins de análise, selecionou-se o intervalo que compreende entre 09/09/2022 às 11:28 e 16/09/2022 às 11:22, totalizando às 1008 amostras válidas conforme o Módulo 8 do PRODIST, onde declara que o conjunto de leituras para gerar os indicadores da qualidade do produto deve compreender o registro de 1008 (mil e oito) leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos (período de integração) de 10 minutos conforme apresentado na Figura 4.8.

Figura 4.6 – Seleção do intervalo de registro para análise.

Fonte: Registros do Analisador de Energia (Embrasul, RE7000), 2022.

A Figura 4.9 apresenta o momento em que ocorreu a falta de energia ao longo da campanha de medição, ocorrendo em 14/09/2022 às 14h52min com duração de 02min24s, extraído dos registros do Analisador de Energia (Embrasul, RE7000).

Figura 4.7 – Relatório de falta de energia.

EMBRASUL N.S:72000335 V.S.2,00 ANL 2,95 (10 minutos)

RELATÓRIO DE FALTAS DE ENERGIA (Integração = 10 minutos)

Número total de faltas no arquivo: 001

Queda de energia	Energia reestabelecida	Duração	No.
14/09/2022 às 14:50:09,97	14/09/2022 às 14:52:34,19	00d 00:02:24,22	001

Fonte: Registros do Analisador de Energia (Embrasul, RE7000), 2022.

4.6 Tensão em regime permanente

Inicialmente buscou-se verificar o comportamento do nível de tensão em regime permanente que consistem entre fase e neutro (V_{an} , V_{bn} e V_{cn}) ao longo da campanha de medição conforme apresentado na Figura 4.10.

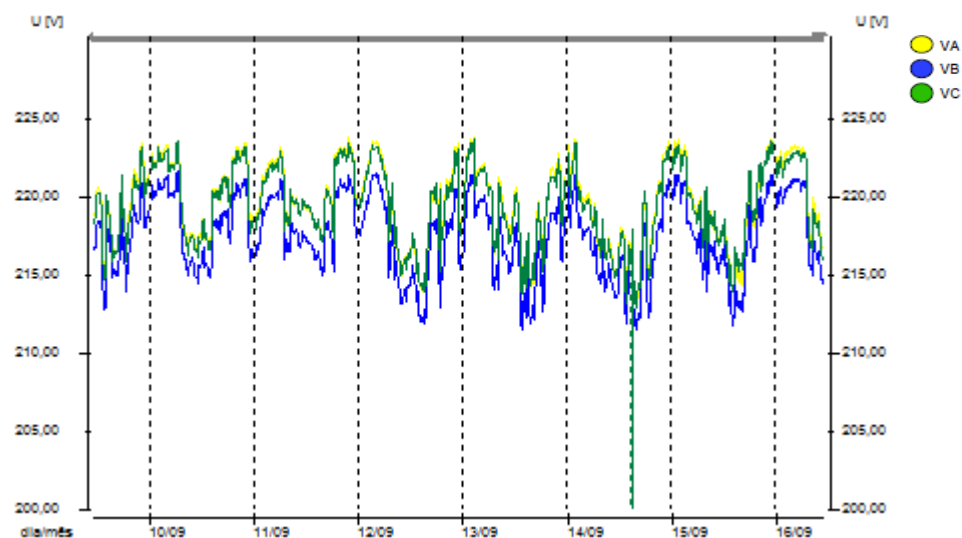


Figura 4.8 – Comportamento do nível de tensão em regime permanente (tensão entre fase e neutro).

Observa-se que os valores de tensão fase e neutro (V_{an} , V_{bn} e V_{cn}) se mantiveram entre o intervalo de 202,00 V (mínimo) a 231,00 V (máximo) da faixa adequada estabelecidos pela norma durante todo o período da campanha de medição. A linha em paralelo apresenta graficamente o momento em que ocorreu a falta de energia ao longo da campanha de medição ocorrido em 14/09/2022 às 14h52min com duração de 02min24s, conforme apresentado no relatório de registros de falta de energia da Figura 4.9.

Ao longo da campanha de medição, os valores de tensão fase e neutro (V_{an} , V_{bn} e V_{cn}) encontram-se dentro do intervalo de 211,34 V (mínimo) a 223,65 V (máximo) conforme apresentado na Tabela 4.2, logo dentro da faixa de tensão adequada. Observa-se que não apresentam valores dentro da faixa precária e crítica, portanto os valores de DRC e DRP são iguais a 0,00%.

Tabela 4.2 – Valores dos indicadores do nível de tensão em regime permanente (tensão entre fase e neutro).

Indicador	Tensão entre fase e neutro			Limite máximo/ mínimo permitido
	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	
$V_{máxima}$	223,65	221,47	223,47	231,00 V
$V_{mínima}$	212,96	211,34	212,84	202,00 V
$V_{média}$	219,42	217,31	219,26	
DRP	0,00 %	0,00 %	0,00 %	3,00 %
DRC	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,50 %

Na Figura 4.11 é apresentado o comportamento do nível de tensão em regime permanente que consistem entre fase e fase (V_{ab} , V_{bc} e V_{ca}) ao longo da campanha de medição.

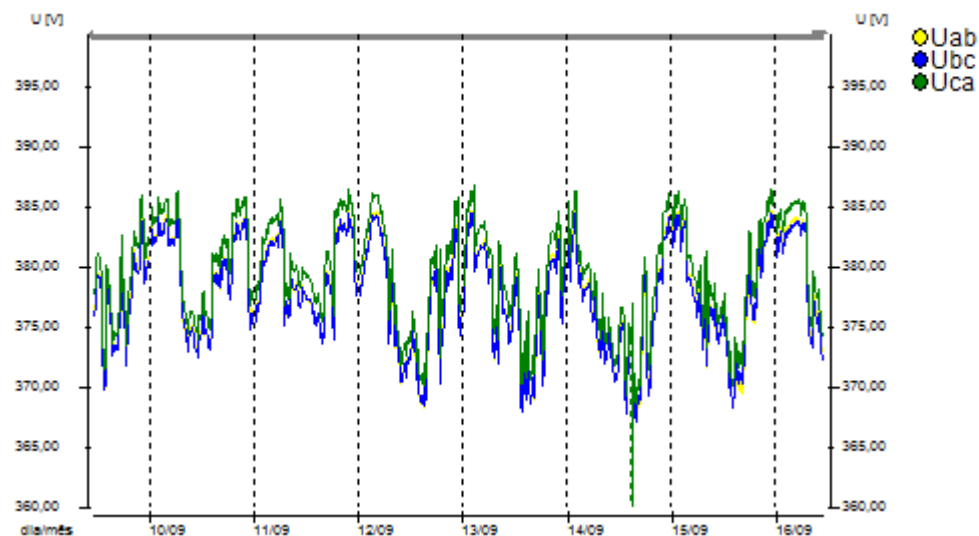


Figura 4.9 – Comportamento do nível de tensão em regime permanente (tensão entre fase e fase).

Observa-se que os valores de tensão fase e fase (V_{ab} , V_{bc} e V_{ca}) se mantiveram entre o intervalo de 350,00 V (mínimo) a 399,00 V (máximo) da faixa adequada estabelecido pela norma em todo o período da campanha de medição. A linha em paralelo apresenta graficamente o momento em que ocorreu a falta de energia ao longo da campanha de medição ocorrido em 14/09/2022 às 14h52min com duração de 02min24s, conforme apresentado no relatório de registros de falta de energia da Figura 4.9.

Ao longo da campanha de medição, os valores de tensão fase e fase (V_{ab} , V_{bc} e V_{ca}) encontram-se dentro do intervalo de 361,35 V (mínimo) a 386,48 V (máximo) conforme apresentado na Tabela 4.3, logo dentro da faixa de tensão adequada. Observa-se que não apresentam valores dentro da faixa precária e crítica, portanto os valores de DRC e DRP são iguais a 0,00%.

Tabela 4.3 – Valores dos indicadores do nível de tensão em regime permanente (tensão de linha).

Indicador	Tensão entre fases			Limite máximo/ mínimo permitido
	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}	
$V_{m\acute{a}xima}$	386,48	384,43	385,23	399,00 V
$V_{m\acute{i}nima}$	362,11	362,57	361,35	350,00 V
$V_{m\acute{e}dia}$	378,22	378,08	379,91	
DRP	0,00 %	0,00 %	0,00 %	3,00 %
DRC	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,50 %

4.7 Desequilíbrio de tensão

A Figura 4.12 apresenta o comportamento do desequilíbrio de tensão ao longo da campanha de medição.

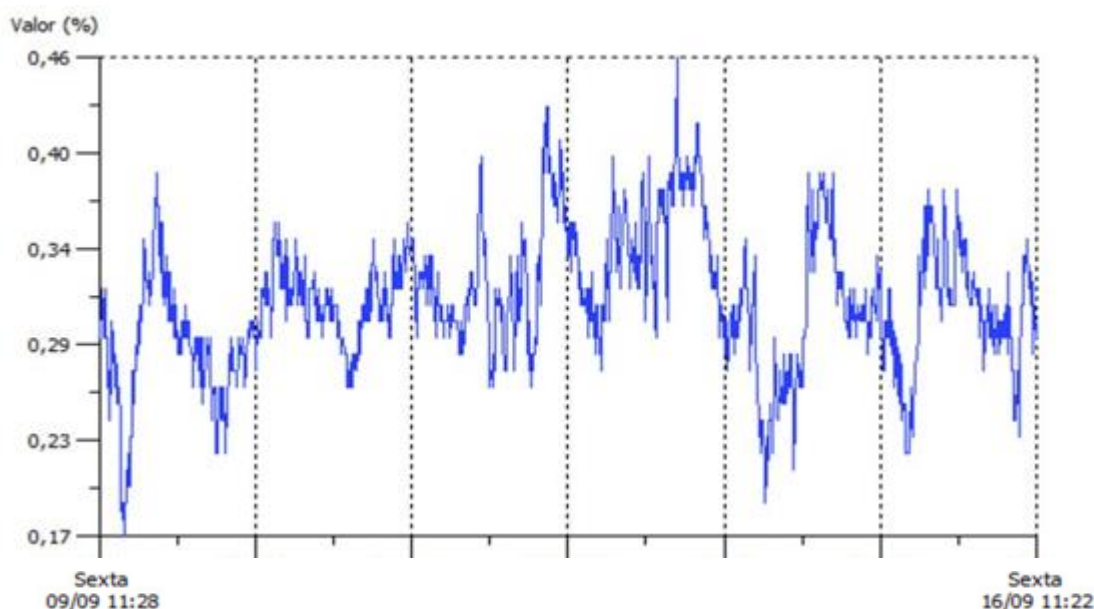


Figura 4.10 – Comportamento do nível de desequilíbrio de tensão.

O menor valor do desequilíbrio de tensão foi registrado em 09/09/2022 apresentando 0,17% e o maior valor registrado ocorreu em 13/09/2022 com 0,46%.

A Tabela 4.4 apresenta os valores do intervalo de 0,17% (mínimo) a 0,46% (máximo) com o limite máximo permitido, nenhuma amostra ultrapassou o limite estabelecido pelo Módulo 8 do PRODIST, que permite em até 3% de desequilíbrio de tensão em relação a 5% das 1008 amostras válidas.

Tabela 4.4 – Valores dos indicadores de desequilíbrio de tensão.

Indicador	Percentuais
Desequilíbrio de tensão máxima	0,46%
Desequilíbrio de tensão mínima	0,17%
Limite máximo permitido	3,00 %

4.8 Variação de frequência

A Figura 4.13 apresenta o comportamento da frequência ao longo da campanha de medição.

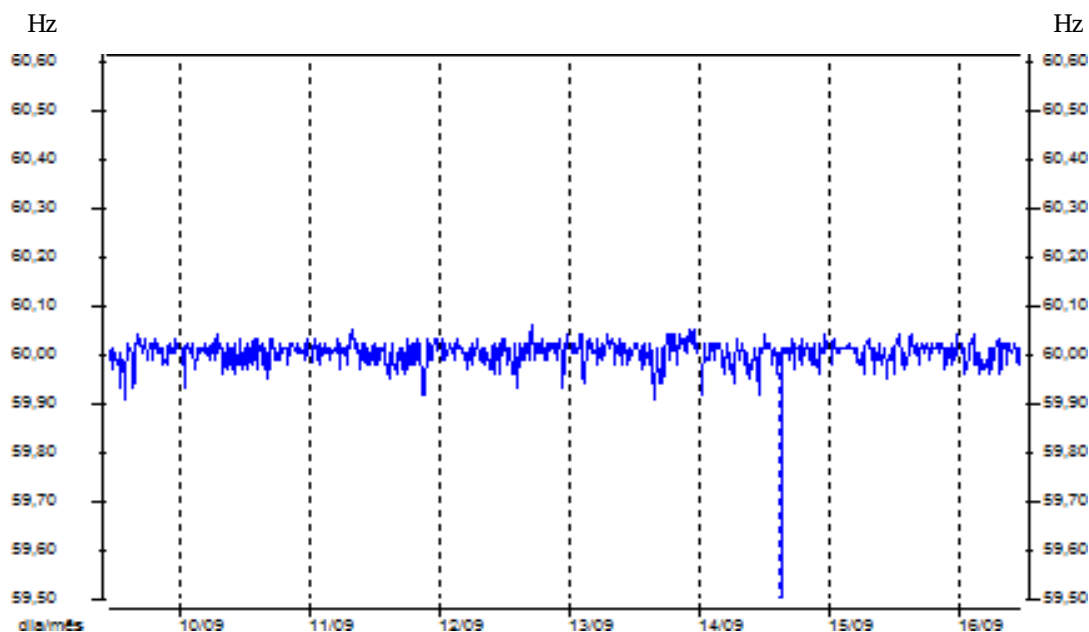


Figura 4.11 – Comportamento da frequência.

A variação da frequência se apresenta com um comportamento estável, onde o menor valor registrado foi de 59,91 Hz e o maior valor foi de 60,06 Hz. A linha em paralelo apresenta graficamente o momento em que ocorreu a falta de energia ao longo da campanha de medição ocorrido em 14/09/2022 às 14h52min com duração de 02min24s, conforme apresentado no relatório de registros de falta de energia da Figura 4.9.

Comparando os valores do intervalo de 59,91 Hz (mínimo) a 60,06 Hz (máximo) com os limites máximo e mínimo permitido apresentados na Tabela 4.5, mostram que os indicadores de frequência estão dentro dos limites estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST.

Tabela 4.5 – Valores dos indicadores de frequência.

Indicador	Valores
Frequência média	59,98 Hz
Frequência máxima	60,06 Hz
Frequência mínima	59,91 Hz
Limite máximo permitido	60,10 Hz
Limite mínimo permitido	59,90 Hz

4.9 Fator de potência

As potências médias por fase e trifásica juntamente com o fator de potência médio para as fases A, B, C e total da campanha de medição são apresentados na Figura 4.14, a partir do relatório extraído do Analisador de Energia (Embrasul RE7000).

Figura 4.12 – Potências médias por fase e trifásica no intervalo (kW, kVAr, kVA e FP).

Potências médias, por fase e trifásicas, no intervalo

FASE	kW	kVAr	kVA	FP
A	18,283	4,261	18,773	0,974
B	17,872	4,095	18,336	0,975
C	16,586	5,122	17,359	0,955
Total	52,742	13,478	54,437	0,969

Fonte: Registros do Analisador de Energia (Embrasul, RE7000), 2022.

Dentre as 1008 amostras válidas, o fator de potência médio durante o período da campanha de medição foi maior do que 0,92. O Módulo 8 do PRODIST estabelece que o valor do fator de potência deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo. Portanto, o sistema elétrico de potência possui um grau de eficiência da sua utilização. No Anexo A, é apresentado o relatório dos valores médios diários das tensões (V), correntes (A), potências ativas (kW), potências reativas (kVAr), potências aparentes (kVA) e fatores de potência da campanha de medição compreendendo o período de 09/09 a 16/09/2022.

4.10 Distorção harmônica de tensão total

A Figura 4.15 apresenta o comportamento das distorções harmônicas totais de tensões (DHT-V) nas fases A, B e C ao longo da campanha de medição.

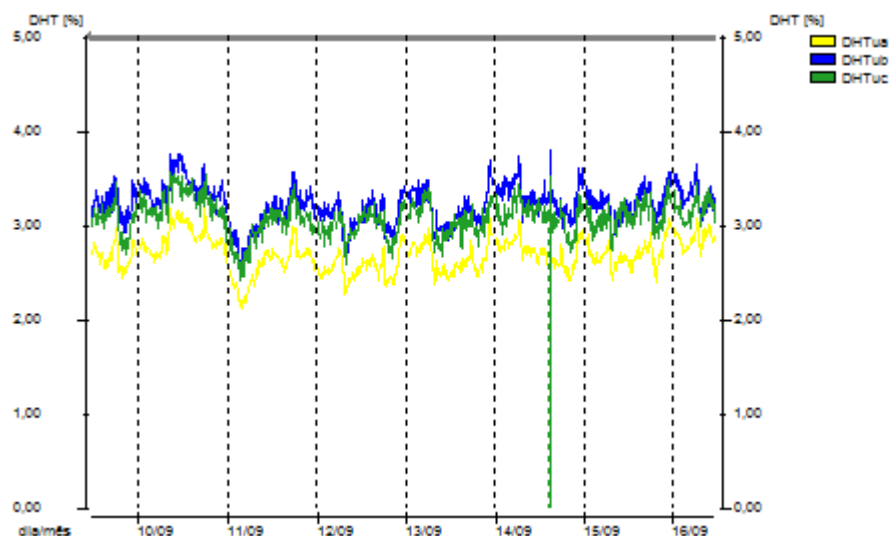


Figura 4.13 – Comportamento das distorções harmônicas totais de tensões (DHT-V) nas fases A, B e C.

Observa-se que os valores das amostras estão compreendidos entre 2,10% (mínimo) e 3,79% (máximo), o que está dentro dos limites estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST, em que a máxima distorção de tensão total permitida é 10,00%.

A Tabela 4.6 apresenta os valores mínimos, médios e máximos medidos e os valores de P95%, o que significa que 95% das 1008 amostras coletadas atendem à máxima distorção de tensão total permitida que é 10,00%.

Tabela 4.6 – Valores das distorções harmônicas totais de tensões (DHT-V) nas fases A, B e C.

Ordem Harmônica	Mínimo (%)	Médio (%)	Máximo (%)	P95 (%)	Máximo permitido (%)	Fase
DHT - V	2,10	2,59	3,11	0,00	10,00	A
DHT - V	2,64	3,12	3,79	0,00	10,00	B
DHT - V	2,47	2,87	3,46	0,00	10,00	C

4.10.1 Distorção harmônica de tensão individual

Para os perfis individuais de distorções harmônicas das tensões, a Tabela 4.7 apresenta o comportamento ao longo da campanha de medição. São apresentados os valores médios e o indicador P95%, o que significa que entre as 1008 amostras coletadas, 95% devem obedecer ao índice máximo permitido (%) para os componentes ímpares não múltiplos de 3 e os componentes múltiplos de 3.

Tabela 4.7 – Valores das distorções harmônicas individuais de tensões (DHI-V) nas fases A, B e C.

Ordem harmônica	Médio (%)	P95 (%)	Máximo permitido (%)	Fase
3	0,22	0,00	6,50	A
5	2,40	0,00	7,50	
7	0,56	0,00	7,50	
9	0,19	0,00	6,50	
11	0,19	0,00	7,50	
13	0,18	0,00	7,50	
15	0,15	0,00	6,50	
17	0,18	0,00	7,50	
19	0,20	0,00	7,50	
21	0,17	0,00	6,50	
23	0,18	0,00	7,50	
25	0,18	0,00	7,50	
27	0,16	0,00	6,50	
29	0,17	0,00	7,50	
3	0,43	0,00	6,50	B
5	2,62	0,00	7,50	
7	0,50	0,00	7,50	
9	0,27	0,00	6,50	
11	0,29	0,00	7,50	
13	0,28	0,00	7,50	
15	0,26	0,00	6,50	
17	0,30	0,00	7,50	
19	0,29	0,00	7,50	
21	0,27	0,00	6,50	

23	0,30	0,00	7,50
25	0,28	0,00	7,50
27	0,28	0,00	6,50
29	0,29	0,00	7,50
3	0,33	0,00	6,50
5	2,47	0,00	7,50
7	0,56	0,00	7,50
9	0,26	0,00	6,50
11	0,28	0,00	7,50
13	0,27	0,00	7,50
15	0,25	0,00	6,50
17	0,29	0,00	7,50
19	0,29	0,00	7,50
21	0,27	0,00	6,50
23	0,30	0,00	7,50
25	0,27	0,00	7,50
27	0,27	0,00	6,50
29	0,29	0,00	7,50

C

Observa-se que os resultados estão de acordo com o Módulo 8 do PRODIST, pois os limites estabelecidos para as componentes ímpares não múltiplas de 3 e as componentes múltiplas de 3, ou seja, DTTi e DTT3 são iguais a 7,50% e 6,50% respectivamente, onde os valores medidos apresentaram resultados inferiores aos limites máximos correspondentes a cada ordem harmônica, em destaque a distorção harmônica individual de 5ª ordem apresentando o maior valor entre as fases A, B e C respectivamente, já o indicador P95% apresentando todos os valores igual a 0,00%.

A Figura 4.16, Figura 4.17 e Figura 4.18 apresentam o comportamento das distorções harmônicas das tensões de 5ª ordem acompanhada das distorções harmônicas das tensões de 3ª ordem, 7ª ordem, 9ª ordem e 11ª ordem para as fases A, B e C respectivamente, ao longo da campanha de medição.

FASE A

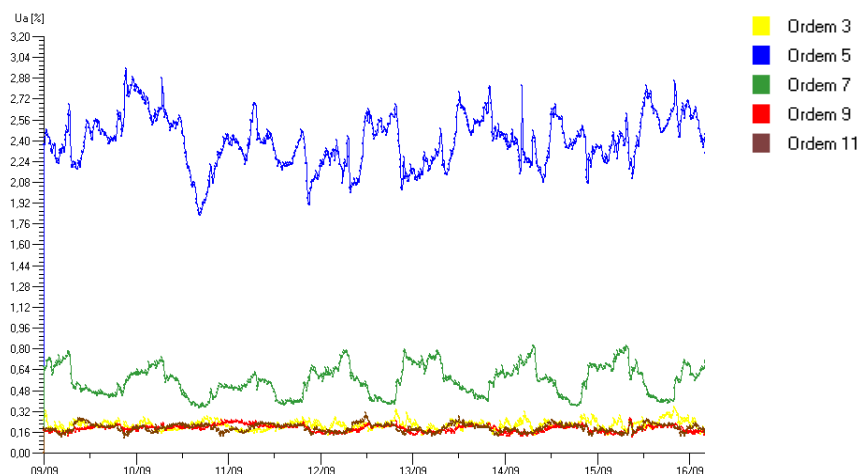


Figura 4.14 – Comportamento das distorções harmônicas de tensões individuais de 3ª, 5ª, 7ª, 9ª e 11ª ordem na fase A.

Observa-se que ao longo da campanha de medição o número de amostras para as distorções harmônicas individuais das tensões de 3ª ordem para a fase A encontram-se dentro do intervalo de 0,14% (mínimo) a 0,35% (máximo), 5ª ordem dentro do intervalo de 1,83% (mínimo) a 2,95% (máximo), 7ª ordem dentro do intervalo de 0,35% (mínimo) a 0,82% (máximo), 9ª ordem dentro do intervalo de 0,12% (mínimo) a 0,26% (máximo) e 11ª ordem dentro do intervalo de 0,12% (mínimo) a 0,31% (máximo), logo as distorções harmônicas individuais das tensões de 5ª ordem apresentam os resultados mais significativos.

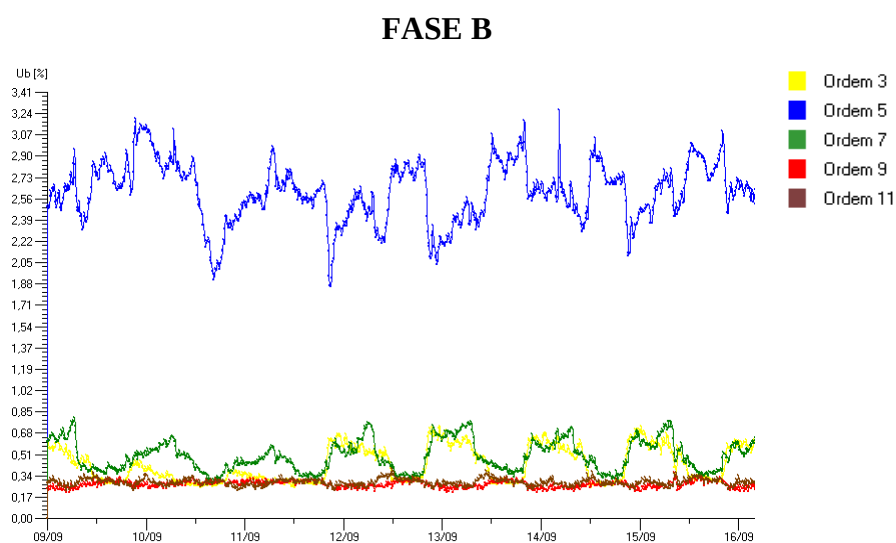


Figura 4.15 – Comportamento das distorções harmônicas de tensões individuais de 3ª, 5ª, 7ª, 9ª e 11ª ordem na fase B.

Observa-se que ao longo da campanha de medição o número de amostras para as distorções harmônicas individuais das tensões de 3ª ordem para a fase B encontram-se dentro do intervalo de 0,25% (mínimo) a 0,74% (máximo), 5ª ordem dentro do intervalo de 1,86% (mínimo) a 3,27% (máximo), 7ª ordem dentro do intervalo de 0,28% (mínimo) a 0,81% (máximo), 9ª ordem dentro do intervalo de 0,21% (mínimo) a 0,37% (máximo) e 11ª ordem dentro do intervalo de 0,22% (mínimo) a 0,40% (máximo), logo as distorções harmônicas individuais das tensões de 5ª ordem apresentam os resultados mais significativos.

FASE C

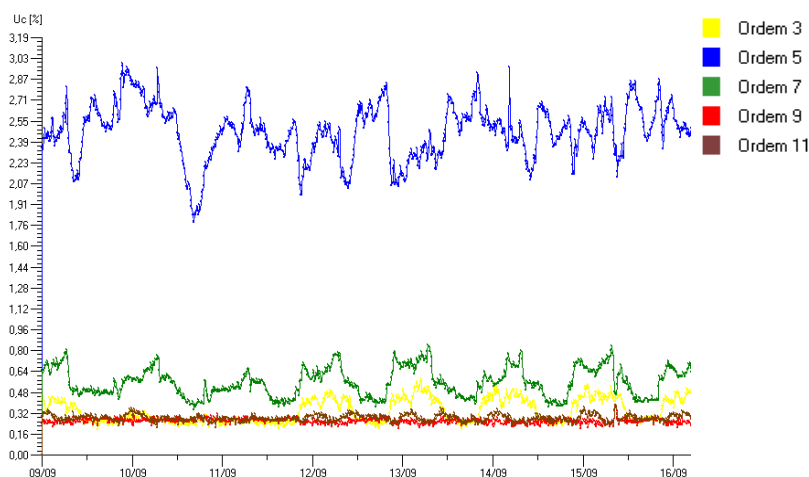


Figura 4.16 – Comportamento das distorções harmônicas de tensões individuais de 3ª, 5ª, 7ª, 9ª e 11ª ordem na fase C.

Observa-se que ao longo da campanha de medição o número de amostras para as distorções harmônicas individuais das tensões de 3ª ordem para a fase C encontram-se dentro do intervalo de 0,20% (mínimo) a 0,58% (máximo), 5ª ordem dentro do intervalo de 1,78% (mínimo) a 2,99% (máximo), 7ª ordem dentro do intervalo de 0,35% (mínimo) a 0,84% (máximo), 9ª ordem dentro do intervalo de 0,20% (mínimo) a 0,38% (máximo) e 11ª ordem dentro do intervalo de 0,18% (mínimo) a 0,41% (máximo), logo as distorções harmônicas individuais das tensões de 5ª ordem apresentam os resultados mais significativos.

4.11 Distorção harmônica de corrente total

Para a análise dos resultados das distorções harmônicas totais e individuais das correntes nas fases A, B e C, é necessário determinar a relação entre a corrente de curto-circuito (ICC) no PAC (Ponto de Acoplamento Comum) e a corrente de demanda de carga (IL), a fim de obter os valores máximos permitidos (%) dos harmônicos de corrente totais e individuais nas fases A, B e C.

A Tabela 4.8 apresenta os valores médios da corrente elétrica ao longo da campanha de medição.

Tabela 4.8 – Valores de corrente nas fases A, B e C no secundário do transformador 1.

Corrente elétrica nas fases	Valor médio (A)
A	87,78 A
B	85,98 A
C	80,77 A

Os valores dados na Tabela 4.8 foram utilizados para determinar a relação entre a corrente de curto-circuito (ICC) no PAC (Ponto de Acoplamento Comum) e a corrente de demanda de carga (IL), a fim de obter os valores máximos permitidos (%) das distorções harmônicas totais e individuais de corrente nas fases A, B e C. Para converter os valores para o enrolamento primário do transformador 1, foi utilizada a relação dos transformadores de corrente instalados, que é 150/5. Contudo, os valores das correntes médias nas fases A, B, e C foram respectivamente 2,92 A, 2,86 A e 2,69 A para o primário do transformador 1.

Para determinar a relação entre ICC/IL se fez necessário buscar o valor da corrente de curto-circuito (ICC), que é obtido a partir das informações dos dados de curto-circuito no ponto de entrega da UC - Unidade Consumidora apresentado na Tabela 4.1, com o valor do ICC em 4842,522. O resultado apresentou a relação $ICC/IL > 1000$. Logo obtendo os valores máximos permitidos (%) das distorções harmônicas totais e individuais de corrente nas fases A, B e C consultando a Tabela 2.7 da seção 2.2.3.3 para a faixa de valores correspondentes estabelecidos pela Norma IEEE 519 – 2014.

A Figura 4.19 apresenta o comportamento das distorções harmônicas totais de corrente (DHT-I) nas fases A, B e C ao longo da campanha de medição.

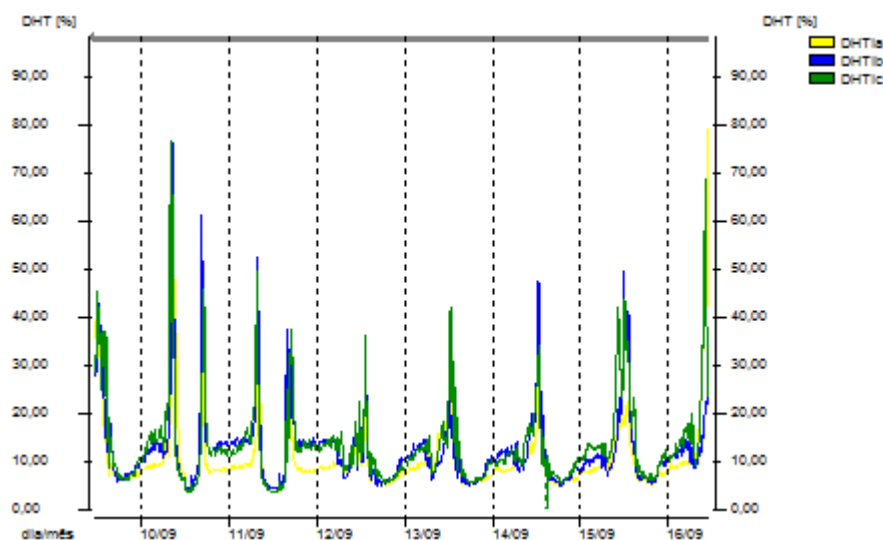


Figura 4.17 – Comportamento das distorções harmônicas totais de corrente (DHT-I) nas fases A, B e C.

Observa-se que os valores das amostras apresentam inúmeras variações ao longo da campanha de medição, como consequência, ultrapassando diversas vezes ao limite estabelecido pela Norma IEEE Std 519, 2014, em que a máxima distorção harmônica de corrente total permitida é 20,00%.

Para as distorções harmônicas totais de corrente nas fases A, B e C, a Tabela 4.9 apresenta os valores mínimos, médios e máximos medidos e os valores do indicador P95%, o que significa que 95% das 1008 amostras coletadas devem atender à máxima distorção de corrente total permitida que é 20,00%. Observa-se que a média das distorções harmônicas totais de corrente nas fases A, B e C se encontram abaixo do limite máximo permitido. Entretanto, é importante salientar que a fase A apresenta 78 amostras ultrapassando o índice máximo permitido de 20,00%, o que corresponde a 7,73%, fase B apresentando 87 amostras ultrapassando o índice máximo permitido de 20,00%, o que corresponde a 8,63% e a fase C apresentando 134 amostras ultrapassando o índice máximo permitido de 20,00%, o que corresponde a 13,29%. Desta forma, violando aos limites do indicador P95%.

Tabela 4.9 – Valores das distorções harmônicas totais de corrente (DHT-I) nas fases A, B e C.

Ordem Harmônica	Mínimo (%)	Médio (%)	Máximo (%)	P95 (%)	Máximo permitido (%)	Fase
DHT - I	4,64	10,74	79,23	7,73	20,00	A
DHT - I	5,43	12,68	77,65	8,63	20,00	B
DHT - I	4,77	13,64	78,07	13,29	20,00	C

4.11.1 Distorção harmônica de corrente individual

Para os perfis individuais de distorção harmônica das correntes, a Tabela 4.10 apresenta o comportamento para as fases A, B e C ao longo da campanha de medição com os valores médios medidos e o índice P(95%), que dentre as 1008 amostras, 95% devem estar em conformidade com o índice máximo permitido (%) para as distorções individuais de corrente.

Observa-se na fase A no índice P(95%), violação na 3ª componente harmônica com o valor de 8,43%. Na fase B ocorreu na 3ª e 5ª componentes com valores iguais a 10,11% e 5,85% respectivamente e na fase C na 3ª componente com o valor de 15,37%.

Tabela 4.10 – Valores das distorções harmônicas individuais de corrente (DHI-I) nas fases A, B e C.

Ordem harmônica	Médio (%)	P95 (%)	Máximo permitido (%)	P95 (%) Parecer	Fase
3	8,12	8,43	15,00	Excedeu	A
5	4,70	3,86	15,00		
7	3,02	0,39	15,00		
9	2,01	0,00	15,00		
11	1,59	0,29	7,00		
13	0,98	0,89	7,00		
15	0,39	0,00	7,00		
17	0,92	0,39	6,00		

19	0,90	0,19	6,00		
21	0,52	0,00	6,00		
23	0,55	0,79	2,50		
25	0,69	0,39	2,50		
27	0,14	0,00	2,50		
29	0,19	0,00	2,50		
3	9,51	10,11	15,00	Excedeu	B
5	5,24	5,85	15,00	Excedeu	
7	3,48	0,49	15,00		
9	2,32	0,09	15,00		
11	1,88	0,49	7,00		
13	1,40	1,58	7,00		
15	0,85	0,19	7,00		
17	1,50	0,29	6,00		
19	0,94	0,29	6,00		
21	0,48	0,49	6,00		
23	0,57	0,39	2,50		
25	0,55	0,09	2,50		
27	0,18	1,19	2,50		
29	0,25	0,00	2,50		
3	11,51	15,37	15,00	Excedeu	C
5	4,70	3,07	15,00		
7	3,24	0,09	15,00		
9	1,89	0,00	15,00		
11	1,94	0,69	7,00		
13	0,94	0,39	7,00		
15	0,38	0,00	7,00		
17	1,12	0,69	6,00		
19	0,94	0,29	6,00		
21	0,35	0,00	6,00		
23	0,70	0,39	2,50		
25	0,56	0,39	2,50		
27	0,28	0,00	2,50		
29	0,34	0,00	2,50		

4.12 Análise comparativa das campanhas de medição

Nesta seção será apresentado a análise comparativa da campanha de medição do estudo realizado no IFG - Campus Goiânia no período de 09/08 a 15/08/2021, que na oportunidade apresentou baixo consumo de energia em virtude da paralisação das atividades letiva devido a pandemia do Covid-19 (FURTADO, 2021) e para melhor compreensão será denotado como primeira campanha de medição. Assim, possibilitando essa análise com a campanha de medição realizado no período de 09/09 a 16/09/2022, através dos resultados informados nas seções anteriores deste trabalho sendo denotado como segunda campanha de medição.

4.12.1 Tensão em regime permanente

A Tabela 4.11 apresenta os resultados dos valores médios referente aos níveis de tensão em regime permanente das tensões entre fase e neutro (V_{an} , V_{bn} e V_{cn}) e tensão entre fase e fase (V_{ab} , V_{bc} e V_{ca}) para as duas campanhas de medição.

Tabela 4.11 – Valores dos indicadores médio do nível de tensão em regime permanente (primeira campanha de medição / segunda campanha de medição).

Primeira campanha de medição				
Indicador	Tensão entre fases			Limite máximo/ mínimo permitido
	Vab	Vbc	Vca	
$V_{média}$	378,37 V	378,20 V	380,29 V	399,00 V
				350,00 V
Indicador	Tensão entre fase e neutro			Limite máximo/ mínimo permitido
	Van	Vbn	Vcn	
$V_{média}$	219,14 V	218,10 V	219,12 V	231,00 V
				202,00 V
Segunda campanha de medição				
Indicador	Tensão entre fases			Limite máximo/ mínimo permitido
	Vab	Vbc	Vca	
$V_{média}$	378,22 V	378,08V	379,91 V	399,00 V
				350,00 V
Indicador	Tensão entre fase e neutro			Limite máximo/ mínimo permitido
	Van	Vbn	Vcn	
$V_{média}$	219,42 V	217,31 V	219,26 V	231,00 V
				202,00 V

Quanto ao comportamento das tensões é possível observar a diminuição dos valores médios da segunda campanha de medição em relação a primeira campanha, apresentando erro médio de 1,01% para a tensão fase e fase (V_{ab} , V_{bc} e V_{ca}) e para a tensão fase e neutro (V_{an} , V_{bn} e V_{cn}) respectivamente, assim mantiveram-se dentro dos limites estabelecidos, logo dentro da faixa de tensão adequada.

4.12.2 Desequilíbrio de tensão

Quanto ao comportamento do desequilíbrio de tensão, a Tabela 4.12 apresenta as variações do desequilíbrio de tensão para as duas campanhas de medição. Observa-se que as variações mantiveram-se dentro do intervalo de 0,1% a 0,6%. Assim, os valores se mantiveram nos limites estabelecidos pelo Módulo8 do PRODIST, que permite até 3% de desequilíbrio de tensão em relação a 5% das 1008 amostras válidas.

Tabela 4.12 – Variações de desequilíbrio de tensão (primeira campanha de medição / segunda campanha de medição).

Primeira campanha de medição	
Indicador	Percentuais
Desequilíbrio de tensão máximo	0,6%
Desequilíbrio de tensão mínimo	0,1%
Limite máximo permitido	3,00 %
Segunda campanha de medição	
Indicador	Percentuais
Desequilíbrio de tensão máxima	0,46%
Desequilíbrio de tensão mínima	0,17%
Limite máximo permitido	3,00 %

4.12.3 Fator de potência

Na Tabela 4.13 apresenta o comportamento do fator de potência total e o fator de potência médio nas fases A, B e C para as duas campanhas de medição. Onde apresenta a violação do limite estabelecido na primeira campanha de medição com o valor de 0,90 para o fator de potência total, logo na segunda campanha de medição os valores do fator de potência total e o fator de potência médio nas fases A, B e C se mantiveram dentro dos limites estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST, onde esses valores devem estar acima de 0,92 indutivo.

Tabela 4.13 – Valores dos indicadores de fator de potência (primeira campanha de medição / segunda campanha de medição).

Primeira campanha de medição				
Indicador	FASES			TOTAL
	A	B	C	
Valor médio	0,94	0,94	0,92	0,90
Segunda campanha de medição				
Indicador	FASES			TOTAL
	A	B	C	
Valor médio	0,97	0,97	0,95	0,96

4.12.4 Variação de frequência

Na Tabela 4.14 é apresentado o comportamento da variação de frequência média para as duas campanhas de medição. Observa-se que o valor da frequência média da primeira campanha de medição e o da segunda campanha de medição apresentam resultados análogos,

onde encontram-se no intervalo de 59,90 a 60,10 Hz para as condições normais de operação, assim se mantiveram dentro dos limites estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST.

Tabela 4.14 – Valores dos indicadores de variação de frequência (primeira campanha de medição / segunda campanha de medição).

Indicador	Primeira campanha de medição	Segunda campanha de medição
Frequência média	59,99 Hz	59,98 Hz
Limite máximo permitido	60,10 Hz	60,10 Hz
Limite mínimo permitido	59,90 Hz	59,90 Hz

4.12.5 Distorção harmônica de tensão

A Tabela 4.15 apresenta o comportamento das distorções harmônicas totais e individuais de tensões nas fases A, B e C, contemplando a primeira e a segunda campanha de medição. Apresentando os valores médios das amostras e o índice de P95%, no qual significa que dentre as 1008 amostras coletadas, 95% devem estar em conformidade com o índice máximo permitido (%) para as distorções totais e individuais de tensões nas fases A, B e C. Assim, o índice de P95% apresenta 0,00% para todas componentes das distorções harmônicas totais e individuais de tensões nas fases A, B e C para as duas campanhas de medição, além da variação média entre as duas campanhas de medição, onde percebe-se o aumento dos valores médios em grande parte da segunda campanha de medição, com exceção nas distorções individuais de tensão da fase A na 3ª e 5ª componentes harmônicas e da fase C na 5ª componente harmônica. Contudo, mesmo com essas variações os resultados se mantiveram dentro dos limites estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST.

Tabela 4.15 – Valores das distorções harmônicas totais de tensão (DHT-V) e individuais nas fases A, B e C (primeira campanha de medição / segunda campanha de medição).

Ordem harmônica	Primeira campanha de medição		Segunda campanha de medição		Máximo permitido (%)	Variação Média (%)	Fase
	Médio (%)	P95 (%)	Médio (%)	P95 (%)			
DHT - V	2,54	0,00	2,59	0,00	10,00	1,97	A
3	0,23	0,00	0,22	0,00	6,50	4,55	
5	2,45	0,00	2,40	0,00	7,50	2,08	
7	0,47	0,00	0,56	0,00	7,50	19,15	
9	0,13	0,00	0,19	0,00	6,50	46,15	
11	0,12	0,00	0,19	0,00	7,50	58,33	
13	0,09	0,00	0,18	0,00	7,50	100,00	
15	0,03	0,00	0,15	0,00	6,50	400,00	

17	0,08	0,00	0,18	0,00	7,50	125,00	
19	0,07	0,00	0,20	0,00	7,50	185,71	
21	0,06	0,00	0,17	0,00	6,50	183,33	
23	0,05	0,00	0,18	0,00	7,50	260,00	
25	0,08	0,00	0,18	0,00	7,50	125,00	
27	0,02	0,00	0,16	0,00	6,50	700,00	
29	0,05	0,00	0,17	0,00	7,50	240,00	
DHT - V	2,59	0,00	3,12	0,00	10,00	20,46	B
3	0,29	0,00	0,43	0,00	6,50	48,28	
5	2,50	0,00	2,62	0,00	7,50	4,80	
7	0,39	0,00	0,50	0,00	7,50	28,21	
9	0,11	0,00	0,27	0,00	6,50	145,45	
11	0,12	0,00	0,29	0,00	7,50	141,67	
13	0,10	0,00	0,28	0,00	7,50	180,00	
15	0,05	0,00	0,26	0,00	6,50	420,00	
17	0,14	0,00	0,30	0,00	7,50	114,29	
19	0,08	0,00	0,29	0,00	7,50	262,50	
21	0,05	0,00	0,27	0,00	6,50	440,00	
23	0,05	0,00	0,30	0,00	7,50	500,00	
25	0,09	0,00	0,28	0,00	7,50	211,11	
27	0,02	0,00	0,28	0,00	6,50	1300,00	
29	0,03	0,00	0,29	0,00	7,50	866,67	
DHT - V	2,57	0,00	2,87	0,00	10,00	11,67	C
3	0,08	0,00	0,33	0,00	6,50	312,50	
5	2,51	0,00	2,47	0,00	7,50	1,62	
7	0,42	0,00	0,56	0,00	7,50	33,33	
9	0,09	0,00	0,26	0,00	6,50	188,89	
11	0,13	0,00	0,28	0,00	7,50	115,38	
13	0,08	0,00	0,27	0,00	7,50	237,50	
15	0,03	0,00	0,25	0,00	6,50	733,33	
17	0,10	0,00	0,29	0,00	7,50	190,00	
19	0,07	0,00	0,29	0,00	7,50	314,29	
21	0,02	0,00	0,27	0,00	6,50	1250,00	
23	0,06	0,00	0,30	0,00	7,50	400,00	
25	0,05	0,00	0,27	0,00	7,50	440,00	
27	0,03	0,00	0,27	0,00	6,50	800,00	
29	0,05	0,00	0,29	0,00	7,50	480,00	

4.12.6 Distorção harmônica de corrente

A Tabela 4.16 apresenta o comportamento das distorções harmônicas totais e individuais de corrente nas fases A, B e C, contemplando a primeira e a segunda campanha de medição. Com as informações dos valores médios e a variação média percentual entre as duas campanhas de medição, o índice de P95%, no qual significa que dentre as 1008 amostras coletadas, 95% devem estar em conformidade com o índice máximo permitido (%) para as distorções totais e individuais de corrente nas fases A, B e C.

Quanto aos valores referente aos índices máximos permitidos, observa-se a diminuição do índice de amostras que ultrapassam o valor máximo permitido para as distorções harmônicas totais de corrente nas fase A, B, e C na segunda campanha de medição. Onde na primeira

campanha apresentam os índices de 11,80% na fase A, 11,90% na fase B e de 46,03% na fase C. Já na segunda campanha de medição, os índices são de 7,73% na fase A, índice de 8,63% na fase B e o destaque para a diminuição significativa na fase C apresentando o índice de 13,29%. No que compete aos valores referente dos índices máximos permitidos para as distorções harmônicas individuais das correntes, na primeira campanha de medição identificou-se na fase A violação na 3ª, 5ª, 13ª, 23ª e 25ª componentes harmônicas com índices de 9,82%, 7,63%, 5,45%, 5,15% e 5,85%, respectivamente. Na fase B ocorreu na 3ª e 5ª componentes com índices de 9,72% e 7,93%, respectivamente e na fase C ocorreu na 3ª, 5ª, 13ª e 25ª componentes com índices de 58,43%, 6,64%, 6,05% e 6,05%, respectivamente. Na segunda campanha de medição identificou-se na fase A violação na 3ª componente harmônica com índice de 8,43%. Na fase B ocorreu na 3ª e 5ª componentes harmônicas com índices de 10,11% e 5,85%, respectivamente e na fase C ocorreu na 3ª componente com índice de 15,37%. Nota-se que para essa segunda campanha de medição, na fase A não houve violação na 5ª, 13ª, 23ª e 25ª componentes harmônicas com índices de 3,86%, 0,89%, 0,79% e 0,39%, respectivamente. Na fase B manteve-se a violação para as mesmas componentes harmônicas e na fase C não houve violação na 5ª, 13ª, 23ª e 25ª componentes harmônicas apresentando os índices de 3,07%, 0,39%, 0,39% e 0,39%, respectivamente.

Quanto aos valores médios medidos das distorções totais de corrente, identificou-se diminuição nas fases A, B e C na segunda campanha de medição. Onde apresentam os índices de 10,74% na fase A, 12,68% na fase B e de 13,64% na fase C. Já na primeira campanha de medição, os índices são de 14,52% na fase A, índice de 15,01% na fase B e na fase C apresentando o índice de 20,53%. Ressaltar a ocorrência na diminuição do valor médio medido para todas as componentes harmônicas individuais de corrente da segunda campanha de medição.

Tabela 4.16 – Valores das distorções harmônicas totais de corrente (DHT-I) e individuais nas fases A, B e C (primeira campanha de medição / segunda campanha de medição).

Ordem harmônica	Primeira campanha de medição		Segunda campanha de medição		Máximo permitido (%)	Variação Média (%)	Fase
	Médio (%)	P95 (%)	Médio (%)	P95 (%)			
DHT - I	14,52	11,80	10,74	7,73	20,00	26,03	
3	9,64	9,82	8,12	8,43	15,00	15,77	
5	5,93	7,63	4,70	3,86	15,00	20,74	
7	5,14	3,67	3,02	0,39	15,00	41,25	
9	3,89	2,57	2,01	0,00	15,00	48,33	
11	2,83	3,37	1,59	0,29	7,00	43,82	

13	2,37	5,45	0,98	0,89	7,00	58,65	A
15	4,70	0,00	0,39	0,00	7,00	91,70	
17	1,14	1,28	0,92	0,39	6,00	19,30	
19	1,03	1,19	0,90	0,19	6,00	12,62	
21	0,93	0,09	0,52	0,00	6,00	44,09	
23	0,89	5,15	0,55	0,79	2,50	38,20	
25	1,22	5,85	0,69	0,39	2,50	43,44	
27	0,28	0,09	0,14	0,00	2,50	50,00	
29	0,54	0,09	0,19	0,00	2,50	64,81	
DHT - I	15,01	11,90	12,68	8,63	20,00	15,52	B
3	10,74	9,72	9,51	10,11	15,00	11,45	
5	6,24	7,93	5,24	5,85	15,00	16,03	
7	4,98	2,08	3,48	0,49	15,00	30,12	
9	3,44	0,59	2,32	0,09	15,00	32,56	
11	2,77	1,88	1,88	0,49	7,00	32,13	
13	2,35	4,46	1,40	1,58	7,00	40,43	
15	1,13	0,09	0,85	0,19	7,00	24,78	
17	2,24	4,66	1,50	0,29	6,00	33,04	
19	1,45	0,59	0,94	0,29	6,00	35,17	C
21	1,01	0,09	0,48	0,49	6,00	52,48	
23	0,99	3,37	0,57	0,39	2,50	42,42	
25	1,56	4,36	0,55	0,09	2,50	64,74	
27	0,61	0,09	0,18	1,19	2,50	70,49	
29	0,71	0,09	0,29	0,00	2,50	59,15	
DHT - I	20,53	46,03	13,64	13,29	20,00	33,56	
3	17,05	58,43	11,51	15,37	15,00	32,49	
5	6,56	6,64	4,70	3,07	15,00	28,35	
7	6,22	1,68	3,24	0,09	15,00	47,91	
9	4,55	0,99	1,89	0,00	15,00	58,46	
11	3,96	2,38	1,94	0,69	7,00	51,01	
13	2,71	6,05	0,94	0,39	7,00	65,31	
15	1,26	0,19	0,38	0,00	7,00	69,84	
17	2,14	2,48	1,12	0,69	6,00	47,66	
19	2,00	1,58	0,94	0,29	6,00	53,00	
21	1,06	0,19	0,35	0,00	6,00	66,98	
23	1,56	0,79	0,70	0,39	2,50	55,13	
25	1,59	6,05	0,56	0,39	2,50	64,78	
27	1,22	0,39	0,28	0,00	2,50	77,05	
29	1,42	0,89	0,34	0,00	2,50	76,06	

4.13 Considerações finais

A análise da energia elétrica utilizada no IFG - Campus Goiânia apresentou um diagnóstico focado na qualidade do produto. Foram realizadas medições, utilizando-se um analisador de energia conectado ao secundário do transformador 1 considerando todas as cargas instaladas juntamente com o sistema fotovoltaico, durante o período mínimo exigido pelo Módulo 8 do PRODIST, as quais forneceram os dados relacionados à tensão em regime permanente, distorções harmônicas de tensão e corrente, desequilíbrio de tensão e fator de potência, possibilitando uma análise criteriosa, comparando-os com valores de referência

previstos pelas normas vigentes e com o outro estudo realizado no IFG – Campus Goiânia, que ocorreu em período com baixo consumo de energia em virtude da paralisação das atividades letivas devido a pandemia do Covid-19 (FURTADO, 2021). O estudo mostrou que os valores obtidos atenderam aos limites estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST, exceto as distorções harmônicas de corrente que mesmo em plena carga, ocorreram violações dos valores aos limites estabelecidos pela Norma IEEE 519-2014, visto que o não há regulamentação de normas e resoluções para essa grandeza elétrica no âmbito nacional.

5 CONCLUSÃO

O crescente uso de equipamentos de conversão CA-CC, o alto índice de instalações de SFV e a modernização do sistema de iluminação com lâmpadas de diodo emissor de luz (LED), ou seja, com características não lineares, tem contribuído significativamente para levantar preocupações sobre o comportamento do sistema elétrico se está operando de modo satisfatório em termos da qualidade da energia elétrica.

Nesse contexto, esse trabalho avalia a qualidade da energia elétrica através do estudo de caso. Com o intuito de verificar se as instalações elétricas do IFG – Campus Goiânia se comportam em conformidade aos limites estabelecidos pelas normas vigentes.

A partir de um estudo realizado nas instalações elétricas do IFG – Campus Goiânia, permitiu a realização deste trabalho, com a utilização dos resultados obtidos através da campanha de medição realizada no secundário do transformador 1, englobando todas as cargas instaladas juntamente com o sistema fotovoltaico. A motivação para a sua realização, foi o fato de que essa campanha de medição foi realizada no período de 09/08 a 15/08/2021, mas na oportunidade se encontrava com o baixo consumo de energia em virtude da paralisação das atividades letivas devido a pandemia do Covid-19 (FURTADO, 2021). Assim, sendo proposto uma análise comparativa dos resultados obtidos com o sistema em plena carga.

Avaliando os resultados, observou-se considerável contribuição de distorções harmônicas de corrente, desse modo, persistindo esse distúrbio mesmo operando com carga significativa. A inserção de novos equipamentos com características não lineares, poderá promover problemas para o sistema, desta forma sendo necessário a apresentação de recomendações para trabalhos futuros, com estudos mais aprofundados para as distorções harmônicas.

Este trabalho reforça que a análise da qualidade da energia permite identificar algum distúrbio no sistema elétrico e propor medidas contra possíveis danos para o sistema elétrico.

5.1. Recomendações para trabalhos futuros

São apresentados a seguir como contribuições de pesquisa:

- a) realizar análise dos índices de desempenho do sistema fotovoltaico no IFG Campus Goiânia, conforme a variação da irradiação solar com a geração de energia, assim realizando medições sazonais ao longo do ano para cada estação do ano.

- b) realizar análise das principais cargas com características não lineares e suas contribuições afim de obter os circuitos mais impactantes na inserção de distorções harmônicas para o sistema elétrico do IFG Campus Goiânia.
- c) possibilidades do balanceamento de cargas entre os dois transformadores do sistema elétrico do IFG Campus Goiânia, otimizando o equilíbrio dos distúrbios harmônicos na rede.

6 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. **Módulo 8: Qualidade de Energia Elétrica**. 10ª ed. 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist>. Acesso em: 28 set. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15287: **Informação e documentação: projeto de pesquisa: apresentação**. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: https://www.fho.edu.br/revistacientifica/_documentos/ABNT-NBR-15287-2011.pdf. Acesso em: 05 abr. 2022.

BALBINO, I. M. **Análise de Impactos de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/tede/824>. Acesso em: 13 jun. 2022

BARROS, B; BORELLI, R; GEDRA, R. **Gerenciamento de Energia: Ações administrativas e técnicas de uso adequado da energia elétrica**. 2ª ed. São Paulo: Editora Érica, 2016. 177 p.

BOGILA, A; PINTO, J.R.; FRANCHI, T.P.; GONÇALVES, M.R. **Análise harmônica nos inversores fotovoltaicos de uma microgeração fotovoltaica**. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2018, Gramado, Brasil, p.1-10.

CAMPELO, M. **Avaliação do impacto da qualidade de energia elétrica na produção industrial: proposta de metodologia**. Revista Produto e Produção V.09, João Pessoa, 2008.

CHESP. **Efeitos do baixo fator de potência**. 2020. 1p. Disponível em <<http://www.chesp.com.br/pagina/institucional/42-efeitos-do-baixo-fator-de-potencia>>.

CODI - COMITÊ DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de Orientação aos Consumidores: Energia Reativa Excedente**. 2004. 13 p.

DECKMANN. S; POMILIO, J. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. Apostila. Faculdade de Engenharia Elétrica e da Computação. Fevereiro de 2017 14p.

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. **Electrical Power Systems Quality**, Second Edition, McGraw-Hill, 2004.

Eliminação de Harmônicas em Instalações. Schneider Eletric. 2015. Disponível em: <http://docplayer.com.br/24457085-Eliminação-de-harmonicas-em-instalacoes.htm>. Acesso em: 09 set. 2022.

EMBRASUL. **Manual de Instalação e Operação – Analisador de Energia RE7000**. Disponível em: http://www.vectus.com.br/resources/pdf/Manual_RE7000_subir.pdf. Acesso em: 09 jul. 2020. Acesso em: 09 set. 2022.

FERNANDES, D. A.; NAIDU, S. R.; COURAJR, C. A. E. **Resolução Instantânea de Componentes de Sequência de Variáveis Trifásicas e Sua Aplicação à Restauração**

Dinâmica de Tensão, in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement , vol. 58, nº. 8, pp. 2580-2587, ago. 2009.

FREITAS, D. C. **Análise das variações de tensão de curta duração de cliente comercial suprido em 69 kV**. 2018. 94 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

FURTADO, B.C. **Análise da qualidade da energia elétrica no IFG Campus Goiânia a partir da implementação de projetos de eficiência energética com adição de Sistema Fotovoltaico**. Goiânia, 2021. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis)-Instituto Federal de Goiás, Goiânia, 2021.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6ª. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

IEEE Std. 519 – **Recommend practices and requirements for harmonic control in electric power systems**, 2014.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61000-4-30: **Testing and measurement techniques - power quality measurement methods**. Geneva, Switzerland, 2015. Disponível em: https://webstore-iec-ch.translate.google/publication/21844?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pBR&_x_tr_pto=sc. Acesso em: 18 jun. 2022.

JANNUZZI, A. C. **Regulação da Qualidade de Energia Elétrica sob o Foco do Consumidor**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília. Brasília: abr. 2007. 216p.

JAVADI, A. et al. **Experimental investigation on a hybrid series active power compensator to improve power quality of typical households**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 63, n. 8, p. 4849–4859, Aug 2016.

LU, Y. et al. **Control strategy for single-phase transformerless three-leg unified power quality conditioner based on space vector modulation**. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 31, n. 4, p. 2840–2849, April 2016. ISSN 0885-8993.

MAMEDE F. **Instalações elétricas industriais**. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

MELO, J. V. J. **Campanha de Medição da QEE em Função do Acesso de Fontes Não Lineares à Rede Elétrica: Um Estudo de Caso**. 2019. 76 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande.

OLIVEIRA, J. C. **Qualidade da energia elétrica: definição e análise dos itens de qualidade**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2000. 90 p.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL – CRESEB, 2014.

RAGESH, R.; BHARANEETHARAN, A.; VENGADESH, R. **Design and control of svpwm based dstatcom for power quality improvement**. p. 1–6, June 2017.

RICHARDSON, R. J. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. 3ª. ed. São Paulo: Atlas, 1999.

ROCHA, J. E. **Qualidade de Energia**. 2016.37f. Monografia (Especialização) – Curso de Engenharia Elétrica, Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: <https://docplayer.com.br/47057322-Departamento-de-eletrotecnica-qualidade-da-energia-eletrica.html>. Acesso em: 08 de set. de 2022.

RODRIGUES, A. M. **Influência da distorção harmônica e de desequilíbrios em medidores de energia elétrica ativa**, 2011, TCC (Graduação) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

ROLIM, M. E. **Análise da qualidade de energia elétrica: Distorções harmônicas em uma planta industrial**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica), Porto Alegre: UFRG, 2015.

TEODORO, R. G. **Metodologia para Compensação de Desequilíbrio em Redes Elétricas**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, SP, 2005.

3E ENGENHARIA. **Estudo de proteção e seletividade - Geração distribuída interligada ao sistema de distribuição ENEL Goiás/313 Subestação IFG**. Goiânia, p. 24. 2020.

VIEIRA, C. V. **Análise dos efeitos de um sistema fotovoltaico de geração distribuída no fator de potência de um Campus Universitário**. 2019. TCC (Graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/203465/TCC%20-%20Cintia%20Vilain%20Vieira.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 17 jun. de 2022.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: Conceitos e aplicações** - Sistemas isolados e conectados à rede. 1ª. ed. São Paulo: Érica, 2012.

ANEXO A – RELATÓRIO DOS VALORES MÉDIOS DIÁRIOS DA CAMPANHA DE MEDIÇÃO DE 09/09 A 16/09/2022

EMBRASUL N.S:72000335 V.S.2,00 ANL 2,95 (10 minutos)

RELATÓRIO DE VALORES MÉDIOS DIÁRIOS (Integração = 10 minutos)

Grandezas médias no dia 09/09/2022

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	219,06	217,07	218,85
Correntes [A]	100,680	95,415	92,401
Potências ativas [kW]	19,457	19,112	17,688
Potências reativas [kVAr]	8,602	6,483	7,826
Potências aparentes [kVA]	21,274	20,182	19,342
Fatores de potência	0,914	0,947	0,914

Grandezas médias no dia 10/09/2022

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	220,28	218,26	220,09
Correntes [A]	66,830	67,393	59,729
Potências ativas [kW]	14,350	14,448	12,558
Potências reativas [kVAr]	2,271	2,188	3,216
Potências aparentes [kVA]	14,528	14,613	12,964
Fatores de potência	0,988	0,989	0,969

Grandezas médias no dia 11/09/2022

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	220,25	218,13	220,10
Correntes [A]	69,667	64,445	60,474
Potências ativas [kW]	14,699	13,595	12,424
Potências reativas [kVAr]	3,033	2,686	4,229
Potências aparentes [kVA]	15,009	13,858	13,124
Fatores de potência	0,979	0,981	0,947

EMBRASUL N.S:72000335 V.S.2,00 ANL 2,95 (10 minutos)

RELATÓRIO DE VALORES MÉDIOS DIÁRIOS (Integração = 10 minutos)

Grandezas médias no dia 12/09/2022

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	218,93	216,77	218,84
Correntes [A]	99,044	94,650	90,925
Potências ativas [kW]	20,052	19,101	18,642
Potências reativas [kVAr]	6,434	5,918	5,997
Potências aparentes [kVA]	21,059	19,997	19,583
Fatores de potência	0,952	0,955	0,952

Grandezas médias no dia 13/09/2022

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	219,18	216,80	219,00
Correntes [A]	96,861	98,446	93,074
Potências ativas [kW]	19,949	20,374	19,000
Potências reativas [kVAr]	5,660	5,196	6,260
Potências aparentes [kVA]	20,737	21,026	20,005
Fatores de potência	0,962	0,969	0,950

Grandezas médias no dia 14/09/2022

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	218,19	216,15	218,01
Correntes [A]	100,127	94,948	98,179
Potências ativas [kW]	21,266	19,863	20,653
Potências reativas [kVAr]	3,006	3,723	4,576
Potências aparentes [kVA]	21,477	20,209	21,154
Fatores de potência	0,990	0,983	0,976

EMBRASUL N.S:72000335 V.S.2,00 ANL 2,95 (10 minutos)

RELATÓRIO DE VALORES MÉDIOS DIÁRIOS (Integração = 10 minutos)

Grandezas médias no dia 15/09/2022

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	219,21	217,21	219,19
Correntes [A]	98,779	92,897	85,316
Potências ativas [kW]	20,782	19,204	17,282
Potências reativas [kVAr]	4,588	4,894	6,109
Potências aparentes [kVA]	21,283	19,818	18,329
Fatores de potência	0,976	0,969	0,943

Grandezas médias no dia 16/09/2022

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	220,80	218,67	220,40
Correntes [A]	64,170	82,321	61,923
Potências ativas [kW]	14,109	17,891	13,257
Potências reativas [kVAr]	0,664	1,386	2,853
Potências aparentes [kVA]	14,125	17,945	13,561
Fatores de potência	0,999	0,997	0,978

Fonte: Registros do Analisador de Energia (Embrasul, RE7000), 2022.