



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUAÇÃO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Berthiê de Castro Furtado

**ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA NO IFG CAMPUS GOIÂNIA
A PARTIR DA IMPLEMENTAÇÃO DE PROJETO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
COM ADIÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO**

Goiânia, 2021.

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUAÇÃO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Berthiê de Castro Furtado

**ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA NO IFG CAMPUS GOIÂNIA
A PARTIR DA IMPLEMENTAÇÃO DE PROJETO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
COM ADIÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO**

Programa de Pós-Graduação *stricto sensu* em Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG (PPG-TPS- IFG) – Dissertação de Mestrado Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Energias Renováveis e Engenharia Econômica Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. José Luis Domingos

Coorientador: Prof. Dr. Aylton José Alves

Goiânia, 2021.

F992a Furtado, Berthiê de Castro.

Análise da qualidade da energia elétrica no IFG Campus Goiânia a partir da implementação de projetos de eficiência energética com adição de Sistema Fotovoltaico / Berthiê de Castro Furtado. – Goiânia : Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2021.
105p.

Orientador: Prof. Dr. José Luis Domingos.
Coorientador: Prof. Dr. Aylton José Alves.

Dissertação (Mestrado) – Mestrado Profissional em Tecnologia de Processos Sustentáveis - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.
Inclui anexo e apêndice.

1. Eficiência energética. 2. Sistema fotovoltaico. 3. Dispositivos não lineares. 4. Qualidade da energia elétrica. I. Domingos, José Luis (orientador). II. Alves, Aylton José (coorientador). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

CDD 621.312



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

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

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:

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: | |

Nome Completo do(a) Autor(a): **BERTHIÊ DE CASTRO FURTADO**

Matrícula: **20182011140020**

Título do Trabalho: **ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA NO IFG CAMPUS GOIÂNIA A PARTIR DA IMPLEMENTAÇÃO DE PROJETO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA COM ADIÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO**

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial:

Não

Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no ReDi/IFG: 26/12/2021

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

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

- 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;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos 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;
- cumprir 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, 26 de novembro 2021.

(Assinado eletronicamente)

BERTHIÊ DE CASTRO FURTADO

Documento assinado eletronicamente por:

■ **Berthiê de Castro Furtado, BERTHIÊ DE CASTRO FURTADO - ESTUDANTE - IFG - CÂMPUS GOIÂNIA (10870883000225)**, em 07/12/2021 14:41:43.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 24/11/2021. 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: 222110

Código de Autenticação: 6ae61590e6



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Rua 75, nº 46, Centro, GOIÂNIA / GO, CEP 74055-110

(62) 3227-2811 (ramal: 2811)



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

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

PARECER 21/2021 - GYN-CMTPS/GYN-DPPGE/CP-GOIANIA/IFG

**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CÂMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS**

BERTHIÊ DE CASTRO FURTADO

**ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA NO IFG CAMPUS GOIÂNIA A PARTIR DA IMPLEMENTAÇÃO DE
PROJETO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA COM ADIÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Sustentáveis do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.
Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Energias Renováveis e Engenharia Econômica Aplicada.

Aprovada em: 26/11/2021

Presidente e Orientador: Prof. Dr. José Luis Domingos – PPGTPS IFG
Coorientador: Prof. Dr. Aylton José Alves – PPGTPS IFG
Avaliador: Prof. Dr. Daywes Pinheiro Neto – PPGTPS IFG
Avaliador: Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior – UFG – Universidade Federal de Goiás
Avaliadora: Profa. Dra. Alana da Silva Magalhães – IFG Câmpus Goiânia

Documento assinado eletronicamente por:

- **Aylton Jose Alves, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 08/12/2021 14:35:25.
- **FERNANDO NUNES BELCHIOR, FERNANDO NUNES BELCHIOR - OUTROS - UFG (01567601000143)**, em 08/12/2021 13:40:36.
- **Alana da Silva Magalhaes, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 29/11/2021 20:22:18.
- **Daywes Pinheiro Neto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 29/11/2021 12:36:04.
- **Jose Luis Domingos, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 29/11/2021 08:35:59.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 24/11/2021. 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: 222055
Código de Autenticação: 35cbe4d94d



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Rua 75, nº 46, Centro, GOIÂNIA / GO, CEP 74055-110
(62) 3227-2811 (ramal: 2811)

Dedico este trabalho à minha família pela compreensão e ausência que lhes fiz durante a realização desse trabalho. À minha filha Rhanna Beatriz Castro Moura, fonte de inspiração, que representa a carta náutica norteando-me em incursões pelos mares nunca dantes navegado. À minha esposa Uranea Moreira Moura. Aos meus pais, que me ensinaram a nunca desistir dos sonhos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela luz que guiou meus passos, onde mostrou o caminho certo, encorajando-me nesta jornada e assim possibilitando transcorrer por todas as etapas para alcançar esse momento singular na vida.

A todos os familiares, que me apoiaram e compreenderam a minha falta cotidiana junto deles.

Ao orientador, Prof. Dr. José Luis Domingos, pela confiança depositada, incentivo, paciência e ensinamentos no desenvolvimento desse trabalho.

Ao coorientador, Prof. Dr. Aylton José Alves, pelos ensinamentos no decorrer dessa pesquisa.

A todos os professores e funcionários, do Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG, Campus Goiânia, que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho.

A todos os colegas de mestrado pela ajuda mútua durante essa jornada.

Ao IFG – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás, instituição pautada pela educação profissional de qualidade, que representa o alicerce da minha formação profissional/acadêmica, desde da Habilitação Técnica em Eletrotécnica, a Graduação em Tecnologia em Eletromecânica e agora o Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis.

Aos colegas de trabalho, especificamente a equipe de docentes da área de Eletroeletrônica da Faculdade de Tecnologia SENAI Ítalo Bologna, pela contribuição positiva na idealização deste projeto.

Aos amigos Emerson de Souza Campos e André Mendes Martins, como sempre atenciosos, com sugestões sábias, contribuindo de maneira efetiva nesse trabalho.

Aos professores membros da banca examinadora, por suas valiosas sugestões para a melhoria e a concepção final desse trabalho.

Por fim, e não menos importantes a todas as pessoas que além de acreditarem na minha dedicação, respeitosamente, estimularam e colaboraram de uma forma ou de outra na realização deste trabalho.

Eu tentei 99 vezes e falhei, mas na centésima tentativa eu consegui, nunca desista dos seus objetivos mesmo que esses pareçam impossíveis, a próxima tentativa pode ser a vitoriosa.

(Albert Einstein)

Título: Análise da Qualidade da Energia Elétrica no IFG Campus Goiânia a partir da implementação de Projeto de Eficiência Energética com adição de sistema fotovoltaico.

Autor: Berthiê de Castro Furtado

Orientador: Dr. José Luis Domingos

Coorientador: Dr. Aylton José Alves

RESUMO

A qualidade da energia elétrica tornou-se um dos assuntos mais estudados no setor elétrico nos últimos anos. As principais motivações em pesquisar esse tema é respaldado pela 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. Neste contexto, este trabalho tem como principal objetivo realizar um estudo de caso com a utilização de método consolidado na literatura, que possibilite avaliar a qualidade da energia elétrica antes, durante e após a implantação de projeto de eficiência energética. O estudo é realizado de forma quantitativa por meio de estudo de caso nas instalações do IFG Campus Goiânia. A metodologia adotada consiste em caracterizar as distorções harmônicas de tensão, a variação de frequência, o fator de potência, a tensão em regime permanente e o desequilíbrio de tensão, através de campanhas de medições, com o intuito de verificar se as instalações elétricas do local comportam-se em conformidade com os limites estabelecidos pelas normas vigentes. Inicialmente, realizou-se a primeira campanha de medição nas instalações elétricas do local de estudo, antes da implantação do projeto de eficiência energética. Em seguida, realizou-se a segunda campanha de medição considerando todas as cargas juntamente com a implantação do novo sistema de iluminação e, por fim, a terceira campanha, onde considerou-se todas as cargas instaladas juntamente com a implantação do sistema fotovoltaico. Os resultados mostram que na primeira e na segunda campanha os fenômenos da qualidade do produto mantiveram-se dentro dos limites estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST e a Norma IEEE 519 – 2014. Entretanto, na terceira campanha identificou-se considerável contribuição de distorções harmônicas de corrente, sendo necessárias ações mitigadoras. Do estudo, conclui-se que, realizar análise da qualidade da energia elétrica, permite identificar o problema e propor solução para mitigar possíveis danos causados nas instalações elétricas da edificação em estudo.

PALAVRAS-CHAVE: EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. SISTEMA FOTOVOLTAICO. DISPOSITIVOS NÃO LINEARES. QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA.

Title: Analysis of the power quality in IFG Campus Goiânia from the implementation of the energy efficiency project with the addition of a photovoltaic system.

Author: Berthiê de Castro Furtado

Adviser: Dr. José Luis Domingos

Co-adviser: Dr. Aylton José Alves

ABSTRACT

The quality of electricity has become one of the most studied subjects in the electricity sector in recent years. The main motivations in researching this theme are supported by the increasing use of loads sensitive to variation in the parameters of the electrical network, causing losses to users and the application of nonlinear devices, which are responsible for the injection of harmonic components of current into the network. In this context, this work has as main objective to carry out a case study with the use of a consolidated method in the literature, which allows the assessment of the power quality before, during, and after the implementation of an energy efficiency project. The study was carried out quantitatively through a case study at the IFG Campus Goiânia facilities. The methodology adopted consists of characterizing harmonic voltage distortions, frequency variation, power factor, Steady-state voltage, and voltage imbalance, through measurement campaigns, to verify whether the electrical installations of the site behave by the limits established by the current standards. Initially carried out the first measurement campaign in the electrical installations of the study site, before the implementation of the energy efficiency project. After that, carried out the second measurement campaign considering all loads together with the implementation of the new lighting system, and finally, the third campaign, which considered all installed loads installed together with the implementation of the photovoltaic system. The results show that in the first and second campaigns the phenomena of product quality remained within the limits established by PRODIST Module 8 and IEEE 519 – 2014. However in the third campaign, a considerable contribution of harmonic distortions of current was identified, and mitigating actions are necessary. From the study, it is concluded that carrying out an analysis of power quality allows identifying the problem and proposing a solution to mitigate possible damage caused to the electrical installations of the building under study.

KEYWORDS: ENERGY EFFICIENCY. PHOTOVOLTAIC SYSTEM. NON-LINEAR DEVICES. POWER QUALITY.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Faixas de tensão em relação à de referência.	29
Figura 2.2 – Forma de onda distorcida.	32
Figura 2.3 – Decomposição de uma onda distorcida em uma série de senóides.	33
Figura 2.4 – Distorções harmônicas individuais de corrente.	34
Figura 2.5 – Desequilíbrio de tensão.	40
Figura 3.1 – Fluxograma da Metodologia.	45
Figura 3.2 – Topologia de medição 3 fases, 1 neutro, 1 proteção em estrela do instrumento.	48
Figura 3.3 – Descrição do tratamento dos dados.	49
Figura 4.1 – Fachada do IFG / Campus Goiânia.	53
Figura 4.2 – Localização dos espaços no IFG / Campus Goiânia.	54
Figura 4.3 – Diagrama elétrico da subestação abrigada do IFG – Campus Goiânia.	55
Figura 4.4 – Transformador 1, 500 kVA, 13,8/0,38 kV.	56
Figura 4.5 – QGF-1: Quadro Geral de Força 1.	57
Figura 4.6 – Transformador 2, 225 kVA, 13,8/0,38 kV.	58
Figura 4.7 – QGF-2: Quadro Geral de Força 2.	58
Figura 4.8 – Detalhe das medições realizadas no ponto de medição M1 no QGF-1/ Transformador 1.	59
Figura 4.9 – Detalhe das medições realizadas no ponto de medição M2 no QGF-2/ Transformador 2.	60
Figura 4.10 – Detalhe das medições realizadas no ponto de medição M3 no QGF-1/ Transformador 1.	61
Figura 4.11 – Arranjo dos módulos no telhado do IFG / Campus Goiânia.	64
Figura 5.1 – Comportamento do nível de tensão em regime permanente (tensão de linha / transformadores 1 e 2).	65
Figura 5.2 – Comportamento do fator de potência (transformadores 1 e 2).	66
Figura 5.3 – Comportamento das distorções harmônicas totais de tensões (DHT-V) nas fases A, B e C (transformadores 1 e 2).	67

Figura 5.4 – Comportamento do desequilíbrio de tensão (transformadores 1 e 2).	67
Figura 5.5 – Comportamento da frequência (transformadores 1 e 2).....	68
Figura 5.6 – Comportamento das DHT-I nas fase A, B e C (transformador 1 / terceira campanha).....	79
Figura 5.7 – Comportamento das DHT-I nas fase A, B e C (transformador 1 / terceira campanha / SFV).	80
Figura 5.8 – Comportamento do desequilíbrio de tensão (transformador 1).	80
Figura 5.9 – Comportamento da frequência (transformador 1).....	81
Figura 5.10 – Comportamento do desequilíbrio de tensão (transformador 2).....	92
Figura 5.11 – Comportamento da frequência (transformador 2).....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Fenômenos da qualidade do produto em regime permanente ou transitório.	28
Tabela 2.2 – Faixa de tensão em regime permanente, igual ou inferior a 1 kV (380/220 V). .	29
Tabela 2.3 – Ponto de conexão em tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV.	30
Tabela 2.4 – Terminologia.....	35
Tabela 2.5 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).....	36
Tabela 2.6 – Limites de distorção harmônica de tensão.....	37
Tabela 2.7 – Limites de distorção harmônica de corrente para sistemas de 120 V a 69 kV. ...	39
Tabela 2.8 – Limites para os desequilíbrios de tensão.	41
Tabela 2.9 – Variação de frequência em relação ao tempo permitido de interrupção.	42
Tabela 4.1 – Dados de curto-circuito no ponto de entrega da UC.....	56
Tabela 4.2 – Disposição dos circuitos no QGF-1	57
Tabela 4.3 – Disposição dos circuitos no QGF-2.....	58
Tabela 4.4 – Descrição das lâmpadas descartadas.	62
Tabela 4.5 – Descrição das lâmpadas implantadas.....	62
Tabela 4.6 – Características básicas do inversor SIW500H ST030.	63
Tabela 4.7 – Características elétricas do módulo GCL – P6/72325.....	63
Tabela 5.1 – Valores dos indicadores do nível de tensão em regime permanente (tensão de linha / transformadores 1 e 2).....	66
Tabela 5.2 – Valores dos indicadores do nível de tensão em regime permanente (tensão de linha / transformador 1).....	69
Tabela 5.3 – Valores dos indicadores do nível de tensão em regime permanente (tensão entre fase e neutro / transformador 1).....	70
Tabela 5.4 – Valores dos indicadores do fator de potência (transformador 1).....	71
Tabela 5.5 – Valores das distorções harmônicas totais de tensões (DHT-V) nas fases A, B e C (transformador 1).....	72
Tabela 5.6 – Valores das distorções harmônicas individuais das tensões nas fases A, B e C (transformador 1 / segunda campanha de medição).....	73

Tabela 5.7 – Valores das distorções harmônicas individuais das tensões nas fases A, B e C (transformador 1 / terceira campanha de medição).	74
Tabela 5.8 – Valores de corrente nas fases A, B e C no secundário do transformador 1.....	75
Tabela 5.9 – Valores das distorções harmônicas totais de corrente (DHT-I) e individuais (DHI-I) nas fases A, B e C (transformador 1 / segunda campanha de medição).	76
Tabela 5.10 – Valores das distorções harmônicas totais de corrente (DHT-I) e individuais (DHI-I) nas fases A, B e C (transformador 1 / terceira campanha de medição).	78
Tabela 5.11 – Valores dos indicadores da frequência (transformador 1).....	81
Tabela 5.12 – Valores dos indicadores do nível de tensão em regime permanente (tensão de linha / transformador 2).	82
Tabela 5.13 – Valores dos indicadores do nível de tensão em regime permanente (tensão entre fase e neutro / transformador 2).....	83
Tabela 5.14 – Valores dos indicadores do fator de potência (transformador 2).....	84
Tabela 5.15 – Valores das distorções harmônicas totais de tensões (DHT-V) nas fases A, B e C (transformador 2).	85
Tabela 5.16 – Valores das distorções harmônicas individuais das tensões nas fases A, B e C (transformador 2 / segunda campanha de medição).	86
Tabela 5.17 – Valores das distorções harmônicas individuais das tensões nas fases A, B e C (transformador 2 / terceira campanha de medição).	87
Tabela 5.18 – Valores de corrente nas fases A, B e C no secundário do transformador 2.....	88
Tabela 5.19 – Valores das distorções harmônicas totais de corrente (DHT-I) nas fases A, B e C (transformador 2).	89
Tabela 5.20 – Valores das distorções harmônicas individuais das correntes nas fases A, B e C (transformador 2 / segunda campanha de medição).	90
Tabela 5.21 – Valores das distorções harmônicas individuais das correntes nas fases A, B e C (transformador 2 / terceira campanha de medição).	91
Tabela 5.22 – Valores dos indicadores da frequência (transformador 2).....	93

LISTA DE ABREVIATURAS 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
CFLs	Lâmpadas fluorescentes Compactas
CHESP	Companhia Hidroelétrica São Patrício
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
DRC	Índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica
DRP	Índice de duração relativa da transgressão para tensão precária
EMC	Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação
FACENS	Faculdade de Engenharia de Sorocaba
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IFG	Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás
LED	Diodo Emissor de Luz (<i>Light Emitting Diode</i>)
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> , ou 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 da Energia Elétrica
QGF-1	Quadro Geral de Força 1
QGF-2	Quadro Geral de Força 2
RMS	<i>Root Mean Square</i> (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
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
UFG	Universidade Federal de Goiás
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
USCA	Unidade de Supervisão de Corrente Alternada
VTCD	Varição de tensão de curta duração

LISTA DE SÍMBOLOS

V_-	Magnitude da tensão eficaz de sequência negativa – frequência fundamental
V_+	Magnitude da tensão eficaz de sequência positiva – frequência fundamental
V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}	Magnitudes das tensões eficazes de linha – frequência fundamental.
a_h e b_h	Componentes de enésima ordem
a_0	Componente contínua
DDT	Distorção de demanda total
DHI-I	Distorção harmônica individual de corrente
DHT-I	Distorção harmônica total de corrente
$DTT_h\%$	Distorção harmônica individual de tensão de ordem h
DTT%	Distorção harmônica total de tensão
$DTT_3\%$	Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3
$DTT_{395}\%$	Valor do indicador $DTT_3\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas
$DTT_{95}\%$	Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas
$DTT_i\%$	Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3
$DTT_{i95}\%$	Valor do indicador $DTT_i\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas
$DTT_p\%$	Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3
$DTT_{p5}\%$	Valor do indicador $DTT_p\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas
FD	Fator de desequilíbrio de tensão
FF	Fase e fase
FN	Fase e neutro

h	Ordem harmônica
$h_{\text{máx}}$	Ordem harmônica máxima
$h_{\text{mín}}$	Ordem harmônica mínima
I_{CC}	Corrente máxima de curto-circuito no PAC
I_{SC}	Corrente de curto-circuito
I_{L}	Corrente de demanda da carga
I_{MP}	Corrente de máxima potência
I_1	Corrente fundamental medida
I_h	Corrente harmônica de ordem h
P	Potência ativa
PE	Condutor de proteção
$P_{\text{máx}}$	Potência elétrica máxima
Q	Potência reativa
S	Potência aparente
V_1	Tensão fundamental medida
V_h	Tensão harmônica de ordem h
$V_{\text{máxima}}$	Tensão máxima
$V_{\text{média}}$	Tensão média
$V_{\text{mínima}}$	Tensão mínima
V_{MP}	Tensão de máxima potência
V_{N}	Tensão nominal
V_{OC}	Tensão de circuito aberto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	ESTADO DA ARTE	21
1.2	OBJETIVO GERAL	26
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	26
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	26
2	ASPECTOS DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	28
2.1	FENÔMENOS DA QUALIDADE DO PRODUTO: CONCEITUAÇÃO E NORMATIZAÇÃO	28
2.1.1	<i>Tensão em regime permanente</i>	28
2.1.2	<i>Fator de potência</i>	31
2.1.3	<i>Harmônicos</i>	32
2.2.3.1	<i>Distorções harmônicas de tensão</i>	34
2.2.3.2	<i>Distorções harmônicas de corrente</i>	37
2.2.3.3	<i>Mitigação das distorções harmônicas de tensão e corrente</i>	39
2.1.4	<i>Desequilíbrio de tensão</i>	40
2.1.5	<i>Variação de frequência</i>	42
2.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43
3	METODOLOGIA.....	44
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	44
3.2	METODOLOGIA	44
3.2.1	<i>Definição dos fenômenos da qualidade do produto a serem analisados</i>	45
3.2.2	<i>Campanhas de medições</i>	46
3.2.2.1	<i>Requisito do instrumento e critérios de medição</i>	46
3.2.2.2	<i>Grandezas monitoradas</i>	48
3.2.3	<i>Tratamento dos dados</i>	48
3.2.4	<i>Avaliação dos resultados</i>	49
3.2.5	<i>Identificação dos problemas, apresentação de soluções e elaboração de relatório</i>	50
3.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
4	ESTUDO DE CASO: IFG CAMPUS GOIÂNIA	53
4.1	LOCAL E CARACTERIZAÇÃO DAS INSTALAÇÕES FÍSICAS DO ESTUDO DE CASO.....	53
4.2	CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DA SUBESTAÇÃO E PONTOS DE MEDIÇÕES	54
4.3	SISTEMA DE ILUMINAÇÃO	61
4.4	SISTEMA FOTOVOLTAICO	62
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1	PRIMEIRA CAMPANHA DE MEDIÇÃO NOS PRIMÁRIOS DOS TRANSFORMADORES 1 E 2.....	65
5.1.1	<i>Tensão em regime permanente</i>	65
5.1.2	<i>Fator de potência</i>	66
5.1.3	<i>Distorção harmônica de tensão</i>	67
5.1.4	<i>Desequilíbrio de tensão</i>	67
5.1.5	<i>Variação de frequência</i>	68
5.2	SEGUNDA E TERCEIRA CAMPANHA DE MEDIÇÃO NO SECUNDÁRIO DO TRANSFORMADOR 1	68
5.2.1	<i>Tensão em regime permanente</i>	69
5.2.2	<i>Fator de potência</i>	70
5.2.3	<i>Distorção harmônica de tensão</i>	71
5.2.4	<i>Distorção harmônica de corrente</i>	75

5.2.5	<i>Desequilíbrio de tensão</i>	80
5.2.6	<i>Variação de frequência</i>	81
5.3	SEGUNDA E TERCEIRA CAMPANHA DE MEDIÇÃO NO SECUNDÁRIO DO TRANSFORMADOR 2	82
5.3.1	<i>Tensão em regime permanente</i>	82
5.3.2	<i>Fator de potência</i>	83
5.3.3	<i>Distorção harmônica de tensão</i>	85
5.3.4	<i>Distorção harmônica de corrente</i>	88
5.3.5	<i>Desequilíbrio de tensão</i>	92
5.3.6	<i>Variação de frequência</i>	92
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
6	CONCLUSÃO	96
6.1	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	97
6.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	97
	REFERÊNCIAS	99
	APÊNDICE A – RELAÇÃO ENTRE ICC/IL NO TRANSFORMADOR 1	103
	ANEXO A – DISTRIBUIÇÃO DOS MÓDULOS NOS BLOCOS 300, 400, 500 E MINIAUDITÓRIO	
	DERMARTIN BIZERRA DA SILVA	104

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma visão geral do tema, abordado no Estado da Arte, definindo a problemática, a hipótese e os objetivos inerentes à sua realização. Por fim, mostra uma breve descrição sobre a estrutura desta dissertação.

1.1 ESTADO DA ARTE

A demanda por energia elétrica em todo o mundo é crescente e acelerada. Esse crescimento é provocado principalmente pelo aumento populacional e pela dependência de tecnologias que necessitam de energia elétrica. Essa dependência gera uma necessidade cada vez maior por energia disponível, sobretudo a partir de fontes renováveis.

Segundo os dados do Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, no Brasil tem-se um quadro onde o setor elétrico brasileiro contraria várias opiniões, pois depende fortemente das hidrelétricas (61,04%) e de combustíveis fósseis (14,70%). O atual cenário apresenta uma baixa representatividade de fontes renováveis como energia solar (1,49%) e energia eólica (8,65%), constatando-se então a necessidade da diversificação da matriz energética com outras fontes renováveis de energia (ANEEL, 2021).

A necessidade de diminuir a dependência de combustíveis fósseis e a preferência por fontes de energia que não poluem têm levado à busca de novas fontes de energia para a geração de eletricidade (VILLALVA, 2012).

Por outro lado, de acordo com Wang (2013) e Indra (2011), os sistemas de energias renováveis, como Sistema Fotovoltaico (SFV) e geração eólica, além de sistemas de iluminação através de Lâmpadas Fluorescentes Compactas (CFL) e de lâmpadas baseadas em Diodos Emissores de Luz (LED), dentre outras cargas, utilizam muitos dispositivos eletrônicos, que caracterizam por injetarem uma quantidade elevada de harmônicos na rede elétrica, tornando uma grande preocupação para consumidores e as concessionárias de energia elétrica com relação à qualidade da energia. Essas cargas, por sua vez, são encontradas frequentemente em diversos setores como no comércio, na indústria, instituições de ensino, dentre outros.

De acordo com Leão et al. (2014) a qualidade da energia elétrica permite que máquinas, equipamentos, instalações elétricas e sistemas elétricos, funcionem de maneira adequada, não comprometendo o desempenho e a vida útil, porém condicionado ao comportamento dos sinais

elétrico de tensão e corrente. Com relação à perda da qualidade de energia Dugan et al. (2004) define como qualquer problema de energia manifestado na tensão, corrente ou desvio de frequência, ocasionando dano ou comprometimento na operação do equipamento.

Independente da definição que se aplica, a qualidade da energia, ou a falta da qualidade da energia, tornou-se um dos assuntos mais abordados em todos os segmentos que estão envolvidos com a energia elétrica, tanto por parte dos consumidores, quanto pelas concessionárias. As principais motivações do estudo desse tema são respaldadas pelas seguintes questões:

- a) o crescente interesse pelo assunto “qualidade da energia”, onde torna os consumidores bem mais informados sobre alguns fenômenos como: fator de potência, desequilíbrio de tensão, variação de frequência, dentre outros. Desta forma, exigindo mais das concessionárias o fornecimento de um produto de qualidade;
- b) o considerável aumento de harmônicos injetados na rede elétrica, causados por equipamentos de eletrônica de potência oriundos de instalações comerciais, industriais, residenciais, dentre outros. Além do elevado índice de instalações de sistemas fotovoltaicos, que podem propiciar efeitos indesejáveis no sistema elétrico, quanto à qualidade da energia elétrica;
- c) aumento da interligação dos processos industriais, onde a falha de qualquer componente, equipamento e/ou máquina, acarreta na parada de uma linha de produção, onde requer horas para reiniciar, desta forma resultado em prejuízos financeiros (DUGAN et al. 2004).

Diante do exposto, é necessário que as concessionárias de energia elétrica apresentem informações junto às agências reguladoras de energia elétrica sobre as condições de operação ou fornecer detalhes acerca de eventos ocorridos, que afetaram o fornecimento de energia elétrica. Cabe às agências reguladoras estabelecerem os indicadores que determinam se o sistema elétrico está funcionando dentro do satisfatório em termos de qualidade da energia.

Sabe-se que a responsabilidade pela qualidade da energia não fica restrita apenas à concessionária, cabe também o envolvimento do usuário nesse processo. Portanto o consumidor deve viabilizar medidas preventivas, implementando programas de monitoramento no sistema elétrico, com o intuito de vislumbrar e prevenir possíveis problemas. De acordo com Deckmann e Pomilio (2018) deve-se tratar esses problemas de forma efetiva, pois caso não sejam realizadas formas de atenuar tais situações, ocorrerá o comprometimento no funcionamento ou redução da vida útil de equipamentos eletrônicos sensíveis, transformadores, capacitores, motores, dentre outros. Também teria consequências quanto às perturbações físicas em pessoas como desconforto visual, perda de concentração, fadiga e irritabilidade.

Pautado nessa preocupação, vários trabalhos têm ressaltado a importância em avaliar a qualidade da energia elétrica, em virtude das frequências harmônicas produzidas pelos inversores nos sistemas fotovoltaicos, somada à outras produzidas por equipamentos baseados em cargas não-lineares, causando uma grande preocupação para o sistema de distribuição, levando a uma série de problemas relacionados à qualidade da energia elétrica. Esses estudos mensuram os impactos causados e as propostas de mitigações, que são abordados a seguir.

No artigo de Bogila et al. (2018), os autores apresentam um estudo da qualidade da energia elétrica na microunidade fotovoltaica do Campus da FACENS – Faculdade de Engenharia de Sorocaba, onde realizam análise da frequência, distorções harmônicas de corrente e tensão. Os resultados mostram que os valores atendem as recomendações das normas IEEE 519 – 2014 e o Módulo 8 do PRODIST, 2018; porém o estudo recomenda a necessidade de estudos adicionais dos inversores fotovoltaicos para os sistemas de microunidades fotovoltaicas, considerando principalmente os aspectos da qualidade da corrente injetada e os desenvolvimentos tecnológicos dos inversores.

No trabalho desenvolvido por Ayub et al. (2014) é abordado os problemas com a qualidade da energia, focando as distorções harmônicas, onde torna-se uma preocupação cada vez mais séria à medida que é integrado o sistema fotovoltaico no sistema de distribuição de energia. Os resultados das medições de campo mostram que o nível de radiação solar tem influência significativa referente à geração de frequência harmônica do inversor. Foram realizadas medições com analisador de qualidade sujeito à vários níveis de irradiação solar e comparados com um modelo computacional, aplicando o *software Simulink*, e constatou-se que as interferências harmônicas, com relação a THD (*Total Harmonic Distortion*), são similares entre as duas análises e assim consolidam o modelo de simulação.

Já no estudo realizado por Teixeira et al. (2016), é avaliado um sistema fotovoltaico centralizado de 1 MVA que apresenta inversores e módulos fotovoltaicos com distintas tecnologias. Durante as medições constatou-se que a corrente harmônica e o fator de potência apresentaram valores acima dos limites permitidos pelas normas nacionais e internacionais. Essas medições foram apresentadas em momentos que se constatou menor geração, isto é, ao amanhecer e ao pôr do sol. Apesar de apresentar valores acima do permitido, nesses horários ocorrem baixa injeção de corrente na rede, dessa forma não afetando os indicadores de qualidade do produto do sistema elétrico da concessionária.

O trabalho de Irfan (2015) apresenta um estudo de caso de auditoria da qualidade da energia realizado na Nagesh Karajagi Orchid College of Engg. e Tecnologia, Solapur (NKOCET). Durante o período em que a maioria das cargas na faculdade estavam energizadas,

constatou-se incidência acentuada de potência reativa, implicando em baixo fator de potência e desequilíbrio de cargas. As análises das distorções harmônicas de tensão e corrente apresentaram valores que excedem as prescrições da IEEE 519-2014. Por fim, os autores sugerem a instalação de filtros para reduzir o conteúdo harmônico e para melhorar o fator de potência; além de recomendarem a redistribuição das cargas no sistema elétrico.

O estudo realizado por Lourenço (2012) aborda a metodologia da construção de um diagnóstico da qualidade da energia elétrica e a avaliação de desempenho, quanto à qualidade da energia, da rede elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará. Os resultados demonstram que o fator de potência e distorção harmônica total de corrente, apresentaram valores acima dos limites estabelecidos, além do baixo carregamento dos transformadores. O trabalho propõe ações como: instalação de filtros harmônicos para o controle das taxas de distorção harmônica de corrente, instalação de bancos de capacitores e a redistribuição de cargas entre os transformadores.

Ainda nesta abordagem, o trabalho de Magalhães (2017), apresenta um diagnóstico da qualidade da energia elétrica do Centro Tecnológico do Campus de Goiabeiras da Universidade Federal do Espírito Santo. Através do Analisador de Energia foram realizadas medições em todos os transformadores do Centro, verificando os níveis de tensão em regime permanente, desequilíbrio de tensão, distorção harmônica total de tensão, frequência, fator de potência, carregamento e balanceamento das cargas dos transformadores. Constatou-se que a frequência, os níveis de tensão, a distorção harmônica e o desequilíbrio de tensão encontram-se dentro dos limites estabelecidos pela ANEEL em todos os transformadores. Observou que o fator de potência, o carregamento dos transformadores e o balanceamento das cargas não se apresentaram dentro dos valores adequados. Por fim, o autor sugeriu algumas medidas buscando mitigar esses problemas.

O estudo realizado por Castro (2019), investiga a distorção harmônica total de corrente (DHT-I) produzida por três inversores fotovoltaicos de 4,4 kW, 2,9 kW e 33 kW, instalados em sistemas distintos na Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG). Os resultados obtidos mostraram que o inversor monofásico de 2,9 kW não apresentou valores de DHT-I em conformidade com a norma ABNT NBR 16149:2013, atingindo valores na ordem de 5,29%, onde o máximo permitido é 4%. Já os outros inversores apresentaram valores percentuais de DHT-I em conformidade. Outro aspecto observado foi que os maiores índices de distorção harmônica total de corrente (DHT-I), ocorrem para baixas potências de carregamento do inversor, ou seja, em horários de início da manhã e final de tarde, onde há a presença dos menores valores de irradiância solar.

Já no estudo realizado por Bandeira et al. (2020), é analisado alguns fenômenos da qualidade do produto, após a implantação de um sistema fotovoltaico de 14 kWp no Laboratório de Energia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA). De acordo com os resultados, o desequilíbrio de tensão apresentou valores entre 0% a 1,88% e a variação de frequência oscilou entre 59,8 Hz a 60,1 Hz; assim, comportando-se dentro dos limites estabelecidos. Com relação ao nível de tensão em regime permanente identificou-se picos de até 234,2 V e decréscimo de tensão igual a 218,5 V, porém a maioria das amostras comportaram-se na faixa de tensão adequada. Tratando-se do comportamento das distorções harmônicas de tensão, observou-se que os valores estão dentro da normalidade, conforme prescrito no Módulo 8 do PRO-DIST. Quanto ao comportamento do fator de potência é notado baixos valores em diversas medições, isso em detrimento do sistema funcionar com inversores sobredimensionados.

Estudos realizados por Pelágio (2014) e Faria (2016), analisaram a viabilidade técnico-econômica da implantação de Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) no Instituto Federal de Goiás Campus Goiânia, e mostraram-se preocupados com os problemas relacionados a qualidade da energia, sugerindo então como trabalho futuro “Analisar o impacto causado pela instalação de cargas não lineares (Led, inversores) no sistema elétrico que abastece o IFG Campus Goiânia”.

O estado da arte mostra que realizar medições com o objetivo de investigar a qualidade da energia elétrica é uma preocupação notória, inclusive uma exigência normativa. Vários estudos evidenciam problemas relacionados com a qualidade da energia elétrica, como: variação de frequência, distorções harmônicas de corrente e tensão, baixo fator de potência em função de elevada potência reativa, desequilíbrio de cargas dos transformadores, dentre outros aspectos, que comprometem o funcionamento adequado nas instalações elétricas dos consumidores.

De modo geral, os estudos apresentados buscam a identificação e a forma de se mitigar esses problemas, investigando o comportamento do sistema elétrico de consumidores, desde de uma Usina Solar Fotovoltaica de 1 MVA até instituições de ensino que não apresentam SFCR; portanto, esses estudos não vislumbram a análise da situação antes e após a implantação de Projeto de Eficiência Energética. Por isso, a proposta desse trabalho é apresentar um estudo de caso, onde utilizará um método consolidado na literatura, que permita avaliar a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) antes, durante e após a implementação do Projeto de Eficiência Energética.

Diante da problemática apresentada, formula-se a hipótese principal deste trabalho: se é possível realizar campanha de medições que permita quantificar os níveis de distorções harmônicas de tensão e corrente, fator de potência, variação de frequência, desequilíbrio de tensão

e tensão em regime permanente, aspectos determinantes na qualidade da energia elétrica, logo é factível identificar as causas e propor medidas para mitigar possíveis danos causados nas instalações elétricas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG) Campus Goiânia, em decorrência da efficientização do sistema de iluminação e a implantação do Sistema Fotovoltaico.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho consiste em realizar um estudo de caso com a utilização de método consolidado na literatura, que possibilite avaliar a qualidade da energia elétrica antes, durante e após a implantação de projeto de eficiência energética.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Além disso, a proposta deste trabalho permitirá:

- a) contextualizar os objetivos e a fundamentação dos aspectos da qualidade da energia elétrica;
- b) apresentar as diretrizes referente a legislação vigente, conforme os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica – PRODIST e a Norma IEEE 519 – 2014, para realizar medição da qualidade da energia elétrica;
- c) caracterizar o nível de tensão em regime permanente, fator de potência, distorções harmônicas de tensão e corrente, desequilíbrio de tensão e variação de frequência antes, durante e após a implantação do projeto de eficiência energética;
- d) realizar análise da qualidade da energia elétrica, onde permita identificar as causas e propor as soluções para mitigar possíveis danos causados nas instalações elétricas da edificação em estudo.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para o alcance dos objetivos supracitados, os próximos capítulos desta dissertação estão organizados conforme descritos a seguir:

- a) o Capítulo 2 aborda os fenômenos da qualidade do produto, quanto a conceituação, normatização, origens, consequências e sugestões para mitigação;
- b) o Capítulo 3 descreve a metodologia, onde define os fenômenos da qualidade do produto a serem analisados, define pontos de monitoramento, estabelece o instrumento

adequado para realizar as medições e as grandezas a serem medidas. Além de mostrar como analisar as medições e propor soluções para mitigar possíveis danos causados a qualidade da energia elétrica;

- c) o Capítulo 4 mostra as instalações físicas do local do estudo de caso, características elétricas da subestação, pontos de medições e ainda descreve o sistema de iluminação e o sistema fotovoltaico;
- d) o Capítulo 5 apresenta e discute os resultados referente aos fenômenos da qualidade do produto (tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão e variação de frequência) decorrente das campanhas de medições realizadas antes da implantação do projeto de eficiência energética, após a efficientização do sistema de iluminação e por fim a implantação do sistema fotovoltaico;
- e) o Capítulo 6 apresenta as conclusões em relação à pesquisa desenvolvida, contribuição do trabalho e recomendações para trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas, o apêndice e o anexo da pesquisa.

2 ASPECTOS DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Esse capítulo aborda os fenômenos da qualidade do produto, quanto à conceituação, normatização, origens, consequências e sugestões para mitigação.

2.1 FENÔMENOS DA QUALIDADE DO PRODUTO: CONCEITUAÇÃO E NORMATIZAÇÃO

Quanto a normatização da qualidade da energia elétrica no Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), estabelece algumas diretrizes, com o intuito de orientar consumidores e concessionárias. Através dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) no seu Módulo 8, a ANEEL aborda os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, onde trata da qualidade do produto, qualidade do serviço prestado e a qualidade do tratamento de reclamações.

Para o estudo da qualidade do produto, aspecto fundamental para análise da QEE, faz necessário conhecer os fenômenos da qualidade do produto em regime permanente ou transitório, que são mostrados 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).

Para um melhor entendimento, alguns dos fenômenos da qualidade do produto são tratados nas seções a seguir, quanto à definição, normatização, origens, consequências e sugestões para mitigação.

2.1.1 Tensão em regime permanente

De forma geral, todas as cargas elétricas são projetadas para funcionarem em determinado nível de tensão. Essas cargas operando em uma tensão fora de limites aceitáveis, poderá afetar o seu funcionamento, reduzir a vida útil, dentre outros aspectos. Por esses motivos, a

tensão deve ser mantida dentro dos limites aceitáveis, assim não comprometendo o funcionamento correto dessas cargas (ROCHA,2016).

Pautado nessa preocupação, a seção 2 do Módulo 8 do PRODIST estabelece os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente, os indicadores de conformidade de tensão elétrica, os critérios de medição e de registro que são abordados nas seções a seguir.

A tensão de atendimento associada às leituras deve ser classificada segundo faixas em torno da tensão de referência (TR), conforme Figura 2.1.

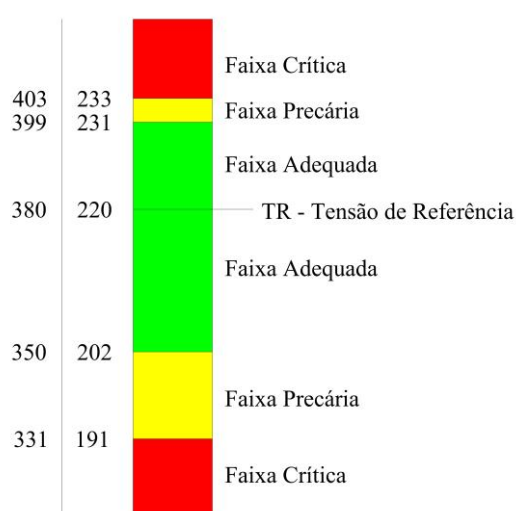


Figura 2.1 – Faixas de tensão em relação à de referência.

Fonte: Adaptado de ANEEL (2018).

Os valores de tensão obtidos por medições devem ser 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).

Para análise da tensão de atendimento em relação a faixa de tensão adequada, precária e crítica, utiliza-se a Tabela 2.2, onde estabelece faixas para tensões em regime permanente, igual ou inferior a 1 kV e tensão de referência nos secundários dos transformadores igual a 380 V entre fases (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).

Nas situações em que o ponto de conexão seja superior a 1 kV e inferior a 69 kV, deve-se utilizar as recomendações da Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Ponto de conexão em tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV.

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93 TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90 TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90 TR$ ou $TL > 1,05TR$

Fonte: ANEEL (2018).

Quanto aos procedimentos de medições, deve-se observar que o conjunto de leituras para gerar os indicadores individuais deve compreender o registro de 1008 (mil e oito) leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos, isto é, com período de integralização de 10 minutos, totalizando sete dias consecutivos (ANEEL, 2018).

Munido das leituras válidas, devem ser obtidos o índice de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) e o para tensão crítica (DRC), de acordo com as expressões (2.1) e (2.2):

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

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

onde

nlp é o número de leituras situadas na faixa precária;

nlc é o número de leituras situadas nas faixa crítica;

nlv é o número de leituras válidas.

O limite máximo a ser observado para o DRP foi estabelecido em 3% (três por cento) e o limite máximo a ser observado para o DRC foi estabelecido em 0,5% (cinco décimos por cento). Na ocorrência da transgressão dos indicadores DRP ou DRC haverá compensação financeira da distribuidora junto aos consumidores, onde o valor da compensação será creditado na fatura do consumidor.

2.1.2 Fator de potência

O fator de potência pode ser definido como um indicador determinado pela relação entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S), consumidas por um equipamento, máquina, dentre outras cargas; desde que as formas de ondas de tensão e corrente sejam periódicas (DECKMANN e POMILIO, 2018).

O valor do fator de potência (FP), deve ser calculado a partir dos valores registrados das potências ativa e reativa (P e Q), utilizando-se da expressão (2.3) (ANEEL,2018):

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

onde

P é a potência ativa (W);

Q é a potência reativa (VAR);

S é a potência aparente (VA).

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

O descumprimento desses valores, conforme estabelecidas nos arts. 96 e 97 da Resolução Normativa 414/2010, acarretará em cobranças a serem adicionadas ao faturamento regular de unidades consumidoras do grupo A¹ (ANEEL, 2010).

Normalmente, a redução do fator de potência é ocasionada pela operação de cargas indutivas ou capacitivas como transformadores, motores de indução e geradores e cargas não-lineares como computadores e retificadores industriais. O baixo fator de potência é causado não apenas pelo o aumento da defasagem angular entre tensão e corrente, mas também pela presença de componentes harmônicas nas formas de onda da tensão e corrente (MARTINS et al., 2012).

A correção do baixo fator de potência é importante na instalação elétrica, pois propicia a redução do aquecimento nos condutores, elevação da vida útil dos equipamentos, melhor aproveitamento da energia elétrica para geração de trabalho útil, evita acréscimo na fatura de energia junto a concessionária, dentre outros aspectos (COPEL, 2020).

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

Geralmente, a solução mais aplicada para a correção de baixos fatores de potência, consiste na instalação de bancos de capacitores, e por se tratar de um sistema de compensação mais simples e econômico.

Outras ações para corrigir o baixo fator de potência em instalações consistem em dimensionar corretamente máquinas, motores e equipamentos; operar os equipamentos de forma correta; contratar profissionais qualificados quanto ao estudo da correção do fator de potência, dentre outros (CHESP, 2020).

2.1.3 Harmônicos

Segundo Bonatto (1999), em um sistema elétrico trifásico ideal, o comportamento do sinal de corrente e tensão deve apresentar de maneira invariável, perfeitamente senoidais, equilibradas entre fases e com frequência e amplitude constantes. Qualquer alteração desse comportamento é apontada como distúrbio.

De acordo com o Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2018) as distorções harmônicas são definidas como as deformações ocorridas nas tensões e correntes, em suas formas de onda, em relação à onda senoidal da frequência fundamental. A Figura 2.2 mostra uma forma de onda distorcida.

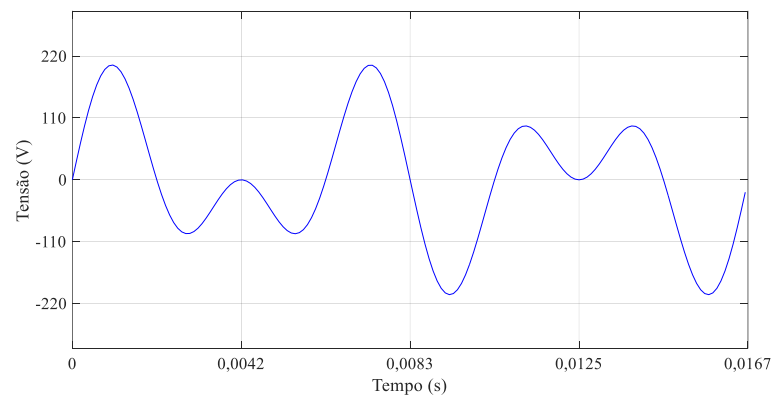


Figura 2.2 – Forma de onda distorcida.

Fonte: Autor.

Segundo Resende (2010) e Paulillo e Teixeira (2013a), a *série de Fourier* é uma ferramenta matemática muito aplicada para a análise das distorções harmônicas presentes na tensão e corrente elétrica, onde uma onda periódica e distorcida (função periódica) é representada por uma soma de ondas senoidais puras com frequências múltiplas da fundamental. Essa ferramenta

permite que cada componente possa ser analisada separadamente e a distorção resultante é estabelecida pela superposição das várias componentes constituintes do sinal distorcido.

Desta forma, dada uma função periódica $f(t)$ pode ser decomposta da seguinte forma:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cdot \cos.(h \cdot \omega_1 \cdot t) + b_h \cdot \text{sen.}(h \cdot \omega_1 \cdot t)] \quad (2.4)$$

onde

a_0 é a componente contínua;

a_h e b_h são as amplitudes ou valor de pico da componente de ordem h da série;

h é a ordem harmônica;

ω_1 é a frequência angular fundamental de $f(t)$.

O valor da frequência angular (ω_1) é dada por:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega_1}{2 \cdot \pi} \Rightarrow \omega_1 = \frac{2 \cdot \pi}{T} \quad (2.5)$$

onde

f é a frequência (Hz);

T é o período (segundos);

ω_1 é a frequência angular fundamental (rad/s).

A Figura 2.3 ilustra a decomposição de uma onda distorcida em uma série de senóides, onde observa-se que a contribuição de todas as distorções harmônicas individuais presente em uma instalação elétrica se sobrepõem a onda da frequência fundamental e ocasiona a distorção.

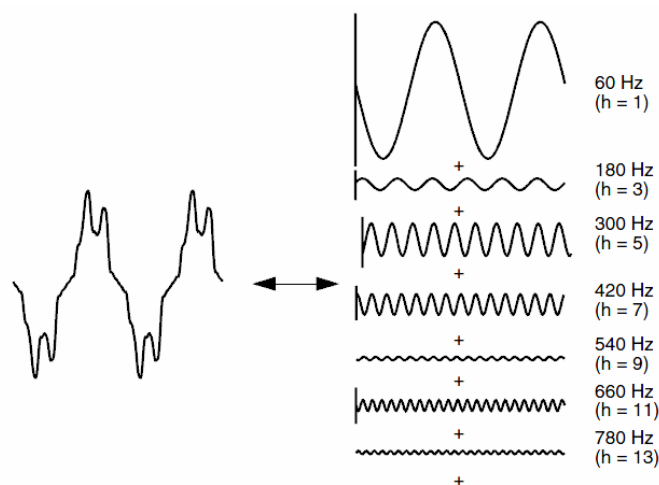


Figura 2.3 – Decomposição de uma onda distorcida em uma série de senóides.

Fonte: DUGAN et al. (2004).

Outra maneira de mostrar uma forma de onda periódica, não senoidal e algumas de suas componentes harmônicas é por meio do seu espectro harmônico, conforme ilustrado na Figura 2.4. Observa-se que ocorre uma distorção harmônica de terceira ordem na corrente igual a 10,59%, uma distorção harmônica de quinta ordem na corrente igual a 6,12%, na sétima igual a 4,19%, na nona igual a 2,74%, na décima primeira igual a 1,94% e na décima terceira igual a 1,21%, isso, em relação à amplitude da corrente fundamental.

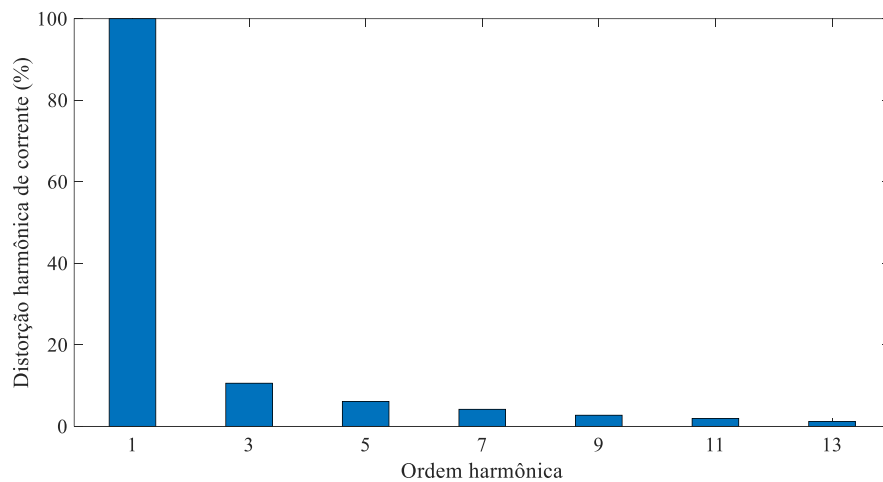


Figura 2.4 – Distorções harmônicas individuais de corrente.

Fonte: Autor.

De acordo com a Norma IEEE Std 519 (2014), compete tanto aos usuários finais, quanto aos fornecedores de energia elétrica, o monitoramento de harmônicos de tensões e corrente elétrica em um sistema de energia.

Pautado nessa preocupação e com o propósito de avaliar a distorção harmônica das instalações elétricas, foram estabelecidos indicadores, em conformidade com as regulamentações nacional e internacional, que são apresentados a seguir.

2.2.3.1 Distorções harmônicas de tensão

Inicialmente, será abordada a visão das normas de âmbito nacional, especificamente as descrições do Módulo 8 do PRODIST a respeito dos limites harmônicos para tensão. Na Tabela 2.4 é apresentada a terminologia utilizada na determinação das distorções harmônicas de tensão, segundo o Módulo 8 do PRODIST.

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	$DTT_p\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTT_i\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DTT_3\%$
Tensão harmônica de ordem h	V_h
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	$h_{m\acute{a}x}$
Ordem harmônica mínima	$h_{m\acute{i}n}$
Tensão fundamental medida	V_1
Valor do indicador $DTT\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{95\%}$
Valor do indicador $DTT_p\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{p95\%}$
Valor do indicador $DTT_i\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{i95\%}$
Valor do indicador $DTT_3\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{395\%}$

Fonte: ANEEL (2018).

De acordo com o Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2018), a determinação dos valores das grandezas $DIT_h\%$, $DTT\%$, $DTT_p\%$, $DTT_i\%$ e $DTT_3\%$ são obtidos através das expressões (2.6) a (2.10):

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

onde

h é a ordem harmônica individual;

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{m\acute{a}x}} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (2.7)$$

onde

h são todas as ordens harmônicas de 2 até $h_{m\acute{a}x}$;

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

onde:

h são todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3 ($h = 2, 4, 8, 10, 14, 16, 20, 22, 26, 28, 32, 34, 38, \dots$);

h_p é a máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3;

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

onde

h são todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3 ($h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37, \dots$);

h_i é a máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3;

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

onde

h são todas as ordens harmônicas múltiplas de 3; ($h = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39, \dots$);

h_3 é a máxima ordem harmônica múltipla de 3.

Os limites das distorções harmônicas de tensão, são apresentados na Tabela 2.5, onde são especificados utilizando o percentil de conformidade de 95%, isto é, admite-se que os limites sejam ultrapassados em 5% das 1008 amostras coletadas ou 95% das amostras estão em conformidade.

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

Indicador	Tensão nominal		
	$V_N \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_N < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_N < 230 \text{ kV}$
DTT95%	10,0%	8,0%	5,0%
DTT _p 95%	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _i 95%	7,5%	6,0%	4,0%
DTT ₃ 95%	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: ANEEL (2018).

Já a Norma IEEE Std 519 (2014), estabelece que no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), os proprietários ou operadores do sistema devem limitar os harmônicos de tensão fase-neutro da seguinte forma:

- a) **avaliação diária:** refere-se à avaliação da medição de “tempo muito curto”, nesse caso medições com intervalos de 3 segundos, considerando o percentil 99², onde os valores devem ser inferiores a 1,5 vezes os indicados na Tabela 2.6;
- b) **avaliação semanal:** refere-se à avaliação da medição de “tempo curto”, nesse caso intervalos entre leituras de 10 minutos, totalizando 1008 amostras válidas no decorrer de sete dias consecutivos, utilizando o percentil 95³, onde os valores devem ser menores do que os apresentados na Tabela 2.6.

Observa-se que a Tabela 2.6 apresenta algumas divergências de limites com relação as recomendações da ANEEL, onde os valores da ANEEL são mais elevados do que os estabelecidos pelo IEEE.

Tabela 2.6 – Limites de distorção harmônica de tensão.

Tensão no barramento do PAC	Harmônico Individual (%)	Distorção Harmônica Total de Tensão – DTT (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5,0	8,0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < V$	1,0	1,5

Fonte: Adaptado de IEEE (2014).

2.2.3.2 Distorções harmônicas de corrente

Em geral, as normas e resoluções nacionais não descrevem limites de distorções harmônicas de corrente para unidades consumidoras; entretanto a Norma IEEE Std 519 estabelece limites harmônicos tanto para tensão, quanto para corrente.

Tratando-se especificamente dos limites harmônicos da corrente, inicialmente é necessário determinar a distorção harmônica individual de corrente DHI-I % e a distorção harmônica total de corrente DHT-I %, que são obtidos através das expressões (2.11) e (2.12):

$$\text{DHI} - \text{I} \% = \frac{I_h}{I_1} \cdot 100 \quad (2.11)$$

² percentil 99: A grandeza está em conformidade com o estabelecido se 99% das amostras estiverem abaixo do limite, onde o número total de amostras serão 1008.

³ percentil 95: A grandeza está em conformidade com o estabelecido se 95% das amostras estiverem abaixo do limite, onde o número total de amostras serão 1008.

$$\text{DHT} - I \% = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{\text{máx.}}} I_h^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (2.12)$$

onde

I_h corrente harmônica de ordem h ;

I_1 corrente fundamental medida;

h ordem harmônica;

$h_{\text{máx.}}$ ordem harmônica máxima.

Posteriormente é necessário determinar a relação entre I_{CC}/I_L , isto é, a corrente de curto-circuito (I_{CC}) no PAC (Ponto de Acoplamento Comum) dividida pela corrente de demanda da carga (I_L). A corrente de demanda da carga (I_L) é obtida através da soma das correntes (componente fundamental) correspondente a demanda máxima durante cada um dos doze meses anteriores dividido por 12 (IEEE, 2014). A corrente de curto-circuito (I_{CC}) normalmente é obtida através de solicitação junto a concessionária de energia elétrica local. De acordo com Leão et al. (2014), quando o valor de I_L não é conhecido, pode ser estimado a partir da corrente de plena carga do transformador como aproximação da corrente de demanda máxima.

Após definido o valor de I_{CC}/I_L , a Norma IEEE Std 519, 2014, apresenta as maneiras de como avaliar as medições, seja diária ou semanal e em seguida mostra a Tabela 2.7, que estabelece os limites de distorção harmônica de corrente para sistemas de 120 V a 69 kV, conforme:

- a) **avaliação diária:** refere-se à avaliação da medição de “tempo muito curto”, nesse caso medições com intervalos de 3 segundos, considerando o percentil 99, onde os valores devem ser acumulados ao longo de um dia e esses valores devem ser inferiores a 2 vezes os indicados na Tabela 2.7;
- b) **avaliação semanal:** refere-se à avaliação da medição de “tempo curto”, com intervalos entre leituras de 10 minutos, utilizando o percentil 99, onde os valores devem ser acumulados por uma semana e esses valores devem ser inferiores do que 1,5 vezes os valores dados na Tabela 2.7;
- c) **avaliação mensal:** refere-se à avaliação da medição de “tempo longo”, nesse caso com intervalos entre leituras de 10 minutos, utilizando o percentil 95, onde os valores devem ser acumulados por uma semana e esses valores devem ser menores do que os apresentados na Tabela 2.7.

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

Distorção harmônica máxima de corrente em porcentagem de I_L						
Ordem harmônica individual (harmônicos 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
$< 20^c$	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
$20 < 50$	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
$50 < 100$	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
$100 < 1000$	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

^a Harmônicas pares são limitadas a 25% dos limites de harmônicos ímpares acima.

^b Distorções de corrente que resultam em um deslocamento cc, por exemplo, conversores de meia onda, não são permitidas.

^c Todo equipamento de geração de energia é limitado a esses valores de distorção de corrente, independentemente do I_{CC}/I_L real. Onde:

I_{CC} = Corrente máxima de curto circuito no PAC.

I_L = Corrente de carga de demanda máxima (componente de frequência fundamental) no PAC sob condições normais de operação de carga

DDT = Distorção de demanda total.

Fonte: Adaptado de IEEE (2014).

Na Tabela 2.7 são apresentados os limites de distorções harmônicas de corrente total e individual e constata-se que à medida que aumenta a relação entre a corrente de curto-circuito e a corrente de demanda da carga, ocorre um aumento no limite de distorção harmônica.

2.2.3.3 Mitigação das distorções harmônicas de tensão e corrente.

Diante da crescente aplicação das cargas não lineares e seus efeitos prejudiciais para as instalações elétricas em geral, torna-se necessário adotar medidas que permita reduzir as distorções harmônicas.

De acordo com Dugan et al. (2004) e Leão et al. (2014) as distorções harmônicas estão presentes em todo o sistema de potência e devem ser mitigados quando ultrapassam os limites normatizados. Existem várias alternativas para mitigação de harmônicos, porém em função das diversidades dos problemas apresentados nos consumidores ou na rede elétrica, algumas soluções não são recomendadas. Dentre as propostas de atenuar os harmônicos, as alternativas mais comuns são:

- a) reduzir as correntes harmônicas em conversores de potência, capacitores, geradores e transformadores;
- b) modificar a resposta de frequência do sistema, aplicando filtros, capacitores ou indutores.

2.1.4 Desequilíbrio de tensão

Um sistema elétrico trifásico equilibrado apresenta tensões iguais em módulo e defasagem angular entre fases de 120° elétricos. Dessa forma, um sistema equilibrado, com sequência de fases direta (sequência ABC), é representado conforme as expressões (2.13) a (2.15).

$$\bar{V}_A = V_A \angle 0^\circ \quad (2.13)$$

$$\bar{V}_B = V_B \angle -120^\circ \quad (2.14)$$

$$\bar{V}_C = V_C \angle 120^\circ \quad (2.15)$$

onde:

\bar{V}_A , \bar{V}_B e \bar{V}_C são os fasores de tensão das fases A, B e C, respectivamente;

V_A , V_B e V_C são os módulos das tensões das fases A, B e C, respectivamente.

Desse modo, define-se desequilíbrio de tensão em um sistema elétrico trifásico como uma condição na qual as três fases apresentam diferentes valores de tensão em módulo ou defasagem angular entre fases diferente de 120° elétricos ou, ainda, as duas condições (ANEEL, 2018). A Figura 2.5 apresenta um sistema trifásico desequilibrado, onde é identificado diferentes valores de tensão em módulo entre as fases.

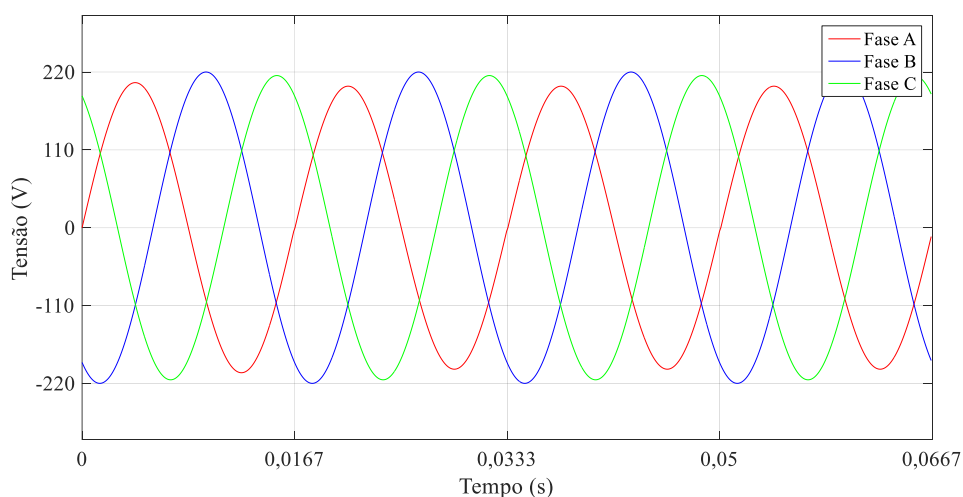


Figura 2.5 – Desequilíbrio de tensão.

Fonte: Autor.

O desequilíbrio de tensão é obtido através da expressão (2.16):

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100 \quad (2.16)$$

onde

FD é o fator de desequilíbrio de tensão;

V_- é a magnitude da tensão eficaz de sequência negativa – frequência fundamental;

V_+ é a magnitude da tensão eficaz de sequência positiva – frequência fundamental.

Alternativamente, pode-se utilizar as expressões (2.17) e (2.18), que conduz a resultados em consonância com a expressão (2.16):

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (2.17)$$

sendo

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (2.18)$$

onde

FD é o fator de desequilíbrio de tensão;

V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} são as magnitudes das tensões eficazes de linha – frequência fundamental.

A Tabela 2.8 apresenta a seguir os limites para o indicador de desequilíbrio de tensão.

Tabela 2.8 – Limites para os desequilíbrios de tensão.

Indicador	Tensão nominal	
	$V_N \leq 1,0 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_N < 230 \text{ kV}$
FD95%	3,0 %	2,0 %

Fonte: ANEEL (2018).

Segundo Matos (2012), dois aspectos são responsáveis pelo desequilíbrio de tensão, o primeiro compete a carga instalada e o outro a estrutura da rede elétrica. De acordo com Arão (2014), o desequilíbrio de tensão relacionado com a carga, em geral é oriundo da distribuição desigual de cargas nas três fases, causado pela presença de cargas trifásicas desequilibradas, pela distribuição inadequada de cargas monofásicas ou ainda pela variação de demanda de cada fase. Outro fator que contribui no desequilíbrio de tensão origina-se da assimetria da rede elétrica no nível de transmissão e de distribuição.

Os altos níveis de desequilíbrio de tensão provocam consequências danosas, como perdas excessivas, sobreaquecimento, solicitação do isolamento e redução da vida útil de motores

e transformadores. Ainda pode ocorrer a circulação de correntes harmônicas não características, tornando mais difícil a solução do problema (FERREIRA FILHO, 2008).

2.1.5 Variação de frequência

Em condições ideais a frequência seria a mesma em todo o sistema elétrico, porém na prática esse comportamento não ocorre. De acordo com Deckmann e Pomilio (2018) as variações de frequência são justificadas pelos frequentes desequilíbrios temporários que ocorrem entre a geração e a demanda, implicando assim nas variações da velocidade de geradores e turbinas, que por princípio funcionam em sincronismo. Com o equilíbrio entre geração e consumo de energia, independente da distância geográfica, as variações da frequência diminuem.

Mesmo considerando a variação da frequência da rede um indicador da qualidade da energia elétrica menos preocupante, se faz necessário monitorar e controlar o equilíbrio entre geração e consumo de energia.

Diante do exposto, o Módulo 8 do PRODIST estabelece que em condições normais de operação e em regime permanente, as instalações de geração conectadas junto ao sistema de distribuição devem apresentar valores de frequência entre 59,9 Hz a 60,1 Hz. Quanto à questão da presença de distúrbio no sistema de distribuição, o tempo tolerável para que a geração retorne para a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz deverá ser 30 (trinta) segundos (ANEEL, 2018).

Caso seja necessário realizar corte de geração ou de carga, caberá observar as prescrições da Tabela 2.9, que apresenta a variação da frequência permitida em função do tempo máximo de interrupção. É importante ressaltar que a Tabela 2.9 estabelece apenas limites de tempo para recuperação do equilíbrio carga-geração em função da variação da frequência e inobserva-se a quantidade máxima permitida de ocorrência do desvio 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).

2.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou informações referentes aos aspectos da qualidade da energia elétrica. Estes conhecimentos são fundamentais para a compreensão da metodologia e dos resultados apresentados nesse trabalho. O próximo capítulo apresenta a metodologia.

3 METODOLOGIA

Esse capítulo apresenta a metodologia, onde classifica a pesquisa, define os fenômenos da qualidade do produto a serem analisados, estabelece os pontos de monitoramento, o instrumento adequado para realizar as medições, as grandezas a serem medidas e os critérios para análise das medições.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Quanto à natureza, esta pesquisa é classificada como aplicada, pois tem o objetivo de gerar conhecimento para aplicação prática, onde propicia solução de problemas referente à qualidade da energia elétrica, assunto comum aos diversos consumidores de energia elétrica.

Do ponto de vista da forma de abordagem do problema é classificada como Pesquisa Quantitativa, pois mensurará o quanto a efficientização do sistema de iluminação e a implantação do SFV influenciará na qualidade da energia elétrica das instalações elétricas em estudo.

Quanto aos procedimentos técnicos, segundo Gil (2002) essa pesquisa é definida como Estudo de Caso, pois consiste no estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos de maneira que se permita o seu amplo e detalhado conhecimento.

3.2 METODOLOGIA

A metodologia é apresentada de forma sumarizada na Figura 3.1, onde mostra a sequência das ações a serem tomadas quanto à realização da análise da qualidade do produto, vislumbrando obter resultados antes da implantação do projeto de eficiência energética, após a efficientização do sistema de iluminação, após a implantação do sistema fotovoltaico e, por fim, elaborar um relatório contendo a descrição da proposta de melhoria, quanto à possíveis danos causados nas instalações elétricas do local de estudo.

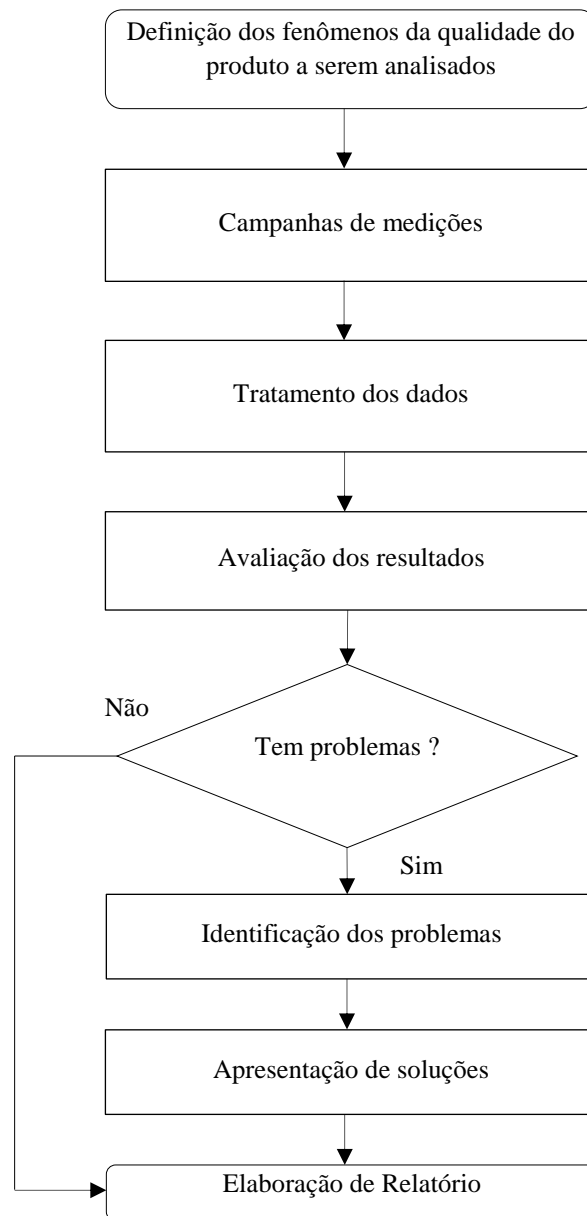


Figura 3.1 – Fluxograma da Metodologia.

Fonte: Autor.

Nas seções 3.2.1 a 3.2.5 são descritas cada fase da metodologia.

3.2.1 Definição dos fenômenos da qualidade do produto a serem analisados

O primeiro passo é a definição dos fenômenos da qualidade do produto, que são:

- a) tensão em regime permanente;
- b) fator de potência;
- c) harmônicos;

- d) desequilíbrio de tensão;
- e) variação de frequência.

3.2.2 Campanhas de medições

Com o objetivo de realizar monitoramento para contemplar todas as etapas do projeto de eficiência energética serão realizadas três campanhas de medições, onde a primeira obterá resultados antes da implantação do projeto de eficiência energética, a segunda obterá resultados após a substituição do sistema de iluminação e, por fim a terceira campanha obterá resultados de todas as cargas do local de estudo e ainda o sistema fotovoltaico, desta forma contemplando todas as etapas do projeto de eficiência energética.

Para realizar a campanha de medições são definidos os pontos de monitoramento, o instrumento adequado para realizar as medições e as grandezas a serem medidas, que são apresentados a seguir.

3.2.2.1 Requisito do instrumento e critérios de medição

Na campanha de medições são utilizados instrumentos e critérios de medição em conformidade com as recomendações do Módulo 8 do PRODIST e a normas IEC 61000-4-30, descritos a seguir:

- a) o instrumento deve operar de acordo com o princípio da amostragem digital;
- b) na medição de todos os fenômenos da qualidade do produto, utilizar um único instrumento;
- c) o conjunto de medições para gerar os indicadores da qualidade do produto deve apresentar um total de 1008 (mil e oito) leituras válidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada. As leituras eventualmente expurgadas são substituídas;
- d) o método de medição utilizado é de Classe A⁴ ou S⁵, conforme norma vigente da IEC 61000-4-30;

⁴ 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).

⁵ 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).

- e) a medição das distorções harmônicas compreende desde a componente fundamental até pelo menos a 40ª ordem harmônica.

O Módulo 8 do PRODIST estabelece apenas para tensão em regime permanente, distorções harmônicas, desequilíbrio de tensão e flutuação de tensão, o registro de 1008 (mil e oito) leituras válidas obtidas, com intervalos de 10 minutos entre as medições, entretanto são realizados os mesmos critérios para os outros fenômenos, permitindo assim uma padronização nas medições.

A definição dos pontos de instalação do equipamento de medição, para monitoramento do consumidor obedecerá às prescrições do Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2018), que são:

- a) instalação do equipamento de medição para monitoramento, que poderá ser realizada no lado secundário do transformador de potência, quando as unidades consumidoras apresentarem medição para fins de faturamento realizadas por medidores lacrados, denominados encapsulados, cujos circuitos de corrente e de tensão não sejam acessíveis;
- b) instalação do equipamento de medição, que poderá ser realizada no ponto de derivação da rede da distribuidora com o ramal de ligação do acessante, quando a instalação do equipamento de medição no ponto de conexão vier a comprometer a segurança do equipamento e de pessoas, ou apresentar impossibilidade técnica;
- c) instalação do equipamento de medição, que poderá ser realizada no ponto de conexão do usuário, nesse caso, no primário dos transformadores, especificamente no transformador de corrente – TC e transformador de potencial – TP, em virtude das características elétricas do instrumento de medição.

A Figura 3.2 apresenta o esquema de instalação do instrumento de medição no secundário dos transformadores, topologia de medição em estrela com neutro aterrado, conforme recomendado no Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2018), onde diz que as medições devem corresponder ao tipo de ligação do acessante, abrangendo medições entre todas as fases, neutro e o aterramento (proteção) fornecidos no ponto de conexão. Além da topologia em estrela com neutro aterrado, outras formas de conexões poderão ser adotadas, conforme a disposição do circuito (FURTADO et al., 2021).

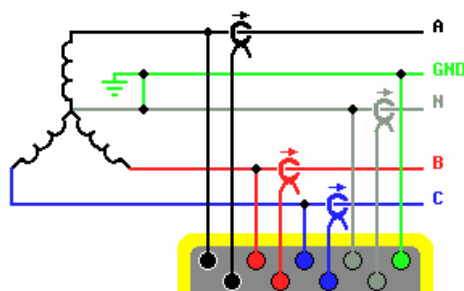


Figura 3.2 – Topologia de medição 3 fases, 1 neutro, 1 proteção em estrela do instrumento.

Fonte: FLUKE (2012).

3.2.2.2 Grandezas monitoradas

Durante a campanha de medição são monitoradas algumas grandezas, conforme descritos a seguir:

- a) corrente e tensão elétrica;
- b) distorção harmônica de corrente e tensão;
- c) fator de potência;
- d) frequência.

3.2.3 Tratamento dos dados

Com a obtenção das medições realizadas nos pontos estabelecidos na seção 3.2.2.1 (Requisito do instrumento e critérios de medição), esses dados são tratados, conforme apresentado de forma sumarizada na Figura 3.3.

Inicialmente realizar o *download* dos dados registrados no analisador de energia junto ao computador, com auxílio do *software* utilizado pelo instrumento. 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 (período de agregação) de 10 minutos, totalizando o registro de 7 dias consecutivos.

Posteriormente com auxílio de *software* matemático e expressões, gerar gráficos e tabelas relativo aos níveis de tensão em regime permanente da tensão eficaz entre fases, fase e neutro, fator de potência total e fator de potência nas fases A, B e C, distorções harmônicas totais e individuais de tensões e correntes nas fases A, B e C, desequilíbrio de tensão e variação de frequência.

E por fim, analisar os resultados, de acordo com os limites estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST e da Norma IEEE Std 519, 2014.

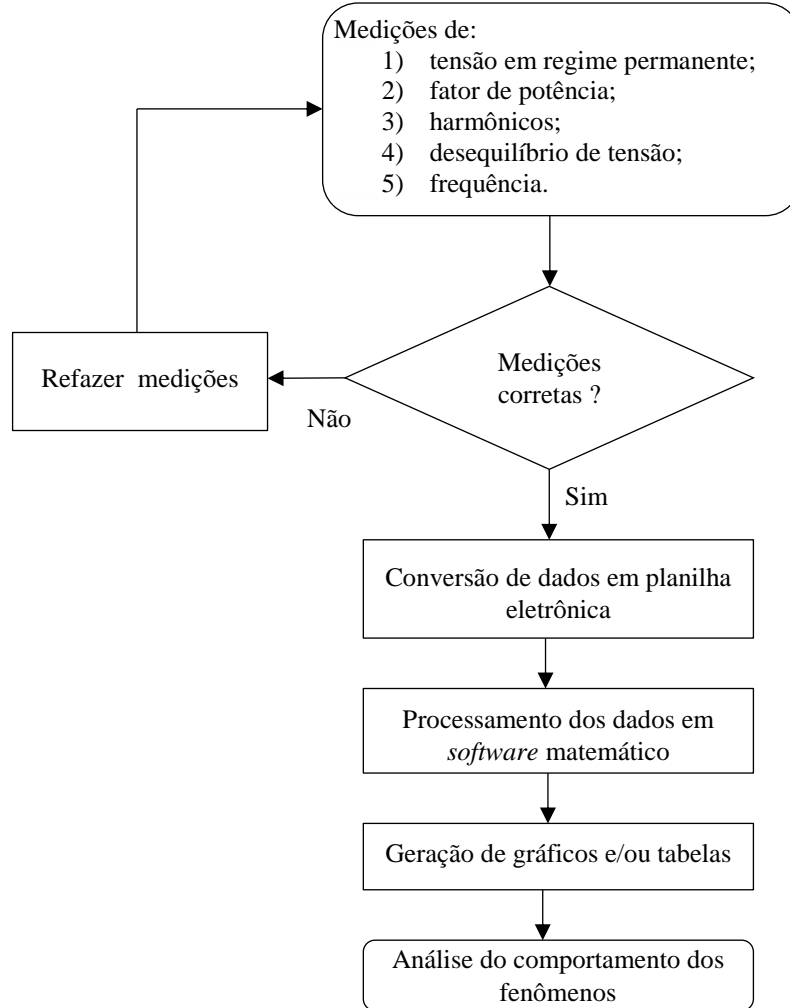


Figura 3.3 – Descrição do tratamento dos dados.

Fonte: Autor.

3.2.4 Avaliação dos resultados

Nesse tópico são abordados os critérios de avaliação dos resultados, diante do tratamento dos dados realizado na seção anterior.

Quanto à tensão em regime permanente são avaliados os valores de DRP – Duração relativa da transgressão de tensão precária e DRC – Duração relativa da transgressão de tensão crítica. Dentre as 1008 amostras válidas o valor de DRP máximo será de 3% e o de DRC em 0,5%. Caso esses índices excedam os limites estabelecidos, haverá compensação da concessionária junto aos consumidores.

Referente ao fator de potência, é avaliado o número de amostras que não estão compreendidos entre 0,92 e 1,00, caso os valores contrariem os limites estabelecidos é necessário tomar algumas medidas preventivas que é abordado na seção 3.2.5, pois o consumidor será penalizado através de multa.

Para avaliar as distorções harmônicas de tensão, inicialmente é necessário observar o percentil de conformidade, que nessa situação é 95%, para distorções harmônicas totais e individuais de tensão; isto é, dentre 1008 amostras, 95% devem estar em conformidade. Depois verificar a tensão nominal (V_N) em que se enquadra o consumidor, que pode ser V_N menor ou igual a 1,0 kV, V_N maior que 1,0 kV e menor que 69 kV, ou V_N maior ou igual a 69 kV e menor que 230 kV. Após, definir a tensão nominal, identificar a quantidade de amostras dentro da normalidade ou que excederam os limites das distorções harmônicas das componentes individual e total definido na Tabela 2.5 do Módulo 8 do PRODIST. Caso o número de amostras apresente valores acima de 5% dentre às 1008 leituras, as tratativas são abordadas na seção 3.2.5.

Na avaliação das distorções harmônicas de corrente é necessário identificar a relação entre corrente de curto-circuito (I_{CC}) e a corrente média anual de demanda máxima (I_L). Com esse valor, verificar em que situação enquadra-se o consumidor quanto a relações (I_{CC}/I_L) e em seguida define-se os limites permitidos de distorções harmônicas para as componentes individuais e total. E por fim avalia-se o número de amostras que ultrapassaram os valores estabelecidos e se tais índices comprometem o funcionamento da rede quanto à injeção de conteúdo harmônico.

Quanto à avaliação do desequilíbrio de tensão, deve-se identificar a tensão nominal (V_N) em que se enquadra o consumidor, que poderá ser V_N menor ou igual a 1,0 kV, ou V_N maior que 1 kV e menor que 230 kV. Munido da tensão nominal, identifica-se o número de amostras que ultrapassaram os índices estabelecidos, e avalia-se se tais índices comprometem o funcionamento do sistema quanto ao desequilíbrio de tensão.

No estudo da variação de frequência inicialmente é necessário identificar o número de amostras que excederam o intervalo das condições normais de operação e avaliar se tais índices comprometem o funcionamento do sistema quanto a oscilação de frequência.

3.2.5 Identificação dos problemas, apresentação de soluções e elaboração de relatório.

Com a avaliação dos resultados realizada na seção 3.2.4 é possível identificar os problemas e apresentar soluções.

Ao identificar problemas pertinentes a baixo fator de potência, balizado em valores medidos, propõe-se então medida preventiva, que poderá ser a instalação de banco de capacitores. Outras ações que podem ser realizadas para corrigir o baixo fator de potência, consistem em desligar cargas indutivas ociosas, verificar e corrigir a utilização de motores superdimensionados ou operando em vazio, transformadores operando em vazio ou com carga muito abaixo do previsto, dentre outras medidas mitigadoras.

Quanto à questão de problemas com distorções harmônicas, propõe-se medidas no sentido de mitigar os níveis harmônicos presente no sistema, como a instalação de filtros para drenar as correntes harmônicas, retirando-as ou impedindo-as de entrar no sistema, dentre outras propostas. Entretanto vale ressaltar que vários métodos podem ser considerados para atenuar harmônicos e de acordo com Leão et al. (2014), cada técnica proporciona suas vantagens e limites, e oferece determinada faixa de desempenho na mitigação de harmônicos, cabendo assim a escolha mais apropriada para obter a melhor solução técnica e econômica.

Ao constatar índices acima dos estabelecidos quanto ao desequilíbrio de tensão, recomenda-se remanejar algumas cargas para as fases menos sobrecarregadas que estejam contribuindo para o desequilíbrio de tensão, isto é, rearranjar ou redistribuir as cargas de tal forma que o sistema se torne mais equilibrado.

Ao identificar problemas relacionados a variações do nível de tensão de atendimento, recomenda-se que o consumidor efetue a reclamação por meio de ligação telefônica à Central de Atendimento da concessionária ou por escrito. Comprovada a procedência da reclamação e a impossibilidade da regularização do nível de tensão durante a inspeção técnica, a concessionária deverá instalar equipamento de medição, no ponto de entrega da energia elétrica da unidade consumidora, para averiguar o nível de tensão de atendimento. Detectada a irregularidade no fornecimento dos níveis de tensão a concessionária terá um prazo para regularizar a tensão de atendimento, conforme estabelecido na Resolução Normativa nº 505, ANEEL, 2001. Caso o prazo expire e não seja regularizado os níveis de tensão, haverá compensação financeira da distribuidora junto ao consumidor (ANEEL, 2001).

De acordo com Deckmann e Pomilio (2018) o controle da frequência do sistema pode ser considerado um processo de ajuste gradual de pequenas perturbações, que o consumidor em geral nem percebe. Na concepção do consumidor, a frequência da rede é considerado o indicador da qualidade da energia elétrica menos preocupante. Entretanto de acordo com o Submódulo 6.15 – Gerenciamento da qualidade da energia elétrica da Rede Básica (ONS, 2020) a avaliação da QEE quanto à frequência é fundamental para se determinar a qualidade da operação da Rede Básica que atende os consumidores e também avaliar as condições de estabilidade

do sistema elétrico. Cabe ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) o gerenciamento do desempenho da frequência, identificar e recomendar ações que venham a melhorar o desempenho operacional do Sistema Interligado Nacional (SIN). Na ocorrência de violação dos limites dos indicadores de frequência, o ONS identifica as causas e propõe ações, inclusive metas e prazos, que corrijam os problemas identificados e previnam novas ocorrências.

Por fim, caberá a elaboração do Relatório que permitirá sistematizar os dados e assim apresentar os resultados com as medidas mitigadoras, de acordo com a situação em questão.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os procedimentos mostrados na metodologia é possível analisar de forma detalhada o comportamento dos fenômenos da qualidade do produto, identificar os problemas, propor soluções e por fim elaborar o relatório. O próximo capítulo apresenta o local e caracterização das instalações físicas, instalações elétricas da subestação, pontos de medições, sistema fotovoltaico e sistema de iluminação.

4 ESTUDO DE CASO: IFG CAMPUS GOIÂNIA

Para a realização de estudos voltados à qualidade da energia elétrica torna-se necessário conhecer e caracterizar as instalações físicas e elétricas do local de estudo. Portanto, este capítulo abordará os seguintes tópicos: local e caracterização das instalações físicas, instalações elétricas da subestação, pontos de medições, sistema fotovoltaico e sistema de iluminação.

4.1 LOCAL E CARACTERIZAÇÃO DAS INSTALAÇÕES FÍSICAS DO ESTUDO DE CASO

Para a realização desse estudo foi escolhido um consumidor contemplado no Programa de Eficiência Energética - PEE da ENEL DISTRIBUIÇÃO GOIÁS, neste caso o IFG – Campus Goiânia, mostrado na Figura 4.1. Em consonância com às Leis nº 9.991/2000, nº 13.203/2015 e nº 13.280/2016, caberá as concessionárias e permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica realizar esse programa, anualmente, a partir de abril de 2016. O Programa contempla projetos em instalações de clientes e consumidores, através de recursos financeiros das concessionárias e permissionárias, que representa 0,4% (zero vírgula quatro por cento) de sua receita operacional líquida anual (ENEL, 2019).



Figura 4.1 – Fachada do IFG / Campus Goiânia.

O IFG Campus Goiânia conta com 32.780,43 m² de área construída, conforme apresenta a Figura 4.2. No perímetro da área de tombamento da Instituição está inclusa toda a Quadra 118, entre as ruas 75, 66, 79 e 62, no setor Central. Dentro do IFG, os seguintes espaços físicos

foram tombados: o pórtico; o pavilhão com as salas de aula do bloco 100, voltado para Rua 75; o Teatro do IFG; o pavilhão com as salas de aula do bloco 200 (IFG, 2020).

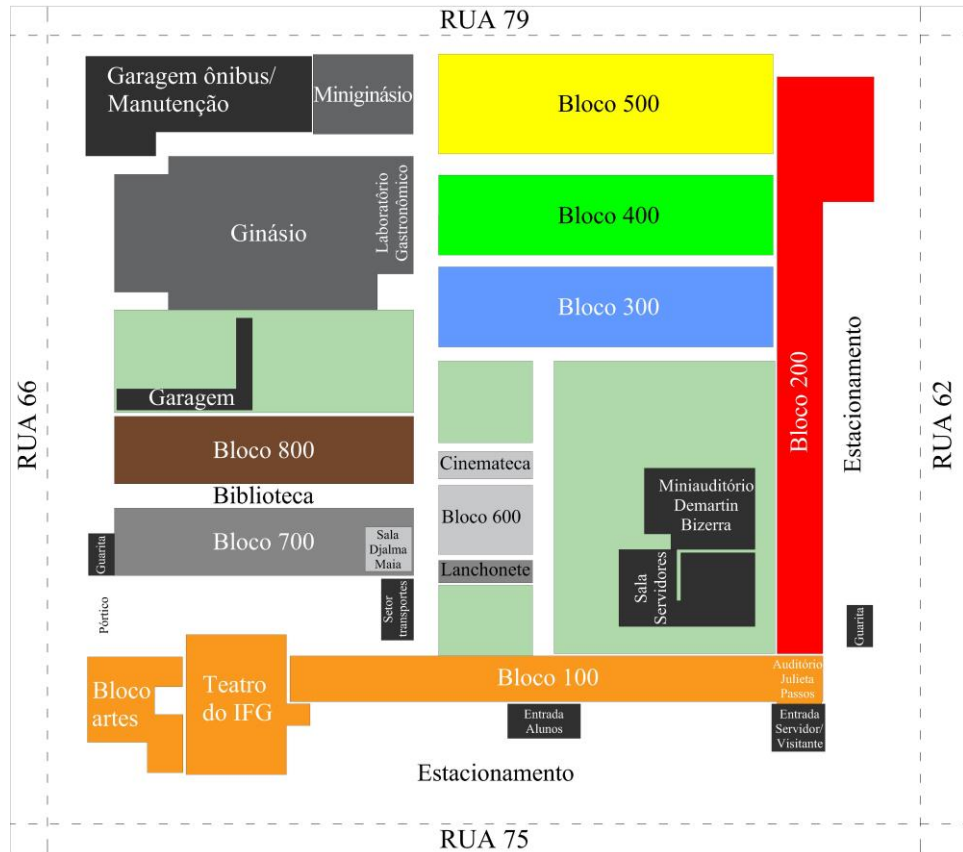


Figura 4.2 – Localização dos espaços no IFG / Campus Goiânia.

Fonte: Adaptado de IFG (2020).

Além da área de tombamento, o Campus ainda conta com outros blocos que são utilizados para aulas teórico-práticas (blocos 300, 400, 500, 700 e 800); um bloco administrativo (bloco 600); ginásio poliesportivo, miniginásio, biblioteca, cinemateca, auditórios, laboratório gastronômico, sala dos servidores, dentre outros ambientes (IFG, 2020).

4.2 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DA SUBESTAÇÃO E PONTOS DE MEDIÇÕES

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, com

entrada subterrânea. A subestação é composta pelo transformador 1 de 500 kVA e o transformador 2 de 225 kVA, conforme apresentado no diagrama elétrico na Figura 4.3.

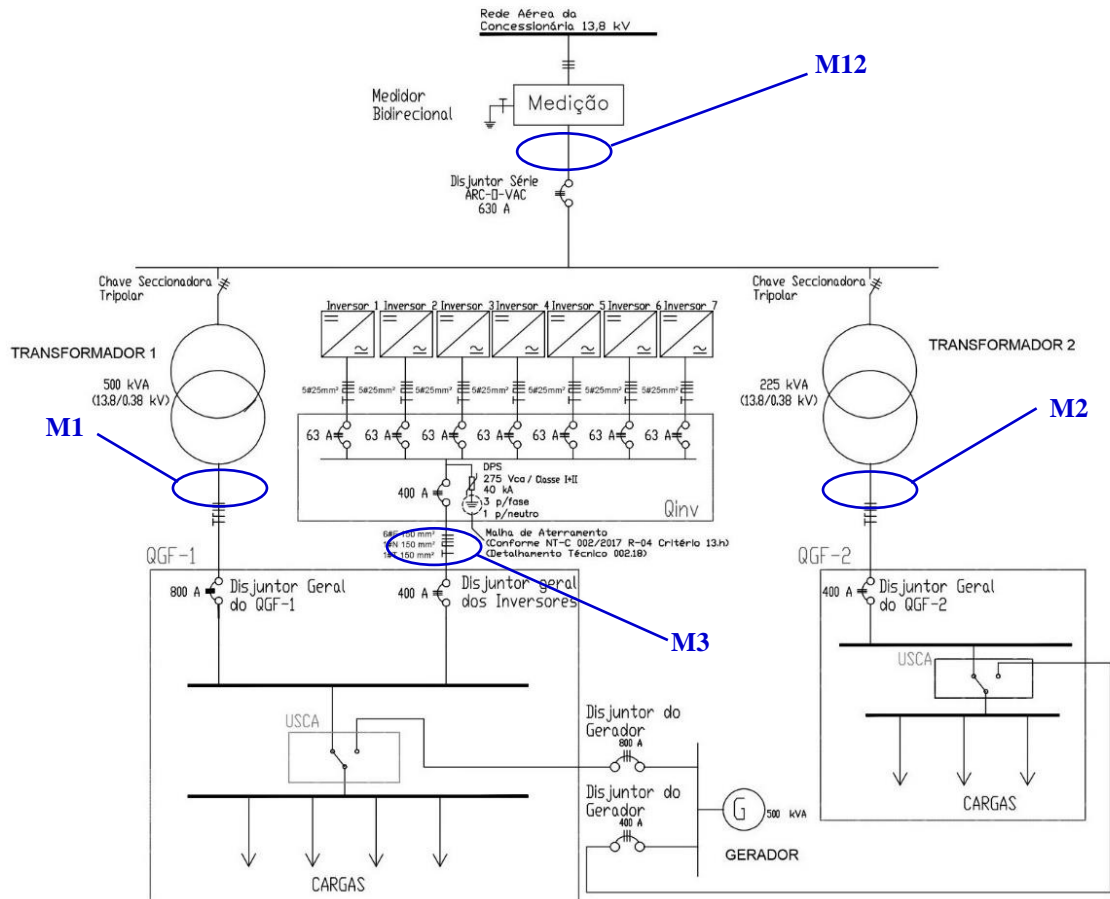


Figura 4.3 – Diagrama elétrico da subestação abrigo do IFG – Campus Goiânia.

Fonte: Adaptado de 3E ENGENHARIA (2019).

A subestação é atendida através do alimentador nº 05918, circuito 18, oriundo da Subestação Ferroviário, que tem uma distância de aproximadamente 2,5 km em relação ao ponto de entrega da UC – Unidade Consumidora, situada na Rua 75, nº46, centro.

No barramento do secundário do transformador 1 de 500 kVA, além dos dispositivos de proteção dos circuitos das cargas conectados, instalou-se o disjuntor onde alimenta os sete inversores, que são interligados aos módulos fotovoltaicos e seus respectivos dispositivos de proteção. O sistema conta também com um gerador (G) de 500 kVA interligado com os dois transformadores através da USCA (Unidade de Supervisão de Corrente Alternada).

Quanto aos níveis de curto-circuito no ponto de entrega da UC – Unidade Consumidora, a Tabela 4.1 mostra seus valores a seguir.

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).

O transformador 1 tem potência igual a 500 kVA, classe de tensão igual a 13,8/0,38 kV e é apresentado na Figura 4.4. Os circuitos são distribuídos no QDF-1, onde contém quatorze circuitos, dispostos conforme exibido na Figura 4.5 e Tabela 4.2.



Figura 4.4 – Transformador 1, 500 kVA, 13,8/0,38 kV.



Figura 4.5 – QGF-1: Quadro Geral de Força 1.

Tabela 4.2 – Disposição dos circuitos no QGF-1.

Nº Circuito	Disjuntor (A)	Ambientes
01	63	Data Center - Reserva
02	100	Bloco 200
03	100	Reserva
04	150	Reserva
05	200	Bloco 100 – Hall do Teatro
06	200	Bloco 500 / Bloco 200 (ar cond.) / Mecânica
07	200	Sala de manutenção
08	350	Bloco 100 – Teatro / Iluminação do pátio externo
09	250	Bloco 600 / Data Center / Biblioteca / Miniauditório Dermatin Bizerra/ Sala dos servidores
10	250	Bloco 400 – Laboratórios de Informática
11	250	Bloco 500 (circuito sem carga)
12	250	Reserva
13	250	Bloco 300
14	250	Reserva

O transformador 2, tem potência igual a 225 kVA, classe de tensão igual a 13,8/0,38 kV, e é apresentado Figura 4.6. Os circuitos são distribuídos no QDF-2, onde contém sete circuitos, dispostos conforme exibido na Figura 4.7 e Tabela 4.3.



Figura 4.6 – Transformador 2, 225 kVA, 13,8/0,38 kV.



Figura 4.7 – QGF-2: Quadro Geral de Força 2.

Tabela 4.3 – Disposição dos circuitos no QGF-2.

Nº Circuito	Disjuntor (A)	Ambientes
01	63	Reserva
02	63	Reserva
03	100	Serralheria
04	200	Bloco 400 – Iluminação e ar condicionado
05	200	Bloco 500
06	200	Ginásio / Miniginásio / Laboratório
07	250	Bloco 700 / Bloco 800 / Biblioteca

A definição dos pontos de instalação do equipamento de medição, para monitoramento dos indicadores da QEE no IFG Campus Goiânia, obedeceram às prescrições do Módulo 8 do PRODIST, descrito na seção 3.2.2.1 da metodologia. Os pontos e períodos de medições são apresentados a seguir.

A primeira campanha de medição foi realizada antes da implantação do projeto de eficiência energética, sendo monitorado o primário dos transformadores, especificamente junto a medição de faturamento, onde o analisador de energia ION 7650 foi conectado junto ao Transformador de Corrente – TC e ao Transformador de Potencial – TP, definido como ponto de medição M12, conforme mostra a Figura 4.3.

As medições foram realizadas pela CELG DISTRIBUIÇÃO S.A., atual ENEL DISTRIBUIÇÃO GOIÁS tendo em vista a implantação de Projeto de Eficiência Energética. O monitoramento foi realizado no período de 14/10 a 21/10/2015, com intervalos entre as leituras de 15 minutos, resultando em 664 amostras utilizáveis para cada grandeza elétrica.

Após a implantação da primeira etapa do projeto de eficiência energética, onde contemplou a efficientização do sistema de iluminação, realizou-se a segunda campanha de medição. Nessa campanha utilizou-se o instrumento *Fluke 435 II*, tipo classe A, conforme recomendações da metodologia. O analisador de energia foi conectado no secundário do transformador 1 de 500 kVA, definido como ponto de medição M1 e em seguida o mesmo analisador foi conectado no secundário do transformador 2 de 225 kVA, nesse caso o ponto de medição M2, conforme exibido nas Figuras 4.3, 4.8 e 4.9.



Figura 4.8 – Detalhe das medições realizadas no ponto de medição M1 no QGF-1/ Transformador 1.



Figura 4.9 – Detalhe das medições realizadas no ponto de medição M2 no QGF-2/ Transformador 2.

Para padronizar as planilhas de amostras de todas as medições efetuadas, foram selecionados todos os registros aos exatos 00, 10, 20, 30, 40 e 50 minutos de cada hora, sendo expurgado os outros registros, resultando em 1.008 amostras utilizáveis para cada grandeza elétrica, realizada no período de 06/05 a 12/05/2019 (sete dias consecutivos) no transformador 1.

Nas medições do transformador 2, utilizou-se o mesmo instrumento e manteve a mesma padronização das planilhas de amostras de todas as medições efetuadas, conforme aplicado no transformador 1. As medições foram realizadas no período de 27/05 a 02/06/2019 (sete dias consecutivos).

Após a implantação da segunda etapa do projeto de eficiência energética, com a instalação e energização do sistema fotovoltaico, onde contemplou todas as etapas do projeto de eficiência energética, realizou-se a terceira campanha de medição. Nessa campanha utilizou-se o mesmo instrumento da segunda campanha, que foi o analisador *Fluke 435 II*, tipo classe A, conforme recomendações da metodologia. De forma análoga a segunda campanha, o analisador de energia foi conectado no ponto de medição M1 e em seguida no ponto de medição M2, conforme exibido nas Figuras 4.3, 4.8 e 4.9.

No transformador 1 as medições foram realizadas no período de 09/08 a 15/08/2021 e no transformador 2 no período de 16/08 a 23/08/2021. Após essas medições houve a necessidade de monitorar o ponto M3, mostrado nas Figuras 4.3 e 4.10, que contemplou apenas o sistema fotovoltaico e as medições foram realizadas no período de 25/08 a 31/08/2021.



Figura 4.10 – Detalhe das medições realizadas no ponto de medição M3 no QGF-1/ Transformador 1.

Durante a segunda e a terceira campanha de medição, estava previsto a instalação do analisador de energia no ponto comum que alimenta os transformadores, junto a medição de faturamento, porém o local proposto apresentava lacre. Solicitou-se junto a ENEL DISTRIBUIÇÃO GOIÁS a liberação para efetuar as medições, entretanto o pedido foi negado, impossibilitando assim o monitoramento nesse ponto. Vale ressaltar que o Módulo 8 do PRODIST recomenda que as medições devem ser realizadas no primário ou no secundário do transformador, desta forma não comprometendo o resultado da campanha de medição.

Em todas as campanhas de medição utilizou-se o *software Power Log* para fazer o *download* dos dados junto ao computador, o *software Excel* para armazenar e organizar os dados das medições e o *software Matlab* para geração dos gráficos e/ou tabelas, que são descritos detalhadamente na seção 3.2.3 (tratamento dos dados).

4.3 SISTEMA DE ILUMINAÇÃO

A primeira etapa do Projeto de Eficiência Energética implementado pela CELG DISTRIBUIÇÃO S.A., atual ENEL DISTRIBUIÇÃO GOIÁS, contemplou parte das instalações do sistema de iluminação do IFG – Campus Goiânia; onde a antiga iluminação, composta por mais de 90% de lâmpadas fluorescentes tubulares, foram substituídas por lâmpadas LED tubulares. Para a realização da efficientização da iluminação, foi necessário instalar 5575 lâmpadas LED, no período de maio de 2018 a fevereiro de 2019.

A Tabela 4.4 apresenta a descrição e a quantidade das lâmpadas do sistema de iluminação descartada e a Tabela 4.5 apresenta a descrição e a quantidade das lâmpadas do sistema de iluminação implantada.

Tabela 4.4 – Descrição das lâmpadas descartadas.

Descrição	Quantidade
Lâmpada fluorescente compacta	52
Lâmpada de dicroica	38
Lâmpada fluorescente tubulares	5.652
Lâmpadas incandescentes	22
Lâmpadas par amarela	2
Lâmpada mista	41
Lâmpada Vapor de Mercúrio	34
Lâmpada Vapor Metálico	10
Total	5.851

Fonte: TECNIA (2016).

Tabela 4.5 – Descrição das lâmpadas implantadas.

Descrição	Quantidade
Lâmpada LED tubular T8, 18 W	5258
Lâmpada LED tubular T8, 9 W	166
Lâmpada Bulbo, 10W	107
Lâmpadas LED (3000K) Dicroica 6 W	44
Total	5575

Fonte: TECNIA (2016).

Além da substituição das lâmpadas foram instalados em alguns ambientes sensores de presença ultrassônico e infravermelho atuando nos circuitos de iluminação, desligando-os na ausência de pessoas no recinto.

De acordo com a necessidade do ambiente, instalou-se também relés fotoelétricos nos circuitos para realizar o acendimento automático na ausência de luz do dia e timer digital para viabilizar o desligamento parcial da iluminação, de forma que a iluminação seja controlada, durante a madrugada e finais de semana.

4.4 SISTEMA FOTOVOLTAICO

A segunda etapa do Projeto de Eficiência Energética contemplou a instalação de uma Usina Solar Fotovoltaica no telhado do IFG Campus Goiânia.

As principais características da usina são:

- a) potência instalada em módulos fotovoltaicos de 251,875 kWp, constituída de 775 módulos de silício policristalino, com potência individual de 325 Wp;
- b) instalação composta por sete inversores *string* SIW500H ST030 WEG, com potência nominal individual de 30 kW;
- c) conexão à rede elétrica através do barramento do secundário do transformador de 500 kVA, onde um disjuntor alimenta os sete inversores.

Os inversores instalados são de fabricação da HUAWEI, porém parametricamente alterado na fábrica da WEG e suas especificações técnicas são apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Características básicas do inversor SIW500H ST030.

Especificações técnicas	SIW500H ST030
Eficiência	
Eficiência máxima	98,6%
Entrada	
Tensão de entrada máxima	1.100 V
Corrente máxima por MPPT	22 A
Faixa de tensão MPPT em máxima potência	480 V ~ 800 V
Número máximo de entradas	8
Número de rastreadores MPPT	4
Saída	
Potência ativa CA nominal	30.000 W
Tensão de saída nominal (FN/FF)	220 V (F-N) / 380 V (F-F), 230 V / 400 V, 3F+N+PE
Frequência de rede CA nominal	50 Hz / 60 Hz
Corrente de saída máxima (380 V)	48 A
Fator de potência ajustável	0,8 LG ... 0,8 LD
Distorção harmônica total máxima	<3%

Fonte: Adaptado de WEG (2018).

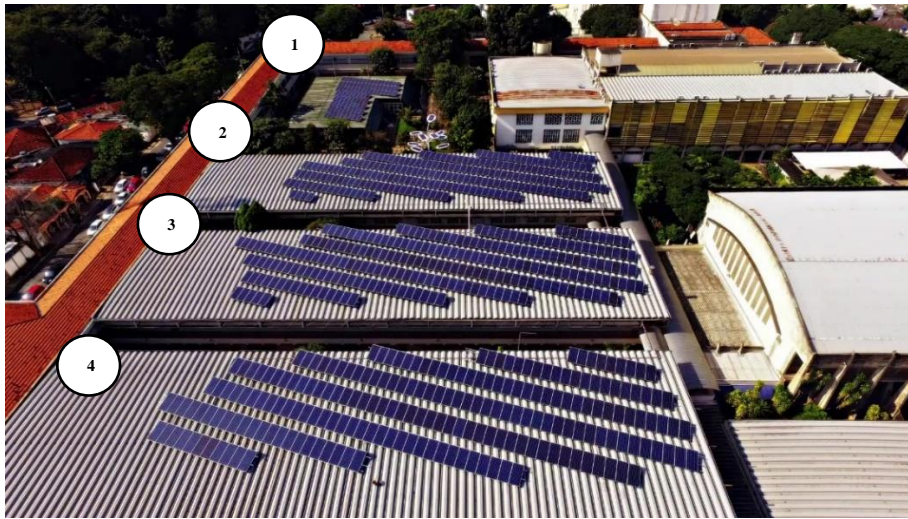
Os módulos fotovoltaicos instalados no IFG tem potência individual de 325 Wp e suas características elétricas são mostradas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Características elétricas do módulo GCL – P6/72325.

Características elétricas	Valor
Potência elétrica máxima ($P_{m\acute{a}x}$)	325 W
Tolerância	0 ~ + 5 W
Tensão de máxima potência (V_{MP})	37,6 V
Corrente de máxima potência (I_{MP})	8,64 A
Tensão de Circuito Aberto (V_{OC})	46,0 V
Corrente de Curto-Circuito (I_{SC})	9,24 A
Tensão Máxima do Sistema	1000 V
Eficiência do Painel	16,7%
Número de células	72

Fonte: Adaptado de GCL (2016).

Segundo o Relatório 3 – Projeto Executivo – Minigeração Fotovoltaica IFG, em seu item 3.1 (TECNIA, 2016), considerou a área disponível em cada bloco, o custo de instalação conforme a distribuição dos módulos e aspectos gerais da estrutura do telhado de cada edifício, para assim determinar o *layout* dos módulos. Dessa forma, utilizando módulos fotovoltaicos de 325 Wp, os arranjos de 775 módulos ficaram dispostos, conforme apresentado na Figura 4.11.



1 – Miniáuditorio Dermatolizerra da Silva.

2 – Bloco 300

3 – Bloco 400

4 – Bloco 500

Figura 4.11 – Arranjo dos módulos no telhado do IFG / Campus Goiânia.
Fonte: 3E ENGENHARIA (2019).

A partir desta distribuição de módulos entre os blocos, os arranjos foram instalados, conforme exibido no Anexo A.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo descreveu de forma geral o local do estudo de caso, as instalações físicas e as instalações elétricas da subestação do IFG, informações importantes para a compreensão dos próximos capítulos. No próximo capítulo são apresentados os resultados obtidos decorrentes da metodologia aplicada no estudo de caso desse trabalho.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo discute os resultados obtidos nas campanhas de medições realizadas antes da implantação do projeto de eficiência energética, após a efficientização do sistema de iluminação, e por fim, após a implantação do sistema fotovoltaico. Desta forma, serão contempladas todas as etapas do projeto e assim vislumbrando uma análise apurada, quanto ao comportamento dos fenômenos da qualidade do produto.

5.1 PRIMEIRA CAMPANHA DE MEDIÇÃO NOS PRIMÁRIOS DOS TRANSFORMADORES 1 E 2

A primeira campanha de medição foi realizada no período de 14/10 a 21/10/2015, antes da implantação do projeto de eficiência energética e nessa coleta o instrumento obteve 664 amostras, entretanto valor suficiente para comparar com as 1008 amostras coletadas na segunda e terceira campanha. O monitoramento foi realizado nos primários dos transformadores 1 e 2 (ponto M12), conforme apresentado na seção 4.2 e os resultados são descritos nas seções 5.1.1 a 5.1.5.

5.1.1 Tensão em regime permanente

Nesse cenário avaliou-se os níveis de tensão em regime permanente das tensões entre fases (V_{ab} , V_{bc} e V_{ca}) no PAC (ponto de acoplamento comum) nos primários dos transformadores 1 e 2, ou seja, no ponto M12 da Figura 4.3 e os resultados são apresentados na Figura 5.1.

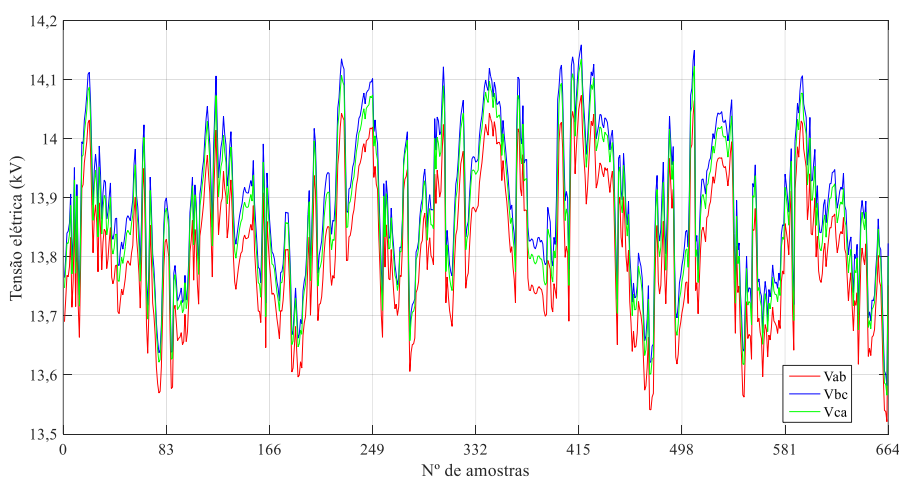


Figura 5.1 – Comportamento do nível de tensão em regime permanente (tensão de linha / transformadores 1 e 2).

Constata-se que os valores de tensão atingiram picos de até 14159,33 V e decréscimo de tensão igual a 13520,89 V, porém esses valores variaram dentro da faixa de tensão adequada estabelecidos no Módulo 8 do PRODIST. Quanto aos índices DRC e DRP, apresentaram valores percentuais iguais a 0,00%, pois nenhuma amostra apresentou valor dentro da faixa precária e crítica. A Tabela 5.1 mostra um resumo dos valores dos indicadores do nível de tensão em regime permanente.

Tabela 5.1 – Valores dos indicadores do nível de tensão em regime permanente (tensão de linha / transformadores 1 e 2).

Indicador	Tensão entre fases		
	Vab	Vbc	Vca
$V_{m\acute{a}xima}$	14073,68 V	14159,33 V	14124,31 V
$V_{m\acute{i}nima}$	13520,89 V	13581,81 V	13565,72 V
$V_{m\acute{e}dia}$	13814,03 V	13892,38 V	13868,67 V
DRP	0,00 %	0,00 %	0,00 %
DRC	0,00 %	0,00 %	0,00 %

5.1.2 Fator de potência

Na Figura 5.2 é apresentado o comportamento do fator de potência total medido na primeira campanha (ponto M12), nos primários dos transformadores 1 e 2. Observa-se que, dentre as 664 amostras coletadas, todas estão compreendidas entre 0,96 a 1,00; desta forma, constata-se regularidade, pois apresentam-se dentro da faixa permitida.

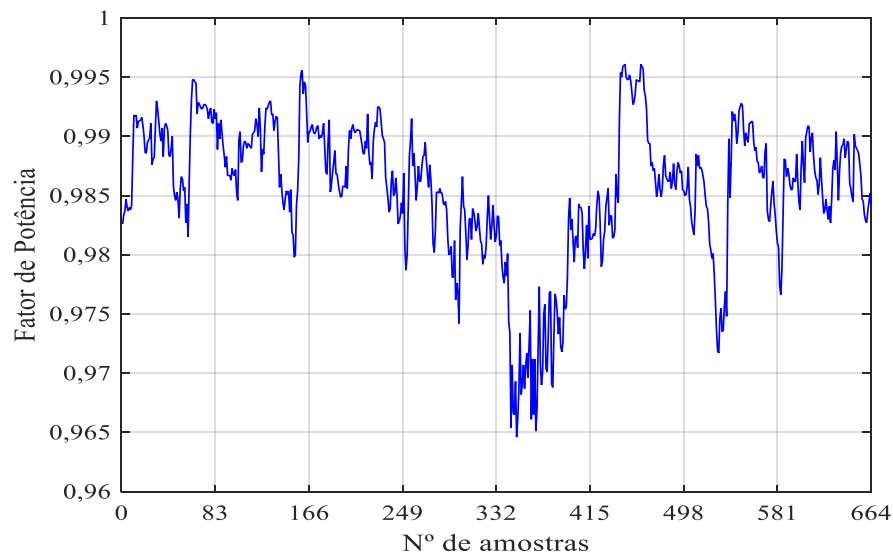


Figura 5.2 – Comportamento do fator de potência (transformadores 1 e 2).

5.1.3 Distorção harmônica de tensão

A Figura 5.3 apresenta o comportamento das distorções harmônicas totais de tensões através de 166 amostras nas fases A, B e C. Observa-se que as amostras se encontram dentro do intervalo de 1,00% a 1,80%, desta forma em consonância com os limites estabelecidos na Tabela 2.5 do Módulo 8 do PRODIST, que permite taxa de distorção de até 8%.

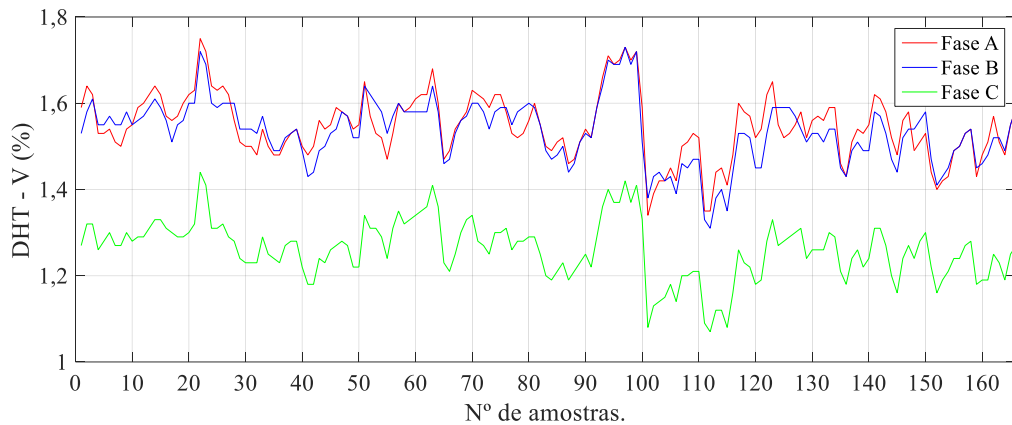


Figura 5.3 – Comportamento das distorções harmônicas totais de tensões (DHT-V) nas fases A, B e C (transformadores 1 e 2).

5.1.4 Desequilíbrio de tensão

O percentual de desequilíbrio de tensão nos transformadores 1 e 2 é mostrado na Figura 5.4 e observa-se que os resultados apresentam valores dentro do intervalo de 0,20% a 0,90%, mesmo identificando algumas oscilações. Nota-se que não houve, em nenhum momento transgressão dos limites estabelecidos, pois o limite máximo permitido é igual a 3%.

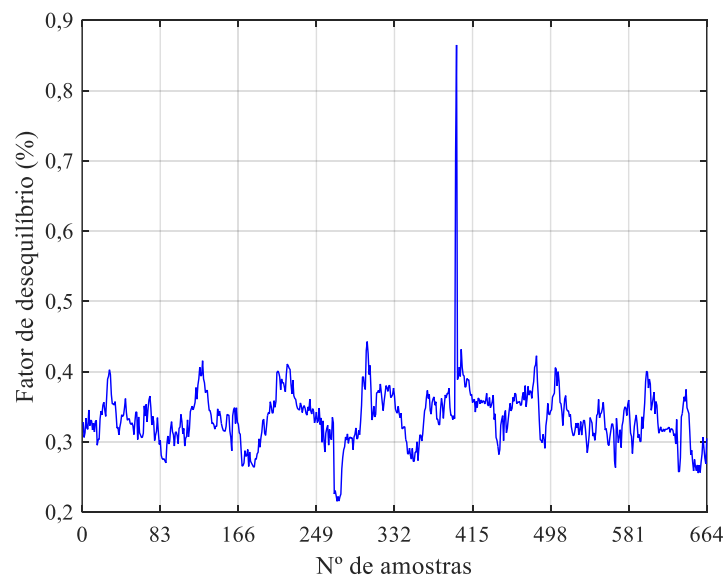


Figura 5.4 – Comportamento do desequilíbrio de tensão (transformadores 1 e 2).

5.1.5 Variação de frequência

Quanto à variação de frequência, a Figura 5.5 apresenta os resultados e constata-se que apesar de pequenas variações, os valores medidos encontram-se no intervalo de 59,9 a 60,1 Hz para as condições normais de operação, desta forma apresentando um comportamento estável. O valor médio da frequência fundamental no intervalo monitorado é 60,00 Hz, e os valores mínimo e máximo medidos foram 59,92 Hz e 60,08 Hz respectivamente.

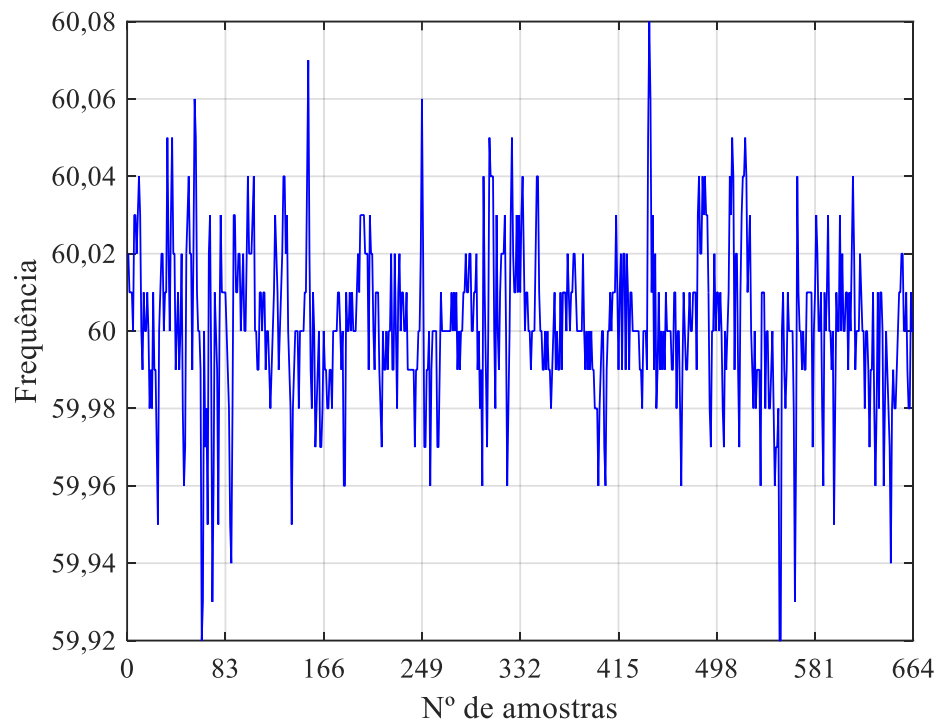


Figura 5.5 – Comportamento da frequência (transformadores 1 e 2).

5.2 SEGUNDA E TERCEIRA CAMPANHA DE MEDIÇÃO NO SECUNDÁRIO DO TRANSFORMADOR 1

A segunda campanha de medição foi realizada no período de 06/05 a 12/05/2019 (ponto M1), após a eficientização do sistema de iluminação. A terceira campanha de medição foi realizada em dois momentos, onde o primeiro foi efetuado no período de 09/08 a 15/08/2021 (ponto M1), onde contemplou todas as cargas juntamente com o sistema fotovoltaico, desta forma monitorando tensão em regime permanente, fator de potência, distorção harmônica de tensão, distorção harmônica de corrente, desequilíbrio de tensão e variação de tensão. Em virtude da indisponibilidade de mais equipamentos para realizar as medições simultaneamente, ocorreu um segundo momento de medições, que foi realizado no período de 25/08 a 31/08/2021

(ponto M3), contemplando apenas o sistema fotovoltaico, que fica conectado no secundário do transformador 1 e monitorou apenas distorção harmônica de corrente. O monitoramento foi realizado no transformador 1, conforme apresentado na seção 4.2 e os resultados são descritos nas seções 5.2.1 a 5.2.6.

5.2.1 Tensão em regime permanente

Nessas medições avaliou-se os níveis de tensão em regime permanente das tensões entre fase e fase (V_{ab} , V_{bc} e V_{ca}) no secundário do transformador 1 para as duas campanhas e os resultados são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Valores dos indicadores do nível de tensão em regime permanente (tensão de linha / transformador 1).

Segunda campanha de medição				
Indicador	Tensão entre fases			Limite máximo permitido
	Vab	Vbc	Vca	
$V_{máxima}$	388,32 V	387,89 V	389,46 V	399,00 V
$V_{mínima}$	370,54 V	369,60 V	372,05 V	350,00 V
$V_{média}$	380,63	380,01 V	381,71 V	
DRP	0,00 %	0,00 %	0,00 %	3,00 %
DRC	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,50 %
Terceira campanha de medição				
Indicador	Tensão entre fases			Limite máximo permitido
	Vab	Vbc	Vca	
$V_{máxima}$	391,82 V	391,98 V	393,96 V	399,00 V
$V_{mínima}$	355,82 V	354,40 V	356,78 V	350,00 V
$V_{média}$	378,37 V	378,20 V	380,29 V	
DRP	0,00 %	0,00 %	0,00 %	3,00 %
DRC	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,50 %

Observa-se que os valores de tensão durante o período da segunda campanha de medição atingiram picos de até 389,46 V e decréscimo de tensão igual a 369,60 V, porém esses valores variaram dentro da faixa de tensão adequada estabelecidos no Módulo 8 do PRODIST. Quanto aos índices DRC e DRP, apresentaram valores percentuais iguais a 0,00%, pois nenhuma amostra apresentou valor dentro da faixa precária e crítica.

Quanto ao comportamento das tensões entre fases na terceira campanha de medição, este apresenta resultado similar a segunda campanha, com valores dentro da faixa de tensão adequada, desta forma constatado valores percentuais iguais a 0,00% nos índices de DRC e DRP.

Na segunda situação avaliou-se os níveis de tensão em regime permanente das tensões entre fase e neutro (V_{an} , V_{bn} e V_{cn}) no secundário do transformador 1 para as duas campanhas e os resultados são mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Valores dos indicadores do nível de tensão em regime permanente (tensão entre fase e neutro / transformador 1).

Segunda campanha de medição				
Indicador	Tensão entre fase e neutro			Limite máximo permitido
	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	
$V_{máxima}$	224,75 V	223,94 V	224,36 V	231,00 V
$V_{mínima}$	214,48 V	213,41 V	214,26 V	202,00 V
$V_{média}$	220,22 V	219,42 V	219,90 V	
DRP	0,00 %	0,00 %	0,00 %	3,00 %
DRC	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,50 %
Terceira campanha de medição				
Indicador	Tensão entre fase e neutro			Limite máximo permitido
	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	
$V_{máxima}$	226,92 V	225,96 V	227,08 V	231,00 V
$V_{mínima}$	205,96 V	204,84 V	205,24 V	202,00 V
$V_{média}$	219,14 V	218,10 V	219,12 V	
DRP	0,00 %	0,00 %	0,00 %	3,00 %
DRC	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,50 %

Observa-se que na segunda campanha de medição nenhuma amostra apresentou valor dentro da faixa precária e crítica, portanto os valores de DRC e DRP foram iguais a 0,00%. Entre fase e neutro o valor máximo de tensão foi igual a 224,75 V e o valor mínimo igual a 213,41 V, logo dentro da faixa de tensão adequada.

Quanto às tensões entre fase e neutro na terceira campanha de medição, comportaram-se de maneira análoga a segunda campanha, desta forma não comprometendo os indicadores estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST.

5.2.2 Fator de potência

Na Tabela 5.4 é apresentado o comportamento do fator de potência total e fator de potência nas fases A, B e C, na segunda campanha de medição, realizada no secundário do transformador 1. Observa-se que os resultados estão dentro dos limites estabelecidos, compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo ou 1,00 e 0,92 capacitivo. Todavia, nota-se que as medições na fase C, mesmo apresentando o valor médio do fator de potência igual a 0,96, constatou-se um índice de 5,75% das amostras com valores abaixo de 0,92, em um total de 1008 amostras válidas. Tais resultados foram oriundos do dia 11/05/2019 (sábado), onde conforme calendário acadêmico

ocorreu atividade letiva e o dia 12/05/2019 (domingo), no qual apresentou as maiores baixas do fator de potência, diante de um quadro mínimo de consumo de energia elétrica.

Tabela 5.4 – Valores dos indicadores do fator de potência (transformador 1).

Segunda campanha de medição		
Fases	Fator de potência	
	Valor médio	Número de amostras menores que 0,92 (%)
A	0,99	0,00
B	0,98	0,00
C	0,96	5,75
Total	0,97	0,00
Terceira campanha de medição		
Fases	Fator de potência	
	Valor médio	Número de amostras menores que 0,92 (%)
A	0,94	9,62
B	0,94	11,40
C	0,92	14,68
Total	0,90	17,16

Na terceira campanha de medição realizada no secundário do transformador 1, ocorreu um aumento do número de amostras menores que 0,92, pois as medições nas fases A, B e C e total o índice com valores abaixo de 0,92, foram respectivamente 9,62%, 11,40%, 14,68% e 17,16%. Tais resultados podem ser justificados pelo baixo consumo de energia constatado durante a terceira campanha de medição, onde analisando o consumo na fase A, situação mais crítica, ocorreu um decréscimo de 52,42% da corrente elétrica em relação ao valor medido na segunda campanha de medição, conforme apresentado na Tabela 5.8, e que será tratado especificamente na seção 5.2.4.

5.2.3 Distorção harmônica de tensão

Nessa seção avaliou-se os resultados pertinente às distorções harmônicas de tensões. A Tabela 5.5 apresenta o comportamento das distorções harmônicas totais de tensões nas fases A, B e C no secundário do transformador 1, contemplando a segunda e a terceira campanha de medição. São apresentados na Tabela 5.5 os valores mínimos, máximos e médios medidos e os valores 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 de tensões nas fases A, B e C.

Na segunda campanha, observa-se que o número de amostras encontram-se dentro do intervalo de 1,57% (mínimo) a 2,17% (máximo), desta forma em consonância com os limites estabelecidos na Tabela 2.5, que permite taxa de distorção de até 10%. De forma análoga, ocorreu com a terceira campanha, pois os limites de distorções totais de tensão não foram ultrapassados.

Tabela 5.5 – Valores das distorções harmônicas totais de tensões (DHT-V) nas fases A, B e C (transformador 1).

Segunda campanha de medição						
Ordem harmônica	Mínimo (%)	Médio (%)	Máximo (%)	P95 (%)	Máximo permitido (%)	Fase
DHT - V	1,57	1,82	2,06	0,00	10,00	A
DHT - V	1,64	1,91	2,17	0,00	10,00	B
DHT - V	1,60	1,81	2,04	0,00	10,00	C
Terceira campanha de medição						
Ordem Harmônica	Mínimo (%)	Médio (%)	Máximo (%)	P95 (%)	Máximo permitido (%)	Fase
DHT - V	1,62	2,54	3,37	0,00	10,00	A
DHT - V	1,53	2,59	3,45	0,00	10,00	B
DHT - V	1,64	2,57	3,36	0,00	10,00	C

Quanto aos perfis das distorções harmônicas individuais das tensões nas fases A, B e C, as Tabelas 5.6 e 5.7 mostram os resultados no transformador 1, contemplando a segunda e a terceira campanhas de medição. São apresentados os valores médios medidos e os valores de P95% no qual significa que dentre as 1008 amostras coletadas, 95% devem estar em conformidade com o índice máximo permitido (%) para as componentes ímpares não múltiplas de 3 e as componentes múltiplas de 3. Observa-se que os resultados da segunda e terceira campanha estão em conformidade com o Módulo 8 do PRODIST, pois os limites estabelecidos para as componentes ímpares não múltiplas de 3 e as componentes múltiplas de 3, isto é, as DTT_1 e DTT_3 são iguais a 7,50% e 6,50% respectivamente, todavia os valores medidos apresentaram valores inferiores.

Tabela 5.6 – Valores das distorções harmônicas individuais das tensões nas fases A, B e C (transformador 1 / segunda campanha de medição).

Segunda campanha de medição				
Ordem harmônica	Médio (%)	P95 (%)	Máximo permitido (%)	Fase
3	0,10	0,00	6,50	A
5	1,50	0,00	7,50	
7	0,91	0,00	7,50	
9	0,11	0,00	6,50	
11	0,25	0,00	7,50	
13	0,20	0,00	7,50	
15	0,06	0,00	6,50	
17	0,12	0,00	7,50	
19	0,07	0,00	7,50	
21	0,03	0,00	6,50	
23	0,13	0,00	7,50	
25	0,08	0,00	7,50	
27	0,04	0,00	6,50	
29	0,03	0,00	7,50	
3	0,22	0,00	6,50	B
5	1,58	0,00	7,50	
7	0,94	0,00	7,50	
9	0,07	0,00	6,50	
11	0,25	0,00	7,50	
13	0,22	0,00	7,50	
15	0,06	0,00	6,50	
17	0,12	0,00	7,50	
19	0,05	0,00	7,50	
21	0,05	0,00	6,50	
23	0,15	0,00	7,50	
25	0,07	0,00	7,50	
27	0,02	0,00	6,50	
29	0,05	0,00	7,50	
3	0,23	0,00	6,50	C
5	1,54	0,00	7,50	
7	0,79	0,00	7,50	
9	0,11	0,00	6,50	
11	0,23	0,00	7,50	
13	0,23	0,00	7,50	
15	0,06	0,00	6,50	
17	0,09	0,00	7,50	
19	0,05	0,00	7,50	
21	0,03	0,00	6,50	
23	0,16	0,00	7,50	
25	0,06	0,00	7,50	
27	0,03	0,00	6,50	
29	0,04	0,00	7,50	

Tabela 5.7 – Valores das distorções harmônicas individuais das tensões nas fases A, B e C (transformador 1 / terceira campanha de medição).

Terceira campanha de medição				
Ordem harmônica	Médio (%)	P95 (%)	Máximo permitido (%)	Fase
3	0,23	0,00	6,50	A
5	2,45	0,00	7,50	
7	0,47	0,00	7,50	
9	0,13	0,00	6,50	
11	0,12	0,00	7,50	
13	0,09	0,00	7,50	
15	0,03	0,00	6,50	
17	0,08	0,00	7,50	
19	0,07	0,00	7,50	
21	0,06	0,00	6,50	
23	0,05	0,00	7,50	
25	0,08	0,00	7,50	
27	0,02	0,00	6,50	
29	0,05	0,00	7,50	
3	0,29	0,00	6,50	
5	2,50	0,00	7,50	
7	0,39	0,00	7,50	
9	0,11	0,00	6,50	
11	0,12	0,00	7,50	
13	0,10	0,00	7,50	
15	0,05	0,00	6,50	
17	0,14	0,00	7,50	
19	0,08	0,00	7,50	
21	0,05	0,00	6,50	
23	0,05	0,00	7,50	
25	0,09	0,00	7,50	
27	0,02	0,00	6,50	
29	0,03	0,00	7,50	
3	0,08	0,00	6,50	C
5	2,51	0,00	7,50	
7	0,42	0,00	7,50	
9	0,09	0,00	6,50	
11	0,13	0,00	7,50	
13	0,08	0,00	7,50	
15	0,03	0,00	6,50	
17	0,10	0,00	7,50	
19	0,07	0,00	7,50	
21	0,02	0,00	6,50	
23	0,06	0,00	7,50	
25	0,05	0,00	7,50	
27	0,03	0,00	6,50	
29	0,05	0,00	7,50	

5.2.4 Distorção harmônica de corrente

Nessa seção avaliou-se os resultados referente às distorções harmônicas de corrente. Inicialmente é apresentada a Tabela 5.8, que contempla o comportamento da corrente elétrica nas fases A, B e C, obtidos no mesmo período de monitoramento das distorções harmônicas totais e individuais de corrente nas fases A, B e C no secundário dos transformador 1, referente à segunda e terceira campanhas de medição.

Tabela 5.8 – Valores de corrente nas fases A, B e C no secundário do transformador 1.

Segunda campanha de medição	
Corrente elétrica nas fases	Valor médio (A)
A	128,62 A
B	124,30 A
C	110,80 A
Terceira campanha de medição	
Corrente elétrica nas fases	Valor médio (A)
A	61,21 A
B	69,47 A
C	68,05 A

Para realizar a conversão dos valores para o primário do transformador 1 utilizou a relação de transformação dos transformadores de corrente instalados, que é de 150/5, isto na segunda campanha. Todavia na terceira campanha utilizou a relação de 300/5 em virtude da instalação de novos transformadores de corrente. Na segunda campanha as correntes médias nas fases A, B e C no primário do transformador apresentaram valores de 4,28 A, 4,14 A e 3,69 A respectivamente. Na terceira campanha as correntes médias nas fases A, B e C no primário do transformador apresentaram valores de 2,04 A, 2,31 A e 2,26 A respectivamente. Esses valores foram utilizados para determinar a relação entre a corrente de curto-circuito (I_{CC}) no PAC (Ponto de Acoplamento Comum) e a corrente de demanda da carga (I_L), para assim obterem os valores máximos permitidos (%) das distorções harmônicas totais e individuais de corrente nas fases A, B e C, conforme descrito na metodologia e no Apêndice A.

A Tabela 5.9 apresenta o comportamento das distorções harmônicas totais de corrente (DHT-I) e individuais (DHI-I) nas fases A, B e C no secundário do transformador 1, contemplando a segunda campanha de medição. São apresentados na Tabela 5.9 os valores médios medidos e os valores 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. O índice máximo permitido foi obtido através da relação entre I_{CC} e I_L .

Para as distorções harmônicas totais de corrente nas fases A, B e C, o valor máximo permitido é 20,00 %, entretanto a fase C apresentou o índice de 0,89% e as fases A e B o índice de 0,00%, desta forma obtendo valores em conformidade com a Norma IEEE Std 519, 2014. Quanto as distorções harmônicas individuais das correntes nas fases A, B e C, observa-se resultados abaixo dos valores máximos permitidos em quase todas as situações, exceto na vigésima terceira harmônica da fase C com índice igual a 23,61%, quando o permitido é 5% das 1008 amostras.

Tabela 5.9 – Valores das distorções harmônicas totais de corrente (DHT-I) e individuais (DHI-I) nas fases A, B e C (transformador 1 / segunda campanha de medição).

Segunda campanha de medição					
Ordem harmônica	Médio (%)	P95 (%)	Parecer	Máximo permitido (%)	Fase
DHT - I	7,99	0,00		20,00	A
3	4,49	0,00		15,00	
5	4,90	0,00		15,00	
7	3,01	0,00		15,00	
9	1,22	0,00		15,00	
11	1,22	0,00		7,00	
13	0,78	0,00		7,00	
15	0,62	0,00		7,00	
17	0,55	0,00		6,00	
19	0,71	0,00		6,00	
21	0,16	0,00		6,00	
23	0,79	0,00		2,50	
25	0,51	0,00		2,50	
27	0,26	0,00		2,50	
29	0,22	0,00		2,50	
DHT - I	9,27	0,00		20,00	B
3	5,20	0,00		15,00	
5	5,90	0,00		15,00	
7	3,60	0,00		15,00	
9	1,44	0,00		15,00	
11	1,04	0,00		7,00	
13	1,09	0,00		7,00	
15	0,72	0,00		7,00	
17	0,45	0,00		6,00	
19	0,60	0,00		6,00	
21	0,44	0,00		6,00	
23	1,16	2,57		2,50	
25	0,44	0,00		2,50	
27	0,12	0,00		2,50	
29	0,39	0,00		2,50	
DHT - I	10,18	0,89		20,00	C
3	7,28	0,00		15,00	
5	5,28	0,00		15,00	
7	3,04	0,00		15,00	
9	1,63	0,00		15,00	
11	0,72	0,00		7,00	
13	1,07	0,00		7,00	

15	0,68	0,00		7,00
17	0,43	0,00		6,00
19	0,76	0,00		6,00
21	0,32	0,00		6,00
23	1,54	23,61	Excedeu	2,50
25	0,47	0,00		2,50
27	0,20	0,00		2,50
29	0,34	0,00		2,50

A Tabela 5.10 apresenta o comportamento das distorções harmônicas totais de corrente (DHT-I) e individuais (DHI-I) nas fases A, B e C no secundário do transformador 1, contemplando a terceira campanha de medição. São apresentados na Tabela 5.10 os valores médios medidos e os valores 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. Ainda mostra o campo P(95%) SFV no qual significa que dentre as 1008 amostras coletadas, 95% devem estar em conformidade com o índice máximo permitido (%), entretanto considerando apenas o Sistema Fotovoltaico (SFV).

O campo P(95%) contempla a terceira campanha de medição (ponto de medição M1), onde considera as medições de todas as cargas e o sistema fotovoltaico. Observa-se uma elevação considerável dos valores referente aos índices máximos permitidos, onde a fase C apresenta o índice de 46,03% de amostras que ultrapassam o valor máximo permitido, quando o máximo permitido é 5% das 1008 amostras que podem atingir o índice máximo que é 20,00%. Da mesma forma, porém com valores inferiores, as fases A e B apresentam respectivamente 11,80% e 11,90%. Ainda considerando o campo P(95%), porém observando as distorções harmônicas individuais das correntes, 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 valores iguais a 9,72% e 7,93% respectivamente e na fase C na 3ª, 5ª, 13ª e 25ª componentes com índices de 58,43%, 6,64%, 6,05% e 6,05% respectivamente.

O campo P(95%) SFV contempla a terceira campanha de medição (ponto de medição M3), onde considera as medições apenas no Sistema Fotovoltaico (SFV). Observa-se contribuição considerável no tocante a elevação de distorções harmônicas totais de corrente nas fases A, B e C, apresentando respectivamente os seguintes índices: 9,12%, 8,63% e 8,33%. Quanto as distorções individuais de corrente, identificou-se na fase A transgressão na 5ª, 7ª, 11ª, 13ª, 17ª e 23ª e 25ª componentes harmônicas com índices de 6,44%, 8,13%, 6,44%, 7,73%, 5,54%, 30,25% e 23,31% respectivamente. Na fase B aconteceu na 5ª, 7ª, 11ª, 13ª, 17ª, 23ª, 25ª e 29ª componentes com valores iguais a 6,34%, 7,83%, 6,44%, 6,74%, 5,35%, 35,71%, 12,38% e

10,11% respectivamente e na fase C na 5^a, 7^a, 11^a, 13^a, 17^a e 23^a e 25^a componentes com índices de 5,95%, 7,63%, 6,25%, 6,64%, 5,15%, 42,95% e 22,51% respectivamente.

Tabela 5.10 – Valores das distorções harmônicas totais de corrente (DHT-I) e individuais (DHI-I) nas fases A, B e C (transformador 1 / terceira campanha de medição).

Terceira campanha de medição							Fase
Ordem harmônica	Médio (%)	P95 (%)	P95 (%) Parecer	P95 (%) SFV	P95 (%) SFV Parecer	Máximo permitido (%)	
DHT - I	14,52	11,80	Excedeu	9,12	Excedeu	20,00	A
3	9,64	9,82	Excedeu	1,28		15,00	
5	5,93	7,63	Excedeu	6,44	Excedeu	15,00	
7	5,14	3,67		8,13	Excedeu	15,00	
9	3,89	2,57		1,38		15,00	
11	2,83	3,37		6,44	Excedeu	7,00	
13	2,37	5,45	Excedeu	7,73	Excedeu	7,00	
15	4,70	0,00		1,28		7,00	
17	1,14	1,28		5,54	Excedeu	6,00	
19	1,03	1,19		4,66		6,00	
21	0,93	0,09		1,48		6,00	
23	0,89	5,15	Excedeu	30,25	Excedeu	2,50	
25	1,22	5,85	Excedeu	23,31	Excedeu	2,50	
27	0,28	0,09		2,28		2,50	
29	0,54	0,09		4,86		2,50	
DHT - I	15,01	11,90	Excedeu	8,63	Excedeu	20,00	B
3	10,74	9,72	Excedeu	1,19		15,00	
5	6,24	7,93	Excedeu	6,34	Excedeu	15,00	
7	4,98	2,08		7,83	Excedeu	15,00	
9	3,44	0,59		1,19		15,00	
11	2,77	1,88		6,44	Excedeu	7,00	
13	2,35	4,46		6,74	Excedeu	7,00	
15	1,13	0,09		1,98		7,00	
17	2,24	4,66		5,35	Excedeu	6,00	
19	1,45	0,59		4,46		6,00	
21	1,01	0,09		1,68		6,00	
23	0,99	3,37		35,71	Excedeu	2,50	
25	1,56	4,36		12,30	Excedeu	2,50	
27	0,61	0,09		1,88		2,50	
29	0,71	0,09		10,11	Excedeu	2,50	
DHT - I	20,53	46,03	Excedeu	8,33	Excedeu	20,00	C
3	17,05	58,43	Excedeu	0,79		15,00	
5	6,56	6,64	Excedeu	5,95	Excedeu	15,00	
7	6,22	1,68		7,63	Excedeu	15,00	
9	4,55	0,99		0,09		15,00	
11	3,96	2,38		6,25	Excedeu	7,00	
13	2,71	6,05	Excedeu	6,64	Excedeu	7,00	
15	1,26	0,19		0,89		7,00	
17	2,14	2,48		5,15	Excedeu	6,00	
19	2,00	1,58		4,06		6,00	
21	1,06	0,19		1,28		6,00	
23	1,56	0,79		42,95	Excedeu	2,50	
25	1,59	6,05	Excedeu	22,51	Excedeu	2,50	
27	1,22	0,39		1,58		2,50	
29	1,42	0,89		3,67		2,50	

As Figuras 5.6 e 5.7 apresentam o comportamento das distorções harmônicas totais de corrente (DHT-I) nas fases A, B e C no secundário do transformador 1, contemplando a terceira campanha de medição. A Figura 5.6 mostra os resultados das medições de todas as cargas conectadas no transformador 1 juntamente com o sistema fotovoltaico e quando inicia a geração de potência (começo do dia) através do SFV, percebe-se um pico de distorção harmônica. No decorrer do dia ocorre decréscimo do valor, entretanto não tende a zero, pois nessa situação mesmo o SFV propiciando baixos valores de harmônicos, tem-se a participação das cargas, que contribui na elevação dos valores de harmônicos. No final do dia ocorre diminuição de geração e assim percebe-se novamente um pico de distorção harmônica, durante a noite e até o amanhecer em virtude da ausência da irradiação solar não ocorre a geração de potência. Entretanto, os valores de harmônicos são maiores em relação ao período do dia em que ocorre a geração, isso, em virtude da atuação das cargas alimentadas pelo transformador 1 durante a noite. Na Figura 5.7, onde as medições foram realizadas apenas no SFV, percebe-se que durante o dia (geração de energia) os valores de harmônicos são baixos, inclusive tendem a zero, comportamento contrário ao que ocorre na Figura 5.6, pois os valores de harmônicos são maiores.

É importante salientar que os picos de distorções harmônicas no início e término da geração de energia, acontecem em horários que ocorrem baixa injeção de corrente na rede, dessa forma não afetando os indicadores de qualidade do produto do sistema elétrico. Entretanto, nos outros horários identifica-se elevação dos valores de distorções harmônicas de corrente, oriunda da contribuição conjunta do SFV e das cargas instaladas no transformador 1 e assim afetando a qualidade da energia do local em estudo.

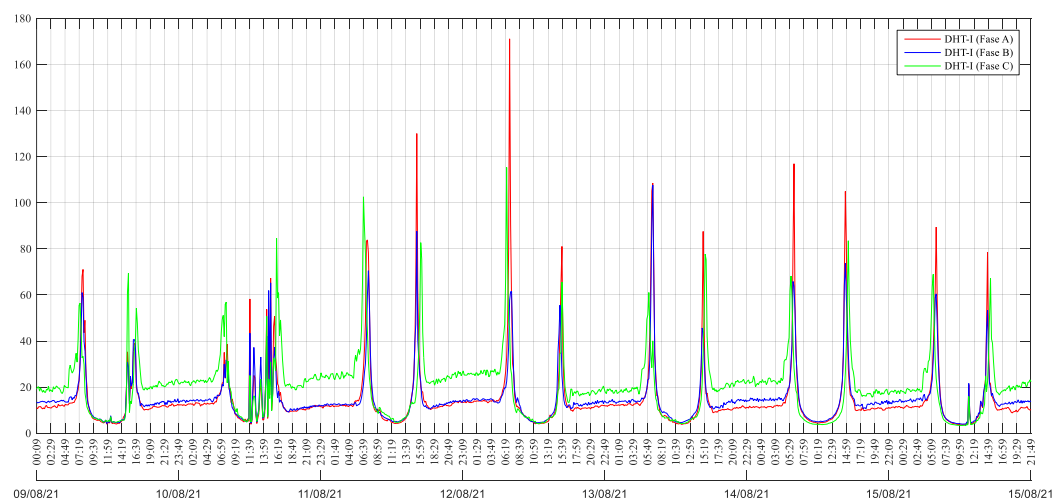


Figura 5.6 – Comportamento das DHT-I nas fase A, B e C (transformador 1 / terceira campanha).

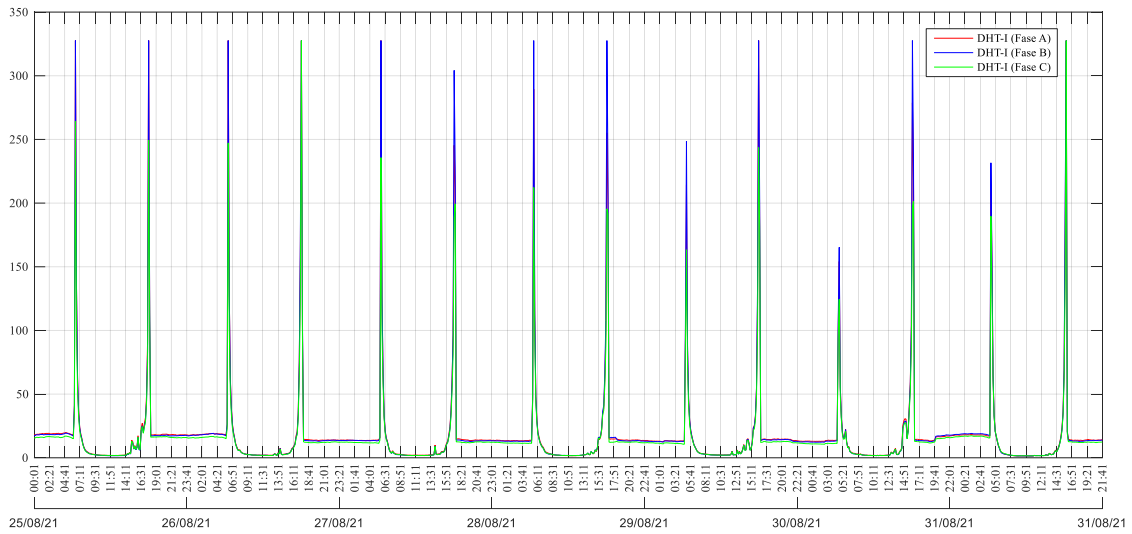


Figura 5.7 – Comportamento das DHT-I nas fase A, B e C (transformador 1 / terceira campanha / SFV).

5.2.5 Desequilíbrio de tensão

A Figura 5.8 mostra a curva do desequilíbrio de tensão na segunda campanha de medição no secundário do transformador 1 indicado na cor azul e observa-se que as medições apresentam valores dentro do intervalo de 0,1% a 0,6%. Esses valores obedecem os limites estabelecidos na Tabela 2.8, que permite até 3% de desequilíbrio de tensão em relação a 5% das 1008 amostras válidas, ou seja, valores que podem ser ultrapassados por 5% de um total de 1008 leituras válidas.

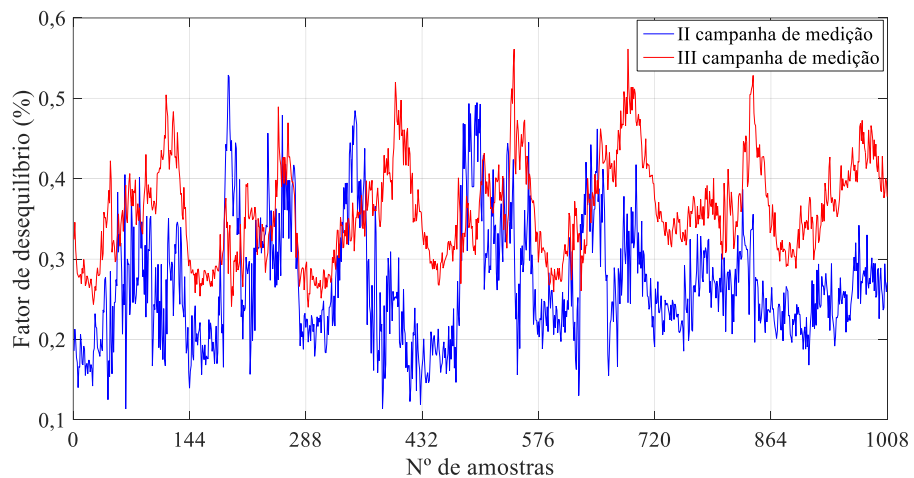


Figura 5.8 – Comportamento do desequilíbrio de tensão (transformador 1).

Quanto ao comportamento do desequilíbrio de tensão na terceira campanha de medição no secundário do transformador 1, indicado na cor vermelha observa-se que as medições apresentaram resultados análogos a segunda campanha, pois as variações mantiveram-se dentro do intervalo de 0,1% a 0,6%.

5.2.6 Variação de frequência

A Figura 5.9 apresenta a frequência registrada no secundário do transformador 1 na segunda campanha de medição indicado na cor azul. Constata-se que os valores medidos no período encontram-se no intervalo de 59,9 a 60,1 Hz para as condições normais de operação, desta forma apresentando um comportamento estável. O valor médio da frequência fundamental no intervalo é 60,00 Hz, e os valores máximos e mínimos medidos são de 60,08 Hz e 59,90 Hz, conforme mostra a Tabela 5.11.

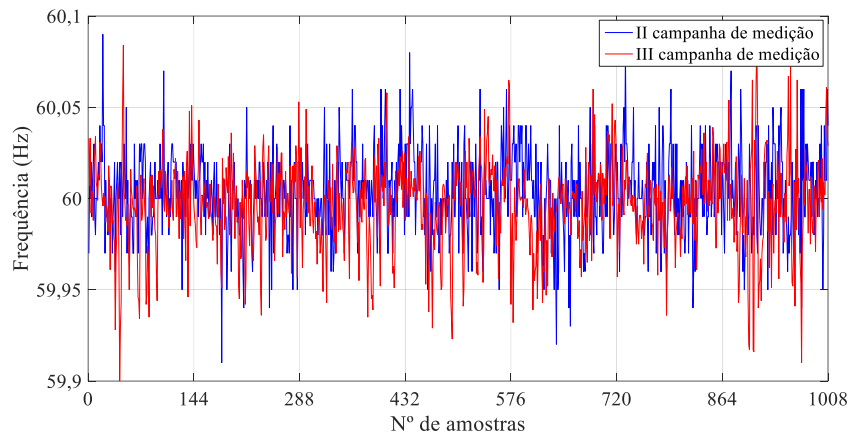


Figura 5.9 – Comportamento da frequência (transformador 1).

Quanto ao comportamento da frequência na terceira campanha de medição no secundário do transformador 1, indicado na cor vermelha na Figura 5.9 é possível observar que não ocorreu nenhuma violação dos valores, pois encontram-se no intervalo de 59,9 a 60,1 Hz para as condições normais de operação. O valor médio da frequência fundamental no intervalo é 59,99 Hz, e os valores máximos e mínimos medidos são de 60,08 Hz e 59,90 Hz, conforme mostra a Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Valores dos indicadores da frequência (transformador 1).

Indicador	Segunda campanha de medição	Terceira campanha de medição
Frequência média	60,00 Hz	59,99 Hz
Frequência máxima	60,08 Hz	60,08 Hz
Frequência mínima	59,90 Hz	59,90 Hz
Frequência máxima permitida	60,10 Hz	60,10 Hz
Frequência mínima permitida	59,90 Hz	59,90 Hz

5.3 SEGUNDA E TERCEIRA CAMPANHA DE MEDIÇÃO NO SECUNDÁRIO DO TRANSFORMADOR 2

A segunda campanha de medição foi realizada no período de 27/05 a 02/06/2019 (ponto de medição M2), após a efficientização do sistema de iluminação e a terceira campanha de medição foi realizada no período de 16/08 a 23/08/2021 (ponto de medição M2), após a implantação do sistema fotovoltaico. O monitoramento foi realizado no secundário do transformador 2 conforme apresentado na seção 4.2 e os resultados são descritos nas seções 5.3.1 a 5.3.6.

5.3.1 Tensão em regime permanente

A Tabela 5.12 apresenta os resultados referente os níveis de tensão em regime permanente das tensões entre fase e fase (Vab, Vbc e Vca) no secundário do transformador 2 para as duas campanhas de medições.

Na segunda campanha de medição os valores variaram dentro da faixa de tensão adequada, mesmo apresentando valor máximo de 390,06 V e valor mínimo de 370,80 V. Os índices DRC e DRP, apresentaram valores percentuais iguais a 0,00%, pois nenhuma amostra apresentou valor dentro da faixa precária e crítica.

Quanto a terceira campanha é possível identificar que o comportamento das tensões entre fase e fase tiveram resultados análogos ao da segunda campanha, pois em nenhum momento violaram os limites máximos permitido pelo Módulo 8 do PRODIST.

Tabela 5.12 – Valores dos indicadores do nível de tensão em regime permanente (tensão de linha / transformador 2).

Segunda campanha de medição				
Indicador	Tensão entre fases			Limite máximo permitido
	Vab	Vbc	Vca	
V _{máxima}	388,48 V	388,16 V	390,06 V	399,00 V
V _{mínima}	371,53 V	370,80 V	371,38 V	350,00 V
V _{média}	381,45	380,96 V	382,53 V	
DRP	0,00 %	0,00 %	0,00 %	3,00 %
DRC	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,50 %
Terceira campanha de medição				
Indicador	Tensão entre fases			Limite máximo permitido
	Vab	Vbc	Vca	
V _{máxima}	380,12	380,10	381,94	399,00 V
V _{mínima}	363,20	363,08	365,24	350,00 V
V _{média}	373,67	373,11	375,35	
DRP	0,00 %	0,00 %	0,00 %	3,00 %
DRC	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,50 %

Na segunda situação avaliou-se os níveis de tensão em regime permanente das tensões entre fase e neutro (V_{an} , V_{bn} e V_{cn}) no secundário do transformador 2 para as duas campanhas e os resultados são mostrados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Valores dos indicadores do nível de tensão em regime permanente (tensão entre fase e neutro / transformador 2).

Segunda campanha de medição				
Indicador	Tensão entre fase e neutro			Limite máximo permitido
	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	
$V_{máxima}$	224,87 V	224,10 V	224,68 V	231,00 V
$V_{mínima}$	215,20 V	213,50 V	213,85 V	202,00 V
$V_{média}$	220,80 V	219,78 V	220,45 V	
DRP	0,00 %	0,00 %	0,00 %	3,00 %
DRC	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,50 %
Terceira campanha de medição				
Indicador	Tensão entre fase e neutro			Limite máximo permitido
	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	
$V_{máxima}$	220,20	219,14	220,14	231,00 V
$V_{mínima}$	210,38	209,38	210,42	202,00 V
$V_{média}$	216,40	215,19	215,26	
DRP	0,00 %	0,00 %	0,00 %	3,00 %
DRC	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,50 %

Na segunda campanha de medição nenhuma amostra apresentou valor dentro da faixa precária e crítica, portanto os valores de DRC e DRP foram iguais a 0,00%. O valor máximo de tensão foi igual a 224,87 V e o valor mínimo igual a 213,50 V, isto é, dentro da faixa de tensão adequada.

Quanto ao comportamento das tensões entre fases e neutro na terceira campanha de medição é possível observar algumas variações nos valores, onde o valor máximo medido foi 220,20 V e o valor mínimo medido foi 209,38 V, porém mantiveram-se dentro da faixa adequada, que é entre 231,00 V e 202,00 V, conseqüentemente os valores de DRC e DRP foram iguais a 0,00%.

5.3.2 Fator de potência

No período de 27/05 a 02/06/2019 realizou-se as medições de fator de potência no secundário do transformador 2 (ponto M2), contemplando a segunda campanha de medição e o resultado é mostrado na Tabela 5.14. Constatou-se que dentre as 1008 amostras válidas, apenas 3,27% das amostras apresentaram valores abaixo de 0,92 com relação ao fator de potência total. Na fase A observou-se um índice igual a 0,09%, na fase B igual a 0,00% e na fase C igual a

0,39%; portanto poucas amostras abaixo do fator de potência recomendado, dessa forma não comprometendo o sistema.

Tabela 5.14 – Valores dos indicadores do fator de potência (transformador 2).

Segunda campanha de medição		
Fases	Fator de potência	
	Valor médio	Número de amostras menores que 0,92 (%)
A	0,98	0,09%
B	0,99	0,00%
C	0,99	0,39%
Total	0,97	3,27%
Terceira campanha de medição		
Fases	Fator de potência	
	Valor médio	Número de amostras menores que 0,92 (%)
A	0,87	39,08
B	0,86	47,02
C	0,89	31,34
Total	0,79	100,00

A terceira campanha de medição no secundário do transformador 2 (ponto M2), foi realizada no período de 16/08 à 23/08/2021 e é possível perceber alterações consideráveis nos valores do fator de potência. Na fase A o índice de 39,08% de amostras apresentaram valores abaixo de 0,92, na fase B o índice foi de 47,02%, na fase C foi de 31,34% e na situação mais crítica o fator de potência total foi igual a 100,00%. Tais resultados podem ser justificados pelo baixo consumo de energia constatado durante a terceira campanha de medição, onde o transformador operou quase a vazio, pois na segunda campanha constatou-se o valor médio de corrente medido da fase C igual a 66,51 A, entretanto na terceira campanha o valor médio de corrente medido da fase C foi igual a 5,08 A, desta forma identificando um decréscimo de 92,37% do valor da corrente elétrica, conforme mostrado na Tabela 5.18.

5.3.3 Distorção harmônica de tensão

A Tabela 5.15 mostra o comportamento das distorções harmônicas totais de tensões nas fases A, B e C, no secundário do transformador 2, abordando a segunda e a terceira campanha de medição.

Tabela 5.15 – Valores das distorções harmônicas totais de tensões (DHT-V) nas fases A, B e C (transformador 2).

Segunda campanha de medição						
Ordem harmônica	Mínimo (%)	Médio (%)	Máximo (%)	P95 (%)	Máximo permitido (%)	Fase
DHT - V	1,45	1,97	2,84	0,00	10,00	A
DHT - V	1,58	1,96	2,61	0,00	10,00	B
DHT - V	1,47	1,85	2,56	0,00	10,00	C
Terceira campanha de medição						
Ordem Harmônica	Mínimo (%)	Médio (%)	Máximo (%)	P95 (%)	Máximo permitido (%)	Fase
DHT - V	2,09	2,64	3,13	0,00	10,00	A
DHT - V	2,15	2,70	3,16	0,00	10,00	B
DHT - V	2,05	2,60	3,18	0,00	10,00	C

Na segunda e terceira campanha, observa-se que o número de amostras mesmo apresentando algumas variações entre valores mínimos e máximos, encontra-se abaixo do valor máximo permitido. O campo P95% apresenta valor igual a 0,00% em todas as fases, significa então que nenhuma amostra dentre as 1008 medidas ultrapassaram o valor máximo permitido que é 10,00%.

Quanto aos perfis das distorções harmônicas individuais das tensões nas fases A, B e C, as Tabelas 5.16 e 5.17 apresentam os resultados no transformador 2, abordando a segunda e a terceira campanha de medição. Constata-se que os resultados na segunda e terceira campanha estão em conformidade com o Módulo 8 do PRODIST, pois os limites estabelecidos para as componentes ímpares não múltiplas de 3 e as componentes múltiplas de 3, isto é, as DTT_1 e DTT_3 são iguais a 7,50% e 6,50% respectivamente, todavia os valores medidos apresentaram resultados inferiores.

Tabela 5.16 – Valores das distorções harmônicas individuais das tensões nas fases A, B e C (transformador 2 / segunda campanha de medição).

Segunda campanha de medição				
Ordem harmônica	Médio (%)	P95 (%)	Máximo permitido (%)	Fase
3	0,13	0,00	6,50	A
5	1,66	0,00	7,50	
7	0,91	0,00	7,50	
9	0,21	0,00	6,50	
11	0,17	0,00	7,50	
13	0,17	0,00	7,50	
15	0,09	0,00	6,50	
17	0,20	0,00	7,50	
19	0,12	0,00	7,50	
21	0,06	0,00	6,50	
23	0,14	0,00	7,50	
25	0,05	0,00	7,50	
27	0,03	0,00	6,50	
29	0,03	0,00	7,50	
3	0,23	0,00	6,50	B
5	1,67	0,00	7,50	
7	0,89	0,00	7,50	
9	0,08	0,00	6,50	
11	0,18	0,00	7,50	
13	0,16	0,00	7,50	
15	0,08	0,00	6,50	
17	0,15	0,00	7,50	
19	0,11	0,00	7,50	
21	0,06	0,00	6,50	
23	0,13	0,00	7,50	
25	0,04	0,00	7,50	
27	0,02	0,00	6,50	
29	0,03	0,00	7,50	
3	0,27	0,00	6,50	C
5	1,60	0,00	7,50	
7	0,75	0,00	7,50	
9	0,15	0,00	6,50	
11	0,15	0,00	7,50	
13	0,15	0,00	7,50	
15	0,10	0,00	6,50	
17	0,15	0,00	7,50	
19	0,09	0,00	7,50	
21	0,05	0,00	6,50	
23	0,15	0,00	7,50	
25	0,04	0,00	7,50	
27	0,03	0,00	6,50	
29	0,03	0,00	7,50	

Tabela 5.17 – Valores das distorções harmônicas individuais das tensões nas fases A, B e C (transformador 2 / terceira campanha de medição).

Terceira campanha de medição				
Ordem harmônica	Médio (%)	P95 (%)	Máximo permitido (%)	Fase
3	0,15	0,00	6,50	A
5	2,34	0,00	7,50	
7	1,13	0,00	7,50	
9	0,05	0,00	6,50	
11	0,12	0,00	7,50	
13	0,10	0,00	7,50	
15	0,05	0,00	6,50	
17	0,06	0,00	7,50	
19	0,07	0,00	7,50	
21	0,01	0,00	6,50	
23	0,03	0,00	7,50	
25	0,04	0,00	7,50	
27	0,01	0,00	6,50	
29	0,02	0,00	7,50	
3	0,70	0,00	6,50	B
5	2,45	0,00	7,50	
7	1,05	0,00	7,50	
9	0,04	0,00	6,50	
11	0,14	0,00	7,50	
13	0,07	0,00	7,50	
15	0,01	0,00	6,50	
17	0,07	0,00	7,50	
19	0,06	0,00	7,50	
21	0,01	0,00	6,50	
23	0,02	0,00	7,50	
25	0,04	0,00	7,50	
27	0,01	0,00	6,50	
29	0,01	0,00	7,50	
3	0,11	0,00	6,50	C
5	2,33	0,00	7,50	
7	1,07	0,00	7,50	
9	0,07	0,00	6,50	
11	0,17	0,00	7,50	
13	0,06	0,00	7,50	
15	0,01	0,00	6,50	
17	0,07	0,00	7,50	
19	0,06	0,00	7,50	
21	0,01	0,00	6,50	
23	0,02	0,00	7,50	
25	0,06	0,00	7,50	
27	0,01	0,00	6,50	
29	0,02	0,00	7,50	

5.3.4 Distorção harmônica de corrente

Nessa seção avaliou-se os resultados referente as distorções harmônicas totais e individuais de corrente nas fases A, B e C obtido no secundário do transformador 2, durante a segunda e terceira campanha de medição. Inicialmente é apresentada a Tabela 5.18, que mostra os resultados referente o comportamento da corrente elétrica nas fases A, B e C, que foram realizados no mesmo período de medições das distorções harmônicas e o monitoramento foi realizado no secundário do transformador 2 (ponto M2).

Tabela 5.18 – Valores de corrente nas fases A, B e C no secundário do transformador 2.

Segunda campanha de medição	
Corrente elétrica nas fases	Valor médio (A)
A	63,27 A
B	59,21 A
C	66,51 A
Terceira campanha de medição	
Corrente elétrica nas fases	Valor médio (A)
A	12,49 A
B	16,10 A
C	5,08 A

Os valores especificados na Tabela 5.18 foram utilizados para determinar a relação entre a corrente de curto-circuito (I_{CC}) no PAC (Ponto de Acoplamento Comum) e a corrente de demanda da carga (I_L), para assim obterem os valores máximos permitidos (%) das distorções harmônicas totais e individuais de corrente nas fases A, B e C, conforme descrito na metodologia. Para realizar a conversão dos valores para o primário do transformador 2 utilizou a relação de transformação dos transformadores de corrente instalados, que é de 150/5 na segunda campanha e de 300/5 na terceira campanha. Na segunda campanha as correntes médias nas fases A, B e C no primário do transformador 2 foram de 2,10 A, 1,97 A e 2,21 A respectivamente. Na terceira campanha as correntes médias nas fases A, B e C foram de 0,41 A, 0,53 A e 0,16 A respectivamente.

A Tabela 5.19 apresenta o comportamento das distorções harmônicas totais de corrente nas fases A, B e C no secundário do transformador 2, contemplando a segunda e a terceira campanha de medição.

Tabela 5.19 – Valores das distorções harmônicas totais de corrente (DHT-I) nas fases A, B e C (transformador 2).

Segunda campanha de medição						
Ordem harmônica	Mínimo (%)	Médio (%)	Máximo (%)	P95 (%)	Máximo permitido (%)	Fase
DHT - I	5,72	15,32	38,49	27,28	20,00	A
DHT - I	4,98	10,67	36,41	3,37	20,00	B
DHT - I	5,01	10,08	53,98	2,27	20,00	C
Terceira campanha de medição						
Ordem Harmônica	Mínimo (%)	Médio (%)	Máximo (%)	P95 (%)	Máximo permitido (%)	Fase
DHT - I	2,96	14,39	26,66	23,71	20,00	A
DHT - I	5,23	7,61	11,78	0,00	20,00	B
DHT - I	6,77	17,76	163,25	26,98	20,00	C

Na segunda campanha o valor máximo permitido é 20,00% para as distorções harmônicas totais de corrente nas fases A, B e C, entretanto identificou-se uma situação em que o limite foi violado, nesse caso na fase A, onde o índice de 27,28% referente a 1008 leituras realizadas ultrapassaram o valor permitido de 20,00%. Quanto a terceira campanha, o valor máximo permitido também é 20,00% e a violação ocorreu nas fases A e B, onde apresentaram os índices de 23,71% e 26,98% respectivamente.

Quanto as distorções harmônicas individuais das correntes nas fases A, B e C as Tabelas 5.20 e 5.21 mostram os resultados da segunda e terceira campanha realizada no transformador 2.

Na segunda campanha, observa-se que as distorções harmônicas individuais das correntes nas fases A, B e C, apresentam resultados abaixo dos valores máximo permitido em quase todas as situações, exceto na terceira harmônica (fase A) com índice igual a 30,05% e na vigésima terceira harmônica (fase A) com índice igual a 7,93%, que excederam o índice de 5% de amostras em não conformidade. Na fase C ocorreu transgressão na 23ª com índice igual a 6,44%. Vale ressaltar que o campo P95(%), significa que dentre 1008 amostras, 95% devem estar em conformidade.

Com relação a terceira campanha, observa-se que as distorções harmônicas individuais das correntes ocorreram com maior incidência na fase C, onde as violações foram identificadas na 5ª, 11ª, 23ª e 25ª componentes harmônicas com os índices de 27,38%, 21,92%, 10,01% e 27,57% respectivamente. Na fase A ocorreu apenas na 3ª componente e o valor foi de 32,83%.

Tabela 5.20 – Valores das distorções harmônicas individuais das correntes nas fases A, B e C (transformador 2 / segunda campanha de medição).

Segunda campanha de medição				Fase
Ordem harmônica	Médio (%)	P95 (%)	Máximo permitido (%)	
3	11,68	30,05	15,00	A
5	6,33	0,99	15,00	
7	4,32	0,00	15,00	
9	3,28	0,00	15,00	
11	2,39	0,39	7,00	
13	1,40	0,00	7,00	
15	1,08	0,00	7,00	
17	1,96	0,09	6,00	
19	1,61	0,00	6,00	
21	0,64	0,00	6,00	
23	1,22	7,93	2,50	
25	0,48	0,00	2,50	
27	0,36	0,00	2,50	
29	0,24	0,00	2,50	
3	6,49	1,09	15,00	B
5	6,24	1,98	15,00	
7	2,98	0,00	15,00	
9	1,78	0,00	15,00	
11	1,33	0,09	7,00	
13	1,37	0,00	7,00	
15	1,13	0,00	7,00	
17	1,22	0,00	6,00	
19	1,78	1,48	6,00	
21	0,71	0,00	6,00	
23	1,07	2,28	2,50	
25	0,41	0,00	2,50	
27	0,22	0,00	2,50	
29	0,21	0,00	2,50	
3	7,39	1,98	15,00	C
5	4,26	0,29	15,00	
7	2,08	0,00	15,00	
9	2,02	0,00	15,00	
11	1,87	1,38	7,00	
13	1,26	0,29	7,00	
15	0,94	0,00	7,00	
17	1,52	0,99	6,00	
19	1,35	0,79	6,00	
21	0,43	0,00	6,00	
23	1,23	6,44	2,50	
25	0,41	0,39	2,50	
27	0,22	0,00	2,50	
29	0,29	0,00	2,50	

Tabela 5.21 – Valores das distorções harmônicas individuais das correntes nas fases A, B e C (transformador 2 / terceira campanha de medição).

Terceira campanha de medição				
Ordem harmônica	Médio (%)	P95 (%)	Máximo permitido (%)	Fase
3	11,16	32,83	15,00	A
5	6,02	0,00	15,00	
7	4,13	0,00	15,00	
9	2,21	0,00	15,00	
11	2,06	0,00	7,00	
13	2,22	0,00	7,00	
15	1,67	0,00	7,00	
17	0,80	0,09	6,00	
19	0,56	0,00	6,00	
21	0,43	0,00	6,00	
23	0,43	0,00	2,50	
25	0,22	0,00	2,50	
27	0,29	0,00	2,50	
29	0,29	0,00	2,50	
3	4,46	0,00	15,00	
5	5,36	0,00	15,00	
7	1,15	0,00	15,00	
9	0,53	0,00	15,00	
11	0,30	0,00	7,00	
13	0,46	0,00	7,00	
15	0,32	0,00	7,00	
17	0,19	0,09	6,00	
19	0,16	0,00	6,00	
21	0,21	0,00	6,00	
23	0,20	0,00	2,50	
25	0,17	0,00	2,50	
27	0,23	0,00	2,50	
29	0,09	0,00	2,50	
3	4,15	0,49	15,00	C
5	14,11	27,38	15,00	
7	3,96	2,28	15,00	
9	1,77	0,09	15,00	
11	5,04	21,92	7,00	
13	3,00	4,06	7,00	
15	2,38	2,87	7,00	
17	0,73	0,49	6,00	
19	1,43	0,19	6,00	
21	1,58	0,69	6,00	
23	1,03	10,01	2,50	
25	2,34	27,57	2,50	
27	0,75	1,09	2,50	
29	0,91	4,36	2,50	

5.3.5 Desequilíbrio de tensão

A Figura 5.10 mostra o percentual de desequilíbrio de tensão obtidos na segunda e terceira campanha de medição realizadas no secundário do transformador 2 (ponto M2). A segunda campanha indicada na cor azul apresenta valores dentro do intervalo de 0,0% a 0,4%. Nota-se que não houve, em nenhum momento transgressão dos limites estabelecidos, pois o valor máximo permitido é igual a 3%.

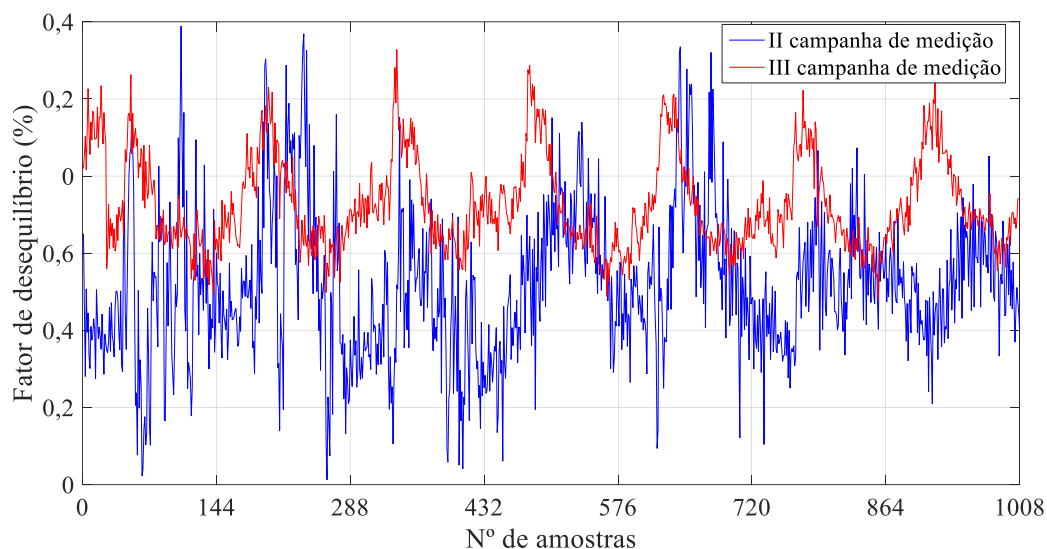


Figura 5.10 – Comportamento do desequilíbrio de tensão (transformador 2).

Na terceira campanha, indicada na cor vermelha ocorreu algumas variações nos valores da tensão, porém mantiveram-se dentro do intervalo de 0,0% a 0,4%, desta forma não violando os limites estabelecido pelo Módulo 8 do PRODIST.

5.3.6 Variação de frequência

A frequência medida no secundário do transformador 2, na segunda campanha é mostrado na Figura 5.11, indicada na cor azul e Tabela 5.22. Nota-se algumas oscilações no gráfico, com valor médio igual a 60,00 Hz, valor mínimo igual a 59,92 Hz e valor máximo igual a 60,10 Hz; porém dentro da faixa permitida de operação.

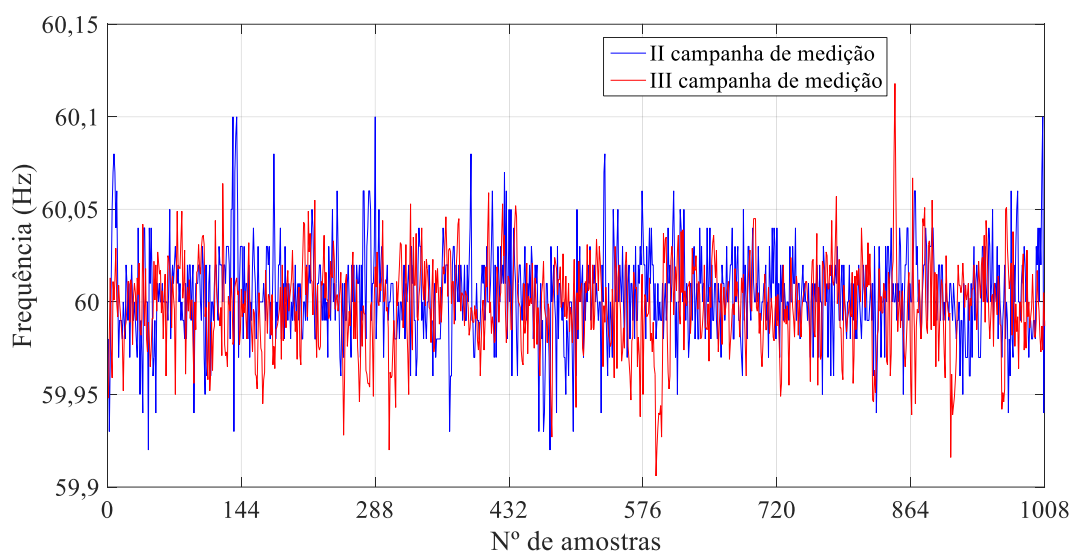


Figura 5.11 – Comportamento da frequência (transformador 2).

Tabela 5.22 – Valores dos indicadores da frequência (transformador 2).

Indicador	Segunda campanha de medição	Terceira campanha de medição
Frequência média	60,00 %	59,99 %
Frequência máxima	60,10 %	60,11 %
Frequência mínima	59,92 %	59,90 %
Frequência máxima permitida	60,10 %	60,10 %
Frequência mínima permitida	59,90 %	59,90 %

Quanto ao comportamento da frequência medida no secundário do transformador 2, na terceira campanha de medição, indicado na cor vermelha na Figura 5.11, constata-se que mesmo ocorrendo algumas variações nos valores, todas as amostras mantiveram-se no intervalo de 59,9 a 60,1 Hz para as condições normais de operação.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo foram apresentados os resultados de medição na primeira campanha, realizada nos primários dos transformadores 1 e 2, onde contemplou as cargas existentes no local, que são: o antigo sistema de iluminação e outras cargas onde são alimentadas pelos transformadores mencionados. Na segunda campanha de medição, realizada nos secundários dos transformadores 1 e 2, considerou as mesmas cargas existentes no local, porém com a inclusão do novo sistema de iluminação, no qual passou por um processo de *retrofit*. Por fim a terceira

campanha, realizada nos secundários dos transformadores 1 e 2, onde considerou todas as cargas do IFG Campus Goiânia e ainda o sistema fotovoltaico, desta forma contemplando todas as etapas do projeto de eficiência energética.

Na primeira campanha o monitoramento foi realizado nos seguintes fenômenos dos produtos: tensão em regime permanente, fator de potência, distorção harmônica de tensão, desequilíbrio de tensão e variação de frequência. O estudo mostrou que os valores obtidos atenderam os limites estabelecidos no Módulo 8 do PRODIST, portanto não cabendo nenhuma medida preventiva.

Na segunda campanha o monitoramento foi realizado nos seguintes fenômenos dos produtos: tensão em regime permanente, fator de potência, distorção harmônica de tensão, distorção harmônica de corrente, desequilíbrio de tensão e variação de frequência. O resultado mostrou uma contribuição discreta a nível de distorção harmônica de corrente no transformador 1, onde ocorreu uma transgressão na fase C (23ª componente harmônica) com índice igual a 23,61%. No transformador 2 ocorreram violações na fase A (3ª e 23ª componente harmônica) e na fase C (23ª componente harmônica).

Quanto à terceira campanha o monitoramento foi realizado com os mesmos fenômenos abordados na segunda campanha. Com a influência do sistema fotovoltaico e as cargas instaladas percebeu-se um aumento considerável de distorções harmônicas de corrente em relação a segunda campanha, pois na segunda campanha, especificamente no transformador 1, onde está conectado o sistema fotovoltaico identificou apenas uma violação nos valores a nível de distorções individuais de corrente, entretanto na terceira campanha constatou-se a violação em onze situações. No transformador 2 e tomando como referência as distorções individuais de corrente, ocorreu na segunda campanha a transgressão dos valores em três situações, entretanto na terceira campanha ocorreu a violação em cinco situações. Diante do exposto, os harmônicos de corrente devem ser mitigados, pois a partir do momento que ocorre a violação dos limites normatizados de forma tão acentuada, esses passam a tornarem problemas. Portanto, faz necessário a instalação de filtros com o intuito de drenar as correntes harmônicas, retirando-as ou impedindo-as de entrar no sistema.

Outro aspecto observado na terceira campanha é que os dois transformadores apresentaram baixo fator de potência, entretanto vale salientar que no período que foram realizadas as medições no IFG – Campus Goiânia, constatou-se um baixo consumo de energia em virtude da paralisação das atividades letivas, desta forma justificado o resultado apresentado.

É importante salientar que a segunda e a terceira campanhas de medição foram realizadas com apenas um instrumento, conforme sugerido na metodologia, desta forma não comprometendo a análise dos resultados. Entretanto as medições poderiam ser realizadas com mais instrumentos, e assim permitir a análise simultânea do comportamento dos fenômenos nos dois transformadores.

6 CONCLUSÃO

O crescente aumento da utilização de equipamentos em que seu funcionamento aplica-se à conversão de CA para CC, o elevado índice de instalações de SFV, o *retrofit* de sistema de iluminação através de lâmpadas baseadas em Diodos Emissores de Luz (LED), dentre outros exemplos; tem contribuído significativamente no tocante à preocupação se o sistema elétrico está funcionando dentro do que é considerado satisfatório em termos de qualidade da energia.

Outro aspecto a ser considerado é que mesmo com o aumento da implantação de geração distribuída fotovoltaica, os distúrbios na rede produzidos por essas unidades geradoras, normalmente são inobservados, quando na realidade podem apresentar algumas preocupações futuras, principalmente com relação as distorções harmônicas de corrente.

Nessa perspectiva, esse trabalho teve como objetivo principal avaliar a qualidade da energia elétrica, através de estudo de caso, onde inicialmente realizou a primeira campanha de medição nas instalações elétricas do local de estudo, antes da implantação do projeto de eficiência energética. Em seguida, realizou a segunda campanha de medição que contemplou o cenário após o *retrofit* da iluminação e por fim, executou a terceira campanha após a implantação do sistema fotovoltaico. Essas ações tiveram como intuito verificar se as instalações elétricas do local comportaram-se em conformidade com os limites estabelecidos pelas normas vigentes.

Diante dos resultados obtidos e comparando a primeira com a segunda campanha observou-se que nas duas situações os fenômenos da qualidade do produto mantiveram-se dentro dos limites estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST e a Norma IEEE 519 – 2014. Inclusive não apresentando alterações relevantes após a implantação no novo sistema de iluminação, desta forma identificando-se pouca influência na injeção de harmônico a nível de corrente no sistema.

Avaliando os resultados da terceira campanha, observou-se considerável contribuição de distorções harmônicas de corrente. No futuro, tal situação poderá promover problemas para o sistema, desta forma sendo necessário a instalação de filtro passivo em paralelo com o circuito elétrico, pois trata-se da solução mais usual para se evitar que correntes harmônicas penetrem em determinadas partes do sistema elétrico.

Diante do exposto, conclui-se que o presente trabalho atingiu de forma satisfatória os objetivos propostos, ratificando, então, que realizar análise da qualidade da energia elétrica, permite identificar a causa e propor solução para mitigar possíveis danos causados nas instalações elétricas da edificação em estudo.

6.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram realizadas as seguintes contribuições:

- a) identificação da causa e proposta de solução para a mitigação das distorções harmônicas a nível de corrente;
- b) elaboração de relatório final que permita sistematizar os dados, apresentar os resultados com indicação de transgressões dos limites normatizados, medidas preventivas, dentre outros;
- c) comprovação da importância de realizar monitoramento nas instalações elétricas do consumidor quando a qualidade da energia, principalmente após a implantação de sistema fotovoltaico. Desta forma sendo de responsabilidade tanto do cliente quanto da concessionária de energia elétrica, conforme salientado na Norma IEEE Std 519.

As contribuições na forma de publicações de artigos foram:

- a) FURTADO, B. C.; MARTINS, A. M.; DOMINGOS, J. L.; ALVES, A. J. **Análise da qualidade de energia elétrica no IFG - Campus Goiânia, a partir de retrofit de iluminação.** CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA – XIV CBQEE, 2021, Foz do Iguaçu;
- b) MARTINS, A. M.; FURTADO, B. C.; FERREIRA, L. G. G. B. **Análise qualitativa de lâmpadas LED para aplicação em retrofit de iluminação.** CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA – XIV CBQEE, 2021, Foz do Iguaçu.

6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Embora o estudo realizado no presente trabalho contribua para um melhor entendimento da análise da qualidade da energia elétrica, são apresentados a seguir como objeto de estudo, demais aspectos que, eventualmente, foram apontados, mas não aprofundados e, ainda tópicos não abordados, porém relevante à continuidade e a contribuição da pesquisa, que são:

- a) realizar estudo de caso, norteado na metodologia apresentada neste trabalho, em planta industrial, propondo assim uma diferente composição de cargas, pois espera-se obter aumento nos indicadores de qualidade de energia, sobretudo em relação as distorções harmônicas de corrente;

- b) realizar análise dos diversos métodos que podem ser aplicados para atenuar as distorções harmônicas de corrente e assim apresentar melhor situação técnica e econômica para o IFG Campus Goiânia. Durante a campanha de medição utilizar mais analisadores de energia, desta forma obtendo medições simultâneas em pontos distintos;
- c) estender as análises realizadas neste trabalho para outros Campus do IFG que foram contemplados com o Programa de Eficiência Energética e utilizar mais analisadores de energia, permitindo, assim, realizar as campanhas de medição simultaneamente;
- d) realizar análise do impacto de Geração Distribuída de origem solar fotovoltaica sobre a rede de distribuição da concessionária;
- e) realizar avaliação dos impactos da agregação da energia solar fotovoltaica nos gastos com energia elétrica no IFG Campus Goiânia.

REFERÊNCIAS

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de Informações de Geração da Matriz de Energia Elétrica**. Brasília; ANEEL, 2021. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 05 mar. 2021.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, **Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**, Revisão 10, Brasília, DF, 2018. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Revis%C3%A3o_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9>. Acesso em: 02 abr. 2020.

ANEEL. Resolução normativa n° 414, de 9 de setembro de 2010. **Estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica de forma atualizada e consolidada**, 2010. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2010414.pdf>>. Acesso em: 09 jul. 2020.

ANEEL. Resolução normativa n° 505, de 26 de novembro de 2001. **Estabelece de forma atualizada e consolidada, as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente**, 2001. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/documents/656877/14486448/bres2001505.pdf>>. Acesso em: 29 set. 2021.

ANEEL. Relatório Técnico: Definição dos Procedimentos de Medição – Distorções Harmônicas, Desequilíbrio de Tensão, Flutuações de Tensão e Variações de Tensão de Curta Duração. 2014. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota%20T%C3%A9cnica_0105_SRD-Anexo%20I%20_Relat%C3%B3rio_3_FINAL.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2020.

ARÃO, L. F. L. **Avaliação Comparativa entre Métodos para Atribuição de Responsabilidades Devido ao Desequilíbrio de Tensão** [Distrito Federal] 2014. 111p., Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica

AYUB, M.; GAN, C. K.; KADIR, A. F. A. **The Impact of Grid-Connected PV Systems on Harmonic Distortion**. In: 2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies, IEEE, Ásia, 2014. p. 669-674.

BANDEIRA, S. L.; VIEIRA, R. G.; GUERRA, M. I. S. **Analysis of the Power Quality of a Grid-Connected Photovoltaic System**. IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, vol.18, n° 4, pp. 714 – 721, 2020.

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

BONATTO, B. D.; MERTENS, E. A.; FERNANDES, F. A. **Diagnóstico da qualidade de energia elétrica em clientes industriais**. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE A QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA – SBQEE, 3., Brasília, 1999. **Anais...** Brasília, DF: [s.n.], 1999.

CASTRO, F. C. **Distorção Harmônica de Corrente Produzida por Inversores Fotovoltaicos Conectados à Rede**. Goiânia: [s.n.], 2019. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Goiás

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>>. Acesso em: 01 de maio de 2020.

COPEL. **FATOR DE POTÊNCIA: Em busca da eficiência energética nas instalações elétricas**. 2020. 4p. Disponível em <[http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/fator_de_potencia/\\$FILE/fator_potencia.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/fator_de_potencia/$FILE/fator_potencia.pdf)>. Acesso em: 26 abril de 2020.

DECKMANN, S. M., POMILIO, J. A. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. 2018. UNICAMP/FEEC/DSE. Disponível em <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/it012.html>> Acesso em: 10 de abril de 2020.

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

ENEL. **CHAMADA PÚBLICA DE PROJETOS DA ENEL DISTRIBUIÇÃO GOIÁS CPP 002/2019**. Versão 4.1, Goiânia, 2019. Disponível em <<https://enel-go.chamadapublica.com.br/>> Acesso em: 05 de jun. 2020.

FARIA, A. F. D. **Eficiência energética e geração distribuída: Estudo de caso aplicado a sistema de iluminação, condicionamento ambiental e adição de fonte incentivada de energia elétrica**. Goiânia: [s.n.], 2016. Dissertação de mestrado - Instituto Federal de Goiás.

FERREIRA FILHO, A. L. **Análise do comportamento do fator de desequilíbrio frente à variação da amplitude e do ângulo da tensão**. 2008. 112 p. Tese de doutorado em engenharia elétrica (Doutorado) – UnB, Brasília.

FLUKE. **Fluke 434-II/435-II/437-II Analisadores de Qualidade de Potência e Energia Trifásicos**. Manual do Usuário. 180p. 2012. Disponível em <https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/F430-II_umpor0100.pdf> Acesso em: 07 de jul. 2020.

FURTADO, B. C.; MARTINS, A. M.; DOMINGOS, J. L.; ALVES, A. J. **Análise da qualidade de energia elétrica no IFG - Campus Goiânia, a partir de retrofit de iluminação**. CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA – XIV CBQEE, 2021, Foz do Iguaçu.

GCL. **Painel Solar GCL-P6/72 325WP – Especificações Técnica**. 2016. 2p. Disponível em <<https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-gcl-p6-72-325wp.html>> Acesso em: 11 de junho de 2020.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 4^a ed. São Paulo: Atlas, 2002.

IEC. Internacional Standard IEC 61.000-4-30, Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods, 2015.

IEC. 1453-2011 - IEEE Recommended Practice--Adoption of IEC 61000-4-15:2010, Electromagnetic compatibility (EMC)--Testing and measurement techniques--Flickermeter--Functional and design specifications. Disponível em: < <https://ieeexplore.ieee.org/document/6158539> > Acesso em: 11 jul. 2020

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

IFG. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.2020. Disponível em <<http://www.ifg.edu.br/goiania/apresentacao?showall=&start=3>> Acesso em: 14 de junho de 2020.

INDRA, N., ISMAIL, D., SYAFRUDIN, M., CHAN BAHAUDIN, R., SURYA, H. **Harmonic Monitoring at UniMAP Distributed Campus.** In: The 5th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2011), Shah Alam, Selangor, Malaysia : 6-7 June 2011

IRFAN I. MUJAWAR, KOMAL S. DUBAS, SUCHITRA V. ITTAM, SNEHA N. NAVGIRE, ISAK I. MUJAWAR. **Power Quality Audit of NKOCET-A Case Study.** In: IEEE International Conference on Energy Systems and Applications (ICESA 2015), Pune, India 30 Oct - 01 Nov, 2015.

LEÃO, R. P. S.; SAMPAIO, R. F.; ANTUNES, F. L. M. **Harmônicos em sistemas elétricos.** 1ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

LOURENÇO, T. G. M. **Avaliação da Qualidade de Energia Elétrica no Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará.** 2012. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, 2012.

MAGALHÃES, F. D. **Diagnóstico da qualidade da energia elétrica no Centro Tecnológico do Campus Goiabeiras da Universidade Federal do Espírito Santo.** Vitória: [s.n], 2017. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Espírito Santo.

MARTINS, A. S.; GABIATTI, G.; Bonan, G. **Entendendo o fator de potência.** Porto Alegre, 2012. Disponível em <<http://docplayer.com.br/8386604-Entendendo-o-fator-de-potencia.html>>. Acesso em: 22 out. 2020.

MATOS, J. M. (2012). **Avaliação dos Efeitos do Desequilíbrio de Tensão Sobre os Motores de Indução Trifásicos.** Trabalho de Graduação, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, pp. 79.

ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Submódulo 6.15 – Gerenciamento da qualidade da energia elétrica da Rede Básica,** Versão 2020. Disponível em:<http://apps08.ons.org.br/ONS.Sintegre.Proxy/ecmprsite/ecmfragments-docments/Subm%C3%B3dulo%206.15-OP_2020.12.pdf>. Acesso em:30 set. 2021.

PAULILLO, G. **Qualidade de Energia - Cap. I: Conceitos gerais sobre qualidade da energia.** 2013. 7p. Disponível em <http://www.osestoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/02/Ed84_fasc_qualidade_energia_cap1.pdf> Acesso em: 01 de maio de 2020.

PAULILLO, G.; TEIXEIRA, M. **Qualidade de Energia – Cap. II: Harmônicos - conceitos.** 2013a. 7p. Disponível em <http://www.osestoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/03/Ed85_fasciculo_qualidade_cap2.pdf> Acesso em 03 de maio de 2020.

PAULILLO, G.; TEIXEIRA, M. **Qualidade de Energia – Cap. VII: Flutuação de Tensão.** 2013b. 8p. Disponível em <http://www.osestoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/09/ed-90_Fasciculo_Cap-VII-Qualidade-de-energia.pdf> Acesso em 02 de maio de 2020.

PELÁGIO, P. R. F. S. **Estudo de viabilidade técnico-econômica para implantação de sistema de painéis fotovoltaicos no Campus Goiânia do IFG.** Goiânia: [s.n.], 2014. Dissertação de mestrado - Instituto Federal de Goiás.

RESENDE, J. W. **Harmônicos em Sistemas Elétricos.** Universidade Federal de Uberlândia, 2010. cap. 2, p.1-54

ROCHA, J. E. **Qualidade da energia elétrica.** 2016. Paraná, UTFPR, 2016. Disponível em <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/joaquimrocha/qualidade-da-energia-eletrica/Qualidade%20da%20Energia%20Eletrica%20_%20Apostila.pdf/view> Acesso em: 08 de maio de 2020.

TECNIA. **Relatório 3 - Projeto executivo – Ações de Eficiência Energética IFG.** Goiânia, p. 49. 2016.

TECNIA. **Relatório 3 - Projeto executivo - Minigeração fotovoltaica IFG.** Goiânia, p. 40. 2016.

TEIXEIRA, M.D.; BLOCK, P.A.B; RETORTA, F.S.; DONADON, A. R.; CAMARGO, J.C.; RONCOLATTO, R. A.; SALAMANCA, H.L.L. **Análise da Qualidade de Energia de um Sistema Fotovoltaico em Larga Escala.** In:XXII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI, 2016, Curitiba, Brasil, p. 1-11.

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

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

WANG, Y.; YAZDANPANAHI, H.; XU, W. **Harmonic impact of LED lamps and PV panels.** In: CANADIAN CONFERENCE OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING (CCECE), IEEE 26º, 2013, Canadá. **Anais...** Regina, SK: IEEE Canadá, 2013. p.1-4.

WEG. **Inversores String - SIW300H e SIW500H.** 2018. 36p. Disponível em <<http://static.weg.net/medias/downloadcenter/ha4/h35/WEG-inversores-string-SIW500H-SIW300H-50076575-pt.pdf>>. Acesso em: 06 de junho de 2020.

APÊNDICE A – RELAÇÃO ENTRE ICC/IL NO TRANSFORMADOR 1

Fases A, B e C (segunda campanha de medição):

$$\frac{I_{cc}}{I_L(A)} = \frac{4842,522 \text{ A}}{4,28 \text{ A}} = 1131,43$$

$$\frac{I_{cc}}{I_L(B)} = \frac{4842,522 \text{ A}}{4,14 \text{ A}} = 1169,69$$

$$\frac{I_{cc}}{I_L(C)} = \frac{4842,522 \text{ A}}{3,69 \text{ A}} = 1312,33$$

$$\frac{I_{cc}}{I_L} > 1000$$

Fases A, B e C (terceira campanha de medição):

$$\frac{I_{cc}}{I_L(A)} = \frac{4842,522 \text{ A}}{2,04 \text{ A}} = 2373,78$$

$$\frac{I_{cc}}{I_L(B)} = \frac{4842,522 \text{ A}}{2,31 \text{ A}} = 2096,32$$

$$\frac{I_{cc}}{I_L(C)} = \frac{4842,522 \text{ A}}{2,26 \text{ A}} = 2142,70$$

$$\frac{I_{cc}}{I_L} > 1000$$

ANEXO A – DISTRIBUIÇÃO DOS MÓDULOS NOS BLOCOS 300, 400, 500 E MINI-AUDITÓRIO DERMARTIN BIZERRA DA SILVA

Bloco	Inversor	Nº MPPT	Nº Entrada	Nº Strings	Nº Módulos	Potência (kWp)	
500	1	1	1	1	15	34,450	
			2	2	15		
		2	1	3	15		
			2	4	15		
			1	5	15		
	2	3	2	6	15		
			1	7	16		
		4	1	8	15		
			2	9	15		
			1	10	15		
2	2	1	11	15			
		2	12	15			
	3	1	13	15			
		2	14	16			
		1	14	16			
Total				212	68,900		
400	3	1	1	15	18	39,325	
			2	16	18		
		2	1	17	17		
			2	18	17		
		3	1	19	17		
			2	20	17		
		4	4	1	21		17
				1	22		18
	2		2	23	18		
			1	24	17		
	3		2	25	17		
			1	26	17		
	4	2	27	17			
		1	28	17			
Total				242	78,650		
300	5	1	1	29	15	37,050	
			2	30	15		
		2	1	31	16		
			2	32	16		
		3	1	33	16		
			2	34	16		
		4	1	35	20		
			1	36	15		
	6	1	2	37	15	37,050	
			1	38	16		
		2	2	39	16		
			1	40	16		
		3	2	41	16		
			1	42	20		
Total					228		74,100
Miniauditório			1	1	43		15
	2			44	15		
	2		1	45	16		

	7		2	46	16	
		3	1	47	16	
		4	1	48	15	
Total					93	30,225

Fonte: Adaptado de 3E ENGENHARIA (2019).