



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**RENAN FREITAS SILVA
FAGNER CHAGAS DE OLIVEIRA**

**ESTUDO DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DA SUBESTAÇÃO DE
ENERGIA III DO INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DO TOCANTINS - CAMPUS PALMAS**

**Palmas - TO
2021**

**RENAN FREITAS SILVA
FAGNER CHAGAS DE OLIVEIRA**

**ESTUDO DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DA SUBESTAÇÃO DE
ENERGIA III DO INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DO TOCANTINS - *CAMPUS* PALMAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso
de Engenharia Elétrica do Instituto
Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Tocantins – *Campus*
Palmas, como exigência à obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia
Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Augusto César dos
Santos.

**Palmas - TO
2021**

Ficha catalográfica em formato eletrônico: [ficha completa](#).

Silva, Renan Freitas; Oliveira, Fagner Chagas de
Estudo da Qualidade de Energia Elétrica da Subestação de Energia III do Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins – *Campus* Palmas.
Renan Freitas Silva / Fagner Chagas de Oliveira. – Palmas, 2021
82 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) -
Instituto Federal de Educação do Tocantins, *Campus* Palmas, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Augusto César dos Santos

1. Qualidade. 2. Energia. 3. Fornecimento . I. Título

RENAN FREITAS SILVA
FAGNER CHAGAS DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DA SUBESTAÇÃO DE
ENERGIA III DO INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DO TOCANTINS - *CAMPUS* PALMAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso
de Engenharia Elétrica do Instituto
Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Tocantins – *Campus*
Palmas, como exigência à obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia
Elétrica.

Aprovado em ____/____/____

BANCA AVALIADORA

Prof. Dr. Augusto César dos Santos (Orientador)
IFTO – *Campus* Palmas

Prof. Msc. Kaison Teodoro de Souza
IFTO – *Campus* Palmas

Eng. Esp. Ricardo Pedrosa de Brito
Energisa Tocantins

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ser o Autor da Vida, reconhecendo que através da sua bondade obtive sabedoria, força e disposição para prosseguir em mais esta etapa da minha vida.

A minha família que, em todos os momentos esteve ao meu lado, apoiando-me, incentivando-me durante todo este processo.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Augusto César dos Santos, pela orientação e paciência na elaboração deste trabalho.

Aos demais professores que contribuíram positivamente para o meu aprendizado.

A todos os amigos que fizeram parte desta jornada.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre qualidade de energia elétrica, considerando a energia fornecida em parte das cargas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins – *Campus* Palmas. Neste estudo, foi instalado um analisador de qualidade de energia para obtenção das medições com o intuito de analisar os dados coletados. Com estas medições foi possível desenvolver este trabalho de forma a concluir a análise sobre a tensão em regime permanente, fator de potência, distorções harmônicas, desequilíbrio de tensão, variação da frequência e variações de tensão de curta duração. Portanto, o objetivo é mostrar os fenômenos da qualidade do produto que está sendo fornecido ao consumidor IFTO – *Campus* Palmas, analisando a medição realizada em uma das subestações de energia.

Palavras-Chave: Qualidade de Energia, Qualidade do Produto, Fornecimento de Energia Elétrica.

ABSTRACT

This work presents a study on the quality of electric energy, considering the energy supplied in part of the loads of the Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins – *Campus* Palmas. In this study, a power quality analyzer was installed to obtain the measurements in order to analyze the collected data. With these measurements it was possible to develop this work in order to conclude the analysis on the voltage in steady state, power factor, harmonic distortions, voltage imbalance, frequency variation and short voltage variations. Therefore, the objective is to show the phenomena of the quality of the product that is being supplied to the consumer IFTO - *Campus* Palmas, analyzing the measurement performed in one of the power substations.

Key-words: Power Quality, Product Quality, Supply of Electricity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de afundamento de tensão na partida de motores	21
Figura 2 - Colapso de tensão.....	23
Figura 3 - Tensões desequilibradas em magnitude e fase	24
Figura 4 - Interrupção momentânea	24
Figura 5 - Exemplo de um sinal resultante da superposição das harmônicas de ordem ímpares.....	26
Figura 6 - Efeito de conexão de capacitor em uma rede elétrica.....	27
Figura 7 - Distribuição Acumulada Complementar da Sensação de Cintilação	46
Figura 8 - Esquema de ligação do analisador de energia PowerNET PQ-700	56
Figura 9 - Gráfico das tensões registradas (pu).....	59
Figura 10 - Gráfico da distribuição das tensões com o intervalo de 0,80 pu a 1,20 pu.....	62
Figura 11 - Gráfico das correntes registradas (A)	63
Figura 12 - Potência Aparente (kVA)	64
Figura 13 - Fator de Potência registrado	64
Figura 14 - Distorção Harmônica Total de Tensão medido	65
Figura 15 - Distorções Harmônicas até a 50ª ordem	66
Figura 16 - Fator de Desequilíbrio de Tensão apurado	68
Figura 17 - Severidade de Flutuação de Tensão de Curta Duração registrado.....	69
Figura 18 - Variação da Frequência registrado.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ordem, Frequência e Sequência das Distorções Harmônicas	26
Tabela 2 - Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV.....	38
Tabela 3 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220)	39
Tabela 4 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).....	43
Tabela 5 - Limites para os desequilíbrios de tensão.....	45
Tabela 6 - Limites para flutuação de tensão	47
Tabela 7 - Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração	49
Tabela 8 - Indicadores de conformidade de tensão da distribuidora local	50
Tabela 9 - Valores médios, máximos e mínimos das tensões registradas, por fase.....	60
Tabela 10 - Distribuição das tensões com o intervalo de 0,80 pu a 1,20 pu da tensão nominal....	61
Tabela 11 - Quantidade e percentual de medições de tensão Adequadas (Adeq), Violadas (Viol) e Inválidas (Inv)	62
Tabela 12 - Valores medidos para cada grandeza harmônica.....	65
Tabela 13 - Indicadores das distorções harmônicas totais registradas	66
Tabela 14 - Indicadores das flutuações de tensão registradas.....	68
Tabela 15 - Contabilização de eventos de VTCD	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

V	Unidade de medida de Tensão (Volts)
kV	Kilo-Volts
A	Unidade de medida de Corrente (Ampere)
kVA	Unidade de medida de Potência Aparente (Kilo-Volt-Ampere)
Hz	Unidade de medida de Frequência (Hertz)
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EUSD	Encargo de Uso do Sistema de Distribuição
IFTO	Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Tocantins
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
COVID-19	Corona Vírus Disease (Doença do Corona vírus)
DIT	Demais Instalações de Transmissão
SIN	Sistema Interligado Nacional
ONS	Operador Nacional do Sistema
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
CIGRE	<i>International Council on Large Electric Systems</i>
NEMA	<i>National Electrical Manufactures Association</i>
SE	Subestação de Energia
DRP	Duração Relativa da Transgressão para Tensão Precária
DRC	Duração Relativa da Transgressão para Tensão Crítica
222	Número de Leituras situadas nas faixas Precária
NLC	Número de Leituras situadas nas faixas Crítica
SDAT	Sistema de Distribuição de Alta Tensão
SDMT	Sistema de Distribuição de Média Tensão
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
TR	Tensão de Referência
TA	Tensão de Atendimento
TL	Tensão de Leitura
MME	Ministério de Minas e Energia
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração

p.u.	Por unidade
DTT%	Distorção Harmônica Total de Tensão
AMT	Afundamento Momentâneo de Tensão
FD	Fator de desequilíbrio de tensão
Pst	Severidade de Flutuação de Tensão de Curta Duração
Plt	Severidade de Flutuação de Tensão de Longa Duração
FP	Fator de potência
RMS	Root-Mean-Square (Raiz quadrada média)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. Justificativa.....	14
1.2. Problema.....	15
1.3. Objetivos	15
1.3.1. Objetivo Geral.....	15
1.3.2. Objetivos Específicos	15
1.4. Metodologia.....	16
1.5. Estrutura do Trabalho	17
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA.....	18
2.1. Principais distúrbios na rede elétrica	20
2.1.1. Afundamento de tensão (<i>voltage sag</i>)	21
2.1.2. Elevação de tensão (<i>voltage swell</i>).....	22
2.1.3. Sobretenção	22
2.1.4. Subtenção	22
2.1.5. Surto de tensão	22
2.1.6. Colapso de tensão.....	23
2.1.7. Desequilíbrio de tensões	23
2.1.8. Interrupção momentânea.....	24
2.1.9. Interrupção Temporária	24
2.1.10. Interrupção permanente.....	25
2.1.11. Distorção Harmônica	25
2.1.12. Oscilações transitórias.....	27
2.1.13. Flutuações de tensão	27
2.1.14. Cintilação luminosa.....	28
2.1.15. Distúrbios de baixa frequência ou subsíncronos ($f < 60 \text{ Hz}$)	28
2.1.16. Distúrbios de média frequência ($60 \text{ Hz} \leq f \leq 9 \text{ kHz}$)	28
2.1.17. Distúrbios de alta frequência ($9 \text{ kHz} \leq f \leq 30 \text{ MHz}$)	29
3. LEGISLAÇÃO SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA.....	30
3.1. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica	30
3.2. Resolução 414 da ANEEL	33
3.3. Prodist – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional.....	34
3.3.1. Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica	36
3.3.1.1. Tensão em Regime Permanente.....	37

3.3.1.2. Fator de Potência.....	40
3.3.1.3. Distorções Harmônicas	41
3.3.1.4. Desequilíbrio de Tensão	43
3.3.1.5. Flutuação de Tensão	45
3.3.1.6. Variação de Frequência	47
3.3.1.7. Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD)	48
3.4. Indicadores de QEE da Concessionária Local.....	50
3.5. Normas Internacionais referentes à Qualidade de Energia Elétrica	51
3.5.1. International Electrotechnical Commission (IEC)	51
3.5.2. Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)	51
3.5.3. International Council on Large Electric Systems (CIGRÉ).....	51
3.5.4. National Electrical Manufacturers Association (NEMA)	52
4. ESTUDO DE CASO	53
4.1. Metodologia empregada para medição.....	53
4.2. Instalação do medidor	55
4.3. Software utilizado – <i>Power Manager Desktop</i>	56
5. RESULTADOS E ANÁLISES	58
5.1. Tensão em Regime Permanente	58
5.2. Corrente, Potência Aparente e Fator de Potência.....	63
5.3. Distorções Harmônicas.....	65
5.4. Desequilíbrio de Tensão.....	67
5.5. Flutuação de Tensão	68
5.6. Variação de Frequência.....	69
5.7. Variações de Tensão de Curta Duração	70
6. CONCLUSÃO	72
7. REFERÊNCIAS	74
APÊNDICE A – Subestação de Energia III do IFTO – Campus Palmas onde foram realizadas as medições do trabalho	77
APÊNDICE B – Esquema de ligação do analisador de energia nas conexões secundárias do transformador	78
APÊNDICE C – Localização da subestação de energia III do IFTO	80
APÊNDICE D – Características do analisador de energia PQ-700 da fabricante IMS Power Quality	81

1. INTRODUÇÃO

O modo de vida moderno faz uso intensivo da eletricidade nas mais diversas áreas, proporcionando benefícios aos consumidores residenciais, comerciais e industriais de energia elétrica, seja no lazer, em climatização de ambientes, na conservação de alimentos, ou no conforto e facilidades domésticas. Outros serviços que envolvem: iluminação pública, saúde, telecomunicações, sistema bancário e transporte público podem ser comprometidos diante da qualidade da energia elétrica fornecida. No entanto, os mesmos equipamentos que proporcionam conforto e aumento de produtividade impõe distúrbios à rede elétrica (ATKINSON, 2017).

Concessionárias e consumidores demonstram grande preocupação com os fenômenos associados à qualidade de energia elétrica, que afetam, sobretudo, os equipamentos eletrônicos mais modernos (fonte de computadores, no-breaks, inversores, e outros), constituídos por microprocessadores e dispositivos eletrônicos sensíveis a distúrbios, que sofrem uma grande redução em sua vida útil, por conta das variações impostas pela forma de onda da tensão encontrada nas instalações elétricas (MARQUES, 2018).

Uma distorção de forma de onda é dita harmônica quando a deformação se apresenta de forma similar em cada ciclo da frequência fundamental. Neste caso, o espectro contém apenas frequências múltiplas inteiras da fundamental. Esse tipo de deformação geralmente é imposta por dispositivos que apresentam relação não linear entre tensão e corrente como, por exemplo, transformadores e motores, cujos núcleos ferromagnéticos são sujeitos à saturação. Outros elementos não lineares são as cargas eletrônicas que produzem descontinuidades na corrente (MARQUES, 2018).

Segundo (FILHO, 2011), qualidade é a combinação de características através das quais produtos e serviços atendem às expectativas do cliente. Como um produto comercial, mesmo que não ocorram interrupções, é percebido de forma difusa através de perturbações ou distúrbios percebidos nas falhas de funcionamento em alguns equipamentos. Os principais indicadores de qualidade de energia elétrica são:

- ✓ Qualidade do serviço: é medida segundo a continuidade do fornecimento da energia elétrica. Do ponto de vista ideal, a qualidade

de serviço deveria oferecer continuidade plena e oferta ilimitada de energia elétrica;

- ✓ Qualidade do produto: é a conformidade do produto, ou seja, é a capacidade do sistema elétrico em fornecer energia com tensões equilibradas, sem deformações na forma de onda, com amplitude e frequência constantes;
- ✓ Qualidade do atendimento: trata das relações do cotidiano entre o cliente e a concessionária de energia. Está ligado ao atendimento de emergência, que contempla as solicitações do consumidor, quando da ocorrência de problemas na rede. De modo geral, a qualidade do atendimento diz respeito à presteza e à eficiência do atendimento pela concessionária.

Uma definição abrangente sobre a qualidade de energia elétrica (QEE) inclui características de continuidade de suprimento e de conformidade com certos parâmetros considerados desejáveis para a operação segura, tanto do sistema supridor quanto das cargas elétricas, como:

- a) Tensão em regime permanente;
- b) Fator de potência;
- c) Distorções harmônicas;
- d) Desequilíbrio de tensão;
- e) Flutuação de tensão;
- f) Variações de tensão de curta duração;
- g) Variação de frequência.

Dentro desse contexto, este trabalho propõe um estudo de caso em que será instalado um Analisador de Qualidade de Energia na Subestação 3 do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO), *Campus Palmas*, as medições serão analisadas sob a ótica da legislação atual do módulo 8 do Procedimentos de Distribuição (PRODIST) e serão propostas as medidas que podem ser adotadas para solucionar problemas oriundos da má qualidade do fornecimento da energia por parte da concessionária, quando esse ocorrer, ou causadas devido ao tipo de carga conectados a subestação (SE).

1.1. Justificativa

Sabe-se que com o avanço da tecnologia, muitos equipamentos elétricos-eletrônicos foram desenvolvidos para utilização de diversos consumidores. Alguns destes equipamentos apresentam sensibilidade quanto a variação da QEE da fonte de alimentação. Diante disto, é de suma importância que o consumidor conheça as normas e leis que foram criadas para atendê-lo e orientá-lo, de forma que venha a suprir as suas necessidades e os seus direitos sobre o nível de tensão elétrica que está sendo disponibilizado em sua unidade consumidora.

Observa-se que o consumidor, quer seja a sua origem: industrial, comercial, residencial, rural e outros, tem tido bastante preocupação em obter o fornecimento de energia elétrica que o atenda com a qualidade que lhe é devida, devendo ser concedida pela distribuidora de energia elétrica.

Partindo desta necessidade, este trabalho está sendo desenvolvido com o objetivo de esclarecer ao consumidor que existem normas que foram criadas visando principalmente garantir a qualidade do fornecimento de Energia Elétrica.

Estas normas conceituam a qualidade de energia elétrica, os indicadores de fornecimento, os níveis adequados, os fenômenos da qualidade deste produto, os procedimentos a serem realizados pela distribuidora e prazos para atendimento ao consumidor. Também regulamenta cálculos para compensação ao consumidor e prazos para resolução do problema, quando este ocorrer.

A complexidade do problema da avaliação e controle da QEE não resulta apenas da grande variedade de perturbações a que o sistema elétrico está sujeito, mas também pelos vários efeitos que podem causar, que vão desde sobreaquecimento de máquinas elétricas devido às distorções harmônicas, vibrações de motores devido a desequilíbrios de tensão, variações luminosas devido a flutuações de tensão, oscilações de potência sustentadas entre as cargas e a rede durante a operação de cargas não lineares e variáveis, até interrupções momentâneas de tensão, cujas causas em geral são curto-circuito de difícil prevenção (DECKMANN, 2010).

Em princípio, os problemas relacionados com a QEE começam quando um equipamento alimentado pela rede elétrica deixa de funcionar como deveria. Se tais problemas não forem devidamente tratados poderá haver prejuízos materiais (redução da vida útil ou até queima de transformadores, motores, capacitores e

equipamentos eletrônicos sensíveis), bem como ocorrer perturbações físicas em pessoas (incômodo visual devido ao efeito de cintilação, ou incômodo auditivo devido a ressonâncias eletromagnéticas), levando ao comprometimento da capacidade produtiva tanto das máquinas como das pessoas (DECKMANN, 2010).

1.2. Problema

A Instalação elétrica analisada possui cargas de ambiente administrativo, influenciando na qualidade da energia elétrica do sistema de fornecimento, podendo ocasionar perturbações na tensão elétrica.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Realizar um estudo sobre Qualidade de Energia Elétrica no circuito da Subestação III do Campus do IFTO de Palmas - TO, analisando a qualidade do produto fornecido pela Distribuidora de Energia.

1.3.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Fazer um levantamento bibliográfico acerca do tema, para embasamento teórico do estudo;
- Conhecer o sistema consumidor (cargas instaladas);
- Realizar medições por meio de um Analisador de energia elétrica, conectado no transformador abaixador da Subestação 3 do IFTO – *Campus Palmas*;
- Analisar os resultados coletados, verificando os parâmetros que estão adequados ou não;
- Explicar sobre os fenômenos da qualidade do produto em regime permanente ou transitório, identificando os seus indicadores e valores de referência ou limites;

- Propor possíveis soluções a partir dos resultados obtidos.

1.4. Metodologia

A metodologia adotada consistiu de uma pesquisa documental, bibliográfica sobre a qualidade de energia elétrica que está sendo fornecida ao IFTO, com ênfase em analisar os indicadores sob a visão do Módulo 8 do PRODIST, utilizando como base livros, artigos científicos, Dissertações de Mestrado, Teses de Doutorado entre outros.

Na parte prática, realizou-se uma medição na Subestação de Energia 3 do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins – *Campus Palmas*, com a utilização de um analisador da qualidade da energia elétrica PowerNET PQ-700 do fabricante IMS, onde foi verificado a qualidade da energia elétrica fornecida pela concessionária de energia local, por um período de 7 dias, compreendidos entre os dias 08/03/2021 a 15/03/2021 (APÊNDICE B).

O analisador de qualidade da energia elétrica é um equipamento digital e portátil, desenvolvido para estudos de eficiência energética, assim como para análise de fenômenos da qualidade da energia. Este equipamento é indicado para detecção e análise de perturbações de curta duração em sistemas elétricos de potência, tais como redes de distribuição, motores, painéis solares e outros, registrando em memória de massa o horário, a duração e a magnitude do evento. Ao mesmo tempo em que faz a medição de transientes, o PowerNET PQ-700 realiza a medição em regime permanente das principais grandezas elétricas relacionadas à qualidade da energia elétrica, entre elas os harmônicos, flutuações (*flicker*), desequilíbrio e transitórios (IMS PQ-700, 2020).

O período de integração do analisador corresponde à tomada da média dos valores ao longo do tempo ajustado. Conforme o Módulo 8 do PRODIST, podem ser utilizados instrumentos de medição com precisão de até 1% (um por cento), e o tempo para integralização das medições deve ser de 10 minutos, sendo que os valores eficazes devem ser calculados a partir das amostras coletadas em janelas sucessivas compreendidas numa sequência de doze ciclos (0,2 segundos) a quinze ciclos (0,25 segundos). Para este trabalho, a integração foi de 10 minutos em janelas sucessivas de doze ciclos.

1.5. Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em 7 capítulos. No capítulo 1, temos uma introdução do assunto analisado. No capítulo 2, apresenta-se uma revisão da literatura sobre qualidade de energia elétrica e seus principais distúrbios na rede elétrica. No capítulo 3, faz-se uma revisão da literatura sobre a legislação que envolve qualidade de energia elétrica. No capítulo 4, descreve-se o estudo de caso abordado. No capítulo 5, apresenta-se os resultados obtidos por meio de gráficos e tabelas. No capítulo 6, são feitas as conclusões do trabalho e propostas para desenvolvimento futuro. No capítulo 7, são descritas as referências utilizadas. Também foram incluídos os Apêndices A, B, C e D, com imagens referenciadas neste trabalho.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA

A partir do ano de 2008 quando implantou-se o Módulo 8 do PRODIST como referência de Qualidade de Energia voltado principalmente para as distribuidoras de energia, muitos trabalhos, artigos, teses de mestrados e doutorados começaram a ser desenvolvidos visando aprimorar este imenso contexto que envolve tal assunto. Assunto este que atualmente é de fundamental importância para pleno funcionamento do sistema elétrico nacional, geradoras, transmissoras, distribuidoras e qualquer outro sistema elétrico, seja ele de grande porte, como as indústrias, ou de pequeno porte como as residências.

O termo “Qualidade da Energia Elétrica” (QEE) caracteriza uma área de estudos relacionada aos Sistemas de Potência de Energia Elétrica e possui várias definições. O termo expressa as mais variadas características da energia elétrica entregue pelas concessionárias aos consumidores e mede o “quão bem” essa energia pode ser utilizada. Tal medida inclui características de continuidade de suprimento e de conformidade com certos parâmetros considerados desejáveis para a operação segura, tanto do sistema supridor como das cargas elétricas. Entre os parâmetros a considerar tem-se: Distorções Harmônicas; Flutuações de tensão; Variações de tensão de curta duração; Desequilíbrio de sistemas trifásicos; Transitórios rápidos. Um problema na Qualidade da Energia pode ser definido como “Qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou desvio de frequência, que resulte em falha ou má operação dos equipamentos e consumidores” (MARQUES, 2018).

Em estudo voltado para Qualidade de Energia Elétrica Pela Universidade Federal do Paraná (MEHL, 2012), concluiu-se que a disponibilidade da energia elétrica representa um incremento na qualidade de vida das populações. Num primeiro momento em que se implanta um sistema de distribuição de energia elétrica, a população local imediatamente passa a contar com inúmeros benefícios, tanto do ponto de vista de maior conforto doméstico como de melhores possibilidades de emprego e produção. A questão da qualidade da energia elétrica aparece, portanto, a partir do momento em que os consumidores constatarem interrupções no fornecimento, mas à medida que tais consumidores se tornam mais sofisticados sob o ponto de vista tecnológico, outros fatores começam a ser considerados.

Em dissertação de mestrado sobre a Regulação da Qualidade de Energia Elétrica sob o Foco do Consumidor (JANNUZZI, 2007), apresentou-se uma proposta da resolução versando sobre a qualidade da energia elétrica fornecidas às unidades consumidoras do Brasil. A abordagem é analisada e tratada prioritariamente sob o foco do consumidor, isto é, considerando as suas reais necessidades técnicas, os seus direitos e deveres e ainda, em estrita consonância com a verdadeira missão da concessionária e do órgão Regulador: prestar um serviço adequado. Neste contexto, é observado nos tempos iniciais de distribuição de energia elétrica que a preocupação básica dos consumidores e dos agentes responsáveis pela oferta do serviço foi, respectivamente, “ter energia elétrica” e “disponibilizar energia elétrica”. Com o avanço do tempo, as preocupações dos agentes do setor (concessionárias, permissionárias e operador nacional do sistema elétrico), e em especial, dos consumidores, sinalizaram atenção gradativamente mais centrada na qualidade da energia elétrica fornecida/consumida.

De acordo com o conteúdo ministrado em curso de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas (DECKMANN, 2010), o monitoramento da qualidade de energia elétrica é relatado como algo importantíssimo. Em princípio, os problemas relacionados com a qualidade da energia elétrica começam quando um equipamento alimentado pela rede elétrica deixa de funcionar como deveria. Assim, uma lâmpada que apresenta variações luminosas, um motor que sofre vibrações mecânicas, equipamentos operando com sobreaquecimento, proteção atuando intempestivamente, capacitores com sobretensões ou sobrecorrentes podem ser indícios de sérios problemas elétricos.

Para (ATKINSON, 2017), pode-se associar a qualidade de energia ao grau de satisfação dos consumidores, que contam com a continuidade do suprimento de uma energia limpa, ou seja, sem variações na magnitude e frequência da tensão que comprometem a operação de equipamentos e/ou processos, podendo causar desde incômodo visual (fenômeno de cintilação) até interferências em aparelhos eletrônicos que impliquem em falhas no respectivo funcionamento. Cargas comuns, tais como lâmpadas incandescentes, chuveiros elétricos, resistências de aquecimento e demais cargas com características puramente resistivas conectadas à rede elétrica convencional drenam correntes na forma senoidal. Quando a forma

de onda da corrente é espelhada pela forma de onda da tensão não há presença de harmônicas.

Consoante com (DECKMANN; POMILIO, 2020), para definir o que seja qualidade de energia elétrica, tem-se que tratar de vários problemas que afetam os consumidores da energia elétrica ou seus usuários indiretos. Esses problemas vão desde os incômodos visuais provocados pela variação luminosa devido à má regulação da tensão até a interferência em equipamentos eletrônicos sensíveis, causada por interrupções no fornecimento de energia ou por fenômenos de mais alta frequência. A complexidade do problema da avaliação e controle da qualidade da energia suprida não resulta apenas da grande variedade de perturbações a que o sistema elétrico está sujeito. São relevantes também os variados efeitos que podem causar, desde o sobreaquecimento (aumento de perdas e de rendimento) de máquinas elétricas devido a distorções espectrais ou desequilíbrios; variações luminosas devidas a flutuações de tensão; oscilações de potência sustentadas entre as cargas e a rede durante a operação de cargas não lineares e variáveis; até interrupções momentâneas de tensão, cujas causas em geral são curtos-circuitos de difícil prevenção.

2.1. Principais distúrbios na rede elétrica

Grande parte dos problemas que surgem nos sistemas elétricos são originados pela excessiva distorção da tensão e da corrente elétrica que suprem a demanda dos consumidores finais. O aumento da utilização de equipamentos baseados em microprocessadores de alta tecnologia e em eletrônica de potência em aplicações industriais, como equipamentos de tecnologia da informação, acionadores de velocidade ajustável, controladores lógicos programáveis (PLC), levou a uma mudança completa na natureza das cargas elétricas (QUEIROZ, 2018).

A partir da evolução dos dispositivos eletrônicos, tanto de baixa potência quanto de alta potência, graças ao aumento de tecnologia empregada no desenvolvimento dos semicondutores, a energia demandada pelos consumidores não é mais a mesma de quando se predominava as cargas resistivas. A presença de fontes de alimentação com circuitos retificadores à suas entradas e circuitos conversores comutados por chaves eletrônicas atribui às cargas conectadas à rede uma característica intrínseca de não linearidade, ou seja, elas não demandam

corrente elétrica constantemente, mas apenas picos de energia em determinados instantes (QUEIROZ, 2018).

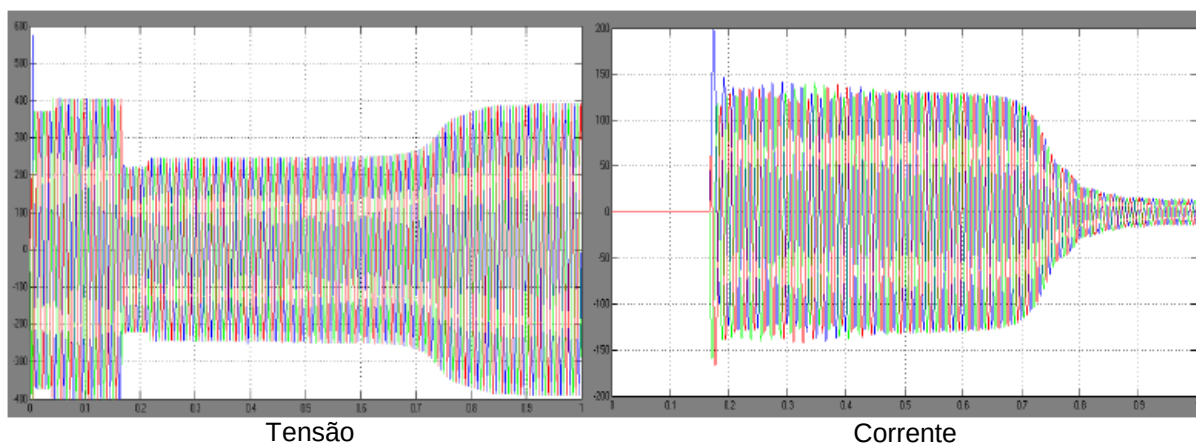
Segundo (DECKMANN; POMILIO, 2020), os distúrbios aos quais o sistema elétrico está exposto podem ser caracterizados de diversas maneiras: em função da duração do evento (curta, média ou longa duração), da faixa de frequências envolvidas (baixa, média ou alta frequência), dos efeitos causados (aquecimento, vibrações, cintilação luminosa, erro de medidas, perda de eficiência, redução da vida útil) ou de acordo com a intensidade do impacto (pequeno, médio ou grande impacto).

2.1.1. Afundamento de tensão (*voltage sag*)

É uma redução do valor eficaz da tensão verificada entre meio ciclo até 3 minutos. É provocado tipicamente pela entrada de uma carga temporária, de porte significativo em relação ao nível de curto-circuito local. Pode também ser devido a um curto-circuito no alimentador. Em geral, o efeito desaparece após a causa ser removida. A Figura 1 mostra o efeito da partida de um motor de indução trifásico. A corrente de partida de um motor de indução é muito elevada e permanece assim até que seja atingida a velocidade de operação, quando se reduz e permite a recuperação da tensão (DECKMANN; POMILIO, 2020).

Para evitar ou minimizar esse fenômeno são exigidos pelas distribuidoras de energia que a partida de motores seja efetuada de forma indireta, via: chave estrela-triângulo, inversores e soft-starter.

Figura 1: Exemplo de afundamento de tensão na partida de motores.



Fonte: (DECKMANN; POMILIO, 2020).

2.1.2. Elevação de tensão (*voltage swell*)

É um aumento do valor eficaz da tensão com duração entre meio ciclo e 3 minutos. Trata-se do efeito contrário ao do afundamento. As principais causas são a saída de cargas (levando à diminuição na corrente do alimentador), a conexão de banco de capacitores e a ocorrência de falhas nos alimentadores, como um curto circuito monofásico (DECKMANN; POMILIO, 2020).

2.1.3. Sobreensão

É o aumento do valor eficaz da tensão durante mais de 1 minuto. Esse seria o prolongamento da elevação de tensão. Em geral os equipamentos apresentam menor tolerância a sobreensões do que a subtensões, devido a problemas de rompimento do dielétrico (DECKMANN; POMILIO, 2020).

2.1.4. Subtensão

A redução do valor RMS (Root-Mean-Square) da tensão durante mais de 1 minuto. Corresponde ao prolongamento do afundamento de tensão. Em caso de subtensão pode haver interrupção no funcionamento de equipamentos. Diversos equipamentos eletrônicos operam como fonte de potência constante. Quando a tensão se reduz, automaticamente há um aumento na corrente. Isso significa uma característica dinâmica de resistência negativa, cujo impacto nos sistemas de regulação de tensão (se existirem) precisa ser cuidadosamente considerado (DECKMANN; POMILIO, 2020).

2.1.5. Surto de tensão

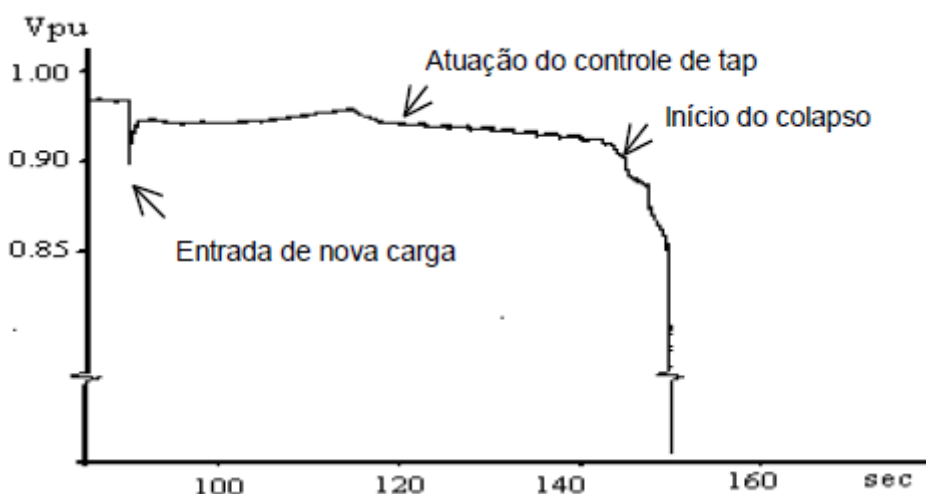
É a elevação impulsiva de tensão. Esse tipo de distúrbio pode estar associado a descargas atmosféricas ou a chaveamento de corrente imposta em circuitos altamente indutivos, seja através da conexão de capacitor ou pela comutação de dispositivo eletrônico. O efeito mais comum é a ruptura do dielétrico no ponto fraco do isolamento do sistema e a queima de componentes eletrônicos por sobreensão ou excessiva variação da tensão em relação ao tempo. Devido à

rapidez do evento (microssegundos) não existem muitas formas de evitar com eficácia os efeitos. Os varistores são dispositivos que têm capacidade de ceifar os picos de tensão, drenando a energia excedente para terra, mas tem capacidade limitada e se deterioram à medida que absorvem os picos de energia (DECKMANN; POMILIO, 2020).

2.1.6. Colapso de tensão

É um afundamento gradual e auto-sustentado da tensão abaixo de níveis toleráveis pelas cargas. Ocorre, em geral, associado à falta de suporte reativo, à insuficiência de capacidade de controle ou falta de coordenação das ações de controle, por exemplo, entre reguladores de tensão e mudança de TAP de transformadores. A dinâmica típica do colapso é não oscilatória, com a tensão caindo gradualmente e provocando desligamentos em cascata (DECKMANN; POMILIO, 2020).

Figura 2: Colapso de tensão.

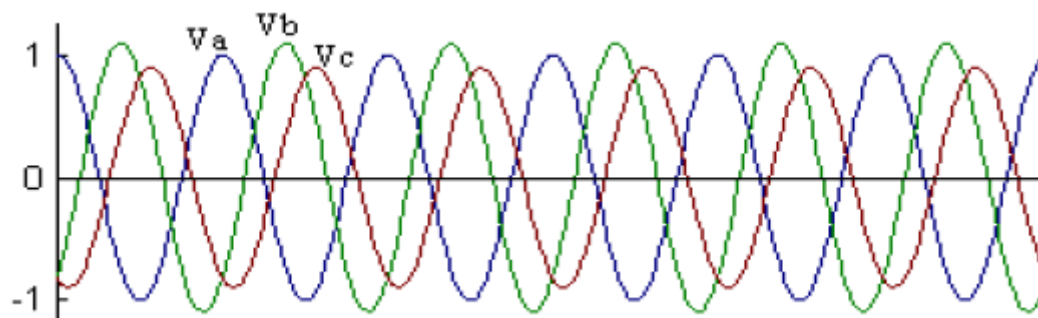


Fonte: (DECKMANN; POMILIO, 2020).

2.1.7. Desequilíbrio de tensões

São variações desiguais em amplitude e/ou fase das tensões trifásicas, causadas pela conexão desigual de cargas mono ou bifásicas em sistemas trifásicos. Cargas trifásicas não balanceadas também produzem desequilíbrio, como os fornos de arco elétrico (DECKMANN; POMILIO, 2020).

Figura 3: Tensões desequilibradas em magnitude e fase.

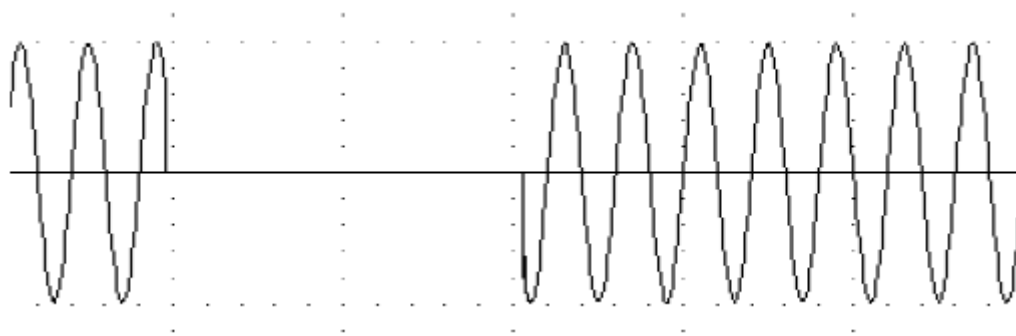


Fonte: (DECKMANN; POMILIO, 2020).

2.1.8. Interrupção momentânea

É uma interrupção de meio ciclo até 3 segundos de duração. No caso de interrupções causadas pela ação correta da proteção da rede, é esperado que ao final do defeito o sistema retorne à condição de operação normal (DECKMANN; POMILIO, 2020).

Figura 4: Interrupção momentânea.



Fonte: (DECKMANN; POMILIO, 2020).

2.1.9. Interrupção Temporária

É uma interrupção com duração entre 3 segundos e 3 minutos. Neste caso já se requer uma fonte ininterrupta que utilize bateria como fonte alternativa, para a qual a carga é transferida automaticamente em caso de falta da alimentação principal. Esse tipo de evento em geral é causado pelo sistema de proteção com religamento automático após a eliminação de curto circuito na rede (DECKMANN; POMILIO, 2020).

2.1.10. Interrupção permanente

É uma interrupção com duração maior que 3 minutos. Este é o caso de desligamento de uma linha sem previsão de retorno imediato. Pode ocorrer de forma imprevista, no caso de defeito, ou de forma programada, para fins de manutenção ou transferência de carga. Existem critérios de qualidade de serviço, que medem a duração ou a frequência anual das interrupções por consumidor (DECKMANN; POMILIO, 2020).

2.1.11. Distorção Harmônica

As harmônicas são sinais periódicos e senoidais que se associam a um sinal de tensão também senoidal de amplitude maior e com uma frequência fundamental. O resultado dessa associação provoca a distorção do sinal de tensão. Este sinal de tensão, portador da frequência fundamental (60 Hz no Brasil), é o que os sistemas elétricos de potência desejam receber, isto é, energia pura, sem a presença de harmônicas. As frequências das harmônicas são múltiplas inteiras do valor da frequência fundamental. Por exemplo: quando se emprega o termo *terceira harmônica* se refere a um sinal com frequência três vezes maior do que a frequência fundamental, resultando, portanto, em um sinal na frequência de 180 Hz (ROLIM, 2015).

Para exemplificar, os harmônicos múltiplos inteiros ímpares de uma onda senoidal com frequência de 60 Hz são: 180 Hz (terceira ordem harmônica), 300 Hz (quinta ordem harmônica), 420 Hz (sétima ordem harmônica) e assim por diante. As distorções harmônicas também são classificadas de acordo com a sequência dos fasores. Define-se componentes de sequência como um conjunto ordenado de três fasores, em que cada ordem possui sua sequência, conforme detalhado na Tabela 1 (ALMEIDA, 2017).

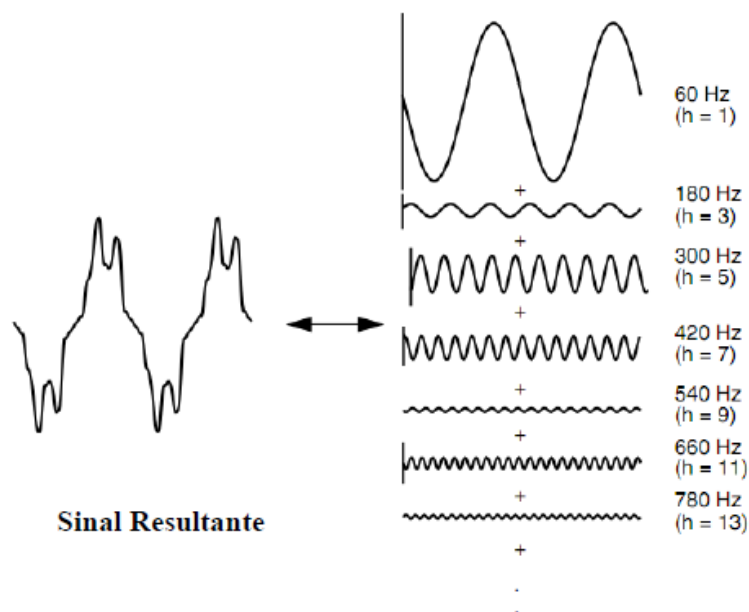
Tabela 1 - Ordem, Frequência e Sequência das Distorções Harmônicas.

Ordem da Distorção Harmônica*	Frequência (Hz)	Sequência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
7	420	+
8	480	-
9	540	0
n	nx60	...

* Ordens atribuídas para a frequência fundamental de 60 Hz

Fonte: (ALMEIDA, 2017).

A origem das harmônicas está relacionada com a conexão de cargas não lineares no sistema elétrico. Ou seja, equipamento eletrônicos de potência, fontes de alimentação chaveada, equipamentos de processamento de dados, impressoras, fotocopiadores, entre outros. São causadas também por fontes industriais, como: fornos a arco, máquinas de solda, retificadores, máquinas rotativas em corrente alternada ou contínua (ROLIM, 2015).

Figura 5: Exemplo de um sinal resultante da superposição das harmônicas de ordem ímpares.

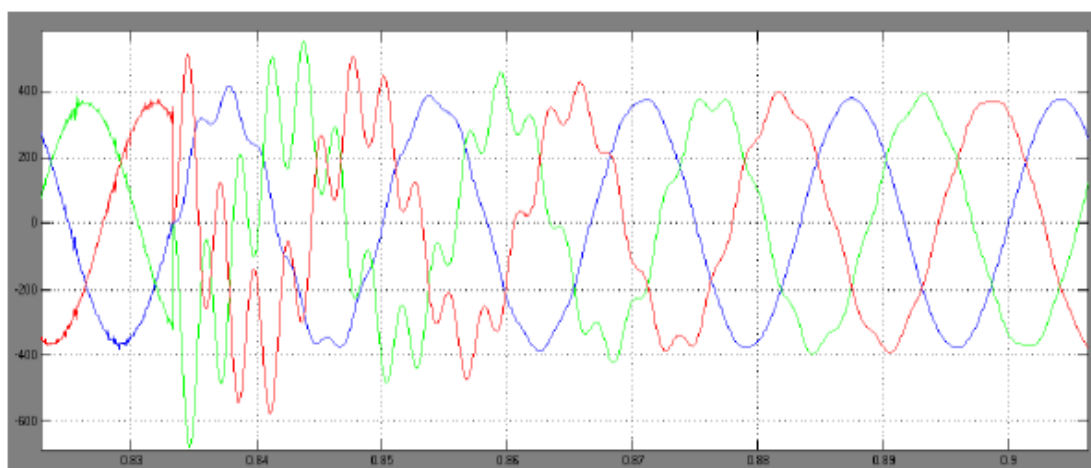
Fonte: (ROLIM, 2015).

A distorção harmônica vem se agravando nos últimos anos, o que tem levado os organismos regulamentadores a estabelecer limites mais rigorosos, atendendo aos interesses de consumidores, fabricantes de equipamentos elétricos e concessionárias de energia (DECKMANN; POMILIO, 2020).

2.1.12. Oscilações transitórias

São oscilações rápidas devidas, por exemplo, a manobras de disjuntores. Em geral são causadas por chaveamento de capacitores na rede. Devido aos elevados valores de corrente em relação ao tempo, provocados pela brusca energização do capacitor, são excitadas ressonâncias presentes no sistema, em geral em alta frequência, que se convertem em oscilações rápidas da tensão no ponto de conexão do capacitor. Essas oscilações podem provocar a atuação da proteção ou produzir sobretensões em outros equipamentos próximos (DECKMANN; POMILIO, 2020).

Figura 6: Efeito de conexão de capacitor em uma rede elétrica.



Fonte: (DECKMANN; POMILIO, 2020).

2.1.13. Flutuações de tensão

São mudanças sustentadas da amplitude da tensão fundamental. Em geral são provocadas por variações de cargas como fornos a arco, elevadores, bombas e compressores. O efeito principal é o fenômeno de cintilação luminosa (*flicker*), mas as flutuações de tensão podem ocasionar oscilações de potência nas linhas de transmissão, levando os geradores a oscilar entre si (oscilações

eletromecânicas) ou com a turbina (ressonância subsíncrona). Podem também ser decorrentes de ajuste inadequado ou descoordenado dos reguladores de tensão, que realimentam pequenas variações positivamente, devido à taxa de amortecimento negativa das malhas de controle (DECKMANN; POMILIO, 2020).

2.1.14. Cintilação luminosa

Conhecido como o efeito *flicker*, é resultante da variação de emissão luminosa percebida visualmente, em decorrência de flutuações da magnitude da tensão. O fenômeno está associado à operação de cargas variáveis. A percepção visual do fenômeno ocorre na faixa de modulação da tensão entre 0 e 30 Hz, sendo máxima em torno de 8,8 Hz. Vários fatores afetam o nível do incômodo provocado, tais como a forma da modulação (quadrada ou senoidal), o tipo de iluminação (incandescente ou fluorescente), a inércia térmica das lâmpadas, entre outros. Seus efeitos são subjetivos e acumulativos, podendo afetar o sistema nervoso central, afetando a concentração do indivíduo e, eventualmente, problemas de saúde (DECKMANN; POMILIO, 2020).

2.1.15. Distúrbios de baixa frequência ou subsíncronos ($f < 60$ Hz)

Entre os distúrbios elétricos mais lentos a que um sistema está sujeito, podemos citar o colapso da tensão, que pode se estender por vários minutos, e a cintilação luminosa (*flicker*), que ocorre quando a frequência estiver na faixa entre 0 e 30 Hz (DECKMANN; POMILIO, 2020).

2.1.16. Distúrbios de média frequência ($60 \text{ Hz} \leq f \leq 9 \text{ kHz}$)

Nesta faixa intermediária de frequências estão incluídos todos os processos que produzem distorções de forma de onda das tensões e correntes com frequência fundamental 60 Hz, cujo espectro pode apresentar componentes significativas até da 50ª harmônica (3 kHz). Elementos não lineares, que distorcem as formas de onda de tensão e corrente, sempre estiveram presentes no sistema elétrico, por exemplo, em dispositivos com núcleo ferro-magnético saturável. Com a introdução dos dispositivos chaveados eletronicamente, no entanto, o grau de

distorção produzido aumentou significativamente, gerando a necessidade de constantes verificações dos níveis harmônicos no sistema. A presença de harmônicas e inter-harmônicas na rede cria uma série de problemas como ressonâncias, sobreaquecimento, erros de medição, vibrações em máquinas, entre outros (DECKMANN; POMILIO, 2020).

2.1.17. Distúrbios de alta frequência ($9 \text{ kHz} \leq f \leq 30 \text{ MHz}$)

Surtos, descargas de tensão e manobras de disjuntores, são exemplos típicos de distúrbios com conteúdo espectral de alta frequência. Porém, os distúrbios de alta frequência mais comuns são devidos ao chaveamento (comutação de chave eletrônica na faixa de dezenas de kHz) para o comando de conversores estáticos. A alta frequência para o chaveamento eletrônico é usada devido à melhoria da resposta dinâmica do circuito e à redução física dos elementos de filtragem (indutores e capacitores) e de eventuais transformadores, com a elevação da densidade de potência do conversor. No entanto, quando alimentados a partir da rede elétrica, componentes de corrente em alta frequência podem circular pela rede, devido à própria característica topológica do conversor e também por fenômenos de acoplamento via indutâncias e capacitâncias parasitas. Isso pode afetar o funcionamento de outros equipamentos conectados à mesma linha de alimentação, sensíveis a essas interferências (DECKMANN; POMILIO, 2020).

3. LEGISLAÇÃO SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

3.1. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é uma autarquia sob regime especial (Agência Reguladora), vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), com sede e foro no Distrito Federal, com a finalidade de regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do governo federal Brasileiro. Esta agência reguladora foi criada em 1996, pela Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, durante o primeiro mandato do Presidente Fernando Henrique Cardoso (BRASIL, 1997).

Segundo (JANNUZZI, 2007), a partir da sua criação, a Aneel passou a atuar de forma mais forte nos setores de concessão, regulação, medição e ainda na fiscalização dos serviços concedidos. Portanto, suas principais atribuições são:

- Regular e fiscalizar a geração, a transmissão, a distribuição e a comercialização de energia elétrica;
- Mediar os conflitos de interesses entre os agentes do setor elétrico e entre estes e os consumidores;
- Conceder, permitir e autorizar instalações e serviços de energia;
- Garantir tarifas justas;
- Zelar pela qualidade do produto;
- Zelar pela qualidade do serviço;
- Exigir investimentos;
- Estimular a competição entre os operadores;
- Assegurar a universalização dos serviços.

A Aneel conduz seu trabalho com base em princípios e valores afinados com a expectativa da sociedade brasileira, de uma atuação equilibrada, transparente e comprometida com o interesse público. A missão desta agência expressa a posição da agência como mediadora e fomentadora de uma relação balanceada entre o governo, os agentes do setor elétrico - empresas de geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia - e os consumidores. O objetivo principal é o fornecimento de energia elétrica com qualidade e a preço justo – nada mais do que o suficiente para garantir o funcionamento adequado das empresas. Essa é uma

preocupação importante, pois se trata de um setor de monopólios naturais – ou seja, apenas uma concessionária fornece o serviço em uma determinada área de concessão. Assim, o bom desempenho da empresa é fundamental para que os consumidores recebam energia com a qualidade e a frequência desejadas (ANEEL, 2016).

Seguindo (ANEEL, 2016) podemos citar as seguintes competências da Aneel:

- Implementa políticas:
Por delegação do Governo Federal, promove as atividades relativas às outorgas de concessão, permissão e autorização de empreendimentos e serviços de energia elétrica;
- Leiloeira concessões do setor elétrico:
Promove, mediante delegação, com base no plano de outorgas e diretrizes aprovadas pelo Ministério de Minas e Energia, os procedimentos licitatórios para a contratação de concessionárias e permissionárias de serviço público para produção, transmissão e distribuição de energia elétrica e para a outorga de concessão para aproveitamento de potenciais hidráulicos;
- Faz a gestão dos contratos de fornecimento:
Cabe celebrar a contratação e gerir os contratos de concessão ou de permissão de serviços públicos de energia elétrica, de concessão de uso de bem público;
- Estabelece as regras para o serviço de energia elétrica:
Regular a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica;
- Dita metas para o equilíbrio e bom funcionamento do mercado:
Determina as metas a serem periodicamente alcançadas pelas distribuidoras de energia elétrica. Cria também limites ou condições para empresas, grupos empresariais e acionistas, com vistas a propiciar concorrência efetiva entre os agentes e a impedir a concentração econômica nos serviços e atividades de energia elétrica;
- Cria a metodologia de cálculo de tarifas:

Estabelece as metodologias de cálculo das diferentes tarifas do setor e calcula as tarifas aplicadas às contas das concessionárias e permissionárias de distribuição de energia;

➤ Fiscaliza o fornecimento do serviço:

Tem a responsabilidade de controlar e fiscalizar, diretamente ou mediante convênios com órgãos estaduais, as concessões, as permissões e os serviços de energia elétrica. Tal atuação tem como objetivos assegurar o bom funcionamento dos agentes, para que não venham a comprometer o serviço ao consumidor, e principalmente a qualidade de fornecimento dos serviços de energia elétrica. A fiscalização pode fazer exigências, impor multas e, em última instância, recomendar à Diretoria Colegiada da Aneel o fim do contrato de concessão;

➤ Media conflitos:

Soluciona, no âmbito administrativo, as divergências entre concessionárias, permissionárias, autorizadas, produtores independentes e autoprodutores, bem como entre esses agentes e seus consumidores;

➤ Gestão e fomento de programas:

Gere os programas de Pesquisa e Desenvolvimento e de Eficiência Energética, ambos conduzidos por concessionárias de geração, transmissão e distribuição. Procura incentivar a realização de projetos que melhorem a eficiência e a qualidade dos serviços prestados e reduzam a dependência tecnológica do setor.

Existem (ANEEL, 2016) algumas atribuições que não são de responsabilidade da agência que regula o setor elétrico:

➤ Horário brasileiro de verão:

Trata-se de uma atribuição do Ministério de Minas e Energia;

➤ Políticas públicas do setor;

➤ Investimento direto em projetos;

➤ Fiscalização da usina hidroelétrica binacional de Itaipu:

A usina está sujeita a regras binacionais de fiscalização, auditoria e mecanismos de transparência e acesso a informações especiais, decorrentes do Tratado Internacional que a criou e rege.

➤ Gestão e fiscalização de usinas nucleares:

Essas são atribuições da Comissão Nacional de Energia Nuclear do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.

3.2. Resolução 414 da ANEEL

Outro papel importantíssimo, foi a criação da Resolução Normativa nº 414/2010 de 9 de setembro de 2010, com o objetivo de regular as disposições a serem observadas pelos consumidores e pelas empresas responsáveis pela prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica, estabelecendo os seus direitos e deveres, de forma atualizada e consolidada (RESOLUÇÃO 414 ANEEL, 2010).

Nos seus 229 artigos escritos na Resolução 414, a ANEEL cita alguns que estão relacionados a direitos, deveres e recomendações quanto à qualidade de energia elétrica.

No artigo 95 (RESOLUÇÃO 414 ANEEL, 2010), o tema é voltado para o fator de potência e o reativo excedente. O fator de potência de referência, seja indutivo ou capacitivo, tem como limite mínimo permitido para as unidades consumidoras do grupo A, o valor de 0,92. As unidades consumidoras do grupo B não têm fator de potência de referência e não podem ser cobradas pelo consumo de energia elétrica reativa excedente. Para as unidades consumidoras do grupo A, a distribuidora deve efetuar cobrança referente aos montantes de energia elétrica e demanda de potência reativas excedentes. Ou seja, se o consumidor não manter o fator de potência dentro do limite estabelecido, a concessionária tem direito de realizar a cobrança do reativo excedente. Isto é válido devido ao excesso de energia reativa ser prejudicial ao sistema elétrico, provocando sobreaquecimentos, quedas de tensão, superdimensionamento de condutores, além da degradação de equipamentos.

No artigo 164 (RESOLUÇÃO 414 ANEEL, 2010), informa que quando o consumidor utilizar em sua unidade consumidora, à revelia da distribuidora, carga ou geração susceptível de provocar distúrbios ou danos ao sistema elétrico de distribuição, ou ainda a instalações e equipamentos elétricos de outros consumidores, a distribuidora deve exigir o cumprimento das seguintes medidas:

I - Instalação de equipamentos corretivos na unidade consumidora, no prazo informado pela distribuidora, ou o pagamento do valor das obras necessárias no sistema elétrico, destinadas à correção dos efeitos desses distúrbios; e

II - Ressarcimento à distribuidora de indenizações por danos a equipamentos elétricos acarretados a outros consumidores, que, comprovadamente, tenham decorrido do uso da carga ou geração provocadora dos distúrbios.

Nestas duas situações a distribuidora é obrigada a comunicar ao consumidor, de forma escrita, específica e com entrega comprovada, às obras que realizará e o necessário prazo de conclusão, fornecendo, para tanto, o respectivo orçamento detalhado, o prazo para a instalação de equipamentos corretivos na unidade consumidora, cujo descumprimento enseja a suspensão do fornecimento, a ocorrência dos danos, assim como a comprovação das despesas incorridas, nos termos da legislação e regulamentos aplicáveis, garantindo-lhe o direito à ampla defesa e o contraditório.

Em seu artigo 165 é dever do consumidor submeter previamente à apreciação da distribuidora o aumento da carga ou da geração instalada que exigir a elevação da potência injetada ou da potência demandada, com vistas à verificação da necessidade de adequação do sistema elétrico, observados os procedimentos dispostos na resolução 414. Melhor dizendo, qualquer novo equipamento elétrico/eletrônico que for conectado nas instalações elétricas do consumidor, o mesmo deve informar à concessionária, detalhando o equipamento a ser utilizado (RESOLUÇÃO 414 ANEEL, 2010).

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

O PRODIST (Procedimentos de Distribuição) aprovado pela ANEEL em dezembro de 2008, padroniza as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho do segmento de distribuição, disciplinando o relacionamento entre agentes setoriais no que se refere aos sistemas elétricos de domínio das concessionárias/permissionárias de serviço público de distribuição, que incluem as redes e linhas de distribuição de energia em tensão inferior a 230 kV (LAMIM, 2009).

O processo de criação do documento fundamentou-se em princípios de modicidade tarifária, direitos e deveres equilibrados, função da distribuição de

energia, tratamento isonômico para usuários da rede e sistemas de informações sistemáticas e permanentes, de modo a auxiliar processos de regulação, fiscalização e mediação da ANEEL, estabelecendo que o PRODIST deveria incorporar procedimentos contidos em resoluções ou artigos de resoluções que seriam revogadas ou modificadas (LAMIM, 2009).

Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional são documentos técnicos que tratam de aspectos regulatórios e estabelecem requisitos mínimos para planejamento, acesso, operação, medição e qualidade de energia nos sistemas elétricos de distribuição. O conjunto de procedimentos, chamado de PRODIST, aprovado pela ANEEL em dezembro de 2008, é composto por onze módulos:

- Módulo 1 - Introdução;
- Módulo 2 - Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição;
- Módulo 3 - Acesso ao Sistema de Distribuição;
- Módulo 4 - Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição;
- Módulo 5 - Sistemas de Medição;
- Módulo 6 - Informações Requeridas e Obrigações;
- Módulo 7 - Cálculo de Perdas na Distribuição;
- Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica;
- Módulo 9 - Ressarcimento de Danos Elétricos;
- Módulo 10 - Sistema de informação Geográfica Regulatório;
- Módulo 11 - Fatura de Energia Elétrica e Informações Suplementares.

Em (MÓDULO 1 ANEEL, 2018), cita-se que os principais objetivos do PRODIST são:

- Garantir que os sistemas de distribuição operem com segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade;
- Propiciar o acesso aos sistemas de distribuição, assegurando tratamento não discriminatório entre agentes;
- Disciplinar os procedimentos técnicos para as atividades relacionadas ao planejamento da expansão, à operação dos sistemas de distribuição, à medição e à qualidade da energia elétrica;
- Estabelecer requisitos para os intercâmbios de informações entre os agentes setoriais;
- Assegurar o fluxo de informações adequadas à ANEEL;

- Disciplinar os requisitos técnicos na interface com a Rede Básica, complementando de forma harmônica os Procedimentos de Rede.

3.3.1. Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica

Tem como objetivo, estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica (QEE), abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado. Para tanto, os procedimentos de qualidade de energia elétrica definidos neste módulo devem ser observados por: consumidores com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição, produtores de energia, distribuidoras, agentes importadores ou exportadores de energia elétrica, transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão (DIT), e Operador Nacional do Sistema (ONS) (MÓDULO 8 ANEEL, 2021).

Para a qualidade do produto, este módulo define a terminologia, caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos que possibilitem à Aneel fixar padrões para os indicadores de QEE (MÓDULO 8 ANEEL, 2021).

Para a qualidade dos serviços prestados, este módulo estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades (MÓDULO 8 ANEEL, 2021).

Segundo a Legislação atual, o PRODIST é a principal referência Regulatória no Sistema de Distribuição no Setor Elétrico Brasileiro. O Módulo 8 do PRODIST atualmente, conta com a décima segunda revisão, após a sua implantação em dezembro de 2008.

Desta forma, este módulo trata dos seguintes fenômenos da qualidade do produto em regime permanente ou transitório:

- I. Em regime Permanente
 - Tensão em regime permanente;
 - Fator de potência;
 - Harmônicos;
 - Desequilíbrio de tensão;
 - Flutuação de tensão;

- Variação de frequência.

II. Em regime transitório

- Variações de tensão de curta duração (VTCD).

3.3.1.1. Tensão em Regime Permanente

No módulo 8 da ANEEL são estabelecidos os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente, os indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão elétrica, os critérios de medição e de registro e os prazos para compensação ao consumidor, caso as medições de tensão excedam os limites dos indicadores.

O termo “conformidade de tensão elétrica” refere-se à comparação do valor de tensão obtido por medição apropriada, no ponto de conexão, em relação aos níveis de tensão especificados como adequados, precários e críticos.

Relacionado aos valores de referência, 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. Assim, para cada tensão de referência, as leituras a ela associadas classificam-se em três categorias: adequadas, precárias ou críticas, baseando-se no afastamento do valor da tensão de leitura em relação à tensão de referência.

Após a obtenção do conjunto de leituras, devem ser calculados os índices de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) e os índices de duração relativa para tensão crítica (DRC) de acordo com as expressões (1) e (2) (MÓDULO 8 ANEEL, 2021).

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \cdot 100[\%] \quad (1)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \cdot 100[\%] \quad (2)$$

Onde:

DRP - Duração Relativa da Transgressão para Tensão Precária;

DRC - Duração Relativa da Transgressão para Tensão Crítica;

NLP - Número de Leituras situadas nas faixas Precária;

NLC - Número de Leituras situadas nas faixas Crítica.

Este cálculo dos indicadores individuais DRP e DRC, é utilizado para identificar o nível percentual de violação da tensão no local onde foi realizado a medição. Este percentual é utilizado para o cálculo da compensação a ser paga ao consumidor, caso os valores ultrapassem os limites estabelecidos pela ANEEL.

O (MÓDULO 8 ANEEL, 2021), define que o valor da Duração Relativa da Transgressão para Tensão Precária - DRP fica estabelecido em 3% (três por cento). O mesmo acontece para o DRC, onde o valor da Duração Relativa da Transgressão para Tensão Crítica - DRC fica estabelecido em 0,5% (cinco décimos por cento).

Para uma melhor compreensão sobre os valores de DRP e DRC, é fundamental que saibamos quais as faixas de Tensão de Atendimento Adequada, Precária e Crítica. Os parâmetros para Tensão de Atendimento (TA) e a faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão de Referência (TR) foram expressos de acordo com as faixas de classificação de tensão em regime permanente, definidas no Módulo 8 da ANEEL, conforme Tabela 2.

Tabela 2: Pontos 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	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

Fonte: Módulo 8 ANEEL, 2021.

À título de conhecimento, segue a Tabela 3 com as Tensões de Atendimento para a grande maioria dos consumidores de energia elétrica, que são os clientes de Baixa Tensão, sendo alimentados por uma tensão nominal igual ou inferior a 1 kV.

Tabela 3: Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220).

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
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: Módulo 8 ANEEL, 2021.

Quanto a compensação ao consumidor, a distribuidora deve ressarcir os consumidores que estiveram submetidos a tensões de atendimento com transgressão dos indicadores DRP ou DRC e os titulares daquelas atendidas pelo mesmo ponto de conexão. Ou seja, o consumidor será compensado caso as medições de tensão realizadas indiquem valor de DRP superior a 3%, ou valor de DRC superior a 0,5%.

Para o cálculo da compensação ao consumidor devido tensão inadequada de fornecimento, o Módulo 8 define que deve ser utilizada a seguinte fórmula:

$$Valor = \left[\left(\frac{DRP - DRP_{limite}}{100} \right) \times K1 + \left(\frac{DRC - DRC_{limite}}{100} \right) \times K2 \right] \times EUSD$$

(3)

Onde:

$K1 = 0$, se $DRP \leq DRP_{limite}$;

$K1 = 3$, se $DRP > DRP_{limite}$;

$K2 = 0$, se $DRC \leq DRC_{limite}$;

$K2 = 7$, para unidades consumidoras atendidas em Baixa Tensão, se $DRC > DRC_{limite}$;

$K2 = 5$, para unidades consumidoras atendidas em Média Tensão, $DRC > DRC_{limite}$;

$K2 = 3$, para unidades consumidoras atendidas em Alta Tensão, $DRC > DRC_{limite}$;

DRP = valor do DRP expresso em %, apurado na medição;

$DRP_{limite} = 3 \%$;

DRC = valor do DRC expresso em %, apurado na medição;

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

EUSD = valor do Encargo de Uso do Sistema de Distribuição correspondente ao mês de referência da medição.

Este encargo (EUSD), é o valor em moeda corrente nacional, de cobrança obrigatória da distribuidora de energia ao consumidor, pelo uso da infraestrutura de distribuição de energia, que compõe a tarifa definida pela Aneel. Isto significa que o EUSD é o valor gasto pela concessionária de energia para que a energia elétrica chegue ao consumidor. Também é utilizado como parâmetro para uma possível compensação ao consumidor, quando a distribuidora de energia descumprir algumas metas de sua responsabilidade.

O valor do EUSD é informado mensalmente pela concessionária de energia através da fatura de energia elétrica.

3.3.1.2. Fator de Potência

Fator de potência é a relação entre a potência ativa e reativa. Melhor dizendo, é uma medida de quanto da potência elétrica consumida está de fato sendo convertido em trabalho.

De acordo com (MÓDULO 8 ANEEL, 2021), o valor do fator de potência deve ser calculado a partir dos valores registrados das potências ativa e reativa (P, Q) ou das respectivas energias (EA, ER), utilizando-se as seguintes fórmulas:

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (4) \quad \text{ou} \quad fp = \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \quad (5)$$

Onde:

Fp = fator de potência;

P = potência ativa;

Q = potência reativa

EA = energia ativa;

ER = energia reativa.

Em relação aos valores de referência, o módulo cita que para unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 (noventa e dois centésimos) e 1,00 (um) indutivo ou 1,00 (um) e 0,92 (noventa e dois centésimos) capacitivo.

Estando a unidade consumidora com o fator de potência abaixo do permitido (ou acima de 8%), a concessionária tem o direito de cobrar o excedente reativo na fatura de energia elétrica.

3.3.1.3. Distorções Harmônicas

Segundo (MÓDULO 8 ANEEL, 2021), as distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental.

Uma forma de avaliar a intensidade da distorção harmônica de tensão em um sistema elétrico é verificando o nível de distorção harmônica total e individual de tensão. Dessa forma, é possível verificar a intensidade da distorção causada na forma de onda da tensão fundamental (ALMEIDA, 2017).

De acordo com o PRODIST, os valores de referência para os indicadores de QEE usados na classificação dos distúrbios de distorções harmônicas de tensão podem ser calculados da seguinte forma:

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (6)$$

Sendo:

$DIT_h\%$ = Distorção harmônica individual de tensão de ordem h;

V_h = Tensão harmônica de ordem h;

V_1 = Tensão fundamental medida;

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

Sendo:

DTT% = Distorção harmônica total de tensão;

h = todas as ordens harmônicas de 2 até h_{máx};

h_{máx} = Ordem harmônica máxima.

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

Sendo:

DTT_p% = Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3;

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

h_p = máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3.

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

Sendo:

DTT_i% = Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3;

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

h_i = máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3.

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

Sendo:

$DTT_3\%$ = Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3;

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

h_3 = máxima ordem harmônica múltipla de 3.

Os indicadores de QEE para distorção harmônica de tensão são obtidos por meio do percentil 95%. Os limites para esses indicadores podem ser encontrados na Tabela 4. Tais limites correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição (MÓDULO 8 ANEEL, 2021).

Tabela 4 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

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

Fonte: Módulo 8 ANEEL, 2021.

Onde:

$DTT_{95\%}$ = Valor do indicador $DTT\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas.

$DTT_{p95\%}$ = Valor do indicador $DTT_p\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas.

$DTT_{i95\%}$ = Valor do indicador $DTT_i\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas.

$DTT_{395\%}$ = Valor do indicador $DTT_3\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas.

3.3.1.4. Desequilíbrio de Tensão

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, e/ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema (MÓDULO 8 ANEEL, 2021).

Para avaliar os desequilíbrios de tensão nos sistemas elétricos é preciso obter os fatores de desequilíbrio de tensão. Esses fatores são considerados os indicadores de QEE para esse tipo de distúrbios e estão relacionados com as sequências positiva, negativa e zero das componentes simétricas. A sua finalidade é obter uma relação de assimetria entre as sequências (ALMEIDA, 2017).

Conforme PRODIST (MÓDULO 8 ANEEL, 2021), o cálculo para o fator de desequilíbrio que determina a assimetria entre as componentes pode ser obtido pela Equação 11. Na prática, esse fator representa a relação entre as tensões eficazes de sequência negativa em relação a sequência positiva, demonstrando o desbalanceamento entre as fases.

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

Onde:

FD = Fator de desequilíbrio de tensão;

V- = Magnitude da tensão eficaz de sequência negativa – frequência fundamental;

V+ = Magnitude da tensão eficaz de sequência positivo – frequência fundamental

Alternativamente, podemos utilizar as expressões a seguir, obtendo resultados que estão em consonância com a equação acima:

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

Sendo:

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

Onde:

V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} = Magnitudes das tensões eficazes de linha – frequência fundamental.

Os limites para o indicador de desequilíbrio de tensão estão apresentados na Tabela 5. Os limites correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição.

Tabela 5 - Limites para os desequilíbrios de tensão.

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

Fonte: Módulo 8 ANEEL, 2021.

3.3.1.5. Flutuação de Tensão

Condizente o PRODIST (MÓDULO 8 ANEEL, 2021), a flutuação de tensão é um fenômeno caracterizado pela variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz ou de pico da tensão instantânea. A determinação da qualidade da tensão do sistema de distribuição quanto à flutuação de tensão tem por objetivo avaliar o incômodo provocado pelo efeito da cintilação luminosa no consumidor, que tenha em sua unidade consumidora pontos de iluminação alimentados em baixa tensão.

O PRODIST adota os procedimentos da *International Electrotechnical Commission* (IEC), definidos na norma IEC 61000-4-15 “Flickermeter – Functional and design specifications”, para avaliar esse tipo de distúrbio.

Concordante (ALMEIDA, 2017), a P_{st} é o índice que quantifica a severidade de cintilações de curta duração em períodos de 10 min e está associado a incidência de flutuação de tensão causada por cargas individuais com ciclos de operações curtos. Da mesma forma, a P_{lt} é o índice que quantifica a severidade de cintilações de longa duração em períodos de duas horas e está associado a incidência combinada de várias cargas operando aleatoriamente (soldas, motores, etc) ou cargas individuais com ciclos de operações longos.

De acordo com PRODIST, as expressões para o cálculo P_{st} e P_{lt} são:

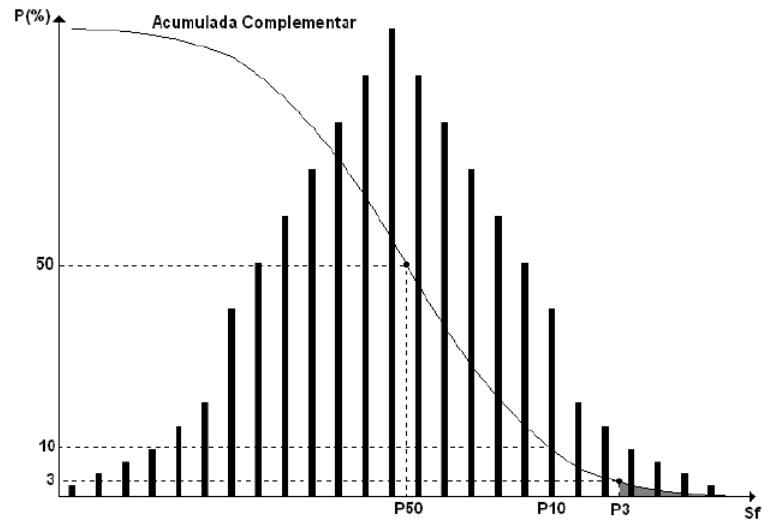
$$P_{st} = \sqrt{0,0314 \cdot P_{0,1} + 0,0525 \cdot P_1 + 0,0657 P_3 + 0,28 P_{10} + 0,08 P_{50}} \quad (14)$$

Onde:

P_{st} = Severidade de Flutuação de Tensão de Curta Duração.

Em que P_i ($i = 0,1; 1; 3; 10; 50$) corresponde ao nível de flutuação de tensão que foi ultrapassado durante i % do tempo, obtido a partir da função de distribuição acumulada complementar da Figura 6.

Figura 7: Distribuição Acumulada Complementar da Sensação de Cintilação.



Fonte: Módulo 8 ANEEL, 2021.

A Plt corresponde a um valor representativo de doze amostras consecutivas de Pst , conforme expressão abaixo:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (P_{sti})^3} \quad (15)$$

Onde:

Plt = Severidade de Flutuação de Tensão de Longa Duração.

Os limites para o indicador de flutuação de tensão estão apresentados na Tabela 6. Os limites correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição (MÓDULO 8 ANEEL, 2021).

Tabela 6 - Limites para flutuação de tensão.

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0\text{kV}$	$1,0\text{kV} < V_n < 69\text{kV}$	$69\text{kV} \leq V_n < 230\text{kV}$
Pst95%	1,0 pu	1,5 pu	2,0 pu

Fonte: Módulo 8 ANEEL, 2021.

Pst95% = Valor do indicador Pst que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas.

3.3.1.6. Variação de Frequência

Um outro indicador importante do sistema elétrico é a variação da frequência. O sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas ao mesmo devem, em condições normais de operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz (MÓDULO 8 ANEEL, 2021).

Na ocorrência de algum desequilíbrio entre a energia gerada e a demanda, surgirá uma variação indesejada na velocidade dos geradores. Um déficit na geração proporcionará uma diminuição da frequência em relação à nominal, enquanto a elevação na frequência indica que a geração está acontecendo em excesso. Pode-se então utilizar o desvio de frequência para verificar se a potência gerada atende ou não à carga em cada instante (MARQUES, 2018).

Em casos extremos, a variação na frequência pode ocasionar instabilidade no sistema elétrico como um todo. A atuação das proteções do sistema, sensibilizadas por frequências fora da faixa de operação, acarretam o corte de grandes blocos de cargas e conseqüentemente aumenta o desequilíbrio entre carga e geração, causando uma reação em cadeia de desligamentos, podendo chegar a um colapso total do sistema, conhecido como blecaute (MARQUES, 2018).

Quanto aos limites regulamentares para a frequência, o PRODIST afirma que:

- Quando da ocorrência de distúrbios no sistema de distribuição, as instalações de geração devem garantir que a frequência retorne, no intervalo de tempo de 30 (trinta) segundos após a transgressão, para a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz, para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração;

- Havendo necessidade de corte de geração ou de carga para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração, durante os distúrbios no sistema de distribuição, a frequência:
 - ✓ Não pode exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz em condições extremas;
 - ✓ Pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 (trinta) segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo 10 (dez) segundos;
 - ✓ Pode permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 (dez) segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 05 (cinco) segundos.

3.3.1.7. Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD)

Variações de tensão de curta duração (VTCD) são desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos. As variações de tensão de curta duração são classificadas de acordo com a Tabela 7 (MÓDULO 8 ANEEL, 2021).

Estima-se que a maioria das falhas no suprimento de energia a consumidores industriais estejam associados às ocorrências de Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) causando grandes prejuízos que podem chegar a cifras bastante elevadas, a depender da sensibilidade dos equipamentos e dos processos industriais afetados, devido à perda de materiais, custos de reprocessamento e perdas na qualidade dos produtos (MARQUES, 2018).

Tabela 7: Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração.

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte: Módulo 8 ANEEL, 2021.

As expressões para o cálculo dos indicadores associados com as variações de tensão de curta duração são os seguintes:

$$V_e = \frac{V_{res}}{V_{ref}} \times 100 \quad (16)$$

Sendo:

V_e = amplitude do evento de VTCD (em %);

V_{res} = tensão residual do evento de VTCD (em Volt);

V_{ref} = tensão de referência (em Volt).

$$\Delta t_e = t_f - t_i \quad (17)$$

Sendo:

Δt_e = duração do evento de VTCD (em milissegundos);

t_f = instante final do evento de VTCD;

t_i = instante inicial do evento de VTCD.

$$f_e = n \quad (18)$$

Sendo:

f_e = frequência de ocorrência de eventos de VTCD;

n = quantidade de eventos de VTCD registrados no período de avaliação.

3.4. Indicadores de QEE da Concessionária Local

De acordo com publicação no site da ANEEL, no que trata dos indicadores de conformidade do nível de tensão (DRP e DRC), a concessionária de energia do estado do Tocantins, Energisa Tocantins, efetuou um quantitativo de 1236 compensações em 2020, chegando ao valor de R\$ 113.474,99 (cento e treze mil, quatrocentos e setenta e quatro reais e noventa e nove centavos). Neste mesmo ano, o indicador DRCE (duração relativa da transgressão de tensão crítica equivalente) chegou a 0,30 e o DRPE (duração relativa da transgressão de tensão precária equivalente) no valor de 0,67. Todos os valores informados pela distribuidora são passíveis de fiscalização pela ANEEL (INDICADORES, 2020).

Abaixo, temos uma tabela contendo os indicadores de conformidade de nível de tensão da Energisa Tocantins, nos últimos 10 anos.

Tabela 8: indicadores de conformidade de tensão da distribuidora local.

Indicadores de conformidade do nível de tensão em regime permanente				
Energisa Tocantins				
ANO	DRCE	DRPE	Quantidade de compensações pagas	Valor de compensações (R\$)
2020	0,30	0,67	1236	113.474,99
2019	1,77	1,85	1957	182.398,13
2018	1,07	1,43	4514	447.875,07
2017	2,93	3,57	4980	583.270,75
2016	1,25	2,84	4259	672.677,58
2015	1,18	3,72	3070	483.113,10
2014	0,02	0,48	2392	468.580,44
2013	0,02	1,02	1078	318.233,68
2012	0,23	0,84	1526	363.151,49
2011	0,03	0,41	1587	441.107,87

Fonte: Indicadores, 2020.

3.5. Normas Internacionais referentes à Qualidade de Energia Elétrica

3.5.1. *International Electrotechnical Commission (IEC)*

A Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) é a organização mundial líder que prepara e publica Normas Internacionais para toda elétrica, eletrônica e tecnologias relacionadas na terra, no mar e ar, bem como as disciplinas relacionadas tais como terminologia, compatibilidade eletromagnética, performance, segurança e meio ambiente, incluindo trabalhos na otimização da eficiência energética e desenvolvimento de normas para energias renováveis (IEC, 2008).

A IEC também gerencia sistemas de avaliação da conformidade que certifica que os equipamentos, sistemas ou componentes, estejam em conformidade com seus padrões internacionais. Diversos comitês técnicos (TCs) e subcomissões (SC) realizam o trabalho relativo às normas da IEC. Estes grupos de trabalho são compostos por especialistas de todo o mundo, a maioria vindo da indústria e do comércio, com participação de entidades governamentais, laboratórios de pesquisa, universidades e grupos de consumidores, que também contribuem para o trabalho (IEC, 2008).

3.5.2. *Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)*

O Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) é uma associação que colabora no incremento da prosperidade mundial, promovendo a engenharia de criação, desenvolvimento, integração, compartilhamento e o conhecimento aplicado no que se refere à ciência e tecnologias da eletricidade e da informação, em benefício da humanidade e da profissão. Atualmente, é a maior sociedade técnico-profissional do mundo, dedicada ao avanço da teoria e prática da engenharia nos campos da eletricidade, eletrônica e computação (IEEE, 2016).

3.5.3. *International Council on Large Electric Systems (CIGRÉ)*

O Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos (CIGRÉ) é uma organização permanente, não-governamental, sem fins lucrativos, fundada em 1921 na França, que se dedica a tratar aspectos técnicos, econômicos, ambientais, organizacionais e de regulamentação relacionados a sistemas elétricos de grande

porte. Também neste caso não se trata de uma organização normativa, mas seus estudos servem de base para as definições de normas e regulamentações. Possui organizações nacionais associadas. O Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (CIGRÉ Brasil) é uma sociedade civil, sem fins lucrativos, fundada em 1971, que tem por objetivo promover o intercâmbio e desenvolvimento técnico, tecnológico, e da engenharia no Brasil, no campo da produção de energia elétrica, de sua transmissão em alta tensão e distribuição (CIGRÉ, 2016).

3.5.4. *National Electrical Manufacturers Association (NEMA)*

A Associação Nacional de Equipamentos Elétricos (NEMA) é uma associação da indústria norte-americana, responsável pelo desenvolvimento de diversas normas técnicas de uso industrial comum no domínio a eletricidade, com mais de 400 membros associados. O principal objetivo da NEMA é promover a competitividade das suas empresas associadas, oferecendo serviços de qualidade, tendo um impacto positivo nas normas, regulamentos governamentais e economia de mercado (NEMA, 2016).

4. ESTUDO DE CASO

A metodologia adotada consistiu no estudo de caso com base nos procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica sob o prisma da legislação atual, na Subestação de Energia 3 do Instituto federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins - *Campus* Palmas. Esse estudo foi baseado em uma pesquisa documental, bibliográfica e medições com o analisador de qualidade de energia descrito.

A Subestação 3 foi energizada em novembro de 2012 e atende a 9 complexos, contendo nestes complexos: salas de aula, salas administrativas, mini auditórios, laboratórios e o ginásio de esportes (APÊNDICE A; APÊNDICE C).

4.1. Metodologia empregada para medição

Acordante (MÓDULO 8 ANEEL, 2021), a medição de tensão em regime permanente deve ser efetuada no ponto de conexão da unidade consumidora, salvo nas seguintes situações: para unidades consumidoras conectadas no Sistema de Distribuição de Média Tensão (SDMT) com equipamentos de medição instalados em tensões do Sistema de Distribuição de Baixa Tensão (SDBT), a instalação do equipamento de medição de tensão poderá ser realizada no lado secundário do transformador de potência, considerando-se a relação de transformação.

Devido ao IFTO – *Campus* Palmas ser atendido pela distribuidora de energia local em tensão nominal 13,8 kV, sendo um consumidor conectado ao SDAT, foi necessário realizarmos a medição no secundário do transformador entre todas as fases e o neutro (vide Figura 8). Esta medição no secundário, foi também ocasionado pela segurança das pessoas que foram responsáveis pela conexão do equipamento ao sistema energizado e pela isolação do equipamento, que permite em sua alimentação uma tensão máxima de 300 Volts para ligações entre fase/neutro e fase/fase.

A qualidade de energia foi avaliada por meio das leituras obtidas pelas medições apropriadas, de acordo com a metodologia descrita para os indicadores. No caso da tensão em regime permanente, as leituras associadas à Tensão de Referência (TR) foram classificadas em três categorias: adequadas, precárias ou críticas, baseando-se no afastamento do valor da tensão de leitura em relação à

tensão de referência. Os valores de tensão obtidos pelas medições realizadas foram comparados à tensão de referência, sendo esta a tensão nominal, de acordo com o nível de tensão do ponto de conexão da distribuidora com o consumidor.

Os conjuntos de leituras para gerar os indicadores individuais compreenderam os registros de 1008 (mil e oito) leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos (período de integralização) de 10 minutos cada, salvo as que eventualmente foram expurgadas devido interrupções de longa duração. No intuito de se obter 1008 (mil e oito) leituras válidas, intervalos adicionais de medição de 10 minutos foram agregados, sempre consecutivamente (MÓDULO 8 ANEEL, 2021).

Para as medições de distorções harmônicas, desequilíbrios de tensão e flutuações de tensão, na ocorrência de variações de tensão de curta duração ou de interrupções de longa duração, o intervalo de medição de 10 (dez) minutos deve ser expurgado e substituído por igual número de leituras válidas. Para as medições de nível de tensão em regime permanente, na ocorrência de variações temporárias de tensão ou de interrupções de longa duração, o intervalo de medição de 10 (dez) minutos deve ser expurgado e substituído por igual número de leituras válidas, sendo opcional o expurgo de intervalos com variações momentâneas de tensão (MÓDULO 8 ANEEL, 2021).

Assim, a cada 10 minutos é armazenado na memória do equipamento um valor de leitura do período de integralização. O somatório para análise da medição deve compreender um somatório de 1008 registros válidos. Sendo assim, em 1 hora temos 6 leituras efetuadas pelo equipamento. Em um dia, temos 144 leituras. Dividindo 1008 por 144, vamos obter o valor de 7 dias, sendo equivalente a 168 horas de medição de tensão em regime permanente.

Os valores eficazes de tensão foram calculados a partir das amostras coletadas em janelas sucessivas. Cada janela compreendeu uma sequência de quinze ciclos (0,25 segundos). Este fator é importante para entender como é feita a medição pelo equipamento.

Se a cada 15 ciclos (0,25 segundos) tivemos uma amostra da medição realizada pelo equipamento, em 60 ciclos (1 segundo) obtivemos 4 amostras. Seguindo este raciocínio, em 3.600 ciclos (1 minuto) obtivemos 240 amostras da medição. E em 36.000 ciclos (10 minutos) foram obtidas 2400 amostras da medição, sendo estas integralizadas, obtendo-se os valores eficazes de tensão no período medido de 10 minutos.

Conforme mencionado anteriormente, a medição foi realizada no secundário do transformador. A ANEEL determina que nos casos em que é feita medição no secundário de consumidor conectado ao SDAT, deve-se analisar esta medição utilizando a relação de transformação. Ou seja, a tensão medida, deve ser dividida pelo seu valor nominal, a fim de encontrarmos o valor em pu (por unidade). Com os valores em pu, encontramos o nível de tensão fornecido no ponto de conexão, sendo a rede primária de 13,8 kV. Portanto, para encontrar este valor em pu, utilizou-se a seguinte fórmula:

$$\textit{Tensão em pu} = \frac{\textit{TENSÃO MEDIDA}}{\textit{TENSÃO NOMINAL}} (V) \quad (19)$$

Como o módulo trabalha com a tensão em pu, os dados serão analisados utilizando esta base. Para identificar este valor em pu medido, refletindo para a tensão de fornecimento (13,8 kV), deve-se proceder da seguinte maneira:

$$\textit{Tensão Refletida} = \textit{Tensão em pu} \times \textit{Tensão Nominal} \quad (20)$$

Encontrando a Tensão Refletida, é possível verificar a proximidade deste valor em relação ao valor nominal fornecido pela distribuidora de energia local.

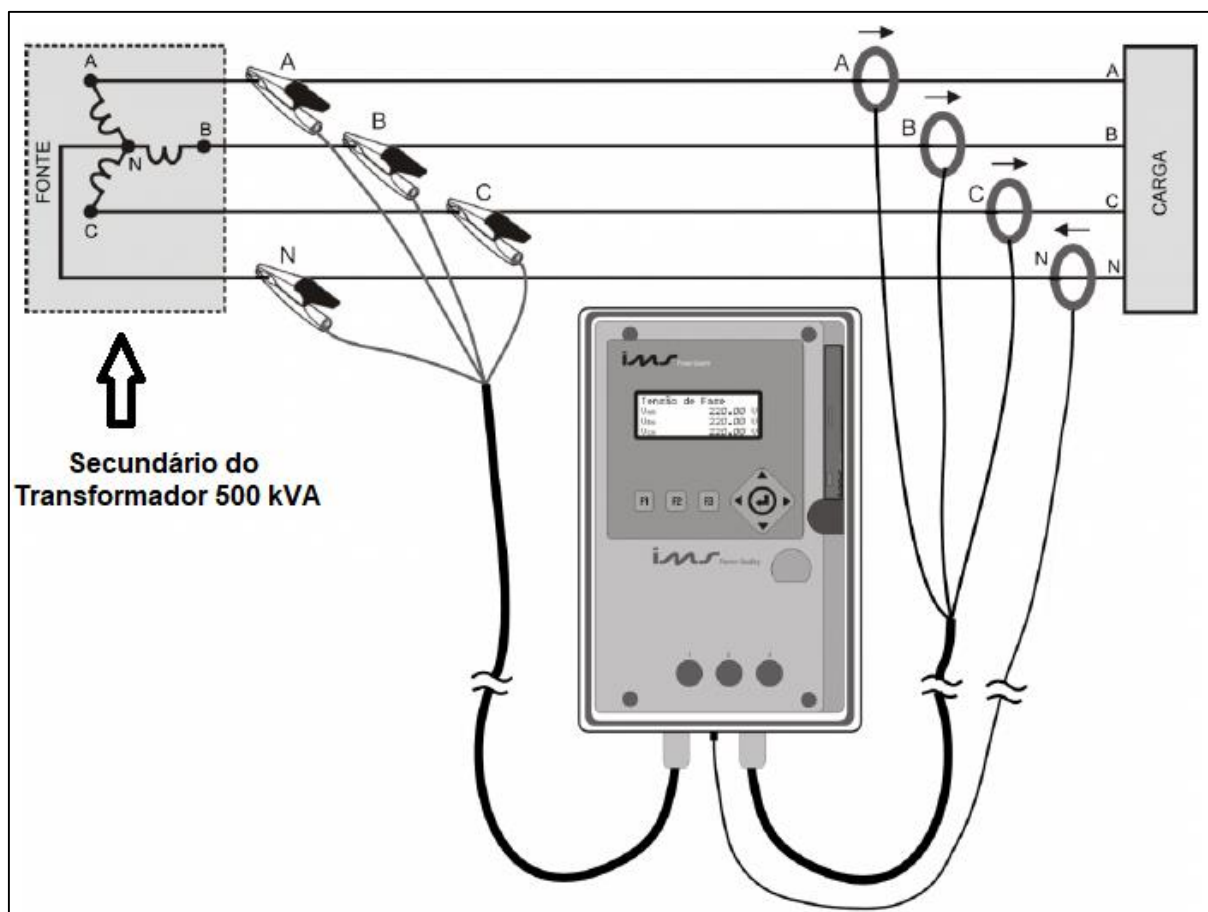
Importante ressaltar que a análise realizada neste trabalho está considerando o transformador da subestação III ligado no TAP 13.800, que é a posição 1, conforme os dados de placa (APÊNDICE B).

Desta forma, os dados obtidos por meio das medições realizadas pelo PQ-700, serviram de subsídio para análise dos fenômenos da qualidade do produto. Sendo, tensão em regime permanente, obtendo os indicadores individuais DRP e DRC, fator de potência, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, harmônicos, variação de frequência e VTCD's. Todos estes serão analisados sob a ótica do Módulo 8 PRODIST da ANEEL.

4.2. Instalação do medidor

O esquema de ligação é mostrado na Figura 8 (IMS PQ-700, 2020).

Figura 8: Esquema de ligação do analisador de energia PowerNET PQ-700.



Fonte: (IMS PQ-700, 2020).

Os dados coletados pelo analisador PowerNET PQ-700 foram filtrados e seus resultados são analisados e comentados no Capítulo 5.

4.3. Software utilizado – *Power Manager Desktop*

O power manager desktop (IMS PowerManager, 2021), é um software de programação para equipamentos e análise de dados. Possui uma aplicação para análises coletados em tempo real ou armazenados em dispositivos de memória de massa, gerando tabelas, gráficos e relatórios. O software oferece uma interface amigável de parametrização de equipamentos e seu controle através de interfaces locais e remotas. Dentre suas aplicações típicas, podemos citar:

- ✓ Monitorar, Gerenciar a Energia Elétrica e as Grandezas Elétricas por meio de relatórios, gráficos e tabelas;
- ✓ Analisar os dados coletados em tempo real;

- ✓ Descarregar e analisar dados armazenados em equipamentos com memória de massa;
- ✓ Controlar e programar os equipamentos através de interfaces locais e remotas.

Possibilita também a utilização de diversas funcionalidades:

- ✓ Parametrização de equipamentos cadastrados no software, incluindo ajustes tais como: relação de TP e TC, limites para eventos, relógio, configurações de memória de massa, idioma, entre outros;
- ✓ Leitura de medições em tempo real (Monitoramento em tempo real);
- ✓ Leitura de memória de massa;
- ✓ Visualização de tabelas e gráficos;
- ✓ Relatórios conforme a ANEEL – PRODIST;
- ✓ Gravação de Forma de Onda (Oscilografia);
- ✓ Viabilidade de analisar o Fator de Potência e simular a sua correção;
- ✓ Diversificados tipos de comunicação: TCP/IP, GPRS, RS-232, RS-485 e Bluetooth.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

As medições da qualidade de energia na SE 3 do IFTO – *Campus Palmas* foram iniciadas às 10h40min do dia 08/03/2021 e permaneceram até o dia 15/03/2021 às 10h30min, compreendendo o período de 1 semana. Para análise da tensão elétrica conforme está descrito no módulo 8 da ANEEL, atingindo um somatório de 1008 leituras válidas que é equivalente a 7 dias de medição.

As medições foram registradas pelo equipamento IMS, sendo analisadas através do software Power Manager Desktop. Programa este, desenvolvido pela *IMS Power Quality*, que também é responsável pela fabricação do analisador de energia *IMS PQ-700*. Através deste software também foi possível exportar os dados para planilhas do *Microsoft Excel*. Algumas análises foram feitas utilizando apenas o software. Em outros casos, foi necessário exportar os dados para possibilitar uma análise e visualização diferente do que é feito pelo programa.

5.1. Tensão em Regime Permanente

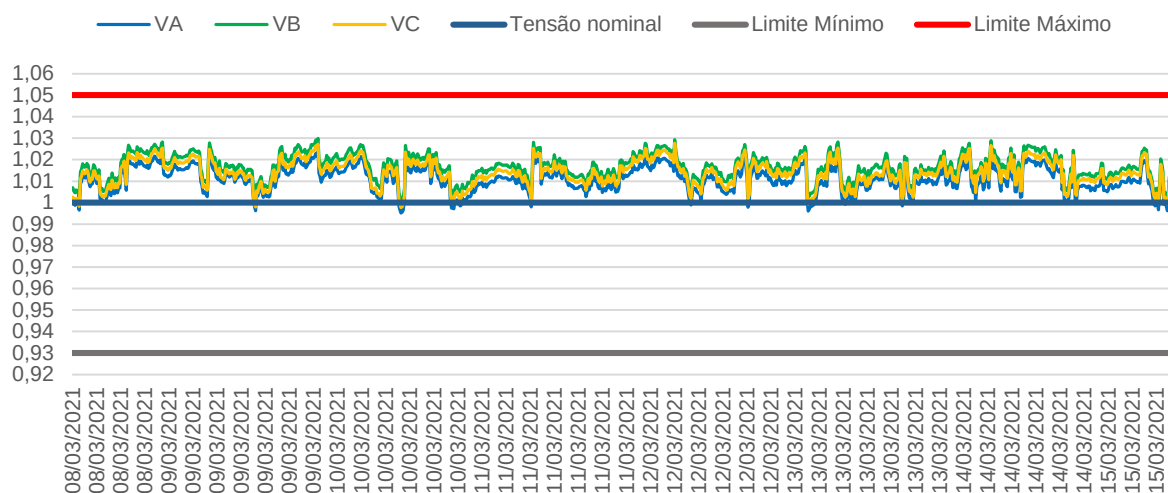
Analisou-se a tensão em regime permanente na sua totalidade, sendo classificadas como adequada, precária ou crítica.

Além da classificação da medição, constatou-se as tensões mínimas, máximas e médias; as medições válidas ou inválidas; o período em que houve alguma falta de energia elétrica, considerando este período como medição inválida; as medições adequadas ou violadas, ultrapassando o limite de tensão estipulado no módulo 8 da ANEEL; e outros dados sendo mostrados em forma de gráficos e tabelas para melhor visualização.

O gráfico de tensão (Figura 8) demonstra o comportamento da tensão elétrica no período medido.

No período da medição não houve nenhuma falta de energia elétrica, vindo a expurgar alguma leitura no intervalo de 10 minutos. Assim, o analisador concluiu as 1008 leituras válidas sem interrupções.

De acordo com módulo 8 da ANEEL, *considera-se que há interrupção sempre que a tensão de fornecimento for igual ou inferior a 70% (setenta por cento) da tensão nominal.*

Figura 9: Gráfico das tensões registradas (pu).

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 9 tem o objetivo de simplificar as medições registradas pelo equipamento, descrevendo as tensões médias, mínimas e máxima por fase. Como esta tensão é analisada na base *pu*, foi refletido este valor para outras bases com o intuito de melhorar a visualização do valor medido.

Para a base da tensão nominal 220 V, foi utilizado a fórmula **(20)**.

Exemplo: $220 \text{ V} \times 1,0106 \text{ pu} = 222,33 \text{ V}$.

Na base da tensão nominal 380 V, foi multiplicado o valor encontrado na base 220 V por raiz de três ($\sqrt{3}$).

Exemplo: $222,33 \text{ V} \times \sqrt{3} = 385,09 \text{ V}$.

Para a base tensão nominal 13,8 kV, foi necessário encontrar o valor da tensão de fase para esta base (dividir 13,8 kV por raiz de três ($\sqrt{3}$)), multiplicá-lo pelo valor em *pu*, e por fim, multiplicar por raiz de três ($\sqrt{3}$), retornando para a base 13800 V.

Exemplo: $13.800 / \sqrt{3} = 7.967 \text{ V}$.

$7.967 \text{ V} \times 1,0106 \text{ pu} \times \sqrt{3} = 13.945,52 \text{ V}$.

Como podemos observar a tensão teve variação máxima no valor de 0,0506 pu (equivalente a 0,698 kV na base 13,8 kV e 11,13 V na base 220 V).

Tabela 9: Valores médios, máximos e mínimos das tensões registradas, por fase.

Descrição	FASE A	FASE B	FASE C
Tensão Média (pu)	1,0110	1,0168	1,0140
Transformando para Base 13,8 kV	13,95	14,03	13,99
Transformando para Base 220 V	222,42	223,70	223,09
Transformando para Base 380 V	384,18	386,39	385,34
Tensão Máxima (pu)	1,0238	1,0300	1,0277
Transformando para Base 13,8 kV	14,13	14,21	14,18
Transformando para Base 220 V	225,23	226,59	226,09
Transformando para Base 380 V	389,03	391,38	390,52
Data / Hora (referente ao valor máximo)	10/03/2021 00:00:00	10/03/2021 00:00:00	12/03/2021 06:20:00
Tensão Mínima (pu)	0,9952	1,0010	0,9977
Transformando para Base 13,8 kV	13,73	13,81	13,77
Transformando para Base 220 V	218,95	220,21	219,50
Transformando para Base 380 V	378,19	380,36	379,14
Data / Hora (referente ao valor mínimo)	10/03/2021 12:40:00	09/03/2021 14:30:00	10/03/2021 12:40:00

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 10 determina quantas medições foram registradas no intervalo de 0,8 pu a 1,20 pu com uma discretização de 41 intervalos diferentes.

Esta tabela é fundamental por se tratar de uma das exigências do Módulo 8 da ANEEL, onde deve-se ter registrado uma tabela de tensão, por unidade de tensão nominal, com o intervalo de 0,8 pu a 1,20 pu, e com uma discretização mínima de 40 (quarenta) intervalos.

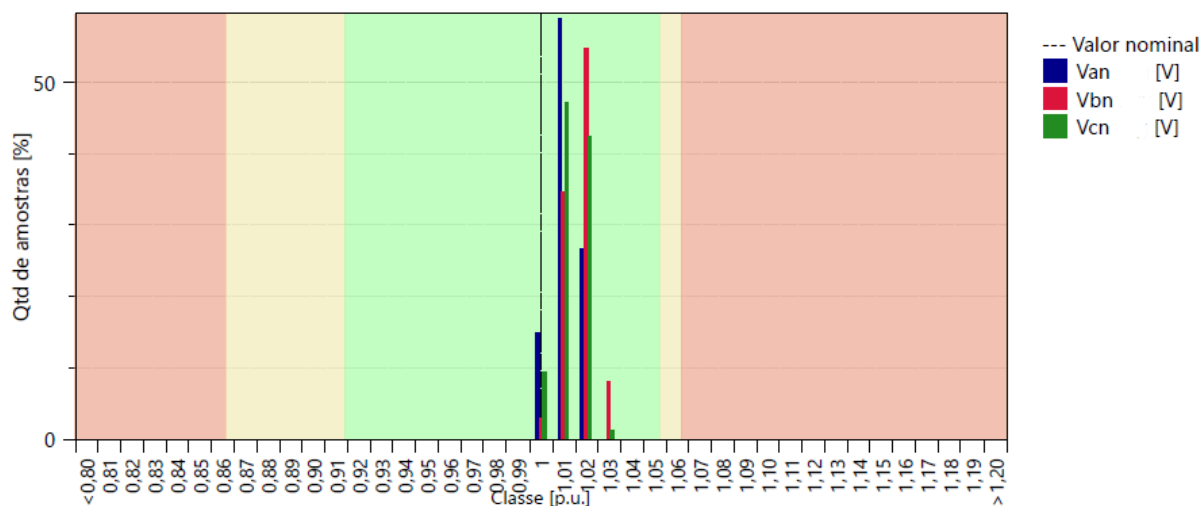
Tabela 10: Distribuição das tensões com o intervalo de 0,80 pu a 1,20 pu da tensão nominal.

FAIXAS DE TENSÃO			VA		VB		VC	
pu	V (220)	V (13.800)	REG.	%	REG.	%	REG.	%
0,80	176,00	11.040,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
0,81	178,20	11.178,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
0,82	180,40	11.316,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
0,83	182,60	11.454,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
0,84	184,80	11.592,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
0,85	187,00	11.730,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
0,86	189,20	11.868,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
0,87	191,40	12.006,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
0,88	193,60	12.144,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
0,89	195,80	12.282,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
0,90	198,00	12.420,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
0,91	200,20	12.558,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
0,92	202,40	12.696,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
0,93	204,60	12.834,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
0,94	206,80	12.972,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
0,95	209,00	13.110,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
0,96	211,20	13.248,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
0,97	213,40	13.386,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
0,98	215,60	13.524,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
0,99	217,80	13.662,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
1,00	220,00	13.800,00	148	14,68%	28	2,78%	94	9,32%
1,01	222,20	13.938,00	593	58,83%	348	34,52%	475	47,12%
1,02	224,40	14.076,00	267	26,49%	551	54,66%	428	42,47%
1,03	226,60	14.214,00	0	0,00%	81	8,04%	11	1,09%
1,04	228,80	14.352,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
1,05	231,00	14.490,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
1,06	233,20	14.628,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
1,07	235,40	14.766,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
1,08	237,60	14.904,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
1,09	239,80	15.042,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
1,10	242,00	15.180,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
1,11	244,20	15.318,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
1,12	246,40	15.456,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
1,13	248,60	15.594,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
1,14	250,80	15.732,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
1,15	253,00	15.870,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
1,16	255,20	16.008,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
1,17	257,40	16.146,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
1,18	259,60	16.284,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
1,19	261,80	16.422,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%
1,20	264,00	16.560,00	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 10 é apenas uma visão da Tabela 4 em forma de gráfico.

Figura 10: Gráfico da distribuição das tensões com o intervalo de 0,80 pu a 1,20 pu.



Fonte: (IMS PowerManager, 2021).

Para finalizar a análise da tensão em regime permanente, temos a Tabela 11 evidenciando a quantidade e o percentual de leituras adequadas, violadas (inadequadas) e inválidas.

Quantidade de medições registradas: 1008;

Quantidade de leituras válidas: 1008;

Quantidade de leituras inválidas: 0;

Quantidade de leituras adequadas: 1008;

Quantidade de leituras violadas: 0.

Tabela 11: Quantidade e percentual de medições de tensão Adequadas (Adeq), Violadas (Viol) e Inválidas (Inv).

Dados	FASE A			FASE B			FASE C		
	Adeq	Viol	Inv	Adeq	Viol	Inv	Adeq	Viol	Inv
Quant	1008	0	0	1008	0	0	1008	0	0
%	100	0,00	0,00	100	0,00	0,00	100	0,00	0,00

Fonte: Elaboração própria.

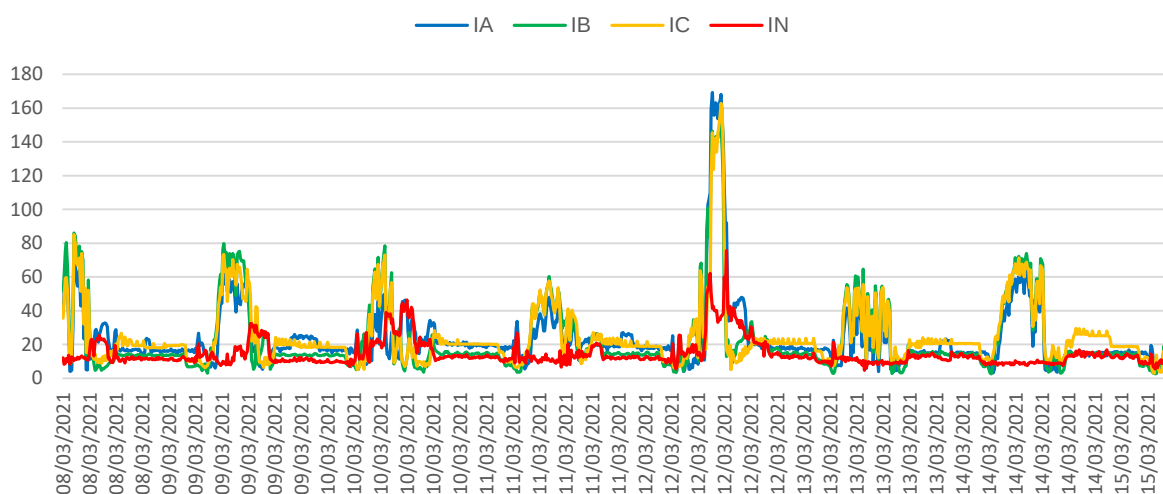
Analisando todos estes gráficos e tabelas, identificamos que não houve nenhuma medição fora dos limites adequados da tensão de fornecimento, podendo ocasionar a contabilização dos indicadores individuais DRP e/ou DRC.

Portanto, após a análise da medição de qualidade de energia, os valores de tensão em regime permanente registrados estão dentro dos limites estipulados pela ANEEL, sendo considerada uma medição adequada.

5.2. Corrente, Potência Aparente e Fator de Potência

Em relação ao valor da corrente medido (A), observamos que o máximo identificado foi no dia 12/03/2021 às 12h50min na fase A, chegando ao valor de 169,32 A. Neste mesmo instante a corrente de neutro registrou o valor de 41,34 A. Isto ocorreu no período em que diversos equipamentos elétricos dos blocos atendidos pela subestação 3 foram ligados. O objetivo foi simular uma situação de carga típica.

Figura 11: Gráfico das correntes registradas (A).

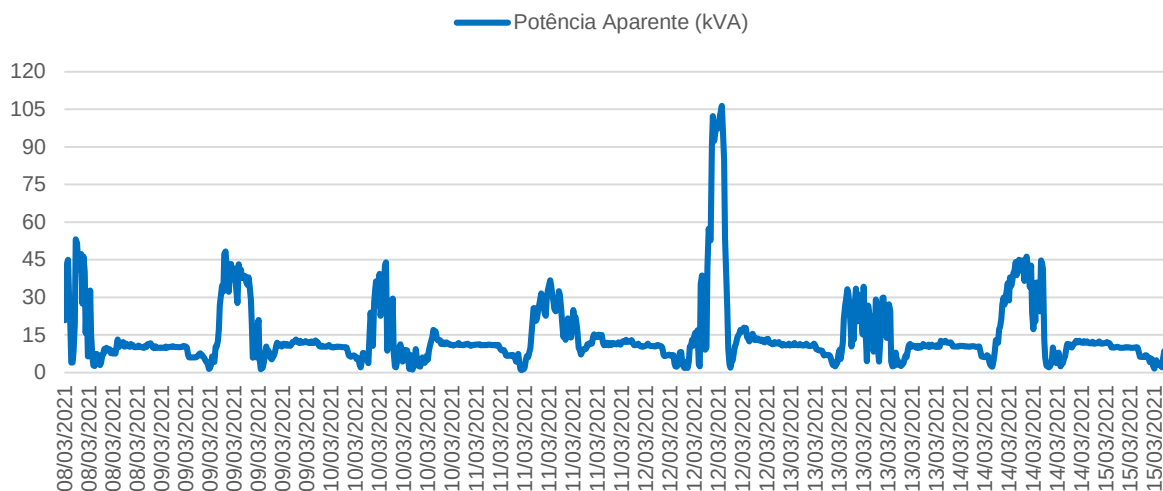


Fonte: Elaboração própria.

O mesmo ocorreu com a potência aparente, registrando o valor de 106,43 kVA no período mencionado para a corrente. Vale ressaltar que foram ligadas algumas cargas.

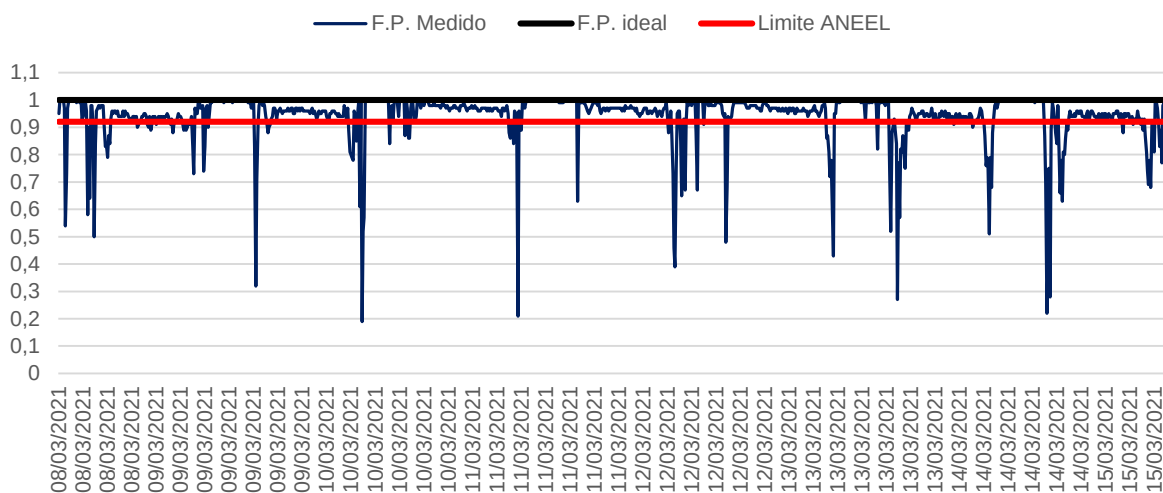
Para um transformador de 500 kVA, a potência máxima medida atingiu apenas 21,3% da carga nominal.

Caso não tivéssemos este período de simulação de carga típica, a maior demanda teria sido 53,14 kVA.

Figura 12: Potência Aparente (kVA).

Fonte: Elaboração própria.

Quanto ao Fator de Potência, a Figura 12 apresenta seu comportamento no período da medição.

Figura 13: Fator de Potência registrado.

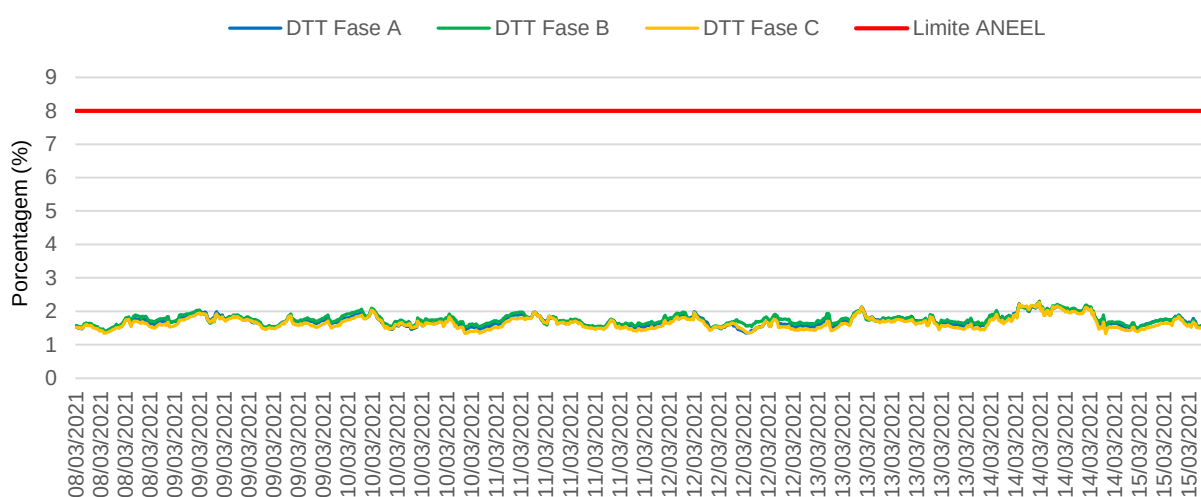
Fonte: Elaboração própria.

Através destes dados, observa-se que os diversos registros ultrapassaram o limite estabelecido pela ANEEL, que é de 0,92. O menor valor apurado foi de 0,19 no dia 10/03/2021 às 10:20 hrs. Ou seja, com estes valores o IFTO estará sujeito a penalizações da concessionária quanto ao consumo excedente de energia reativa.

5.3. Distorções Harmônicas

No gráfico apresentado na Figura 13 visualiza-se os níveis de distorções harmônicas totais de tensão em cada uma das fases do circuito. O valor máximo registrado no período da medição foi na fase B, chegando a uma DTT% de 2,30% no dia 14/03/2021 às 09h30min. Enquanto, o valor mínimo da DTT% foi de 1,33% na fase C, sendo medido no dia 14/03/2021 às 19h20min.

Figura 14: Distorção Harmônica Total de Tensão medido.



Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 12 contém os valores percentuais das grandezas DTT%, DTT_P%, DTT_i%, DTT₃%, onde obteve-se os médios e máximos registrados pelo analisador de qualidade de energia.

Tabela 12: Valores medidos para cada grandeza harmônica.

Grandeza		Fase A (%)	Fase B (%)	Fase C (%)
DTT%	Média	1,71	1,75	1,65
	Máximo	2,26	2,30	2,27
DTT _P %	Média	0,03	0,03	0,04
	Máximo	0,08	0,09	0,08
DTT _i %	Média	1,67	1,73	1,64
	Máximo	2,23	2,29	2,27
DTT ₃ %	Média	0,33	0,26	0,13
	Máximo	0,46	0,42	0,25

Fonte: (IMS PowerManager, 2021).

Atendendo as exigências da ANEEL, a Tabela 13 apresenta os indicadores DTT95%, DTT_P95%, DTT_i95%, DTT₃95%, onde o valor foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas. Com estes dados podemos comparar o aferido com a meta estipulada.

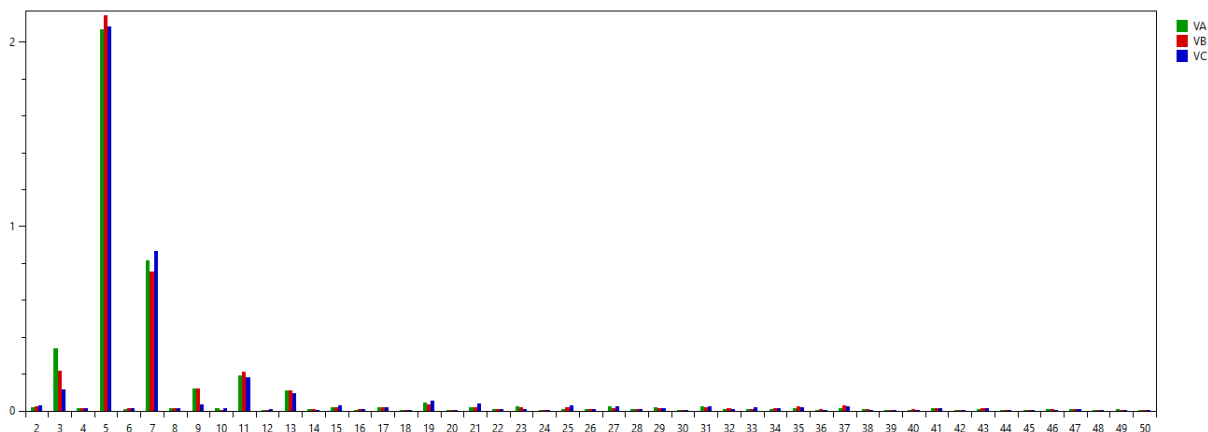
Tabela 13: Indicadores das distorções harmônicas totais registradas.

Grandeza	Limite	Fase A (%)	Fase B (%)	Fase C (%)
DTT95%	8,00%	2,03	2,06	2,00
DTT _P 95%	2,00%	0,04	0,05	0,05
DTT _i 95%	6,00%	2,00	2,05	1,99
DTT ₃ 95%	5,00%	0,39	0,34	0,17

Fonte: (IMS PowerManager, 2021).

A Figura 14 é um espectro que detalha todas as ordens harmônicas registradas no período das 1008 leituras válidas, sendo a 50ª (quinquagésima) harmônica sua ordem máxima (3kHz). Os dados são referentes ao registro do dia 14/03/2021 às 09h30min, onde já citado acima que foi o período integralizado que obteve-se o valor máximo da DTT%.

Figura 15: Distorções Harmônicas até a 50ª ordem.



Fonte: (IMS PowerManager, 2021).

Conforme mencionado anteriormente, as harmônicas são divididas em ordens, todas partindo da fundamental, e são discriminadas em ímpares e pares. As harmônicas de ordem ímpar são encontradas em instalações em geral e as pares somente em caso de assimetria, caso haja a presença de componente contínua. Por exemplo, num motor de indução, um harmônico de sequência positiva gera um

campo magnético que gira na mesma direção do fundamental. Um harmônico de sequência negativa gira na direção oposta. Assim, as harmônicas de sequência positiva podem produzir aquecimento de condutores e interrupções no circuito. As de sequência negativa provocam também o aquecimento e mais problemas no motor e as de sequência zero, além do aquecimento, elevam a corrente de neutro do sistema trifásico de quatro fios (trifásico com neutro), ocasionando maior desbalanceamento (ATKINSON, 2017).

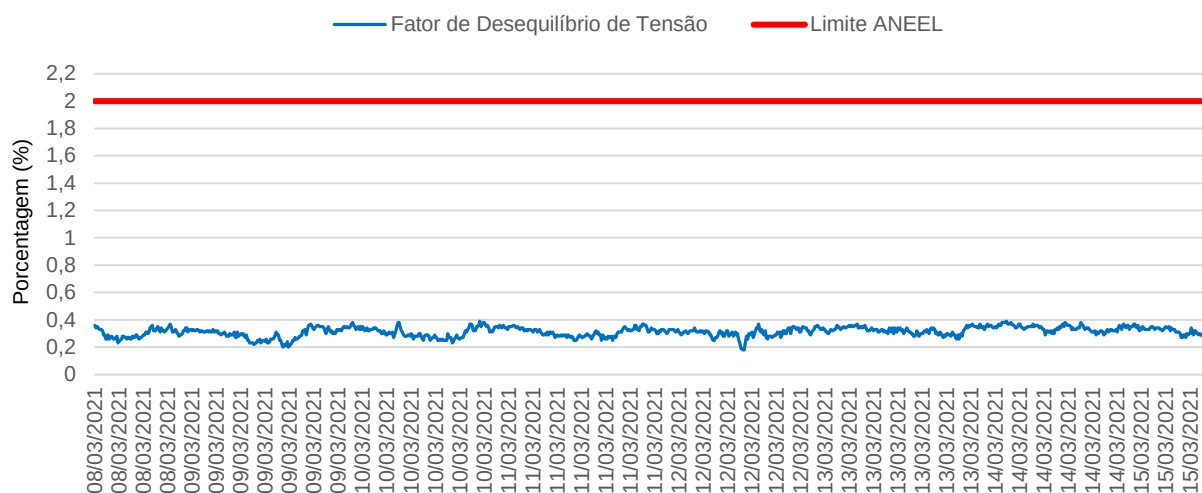
Portanto, após a análise da medição de qualidade de energia, os valores das distorções harmônicas totais registrados estão dentro dos limites estipulados pela ANEEL, sendo considerada uma medição adequada.

5.4. Desequilíbrio de Tensão

O analisador de energia PQ-700 realizou as verificações do desequilíbrio de tensão conforme está descrito no PRODIST. A figura 14 denota o comportamento do desequilíbrio de tensão no período de integralização das 1008 leituras válidas.

O valor máximo de desequilíbrio foi registrado no dia 10/03/2021 às 20h40min, registrando o valor percentual de 0,39. Enquanto isso, o mínimo foi de 0,18%, sendo medido no dia 12/03/2021 às 12h20min.

Tratando-se do indicador FD95%, onde temos os valores o valor do indicador FD% que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas, obtivemos o valor percentual de 0,36. Comparando este valor com o estabelecido pela ANEEL, que é de 2%, percebe-se que o mesmo atende ao que foi determinado, sendo considerado um valor adequado. Ou seja, este dado indica que as cargas estão equilibradas quanto à sua distribuição entre as fases.

Figura 16: Fator de Desequilíbrio de Tensão apurado.

Fonte: Elaboração própria.

5.5. Flutuação de Tensão

Durante o período de medição realizado, o maior valor registrado para flutuação de tensão de curta duração, o P_{st} , foi de 0,3805 p.u. na fase C no dia 08/03/2021, enquanto, o maior valor para severidade de longa duração, o P_{lt} , foi de 1,25 p.u. na fase B.

Os valores das grandezas P_{st} e P_{lt} , que foram superados em apenas 5% das 1008 leituras válidas, podem ser visualizados, por fase, na Tabela 14.

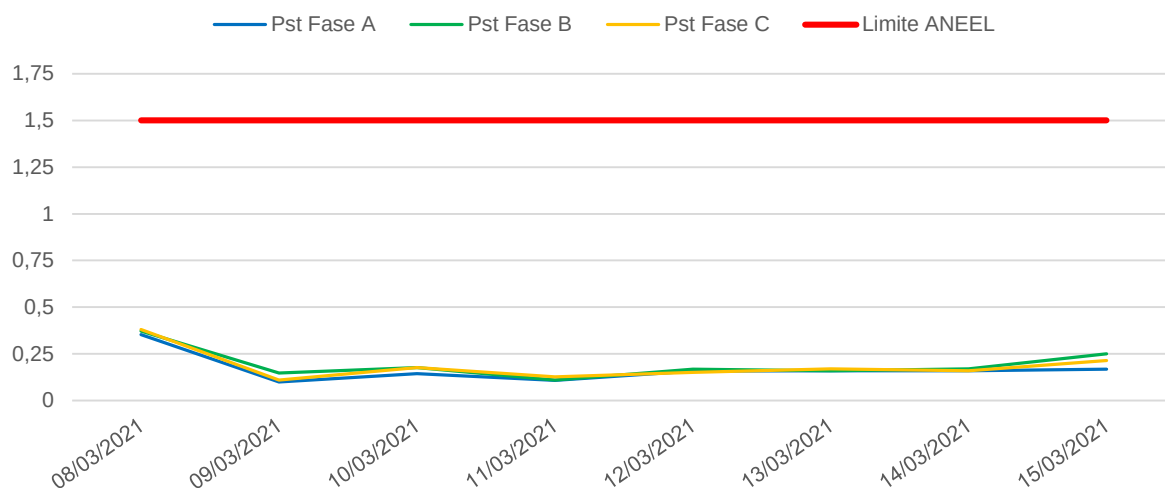
Tabela 14: Indicadores das flutuações de tensão registradas.

Grandeza	Limite ANEEL	Fase A (p.u.)	Fase B (p.u.)	Fase C (p.u.)
P_{st}95%	1,5	0,16	0,17	0,16
P_{lt}95%	-----	0,13	0,35	0,31

Fonte: (IMS PowerManager, 2021).

Vale ressaltar que na revisão em vigência do Módulo 8 do PRODIST, revisão 12, a ANEEL não estipula o limite para o indicador $P_{lt}95\%$.

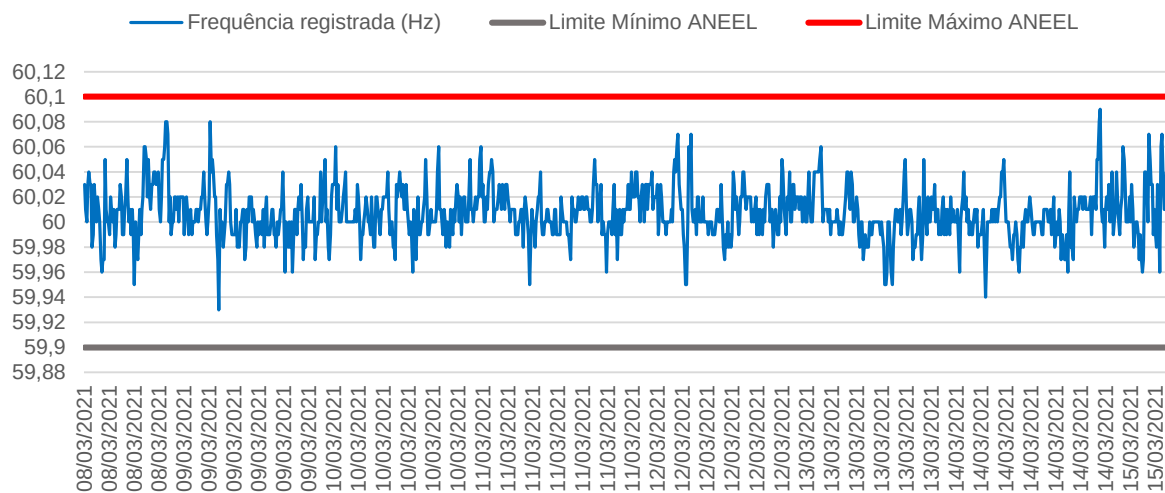
A Figura 15 apresenta os valores diários da grandeza P_{st} que foram superados em apenas 5% das 1008 leituras válidas. Constata-se que não houve nenhuma transgressão do limite ANEEL, que é 1,5 p.u. para clientes que são atendidos em tensão superior a 1 kV e inferior a 69 kV. Desta forma, os valores de flutuação de tensão estão de acordo com o determinado pelo órgão regulador.

Figura 17: Severidade de Flutuação de Tensão de Curta Duração registrado.

Fonte: Elaboração própria.

5.6. Variação de Frequência

A Figura 16 demonstra a frequência registrada no período de medição. Observa-se que o valor mínimo registrado no período foi de 59,93 Hz no dia 09/03/2020 às 07h20min, enquanto, o valor máximo chegou a 60,09 Hz no dia 14/03/2021 às 23h. Assim, as medições realizadas comprovam que os valores integralizados de frequência estão de acordo com os limites da ANEEL, sendo uma medição adequada.

Figura 18: Variação da Frequência registrado.

Fonte: Elaboração própria.

Vale ressaltar que a frequência do Sistema Interligado Nacional (SIN) é controlada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (NOS), sediado em Brasília-DF. Quando ocorre alguma anomalia e/ou perda no sistema elétrico que venha ocasionar fortes variações na frequência do SIN (desbalanço entre geração e carga), um sistema especial de proteção chamado ERAC (Esquema Regional de Alívio de Carga) atua realizando o corte de carga de diversas regiões do país (FRASSI, 2020).

O ERAC efetua o corte automático de cargas por meio de atuadores, como relés, quando é detectado uma taxa de variação de frequência no tempo ($\Delta f/\Delta t$), desligando assim cargas previamente estabelecidas. Como o Sistema Interligado Nacional (SIN) é constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte, e estes são interconectados por meio da malha de transmissão, propicia assim a transferência de energia entre subsistemas, o que permite a obtenção de ganhos sinérgicos. A integração dos recursos de geração e transmissão permite o atendimento ao mercado com segurança e economicidade (FRASSI, 2020).

5.7. Variações de Tensão de Curta Duração

Em relação aos VTCD's, no período de medição o analisador identificou duas situações em que a tensão de fornecimento atingiu valores significativos na amplitude do valor eficaz durante um intervalo de tempo menor que 3 minutos.

Os dois desvios foram registrados no dia 12/03/2021 em fases diferentes.

O primeiro VTCD ocorreu na fase B, tendo início às 16h02min17s282ms e sendo finalizado às 16h02min17s332ms, demandando 50 milissegundos, isto é, 3 ciclos. O valor registrado foi de 0,83 p.u. em relação a tensão nominal.

O segundo VTCD ocorreu na fase C, tendo início às 16h02min17s304ms e sendo finalizado às 16h02min17s329ms, demandando 30 milissegundos, isto significa quase 2 ciclos completos. O valor registrado foi de 0,90 p.u. em relação a tensão nominal.

Conforme definição do PRODIST, esses dois eventos que ocorreram tiveram uma duração superior a um ciclo e inferior a 3 segundos e uma amplitude de tensão superior a 0,1 p.u. e inferior a 0,9 p.u. Portanto, podemos definir estes desvios como um afundamento momentâneo de tensão (AMT).

Tabela 15: Contabilização de eventos de VTCD.

Amplitude (pu)	Duração						
	[16,67 ms - 100 ms]	(100 ms - 300 ms]	(300 ms - 600 ms]	(600 ms - 1 seg]	(1 seg - 3 seg]	(3 seg - 1 min]	(1 min - 3 min)
> 1,15	0	0	0	0	0	0	0
(1,10 - 1,15]	0	0	0	0	0	0	0
(0,85 - 0,90]	1	0	0	0	0	0	0
(0,80 - 0,85]	1	0	0	0	0	0	0
(0,70 - 0,80]	0	0	0	0	0	0	0
(0,60 - 0,70]	0	0	0	0	0	0	0
(0,50 - 0,60]	0	0	0	0	0	0	0
(0,40 - 0,50]	0	0	0	0	0	0	0
(0,30 - 0,40]	0	0	0	0	0	0	0
(0,20 - 0,30]	0	0	0	0	0	0	0
(0,10 - 0,20]	0	0	0	0	0	0	0
< 0,10	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Elaboração própria.

6. CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi realizar uma análise da qualidade de energia elétrica da subestação de energia 3 do IFTO – Campus Palmas, focando na qualidade do produto fornecido pela concessionária, abordando as principais grandezas relacionadas. Assim, com as medições realizadas, a QEE foi classificada de acordo com os padrões estabelecidos pelo órgão regulador através do PRODIST.

Um fato que não deve ser esquecido é que a medição realizada no IFTO foi no período da pandemia da COVID-19. Devido esta situação, as aulas estão sendo realizadas de forma online e pouquíssimas cargas ficam ligadas, sendo realizado apenas alguns serviços administrativos. Deste modo, entende-se a subcarga registrada no período da medição.

Em relação às grandezas que foram apuradas, verificou-se que a tensão em regime permanente está dentro dos limites estabelecidos, não sendo constatado nenhum valor nos níveis de tensão precário ou crítico. As distorções harmônicas foram bastante satisfatórias, pois não ultrapassaram os limites estabelecidos em norma. O Desequilíbrio de tensão também apresentou valores bem abaixo do limite, certificando cargas equilibradas. A flutuação de tensão apresentou valores satisfatórios. De igual modo a frequência e as variações de tensão de curta duração.

A grandeza que não ficou de acordo com o determinado pela ANEEL foi o fator de potência. Este, apresentou em diversas vezes valores que fora do limite definido em norma. Em conformidade com a resolução 414 da ANEEL, exceder esta grandeza pode ocasionar em penalizações da concessionária devido ao consumo exorbitante de energia reativa. Algumas ações para melhorar este fator de potência podem ser realizadas, sendo: dimensionamento correto dos motores e equipamentos, realizar a instalação de banco de capacitores para consumir a energia reativa excedente e utilizar aparelhos com alta eficiência energética, pois esses dispositivos possuem altos índices de fator de potência, aquecendo menos.

No que tange a concessionária de energia, sabe-se que existe uma grande preocupação em atender o cliente de forma adequada, fornecendo um produto de qualidade. Isto é causado pelo fato de fornecimentos inadequados ocasionarem penalizações, podendo alcançar valores extremamente altos. A preocupação não foca apenas na multa. De igual modo, a satisfação do cliente é algo que contribui diretamente para uma excelência no fornecimento de energia

elétrica. Assim sendo, o PRODIST tem o objetivo de fazer com que as distribuidoras de energia alcancem níveis de excelência perante os seus clientes.

Apesar de já estar na sua 12^a (décima segunda) revisão, o Módulo 8 da ANEEL ainda não definiu penalizações para a concessionária quando houver transgressão referente a desequilíbrios de tensão, distorções harmônicas, frequência, flutuação de tensão e variações de tensão de curta duração. No atual momento, a concessionária só é penalizada quando a tensão em regime permanente não está em conformidade com os limites estabelecidos. Porém, é importante frisar que na ocorrência de fenômenos com valores inadequados, prejudicando o funcionamento correto dos equipamentos, a ANEEL exige que seja feito um estudo visando minimizar tais efeitos, proporcionando a melhoria da qualidade do produto.

Um exemplo para novas propostas de pesquisas é realizar uma análise da qualidade da energia elétrica numa situação de cargas constantes, conforme o calendário do período letivo. Para tal, será necessário aguardar a pandemia alcançar níveis seguros para possibilitar o retorno das aulas presenciais. Outra possibilidade é avaliar com outro analisador de energia os valores referentes ao fator de potência. Entender a causa deste consumo excessivo de energia reativa, quais os equipamentos que estão ocasionando, já que o IFTO está com a demanda baixíssima.

7. REFERÊNCIAS

ANEEL, versão 2016. **Definição sobre Missão, Visão e Valores e as Competências da Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 16 dez 2020, 21:52.

BRASIL. Portaria MME n. 349, de 28 de novembro de 1997. **Definição sobre Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bprt1997349mme.pdf>>. Acesso em: 16 dez 2020, 23:45.

CIGRE, 2016. **Definição, História, Significado do *International Council on Large Electric Systems***. Disponível em: < <http://www.cigre.org.br> >. Acesso em: 25 jan 2021, 01:48.

DECKMANN, S. M. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. Conteúdo ministrado nos cursos de pós-graduação em Engenharia Elétrica na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, Unicamp/FEEC/DSCE. Campinas: jul. 2010.

FILHO, J. M. de C. **Análise e Soluções de Distúrbios em Tensão de Regime Permanente**. Artigo apresentado na Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI. Itajubá: set. 2011.

IEC, de março de 2008. **Definição sobre Papel Vital, Estrutura, Comitês Técnicos e as Atividades da *International Electrotechnical Commission***. Disponível em: <http://www.iec.ch/about/brochures/pdf/about_iec/welcome_to_the_iec-p.pdf>. Acesso em: 25 jan 2021, 00:33.

IEEE, 2016. **Definição, História, Significado do *Institute of Electrical and Electronic Engineers***. Disponível em: < http://www.ieee.org/about/ieee_history.html >. Acesso em: 25 jan 2021, 01:21.

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

LAMIM, H. **Nova Era na Regulação dos Serviços de Distribuição de Energia**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Revista Eletricidade Moderna, v.37, n.419 p. 112-123, dez. 2009.

MEHL, E. L. M. **Qualidade da Energia Elétrica**. Estudo Ministrado no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná. Curitiba: ago. 2012.

MÓDULO 1 ANEEL, de 26 de dezembro de 2018. **PRODIST Módulo 1 - Introdução**. Revisão 10. 55p. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo1_Revis%C

3%A3o10/f6c63d9a-62e9-af35-591e-5fb020b84c13>. Acesso em: 05 fev 2021, 21:03.

MÓDULO 8 ANEEL, de 1 de janeiro de 2021. **PRODIST Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica**. Revisão 12. 88p. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Revis%C3%A3o_12/342ff02a-8eab-2480-a135-e31ed2d7db47>. Acesso em: 11 jan 2021, 22:15.

NEMA, 2016. **Definição, História, Visão, Missão e Valores da National Electrical Manufactures Association**. Disponível em: < <http://www.cigre.org.br> >. Acesso em: 25 jan 2021, 00:54.

RESOLUÇÃO 414 ANEEL, de 9 de setembro de 2010. **Resolução Normativa Nº 414/2010 da Agência Nacional de Energia Elétrica**. Texto atualizado. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2010414.pdf>>. Acesso em: 30 jan 2021, 00:11.

IMS POWER QUALITY. **PowerNET PQ-700 G4 Analisador da Qualidade da Energia Elétrica**. Manual de Instalação e Operação, Revisão 1.0. Março 2020. 166 p. Disponível em: < https://ims.ind.br/downloads/manuais/manual_PowerNET_PQ-700_G4.pdf> Acesso em 15 jan 2021, 18:30.

IMS POWER QUALITY. **PowerManager Desktop Software para Análise de Grandezas Elétricas**. Manual de Instalação e Operação, Revisão 2.6. 2021. 186 p. Disponível em: <https://ims.ind.br/downloads/manuais/manual_PM_DESKTOP.pdf> Acesso em 15 de Jan 2021, 20:32.

ATKINSON, G. de S. **Análise da qualidade de energia residencial: um estudo para identificação de distorções harmônicas e índices de fator de potência**. Dissertação de Bacharelado em Engenharia Elétrica da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí: jul. 2017. 102 p.

MARQUES, A. F. de M. **Estudo da qualidade da energia elétrica fornecida ao IFBA - Campus de Paulo Afonso**. Dissertação de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Campus Paulo Afonso. Paulo Afonso: 2018. 59 p.

QUEIROZ, T. M. **Análise dos Indicadores de Qualidade da Energia em um Sistema de Geração Fotovoltaico do IFMG Campus Formiga**. Dissertação de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Campus Formiga. Formiga: 2018. 83 p.

ROLIM, M. E. **Análise da Qualidade de Energia Elétrica: Distorções Harmônicas em uma Planta Industrial**. Dissertação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: 2015. 58 p.

ALMEIDA, D. de F. U. **Análise da Qualidade de Energia no Sistema Elétrico da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Pato Branco**.

Dissertação de Bacharelado em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco. Pato Branco: 2017. 100 p.

INDICADORES ANEEL, 2020. **Indicadores de Conformidade do Nível de Tensão (DRP e DRC)**. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/conformidade>>. Acesso em: 02 fev 2021, 23:10.

DECKMANN, S. M; POMILIO, J. A. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. Conteúdo ministrado nos cursos de pós-graduação em Engenharia Elétrica na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP. Revisto e atualizado. Fevereiro 2020. 155 p. Disponível em: <<https://www.fee.unicamp.br/dse/antenor/it012>> Acesso em 08 fev 2021, 22:35.

FRASSI, M. **O que é o ERAC**. Maio 2020 Disponível em: <<https://memt.com.br/blog/?p=556>>. Acesso em: 10 mar 2021, 23:29.

APÊNDICE A – Subestação de Energia 3 do IFTO – *Campus Palmas*, onde foram realizadas as medições do trabalho.



APÊNDICE B – Transformador da Subestação 3 e esquema de ligação do analisador de energia nas conexões secundárias do transformador.





APÊNDICE C – Localização da subestação de energia III do IFTO.

Fonte: (Google Earth, 2021).



APÊNDICE D – Características do analisador de energia PQ-700 da fabricante IMS Power Quality.

Fonte: (IMS PQ-700, 2020).

1. Aplicações Típicas

- ✓ Geração de relatórios de conformidade com base no PRODIST 8 (valor eficaz, harmônicos, flutuação e desequilíbrio de tensão)
- ✓ Detecção e análise de perturbações da rede (forma de onda e RMS do evento)
- ✓ Análise e dimensionamento de motores e transformadores (corrente de *inrush* e fator-k)
- ✓ Detecção de fugas de corrente (corrente de neutro)
- ✓ Estudos de eficiência energética
- ✓ Medição de energia consumida e gerada em sistemas On Grid
- ✓ Oscilografia

2. Grandezas medidas/registradas

- | | |
|---|--|
| ✓ Tensão de fase e linha (médias, máximos e mínimos) | ✓ Energia Reativa total bruta e líquida |
| ✓ Correntes de fase (médias, máximos e mínimos); | ✓ Demanda Ativa total |
| ✓ Frequência | ✓ Demanda Reativa total |
| ✓ Potência ativa, reativa e aparente | ✓ Demanda Aparente total |
| ✓ Energia ativa direta e reversa, bruta, líquida, capacitiva e indutiva | ✓ THD e Harmônicas de Tensão e corrente (até 50º ordem) (médias e máximos) |
| ✓ Energia reativa total, direta e reversa; | ✓ TID e Inter-harmônicas de tensão e corrente (até 50º ordem) (médias e máximos) |
| ✓ Energia aparente total | ✓ Flutuações de tensão instantânea, de curta e longa duração |
| ✓ Energia ativa total bruta e líquida | |

3. Exatidão

01. Tensão	$\pm 0,25\% \text{ VL} \pm 0,1\% \text{ FE}^*$
02. Corrente	$\pm 0,25\% \text{ VL} \pm 0,1\% \text{ FE}^* \pm 1\% \text{ do sensor}$
03. Frequência	$\pm 0,01 \text{ Hz}$
04. Potências e demanda	$\pm 0,5\% \pm 1\% \text{ do sensor de corrente}$
05. Fator de potência	$\pm 0,5\% \pm 1\% \text{ do sensor de corrente}$
06. Energia	$\pm 1\% \pm 1\% \text{ do sensor de corrente}$
07. Harmônicos e THD	$\pm 5\%$
08. Inter-harmônicos e TID	$\pm 5\%$
09. Flutuação de tensão	$\pm 5\%$
10. Desequilíbrio de tensão	$\pm 0,3\%$

*VL= Valor lido FE= Fundo de escala

4. Características básicas

01. Alimentação AC	70 a 300 Vac
02. Medição tensão	50 a 500 Vac (Tensão de linha ou fase) 6 fios
03. Medição corrente	10A, 20A, 200A, 1000A ou 3000A ¹
04. Memória de massa	512MB (Cartão Micro SD: 2 GB – opcional)
05. Indicação de sequência de fase	Sim
06. Consumo	20 VA
07. Frequência	50 ou 60 Hz
08. Entradas	3 tensões e 4 ² correntes
09. Amostragem	256 amostras por ciclo
10. Conversor AD	16 Bits com conversão simultânea dos canais
11. Ligações	Monofásico, Bifásico, Bifásico com Neutro, Estrela, Delta a 3 Fios e Delta a 4 fios ("High Leg")

5. Características mecânicas

01. Material Construtivo	Termoplástico com alta resistência mecânica, anti-inflamável e com proteção UV
02. Dimensões (AxLxP)	285 x 208 x 125 mm
03. Peso aproximado	1600g (sem sensor)
04. Grau de proteção	IP-659
05. Display	4 linhas x 20 colunas (80 caracteres)
06. Back-light	Sim
07. Teclado	8 teclas multifuncionais
08. Montagem	Portátil uso ao tempo
09. Temperatura de armazenagem	10°C a 75°C
10. Temperatura de operação	0°C a 60°C
11. Umidade relativa para operação	40 a 70%

6. Comunicação

01. Interface	USB Mini, Bluetooth ¹ , GPRS ¹ , IRDA (Optico) ¹
02. Protocolo	MODBUS-RTU
03. Velocidade	600 a 115.000 bps
04. Formato de dados	8N1, 8N2, 8E1, 8E2, 8O1, 8O2