

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

DOUGLAS DE FLORIO UBEDA ALMEIDA

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA NO SISTEMA ELÉTRICO DA
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ – CÂMPUS PATO
BRANCO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2017

DOUGLAS DE FLORIO UBEDA ALMEIDA

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA NO SISTEMA ELÉTRICO DA
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ – CÂMPUS
PATO BRANCO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Elétrica – DAELE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Giovanni Alfredo Guarneri

PATO BRANCO

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado “**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA NO SISTEMA ELÉTRICO DA UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ – CÂMPUS PATO BRANCO**”, do aluno “**Douglas de Florio Ubeda Almeida**” foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **154** de 2017.

Fizeram parte da banca os professores:

Prof. Dr. Giovanni Alfredo Guarneri

Prof. Dr. Alexandre Batista de Jesus Soares

Prof. Dr. Jorge Luis Roel Ortiz

A Ata de Defesa assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família. Meus pais, meus avos, meus irmãos e meus amigos, por todo amor e incentivo dedicados a mim.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por sua infinita bondade e amor, por estar sempre ao meu lado em todos os momentos, por me dar a graça da vida e me proporcionar à oportunidade de concluir esta etapa.

A minha família que amo, que mesmo longe sempre esteve presente, transmitindo palavras de incentivo e apoio em todos os momentos. Em especial aos meus pais Creudes e Marci, pelo carinho e apoio incondicional, por acreditarem nos meus sonhos e por me ajudar a torná-los realidade. Aos meus avós, em especial aos meus avós maternos, Vicente e Natália (que descansa em paz), por todo incentivo, mantendo meus dias difíceis mais felizes desde o começo do curso. Aos meus irmãos Jacqueline e Rodrigo, pela amizade e companheirismo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Giovanni Alfredo Guarneri, por todo apoio e confiança depositados em mim. Pelo exemplo, dedicação, paciência e compreensão durante toda a realização deste trabalho. Sua dedicação e seus ensinamentos permitiram não somente o meu crescimento acadêmico, mas também o meu crescimento pessoal e profissional, que levarei para vida toda.

Ao laboratorista Célio, não somente pela amizade, mas também pelo suporte e auxílio em diversas etapas deste trabalho. Pela paciência e compreensão e pelos favores e conhecimentos fornecidos com boa vontade.

Ao meu amigo Alessandro Pasa, por compartilhar de sua amizade, por me incentivar nos momentos de fragilidade e por me proporcionar momentos de alegria e irmandade que ficarão guardados para sempre.

Ao meu amigo Guilherme Viana pelo apoio e companheirismo durante a minha trajetória no curso, pela sua sinceridade e pelas conversas mais engraçadas e os conselhos mais racionais que alguém poderia ter.

A todos os amigos do curso de engenharia, pela amizade e companheirismo, em especial os amigos Ionatan, Eduardo, Luiz Afonso, Taislaine, Maurício, Crystian e Pedro Otávio.

Aos meus amigos Trento, Fausto, Paixão, Bonotto e Marlon, do nosso grupo de amigos “microrolês”, que me proporcionaram os melhores “rolês” e cafés de domingo e as melhores risadas, conversas, piadas e amizades.

A todos os membros da equipe de eficiência energética Tubarão Branco, pelas amizades, ensinamentos e pelas melhores experiências acadêmicas.

Aos membros da banca, pela disposição e colaboração na conclusão deste trabalho.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

EPÍGRAFE

Success means going from failure to failure without losing passion and enthusiasm (CHURCHILL, Winston, 1965).

O sucesso significa ir de fracasso em fracasso sem perder a paixão e o entusiasmo (CHURCHILL, Winston, 1965).

RESUMO

ALMEIDA, Douglas de Florio Ubeda. Análise da qualidade de energia no sistema elétrico da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – câmpus Pato Branco. 2017. 99 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

Esta análise apresenta uma abordagem teórico-conceitual para avaliar a qualidade de energia elétrica do sistema elétrico da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco. A análise consiste em monitorar o sistema elétrico utilizando um analisador de qualidade de energia da marca *Fluke* e classificando os distúrbios encontrados por meio dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, disponibilizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica, além de também utilizar algumas normas da *International Electrotechnical Commission* para complementar o trabalho. A metodologia utilizada apresenta o uso dos *softwares MATLAB* e *Power Log* para análises gráficas e estatísticas e demonstra a utilização de uma pesquisa de campo em que se verificou, por meio de aplicação de questionário, como se encontra o sistema elétrico pela visão do consumidor. Além disso, apresenta um planejamento para realizar as medições, baseado na pesquisa de campo e nas informações adquiridas do sistema elétrico. Discute os resultados com base na literatura pertinente ao tema, nos conjuntos de dados adquiridos e nos indicadores de qualidade de energia, trazendo como resultado a situação atual da qualidade de energia do sistema elétrico analisado, em que se encontra com alguns problemas tais como: afundamentos de tensão (*sags*), desequilíbrios de tensão, desequilíbrios de corrente e flutuação de tensão.

Palavras-chave: Qualidade de energia elétrica. Metodologia para investigação de distúrbios de energia. Distúrbios de energia a elétrica.

ABSTRACT

ALMEIDA, Douglas de Florio Ubeda. Analysis of the energy quality in the electrical system of the Federal Technological University of Paraná - Pato Branco Camp. 2017. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

This analysis presents a theoretical-conceptual approach to evaluate the electric power quality of the electrical system of the Federal Technological University of Paraná - Pato Branco Camp. The analysis consists of monitoring the electrical system using a Fluke brand of energy quality analyzer and classifying the disturbances found by means of the Electric Power Distribution Procedures in the National Electric System, made available by the National Electric Energy Agency. Also, use some International Electrotechnical Commission standards to complement the work. The methodology used presents MATLAB and Power Log software for graphical and statistical analyzes and demonstrates the use of a field survey in which, through a questionnaire application, the electrical system was found by the consumer's vision. It presents a planning to carry out as measurements, based on field research and information acquired from the electrical system. It discusses the results based on the pertinent literature, our datasets acquired and the indicators of energy quality, resulting in a current situation of the energy quality of the analyzed electrical system, where it encounters some problems such as: voltage sags, voltage unbalances, current unbalances and voltage fluctuation.

Keywords: Electric power quality. Methodology for investigation of energy disturbances. Power to electrical disturbances.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Crescimento de Cargas Eletrônicas no Brasil.....	19
Figura 2 - Exemplo de Histograma com Curva Normal de Distribuição Acumulada..	27
Figura 3 - Curva Normal de Distribuição Acumulada com Variações na Média e Desvio Padrão.	28
Figura 4 - Exemplos para Eventos de: (a) <i>Sags</i> e (b) <i>Swells</i>	29
Figura 5 - Apresentação das Componentes Simétricas para um Sistema Desequilibrado.....	31
Figura 6 - Exemplo de Flutuação de Tensão.....	32
Figura 7 - Faixas de Tensão em Relação à de Referência (TR).	34
Figura 8 - Distribuição Acumulada Complementar da Sensação de Cintilação.	38
Figura 9 - Metodologia Proposta pela EPRI para Investigação de Sistemas com Problemas com a QEE.	41
Figura 10 - Esquema de Ligação do Analisador de Qualidade de Energia.	48
Figura 11 - Diagrama Fasorial para o Analisador Conectado Corretamente.....	48
Figura 12 - Gráfico Gerado pelos <i>Scripts</i> para Análise dos Indicadores de QEE de <i>Sags</i> e <i>Swells</i>	51
Figura 13 - Gráfico Gerado pelos <i>Scripts</i> para Análise dos Níveis de Distorções Harmônicas de Tensão.....	51
Figura 14 - (a) Exemplo de Curva de Probabilidade Acumulativa. (b) Exemplo de Histograma e Curva de Distribuição Acumulada.	53
Figura 15 - Fator de Desequilíbrio de Tensão do Circuito da Cabine do Transformador TR1.....	57
Figura 16 - Curva de Probabilidade Cumulativa do Fator de Desequilíbrio para Tensão de Sequência Negativa do Transformador TR1.....	58
Figura 17 - Histograma e Curva de Distribuição Acumulada do Indicador FD para Tensão de Sequência Negativa do Transformador TR1.....	59
Figura 18 - Curvas de Corrente Máxima e Mínima no Neutro do Circuito da Cabine do Transformador TR1.....	60
Figura 19 - Fator de Desequilíbrio de Corrente de Sequência Negativa do Circuito da Cabine do Transformador TR1.	60
Figura 20 - Curva de Probabilidade Cumulativa do Fator de Desequilíbrio para Corrente de Sequência Negativa do Transformador TR1.....	61

Figura 21 - Histograma e Curva de Distribuição Acumulada do Fator de Desequilíbrio para Corrente de Sequência Negativa do Transformador TR1.....	62
Figura 22 - Curvas de Corrente e Tensão Máxima e Mínima das Fases A, B e C do Circuito de Cargas do Bloco H.....	64
Figura 23 - Indicador de Desequilíbrio de Tensão do Circuito da Cabine do Circuito de Usinagem.....	66
Figura 24 - Curva de Probabilidade Cumulativa do Fator de Desequilíbrio para Corrente de Sequência Negativa.....	67
Figura 25 - Histograma e Curva de Distribuição Acumulada do Indicador FD para Corrente de Sequência Negativa.....	68
Figura 26 - Curvas de Corrente e Tensão Máxima e Mínima da Fase B do Circuito de Cargas do Bloco J.	69
Figura 27 - Curvas de Corrente e Tensão Máxima e Mínima do Neutro do Circuito de Cargas do Bloco J.	70
Figura 28 - Curvas de Corrente e Tensão Máxima e Mínima do Neutro do Bloco I.	73
Figura 29 - Indicador de Severidade de Flutuação de Tensão de Curta Duração da Fase B do Circuito de Iluminação do Bloco I.	74
Figura 30 - Curva de Probabilidade Cumulativa da Fase B do Indicador P_{st}	75
Figura 31 - Histograma e Curva de Distribuição Acumulada do Indicador P_{st} da Fase B.	76
Figura 32 - Curva de Probabilidade Cumulativa da Fase B do Indicador P_{lt}	76
Figura 33 - Histograma e Curva de Distribuição Acumulada do Indicador P_{st} da Fase B.	77
Figura 34 - Histograma e Curva de Distribuição Acumulada de P_{lt} para Fase A.	78
Figura 35 - Histograma e Curva de Distribuição Acumulada de P_{st} para a Fase C. ...	79
Figura 36 - Histograma e Curva de Distribuição Acumulada do Indicador P_{lt} da Fase B.	80

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Ordem, Frequência e Sequência das Distorções Harmônicas	30
Tabela 2 - Faixas de Valores para Tensão de Referência (TR) Iguais a 220/127 V .	34
Tabela 3 - Limite dos Indicadores de QEE para Tensão em Regime Permanente ...	35
Tabela 4 - Indicadores de QEE para Distorções Harmônicas	36
Tabela 5 - Limite do Indicador de QEE para Desequilíbrio de Tensão.....	37
Tabela 6 - Limites do Indicador de QEE para Flutuação de Tensão	39
Tabela 7 - Padrões de Fábrica do Analisador de QEE da Marca Fluke	39
Tabela 8 - Lista de Cargas mais Significativas Instaladas nos Painéis de Distribuição para as Medições	43
Tabela 9 - Plano de Medições.....	45
Tabela 10 - Indicadores para Tensão em Regime Permanente do Transformador TR1	56
Tabela 11 - Indicadores para Desequilíbrio de Tensão do Transformador TR1	58
Tabela 12 - Indicadores para Desequilíbrio de Corrente do Transformador TR1	61
Tabela 13 - Indicador para Distorções Harmônicas Total de Tensão do Transformador TR1	62
Tabela 14 - Indicadores para Tensão em Regime Permanente do Circuito de Cargas do Bloco H (Laboratório de Soldagem).....	64
Tabela 15 - Indicador para Distorções Harmônicas de Tensão do Circuito de Cargas do Bloco H (Laboratório de Soldagem).....	65
Tabela 16 - Indicadores para Tensão em Regime Permanente do Circuito de Cargas do Bloco H (Laboratório de Usinagem).....	65
Tabela 17 - Indicadores para Desequilíbrio de Tensão do Circuito de Cargas do Bloco H (Laboratório de Usinagem).....	66
Tabela 18 - Indicador para Distorções Harmônicas de Tensão do Circuito de Cargas do Bloco H (Laboratório de Usinagem).....	68
Tabela 19 - Medição de Tensão e Corrente Máximas e Mínimas do Circuito de Cargas do Bloco J	70
Tabela 20 - Indicadores para Tensão em Regime Permanente do Circuito de Cargas do Bloco J	71
Tabela 21 - Indicador para Distorções Harmônicas de Tensão do Circuito de Cargas do Bloco J	72

Tabela 22 - Indicadores para Tensão em Regime Permanente do Circuito de Cargas do Bloco I.....	73
Tabela 23 - Indicador para Distorções Harmônicas de Tensão do Circuito de Cargas do Bloco I.....	74
Tabela 24 - Indicadores para Flutuação de Tensão do Circuito de Iluminação do Bloco I.....	75
Tabela 25 - Indicadores para Flutuação de Tensão do Circuito de Iluminação do Bloco H.....	78
Tabela 26 - Indicadores para Flutuação de Tensão do Circuito de Iluminação do Bloco J.....	79
Tabela 27 - Indicador para Distorções Harmônicas Individual de Tensão do Transformador TR1	95
Tabela 28 - Indicador para Distorções Harmônicas Individual do Circuito de Cargas do Bloco H (Laboratório de Soldagem).....	95
Tabela 29 - Indicador para Distorções Harmônicas Individual do Circuito de Cargas do Bloco H (Laboratório de Usinagem).....	96
Tabela 30 - Indicador para Distorções Harmônicas Individual do Circuito de Cargas do Bloco J.....	96
Tabela 31 - Indicador para Distorções Harmônicas Individual do Circuito de Cargas do Bloco I.....	97
Tabela 32 - Medição de Tensão e Corrente Máximas e Mínimas Circuito de Cargas Sensíveis Bloco J (continua).....	98
Tabela 33 - Medição de Tensão e Corrente Máximas e Mínimas Circuito de Cargas Sensíveis Bloco J (conclusão).....	99

LISTA DE SIGLAS E TERMINOLOGIAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEA	<i>Canadian Electricity Association</i>
CENELEC	<i>European Committee for Electrotechnical Standardization</i>
CG-MS	Cromatógrafo Gasoso acoplado ao espectro de massas
DIT _i %	Distorção Harmônica Total de Tensão para as Componentes Ímpares não Múltiplas de 3
DIT _h %	Distorção Harmônica Individual de Tensão de Ordem H
DIT _p %	Distorção Harmônica Total de Tensão para as Componentes Pares Não Múltiplas de 3
DRC	Índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica
DRP	Índice de duração relativa da transgressão para tensão precária
DRX	Difractômetro de Raios-X
DSC	Calorímetro Diferencial de Varredura
DTT %	Distorção Harmônica Total de Tensão
EA	Analisador Elementar
ecdf	<i>Empirical Cumulative Distribution Function</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
H	Ordem Harmônica
H _{máx}	Ordem Harmônica Máxima
FD	Fator de desequilíbrio
FTIR	Espectro de infravermelho médio
H _{max}	Ordem Harmônica Máxima
H _{min}	Ordem Harmônica Mínima
HPLC	Cromatógrafo Líquido de Alta Eficiência
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NIR	Espectro de Infravermelho Próximo
<i>nlc</i>	Número de Ultrapassagens de Limite Crítico

<i>nlp</i>	Número de Ultrapassagens de Limite Precário
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
P_{lt}	Severidade de Longa Duração
$P_{ltS95\%}$	Valor semanal do indicador P_{lt} que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de sete dias completos e consecutivos
P_{st}	Severidade de Curta Duração
$P_{stD95\%}$	Valor diário do indicador P_{st} que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 24 hs
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SDT	Analizador Térmico
TL	Tensão de Linha
TR	Tensão de Referência
TR1	Transformador 1
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
UTFPR-PB	Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Pato Branco
UV-VIS	Espectro Ultravioleta/visível
V_{ab}	Magnitude de tensão trifásicas de linha (RMS)
V_{bc}	Magnitude de tensão trifásicas de linha (RMS)
V_{ca}	Magnitude de tensão trifásicas de linha (RMS)
V_h	Tensão Harmônica de Ordem H
V_1	Tensão Fundamental Medida
V_-	Magnitude de tensão de sequência negativa (RMS)
V_+	Magnitude de tensão de sequência positiva (RMS)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Justificativa.....	22
1.2	Objetivos	24
1.2.1	Objetivo Geral	24
1.2.2	Objetivos Específicos	24
2	DESENVOLVIMENTO.....	26
2.1	Ferramentas Estatísticas.....	26
2.1.1	Percentil	26
2.1.2	Histograma e Curva Normal de Distribuição Acumulada.....	27
2.2	Descrição dos Distúrbios de Qualidade de Energia Elétrica	28
2.2.1	Tensão em Regime Permanente.....	28
2.2.2	Ruídos de Modo Comum.....	29
2.2.3	Distorções Harmônicas de Tensão	29
2.2.4	Desequilíbrios.....	30
2.2.5	Flutuação de Tensão.....	32
2.3	Indicadores de Qualidade de Energia Elétrica	33
2.3.1	Tensão em Regime Permanente.....	33
2.3.2	Distorções Harmônicas de Tensão	35
2.3.3	Desequilíbrio de Tensão.....	36
2.3.4	Flutuação de Tensão.....	37
2.4	Considerações para o Monitoramento de QEE	39
3	METODOLOGIA.....	41
3.1	Documentação do Sistema	42
3.2	Pesquisa de Campo	43
3.3	Monitoramento do Sistema Elétrico.....	44
3.4	Processo de Análise dos Dados Coletados.....	49

3.4.1	Revisão dos Dados Monitorados.....	50
3.4.2	Análise Gráfica dos Dados Monitorados	50
3.4.3	Obtenção dos Indicadores de QEE	52
3.4.4	Classificação dos Distúrbios de Energia	52
3.5	Correlação das Cargas do Sistema Elétrico com os Distúrbios Encontrados	54
3.6	Considerações Finais	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1	Cabine do Transformador TR1.....	56
4.1.1	Tensão em Regime Permanente.....	56
4.1.2	Desequilíbrio de Tensão.....	57
4.1.3	Desequilíbrio de Corrente.....	59
4.1.4	Distorção Harmônica de Tensão	62
4.2	Circuito do Laboratório de Soldagem	63
4.2.1	Tensão em Regime Permanente.....	63
4.2.2	Distorção Harmônica de Tensão	64
4.3	Circuito do Laboratório de Usinagem	65
4.3.1	Tensão em Regime Permanente.....	65
4.3.2	Desequilíbrio de Tensão.....	66
4.3.3	Distorção Harmônica de Tensão	68
4.4	Circuito do Bloco J	68
4.4.1	Tensão em Regime Permanente.....	69
4.4.2	Distorção Harmônica de Tensão	71
4.5	Circuito do Bloco I	72
4.5.1	Tensão em Regime Permanente.....	72
4.1.2	Distorção Harmônica de Tensão	73
4.6	Circuito de Iluminação do Bloco I	74
4.7	Circuito de Iluminação do Bloco H	77

4.8 Circuito de Iluminação do Bloco J	79
4.9 Considerações Finais	80
5 CONCLUSÕES.....	82
REFERÊNCIAS.....	83
APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO INVESTIGATIVO E RELACIONADO A ANÁLISE DE QEE.....	86
APÊNDICE B – SCRIPTS DO MATLAB PARA CLASSIFICAÇÃO DOS DISTÚRBIOS DE ENERGIA	88
B.1 TENSÃO EM REGIME PERMANENTE	88
B.2 DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO	89
B.3 DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO E CORRENTE	92
B.4 FLUTUAÇÃO DE TENSÃO.....	93
APÊNDICE C – DADOS DAS HARMÔNICAS	95
APÊNDICE D – DADOS QUEDAS DE TENSÃO	98

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com a qualidade de energia elétrica (QEE) vem sendo abordada pelas empresas de energia elétrica e seus consumidores desde a década de 1980, sendo esses os principais causadores e, ao mesmo tempo, os que mais sofrem com problemas causados pela falta de uma energia elétrica de qualidade (DUGAN et al., 2002). Esse assunto é tratado com extrema importância, sendo que existe uma área da QEE que se dedica a pesquisas, com o objetivo de analisar e trazer possíveis soluções aos consumidores e as empresas geradoras de eletricidade. Isso fica evidente quando se verifica o aumento na quantidade de artigos científicos publicados e congressos onde se discutem o tema (CORRÊA, 2007).

As pesquisas nessa área vêm se intensificando conforme aumenta a quantidade de consumidores que conectam equipamentos sensíveis aos distúrbios de energia nos sistemas elétricos de distribuição. Esses equipamentos, tais como os eletroeletrônicos microprocessados, operam com baixas tensões e são sensíveis a quaisquer tipos de variações ou interferências de suas grandezas operacionais (DUGAN et al., 2002).

De forma genérica, as causadas dos problemas de QEE é consequência das conversões de níveis de corrente alternada (CA) para corrente contínua (CC) e o aumento de cargas não-lineares no sistema de energia (ALDABÓ, 2001). A Figura 1 demonstra isso, apresentando o crescimento na quantidade de cargas não-lineares no sistema elétrico brasileiro desde 1960 até 2005, em que, no ano de 2005, mais de 50% da demanda de energia elétrica no Brasil era consumida pelas mesmas. Essa ocorrência é justificada pela competitividade do mercado globalizado em que o mesmo exige equipamentos mais modernos que operam de forma mais eficiente, porém gerando distúrbios que comprometem a QEE do sistema elétrico ao qual está conectado (RAVAGNANI, 2008).

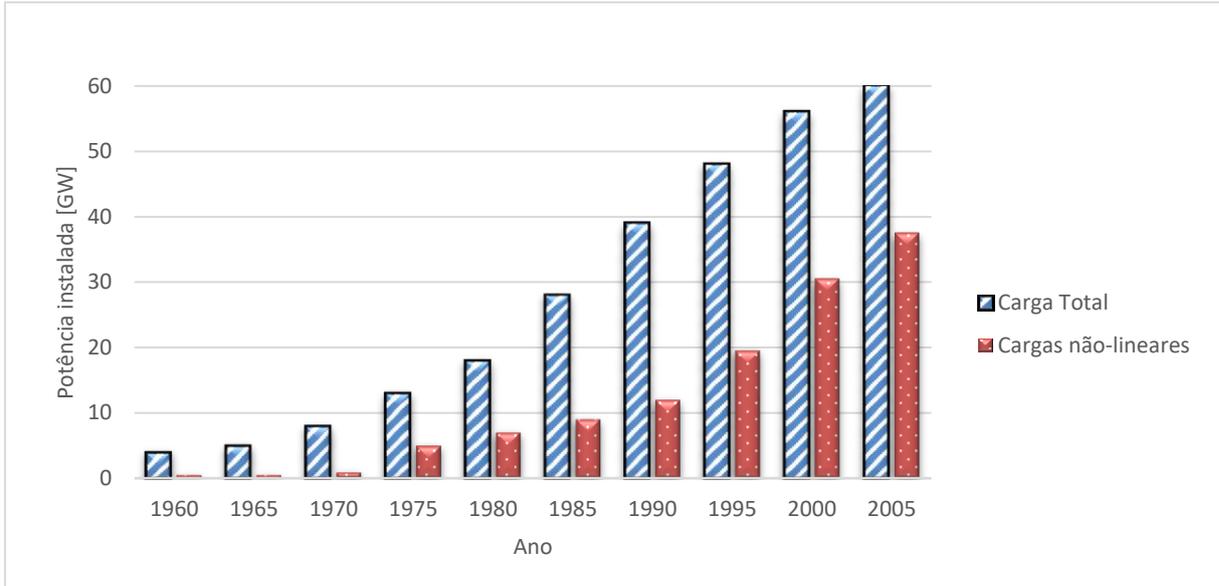


Figura 1 - Crescimento de Cargas Eletrônicas no Brasil.
Fonte: Adaptado de Ravagnani (2008).

Em um sistema elétrico ideal, os sinais de tensões e correntes devem ser perfeitamente equilibrados, senoidais e possuir amplitude e frequência constantes. Portanto, qualquer perturbação que ocasione mudança nos valores estabelecidos contratualmente pela concessionária, pode ser considerado um distúrbio na qualidade de energia (HADDAD, 2004).

Os problemas de qualidade de energia são definidos como qualquer perturbação ou distúrbio ocorridos nos níveis de tensão, corrente ou variações de frequência na energia fornecida. Eles podem causar problemas em equipamentos conectados ao sistema de energia, como instalações de consumidores ou nos sistemas de distribuição (HADDAD, 2004).

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é responsável por padronizar e fiscalizar os parâmetros referentes a QEE fornecida pelas concessionárias de energia, estabelecendo assim, um conjunto de normas e recomendações para padronizar e garantir a eficiência da mesma (CORRÊA, 2007). Por meio dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), em específico o módulo 8 destinado a QEE, são estabelecidas terminologias e caracterizados os fenômenos, parâmetros e valores de referência relacionados aos níveis de tensão em regime permanente e as perturbações que podem ocorrer na forma de onda de tensão (AGÊNCIA..., 2010).

Essas perturbações são classificadas pelo PRODIST em distúrbios permanentes e transitórios. Desse modo são definidos indicadores que permitem medir a qualidade da energia elétrica fornecida a um equipamento. Entre as grandezas que podem ser medidas para avaliar a existência de problemas na QEE, têm-se:

- Tensão em regime permanente;
- Fator de potência;
- Níveis de harmônicos;
- Desequilíbrios de tensão;
- Flutuação de tensão;
- Variações de tensão de curta duração;
- Variação de frequência.

Uma parte dos problemas na QEE está presente na própria instalação elétrica do consumidor, causados por interferências internas ou ainda, provenientes de distúrbios ocorridos nos circuitos de distribuição da concessionária de energia elétrica. Isso é o motivo do desenvolvimento de muitos programas e projetos que visam solucionar os problemas causados pela falta de QEE (ALDABÓ, 2001).

Os desequilíbrios de tensão de alta frequência, conhecido como impulsos de alta amplitude e diferente da frequência fundamental de 60 Hz, podem causar alguns efeitos indesejados sobre sistemas eletrônicos. Apesar de normalmente não causarem muitos danos a esses sistemas, é possível a ocorrência de operações errôneas, perdas de memória e travamentos nos mesmos. Os desequilíbrios quando consecutivos e sincronizados, podem influenciar em discrepâncias nos equipamentos de medições analógicas, interferir na resolução de sistemas de imagens (*scanners*, raios x, etc.) e em sistemas de comunicação denominados, neste caso, de ruídos no sinal transmitido ou recebido (ALDABÓ, 2001).

Entre os vários distúrbios de qualidade de energia, as distorções nos sinais de tensão e corrente causadas pela presença de harmônicos ocorre com bastante frequência nos sistemas de energia atuais (IEEE 1159, 2009). Produzidos na maioria dos equipamentos eletrônicos com características não-lineares, sua interação com outros dispositivos conectados no mesmo sistema elétrico pode causar alguns problemas quando atinge uma magnitude suficiente (DELMONT FILHO, 2007). Dessa forma, podem ocasionar, por exemplo, desligamento de cargas quando influencia

relés nos sistemas de potência, erros de frequências, níveis de tensões elevados entre neutro e terra e indução de campos magnéticos em transformadores e disjuntores (ALDABÓ, 2001).

Além dos vários problemas que ocorrem devido a presença de harmônicos, Martins *et al.* (2003), IEEE 1159 (2009) e Aldabó (2001) citam os mais comuns: (I) condutores aquecidos e com corrente elevada resultando em perdas de potência por efeito Joule tanto no transporte quanto na distribuição de energia elétrica; (II) ressonância e dissipação térmica em capacitores e indutores influenciando no fator de potência e na deterioração dos mesmos; (III) vibração de enrolamentos, saturação, ruídos audíveis e superaquecimento de transformadores e máquinas rotativas; (IV) interferências em sistemas eletrônicos no disparo indesejado de semicondutores de potência; (V) interferência nas medições atuando em erros significativos; (VI) *Uninterruptible Power Supply* (UPS ou *nobreak*) com falhas e; (VII) interferências em sistemas de comunicação e dispositivos microprocessados, sobretudo os equipamentos médico-hospitalares e controladores de processos industriais.

Nos sistemas elétricos em que existem aparelhos de ar condicionado instalados, por exemplo, podem apresentar níveis elevados de harmônicas. Segundo Vasconcellos (2014), uma análise feita em sistemas elétricos contendo aparelhos de ar condicionado acionados eletronicamente, demonstrou a existência de harmônicas de tensão com alta amplitude.

Além da presença de sinais harmônicos no sistema elétrico que comprometem a QEE, existem ainda os eventos tais como afundamentos e elevações de tensão de curta duração (no inglês *sags* e *swells* respectivamente). Esses eventos são causados por cargas de elevada potência, motores, mal dimensionamento de instalações, derivações incorretas de transformadores, reguladores de tensão desregulados ou sobrecarga indesejada no sistema. Tais efeitos podem causar mal funcionamento em dispositivos eletrônicos e, na maioria dos casos, reinicialização e desligamento pela proteção do sistema (ALDABÓ, 2001).

As presenças desses distúrbios em um sistema elétrico causam problemas nas cargas conectadas ao mesmo. Apesar dos vários equipamentos que sofrem com os efeitos dos distúrbios de energia, os principais e mais frequentes são os computadores (ALDABÓ, 2001). Por apresentarem dispositivos de memória e armazenarem grande quantidade de informações, eles são sensíveis aos distúrbios de energia. Em alguns computadores, quando submetidos a teste de subtensão com

interrupções maiores que 5 ou 6 ciclos, precisam ser reiniciados. Devido a isso, a memória armazenada é perdida pois todo o sistema é interrompido. Além disso, interrupções momentâneas de tensão produzem enormes correntes de energização nos computadores, além de causar breves cintilações nos monitores (BARAN,1998).

1.1 JUSTIFICATIVA

O propósito deste trabalho é realizar uma análise da qualidade de energia elétrica com o objetivo de localizar a presença de possíveis distúrbios de energia no sistema elétrico interno da Universidade Tecnológica Federal do Paraná câmpus Pato Branco (UTFPR-PB).

A escolha da UTFPR-PB para análise é em virtude de a mesma possuir equipamentos sensíveis que são utilizados para fins acadêmicos de ensino, pesquisa e extensão. Devido a isso, essas cargas devem ser preservadas contra os distúrbios que interferem na QEE do seu sistema elétrico interno e que sempre devem estar operando em perfeito funcionamento. Dentre esses equipamentos, destacam-se:

- Computadores;
- Projetores multimídias;
- Microscópio Metalógrafo;
- Analisador Térmico (SDT);
- Calorímetro Diferencial de Varredura (DSC);
- Cromatógrafo Líquido de Alta Eficiência (HPLC);
- Cromatógrafo Gasoso acoplado ao espectro de massas (CG-MS);
- Difratômetro de Raios-X (DRX);
- Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV);
- Espectro de infravermelho médio (FTIR);
- Espectro de infravermelho próximo (NIR);
- Espectro Ultravioleta/visível (UV-VIS);
- Analisador elementar (EA);
- Absorção atômica (AA);
- Espectros de UV-Vis.

Além do mais, os cursos ofertados na UTFPR-PB são de áreas distintas e apresentam variados tipos de cargas especiais conectadas no sistema elétrico devido a essa diversidade. Essas cargas, quando utilizadas, podem gerar distúrbios e comprometer a qualidade da energia do sistema elétrico da universidade. Dentre todos, os principais são:

- Aparelhos condicionadores de ar;
- Rotaevaporadores;
- *Nobreaks* (UPS);
- *Soft-starter*;
- Sistemas de iluminação fluorescente;
- Cortadeira de amostras metalógrafas;
- Forno tubular para determinação de carbono em aços;
- Tornos CNC de bancada;
- Fresadora didática CNC;
- Máquinas de solda;
- Fresadora ferramenteira;
- Fresadora universal;
- Furadeira de coluna;
- Furadeira radial;
- Serra fita horizontal franho;
- Plaina limadora;
- Retífica plana;
- Serra circular esquadrejadeira para madeira;
- Serra fita para madeira;
- Serra tico-tico de bancada;
- Liofilizador;
- Incubadora *Shaker*;
- Autoclaves.

Segundo Aldabó (2001), os distúrbios de energia podem aparecer no sistema elétrico devido a fatores externos e internos. Na universidade, se espera a ocorrência dos dois tipos. Entretanto, quando as cargas especiais e os equipamentos sensíveis aos distúrbios estão funcionando em conjunto e ocorre interação entre elas, alguns problemas de QEE podem ocorrer no sistema elétrico. Isso é classificado,

evidentemente, como fatores internos que influenciam distúrbios em equipamentos sensíveis. Esses equipamentos, quando submetidos aos distúrbios podem não operar de maneira desejada e ocasionar problemas em seu funcionamento tais como desligamento indesejável, deterioração do mesmo, entre outros problemas citados nesta proposta e que serão analisados no decorrer do trabalho.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral realizar uma análise na qualidade de energia do sistema elétrico da UTFPR-PB. O contexto dessa análise é detectar possíveis distúrbios no sistema de alimentação em diversas cargas instaladas, avaliar se estão enquadrados como problemas de qualidade de energia de acordo com o PRODIST e normas complementares e encontrar possíveis soluções para os mesmos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Investigar possíveis distúrbios relacionados à QEE tais como fator de potência, transitórios impulsivos ou oscilatórios, variações de tensão de longa e curta duração, desbalanceamento, flutuações de tensão, distorção da forma de onda e variações na frequência da rede;
- Analisar, no âmbito da UTFPR-PB, os locais mais adequados para efetuar as medições e os horários estratégicos para realizar a mesma;
- Efetuar as medições nos locais escolhidos entre os blocos H, I e J;
- Analisar as medições obtidas, comparando-as com o PRODIST e com as normas regulamentadoras complementares da IEC (*International Electrotechnical Commission*) e CENELEC (*European Committee for Electrotechnical*) para classificação dos distúrbios relacionados à QEE.

- Desenvolver uma descrição dos problemas encontrados e apontar possíveis soluções.

2 DESENVOLVIMENTO

Esse capítulo apresenta uma revisão na literatura para auxiliar no desenvolvimento deste trabalho. O mesmo apresenta as definições dos conceitos a respeito dos distúrbios que causam problemas de qualidade de energia. Além disso, descreve os indicadores de QEE adotados pela ANEEL com seus respectivos limites e as definições dos métodos utilizados para tratamentos dos dados coletados com base na literatura pertinente.

2.1 FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS

Nessa Seção estão apresentadas as ferramentas estatísticas necessárias para a realização deste trabalho fornecidas pelos *softwares Matlab e Power Log*. Para este trabalho, foram utilizadas as análises de percentil, histogramas de frequência e curvas normais de distribuição acumulada. Devido ao fato de que a maioria dos indicadores de QEE são calculados a partir dessas ferramentas, é necessário o uso das mesmas.

2.1.1 Percentil

Segundo Witte (2005), “*a classificação de percentis de uma observação indica a porcentagem de observações em toda a distribuição, com valores similares ou menores do que aquela observação*”. Dessa forma, o percentil representa uma medida de posição relativa de uma observação em relação as outras de um conjunto de dados distribuídos em ordem crescente (MANITO, 2009).

A maioria dos indicadores de QEE utilizam o percentil 95% para analisar os dados coletados. Em um conjunto de 1008 leituras válidas, os valores são distribuídos em ordem crescente e cada percentil indica a posição daquele valor em relação as demais. Para a análise de QEE, esses indicadores que utilizam percentis 95% são comparados com seus limites e analisados do quão próximos chegam das suas limitações (BOLLEN, 2006; MANITO, 2009).

2.1.2 Histograma e Curva Normal de Distribuição Acumulada

Os histogramas são definidos como gráficos de distribuição de frequência e que representam dados quantitativos em formato de barras. Os dados são divididos em intervalos de classes ao longo do eixo X. Cada classe representa uma barra e a sua magnitude é representado no eixo Y na forma de números de ocorrências, conforme é mostrado na Figura 2 (WITTE, 2005).

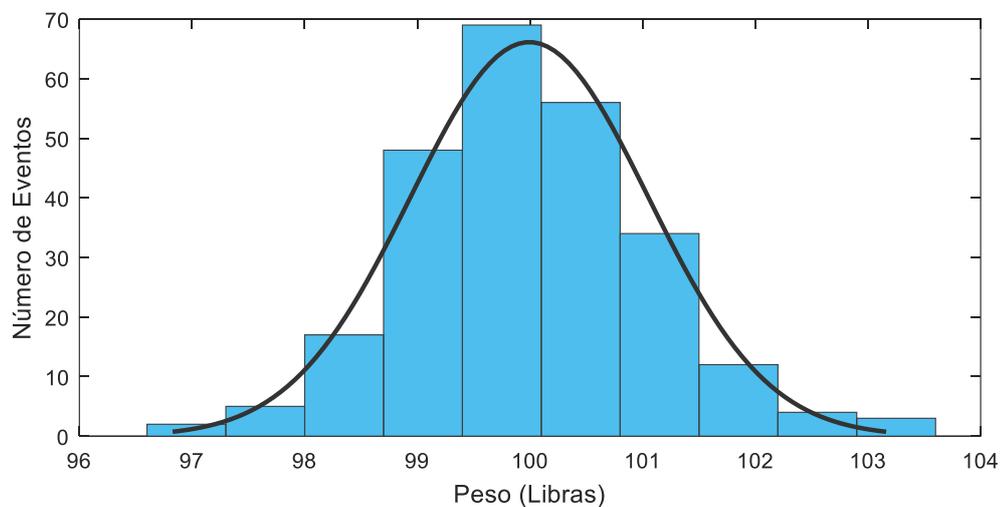


Figura 2 - Exemplo de Histograma com Curva Normal de Distribuição Acumulada
 Fonte: Adaptado de Witte (2005).

Conforme Witte (2005), o objetivo dos histogramas é avaliar com que frequência ocorrem os intervalos de classes. Os gráficos de distribuição de frequências são eficientes para determinar padrões de dados. Dessa forma, é possível analisar se uma distribuição de dados é equilibrada ou assimétrica.

As curvas normais de distribuição acumulada são representadas na forma de sinos e podem ser sobrepostas em muitas distribuições de frequências. Esse tipo de curva é a representação ajustada dos polígonos de frequência (corresponde à uma variação importante em um histograma). As informações contidas nessas curvas são a média das observações e o desvio padrão da média. O valor da média (μ) determina o centro da função e o valor do desvio padrão (σ) determina a largura. A Figura 3 demonstra variações na média e desvio padrão, para cada valor a curva possui características simétricas em forma de sino, porém centros e as dispersões diferentes (MONTGOMERY, 2004).

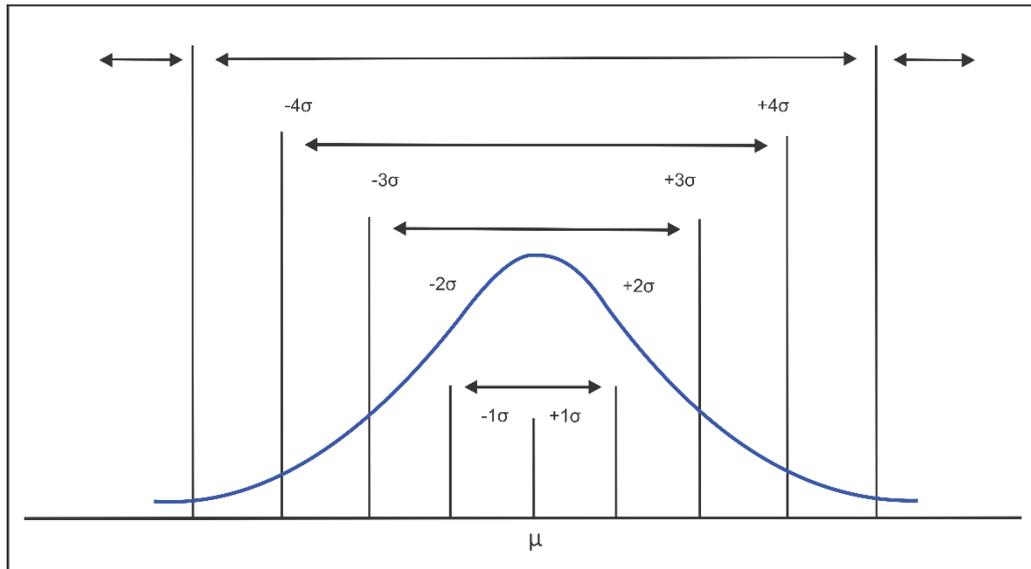


Figura 3 - Curva Normal de Distribuição Acumulada com Variações na Média e Desvio Padrão.
Fonte: Adaptado de Montgomery (2004).

2.2 DESCRIÇÃO DOS DISTÚRBIOS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Dentre os distúrbios de QEE existentes, os selecionados para apresentar suas definições de acordo com a literatura foram: (I) tensão em regime permanente; (II) distorções harmônicas de tensão; (III) desequilíbrio de tensão; (IV) flutuação de tensão.

2.2.1 Tensão em Regime Permanente

O PRODIST módulo 8 (AGÊNCIA..., 2010) define os níveis de tensão em regime permanente para classificar a qualidade da tensão de alimentação. Os afundamentos e elevações de tensão, denominados de *sags* ou *swells*, são chamados assim por diminuir ou aumentar esses níveis de tensão acima ou abaixo do seu limite normal de operação (MEHL, 1996).

Os eventos de *sags* ocorrem quando a tensão reduz abaixo do seu limite máximo e termina quando retorna ao seu valor normal de regime, levando em consideração a histerese, na qual representa uma faixa de tensão em que os valores são aceitáveis, conforme demonstra a Figura 4(a). O mesmo pode ser considerado

para eventos de *swells*, em que a tensão se eleva ao invés de ocorrer uma redução, conforme a Figura 4(b) (FLUKE, 2012).

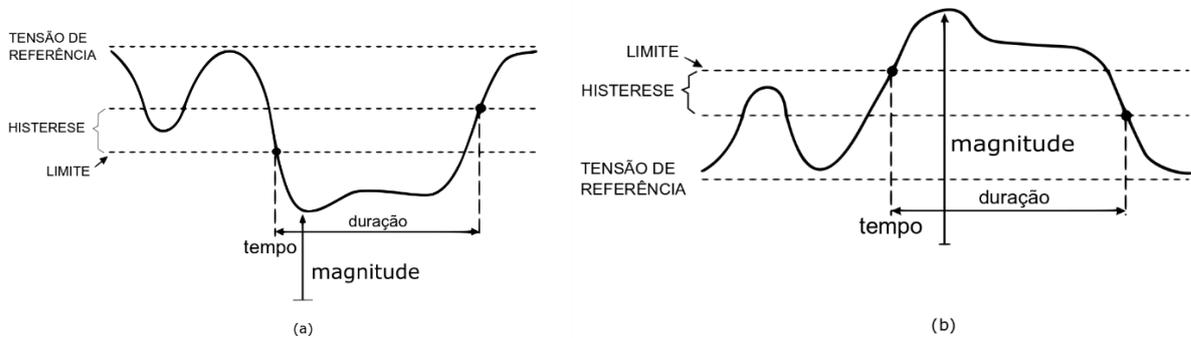


Figura 4 - Exemplos para Eventos de: (a) Sags e (b) Swells.
Fonte: Fluke (2012).

2.2.2 Ruídos de Modo Comum

Os ruídos de modo comum são considerados como as consequências ou as causas de distúrbios de energia. As presenças de ruídos estão relacionadas com a qualidade do aterramento de um circuito elétrico quando neutros compartilhados auxiliam o aumento das tensões neutra-terra. Dessa forma, resultam em um aumento de ruído e conseqüentemente pode se tornar a fonte de *swells* e *sags* (DUGAN *et al.*, 2002; IEEE, 1995).

Definido como um sinal elétrico com frequências menores que 200 KHz nas quais estão superpostas às tensões e correntes de fase, os ruídos são os maiores causadores de problemas em computadores. Sinais com valores superiores a 1% da tensão nominal indicam problemas no aterramento do sistema. Para exemplificar, se um ruído de modo comum possuir uma amplitude de 2,3 V entre neutro e terra da linha alimentadora de um computador, o mesmo pode sofrer alterações nos sinais de dados (ALDABÓ, 2001).

2.2.3 Distorções Harmônicas de Tensão

As distorções harmônicas de tensão são fenômenos associados com a deformação nas formas de onda da tensão, cuja as magnitudes das suas frequências

são múltiplas da frequência fundamental do sistema (ALDABÓ, 2001; MANITO, 2009). 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, conforme demonstrado na Tabela 1 (MANITO, 2009).

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
n	n×60	...

*Ordens atribuídas para a frequência fundamental de 60 Hz.

Fonte: Manito (2009).

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 (MANITO, 2009). Segundo Aldabó (2001), as distorções harmônicas podem causar o superaquecimento dos transformadores. Além disso, o efeito das distorções harmônicas de sequência positiva em motores é fazer com que os mesmos executem mais rapidamente do que as fundamentais, ao contrário das distorções harmônicas de sequência negativa, que tentam fazer o motor executar mais lentamente. Em ambos os casos, o motor perde torque e se aquece.

2.2.4 Desequilíbrios

Os desequilíbrios de tensão são distúrbios associados as tensões de fase. Em teoria, as tensões nos sistemas trifásicos devem ter a mesma amplitude e defasadas 120° elétricos entre elas. A ocorrência de um desvio nessas magnitudes corresponde a um sistema desequilibrado (EPRI, 2000; MANITO, 2009).

Conforme Bollen (2006), a forma mais utilizada para estimar o desequilíbrio entre as fases é utilizando a teoria das componentes simétricas. Sendo assim, consiste em representar um sistema desequilibrado em outros três sistemas

equilibrados, de forma a dividi-los em sequências positiva, negativa e zero, conforme a Figura 5.

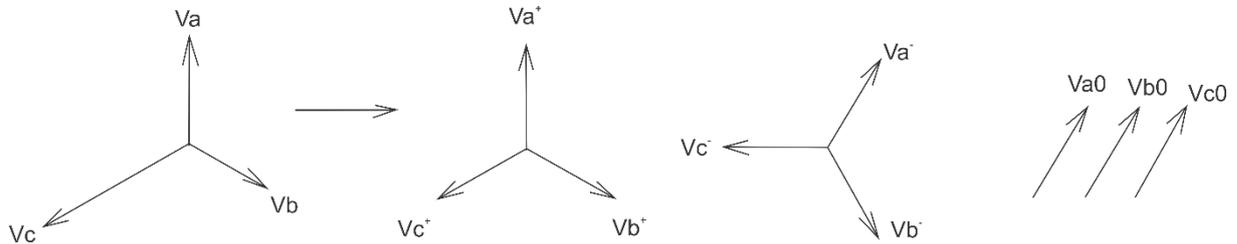


Figura 5 - Apresentação das Componentes Simétricas para um Sistema Desequilibrado.
 Fonte: Adaptado de Manito (2009).

Para determinar o nível de desequilíbrio de tensão entre as fases, por exemplo, na teoria das componentes simétricas, é necessário obter a relação entre as componentes de sequência negativa (V_-) e zero (V_0) com a componente de sequência positiva (V_+). Isso é feito obtendo o quociente entre elas. Essa relação determina a assimetria entre as componentes (BOLLEN, 2006; MANITO, 2009).

De acordo com Bollen (2006), componente de sequência positiva é presente em sistemas equilibrados, ao contrário da componente de sequência negativa que surgem nos sistemas elétricos em que as correntes e tensões estão desequilibradas. As componentes de sequência zero podem aparecer em sistemas elétricos que possuem cargas desequilibradas e na presença do condutor neutro. Essa componente representa a presença de corrente nesse condutor. Um desequilíbrio de tensão superior a 2% e de corrente acima de 10%, é considerado inadequado.

Em sistemas elétricos que possuem motores elétricos como cargas, é preocupante a presença de desequilíbrios de tensão. Os motores trifásicos são extremamente sensíveis a eles. As correntes de sequência negativa circulam no estator e rotor do motor como resultado desse distúrbio, causando um efeito de 'frenagem' que pode ocasionar um aquecimento significativo e redução da vida útil do mesmo. Além disso, desequilíbrios extremos podem causar falta de fase real em sistemas trifásicos e causar danos em motores (EPRICSG, 1999).

2.2.5 Flutuação de Tensão

A flutuação de tensão é definida como uma variação do valor eficaz ou de pico de tensão entre 0,9 p.u. e 1,1 p.u. e em frequências de até 35 Hz. Em geral, ela pode se manifestar na forma aleatória, repetitiva ou esporádica, dependendo do agente causador e de seu ciclo de trabalho (MANITO, 2009). Um exemplo do efeito da flutuação de tensão pode ser visto na Figura 6, nos curtos períodos em que ocorrem os afundamentos do sinal de tensão.

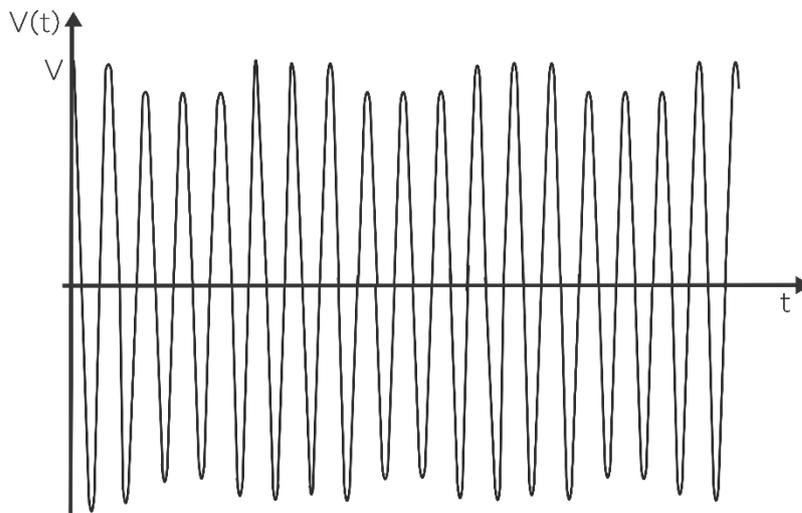


Figura 6 - Exemplo de Flutuação de Tensão.
Fonte: Autoria própria.

A origem da flutuação de tensão é devida as variações rápidas no funcionamento de certas cargas como, por exemplo, chaveamento de cargas resistivas, máquinas de solda por resistência ou variações abruptas de potência, as partidas de lâmpadas de descarga, os aparelhos eletrodomésticos com regulação automática (de tempo, temperatura, etc.), fornos a arco elétrico, entre outros (MANITO, 2009; SANTOS, 2007).

Um dos efeitos causados pela flutuação de tensão é a cintilação luminosa. Segundo Colnago *et al.* (2013), essa cintilação, mais conhecida como *flicker*, é definida como a variação do fluxo luminoso de uma lâmpada quando submetida ao efeito da flutuação de tensão.

De acordo com Colnago *et al.* (2013) e Manito (2009), a cintilação luminosa é um fenômeno perceptível pela visão humana. Dessa forma, os indivíduos podem

sofrer efeitos fisiológicos adversos tais como dor de cabeça, cansaço visual, estresse mental e perda de concentração quando submetidos continuamente ao *flicker*.

2.3 INDICADORES DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Os distúrbios selecionados para definir os seus indicadores de QEE foram: (I) tensão em regime permanente; (II) distorções harmônicas de tensão; (III) desequilíbrio de tensão; (IV) flutuação de tensão. Os limites dos distúrbios e algumas de suas definições são estabelecidos pelo PRODIST.

2.3.1 Tensão em Regime Permanente

Conforme é definido no PRODIST (AGÊNCIA...2010), os níveis para a tensão de referência em regime permanente são definidos como adequados, precários e críticos. De acordo com a Figura 7, as faixas de tensão que definem os limites para classificação dos eventos são:

- Tensão de Referência (TR);
- Faixa Adequada de Tensão ($TR - \Delta_{ADINF}$, $TR + \Delta_{ADSUP}$);
- Faixas Precárias de Tensão ($TR + \Delta_{ADSUP}$, $TR + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$ OU $TR - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$, $TR - \Delta_{ADINF}$);
- Faixas Críticas de Tensão ($>TR + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$ OU $<TR - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$).

Em que Δ_{ADSUP} e Δ_{ADINF} representam a variação máxima superior e inferior para a faixa adequada de tensão e Δ_{PRSUP} e Δ_{PRINF} , a variação máxima superior e inferior para a faixa precária de tensão, respectivamente.

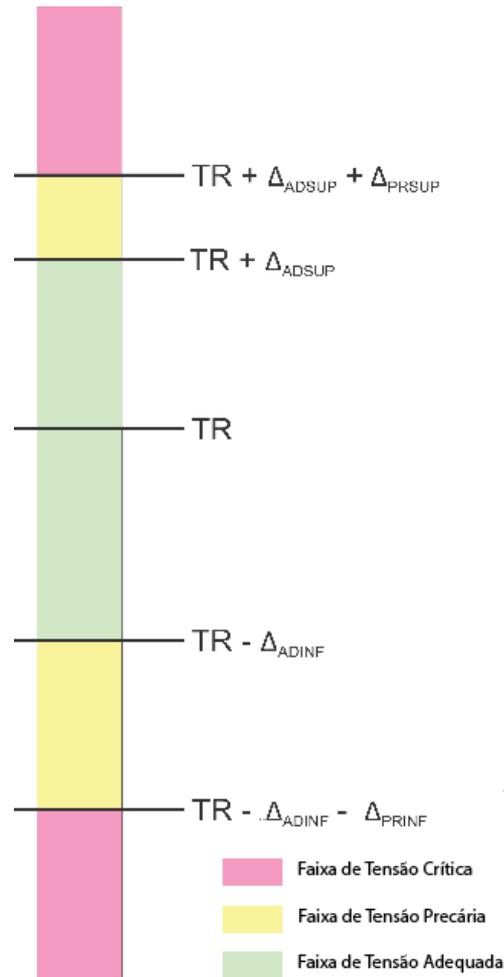


Figura 7 - Faixas de Tensão em Relação à de Referência (TR).
Fonte PRODIST (AGÊNCIA..., 2010).

As magnitudes das faixas de tensão em relação a tensão de referência igual a 220/127 Volts podem ser visualizadas na Tabela 2. A tensão de leitura (TL) deve compreender entre as faixas para ser classificada com um evento. Dessa forma, quando ocorre um *sag* ou *swell* e suas magnitudes ultrapassam os limites, então é possível afirmar que ocorreu um evento.

Tabela 2 - Faixas de Valores para Tensão de Referência (TR) Iguais a 220/127 V

Classificação dos eventos	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) (Volts RMS)	
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231)$	$(117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TL \leq 202)$ ou $(231 \leq TL \leq 233)$	$(110 \leq TL \leq 117)$ ou $(133 \leq TL \leq 135)$
Crítica	$(TL \leq 191)$ ou $(TL \leq 233)$	$(TL \leq 110)$ ou $(TL \leq 135)$

Fonte: PRODIST (AGÊNCIA..., 2010).

A classificação para *sags* e *swells* é definida pelos indicadores individuais DRP (Índice de duração relativa da transgressão para tensão precária) e DRC (Índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica), sendo calculados da seguinte forma:

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

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

em que, *nlp* (número de ultrapassagem de limite precário) representa o maior valor entre as fases A, B ou C do número de eventos ocorridos nas faixas de tensão precária e *nlc* (número de ultrapassagem de limite crítico), nas faixas de tensão crítica. Os limites para os indicadores DRP e DRC encontram-se na Tabela 3 (AGÊNCIA..., 2010).

Tabela 3 - Limite dos Indicadores de QEE para Tensão em Regime Permanente

Indicadores de QEE	Limites dos Indicadores
DRP (%)	3
DRC (%)	0,500

Fonte: PRODIST (AGÊNCIA..., 2010).

2.3.2 Distorções Harmônicas de Tensão

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 (ALDABÓ, 2001).

Segundo o PRODIST (AGÊNCIA..., 2010), 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:

$$DIT_h \% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (3)$$

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h}}{V_1} \times 100 \quad (4)$$

Os indicadores de QEE para distorção harmônica de tensão são obtidos por meio do percentil 95% dos valores de referência obtidos pela equação (2). Os limites para esses indicadores podem ser encontrados na Tabela 4. O Módulo 8 do PRODIST determina que seja apresentado, no mínimo, até a 25ª ordem harmônica (AGÊNCIA..., 2010).

Tabela 4 - Indicadores de QEE para Distorções Harmônicas

Indicadores de QEE	Ordem da Distorção Harmônica	Limite dos Indicadores (%)
DTT _{95%}	-	10
	5	7,5
	7	6,5
	11	4,5
DTT _{95%}	13	4
	17	2,5
	19	2
	23	2
	25	2
	3	6,5
DTT _{395%}	9	2
	15	1
	21	1
	2	2,5
DTT _{P95%}	4	1,5
	6	1
	8	1
	10	1
	12	1

Fonte: PRODIST (AGÊNCIA..., 2010).

2.3.3 Desequilíbrio de Tensão

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.

Segundo PRODIST (AGÊNCIA...,2010), o cálculo para o fator de desequilíbrio que determina a assimetria entre as componentes pode ser obtido pela equação (5). Em termos práticos, esse fator representa a relação entre as sequências

de fase negativa em relação a sequência positiva, evidenciando o desbalanceamento entre as fases.

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100 \quad (5)$$

Uma forma alternativa utilizando as tensões trifásicas de linha proposta é:

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

em que:

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

O limite para desequilíbrio de tensão é obtido calculando o percentil 95% do fator de desequilíbrio e pode ser visualizado na Tabela 5.

Tabela 5 - Limite do Indicador de QEE para Desequilíbrio de Tensão

Valor de Referência	FD95%
Adequado	3%

Fonte: PRODIST (AGÊNCIA..., 2010).

2.3.4 Flutuação de Tensão

Para a análise de QEE, a flutuação de tensão é quantificada em termos do seu efeito de cintilação luminosa com o objetivo principal de avaliar o incômodo provocado por ela no consumidor. 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.

Os valores de referência P_{st} e P_{it} são obtidos para o cálculo dos indicadores de QEE $P_{stD95\%}$ e $P_{stS95\%}$. De acordo com a norma IEC 61000-4-15 (INTERNATIONAL..., 2008), as definições desses valores de referência são as seguintes:

- P_{st} - 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;

- P_{lt} - 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.

Seguindo IEC 61000-4-15 (INTERNATIONAL..., 2008), o cálculo para os valores de referência é obtido da seguinte forma:

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (8)$$

em que P_i ($i=0,1; 1; 3; 10; 50$) corresponde ao nível de sensação de cintilação que foi ultrapassado durante $i\%$ do tempo, obtida pela distribuição acumulada complementar da Figura 8.

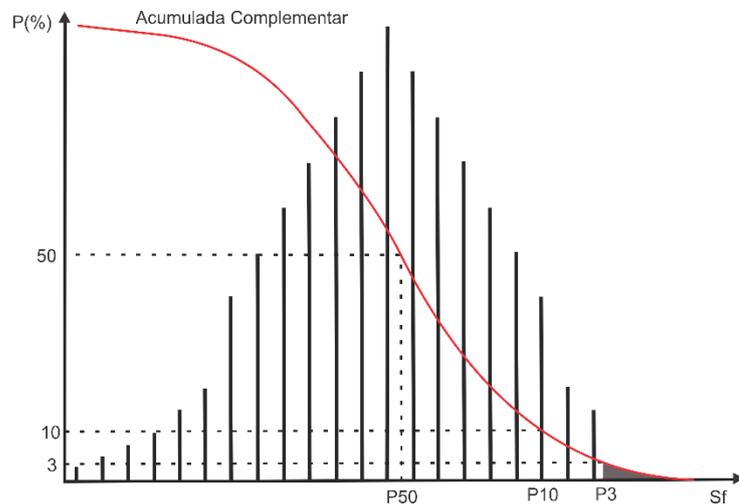


Figura 8 - Distribuição Acumulada Complementar da Sensação de Cintilação.
Fonte: PRODIST (AGÊNCIA..., 2010).

Os valores de referência de P_{lt} , para o indicador $P_{ltS95\%}$, pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (P_{sti})^3} \quad (9)$$

O limite para o indicador de QEE que mede o nível de cintilação luminosa é dado é obtido calculando o percentil 95% dos valores de referência P_{st} e P_{lt} e podem ser visualizados na Tabela 6.

Tabela 6 - Limites do Indicador de QEE para Flutuação de Tensão

Valor de Referência	$P_{std95\%}$	$P_{ItD95\%}$
Adequado	< 1 p.u.	< 0,8 p.u.

Fonte: PRODIST (AGÊNCIA..., 2010).

2.4 CONSIDERAÇÕES PARA O MONITORAMENTO DE QEE

De acordo com o PRODIST (AGÊNCIA...,2010), as grandezas podem ser avaliadas por meio de um conjunto de medições feitas de modo apropriado (eventual, amostral ou ininterrupta). As leituras devem ser obtidas por meio de equipamentos que operem segundo o princípio da amostragem digital. Os equipamentos de medição devem atender os seguintes requisitos mínimos:

- Taxa amostral de 16 amostras/ciclo;
- Conversor A/D (analógico/digital) de sinal de tensão de 12 bits;
- Precisão de até 1% da leitura.

As medições eventuais e amostrais deverão compreender o registro de 1008 leituras válidas e obtidas em intervalos de 10 minutos com duração mínima de 168 horas. Este intervalo de horas é considerado como mês civil quando os dados forem analisados e estudados (ASSOCIAÇÃO..., 2011). O manual do Analisador de Qualidade de Energia (FLUKE, 2012) informa que o equipamento possui padrões de medições em conformidade com o PRODIST e encontram-se detalhados na Tabela 7.

Tabela 7 - Padrões de Fábrica do Analisador de QEE da Marca Fluke

Métodos de medição usados	IEC61000-4-30 2ª edição classe A
Desempenho de medição	Fluke 435-II/437-II IEC61000-4-30 Classe A, Fluke 434-II IEC61000-4-30 Classe S
Qualidade da energia	EN50160
Oscilação	IEC 61000-4-15
Harmônicas	IEC 61000-4-7

Fonte: Fluke (2012).

O PRODIST (AGÊNCIA...,2010) determina que equipamentos de medição devem permitir a apuração das seguintes informações: I) valores calculados dos

indicadores; II) tabelas de medições, III) histogramas e IV) exportação dos dados para análises computacionais.

3 METODOLOGIA

O procedimento para análise de QEE é obter todos as informações relevantes do sistema elétrico a ser investigado. Esse procedimento consiste em cinco etapas iniciais propostas pelo *Electric Power Research Institute* (EPRI): (I) obter a documentação do sistema; (II) pesquisa de campo; (III) monitoramento do sistema elétrico; (IV) análise dos dados coletados; (V) correlacionar as cargas do sistema com os distúrbios monitorados. O fluxograma da Figura 9 demonstra o procedimento para investigação dos distúrbios.

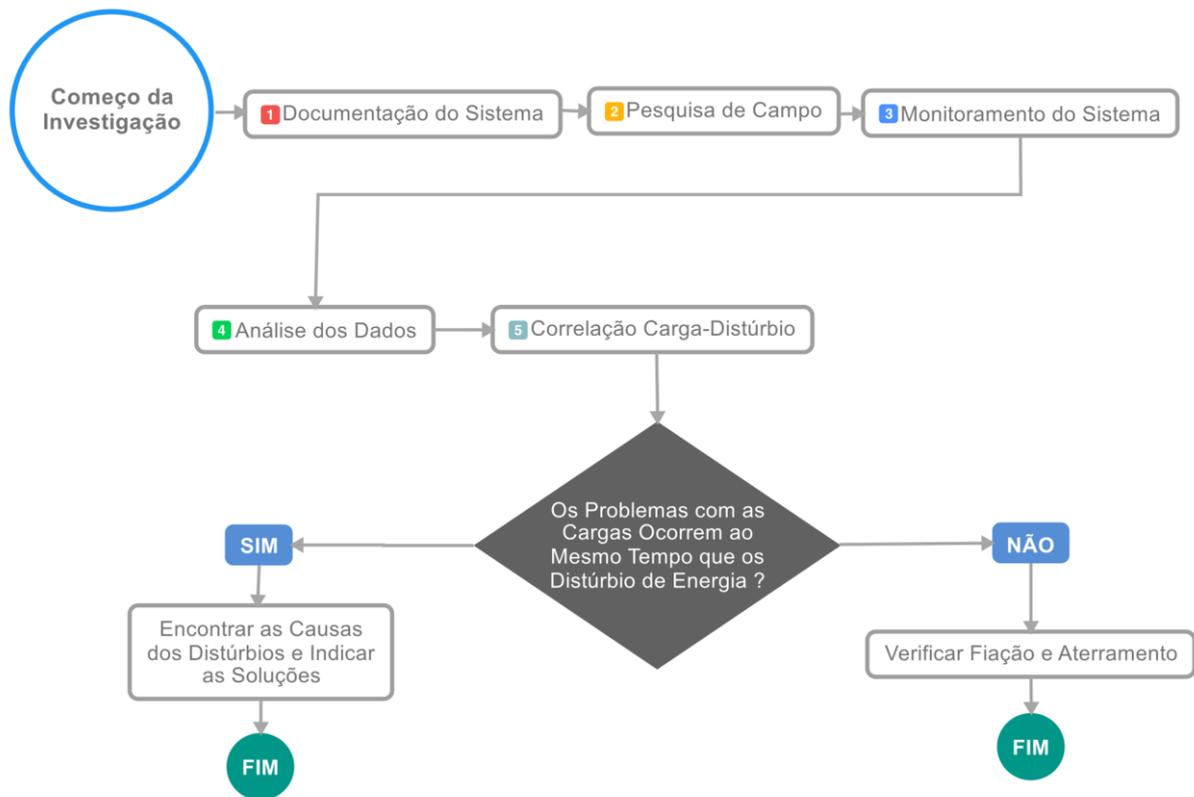


Figura 9 - Metodologia Proposta pela EPRI para Investigação de Sistemas com Problemas com a QEE.

Fonte: Adaptado de EPRI (2001).

Essa metodologia foi escolhida pelo fato de fornecer mais detalhes a respeito dos procedimentos a serem realizados. A ANEEL possui seus procedimentos para análise de QEE, porém, utilizando somente eles, não é suficiente para obter uma análise satisfatória. Além disso, o EPRI possui tradição na busca por distúrbios de QEE nos EUA e possuem um acervo de estudos de casos, métodos de análises dos

dados coletados, entre outros arquivos relacionados a busca por distúrbios de energia (EPRI, 2017).

3.1 DOCUMENTAÇÃO DO SISTEMA

A documentação do sistema elétrico do UTFPR-PB foi necessária para obter informações de como estão sendo alimentados e distribuídos os circuitos elétricos. O objetivo dessas informações é para, posteriormente, criar um plano de medições. De tal modo, foram necessários os seguintes documentos: diagrama unifilar das subestações de transformação com memorial descritivo, projeto elétrico dos circuitos de tomadas, luminárias, painéis elétricos e fiação e a lista de cargas conectadas aos circuitos.

Com o diagrama unifilar das subestações de transformação, foi possível obter a quantidade de transformadores instalados. Além disso, os locais nos quais estão situados os mesmos, o tipo de ligação elétrica do sistema (estrela ou triângulo), a potência instalada e as maiores cargas instaladas em cada um com o tipo de partida utilizada.

O projeto elétrico e planta baixa, juntamente com a lista de cargas instaladas, foi necessário para determinar os locais nos quais se concentram as cargas elétricas e como elas estão distribuídas. Ainda, foi possível localizar os painéis elétricos de cada divisão de circuito e a fiação de alimentação e distribuição de energia para as cargas. A lista das principais cargas que estão conectadas nos circuitos que foram analisados está resumida na Tabela 8.

Tabela 8 - Lista de Cargas mais Significativas Instaladas nos Painéis de Distribuição para as Medições

Painel	Setores	Detalhes dos Setores
		Cargas mais significativas
C	Iluminação do Bloco H e parte das tomadas da H003	Aproximadamente 130 reatores para luminárias.
D	H007 (sala dos professores, laboratório de soldagem e tratamentos térmicos)	07 retificadores para solda por eletrodo revestido modelo <i>Soldarc</i> r4300; 02 transformadores para solda por eletrodo revestido até 250 A; 02 máquinas de solda <i>Mig/Mag</i> modelo <i>Solmig250</i> com tocha su320; 01 máquina de solda <i>Tig</i> modelo <i>Soltig260</i> ; 02 fornos <i>Mufla</i> para tratamento térmico; 01 dispositivo para ensaio <i>Jominy</i> de temperabilidade; 01 forno para tratamento térmico em sal fundido; computadores pessoais e impressoras; forno tubular para determinação de carbono em aços.
E F	H006 (sala de aula e laboratório de usinagem)	01 torno universal <i>CNC Romi</i> 15cv – partida suave (<i>soft-starter</i>) e Torno Universal marca <i>Nardini</i> modelo 500 es; 05 tornos horizontais <i>Romi</i> modelo <i>Tormax 20</i> ; 01 fresadora ferramenteira marca <i>Bridgeport</i> ; 01 fresadora universal <i>fcu 30</i> ; 01 furadeiras de coluna marca <i>VR4A</i> ; 01 furadeira radial marca <i>Cincinnati Bickfor</i> ; 01 serra fita horizontal franho modelo <i>fm-500</i> ; 01 plaina limadora marca <i>Rocco</i> modelo <i>plr450</i> ; 01 retífica plana modelo <i>Permag</i> ; 04 conjuntos de moto-esmeril e 01 centro de usinagem vertical.
J	I010 (laboratório de eletrônica analógica)	Computadores e aparelho de ar condicionado.
M	Iluminação do Bloco I	Aproximadamente 100 reatores para luminárias.
U	J002 (iluminação das salas de professores)	Aproximadamente 30 reatores para luminárias, computadores e impressoras.
V	J002 (circuitos de tomadas da coordenação e iluminação do Bloco J)	Aproximadamente 160 reatores para luminárias, computadores e impressoras.
AA	J008 (laboratório de solos, sala de professores)	01 Penetrômetro de solos <i>Mr. Solotest</i> ; 01 Penetrômetro de solos <i>Mr. Rodoteste</i> APN 47; 01 Piezômetro <i>MR Soiltest</i> ; 01 Agitador de peneiras elétrico; 01 Balança eletrônica analítica, carga máxima 200g; 01 Balança eletrônica para carga máxima para 10.000 g; 01 Bomba de vácuo, tipo 2 VC; 01 Conjunto para ensaio de controle de compactação pelo Método de <i>Hilf</i> ; dispersor elétrico para solos; 01 Estufa elétrica (110 x 220V), para temperatura até 200° C.

3.2 PESQUISA DE CAMPO

A pesquisa de campo foi necessária para investigar os locais com possibilidade maior de apresentarem distúrbios de QEE. Ela consiste em realizar uma entrevista com servidores da UTFPR-PB, submetendo um questionário aos mesmos com perguntas investigativas e relacionadas a análise de QEE.

O questionário é uma adaptação de perguntas propostas segundo EPRI (2001) e Michaels (1997) e é chamado de “*walk-through*”. Um modelo do mesmo pode ser encontrado no Apêndice A. As perguntas foram feitas a professores, laboratoristas e estagiários. Os mesmos foram escolhidos devido ao contato direto com as cargas. Esses relatos foram analisados e chegou-se à conclusão de que a UTFPR-PB possui os seguintes indícios de problemas de QEE:

- Alta corrente no neutro;
- Desequilíbrio de cargas;
- Queima e superaquecimento de fusíveis e fiação;
- Circuito elétrico sem aterramento;
- Computadores com problemas;
- Fator de potência baixo em alguns horários do dia;
- Desarme constante de disjuntores de proteção;
- Possíveis interferências entre cargas.

Com o resultado das entrevistas, foi necessário investigar os locais onde ocorrem os problemas. Essa etapa da pesquisa de campo consistiu em verificar as informações dadas pelos entrevistados e as cargas com potencial para gerar distúrbios. Além disso, foi possível verificar em quais painéis elétricos essas cargas estão conectadas.

3.3 MONITORAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO

Para monitorar o sistema elétrico da UTFPR-PB, se fez necessário criar um plano de medição. Desse modo, é possível planejar os dias para realizar as medições, definir quais distúrbios deverão ser monitorados e em qual painel o medidor permanecerá. Além disso, é necessário estimar a quantidade de medições que será preciso para realizar a análise.

A UTFPR-PB possui um sistema elétrico com uma variedade de cargas distribuídas em quatro transformadores. Para simplificar a análise e reduzir a quantidade de medições, foi preciso escolher um para aplicar os procedimentos de análise de QEE. O transformador escolhido foi o TR1 de 500 KVA, com enfoque nas cargas dos blocos H, I e J. Os critérios para a escolha do mesmo foram o que teve

maior índice de problemas relatados na pesquisa de campo e que possui maior número de cargas.

Os pontos de medição foram definidos tomando como base a documentação do sistema elétrico e a busca na literatura das possíveis causas dos problemas relatados na pesquisa de campo. Cada ponto de medição foi escolhido levando em consideração a carga instalada e o distúrbio relatado. A Tabela 9 apresenta o plano de medição.

Tabela 9 - Plano de Medições

Problemas relatados*	Detalhes			
	Medições	Painel	Ênfase do circuito	Distúrbios relacionados
Corrente no Neutro (desequilíbrio de tensão) e circuito elétrico sem aterramento	Medição 1	Cabine de transformação TR1	Todos	Todos
Queima de fusíveis e possíveis influências em outras cargas	Medição 2	D	Máquinas de solda, fornos e computadores (salas de professores)	Harmônicas e Tensão em regime permanente (<i>sags</i> e <i>swells</i>)
Queima de fusíveis e possíveis influências em outras cargas	Medição 3	E	Usinagem	Harmônicas e Tensão em regime permanente (<i>sags</i> e <i>swells</i>)
Computadores com problemas	Medição 4	AA	Computadores, máquinas indutivas e estufas elétricas	Ruídos, Harmônicas e Tensão em regime permanente (<i>sags</i> e <i>swells</i>)
	Medição 5	J	Computadores e máquinas indutivas.	Ruídos, Harmônicas e Tensão em regime permanente (<i>sags</i> e <i>swells</i>)
<i>Flickers</i>	Medição 6	C	Iluminação bloco I	Flutuação de tensão
	Medição 7	M	Iluminação bloco H	Flutuação de tensão
	Medição 8	V	Iluminação bloco J	Flutuação de tensão

*Problemas relatados na pesquisa de campo em conjunto com a revisão bibliográfica.

O primeiro local de medição foi a cabine de transformação do TR1 que encontra-se perto do Bloco H da UTFPR-PB e alimenta os blocos de laboratórios H, I, J; bloco B; a parte antiga dos blocos L, M, N; o refeitório dos servidores; a lanchonete dos alunos e o almoxarifado. Esse ponto de medição foi escolhido por ser a fonte de alimentação das cargas analisadas. Segundo Dorr et al. (1997), a CEA (*Canadian*

Electricity Association) considera realizar um monitoramento no painel de entrada do circuito elétrico, pois oferece uma média combinada da QEE em todas as instalações do cliente. Devido a isso, foi analisada a possível ocorrência dos distúrbios citados pelo PRODIST.

O segundo local de medição foi o painel D, localizado no Laboratório de Soldagem do bloco H que alimenta as máquinas de solda e fornos industriais, juntamente com as tomadas de uso geral localizadas nas salas dos professores. Os tipos de problemas relatados na pesquisa de campo para este local foram: a queima de fusíveis e possíveis influências entre cargas. Conforme EPRI (2009), os distúrbios analisados nesse ponto de medição podem ser: distorção harmônica e tensão em regime permanente (*sags e swells*).

O terceiro local de medição foi o circuito alimentado pelo painel E, localizado no Laboratório de Usinagem do bloco H. Esse painel alimenta os tornos de usinagem CNC, juntamente com as tomadas de uso geral. A análise das entrevistas revelou que os tipos de problemas encontrados neste local foram: queima de fusíveis e possíveis influências entre cargas. De acordo com EPRI (2003) e EPRI (2006), os distúrbios analisados nesse ponto de medição podem ser: distorção harmônica e tensão em regime permanente (*sags e swells*).

O quarto e o quinto local de medições foram os painéis AA e J, respectivamente. O primeiro, localizado no Laboratório de Solos do bloco J e o segundo, localizado no Laboratório de Eletrônica Analógica do bloco I. Ambos alimentam cargas indutivas, computadores, aparelhos de ar condicionado e estufas elétricas, juntamente com as tomadas de uso geral. Pela pesquisa de campo, concluiu-se que o tipo de problema encontrado nestes locais está relacionado com os computadores (queima de teclados e desligamento aleatório do equipamento e cintilação nos monitores). Dessa forma, os distúrbios nesse ponto de medição podem ser: ruídos, distorções harmônicas e tensão em regime permanente (*sags e swells*) (EPRICSG, 1999).

Os últimos três locais de medições (para as medições de 6 a 8) foram os painéis de iluminação, localizadas nos blocos H, I e J, nos quais alimentam cerca de 300 luminárias fluorescentes com reatores. Os relatos dos entrevistados na pesquisa de campo foram que o tipo de problema nesses locais são as cintilações luminosas. Segundo Colnago *et al.* (2013), o distúrbio analisado nesse ponto de medição é a flutuação de tensão (*Flicker*).

As medições foram feitas utilizando um Analisador de Qualidade de Energia da marca *Fluke*, modelo 434, número de série 4895015. Este medidor oferece um conjunto abrangente de medições para verificar os sistemas de distribuição de força. Dentre os conjuntos de funções do analisador, o modo registrador foi utilizado e foi possível medir todas as grandezas necessárias para executar o plano de medições (flutuação de tensão, desequilíbrio de fase, distorção harmônica, etc.). Essa função permite ao usuário ajustar intervalos de tempo de observação da grandeza medida e os intervalos de registro. Possibilitando, assim, aplicar as normas para análise de QEE.

Para efetuar as medições, utilizam-se as 4 entradas BNC para pinça de corrente e 5 entradas do tipo “banana” para tensão. Para locais em que as pinças de corrente não se aplicavam, elas foram substituídas pelas pinças flexíveis de corrente CA de 3000 A (modelo i430flex-4pk) para abraçar uma quantidade maior de fios condutores. A Figura 10 apresenta a disposição na qual as pinças foram instaladas.

O procedimento para instalação do equipamento é o seguinte:

- Abraçar os nos condutores da fase A (L1), B (L2), C (L3) e N (neutra) com as pinças de corrente, respeitando o sentido das setas indicadas nas mesmas. O sentido da seta indica a polaridade do sinal, evitando a medição de potências negativas.
- Colocar as pinças de tensão seguindo o padrão: primeiro o aterramento e depois N, A (L1), B (L2) e C (L3) sucessivamente;
- Conectar a pinça de aterramento. Seu uso ajuda a obter resultados de medições corretos;
- Verificar todas as conexões no mínimo duas vezes e observar se as pinças de corrente estão completamente abraçadas ao redor dos condutores.

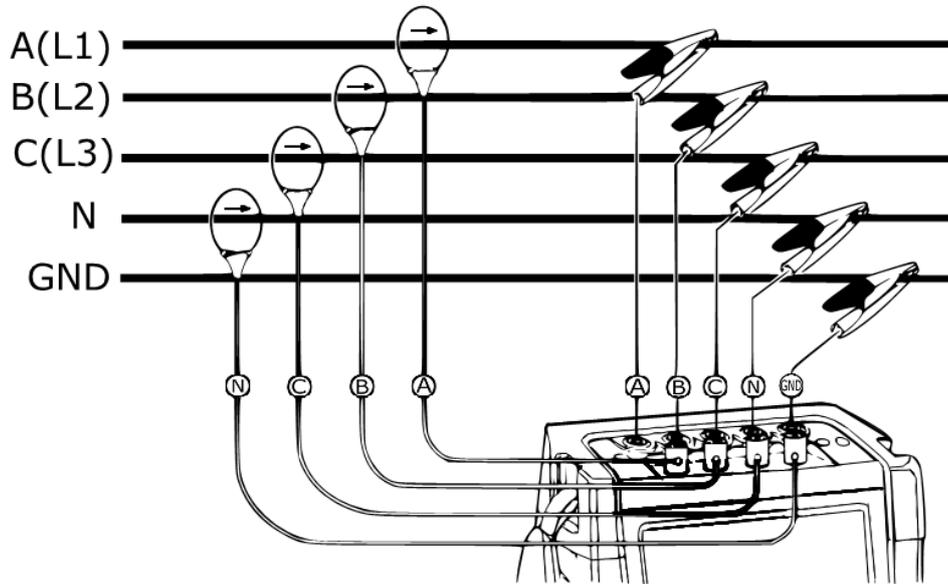


Figura 10 - Esquema de Ligação do Analisador de Qualidade de Energia.
Fonte: Fluke (2012).

Ao final da instalação, é necessário certificar se as pinças de tensão e corrente estão conectados de modo correto. Para isso, utiliza-se a tela de forma de onda do perfil/fasor. Essa função permite ao usuário verificar o diagrama fasorial das tensões e correntes. As mesmas devem aparecer em sequência e observadas no sentido horário, conforme o exemplo da Figura 11.

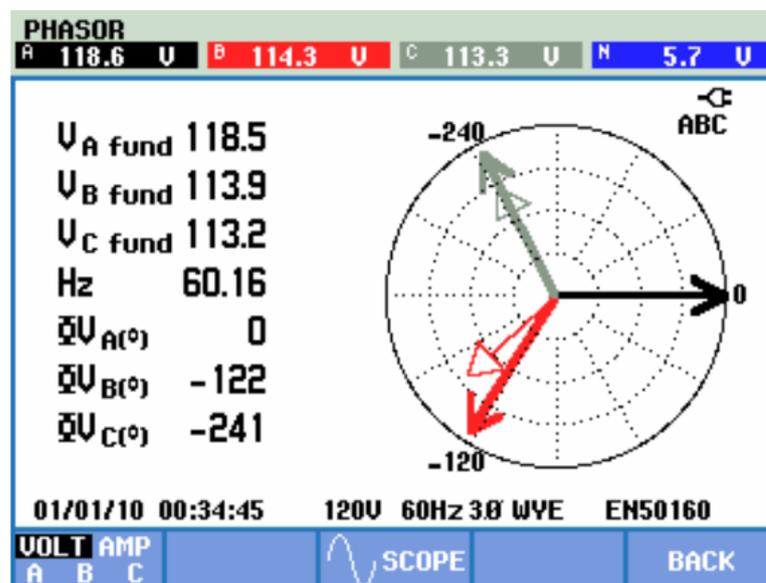


Figura 11 - Diagrama Fasorial para o Analisador Conectado Corretamente.
Fonte: Fluke (2012).

É necessário realizar uma configuração prévia antes de iniciar a medição. O equipamento deve ser personalizado de acordo com o conjunto de medidas. Essa configuração foi feita da seguinte forma: ir até *setup readings* do menu *Start* da função *logger* e adicionar ou remover as leituras necessárias. Essa função permite selecionar os intervalos de aquisição de dados (de 0,25 s até 2 h), o conjunto de leituras a serem medidos, a duração máxima da medição de acordo com a memória de armazenamento do medidor e o início imediato ou cronometrado do registro.

Para selecionar o conjunto de leituras, usar as teclas de seta para cima/para baixo para selecioná-las. Essas categorias são listadas em uma coluna da seguinte forma: *Volt, Amp, Potência, Energia, Volts harmônicos, Amps harmônicos, Watts harmônicos, Frequência, Flicker/Oscilação, Desequilíbrio e Sinalização da rede elétrica*.

Após o término do período de medição, os dados ficam salvos automaticamente no equipamento. Em seguida, é necessário salvar o arquivo em um dispositivo de memória externo. Aconselha-se, neste caso, a transferência dos dados para um PC ou *laptop* utilizando o cabo de interface óptica para *USB*, fornecido junto com o analisador.

Para a visualização dos dados no *PC* ou *laptop*, utiliza-se o *software Power Log*. Esse programa é utilizado para gerar os gráficos temporais, além de outras funções para analisar QEE. O mesmo ainda permite que os dados possam ser extraídos em arquivos de texto para que possam ser usados em *softwares* de gráficos mais complexos.

3.4 PROCESSO DE ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS

O processo de análise dos dados é composto por etapas que consistem em revisar os dados medidos, analisar os gráficos, classificar os distúrbios de energia e comparar as cargas do sistema elétrico com os distúrbios encontrados.

3.4.1 Revisão dos Dados Monitorados

Para se ter certeza que os dados foram medidos de forma correta, é necessário realizar uma revisão antes do processo de análise. Verificar se os valores estão de acordo com as grandezas medidas, se os intervalos de tempos de aquisição e os períodos de observação estão corretos. Além de verificar se as potências não estão negativas.

3.4.2 Análise Gráfica dos Dados Monitorados

O processo para análise dos dados é feito por meio de gráficos, juntamente com as normas regulamentadoras que classificam os distúrbios. Para isso, é necessário utilizar de ferramentas gráficas para plotagem dos gráficos. O *software Power Log* (disponibilizado pela *Fluke* junto com o medidor) permite a plotagem dos mesmos, porém utiliza de normas europeias e americanas para classificar as perturbações de energia.

Assim, para atender a necessidade de interação dos gráficos com as normas brasileiras, utilizou-se o *software MATLAB*. Dessa forma, foram implementados alguns *scripts* para classificar os distúrbios conforme o PRODIST. Os gráficos são feitos utilizando as funções de plotagem do *MATLAB*. Os dados da medição são armazenados em vetores e plotados na forma cartesiana ou de barras.

Para exemplificar, a Figura 12 representa o tipo de gráfico cartesiano que se aplica na análise para classificar os distúrbios de *sags* e *swells*. As linhas de limites para os indicadores de QEE são plotados juntamente com os dados, conforme mostra a Figura 12. Dessa forma, quando um dos dados medidos ultrapassam esses indicadores, ficará evidente no gráfico cartesiano.

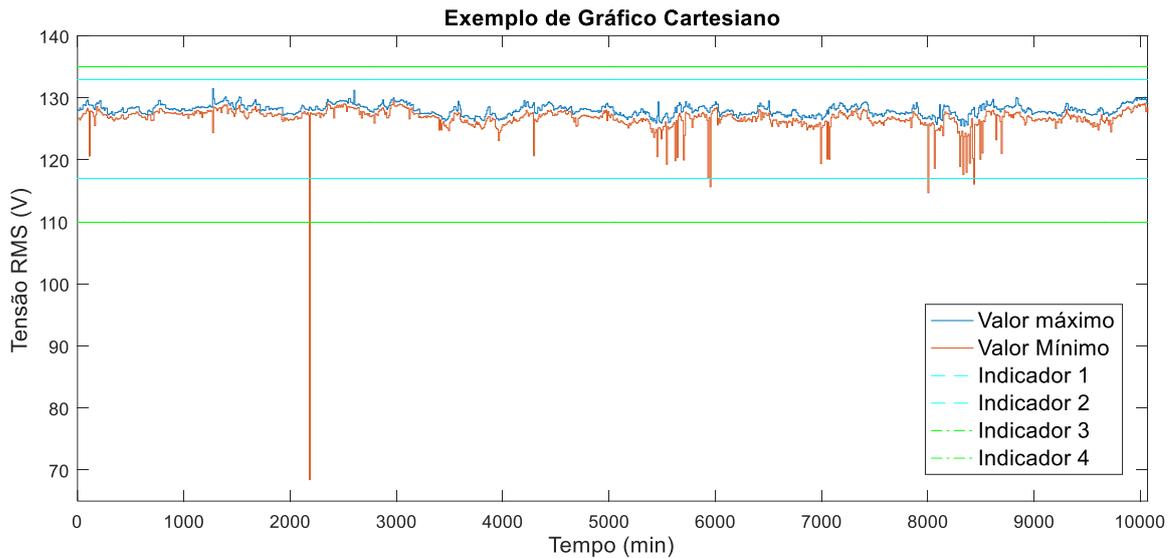


Figura 12 - Gráfico Gerado pelos *Scripts* para Análise dos Indicadores de QEE de Sags e Swells.

De acordo com o PRODIST (AGÊNCIA...,2010), os eventos que caracterizam uma perturbação ocorrem quando as grandezas medidas ultrapassam os limites estabelecidos. Para que os *scripts* gerem gráficos que evidenciem isso, é necessário defini-los nas linhas de comando do código. Dessa forma, os *scripts* são criados levando em consideração os limites dos indicadores de QEE da Secção 2.2.

Além dos gráficos cartesianos, é necessária a plotagem dos gráficos de barras para análise de *percentil* e dos níveis de distorções harmônicas. Os gráficos são criados a partir de um vetor de dados. A sua magnitude é representada na forma de barras. Um exemplo da implementação dos *scripts* para esse tipo de gráfico pode ser observado na Figura 13. Os *scripts* podem ser encontrados no Apêndice B.

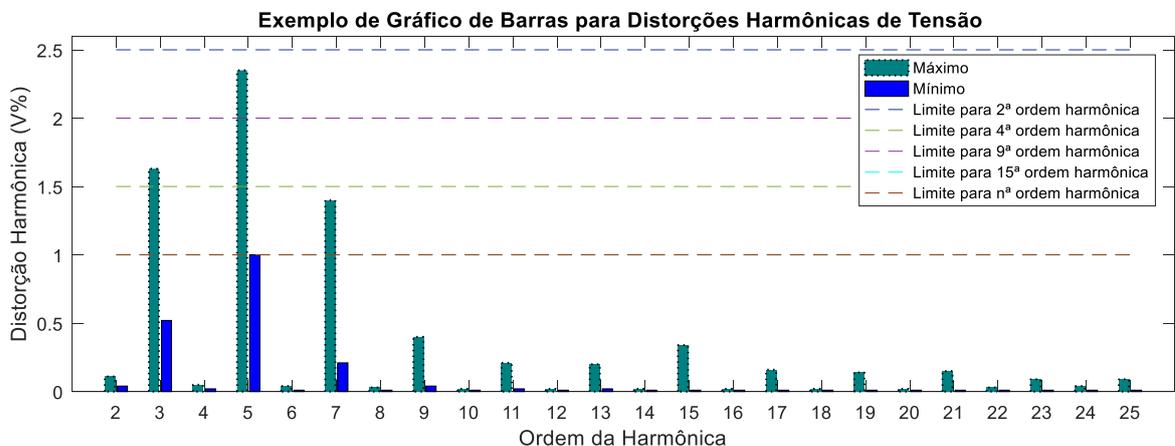


Figura 13 - Gráfico Gerado pelos *Scripts* para Análise dos Níveis de Distorções Harmônicas de Tensão.

3.4.3 Obtenção dos Indicadores de QEE

Após coletar o conjunto de dados, é necessário realizar os cálculos para obtenção dos indicadores de QEE. É por meio deles que é possível determinar a QEE do sistema monitorado. Para esse trabalho, os indicadores calculados foram: DRP, DRC, DTT95%, DTT_i95%, DTT_p95%, P_{stD}95% e P_{ItS}95% (AGÊNCIA..., 2010).

Para os cálculos dos indicadores DRP e DRC, que avaliam a tensão em regime permanente seguindo as normas do PRODIST, os valores de tensão medidos são comparados com o valor de tensão de referência, a qual deve ser a nominal ou a contratada. Essa comparação é feita por meio dos *scripts*, em que são calculados os indicadores para tensão em regime permanente dividindo o maior valor entre as fases do número de leituras situadas nas faixas precária ou crítica pelo número de leituras efetuadas na medição, conforme a equação (1) e equação (2), da Seção 2.1. Dessa forma, quando ocorre um evento, ele é classificado em uma das faixas de tensões. Os indicadores são calculados para as três fases do sistema (AGÊNCIA..., 2010).

Os valores de referência para distorções harmônicas, flutuação e desequilíbrio de tensão, são disponibilizados pelo analisador de QEE. Seus valores também podem ser obtidos pelas equações (3) até (9), apresentadas no Capítulo 2.

Os indicadores percentis DTT95%, DTT_i95%, DTT_p95%, FD95%, P_{stD}95% e P_{ItS}95% são calculados utilizando a ferramenta *prctile* do *MATLAB* nos dados coletados pelo analisador. Além disso, foi possível obtê-los na forma gráfica por meio da função de plotagem *Empirical Cumulative Distribution Function (ecdf)*.

3.4.4 Classificação dos Distúrbios de Energia

A classificação dos distúrbios foi iniciada analisando os conjuntos de dados por setores. Os dados de cada local medido foram analisados visualmente utilizando o *software Power Log*. Primeiramente, observando a possível existência de distúrbios relatados na pesquisa de campo e, em seguida, a ocorrência de outros tipos de perturbações de energia. Os conjuntos de dados que possuem distúrbios foram exportados para o *MATLAB*, onde passaram por um processo de análise mais detalhado. Nesse processo, os gráficos são plotados por meio dos *scripts* para que os

distúrbios fiquem evidenciados e a incidência dos valores ultrapassados sejam anotados.

Conforme o PRODIST (AGÊNCIA...,2010), é necessária a análise estatística para a maioria dos casos. Devido a isso, utilizou-se as ferramentas estatísticas de percentis e histogramas disponíveis no MATLAB. Os histogramas vêm acompanhados das curvas de distribuição acumulada.

Para o caso da análise de percentis, os dados são processados e plotados em uma função de probabilidade acumulativa, conforme ilustra a Figura 14(a). O percentil 95% é obtido usando as ferramentas estatísticas do MATLAB. O seu valor é indicado no gráfico para as análises dos indicadores de QEE.

Com relação a análise estatística por meio de histogramas, juntamente com as curvas de distribuição acumulativa, os dados são plotados em gráficos de barras e de linhas que evidenciam a ocorrência dos valores durante o período de amostragem dos dados e a probabilidade deles ocorrerem ao redor da mediana, conforme observado na Figura 14(b).

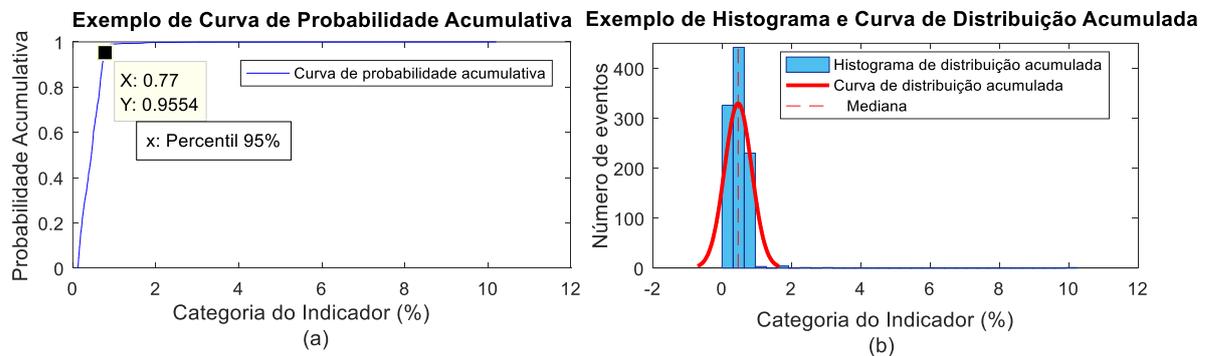


Figura 14 - (a) Exemplo de Curva de Probabilidade Acumulativa. (b) Exemplo de Histograma e Curva de Distribuição Acumulada.

No fim do período, os índices de QEE são comparados com os limites estabelecidos pelas normas do PRODIST (AGÊNCIA..., 2010) e IEC (ASSOCIAÇÃO..., 2011). Se os indicadores forem ultrapassados, então conclui-se que o local medido possui problemas com a QEE. Caso contrário, se a incidência dos distúrbios não ultrapassarem os limites, então o sistema elétrico analisado apresenta desempenho adequado.

3.5 CORRELAÇÃO DAS CARGAS DO SISTEMA ELÉTRICO COM OS DISTÚRBIOS ENCONTRADOS

Essa parte da análise consiste em comparar os horários dos eventos que ocorreram os distúrbios de QEE com as cargas operando nesses momentos. Pela metodologia de análise proposta pela EPRI (2001), é preciso essa comparação pois nem todos os eventos registrados podem ser causados por problemas de QEE. EPRI (2001) sugere que, para realizar essa análise é necessário procurar por coincidências de eventos, como uma cintilação na tela dos computadores quando um aparelho de ar condicionado é ligado ou as luzes piscando durante um desligamento de carga. Dessa forma, se uma perturbação elétrica foi registrada na mesma data e hora de um mau funcionamento do equipamento, a primeira hipótese deveria ser que o distúrbio elétrico causou o problema no equipamento.

Para o sistema elétrico da UTFPR-PB, essa análise foi feita verificando os horários em que os laboratórios e salas de aula estavam em uso. Além disso, uma parte da pesquisa de campo foi feita com intuito de realizar essa verificação. Os entrevistados chegaram a relatar as ocorrências desses eventos quando certas cargas eram ligadas na energia do sistema elétrico.

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia desenvolvida e utilizada para avaliação do desempenho do sistema elétrico da UTFPR-PB foi adaptada para atender os objetivos deste trabalho. Inicialmente, foi preciso buscar métodos de investigação de sistemas elétricos em instituições de pesquisa com experiência no assunto, tal como a EPRI.

Posteriormente, as informações fornecidas pela documentação do sistema elétrico analisado (lista de cargas, diagramas elétricos, etc.) facilitou na busca dos pontos estratégicos para realizar as medições. Além disso, a pesquisa de campo foi essencial para realizar o planejamento das medições e definir os possíveis distúrbios que poderiam estar ocorrendo no sistema elétrico.

A análise computacional utilizando o *MATLAB* permitiu uma melhor interação com os dados. Dessa forma, destacou-se a facilidade com que as ferramentas desse *software* possibilitaram na análise estatísticas e na criação de *scripts* para tratamento dos dados e gráficos.

O método adotado neste trabalho pode ser aplicável em qualquer sistema elétrico. Na presença de um agrupamento de cargas industriais diversas, é recomendável considerar maiores informações fornecidas pelo EPRI (2003). Entretanto, considerando-se os vários desdobramentos associados ao desenvolvimento deste método, optou-se pelo uso de um modelo simplificado. Tal motivação foi devida ao fato de que, o sistema elétrico da UTFPR-PR não possui um padrão de utilização de cargas igual a um cenário industrial.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados os resultados das medições adquiridas pelo analisador de qualidade de energia. Os resultados são apresentados para cada um dos circuitos monitorados descritos no Plano de Medições. As medições e as análises dos dados foram realizadas conforme a metodologia descrita no Capítulo 3 deste trabalho.

4.1 CABINE DO TRANSFORMADOR TR1

A medição realizada no transformador TR1, entre os dias 14/09/2017 até 21/09/2017, teve como principal objetivo monitorar o painel de entrada de todos os circuitos presentes no Plano de Medições. Os distúrbios analisados foram: (I) tensão em regime permanente; (II) desequilíbrio de tensão; (III) desequilíbrio de corrente; (IV) distorção harmônica de tensão.

4.1.1 Tensão em Regime Permanente

Durante o período de amostragem, ocorreram 13 eventos de quedas de tensão. Na fase A, ocorreram 6 eventos de tensão precária e 1 de tensão crítica. Para a fase B, foram 4 de tensão crítica e 1 de tensão precária. A fase C teve somente 1 evento de tensão crítica. Os indicadores de QEE para tensão em regime permanente, DRP% e DRC%, foram calculados com base nos eventos e estão apresentados na Tabela 10. Seus valores encontram-se dentro dos limites do PRODIST.

Tabela 10 - Indicadores para Tensão em Regime Permanente do Transformador TR1

Indicadores de QEE	Valores registrados por fase			Limite dos indicadores
	Fase A	Fase B	Fase C	
DRP (%)	0,590	0,390	0,100	3
DRC (%)	0,100	0,100	0	0,500

4.1.2 Desequilíbrio de Tensão

O desequilíbrio de tensão é definido como a assimetria entre a tensão de sequência negativa e a tensão de sequência positiva, representada como um valor percentual. Os dados coletados estão plotados na Figura 15. Não foi encontrado desequilíbrio de tensão significativo nesse circuito, com poucos picos de assimetria de tensão durante o tempo de amostragem dos dados.

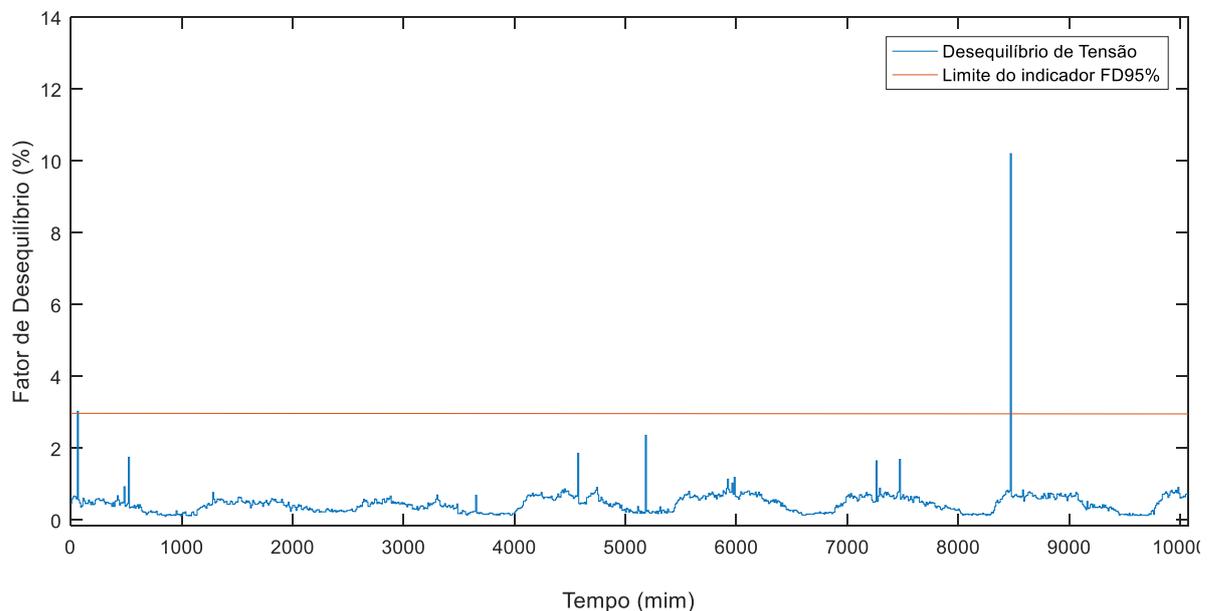


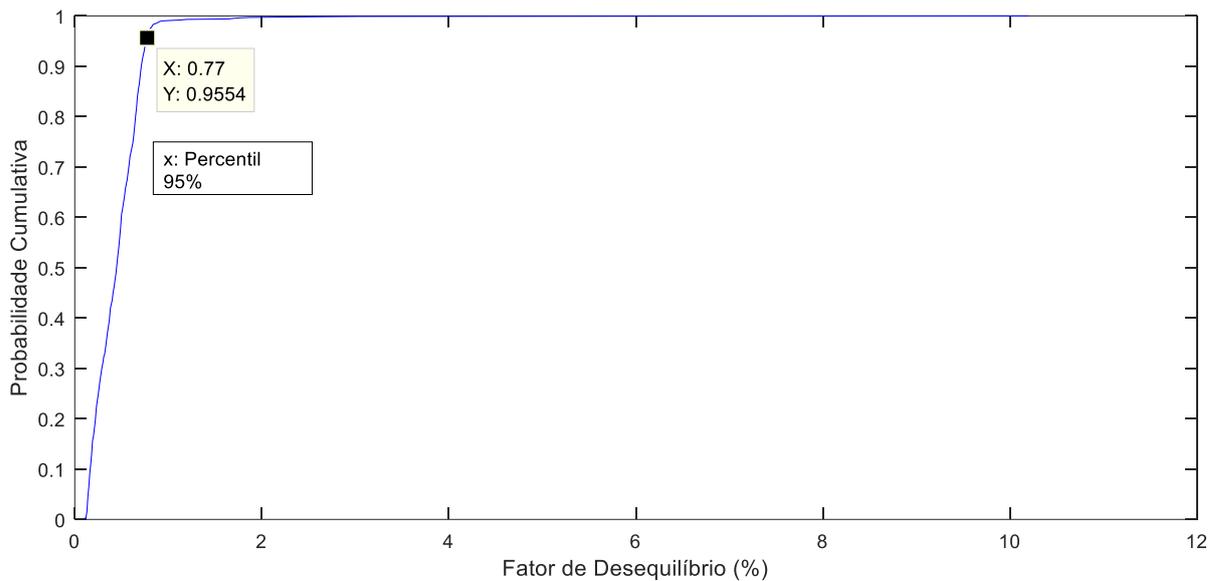
Figura 15 - Fator de Desequilíbrio de Tensão do Circuito da Cabine do Transformador TR1.

O indicador FD95%, para tensão de sequência negativa (V_-), encontra-se dentro do limite de 3% estabelecido pelo PRODIST. Os valores podem ser observados na Tabela 11. O indicador FD95%, para a tensão de sequência zero (V_0), não é uma exigência do PRODIST. Porém, de acordo com o manual de operação do Analisador de Qualidade de Energia utilizado nos ensaios (FLUKE, 2012), as componentes de sequência zero podem aparecer em uma carga desequilibrada nos sistemas de alimentação de 4 fios. Para a norma EN50160 (EUROPEAN...,1999), adotada pelo manual, um desequilíbrio de 2% é considerado alto.

Tabela 11 - Indicadores para Desequilíbrio de Tensão do Transformador TR1

Sequência das fases	Valores dos Indicadores	
	FD95% (%)	Limite dos indicadores (%)
V-	0,770	3
V ₀	0,530	2

A curva de probabilidade cumulativa da Figura 16 mostra como os valores dos percentis para os fatores de desequilíbrio para tensão de sequência negativa estão distribuídos com relação ao tempo de observação. O percentil de 95% pode ser observado na curva. Os dados dos percentis crescem de forma linear, porém não ultrapassam o limite do fator de desequilíbrio de 3% estabelecido pelo PRODIST. Isso demonstra que, a distribuição dos valores está concentrada abaixo desse limite e assumindo valores baixos durante o tempo de observação.

**Figura 16 - Curva de Probabilidade Cumulativa do Fator de Desequilíbrio para Tensão de Sequência Negativa do Transformador TR1.**

O histograma da Figura 17 mostra como os valores de desequilíbrio para tensão de sequência negativa ocorrem com maior frequência abaixo de 2%. Uma densa concentração de valores pode ser observada entre os intervalos de 0% a 1%. Isso significa dizer que, durante o tempo de observação, as cargas conectadas no circuito de entrada do transformador TR1 estão submetidas a poucos desequilíbrios de tensão acima de 2%. A curva de distribuição acumulada encontra-se de forma estreita ao redor da mediana cujo valor é de 0,4634%.

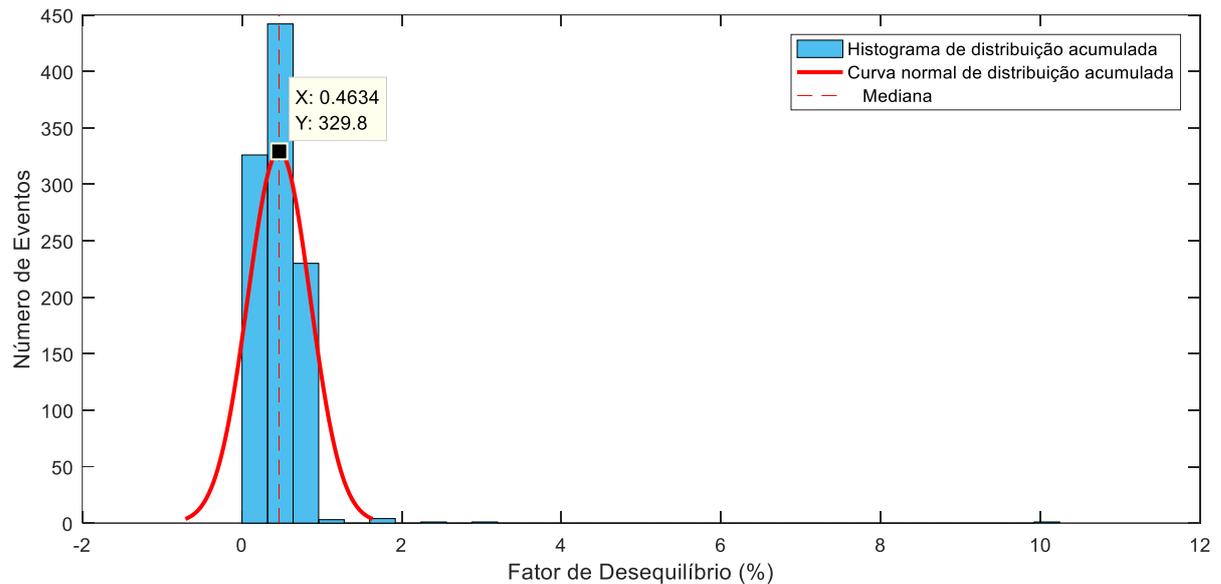


Figura 17 - Histograma e Curva de Distribuição Acumulada do Indicador FD para Tensão de Sequência Negativa do Transformador TR1.

Essa análise estatística permite afirmar que a possibilidade de ocorrer tensão de sequência negativa no sistema analisado é baixa. Conforme EPRI (2010), isso significa preservar a vida útil das cargas que possuem motores ligados ao sistema elétrico do transformador TR1, já que um desequilíbrio de tensão no enrolamento do estator, resulta em superaquecimento e redução da vida útil do motor.

4.1.3 Desequilíbrio de Corrente

A Figura 18 apresenta a magnitude de corrente presente no condutor neutro durante o período de observação. É notável a presença de valores de corrente alto durante a semana. Segundo Aldabó (2001), valores altos de corrente no neutro indicam que a distribuição de cargas no circuito encontra-se desequilibrada. Além disso, a presença da mesma indica aquecimento excessivo na fiação, tensão neutro-terra elevada e aquecimento excessivo e ruídos em transformadores.

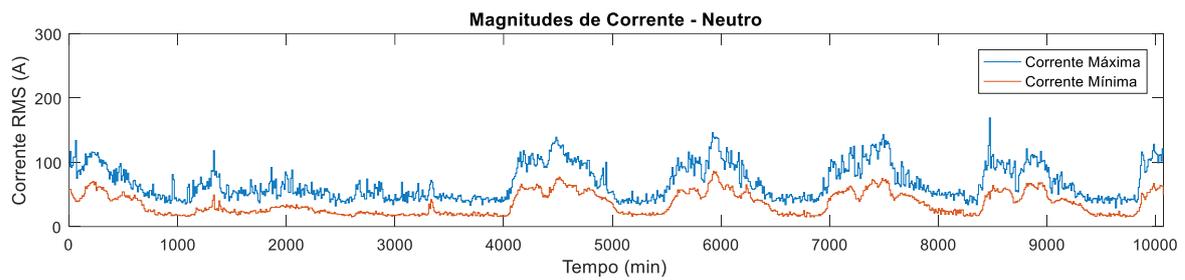


Figura 18 - Curvas de Corrente Máxima e Mínima no Neutro do Circuito da Cabine do Transformador TR1.

Apesar de não ser uma exigência do PRODIST, os valores dos percentis 95% dos indicadores para corrente de seqüências negativa e zero também foram medidos e calculados. A Figura 19 apresenta a assimetria da corrente de seqüência negativa com a corrente de seqüência positiva. Pode-se observar que os valores encontram-se altos durante toda semana.

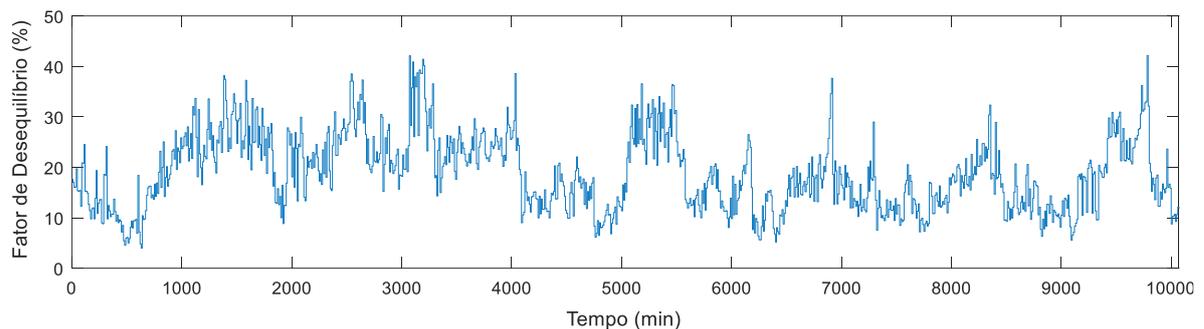


Figura 19 - Fator de Desequilíbrio de Corrente de Seqüência Negativa do Circuito da Cabine do Transformador TR1.

Os indicadores de QEE para o desequilíbrio de corrente encontram-se na Tabela 12. Os percentis 95%, da corrente de seqüência negativa (I_-) e zero (I_0) resultaram em valores altos. O manual do Analisador de Qualidade de Energia (FLUKE, 2012) que segue a norma EN50160 (EUROPEAN...,1999), indica que o limite do indicador para a corrente de seqüência negativa é de 10%. Logo, o valor para esse indicador ultrapassou o limite.

Tabela 12 - Indicadores para Desequilíbrio de Corrente do Transformador TR1

Sequência das fases em relação a I+	Valores dos Indicadores	
	FD95%(%)	Limite dos indicadores (%)
I-	32,169	10
I ₀	20,9226	-*

*Indicador não encontrado em normas referentes a QEE.

O valor do percentil 95% para a corrente de sequência negativa está indicado na curva de probabilidade acumulativa na Figura 20. Pela curva, pode-se obter qualquer valor de desequilíbrio de corrente que excede o tempo de observação em um determinado percentual.

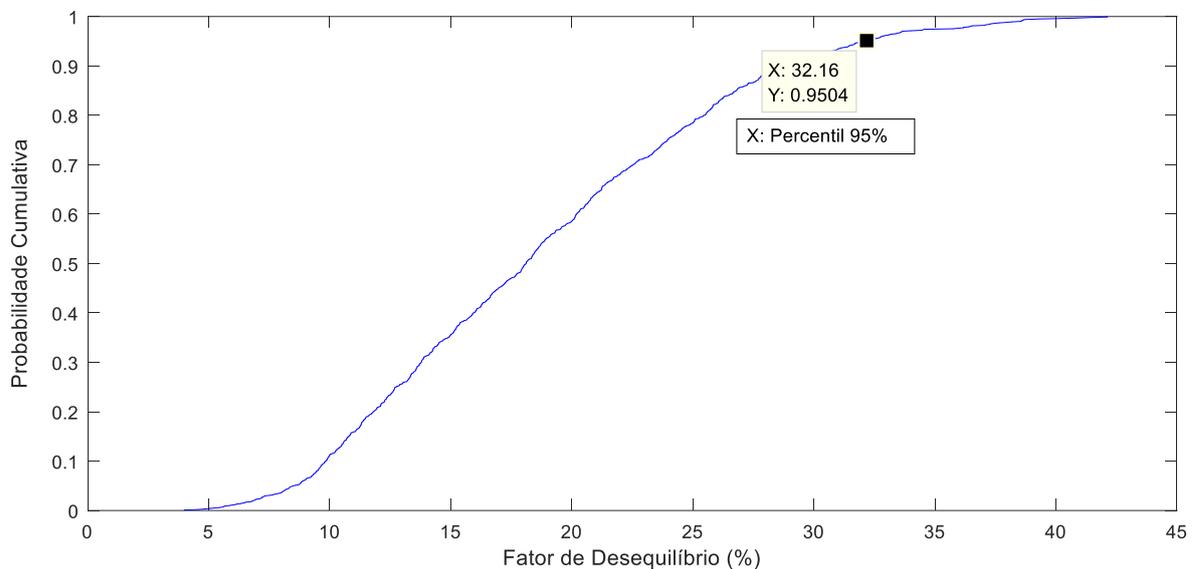


Figura 20 - Curva de Probabilidade Cumulativa do Fator de Desequilíbrio para Corrente de Sequência Negativa do Transformador TR1.

A incidência dos valores do fator de desequilíbrio para corrente de sequência negativa estão demonstrados no histograma da Figura 21. A curva de distribuição acumulada não ficou muito alongada e nem estreita, mostrando que os indicadores apresentam tanto valores próximos quanto longe da mediana durante o período de amostragem.

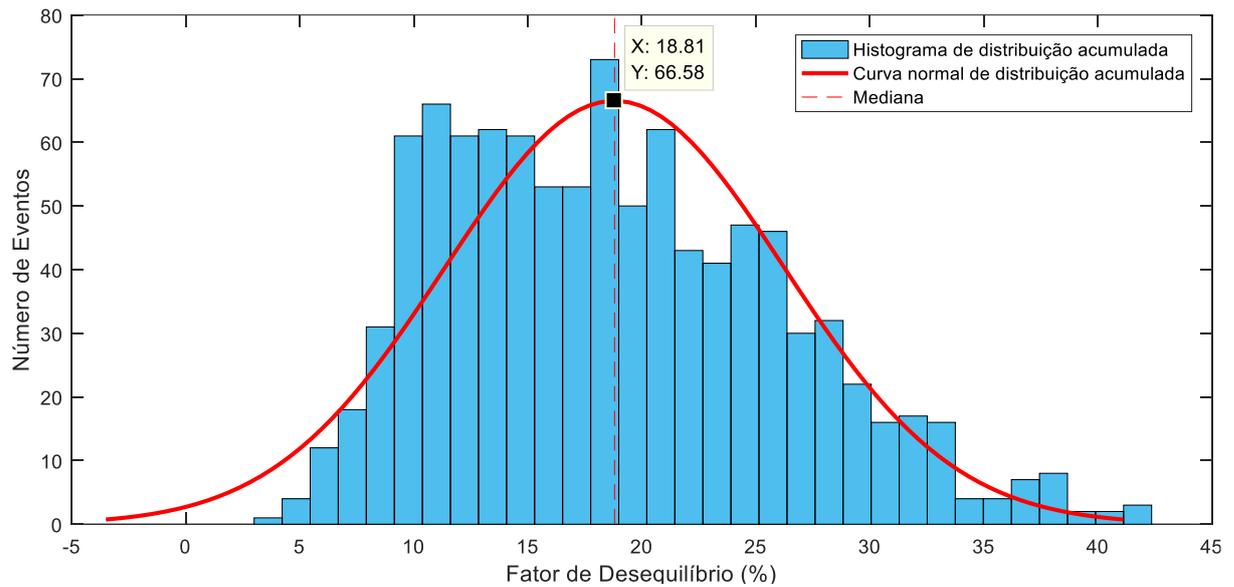


Figura 21 - Histograma e Curva de Distribuição Acumulada do Fator de Desequilíbrio para Corrente de Sequência Negativa do Transformador TR1.

Os dados analisados nessa medição comprovam que o sistema analisado possui desequilíbrios altos de corrente nas fases, e conseqüentemente, corrente no condutor neutro. Durante a pesquisa de campo, um dos relatos indicou que os condutores apresentavam temperaturas excessivas, chegando a derreter o material isolante dos mesmos. Além disso, os painéis estavam superaquecidos e fusíveis queimando de forma anormal.

4.1.4 Distorção Harmônica de Tensão

O indicador de QEE para distorções harmônicas total de tensão encontram-se na Tabela 13. Devido a quantidade de indicadores, os restantes dos índices estão apresentados na Tabela 27 do Apêndice C. Os valores não ultrapassaram os limites estabelecidos pelo PRODIST.

Tabela 13 - Indicador para Distorções Harmônicas Total de Tensão do Transformador TR1

Indicadores de QEE	Valores registrados por fase			
	Fase A	Fase B	Fase C	Limite do indicador (%)
DTT95%	2,25	2,26	2,33	10

4.2 CIRCUITO DO LABORATÓRIO DE SOLDAGEM

A segunda medição foi realizada entre os dias 12/03/2017 até 19/03/2017. As principais cargas conectadas nesse ponto de medição são as máquinas de solda e os fornos tubular. Os dados foram coletados em dias que ocorreram aulas práticas no Laboratório de Soldagem. Dessa forma, é possível verificar se existe alguma influência dessas cargas na QEE do sistema. Os distúrbios analisados nesta medição foram: (I) tensão em regime permanente; (II) distorção harmônica de tensão.

4.2.1 Tensão em Regime Permanente

Durante o período de amostragem, ocorreram 16 eventos de quedas de tensão. Apesar de ser uma parte do sistema com cargas que consomem muita corrente, verificaram-se poucos eventos durante o período de medição. Além disso, eles não ocorreram durante o uso das máquinas de solda.

Em certas horas do período analisado notou-se uma circulação de corrente com grande magnitude nas fases A e B, porém, o mesmo não ocorre com a fase C. Isso pode ser observado na Figura 22. Esse consumo de corrente coincide com os horários do dia em que ocorreram as aulas práticas de soldagem.

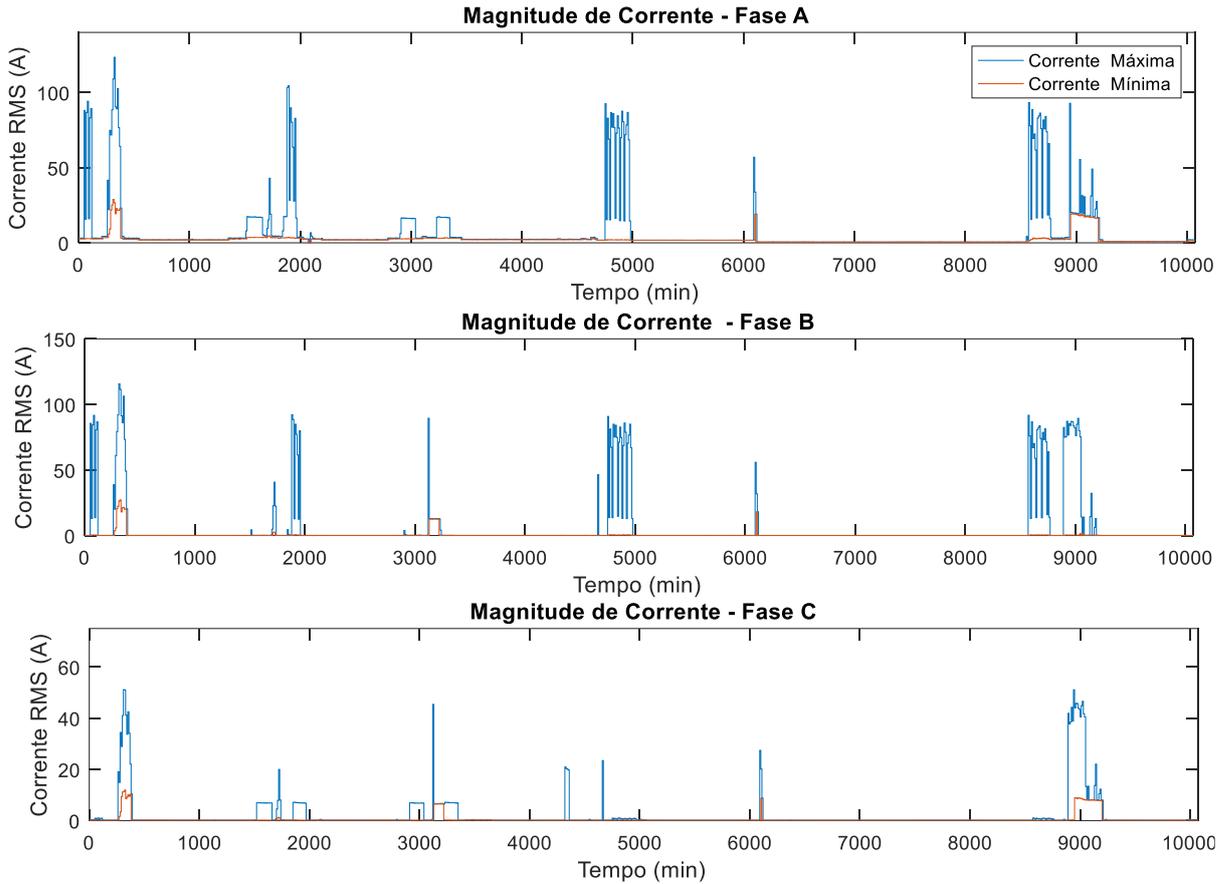


Figura 22 - Curvas de Corrente e Tensão Máxima e Mínima das Fases A, B e C do Circuito de Cargas do Bloco H.

Os valores dos indicadores de QEE calculados por meio dos eventos ocorridos encontram-se dentro dos limites. O indicador DRC foi o que chegou mais perto de ultrapassar o valor estabelecido pelo PRODIST nas três fases. Os indicadores de QEE podem ser vistos na Tabela 14.

Tabela 14 - Indicadores para Tensão em Regime Permanente do Circuito de Cargas do Bloco H (Laboratório de Soldagem)

Indicadores de QEE	Valores registrados por fase			Limite dos indicadores
	Fase a	Fase b	Fase c	
DRP (%)	0,300	0,200	0,200	3
DRC (%)	0,300	0,300	0,300	0,500

4.2.2 Distorção Harmônica de Tensão

Os valores dos indicadores de QEE para distorções harmônicas não ultrapassaram os limites estabelecidos pelo PRODIST. A Tabela 15 apresenta o valor

do indicador de QEE para distorções harmônicas total de tensão das fases. Os valores dos indicadores para distorção harmônica individual de tensão encontram-se na Tabela 28 do Apêndice C.

Tabela 15 - Indicador para Distorções Harmônicas de Tensão do Circuito de Cargas do Bloco H (Laboratório de Soldagem)

Indicadores de QEE	Valores registrados por fase			
	Fase A	Fase B	Fase C	Limite do indicador (%)
DTT95%	2,09	2,07	2,17	10

4.3 CIRCUITO DO LABORATÓRIO DE USINAGEM

A terceira medição foi realizada entre os dias 10/04/2017 até 17/04/2017. As principais cargas conectadas nesse ponto de medição são os tornos de usinagem CNC. Essa medição permite verificar se existe alguma influência dessas cargas na QEE do sistema. Os distúrbios analisados foram: (I) tensão em regime permanente; (II) desequilíbrio de tensão; (III) distorção harmônica de tensão.

4.3.1 Tensão em Regime Permanente

Durante o período de amostragem, ocorreram 11 eventos de quedas de tensão. Os indicadores de QEE para tensão em regime permanente encontram-se dentro dos limites e detalhados na Tabela 16. Na fase A, ocorreu somente 1 evento de tensão precária e de tensão crítica. Para a fase B, foram 3 de tensão crítica e 1 de tensão precária. A fase C teve 3 eventos de tensão precária e 2 de tensão crítica.

Tabela 16 - Indicadores para Tensão em Regime Permanente do Circuito de Cargas do Bloco H (Laboratório de Usinagem)

Indicadores de QEE	Valores registrados por fase			Limite dos indicadores
	Fase A	Fase B	Fase C	
DRP (%)	0,100	0,290	0,290	3
DRC (%)	0,100	0,100	0,190	0,500

4.3.2 Desequilíbrio de Tensão

A assimetria da tensão de sequência negativa com a positiva apresenta picos em alguns horários do dia, com poucas anormalidades durante o tempo de amostragem dos dados. Os dados coletados estão plotados na Figura 23.

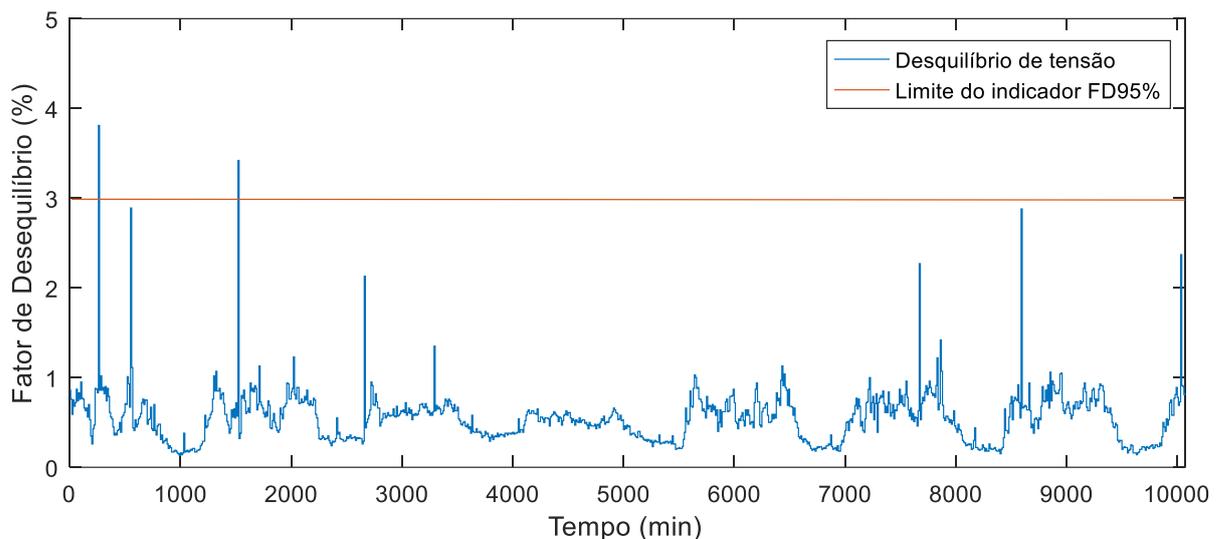


Figura 23 - Indicador de Desequilíbrio de Tensão do Circuito da Cabine do Circuito de Usinagem.

Os indicadores de QEE para o desequilíbrio de tensão são apresentados na Tabela 17. O indicador FD95% da tensão de sequência negativa encontra-se dentro do limite estabelecido pelo PRODIST. O valor do percentil da tensão de sequência zero também foi medido e encontra-se acima do limite de 2%, recomendado pela norma EN50160 (EUROPEAN...,1999).

Tabela 17 - Indicadores para Desequilíbrio de Tensão do Circuito de Cargas do Bloco H (Laboratório de Usinagem)

Sequência das fases em relação a V ₊	Valores dos Indicadores	
	FD95%(%)	Limite dos indicadores (%)
V ₋	0,910	3
V ₀	2,8130	2

O valor do indicador FD95% para a tensão de sequência negativa, está indicado na curva de probabilidade acumulativa na Figura 24. Pela curva, é possível verificar a posição do percentil 95% em relação ao limite de 3% do indicador FD95%

e o restante das observações. Os fatores de desequilíbrio comportam-se de forma linear para valores de abaixo de 1%.

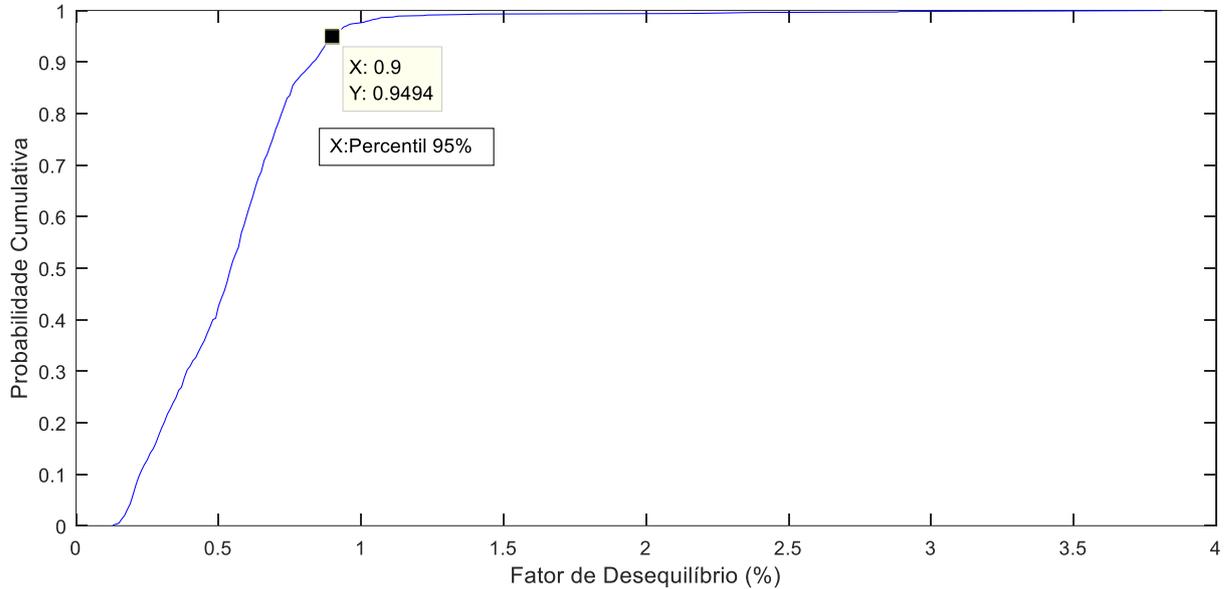


Figura 24 - Curva de Probabilidade Cumulativa do Fator de Desequilíbrio para Corrente de Sequência Negativa.

O histograma da Figura 25 mostra como os fatores de desequilíbrio possuem tendência para assumir valores abaixo de 1%. Algumas ocorrências podem ser notadas acima de 2%. Porém, as maiores incidências das amostras estão nos valores baixos ao redor da mediana, cujo o valor é de 0,5524%.

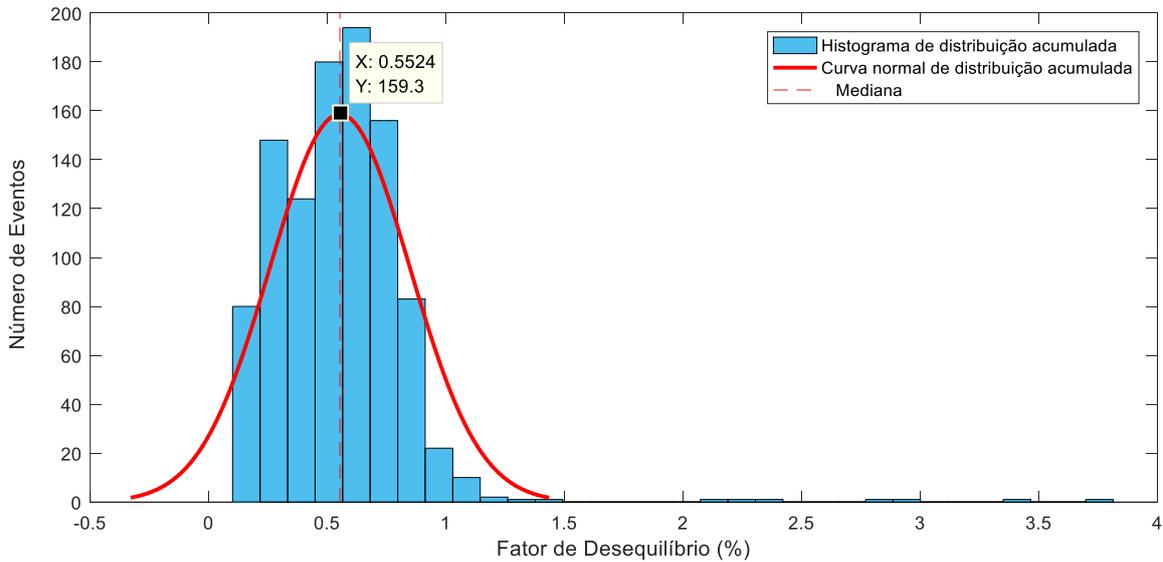


Figura 25 - Histograma e Curva de Distribuição Acumulada do Indicador FD para Corrente de Sequência Negativa.

4.3.3 Distorção Harmônica de Tensão

O indicador de QEE para distorções harmônicas total de tensão para todas as fases podem ser visualizados na Tabela 18. Os valores encontram-se dentro dos limites estabelecido pelo PRODIST. Devido a quantidade de indicadores, os restantes dos índices podem ser encontrados na Tabela 29 do Apêndice C.

Tabela 18 - Indicador para Distorções Harmônicas de Tensão do Circuito de Cargas do Bloco H (Laboratório de Usinagem)

Indicadores de QEE	Valores registrados por fase			
	Fase A	Fase B	Fase C	Limite do indicador (%)
DTT95%	2,41	2,47	2,61	10

4.4 CIRCUITO DO BLOCO J

A medição quatro realizada no laboratório do Bloco J, entre os dias 08/05/2017 até 15/05/2017, teve como objetivo principal analisar a QEE do circuito

que alimenta os computadores do laboratório de CAD. Os distúrbios analisados nessa medição foram: (I) tensão em regime permanente; (II) distorção harmônica de tensão.

4.4.1 Tensão em Regime Permanente

Durante o período de amostragem das fases, ocorreram 52 eventos, sendo eles 51 de quedas e 1 de pico de tensão. Dentre eles, 3 foram na fase A, 45 na fase B e 4 na fase C. Pelo fato da ocorrência de muitos eventos, os valores encontram-se registrados na Tabela 32 do Apêndice D.

Os eventos de quedas de tensão na fase B são predominantes nos horários de pico de energia, durante os dias letivos da semana. Além disso, eles estão acompanhados de aumentos na corrente dos condutores. Esse fato pode ser observado na Figura 26, notadas no período em que o sistema atinge seus maiores valores de corrente. Os dados das fases A e C não foram plotados devido as poucas incidências dos eventos.

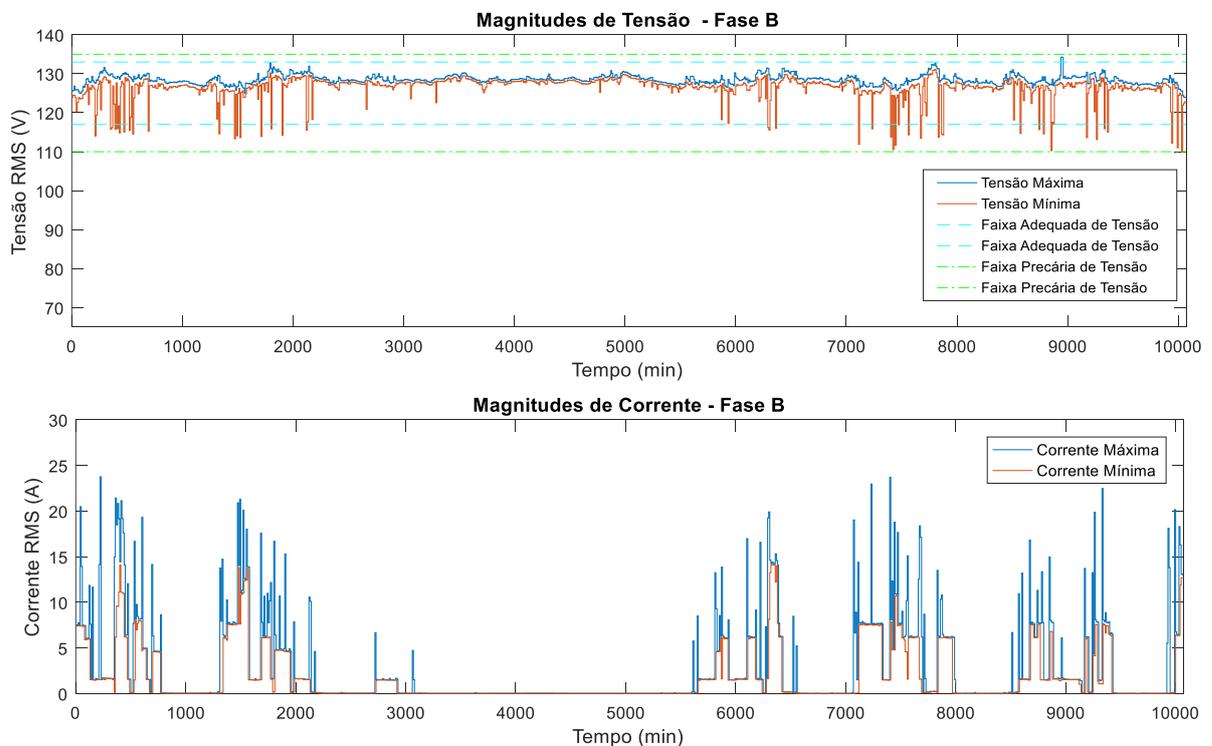


Figura 26 - Curvas de Corrente e Tensão Máxima e Mínima da Fase B do Circuito de Cargas do Bloco J.

Na Tabela 19, encontram-se os valores de tensão e corrente máxima das fases. Pode-se notar que a tensão máxima da fase B encontra-se na faixa de tensão precária tal como o valor mínimo de tensão da fase A. Nota-se, ainda, que a corrente máxima no condutor neutro se encontra com valores próximos aos das fases em condições de carga, chegando a ser 2 vezes maior que o menor valor das correntes de fase. De acordo com EPRICSG (1999), não é recomendável que a corrente no condutor neutro exceda 1,7 vezes a magnitude de corrente da maior fase. Esse fato também pode ser observado na Figura 27.

Tabela 19 - Medição de Tensão e Corrente Máximas e Mínimas do Circuito de Cargas do Bloco J

Eventos	Valores registrados por fase			
	Fase A	Fase B	Fase C	Neutro
Valor Máximo de Tensão (V)	131,870	134,250	131,330	8,750
Valor Mínimo de Tensão (V)	101,700	109,910	109,330	0,090
Valor Máximo de Corrente (A)	65,500	23,750	31,440	64,400
Valor Mínimo de Corrente (A)	0,110	0,030	0,130	0,230

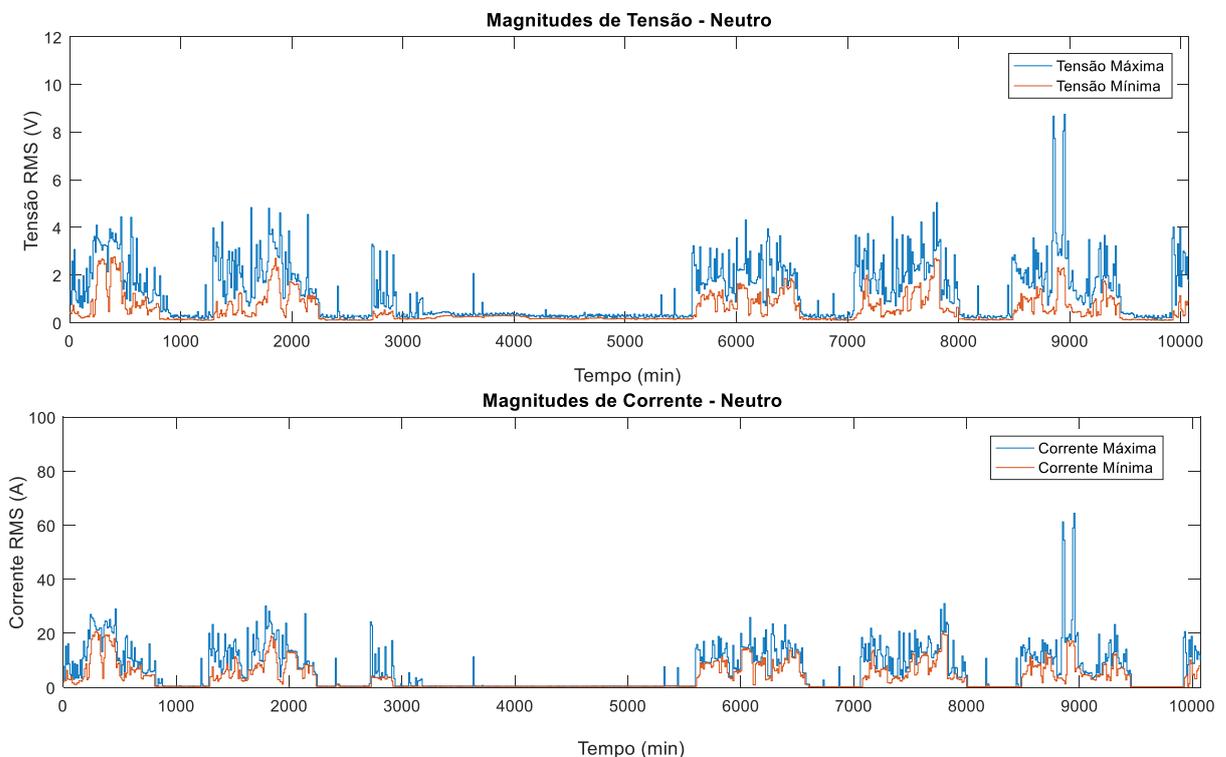


Figura 27 - Curvas de Corrente e Tensão Máxima e Mínima do Neutro do Circuito de Cargas do Bloco J.

De acordo com a quantidade de eventos ocorridos, pode-se obter os indicadores de QEE para tensão em regime permanente, apresentados na Tabela 20. Para as fases A e C, o indicador DRP manteve-se abaixo do indicado. Porém, na fase B, o valor ultrapassou o limite estabelecido pelo PRODIST de 3%. Para todas as fases, os valores do indicador DRC permaneceram dentro do limite.

Tabela 20 - Indicadores para Tensão em Regime Permanente do Circuito de Cargas do Bloco J

Indicadores de QEE	Valores registrados por fase			Limite dos indicadores
	Fase A	Fase B	Fase C	
DRP (%)	0,300	4,460	0,400	3
DRC (%)	0,200	0,100	0,200	0,500

O circuito de cargas do bloco J não possui uma QEE para tensão em regime permanente pois o indicador DRP indica um sistema elétrico inadequado. Além disso, equipamentos sensíveis a esse distúrbio, tais como computadores e impressoras, estão conectadas ao mesmo e podendo sofrer danos. De acordo com Aldabó (2001) e EPRI (2003), essas cargas são sensíveis a esse tipo de distúrbio, causando falha em componentes eletrônicos, apagamento de memória ou instruções de programas, erros de paridade, entre outros.

Para evitar esse tipo de problemas é recomendável realizar uma verificação no dimensionamento da instalação elétrica. Além disso, verificar quais as cargas que estão sendo utilizadas nos horários em que ocorrem quedas de tensão, pois as instalações do bloco H, nas quais estão conectadas cargas que drenam corrente como máquinas de soldas, estão próximas das instalações do bloco I.

4.4.2 Distorção Harmônica de Tensão

Na Tabela 21, está apresentado o indicador de QEE para distorções harmônicas total de tensão para as fases A, B e C. Devido a quantidade de indicadores que avaliam níveis de distorções harmônicas, os restantes dos índices estão apresentados na Tabela 29 do Apêndice C. Os valores não ultrapassaram os limites estabelecidos pelo PRODIST.

Tabela 21 - Indicador para Distorções Harmônicas de Tensão do Circuito de Cargas do Bloco J

Indicadores de QEE	Valores registrados por fase			Limite do indicador (%)
	Fase A	Fase B	Fase C	
DTT95%	2,47	2,64	2,63	10

4.5 CIRCUITO DO BLOCO I

A quinta medição foi realizada entre os dias 17/11/2016 até 23/11/2016. Os distúrbios analisados nessa medição foram: (I) tensão em regime permanente; (II) distorção harmônica de tensão. A medição realizada no laboratório do Bloco I teve como objetivo principal analisar a QEE do circuito que alimenta os computadores do laboratório de eletrônica, juntamente com aparelhos de ar condicionado e cargas indutivas.

4.5.1 Tensão em Regime Permanente

Durante o tempo de medição, foi possível registrar a ocorrência de 12 eventos de queda de tensão, nos quais 9 encontraram-se na faixa de tensão precária e 3 na faixa de tensão crítica. Esses eventos não interferem na QEE devido as suas poucas incidências. A Figura 28 apresenta os valores de tensão e corrente no condutor neutro. É possível notar a presença excessiva em alguns horários do dia durante os dias letivos. De acordo com Aldabó (2001), correntes no neutro aumentam a tensão neutro-terra. Esse efeito pode ser prejudicial as cargas conectadas nesse circuito. Tomando como exemplo, computadores e redes de dados que operam com níveis baixos de tensão (em torno de ± 5 volts) e utilizam o terra como referência para suas operações, causando falhas em componentes eletrônicos, apagamento de memória, erros de paridade, entre outros.

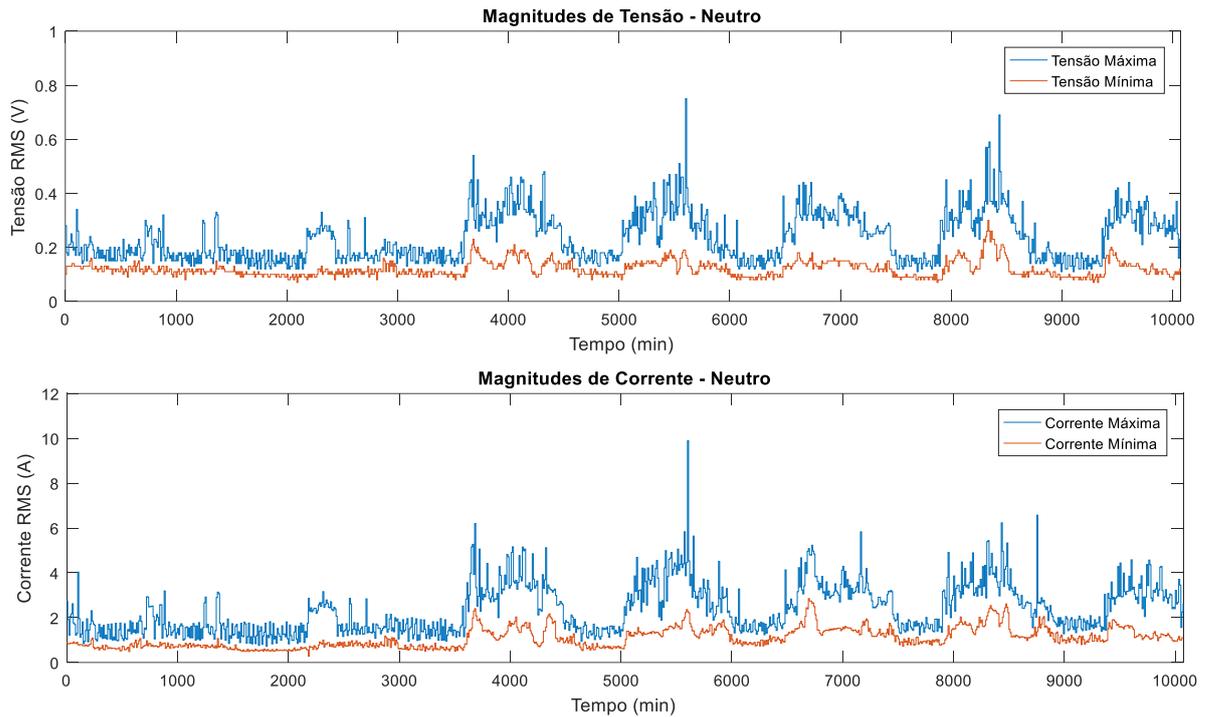


Figura 28 - Curvas de Corrente e Tensão Máxima e Mínima do Neutro do Bloco I.

Na Tabela 22 estão calculados os valores dos indicadores de QEE para tensão em regime permanente. Para as fases A, B e C, o indicador DRP e DRC manteve-se dentro dos limites estabelecidos pelo PRODIST.

Tabela 22 - Indicadores para Tensão em Regime Permanente do Circuito de Cargas do Bloco I

Indicadores de QEE	Valores registrados por fase			Limite dos indicadores
	Fase A	Fase B	Fase C	
DRP (%)	0,400	0,500	0,300	3
DRC (%)	0,100	0,100	0,100	0,500

4.1.2 Distorção Harmônica de Tensão

O indicador de QEE para distorções harmônicas total de tensão, para as fases A, B e C, encontram-se na Tabela 23. Os indicadores de distorção harmônica individual de tensão de todas as fases encontram-se na Tabela 31 do Apêndice C. Os valores não ultrapassaram os limites estabelecidos pelo PRODIST.

Tabela 23 - Indicador para Distorções Harmônicas de Tensão do Circuito de Cargas do Bloco I

Indicadores de QEE	Valores registrados por fase			
	Fase A	Fase B	Fase C	Limite do indicador (%)
DTT95%	2,72	2,75	2,60	10

4.6 CIRCUITO DE ILUMINAÇÃO DO BLOCO I

A medição em questão foi realizada entre os dias 17/11/2016 até 24/11/2017 para analisar o efeito da flutuação de tensão (*flicker*) do sistema elétrico que alimenta aproximadamente 100 reatores de luminárias do bloco I. Durante o período de medição, os maiores valores registrados das grandezas P_{st} e P_{lt} foram 3,576 p.u. e 1,953 p.u., respectivamente. A fase B foi a que apresentou os maiores índices e seus valores podem ser observados na Figura 29. Os restantes das fases não foram plotados devido a poucas incidências dos valores de severidade de flutuação de tensão.

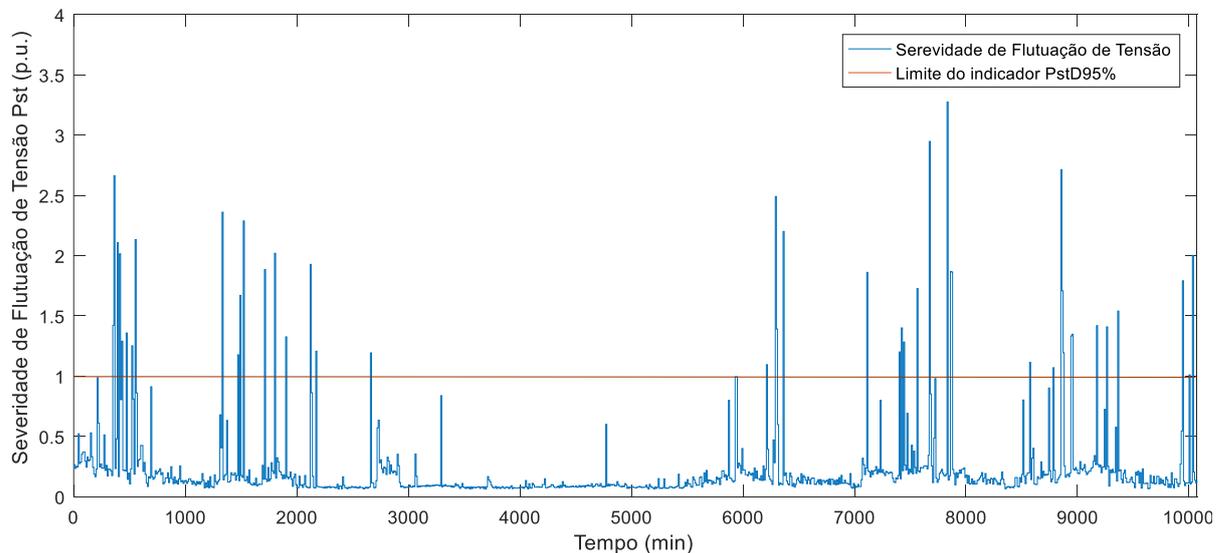


Figura 29 - Indicador de Severidade de Flutuação de Tensão de Curta Duração da Fase B do Circuito de Iluminação do Bloco I.

Os valores das grandezas P_{st} e P_{lt} , que foram superados em apenas 5% das 1008 leituras válidas, estão demonstrados na Tabela 24. O indicador $P_{stD95\%}$ da fase B chegou próximo de ultrapassar o limite de 1 p.u., estabelecido pelo PRODIST.

Já o indicador $P_{ItS95\%}$ da mesma fase ultrapassou o limite de 0,650 p.u, estabelecido pela norma IEC 61000-3-3.

Tabela 24 - Indicadores para Flutuação de Tensão do Circuito de Iluminação do Bloco I

Indicadores de QEE	Valores registrados por fase			Limites dos indicadores
	Fase A	Fase B	Fase C	
$P_{stD95\%}$	0,373	0,862	0,330	1
$P_{ItS95\%}$	0,616	1,155	0,453	0,650

A curva da probabilidade cumulativa da Figura 30 indica qualquer valor de nível de flicker com ocorrência que excede o tempo de observação em um determinado percentual. O percentil de 95% da fase B para P_{st} pode ser observado na curva. Pelo gráfico, pode ser analisado que pequenos valores de P_{st} estão concentrados nos percentis mais baixos, apesar de apresentarem alguns valores altos nos percentis acima de 95%.

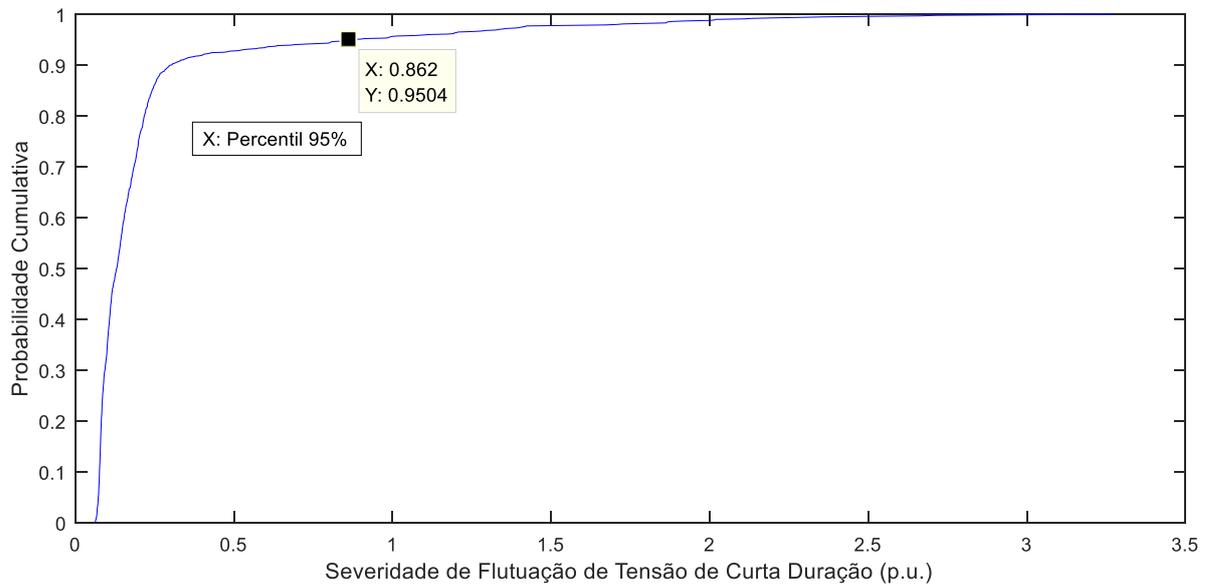


Figura 30 - Curva de Probabilidade Cumulativa da Fase B do Indicador P_{st} .

Dessa forma, os indicadores de P_{st} possuem tendência para valores abaixo de 0,5 p.u. e distribuídos de forma equilibrada ao redor da mediana. Esse fato pode ser melhor visualizado no histograma da Figura 31. Para ilustrar: as maiores ocorrências durante o tempo de observação ocorreram entre 0 e 0,5 p.u..

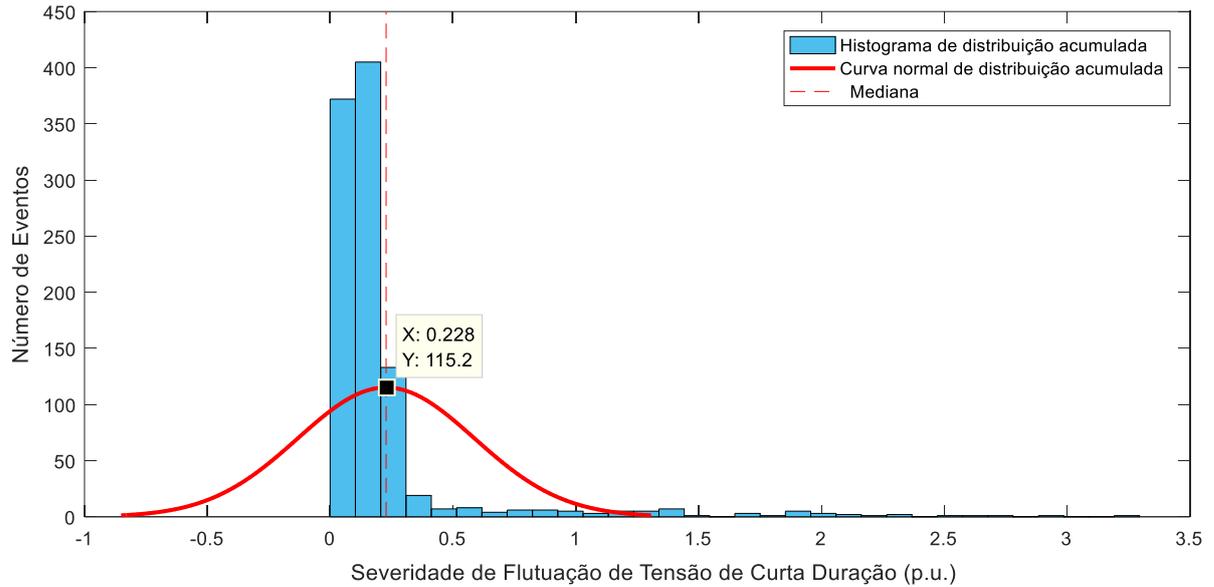


Figura 31 - Histograma e Curva de Distribuição Acumulada do Indicador P_{st} da Fase B.

A curva de probabilidade cumulativa do indicador P_{lt} da fase B apresenta a distribuição dos percentis de forma mais linear. Os valores próximos de 0,65 p.u. excedem aproximadamente 70% do período de observação. O $P_{lt95\%}$ pode ser observado na Figura 32, indicando que ultrapassou o limite de 0,65 p.u..

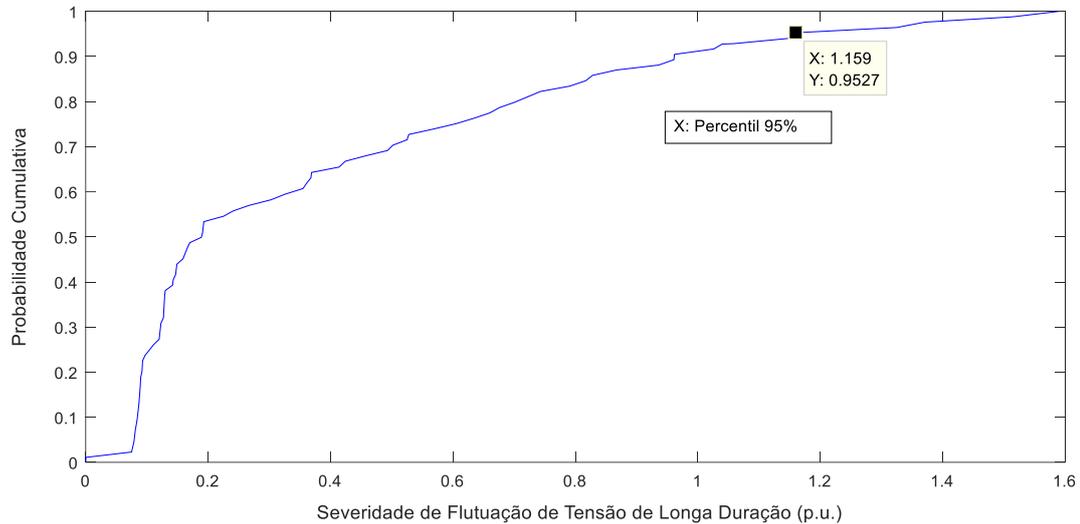


Figura 32 - Curva de Probabilidade Cumulativa da Fase B do Indicador P_{lt} .

A incidência dos valores de P_{lt} da fase B estão melhores distribuídos durante o período de amostragem. Apesar dos valores se concentrarem entre 0 e 0,5 p.u., uma incidência considerável ocorre acima desse intervalo. Dessa forma, a curva

de distribuição acumulada fica mais alongada e se distanciando da mediana devido as amostras estarem mais dispersas.

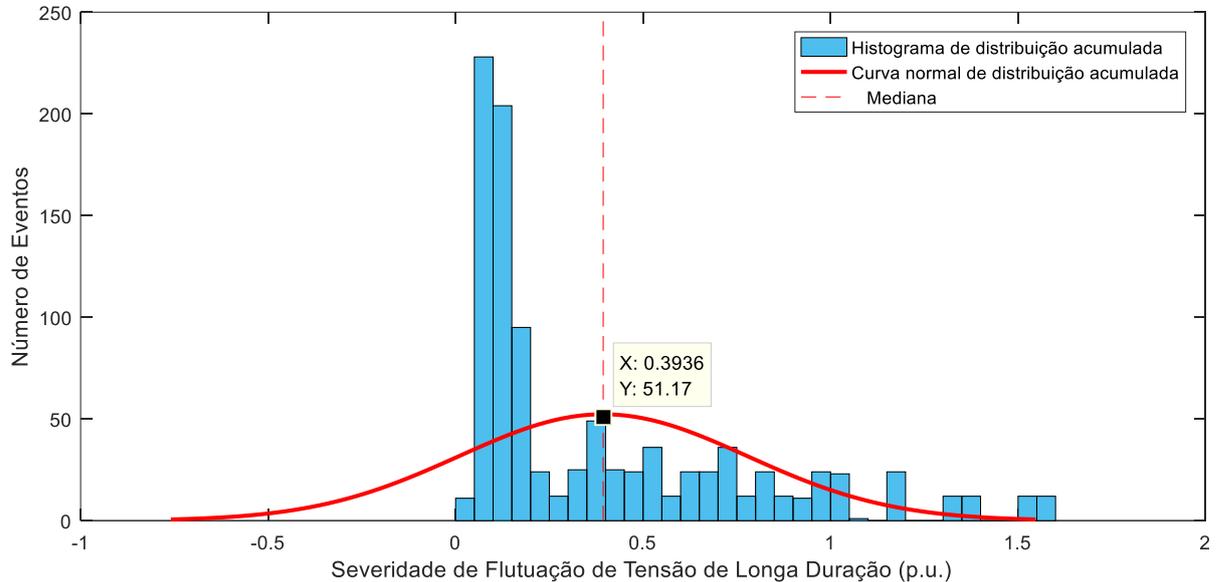


Figura 33 - Histograma e Curva de Distribuição Acumulada do Indicador P_{st} da Fase B.

Os dados analisados comprovam que ocorre cintilação luminosa no circuito de iluminação do bloco I. Conforme Martins *et al.* (2003), isso acontece devido a variações intermitentes de certas cargas, causando flutuações nas tensões de alimentação e conseqüentemente, oscilações na intensidade da luminosa. De acordo com Colnago *et al.* (2013), tal conseqüência, pode causar desconforto visual as disfunções neurológicas. Além disso, podem ocorrer dores de cabeça, estresse mental, perda de concentração e cansaço visual.

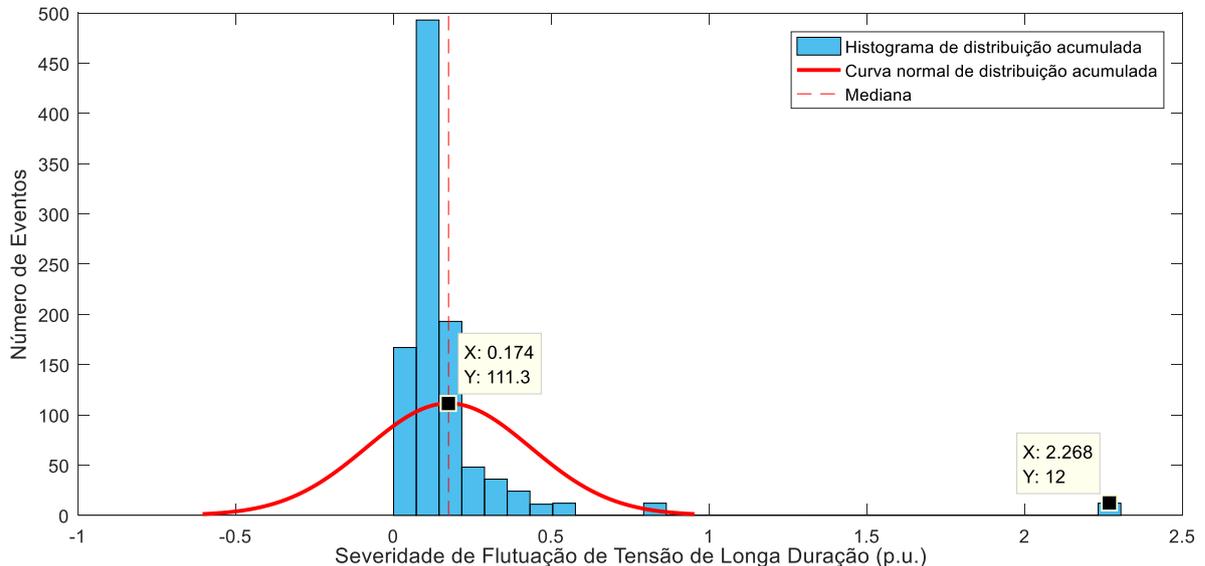
4.7 CIRCUITO DE ILUMINAÇÃO DO BLOCO H

A análise realizada no bloco H, nos dias 17/11/2016 09:01 à 24/11/2017, teve como objetivo monitorar a flutuação de tensão do circuito de 130 luminárias. Os resultados se encontram detalhados na Tabela 25. Os indicadores de QEE $P_{stD95\%}$ e $P_{ItS95\%}$ estão dentro do limite estabelecido pelas normas.

Tabela 25 - Indicadores para Flutuação de Tensão do Circuito de Iluminação do Bloco H

Indicadores de QEE	Valores registrados por fase			Limites dos indicadores
	Fase A	Fase B	Fase C	
$P_{stD95\%}$	0,211	0,284	0,318	1
$P_{ItS95\%}$	0,436	0,407	0,410	0,650

As medições que mais se aproximaram dos limites dos indicadores foram das fases A e C para P_{It} e P_{st} , respectivamente. Na Figura 34 pode se observar que o valor para o indicador P_{It} teve maiores incidências entre 0 e 0,5 p.u., com poucas acima deste intervalo.

**Figura 34 - Histograma e Curva de Distribuição Acumulada de P_{It} para Fase A.**

A curva de distribuição acumulada na Figura 35 da fase C está mais acentuada devido aos valores se encontrarem próximos da mediana, ao contrário da curva da fase A da Figura 34, em que os valores se encontram mais distribuídos. É devido a isso que o percentil $P_{ItS95\%}$ apresentou valor maior que o $P_{stD95\%}$.

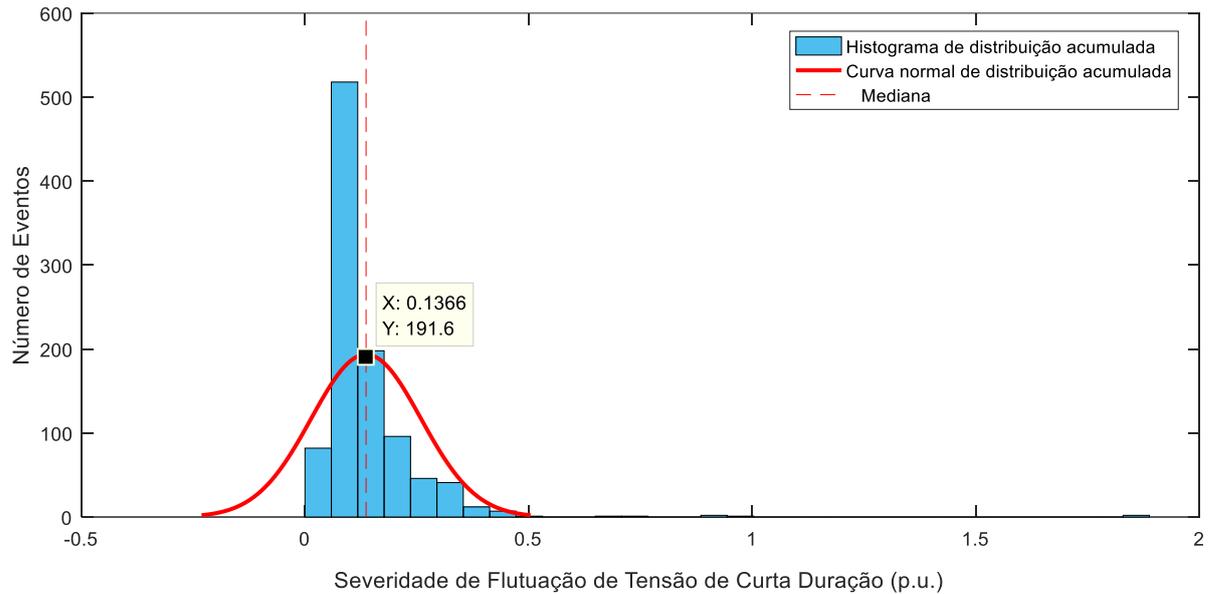


Figura 35 - Histograma e Curva de Distribuição Acumulada de P_{st} para a Fase C.

4.8 CIRCUITO DE ILUMINAÇÃO DO BLOCO J

Durante o período de amostragem no circuito de iluminação do bloco J, entre os dias 17/11/2016 à 24/11/2017, foram observados aproximadamente 160 reatores com luminárias fluorescentes. Os percentis de cada fase estão demonstrados na Tabela 26. Apesar de não terem ultrapassado os limites dos indicadores de QEE, o indicador $P_{ItS95\%}$ chegou próximo ao limite de 0,65 p.u., estabelecido pela norma IEC 61000-3-3.

Tabela 26 - Indicadores para Flutuação de Tensão do Circuito de Iluminação do Bloco J

Indicadores de QEE	Valores registrados por fase			Limites dos indicadores
	Fase A	Fase B	Fase C	
$P_{stD95\%}$	0,231	0,370	0,320	1
$P_{ItS95\%}$	0,415	0,520	0,494	0,650

A análise do histograma da Figura 36, percebe-se que a maior incidência ocorre no intervalo onde compreende o valor de 0,21 p.u. Alguns valores se encontram ao redor de 0,63 e 1,05 p.u. Além disso, houve ocorrências de valores altos por um período curto de tempo. Devido a isso, os dados encontram-se dispersos na curva de distribuição acumulada e se afastando da mediana.

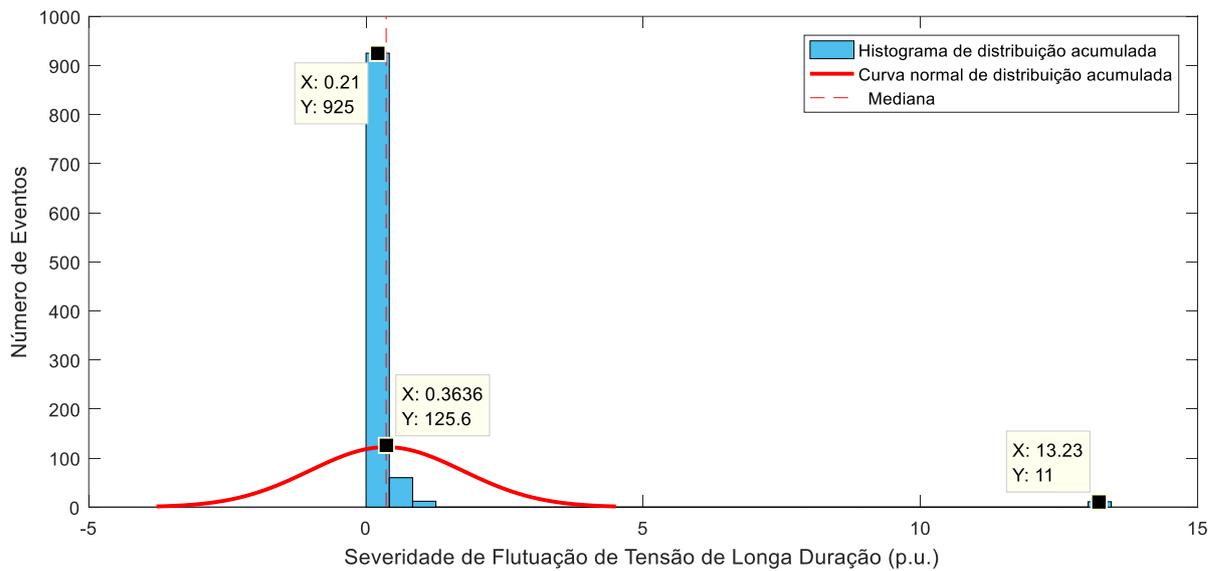


Figura 36 - Histograma e Curva de Distribuição Acumulada do Indicador P_{It} da Fase B.

4.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao monitorar o sistema, é possível notar a alteração da tensão quando a corrente se eleva. Conforme o manual de operação do Analisador de Qualidade de Energia (FLUKE, 2012), quando ocorre esse fenômeno é possível afirmar que o motivo da queda de tensão encontra-se dentro do sistema. Esse fenômeno é chamado de *downstream*, caso contrário, ocorre um *upstream*, ou seja, se a tensão e a corrente caírem ao mesmo tempo, significa dizer que o motivo está fora do sistema elétrico analisado.

A presença de picos de corrente seguido de quedas de tensão nas medições realizadas no Bloco I e J indicam que, nos horários dessas ocorrências, estão sendo utilizadas cargas que exigem correntes elevadas. Essas cargas podem ser motores de potência elevada ou máquinas de solda. Essa alteração da tensão pode indicar um sistema de distribuição de energia deficiente. As ocorrências de muitas quedas de tensão na instalação elétrica dos computadores podem ocasionar danos aos mesmos por serem cargas sensíveis (EPRI, 1999).

A EPRI apresentou um estudo de caso de uma escola que tinha problemas de QEE. A escola solicitou que a concessionária local ajudasse a determinar por que alguns dos computadores do laboratório de informática estavam sendo danificados.

Em resposta a esse pedido, um engenheiro de QEE realizou uma análise parcial na fiação e aterramento do sistema elétrico do laboratório de informática (EPRI, 2003).

A recomendação do engenheiro após a análise foi não utilizar neutros compartilhados em circuitos elétricos que possuem cargas sensíveis. As sugestões servem para melhorar a proteção e desempenho dos equipamentos e serve para eliminar a adição de corrente no condutor neutro (EPRI, 2003). Conforme EPRI (1999), é recomendável que a corrente no condutor neutro não exceda 1,7 vezes a magnitude de corrente da maior fase. Apesar da análise realizada nos ambientes da universidade não apresentarem esse fato, é preocupante notar o aumento da corrente no condutor neutro nas medições realizadas no Laboratório de CAD do bloco J, registradas na Tabela 19 da subseção 4.4.1.

O aumento de corrente no neutro pode ser resultado de cargas não-lineares no sistema elétrico. Segundo teste realizado pela *Power Electronics Application Center*, uma adição de cargas não-lineares em um circuito elétrico com cargas lineares resulta no aumento de corrente no neutro (EPRI, 1999).

Devido a isso, é recomendável a utilização de neutros separados para amenizar os problemas relatados na pesquisa de campo com as cargas consideradas sensíveis. Ainda, é necessário realizar uma distribuição de cargas mais eficiente no circuito energizado pelo transformador TR1. Esse procedimento irá diminuir os desequilíbrios das correntes de fase e, conseqüentemente, a adição de corrente no condutor neutro.

Uma revisão em toda a fiação na instalação elétrica dos circuitos analisados também é necessária. Em alguns casos, a solução para um problema na QEE é simplesmente apertar uma conexão solta ou substituir um condutor corroído. Ainda, seria aconselhável verificar a impedância do sistema e a situação atual do circuito de aterramento.

5 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi realizar uma análise de QEE no sistema elétrico da UTFPR-PB. Dessa forma, o mesmo foi monitorado e a qualidade da energia elétrica foi classificada conforme as normas brasileiras estabelecidas pelo PRODIST. Além disso, o uso de normas complementares foi necessário para realizar uma análise completada da situação atual das instalações do sistema elétrico.

A metodologia aplicada foi baseada teoricamente em acervos do EPRI, sendo adotado etapas que incluí o uso de uma pesquisa de campo e um planejamento adequado das medições. Essas etapas foram essenciais para a definição dos distúrbios a serem monitorados e os locais de medições, mostrando ser eficaz e podendo ser aplicada a qualquer sistema elétrico que apresente sintomas de ocorrência dos distúrbios de energia. O planejamento das medições e a pesquisa de campo mostraram ser eficientes na seleção dos distúrbios escolhidos para serem monitorados por evidenciarem a presença deles.

Com base nas análises realizadas das medições coletadas nos circuitos e pesquisa de campo, foi possível notar as presenças de: afundamentos de tensão (*sags*) no circuito do bloco J, desequilíbrios de tensão no circuito do bloco H, desequilíbrios de tensão no circuito alimentado pelo transformador TR1 e flutuação de tensão no circuito de iluminação do bloco I. Além disso, a presença de altos valores de corrente e tensão no condutor neutro e o aquecimento da fiação e de painéis de distribuição de energia, consequências da presença de distúrbios de energia.

Contudo, após a análise dos resultados obtidos, é recomendável a utilização de neutros compartilhados em circuitos que possuem cargas consideradas sensíveis (computares, impressoras, etc.), verificar a impedância do sistema, realizar uma distribuição de cargas de modo adequado para equilibrar as correntes no condutor neutro e uma revisão em toda fiação elétrica, principalmente no circuito do sistema de aterramento.

Devido as medições terem sido realizadas somente nos blocos H, I, J e transformador TR1, é recomendável a realização de uma análise de QEE no restante do campus da UTFPR-PR. Desse modo, é possível realizar essa análise em um cenário que possui outros tipos de cargas e em instalações elétricas com característica diferentes.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST**. Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica. ANEEL. [S.l.]. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR IEC 61000-4-30: Compatibilidade eletromagnética Parte 4-30: Técnicas de medição e ensaio - Métodos de medição de qualidade da energia - Rio de Janeiro, 2011.

ALDABÓ, R. **Qualidade na energia elétrica**. São Paulo: Artliber, 2001. 252 p. ISBN 85-88098-02-4.

BARAN, M. E. et al. Effects of power disturbances on computer systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 13, n. 4, p. 1309–1315, 1998.

BOLLEN, Math H. J.; GU, Irene Yu-Hua. Signal processing of power quality disturbances. Piscataway, NJ: Hoboken, N. J.: c2006. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/bkabstractplus.jsp?bkn=5224658>>. Acesso em: 20 nov. 2017.

COLNAGO, G. P.; MACEDO JR, J. R.; DE FREITAS VIEIRA, J. L.. **Análise dos Efeitos da Flutuação de Tensão sobre Lâmpadas por Medição Luminosa Direta**. In: X Conf. Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica. 2013.

CORRÊA, F. I. M. **Estudo de um Sistema de Distribuição com Enfoque na Qualidade da Energia Elétrica**. [S.l.] Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 2007.

DELMONT FILHO, O.. **Um Algoritmo para Detecção, Localização e Classificação de Distúrbios na Qualidade da Energia Elétrica Utilizando a Transformada Wavelet**. 2007. Tese - [s.n.], São Carlos - SP, 2007.

DORR, D. S. *et al.* Interpreting recent power quality surveys to define the electrical environment. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 33, n. 6, p. 1480–1487, 1997.

DUGAN, R. C. *et al.* **Electrical Power Systems Quality** - McGraw-Hill, Second Edition, New York, 2002, page 1.

EPRI. **Understanding Premium Power Grades**. California, 2000.

EPRI. **Power Quality Investigation Methodology and Sensitivity Analysis**. Palo Alto, CA, 2001.

EPRI. **Voltage Sag Prediction Model Using Distribution Power Quality Phase II Data**. 2003a.

EPRI. Case Study: Schools - CPU damage (2003b). Disponível em: <<https://www.epri.com/#/pages/product/1017417/>>. Acesso em: 18 jan. 2017.

EPRI. Analysis of Power Quality Concerns at a County High School. (2006).

EPRI. Can High Harmonic Currents Cause Fuses to Blow ? (2009) Disponível em: <<https://www.epri.com/#/pages/product/00000000001018811/>>. Acesso em: 6 nov. 2017.

EPRI. **About EPRI** (2017). Disponível em:<<https://www.epri.com/#/about/epri>>. Acesso em: 05 nov. 2017.

EPRICSG, I. (1999). Power Quality Applications Guide for Architects and Engineers. California. Disponível em: <<https://www.epri.com/#/pages/product/TR-113874/>>. Acesso em:17 jan. 2017.

EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, EN 50160. CENELEC, Brussels, Belgium - Novembro,1999.

FLUKE. **Fluke 434-II/435-II/437-II Analisadores de Qualidade de Potência e Energia Trifásicos** (2012). Disponível em: http://assets.fluke.com/manuals/F430-II_umpor0100.pdf . Acesso em: 15 mar. 2016.

HADDAD, J. **Energia Elétrica: Conceitos, Qualidade E Tarifação**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Energ_Elet_Conceitos_Qualid_Tarif_Eletr_Procel-04.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2016.

IEEE **Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**. (1995). Inst. of Elect. & Electronic, ISBN: 1559375493.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION et al. IEC 61000-4-15. Flickermeter-Functional and design specifications (11/1997), 1997.

MANITO, A. R. A.. **Análise da qualidade da tensão no ponto de conexão de uma fábrica de alumínio com o sistema interligado nacional**. 2009. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2009. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

MARAFÃO, F. P.; DECKMANN, S. M.; PAREDES, H. K. M. The Influence of Voltage Referential in Power Quality Indices Evaluation. **IEEE Latin America Transactions**, v. 6, n. 1, p. 81–88, mar. 2008.

MARTINS, J. S.; COUTO, C.; AFONSO, J. L. **Qualidade de energia eléctrica: 3º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia – CLME'2003 Engenharia e Inovação para o Desenvolvimento**, p. 219–231, 2003.

MEHL, E. L. M. Qualidade da Energia Elétrica. **Curso de Pós-Graduação em Energia Elétrica**, p. 1–8, 1996.

MICHAELS, K. M. Sensible approaches to diagnosing power quality problems. Proceedings of 1996 IAS Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference. **Anais...** . v. 33, p.109–115, 1997. IEEE. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/533944/>>.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C.; HUBELE, Norma Faris. **Estatística aplicada à engenharia**. 2. ed. São Paulo: LTC, c2004. xiii, 335 p. ISBN 8521613989.

RAVAGNANI, L. L.. Sistemas híbridos para mitigação de harmônicos: modelagem e estudos experimentais. 2008. xii, 146 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2008.

SANTOS, F. M. F. DOS. Qualidade De Energia–Comparação Das Normas Iec 61000-3-2 E Ieee 519. **Monografias.Poli.Ufrj.Br**, 2007. Disponível em: <<http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10000459.pdf>>. .

VASCONCELLOS, A. B. et al. Energy efficiency and harmonic distortion in automation of air conditioning. 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). **Anais...IEEE**, maio 2014. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6842760>.

WITTE, Robert S.; WITTE, John S. Estatística. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, c2005. xv, 486 p. ISBN 8521614411.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO INVESTIGATIVO E RELACIONADO A ANÁLISE DE QEE

QUESTIONÁRIO SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA (“walk-through”)

Questionário referente a situação do sistema elétrico da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco, com a finalidade de obter informações dos equipamentos conectados ao mesmo para complementar o trabalho de conclusão de curso titulado como Análise da qualidade de energia do sistema elétrico da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Pato Branco.

Questão 1.

Os laboratórios do seu setor possuem ar condicionados? Se sim, quando eles ou outros tipos de equipamentos de elevada potência são ligados, você sente alguma perturbação em algum outro equipamento que já estava ligado?

Questão 2.

Houve alguma reclamação dos acadêmicos de equipamentos que estavam realizando análises erradas ou operando de forma anormal?

Questão 3.

Já presenciaram cintilação de monitores ou luminárias durante o período em que estavam nos laboratórios? Sentem estabilizadores de tensão entrando em operação quando ligam ar condicionados?

Questão 4.

Descreva aqui quaisquer tipos de problemas que você já presenciou nos laboratórios referente a eletricidade (queima de algum equipamento, aparelho que libera descarga elétrica, disjuntor que caiu e ficou sem eletricidade, etc.).

Questão 5.

Os teclados dos computadores queimam ou param de funcionar teclas com muita frequência?

Questão 6.

Que tipo de equipamento está tendo problemas e qual é a sensibilidade do dispositivo?

APÊNDICE B – SCRIPTS DO MATLAB PARA CLASSIFICAÇÃO DOS DISTÚRBIOS DE ENERGIA

B.1 TENSÃO EM REGIME PERMANENTE

```

%% Define os tempos em minutos de 10 em 10 até 168 horas

t=0:10:10070;

%% Definição dos limites para os indicadores de QEE de Sags e Swells

%limites auxiliares
lim1 = ones(1,1008)';

%Limites para sags e swells
TR=127*lim1;%Tensão de Referência (TR);

FAD=[133*lim1 117*lim1];%Faixa Adequada de Tensão (TR - DADINF, TR +
DADSUP);
%FADmin=117*lim1;

FPT=[135*lim1 110*lim1]; %Faixas Críticas de Tensão (>TR + DADSUP + DPRSUP
ou <TR - DADINF - DPRINF). Faixas Precárias de Tensão (TR + DADSUP, TR +
DADSUP + DPRSUP ou TR - DADINF - DPRINF, TR -DADINF);

%Sags e Swells para a fase A (Aplicável para fase A, B ou C)

Fav= [TensodeMeioCicloVRMSL1NMx,TensodeMeioCicloVRMSL1NMn];
figure(1)
subplot(2,1,1)
stairs(t,Fav);
hold on
plot(t,FAD,'c--');
plot(t,FPT,'g-.');
title('Magnitudes de Afundamentos e Aumentos de Tensão - Fase a');
axis([0 10071 65 140])
legend({'Tensão Máxima','Tensão Mínima','Faixa Adequada de Tensão', 'Faixa
Adequada de Tensão','Faixa Precária de Tensão*','Faixa Precária de
Tensão*'},'FontSize',8);
xlabel('Tempo (m)');
ylabel('Tensão (V)');
Fac= [CorrentedeMeioCicloARMSL1Mx,CorrentedeMeioCicloARMSL1Mn];
subplot(2,1,2)
stairs(t,Fac);
title('Magnitudes de Corrente - Fase a');
axis([0 10071 0 115])
legend('Corrente Máxima','Corrente Mínima');
xlabel('Tempo (m)');
ylabel('Corrente (A)');

```

```

%Neutro

Fnc=
[TensodeMeioCicloVRMSNGMx,TensodeMeioCicloVRMSNGMn,FAD,FADmin,FPTmax,FPTmin
,FPT,FCTmin];
figure(4)
subplot(2,1,1)
stairs(t,Fnc);
title('Magnitudes de Tensão - Neutro');
axis([0 10071 0 1])
legend('Tensão Máxima','Tensão Mínima');
xlabel('Tempo (m)');
ylabel('Tensão (V)');
Fnc= [CorrentedeMeioCicloARMSNMx,CorrentedeMeioCicloARMSNMn];
subplot(2,1,2)
stairs(t,Fnc);
title('Magnitudes de Corrente - Neutro');
axis([0 10071 0 300])
legend('Corrente Máxima','Corrente Mínima');
xlabel('Tempo (m)');
ylabel('Corrente (A)');

```

B.2 DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO

```

%Harmônicas de Tensão

%% Harmônicas Fase A (Aplicável para Fase A, B e C)

%Distorção Harmônica total de tensão da Fase a
figure(1)
subplot(2,1,1)
h1=histogram(THDVL1NMn);
title('Distribuição Acumulada da Distorção Harmônica Total de Tensão
Mínima');
xlabel('Indicador TDD (%)');
ylabel('Número de eventos');

%Estilo do gráfico de barras
h1(1).FaceColor= [0 0 0.6];
h1(1).LineWidth = 1;
h1(1).LineStyle= ':';
h1.NumBins = 40;

%defini como mostrar os eixos
ax = gca;
ax.YTick = 0:20:300;
ax.XTick = 1:0.5:9.5;

%plotagem dos gráficos
subplot(2,1,2)
h2=histogram(THDVL1NMx);

```

```

title('Distribuição Acumulada da Distorção Harmônica Total de Tensão
Máxima');
xlabel('Indicador TDD (%)');
ylabel('Número de eventos');

%Estilo do gráfico de barras
h2.FaceColor=[0 0 0.6] ;
h2.LineWidth = 1;
h2.LineStyle= ':';

%defini como mostrar os eixos
ax = gca;
ax.YTick = 0:10:230;
ax.XTick = 1:0.5:9.5;

%Percentil máx. e min da Fase a
Perc951 = prctile(THDVL1NMn,95);
Perc952 = prctile(THDVL1NMx,95);

%Distorção Harmônica individual de tensão da fase A

%Módulo da harmônica máxima
k = 0:1:25; %ordem da harmônica
figure(2)
b1=bar(k,[HarmnicasdeTensoL1NMx HarmnicasdeTensoL1NMn]);

b1(2).FaceColor= 'blue';
b1(1).LineWidth = 1;
b1(1).LineStyle= ':';
b1(1).FaceColor= [0 0.5 0.5];

%txt = '\leftarrow Harmônica 100%';
%text(k(2),HarmnicasdeTensoL1NMx(3),txt);
ax = gca;
%ax.YTick = [0 1 2 3 50 100];
ax.XTick = [0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23
24 25 26];
xlabel('Ordem da harmônica');
ylabel('Distorção Harmônica |V%|');
axis([-1 26 0 3]);
legend('Máximo', 'Mínimo')
%daspect([1 2 2]);

%% Harmônicas Neutro
figure(7)
subplot(2,1,1)
h7=histogram(THDVNGMn);
title('Distribuição Acumulada da Distorção Harmônica Total de Tensão Mínima
- Neutro');
xlabel('Indicador TDD (%)');
ylabel('Número de eventos');

%Estilo do gráfico de barras
h7.FaceColor= [0 0 0.6];
h7.LineWidth = 1;
h7.LineStyle= ':';
h7.NumBins = 25;

```

```

ax = gca;
ax.YTick = 0:30:300;
ax.XTick = 20:10:200;

subplot(2,1,2)
h8=histogram(THDVNGMx);
title('Distribuição Acumulada da Distorção Harmônica Total de Tensão Máxima
- Neutro');
xlabel('Indicador TDD (%)');
ylabel('Número de eventos');

%Estilo do gráfico de barras
h8.FaceColor= [0 0 0.6];
h8.LineWidth = 1;
h8.LineStyle= ':';
h8.NumBins = 25;

ax = gca;
ax.YTick = 0:30:350;
ax.XTick = 20:10:350;

%Módulo da harmônica máxima
k = 0:1:25; %ordem da harmônica
figure(8)
b4=bar(k, [HarmnicasdeTensoNGMx HarmnicasdeTensoNGMn]);

b4(2).FaceColor= 'blue';
b4(1).LineWidth = 1;
b4(1).LineStyle= ':';
b4(1).FaceColor= [0 0.5 0.5];

ax = gca;
%ax.YTick = [0 1 2 3 50 100];
ax.XTick = [0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23
24 25 26];

xlabel('Ordem da Harmônica');
ylabel('Distorção Harmônica |V%|');
axis([-1 26 0 350]);
legend('Máximo', 'Mínimo')
%daspect([1 2 2]);

%Cálculo dos Percentis

Perc953 = prctile(THDVL2NMn, 95);
Perc954 = prctile(THDVL2NMx, 95);
Perc955 = prctile(THDVL3NMn, 95);
Perc956 = prctile(THDVL3NMx, 95);
Perc957 = prctile(THDVNGMn, 95);
Perc958 = prctile(THDVNGMx, 95);

```

B.3 DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO E CORRENTE

```

%% Desequilíbrio

t=0:10:10070;

%% Tensão e corrente sequência negativa (Aplicável as sequências negativa,
positiva e zero)

Y1=[AssimetriaVnMx];
figure(1)
subplot(2,1,1)
stairs(t,Y1);
title('Desequilíbrio de Tensão Em Relação À Tensão De Sequência Negativa');
xlabel('Tempo (m) ');
ylabel('Assimetria(%) ');
axis([0 10071 0 5 ])

AssimetriaVnMx95 = prctile(AssimetriaVnMx,95); %percentil de 95%

subplot(2,1,2)
histogram(AssimetriaVnMx);
title('Distribuição Acumulada do desequilíbrio de Tensão em relação à
tensão de sequência negativa');
xlabel('Indicador Flt (pu) ');
ylabel('Número de eventos');

figure(2)
[f,x] = ecdf(AssimetriaVnMx);
plot(x,f,'b');
title('Curva de Probabilidade Acumulativa (p.u) - Tensão Sequência
Negativa');
xlabel('Categoria do Indicador FD(%) ');
ylabel('Probabilidade Acumulativa (p.u) ');

figure(3)
histfit(AssimetriaVnMx);
title('Histograma e Curva de Distribuição Acumulada de FD - Sequência
Negativa');
xlabel('Categoria do Indicador FD(pu) ');
ylabel('Número de eventos');

%% Corrente sequência negativa

Y2=[AssimetriaAnMx];

figure(4)
subplot(2,1,1)
stairs(t,Y2);
title('Desequilíbrio de Corrente em Relação à Corrente de Sequência
Negativa');
xlabel('Tempo (m) ');
ylabel('Assimetria(%) ');
axis([0 10071 0 50 ])

```

```

AssimetriaAnMx95 = prctile(AssimetriaAnMx,95); %percentil de 95%

subplot(2,1,2)
h1=histogram(AssimetriaAnMx);
title('Distribuição Acumulada da Severidade de Flutuação de Tensão de Curta
Duração (Pst) - Fase b');
xlabel('Indicador Pst (pu)');
ylabel('Número de eventos');

figure(5)
[f,x] = ecdf(AssimetriaAnMx);
plot(x,f,'b');
title('Curva de Probabilidade Acumulativa (p.u) - Fase b');
xlabel('Categoria do Indicador Pst (pu)');
ylabel('Probabilidade cumulativa (p.u)');

figure(6)
histfit(AssimetriaAnMx);
title('Histograma e Curva de Distribuição Acumulada de Pst - Fase b');
xlabel('Categoria do Indicador Pst (pu)');
ylabel('Número de eventos');

```

B.4 FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

```

%Flutuação de tensão

t=0:10:10070;

%Pst fase A (Aplicável para pst e plt da fase A, B E C)

Y1=[PstL1N];

figure(1)
subplot(2,1,1)
stairs(t,Y1);
title('Severidade de Flutuação de Tensão de Curta Duração (Pst) - Fase a');
xlabel('Tempo (m)');
ylabel('Indicador Pst (pu)');
axis([0 10071 0 2 ])

Perc95L1 = prctile(PstL1N,95); %percentil de 95%

subplot(2,1,2)
histogram(PstL1N);
title('Distribuição Acumulada da Severidade de Flutuação de Tensão de Curta
Duração (Pst) - Fase a');
xlabel('Indicador Pst (pu)');
ylabel('Número de eventos');

```

```
figure(2)
[f,x] = ecdf(PstL1N);
plot(x,f,'b');
title('Curva de Probabilidade Acumulativa (p.u) - Fase a');
xlabel('Categoria do Indicador Pst(pu)');
ylabel('Número de eventos');
```

```
figure(3)
histfit(PstL1N);
title('Histograma e Curva de Distribuição Acumulada de Pst - Fase a');
xlabel('Categoria do Indicador Pst(pu)');
ylabel('Número de eventos');
```

APÊNDICE C – DADOS DAS HARMÔNICAS

Tabela 27 - Indicador para Distorções Harmônicas Individual de Tensão do Transformador TR1

Indicadores de QEE	Ordem harmônica	Valores registrados por fase			Limite dos indicadores (%)
		Valor medido do indicador por fase			
DTT _i 95%	5	1,9	1,8	1,85	7,5
	7	0,78	0,87	0,94	6,5
	11	0,15	0,17	0,21	4,5
	13	0,09	0,14	0,08	4
	17	0,05	0,06	0,08	2,5
	19	0,06	0,12	0,08	2
	23	0,04	0,06	0,08	2
	25	0,04	0,07	0,08	2
DTT ₃ 95%	3	0,78	0,98	1,05	6,5
	9	0,26	0,3	0,31	2
	15	0,11	0,18	0,22	1
	21	0,05	0,08	0,08	1
DTT _P 95%	2	0,09	0,08	0,07	2,5
	4	0,06	0,04	0,04	1,5
	6	0,02	0,04	0,04	1
	8	0,02	0,02	0,02	1
	10	0,02	0,01	0,02	1
	12	0,01	0,01	0,01	1

Tabela 28 - Indicador para Distorções Harmônicas Individual do Circuito de Cargas do Bloco H (Laboratório de Soldagem)

Indicadores de QEE	Ordem harmônica	Valores registrados por fase			Limite dos indicadores (%)
		Valor medido do indicador por fase			
DTT _i 95%	5	1,9	1,76	1,76	7,5
	7	0,93	0,94	0,90	6,5
	11	0,14	0,14	0,13	4,5
	13	0,13	0,11	0,12	4
	17	0,09	0,01	0,08	2,5
	19	0,09	0,08	0,04	2
	23	0,06	0,08	0,04	2
	25	0,07	0,05	0,03	2
DTT ₃ 95%	3	1,41	1,46	1,12	6,5
	9	0,35	0,32	0,31	2
	15	0,26	0,27	0,18	1
	21	0,05	0,11	0,08	1
DTT _P 95%	2	0,08	0,07	0,08	2,5
	4	0,04	0,04	0,06	1,5
	6	0,02	0,03	0,04	1
	8	0,02	0,02	0,02	1
	10	0,02	0,02	0,02	1
	12	0,01	0,01	0,01	1

Tabela 29 - Indicador para Distorções Harmônicas Individual do Circuito de Cargas do Bloco H (Laboratório de Usinagem)

Indicadores de QEE	Ordem harmônica	Valores registrados por fase			Limite dos indicadores (%)
		Valor medido do indicador por fase			
DTT _i 95%	5	1,94	1,92	1,97	7,5
	7	1,12	1,23	1,16	6,5
	11	0,14	0,18	0,19	4,5
	13	0,10	0,13	0,13	4
	17	0,07	0,13	0,11	2,5
	19	0,07	0,10	0,07	2
	23	0,05	0,01	0,04	2
DTT ₃ 95%	25	0,03	0,04	0,06	2
	3	1,22	1,28	1,44	6,5
	9	0,31	0,4	0,37	2
	15	0,16	0,24	0,28	1
	21	0,09	0,11	0,12	1
DTT _p 95%	2	0,07	0,07	0,08	2,5
	4	0,05	0,04	0,04	1,5
	6	0,03	0,03	0,04	1
	8	0,02	0,02	0,03	1
	10	0,02	0,02	0,02	1
	12	0,01	0,02	0,02	1

Tabela 30 - Indicador para Distorções Harmônicas Individual do Circuito de Cargas do Bloco J

Indicadores de QEE	Ordem harmônica	Valores registrados por fase			Limite dos indicadores (%)
		Valor medido do indicador por fase			
DTT _i 95%	5	2,44	2,36	2,33	7,5
	7	1,29	1,09	1,27	6,5
	11	0,19	0,17	0,16	4,5
	13	0,18	0,12	0,17	4
	17	0,10	0,10	0,16	2,5
	19	0,09	0,10	0,12	2
	23	0,07	0,07	0,11	2
DTT ₃ 95%	25	0,07	0,07	0,11	2
	3	1,71	1,39	1,55	6,5
	9	0,03	0,28	0,38	2
	15	0,32	0,21	0,28	1
	21	0,12	0,11	0,12	1
DTT _p 95%	2	0,08	0,09	0,08	2,5
	4	0,04	0,10	0,05	1,5
	6	0,04	0,10	0,04	1
	8	0,03	0,10	0,03	1
	10	0,02	0,09	0,03	1
	12	0,02	0,09	0,03	1

Tabela 31 - Indicador para Distorções Harmônicas Individual do Circuito de Cargas do Bloco I

Indicadores de QEE	Ordem harmônica	Valores registrados por fase			Limite dos indicadores (%)
		Valor medido do indicador por fase			
DTT _i 95%	5	2,12	2,13	2,12	7,5
	7	1,06	1,14	0,9	6,5
	11	0,15	0,13	0,10	4,5
	13	0,13	0,14	0,12	4
	17	0,12	0,12	0,08	2,5
	19	0,07	0,11	0,07	2
	23	0,07	0,10	0,04	2
DTT ₃ 95%	25	0,05	0,09	0,04	2
	3	1,45	1,35	1,21	6,5
	9	0,31	0,37	0,30	2
	15	0,29	0,27	0,19	1
	21	0,12	0,11	0,10	1
DTT _p 95%	2	0,08	0,07	0,07	2,5
	4	0,04	0,04	0,04	1,5
	6	0,03	0,03	0,02	1
	8	0,03	0,02	0,02	1
	10	0,02	0,02	0,02	1
	12	0,02	0,02	0,01	1

APÊNDICE D – DADOS QUEDAS DE TENSÃO

Tabela 32 - Medição de Tensão e Corrente Máximas e Mínimas Circuito de Cargas Sensíveis Bloco J (continua)

Ocorrência de Eventos por fase	Valores registrados de Tensão (V) e Corrente (A)						Classificação C ou P*	
	Fase A		Fase B		Fase C			
	Tensão	Corrente	Tensão	Corrente	Tensão	Corrente		
A	1	101,07	9,34	120,71	1,7	109,33	24,4	C
	2	109,94	65,5	127,24	1,64	118,82	20,4	C
	3	111,10	59,34	134,25	1,65	122,86	25,05	P
B	4	126,73	16,93	114,04	14,13	122,14	10,64	P
	5	124,11	8,95	115,74	14,98	122,20	23,09	P
	6	125,06	16,68	116,14	21,43	121,17	29,28	P
	7	127,60	6,46	115,78	19,15	121,61	23,47	P
	8	127,87	6,92	115,91	21,14	121,30	24,95	P
	9	127,10	6,10	114,81	17,61	121,94	20,30	P
	10	127,13	2,92	115,04	12,04	123,03	20,39	P
	11	125,74	9,97	115,46	7,69	123,90	5,08	P
	12	124,87	25,03	114,53	9,77	125,29	11,01	P
	13	125,54	65,50	134,22	1,64	124,07	20,40	P
	14	124,75	10,04	115,28	14,15	127,10	4,99	P
	15	123,48	10,79	114,56	14,73	124,76	10,04	P
	16	123,71	23,10	113,32	20,11	122,72	16,11	P
	17	124,05	11,54	114,08	21,29	123,63	10,63	P
	18	126,23	8,61	113,65	20,10	122,84	16,40	P
	19	124,13	12,14	113,89	10,67	120,02	31,44	P
	20	126,48	6,07	115,87	16,69	122,26	26,89	P
	21	129,82	11,02	114,24	15,30	124,09	25,98	P
	22	125,98	9,86	115,51	10,58	127,71	4,92	P
	23	126,06	14,57	116,19	19,23	123,69	20,56	P
	24	125,25	18,51	115,55	19,91	124,59	17,88	P
	25	126,18	17,94	115,99	15,32	123,57	20,72	P
	26	124,71	5,46	111,88	14,39	124,21	12,63	P
	27	122,94	11,97	115,87	22,97	120,74	27,59	P
	28	124,52	4,01	113,76	23,71	124,78	4,99	P
	29	123,68	7,35	110,53	12,35	123,21	4,90	P
	30	123,57	16,76	111,63	18,78	121,36	21,70	P
	31	122,52	12,19	116,90	17,65	121,94	12,99	P
	32	127,20	12,50	114,32	15,10	120,33	21,77	P
	33	126,94	3,05	113,48	18,36	124,09	15,40	P
	34	123,97	14,93	113,73	13,51	121,80	23,80	P
	35	127,02	10,11	114,54	10,33	126,81	6,30	P
	36	127,02	9,57	128,71	10,80	128,31	6,30	P
	37	123,64	10,89	114,68	10,95	123,96	12,26	P
	38	125,72	5,95	111,67	11,32	122,70	17,03	P
	39	125,68	2,97	114,56	13,36	125,04	5,05	P
	40	124,11	2,89	110,23	14,97	116,59	14,48	P
	41	125,17	6,87	113,60	13,72	124,04	20,12	P
	42	124,73	7,35	113,13	19,86	123,57	10,38	P
	43	123,64	16,32	115,88	22,47	124,94	17,01	P

Tabela 33 - Medição de Tensão e Corrente Máximas e Mínimas Circuito de Cargas Sensíveis Bloco J (conclusão)

Ocorrência de Eventos por fase	Valores registrados de Tensão (V) e Corrente (A)						Classificação C ou P*	
	Fase A		Fase B		Fase C			
	Tensão	Corrente	Tensão	Corrent e	Tensão	Corrent e		
	44	125,41	16,74	115,02	8,87	123,50	8,45	P
	45	124,84	4,74	112,21	13,08	126,43	0,29	P
	46	122,01	11,78	110,01	20,16	125,43	0,32	C
	47	123,89	8,73	109,91	18,31	125,04	4,95	P
	48	124,79	59,34	134,25	1,65	122,96	25,05	P
	49	101,07	5,16	120,71	1,52	109,33	21,94	C
C	50	124,11	2,89	110,27	14,97	116,54	14,48	P
	51	117,47	9,37	117,55	8,03	115,29	5,32	P
	52	117,75	14,29	117,04	7,85	115,99	19,57	P

*Classificação das faixas de tensão segundo PRODIST: C=Faixa Crítica, P=Faixa precária; ** Quantidade de eventos que ultrapassaram os limites dos indicadores de QEE por fase.