

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM FONTES RENOVÁVEIS

***Estudo de Caso: Comparação de Campanha de Indicadores de
Qualidade de Energia Elétrica em Usinas de Geração de Energia
Renovável***

por

Henrique Lopes Angueth de Araújo

Trabalho de Conclusão de Curso

Prof. Wallace do Couto Boaventura
(Orientador)

Belo Horizonte, novembro de 2019.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM FONTES RENOVÁVEIS

Estudo de Caso: Comparação Pré-operação e Pós Operação de indicadores de Campanha de Qualidade de Energia Elétrica em Usinas de Geração de Energia Renovável

Henrique Lopes Angueth de Araújo

Monografia apresentada durante o Seminário dos Trabalhos de Conclusão do Curso de Especialização em Fontes Renováveis da UFMG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Wallace do Couto Boaventura

Belo Horizonte - MG

Novembro de 2019



ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DO ALUNO HENRIQUE LOPES ANGUETH DE ARAUJO

Realizou-se, no dia 17 de dezembro de 2019, às 08:00 horas, Sala 2305 - 2o. andar - bloco 1 - Escola de Engenharia, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de monografia, intitulada *Estudo de Caso: Comparação Pré-operação e Pós Operação de indicadores de Campanha de Qualidade de Energia Elétrica em Usinas de Geração de Energia Renovável*, apresentada por HENRIQUE LOPES ANGUETH DE ARAUJO, número de registro 2018704286, graduado no curso de ENGENHARIA ELETRICA, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em FONTES RENOVÁVEIS - GERAÇÃO, OPERAÇÃO E INTEGRAÇÃO, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Wallace do Couto Boaventura - Orientador (UFMG), Prof(a). Ivan Jose da Silva Lopes (UFMG).

A Comissão considerou a monografia:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 17 de dezembro de 2019.

Prof(a). Wallace do Couto Boaventura (Doutor)

Prof(a). Ivan Jose da Silva Lopes (Doutor)

Secretaria do Curso de Especialização em
Fontes Renováveis - Geração, Operação
e Integração

*Aos meus pais, Antônio e Ângela, pela dedicação, cuidados e incentivo.
Ao meu irmão, Thiago, pela paciência e apoio.*

Agradecimentos

Primeiramente a Nosso Senhor e Nossa Senhora que sempre me enchem de bênçãos.

Ao Professor Wallace agradeço por me aceitar e orientar e pelo incentivo para realizar este trabalho, pela disponibilidade de ajudar em todos os momentos que foram necessários e pela preocupação e paciência, sem as quais esse trabalho não teria sido concluído neste semestre.

Ao Leandro Chagas, da empresa Metrum, pela colaboração na concepção do trabalho e pelos colegas de trabalho pelo apoio.

Ao Ramon Albino meu colega de curso e de trabalho, pelo apoio durante o curso de especialização, me dando assistência, motivação e ânimo.

Ao Professor Antônio Emílio que me orientou e ajudou bastante durante toda minha especialização.

“If some of my faults and negligences may have by chance given occasion to some one to suspect me of infidelity, I am ready, as some reparation for this and for any other good purpose, to declare to such a one and to every other person and on every occasion and under all circumstances that I have always held, and hold now, the Holy Catholic Religion as the only true and infallible one, thanking without end the good God for having gifted me with such a faith, in which I firmly propose to live and die, in the lively hope of attaining eternal life.” Alessandro Volta

Resumo

De acordo com o submódulo 2.8 dos procedimentos de rede do ONS, “quando ocorrem solicitações de acesso de consumidores livres, agentes de geração, agentes de distribuição, agentes de importação e de exportação, cujas instalações não lineares possam comprometer o desempenho da rede básica, devem ser realizadas análises fundamentais em indicadores de qualidade de energia elétrica”. Dentre os indicadores a serem gerenciados encontram-se aqueles relativos à conformidade da forma de onda, e dentre estes, a distorção harmônica, o desequilíbrio de tensão e a flutuação de tensão. Esse conjunto de análises é chamado de Campanha de Qualidade.

No caso de usinas de fontes renováveis, tendo em vista que o impacto da sua operação na qualidade de energia elétrica do ponto de acoplamento comum depende do regime inconstante de geração de energia onde se encontra instalado, o ONS estabelece, em conjunto com o agente, uma série de indicadores específicos como: distorção harmônica, flicker e desequilíbrio de tensão, também deverão ser medidas as correntes harmônicas geradas, bem como as correntes harmônicas totais injetadas na rede elétrica, resultantes da operação do conjunto gerador. As medições de tais correntes têm por finalidade permitir reavaliar o estudo de desempenho da instalação quanto à distorção harmônica de tensão. Essas medições devem ocorrer numa etapa pré-operacional e pós-operacional para observar o impacto do novo acessante à Rede Básica.

O objetivo do trabalho é apresentar a comparação dos resultados desses indicadores nas fases pré-operação e pós-operação de cinco empreendimentos diferentes.

Palavras-chaves: Qualidade de energia, Geradores eólicos, Geradores fotovoltaicos, Campanha de Qualidade de Energia Elétrica.

Abstract

According to ONS documentation “Procedimento de Rede” chapter 2.8, whenever happens a solicitation to access power grid, it is necessary to run a series of power quality analysis, measuring, mostly, voltage harmonic distortion, voltage unbalance and voltage flicker. This measurement series is called Quality Campaign and need to occur in pre-operational and post operational steps.

When Eolic or photovoltaic complexes requests power grid access, it is necessary to measure, along with the other indicators, the current harmonic distortion, due to nonlinear load. This particularity makes Eolic and Photovoltaic complexes Quality Campaign different from others.

The objective of this project is to present a comparison between power quality indicators pre-operational and post operational steps in five different power plants.

Key-words: Power quality, Wind turbines, Photovoltaic generation, Measurement and assessment of power quality.

Lista de ilustrações

Figura 2.1 - Integração eletroenergética no Brasil [1].....	5
• Figura 2.2 - As principais instituições do modelo do setor elétrico. [1].....	6
Figura 2.3 - Formas de Ondas de carga linear e não linear.....	8
Figura 2.4 - Consumo de um aquecedor de 1kW. [7].....	11
Figura 2.5 - Dispositivo semicondutor de controle da corrente e da tensão - Carga Não Linear. [7].....	12
Figura 2.6- Sinal de tensão com harmônicos ímpares. [7].....	14
Figura 3.1 - Exemplo de gráfico de linha mostrando a tendência do indicador K	19
Figura 3.2 - Exemplo de histograma do indicador K durante os sete dias da campanha.....	19
Figura 3.3 - Exemplo de gráfico tipo linha com valores de Pst medidos na fase A de uma campanha de medição de um gerador ao longo de uma semana	22
Figura 3.4 - Exemplo de gráfico tipo linha com valores de Plt medidos na fase A de uma campanha de medição de um gerador ao longo de uma semana	23
Figura 3.5 - Exemplo de histogramas com valores de Pst medidos na fase A de uma campanha de medição de um gerador ao longo de uma semana	23
Figura 3.6 - Exemplo de histogramas com valores de Plt medidos na fase A de uma campanha de medição de um gerador ao longo de uma semana	24
Figura 3.7 - Exemplo de gráfico tipo linha com valores de DTHT medidos na fase A de uma campanha de medição de um gerador ao longo de uma semana	27
Figura 3.8 - Exemplo de gráfico tipo linha com valores de V5 medidos na fase A de uma campanha de medição de um gerador ao longo de uma semana	27
Figura 3.9 - Exemplo de histogramas com valores de DTHT medidos na fase A de uma campanha de medição de um gerador ao longo de uma semana	28
Figura 3.10 - Exemplo de histogramas com valores de V3 medidos na fase A de uma campanha de medição hipotética ao longo de uma semana.....	28
Figura 4.1 – Indicador de tendência K de desequilíbrio de tensão (pré-operação).....	31
Figura 4.2 - Indicador de tendência K de desequilíbrio de tensão (pós operação)	31
Figura 4.3 - Histograma do indicador de desequilíbrio de tensão K (pré-operação).....	32
Figura 4.4 - Histograma do indicador de desequilíbrio de tensão K (pós operação).....	32
Figura 4.5 - Tendência do Indicador Pst Fase A (pré-operacional).....	34
Figura 4.6 - Tendência do Indicador Pst Fase A (pós operacional).....	34
Figura 4.7 - Tendência do Indicador Pst Fase B (pré-operacional)	35
Figura 4.8 - Tendência do Indicador Pst Fase B (pós operacional).....	35
Figura 4.9 - Tendência do Indicador Pst Fase C (pré-operacional)	36
Figura 4.10 - Tendência do Indicador Pst Fase C (pós operacional).....	36
Figura 4.11 - Tendência do Indicador Plt Fase A (pré-operacional)	37
Figura 4.12 - Tendência do Indicador Plt Fase A (pós operacional)	37
Figura 4.13 - Tendência do Indicador Plt Fase B (pré-operacional).....	38
Figura 4.14 - Tendência do Indicador Plt Fase B (pós operacional)	38
Figura 4.15 - Tendência do Indicador Plt Fase C (pré-operacional).....	39
Figura 4.16 - Tendência do Indicador Plt Fase C (pós operacional)	39
Figura 4.17 - Histograma do Indicador Pst Fase A (pré-operacional).....	40

Figura 4.18 - Histograma do Indicador Pst Fase A (pós operacional).....	40
Figura 4.19 - Histograma do Indicador Pst Fase B (pré-operacional).....	41
Figura 4.20 - Histograma do Indicador Pst Fase B (pós operacional).....	41
Figura 4.21 - Histograma do Indicador Pst Fase C (pré-operacional).....	42
Figura 4.22 - Histograma do Indicador Pst Fase C (pós operacional).....	42
Figura 4.23 - Histograma do Indicador Plt Fase A (pré-operacional).....	43
Figura 4.24 - Histograma do Indicador Pst Fase A (pós operacional).....	43
Figura 4.25 - Histograma do Indicador Plt Fase B (pré-operacional).....	44
Figura 4.26 - Histograma do Indicador Pst Fase B (pós operacional).....	44
Figura 4.27 - Histograma do Indicador Plt Fase C (pré-operacional).....	45
Figura 4.28 - Histograma do Indicador Pst Fase C (pós operacional).....	45
Figura 4.29 - Tendência Indicador DTHT Fase A (pré-operacional).....	47
Figura 4.30 - Tendência Indicador DTHT Fase A (pós operacional).....	47
Figura 4.31 - Tendência Indicador DTHT Fase B (pré-operacional).....	48
Figura 4.32 - Tendência Indicador DTHT Fase B (pós operacional).....	48
Figura 4.33 - Tendência Indicador DTHT Fase C (pré-operacional).....	49
Figura 4.34 - Tendência Indicador DTHT Fase C (pós operacional).....	49
Figura 4.35 - Tendência Indicador DTH V5 Fase A (pré-operacional).....	50
Figura 4.36 - Tendência Indicador DTH V5 Fase A (pós operacional).....	50
Figura 4.37 - Tendência Indicador DTH V5 Fase B (pré-operacional).....	51
Figura 4.38 - Tendência Indicador DTH Fase B (pós operacional).....	51
Figura 4.39 - Tendência Indicador DTH V5 Fase C (pré-operacional).....	52
Figura 4.40 - Tendência Indicador DTH V5 Fase C (pós operacional).....	52
Figura 4.41 - Histograma Indicador DTHT Fase A (pré-operacional).....	53
Figura 4.42 - Histograma Indicador DTHT Fase A (pós operacional).....	53
Figura 4.43 - Histograma Indicador DTHT Fase B (pré-operacional).....	54
Figura 4.44 - Histograma Indicador DTHT Fase B (pós operacional).....	54
Figura 4.45 - Histograma Indicador DTHT Fase C (pré-operacional).....	55
Figura 4.46 - Histograma Indicador DTHT Fase C (pós operacional).....	55
Figura 4.47 - Histograma Indicador DTH V5 Fase A (pré-operacional).....	56
Figura 4.48 - Histograma Indicador DTH V5 Fase A (pós operacional).....	56
Figura 4.49 - Histograma Indicador DTH V5 Fase B (pré-operacional).....	57
Figura 4.50 - Histograma Indicador DTH V5 Fase B (pós operacional).....	57
Figura 4.51 - Histograma Indicador DTH V5 Fase C (pré-operacional).....	58
Figura 4.52 - Histograma Indicador DTH V5 Fase C (pós operacional).....	58
Figura 5.1 - Quadro comparativo dos casos apresentados.....	84

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Qualidade da tensão quanto a flutuação	20
Tabela 3.2 - Limites Globais.....	20
Tabela 3.3 - Valores Típicos dos Fatores de Transferência (FT)	20
Tabela 3.4 - Tabela com resumo de indicadores de flutuação de tensão obtidos em uma campanha de medição de um gerador ao longo de uma semana	24
Tabela 3.5 - Tabela com resumo de indicadores de distorção harmônica de tensão obtidos em uma campanha de medição de um gerador de uma semana	29
Tabela 4.1 - Tabela de fator KD95% do indicador de desequilíbrio K (pré-operação).....	33
Tabela 4.2 - Tabela de fator KD95% do indicador de desequilíbrio K (pós operação).....	33
Tabela 4.3 - Tabela de Indicadores PstD95% e Plt95%	46
Tabela 4.4 - Tabela de Indicadores PstD95% e Plt95%	46
Tabela 4.5 - Tabela de Indicadores DTHTD95%, e mais significativos V2S95% a V50S95% (pré-operacional).....	59
Tabela 4.6 - Tabela de Indicadores DTHTD95%, e mais significativos entre V2S95% a V50S95% (pós operacional)	59
Tabela 4.7 - Indicador de desequilíbrio K pré-operacional	60
Tabela 4.8 - Indicador de desequilíbrio K pós-operacional.....	60
Tabela 4.9: Limites para os indicadores PstD95% e Plt95%.....	60
Tabela 4.10: Fator de transferência Ft.	61
Tabela 4.11: Limites globais inferior e superior para PstD95% e PltS95%.	61
Tabela 4.12 - Indicador de desequilíbrio PstD e PltS pré-operacional	61
Tabela 4.13 - Indicador de desequilíbrio PstD e PltS pós operacional	61
Tabela 4.14: Limites globais inferiores para os indicadores de harmônicas de tensão.	62
Tabela 4.15 - Indicadores estatísticos de harmônicas individuais e totais de tensão - mais significativos na pré-operação	62
Tabela 4.16: Indicadores estatísticos de harmônicas individuais e totais de tensão - mais significativos na pós operação	62
Tabela 4.17 - Tabela de fator KD95% do indicador de desequilíbrio K (pré-operação).....	63
Tabela 4.18 - Tabela de fator KD95% do indicador de desequilíbrio K (pós operação).....	63
Tabela 4.19 - Tabela de Indicadores PstD95% e Plt95% (pré-operacional).....	64
Tabela 4.20 - Tabela de Indicadores PstD95% e Plt95% (pós operacional)	64
Tabela 4.21 - Tabela de Indicadores DTHTD95%, e mais significativos V2S95% a V50S95% (pré-operacional).....	64
Tabela 4.22 - Tabela de Indicadores DTHTD95%, e mais significativos entre V2S95% a V50S95% (pós operacional)	65
Tabela 4.23 - Indicador de desequilíbrio K pré-operacional	65
Tabela 4.24 - Indicador de desequilíbrio K pós-operacional.....	65
Tabela 4.25: Limites para os indicadores PstD95% e Plt95%.....	66
Tabela 4.26: Fator de transferência Ft.	66
Tabela 4.27: Limites globais inferior e superior para PstD95% e PltS95%.	66
Tabela 4.28 - Indicador de desequilíbrio PstD e PltS pré-operacional	66
Tabela 4.29 - Indicador de desequilíbrio PstD e PltS pós operacional	66
Tabela 4.30: Limites globais inferiores para os indicadores de harmônicas de tensão.	67

Tabela 4.31 - Indicadores estatísticos de harmônicas individuais e totais de tensão - mais significativos na pré-operação	67
Tabela 4.32: Indicadores estatísticos de harmônicas individuais e totais de tensão - mais significativos na pós operação	68
Tabela 4.33 - Tabela de fator KD95% do indicador de desequilíbrio K (pré-operação).....	69
Tabela 4.34 - Tabela de fator KD95% do indicador de desequilíbrio K (pós operação).....	69
Tabela 4.35 - Tabela de Indicares PstD95% e Plt95% (pré-operacional).....	69
Tabela 4.36 - Tabela de Indicadores PstD95% e Plt95% (pós operacional)	70
Tabela 4.37 - Tabela de Indicadores DTHTD95%, e mais significativos V2S95% a V50S95% (pré-operacional).....	70
Tabela 4.38 - Tabela de Indicadores DTHTD95%, e mais significativos entre V2S95% a V50S95% (pós operacional)	70
Tabela 4.39 - Indicador de desequilíbrio K pré-operacional	71
Tabela 4.40 - Indicador de desequilíbrio K pós-operacional.....	71
Tabela 4.41: Limites para os indicadores PstD95% e Plt95%.....	71
Tabela 4.42: Fator de transferência Ft.	72
Tabela 4.43: Limites globais inferior e superior para PstD95% e PltS95%.	72
Tabela 4.44 - Indicador de desequilíbrio PstD e PltS pré-operacional	72
Tabela 4.45 - Indicador de desequilíbrio PstD e PltS pós operacional.....	72
Tabela 4.46: Limites globais inferiores para os indicadores de harmônicas de tensão.	73
Tabela 4.47 - Indicadores estatísticos de harmônicas individuais e totais de tensão - mais significativos na pré-operação	73
Tabela 4.48: Indicadores estatísticos de harmônicas individuais e totais de tensão - mais significativos na pós operação	73
Tabela 4.49 - Tabela de fator KD95% do indicador de desequilíbrio K (pré-operação).....	74
Tabela 4.50 - Tabela de fator KD95% do indicador de desequilíbrio K (pós operação).....	74
Tabela 4.51 - Tabela de Indicares PstD95% e Plt95% (pré-operacional).....	74
Tabela 4.52 - Tabela de Indicadores PstD95% e Plt95% (pós operacional)	74
Tabela 4.53 - Tabela de Indicadores DTHTD95%, e mais significativos V2S95% a V50S95% (pré-operacional).....	75
Tabela 4.54 - Tabela de Indicadores DTHTD95%, e mais significativos entre V2S95% a V50S95% (pós operacional)	75
Tabela 4.55 - Indicador de desequilíbrio K pré-operacional	76
Tabela 4.56 - Indicador de desequilíbrio K pós-operacional.....	76
Tabela 4.57: Limites para os indicadores PstD95% e Plt95%.....	76
Tabela 4.58: Fator de transferência Ft.	77
Tabela 4.59: Limites globais inferior e superior para PstD95% e PltS95%.	77
Tabela 4.60 - Indicador de desequilíbrio PstD e PltS pré-operacional	77
Tabela 4.61 - Indicador de desequilíbrio PstD e PltS pós operacional.....	77
Tabela 4.62: Limites globais inferiores para os indicadores de harmônicas de tensão.	78
Tabela 4.63 - Indicadores estatísticos de harmônicas individuais e totais de tensão - mais significativos na pré-operação	78
Tabela 4.64: Indicadores estatísticos de harmônicas individuais e totais de tensão - mais significativos na pós operação	78
Tabela 4.65 - Tabela de fator KD95% do indicador de desequilíbrio K (pré-operação).....	79
Tabela 4.66 - Tabela de fator KD95% do indicador de desequilíbrio K (pós operação).....	79

Tabela 4.67 - Tabela de Indicadores PstD95% e Plt95% (pré-operacional).....	80
Tabela 4.68 - Tabela de Indicadores PstD95% e Plt95% (pós operacional)	80
Tabela 4.69 - Tabela de Indicadores DTHTD95%, e mais significativos V2S95% a V50S95% (pré-operacional).....	80
Tabela 4.70 - Tabela de Indicadores DTHTD95%, e mais significativos entre V2S95% a V50S95% (pós operacional)	80
Tabela 4.71 - Indicador de desequilíbrio K pré-operacional	81
Tabela 4.72 - Indicador de desequilíbrio K pós-operacional	81
Tabela 4.73: Limites para os indicadores PstD95% e Plt95%.....	81
Tabela 4.74: Fator de transferência Ft.	82
Tabela 4.75: Limites globais inferior e superior para PstD95% e PltS95%.	82
Tabela 4.76 - Indicador de desequilíbrio PstD e PltS pré-operacional	82
Tabela 4.77 - Indicador de desequilíbrio PstD e PltS pós operacional	82
Tabela 4.78: Limites globais inferiores para os indicadores de harmônicas de tensão.	83
Tabela 4.79 - Indicadores estatísticos de harmônicas individuais e totais de tensão - mais significativos na pré-operação	83
Tabela 4.80: Indicadores estatísticos de harmônicas individuais e totais de tensão - mais significativos na pós operação	83

Sumário

1. INTRODUÇÃO	3
2. CONCEITOS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA.....	4
2.1. INTRODUÇÃO.....	4
2.2. O SETOR ELÉTRICO	4
2.2.1. SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL - SIN	4
2.2.1. MODELO DO SETOR ELÉTRICO.....	5
2.2.2. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS.....	7
2.3. DEFINIÇÕES DOS ÍTENS DE QUALIDADE DE ENERGIA.....	7
2.4. FLUTUAÇÃO OU OSCILAÇÕES DE TENSÃO.....	8
2.5. DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO.....	9
2.6. DISTORÇÕES NA ONDA SENOIDAL OU HARMÔNICOS.....	10
2.6.1. CARGAS LINEARES.....	11
2.6.1. CARGAS NÃO LINEARES	11
2.6.1. ANÁLISE MATEMÁTICA DOS HARMÔNICOS	12
3. CAMPANHA DE QUALIDADE DE ENERGIA	16
3.1. INTRODUÇÃO.....	16
3.2. GERENCIAMENTO DE INDICADORES: OBSERVAÇÕES PARA MEDIÇÕES.....	16
3.2.1. PERÍODO DE MONITORAMENTO	16
3.2.2. DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO.....	17
3.2.3. FLUTUAÇÃO DE TENSÃO.....	20
3.2.4. DISTORÇÃO HARMÔNICA	24
3.3. EXPORTAÇÃO DOS DADOS	29
3.4. CONSIDERAÇÕES GERAIS PARA A REALIZAÇÃO DA CAMPANHA	29
4. ESTUDO DE CASO: COMPARAÇÃO DOS INDICADORES PRÉ-OPERACIONAL E PÓS-OPERACIONAL	30
4.1. INTRODUÇÃO.....	30
4.2. CASO A: PERNAMBUCO	30
4.2.1. ESTUDOS DE CAMPANHA DE QUALIDADE DE ENERGIA	30
4.2.1.1. DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO.....	30
4.2.1.2. FLUTUAÇÃO DE TENSÃO (FLICKER)	34
4.2.1.3. DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO.....	47
4.2.1. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	60
4.2.1.1. DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	60
4.2.1.2. FLUTUAÇÃO DE TENSÃO	60
4.2.1.3. HARMÔNICAS DE TENSÃO	61
4.3. CASO B, C E D	63
4.3.1. CASO B: ESTUDOS DE CAMPANHA DE QUALIDADE DE ENERGIA	63
4.3.1.1. DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO.....	63
4.3.1.2. FLUTUAÇÃO DE TENSÃO (FLICKER)	63
4.3.1.3. DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO.....	64
4.3.2. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	65
4.3.2.1. DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	65
4.3.2.2. FLUTUAÇÃO DE TENSÃO	66
4.3.2.3. HARMÔNICAS DE TENSÃO	67
4.3.3. CASO C: ESTUDOS DE CAMPANHA DE QUALIDADE DE ENERGIA	69
4.3.3.1. DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO.....	69
4.3.3.2. FLUTUAÇÃO DE TENSÃO (FLICKER)	69

4.3.3.3.	DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO.....	70
4.3.4.	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	71
4.3.4.1.	DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	71
4.3.4.2.	FLUTUAÇÃO DE TENSÃO	71
4.3.4.3.	HARMÔNICAS DE TENSÃO	72
4.3.5.	CASO D: ESTUDOS DE CAMPANHA DE QUALIDADE DE ENERGIA.....	74
4.3.5.1.	DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO.....	74
4.3.5.2.	FLUTUAÇÃO DE TENSÃO (FLICKER)	74
4.3.5.3.	DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO.....	75
4.3.6.	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	76
4.3.6.1.	DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	76
4.3.6.2.	FLUTUAÇÃO DE TENSÃO	76
4.3.6.3.	HARMÔNICAS DE TENSÃO	77
4.4.	CASO E: RIO GRANDE DO NORTE.....	79
4.4.1.	CASO E: ESTUDOS DE CAMPANHA DE QUALIDADE DE ENERGIA	79
4.4.1.1.	DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	79
4.4.1.2.	FLUTUAÇÃO DE TENSÃO (FLICKER)	79
4.4.1.3.	DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO.....	80
4.4.2.	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	81
4.4.2.1.	DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	81
4.4.2.2.	FLUTUAÇÃO DE TENSÃO	81
4.4.2.3.	HARMÔNICAS DE TENSÃO	82
5.	CONCLUSÃO	84
6.	REFERÊNCIAS	86

1. Introdução

Com o aumento da participação da energia eólica e fotovoltaica na matriz energética brasileira, cresce a preocupação com a qualidade de energia elétrica. Isto se deve principalmente ao fato de que a conexão desses complexos geradores na rede aumenta o número de componentes com características não lineares, provocando o aumento dos níveis de harmônicos no sistema. Por sua vez, a presença de harmônicos no sistema elétrico de potência pode comprometer o funcionamento ideal do sistema e de seus equipamentos, assim como ocasionar efeitos indesejados tais como: tensões ressonantes, aparecimento de vibrações e ruídos em máquinas rotativas, sobreaquecimento de núcleos ferromagnéticos, sobreaquecimento de capacitores, erros em medição de grandezas elétricas, erros no controle de conversores, erros de atuação da proteção, além de distúrbios de compatibilidade eletromagnética.

Dentro deste contexto, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) possui uma regulamentação definida especificamente para a conexão de acessantes com características não lineares, como é o caso de Complexos de Geração Eólica e de Usinas Fotovoltaicas à Rede Básica. Esta normatização é definida através dos Procedimentos de Rede (PROREDE), mais especificamente no submódulo 2.8 [4], o qual define a obrigatoriedade da realização de campanhas de medições do conteúdo harmônico nestas instalações, bem como da realização de estudos computacionais para a avaliação do impacto harmônico decorrente do acesso de novos Complexos Geradores.

Tendo em vista as preocupações relacionadas à geração de correntes harmônicas por fontes renováveis no novo cenário do sistema elétrico nacional, o presente trabalho tem por objetivo dar um panorama geral sobre qualidade de energia no que diz respeito a geradores, mostrar quais os procedimentos, metodologias de medição que os geradores eólicos tem adotado para realização das campanhas de qualidade e apresentar a comparação dos resultados desses indicadores nas fases pré-operação e pós-operação em 5 casos reais.

2. Conceitos de Qualidade de Energia Elétrica

2.1. Introdução

Antes de começarmos o assunto principal, se faz necessário primeiramente uma breve descrição de como o setor elétrico brasileiro é constituído, quais as principais grandezas elétricas importantes para avaliação do sistema elétrico, e a conceituação dos principais indicadores de qualidade de energia.

2.2. O Setor Elétrico

2.2.1. Sistema Interligado nacional – SIN

Com tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial, o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O Sistema Interligado Nacional é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Apenas 1,7% da energia requerida pelo país encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica.[1]

A capacidade instalada de geração do SIN é composta, principalmente, por usinas hidroelétricas distribuídas em doze bacias hidrográficas nas diferentes regiões do país. Essas bacias, integradas aos sistemas de transmissão, possibilitam o suprimento do mercado consumidor, como se pode ver na Figura 2.1. Naturalmente, essa capacidade está em constante evolução, o que pode alterar a distribuição de bacias e usinas, com suas interligações. As usinas térmicas, muitas vezes localizadas nas proximidades dos centros de carga, desempenham papel estratégico relevante, pois contribuem para a segurança do SIN. Em períodos de condições hidrológicas desfavoráveis, as usinas térmicas são despachadas, permitindo o armazenamento de água nos reservatórios das usinas hidrelétricas, para assegurar o atendimento futuro.

A coordenação da operação do SIN está embasada na interdependência operativa entre as usinas, na interconexão dos sistemas elétricos, e na integração dos recursos de geração e transmissão.

A interdependência operativa resulta do aproveitamento conjunto dos recursos hidroelétricos, por meio da construção e da operação de usinas e reservatórios localizados em cascata em várias bacias hidrográficas. Dessa forma, a operação de determinada usina não só depende das vazões liberadas a montante por outras usinas – eventualmente pertencentes a outras empresas – como também afeta as usinas a jusante.

A interconexão dos sistemas elétricos, através da malha de transmissão, propicia a transferência de energia entre subsistemas, permite a obtenção de ganhos sinérgicos – com o uso ótimo dos recursos hidrológicos e o despacho ótimo hidrotérmico – e explora a diversidade de regime hidrológico das bacias. A integração dos recursos de geração e transmissão permite o atendimento ao mercado com segurança e economicidade. [1]

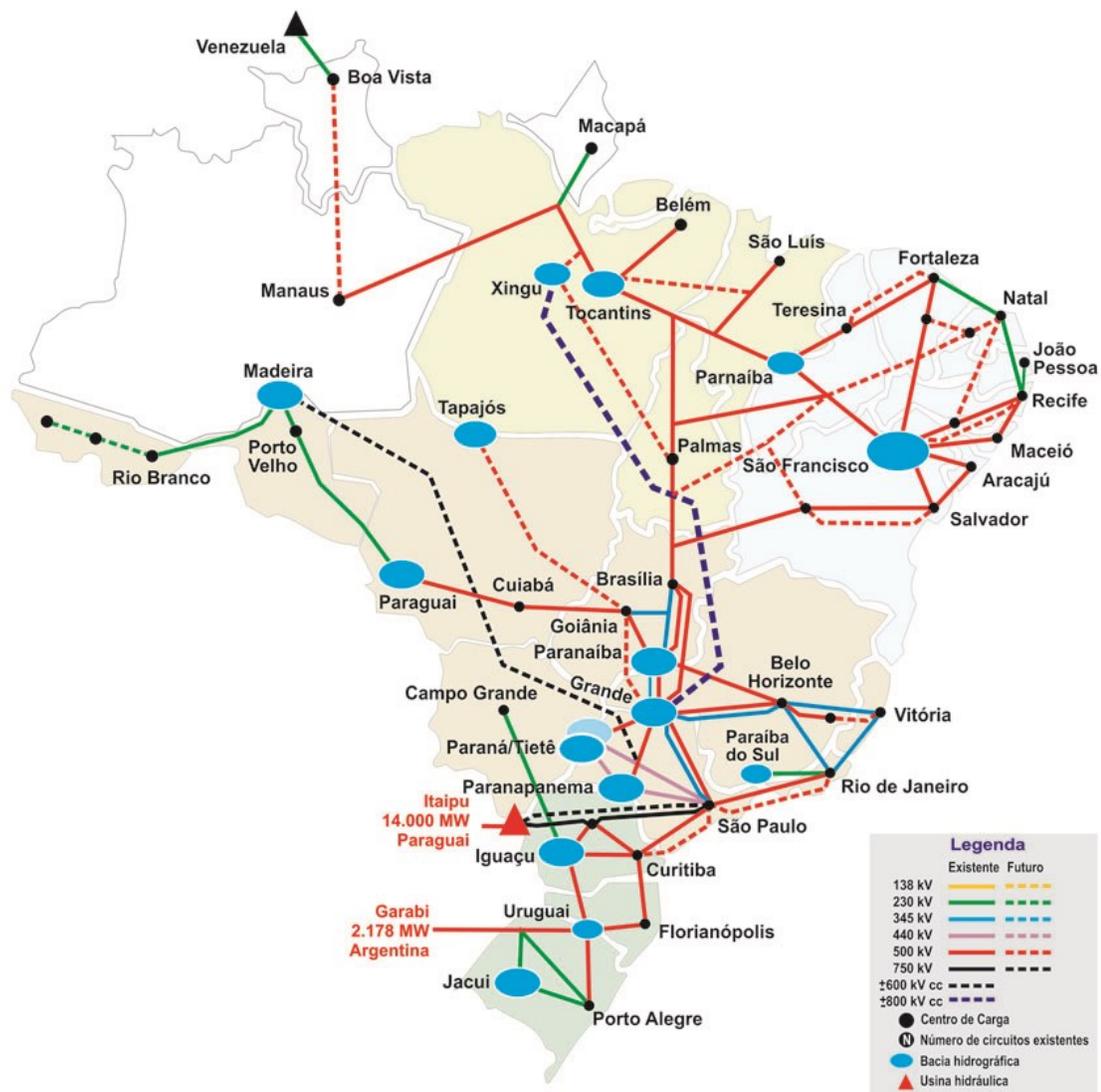
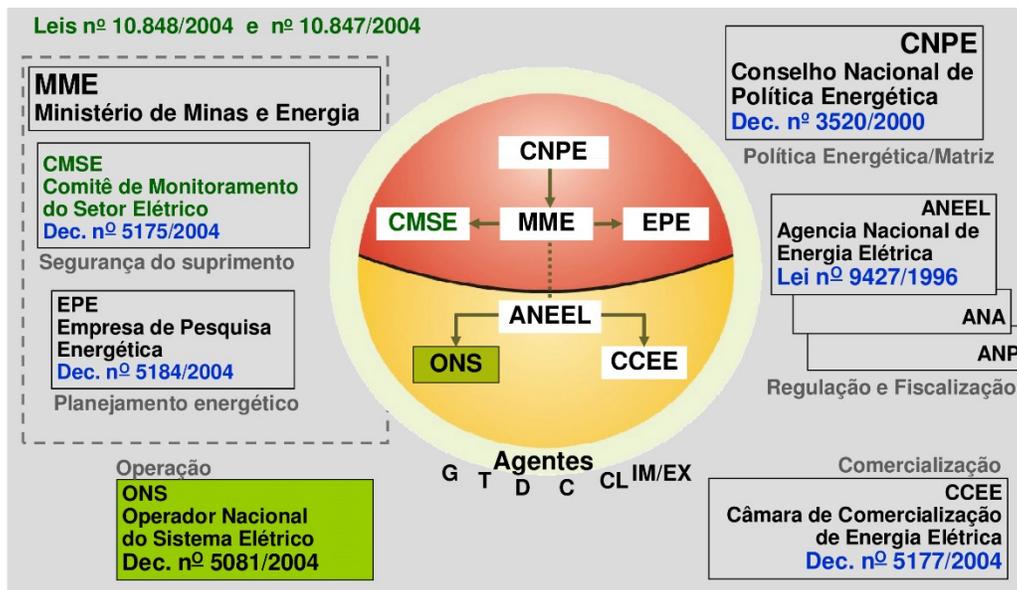


Figura 2.1 - Integração eletroenergética no Brasil [1]

2.2.1. Modelo do setor elétrico

O modelo do setor elétrico brasileiro, que institucionaliza e define responsabilidades entre as entidades da atual estrutura, tem por diretrizes básicas a Proposta do Modelo Institucional do Setor Elétrico (Resolução CNPE nº 005, de 21 de julho de 2003), que versa sobre:

- Prevalência do Conceito de Serviço Público para a produção e distribuição de energia elétrica aos consumidores cativos;
- Modicidade Tarifária;
- Restauração do Planejamento da Expansão do Sistema;
- Transparência no processo de licitação permitindo a contestação pública, por técnica e preço, das obras a serem licitadas;
- Mitigação de riscos sistêmicos;
- Manutenção da operação coordenada e centralizada necessária e inerente ao sistema hidrotérmico brasileiro;



• Figura 2.2 - As principais instituições do modelo do setor elétrico. [1]

- Universalização do acesso e do uso dos serviços de eletricidade;
- Modificação no processo de licitação da concessão do serviço público de geração priorizando a menor tarifa.

A Figura 2.2 ilustra o relacionamento das principais instituições do modelo do setor elétrico

O Conselho Nacional de Política Energética – CNPE é o órgão de assessoramento do Presidente da República para a formulação de políticas nacionais e diretrizes de energia voltadas, entre seus objetivos, para o aproveitamento racional dos recursos energéticos do país, a revisão periódica da matriz energética e o estabelecimento de diretrizes para programas específicos. É órgão interministerial presidido pelo Ministro de Minas e Energia – MME.

O MME encarrega-se da formulação, do planejamento e da implementação de ações do governo federal no âmbito da política energética nacional.

A Empresa de Pesquisa Energética – EPE é uma empresa pública federal dotada de personalidade jurídica de direito privado e vinculada ao MME. Tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético. Elabora os planos de expansão da geração e transmissão da energia elétrica.

O Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico – CMSE é constituído no âmbito do MME e está sob sua coordenação direta, com a função precípua de acompanhar e avaliar permanentemente a continuidade e a segurança do suprimento eletroenergético em todo o território nacional.

A Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE é uma pessoa jurídica de direito privado, sem fins lucrativos, sob regulação e fiscalização da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, que tem a finalidade de viabilizar a comercialização de energia elétrica no SIN e de administrar os contratos de compra e venda de energia elétrica, sua contabilização e liquidação.

A ANEEL é uma autarquia sob regime especial, vinculada ao MME, que tem a finalidade de regular e fiscalizar a produção, a transmissão, a distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do governo federal.

O ONS, por sua vez, é uma associação civil de direito privado, sem fins lucrativos, autorizado a executar as atividades de coordenação e controle da operação da geração e da transmissão de energia elétrica, no âmbito do SIN.

Os agentes relacionados com a operação do SIN não constam na figura anterior, porém se relacionam direta ou indiretamente com todas as instituições apresentadas. [1]

2.2.2. Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS

O ONS se compõe de membros associados e membros participantes – conforme Estatuto do ONS (Resolução Autorizativa ANEEL n° 328, de 12 de agosto de 2004) –, quais sejam os agentes de geração, de transmissão, de distribuição, de importação e de exportação de energia elétrica, consumidores livres e potencialmente livres, conselho de consumidores e MME.

Instituído pela Lei n° 9648, de 27 de maio de 1998, e pelo Decreto n° 2655, de 2 de julho de 1998, o ONS teve seu funcionamento autorizado pela Resolução ANEEL n° 351, de 11 de novembro de 1998.

O ONS, no exercício de suas atribuições legais, executa atividades com os objetivos de:

- promover a otimização da operação do sistema eletroenergético, observados os padrões técnicos, os critérios de confiabilidade e as regras de mercado;
- garantir que todos os agentes tenham acesso à rede de transmissão de forma não discriminatória; e
- contribuir, de acordo com a natureza de suas atividades, para que a expansão do sistema eletroenergético se faça ao menor custo e vise às melhores condições operacionais futuras. [1]

2.3. Definições dos Itens de Qualidade de Energia

Qualidade de energia elétrica (QEE) pode ser definida como a ausência relativa de variações de tensões provocadas pelo sistema da concessionária, particularmente a ausência de desligamentos, flutuações de tensão, surtos e harmônicos (este pelo lado do cliente, medidos no ponto de entrega de energia (fronteira entre as instalações da concessionária e as do consumidor).

Em um sistema elétrico trifásico ideal, as tensões em qualquer ponto deveriam ser, de forma permanente, perfeitamente senoidais, equilibradas, e com amplitude e frequência constantes. Qualquer desvio, acima de certos limites, na característica desses parâmetros pode ser considerado como uma perda de qualidade de energia. Em outras palavras, existe um problema de QEE sempre que ocorre um desvio na forma de onda da tensão de alimentação. Portanto, a QEE, na maioria dos casos, poderia ser representada pela qualidade da tensão elétrica do ponto onde a carga está ligada.

Por outro lado, a natureza das cargas conectadas à rede de distribuição cujas correntes solicitadas são também senoidais, são ditas lineares e apresentam formas de onda de corrente e tensão, conforme Figura 2.3 (a). Para outras cargas, chamadas de não lineares (ou especiais), as correntes são distorcidas (Figura 2.3 (b)).

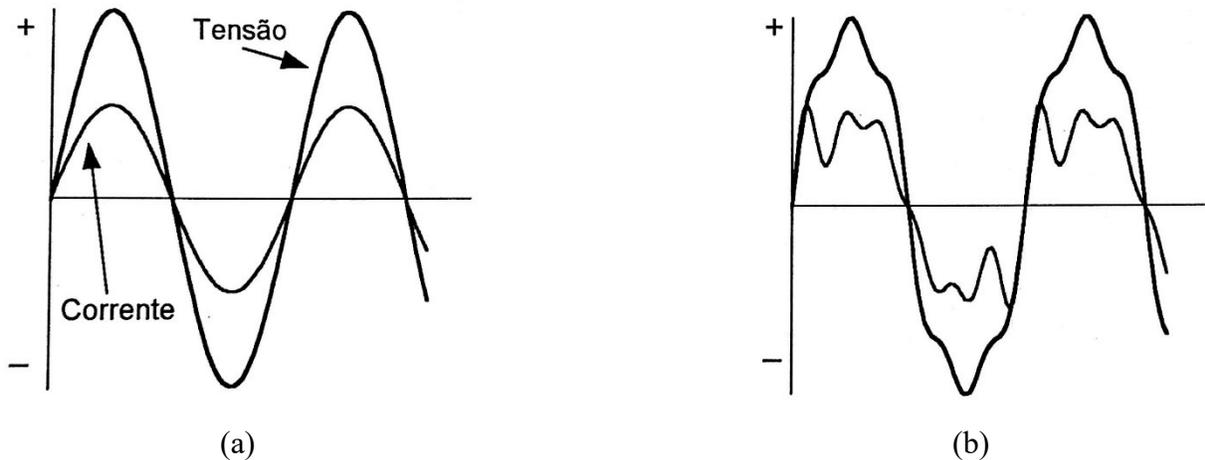


Figura 2.3 - Formas de Ondas de carga linear e não linear

Assim, a qualidade de energia pode ser caracterizada por um conjunto de parâmetros, relacionados com a qualidade de tensão e corrente.

A qualidade da tensão pode ser definida através de quatro parâmetros principais:

- Frequência;
- Forma de onda (Harmônicos);
- Amplitude da tensão;
- Desequilíbrio de tensão.

2.4. Flutuação ou Oscilações de Tensão

As flutuações de tensão correspondem a variações sistemáticas dos valores eficazes da tensão de suprimento dentro da faixa compreendida entre 0,95 e 1,05 pu. Tais flutuações são geralmente causadas por cargas industriais e manifestam-se de diferentes formas, a destacar:

- a) Flutuações Aleatórias: causadas por fornos a arco, onde as amplitudes das oscilações dependem do estado de fusão do material e do nível de curto-circuito da instalação.
- b) Flutuações Repetitivas: causadas por máquinas de solda, laminadores, elevadores de minas e ferrovias.
- c) Flutuações Esporádicas: causadas pela partida direta de grandes motores.

Os principais efeitos nos sistemas elétricos, resultados das oscilações causadas pelos equipamentos mencionados anteriormente, são oscilações de potência e torque das máquinas elétricas, queda de rendimento dos equipamentos elétricos, interferência nos sistemas de proteção, e efeito *flicker* ou cintilação luminosa.

Os conceitos aplicados aos indicadores de flutuação de tensão são [6]:

- a) Severidade de *flicker Pst* (*Probability Short Term*): valor representativo da severidade do *flicker* associado à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 10 minutos. Por convenção para efeito de apresentação dos valores de *Pst* na presente dissertação, os valores medidos serão referenciados ao instante inicial do período de 10 minutos. Exemplo: valor de *Pst* associado ao período

compreendido entre 00:00 horas e 00:10 horas, será indicado como P_{st} 00:00 horas;

- b) Severidade de *flicker* Plt (*Probability Long Term*): valor representativo da severidade do *flicker* associado à flutuação de tensão verificada num período de 2 horas, determinado a partir dos níveis de P_{st} conforme as seguintes expressões:

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

P_i ($i = 0,1; 1; 3; 10; 50$) corresponde ao nível de sensação de cintilação que foi ultrapassado durante i % do tempo, obtido a partir da função de distribuição acumulada complementar, de acordo com o procedimento estabelecido nas Normas IEC (International Electrotechnical Commission): IEC 61000-4-15. Flickermeter – Functional and Design Specifications.

Complementarmente, o indicador Plt corresponde a um valor representativo de doze amostras consecutivas de P_{st} , como estabelecido pela expressão a seguir:

$$Plt = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} P_{st_i}^3}$$

- c) Flickerímetro: instrumento para medição da severidade de *flicker*, P_{st} ou Plt , associado à flutuação de tensão existente no ponto de avaliação. Os valores de P_{st} ou Plt medidos pelo flickerímetro são expressos em pu tendo como referência a curva de P_{st} unitária referente a uma lâmpada incandescente padrão de 60W – 230V ou 60W - 120 V;
- d) P_{stMax} ou $PltMax$: maior valor de P_{st} ou Plt registrado num período contínuo de edição;
- e) $P_{st95\%}$ ou $Plt95\%$: valor de P_{st} ou Plt que foi superado por apenas 5% dos registros obtidos num período contínuo de medição;
- f) $P_{stD95\%}$: valor do indicador de severidade de *flicker* P_{st} que foi superado em apenas 5 % dos registros obtidos no período de 1 dia;
- g) $PltS95\%$: valor do indicador de severidade de *flicker* Plt que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de uma semana, 7 (sete) dias completos e consecutivos.

2.5. Desequilíbrio de Tensão

Os desequilíbrios podem ser definidos como o desvio [6] máximo da média das correntes ou tensões trifásicas, dividido pela média das correntes ou tensões trifásicas, expressado em percentual. As origens destes desequilíbrios estão geralmente nos sistemas de distribuição, os quais possuem cargas monofásicas distribuídas inadequadamente, fazendo surgir no circuito tensões de sequência negativa. Este problema se agrava quando consumidores alimentados de forma trifásica possuem uma má distribuição de carga em seus circuitos internos, impondo correntes desequilibradas no circuito da concessionária.

Tais fatores fazem com que a qualidade no fornecimento de energia seja prejudicada, e alguns consumidores tenham em suas alimentações um desequilíbrio de tensão. Estes

desequilíbrios de tensão podem apresentar problemas indesejáveis na operação de equipamentos, dentre os quais se destacam:

- a) Problemas de desequilíbrio de tensão em motores de indução: Para as análises dos efeitos de tensões desequilibradas aplicadas a um motor de indução, consideram-se somente os efeitos produzidos pelas tensões de sequência negativa, que somados aos resultados da tensão de sequência positiva, resultam num conjugado pulsante no eixo da máquina e no sobreaquecimento da máquina. Como consequência direta desta elevação de temperatura, tem-se a redução da expectativa de vida útil dos motores, visto que o material isolante sofre uma deterioração mais acentuada na presença de elevadas temperaturas nos enrolamentos;
- b) Problemas de desequilíbrio de tensão em máquinas síncronas: Como no caso anterior, a corrente de sequência negativa fluindo através do estator de uma máquina síncrona, cria um campo magnético girante com velocidade igual à do rotor, porém, no sentido contrário ao de rotação definido pela sequência positiva. Consequentemente, as tensões e correntes induzidas nos enrolamentos de campo, de amortecimento e na superfície do ferro do rotor, terão uma frequência igual a duas vezes à da rede, aumentando significativamente as perdas no rotor;
- c) Problemas de desequilíbrio de tensão em retificadores: Uma ponte retificadora do tipo corrente alternada/corrente contínua (CA/CC), controlada ou não, injeta na rede CA, quando esta opera sob condições nominais, correntes harmônicas características (de ordem 5^a, 7^a, 11^a, 13^a, etc.). Entretanto, quando o sistema alimentador se encontra desequilibrado, os retificadores passam a gerar, além das correntes harmônicas características, a terceira harmônica e seus múltiplos (3^a, 6^a, 9^a, 12^a, etc.). A presença da terceira harmônica e de seus múltiplos no sistema elétrico é extremamente indesejável, pois possibilita manifestação de ressonâncias não previstas em outros equipamentos ligados a esta rede, podendo vir a causar danos.[6]

2.6. Distorções na Onda Senoidal ou Harmônicos

A geração de energia elétrica, no Brasil, se dá através da frequência fundamental de 60 Hz, de formas de onda perfeitamente senoidais. Harmônicos é o nome dado para uma distorção na forma de onda do sinal elétrico que não possui somente a frequência fundamental em sua composição, mas também, sinais cujas frequências são múltiplas da fundamental. [7]

A explicação do aparecimento de harmônicos no sistema elétrico está diretamente ligada ao crescimento e uso disseminado das chamadas cargas não lineares. Estas últimas, por sua vez, não apresentam proporcionalidade entre a tensão aplicada com a respectiva corrente.

Os harmônicos são conhecidos no sistema elétrico há décadas. Mas, até antes dos equipamentos com base na eletrônica de potência surgirem (conversores estáticos), os elementos não lineares em circuitos elétricos eram relativamente pequenos, fazendo com que a sua influência no sistema fosse insignificante. Atualmente, com o crescimento baseado na eletrônica de potência, a questão dos harmônicos preocupa pela sua influência no sistema como um todo.

2.6.1. Cargas Lineares

As cargas lineares seguem a Lei de Ohm, onde sua corrente é proporcional à tensão aplicada dividida pela sua impedância. Assim, caso a forma de onda da tensão seja senoidal, a da corrente também será. A figura 2.4 mostra uma relação entre a tensão e a corrente para um tipo de carga linear.

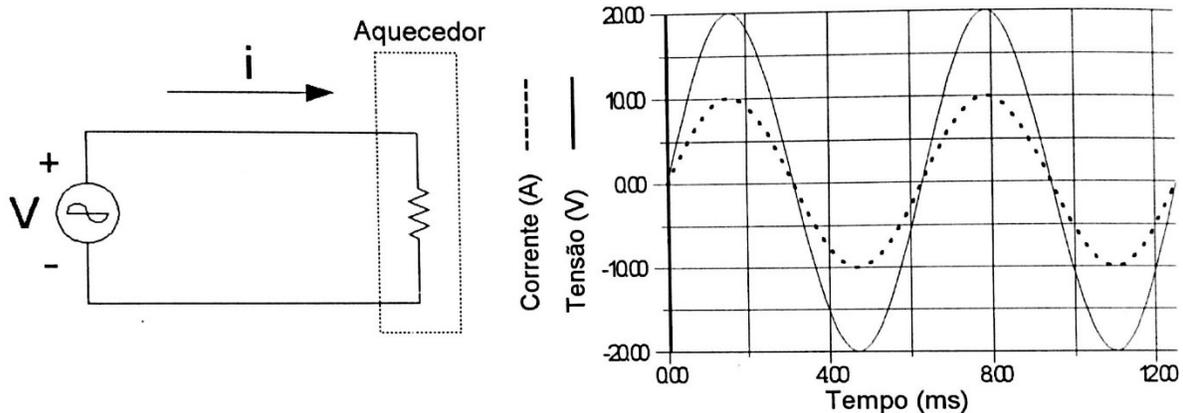


Figura 2.4 - Consumo de um aquecedor de 1kW. [7]

2.6.1. Cargas Não Lineares

A eletrônica de potência disponibilizou para vários setores, como escritórios, indústrias e residências, diversos equipamentos capazes de controlar: iluminação variável, velocidade ajustável de motores, etc. Desse modo, aproximadamente 50% da energia elétrica passa por um dispositivo de eletrônica de potência antes de ser realmente utilizada. Essa eletrônica faz uso de diodos, tiristores, transistores, sendo que praticamente todos eles operam em modo de interrupção. Isto significa que funcionam essencialmente em dois estados: Condução e Bloqueio. O primeiro corresponde ao período em que o dispositivo permite a passagem de corrente. O segundo estado tem operação inversa ao primeiro, bloqueando a passagem da corrente. Deste modo, a tensão na carga é interrompida pelos semicondutores e deixa de ser senoidal, podendo o usuário variar o instante de condução e conseqüentemente a tensão e a corrente no circuito.

Assim sendo, a forma de onda da corrente em um circuito com cargas não lineares apresenta-se de forma não senoidal. A figura 2.5 mostra um dispositivo para controlar corrente em uma carga não linear constituída por uma resistência e uma indutância. A tensão é interrompida pelos semicondutores e deixa de ser senoidal. A corrente é nula em determinados intervalos de tempo. Ao resultar na circulação de correntes não senoidais pelo circuito, fala-se da distorção harmônica devido à carga não linear.

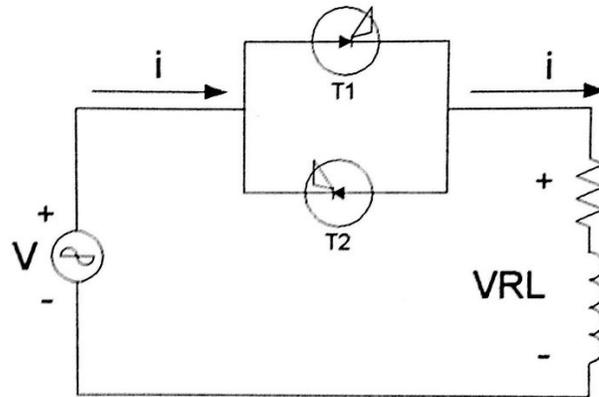


Figura 2.5 - Dispositivo semiconductor de controle da corrente e da tensão - Carga Não Linear. [7]

2.6.1. Análise Matemática dos Harmônicos

Os sinais, tanto de tensão quanto de corrente, podem ser decompostos em componentes harmônicos. Para tanto, utiliza-se a Série de Fourier de uma função periódica, no domínio da frequência, dada pela equação a seguir:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \text{sen}\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right)$$

Onde:

$x(t)$ = função periódica a ser decomposta em Série de Fourier;

a_0 = componente contínua ou valor médio do sinal;

a_n = amplitude de pico das componentes de frequência $n\omega$;

T = período da forma de onda do sinal na frequência fundamental.

Na eletrotécnica, costuma-se utilizar valores eficazes ao invés de valores de pico. Desse modo, a equação fica:

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \sqrt{2} \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + B_n \sqrt{2} \text{sen}\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right)$$

sendo A_n e B_n valores eficazes do sinal. Estes coeficientes são obtidos através das seguintes equações:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

$$A_n = \frac{2}{\sqrt{2} T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt$$

$$B_n = \frac{2}{\sqrt{2} T} \int_0^T f(t) \text{sen}(n\omega t) dt$$

Cada harmônico tem a sua fase e o seu módulo. Em geral, nos sistemas elétricos, os harmônicos de ordem par são nulos, devido aos dispositivos que atuam de forma simétrica e periódica. Os harmônicos de ordem elevada são pequenos, fundamentalmente porque as variações são suavizadas pela presença de indutâncias no sistema. A presença de harmônicos

pares é sintoma de que o controle dos semicondutores está desajustado e a existência de harmônicos elevados pode ser indício de variações bruscas de tensão ou corrente.

A distorção harmônica pode ser quantificada de várias formas. Uma das mais comuns é a Distorção Harmônica Total – THD (*Total Harmonic Distortion*). Ela representa a distorção dividida a todos os harmônicos presentes em um sinal. É definida como sendo uma porcentagem da frequência fundamental e é calculada através da equação:

$$THD = \sqrt{\frac{\text{Somatório de Todos os Quadrados das Amplitudes de Todos os Harmônicos do Sinal}}{\text{Quadrado da Amplitude da Frequência Fundamental do Sinal}}} \cdot 100\%$$

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} C_n^2}{C_1^2}} \cdot 100\%$$

onde C_1 e C_2 são as amplitudes dos harmônicos de frequências fundamental e de ordem “n”, respectivamente.

Deste modo, basta substituir os valores de C_n por valores de amplitudes de tensão ou corrente para se determinar a Distorção Harmônica Total de Tensão (THD_v) ou a Distorção Harmônica de Corrente (THD_i), respectivamente.

Obtém-se as seguintes equações mais especificamente:

Distorção Harmônica Total de Tensão (THD_v):

$$THD_v = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{V_1^2}} \cdot 100\%$$

Distorção Harmônica de Corrente (THD_i):

$$THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}} \cdot 100\%$$

O valor total da corrente em um circuito contendo uma carga linear é dado pela equação abaixo, onde I_2, \dots, I_N são as correntes harmônicas e I_1 é a corrente fundamental.

$$I_{TOTAL} = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_N^2}$$

Assim, define-se a Distorção Total Harmônica de corrente, conforme [IEEE-519], como sendo:

$$I_{TOTAL}(\%) = 100 \times \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_N^2}}{I_1}$$

Ou, conforme [IEC-1000],

$$I_{TOTAL}(\%) = 100 \times \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_N^2}}{I_{TOTAL}}$$

A figura 2.6 mostra um sinal contendo as frequências fundamental, de 3ª, 5ª e 7ª ordens e o espectro de frequência do sinal. Neste espectro, pode-se verificar a ordem dos harmônicos existentes no sinal de tensão com as suas respectivas amplitudes.[7]

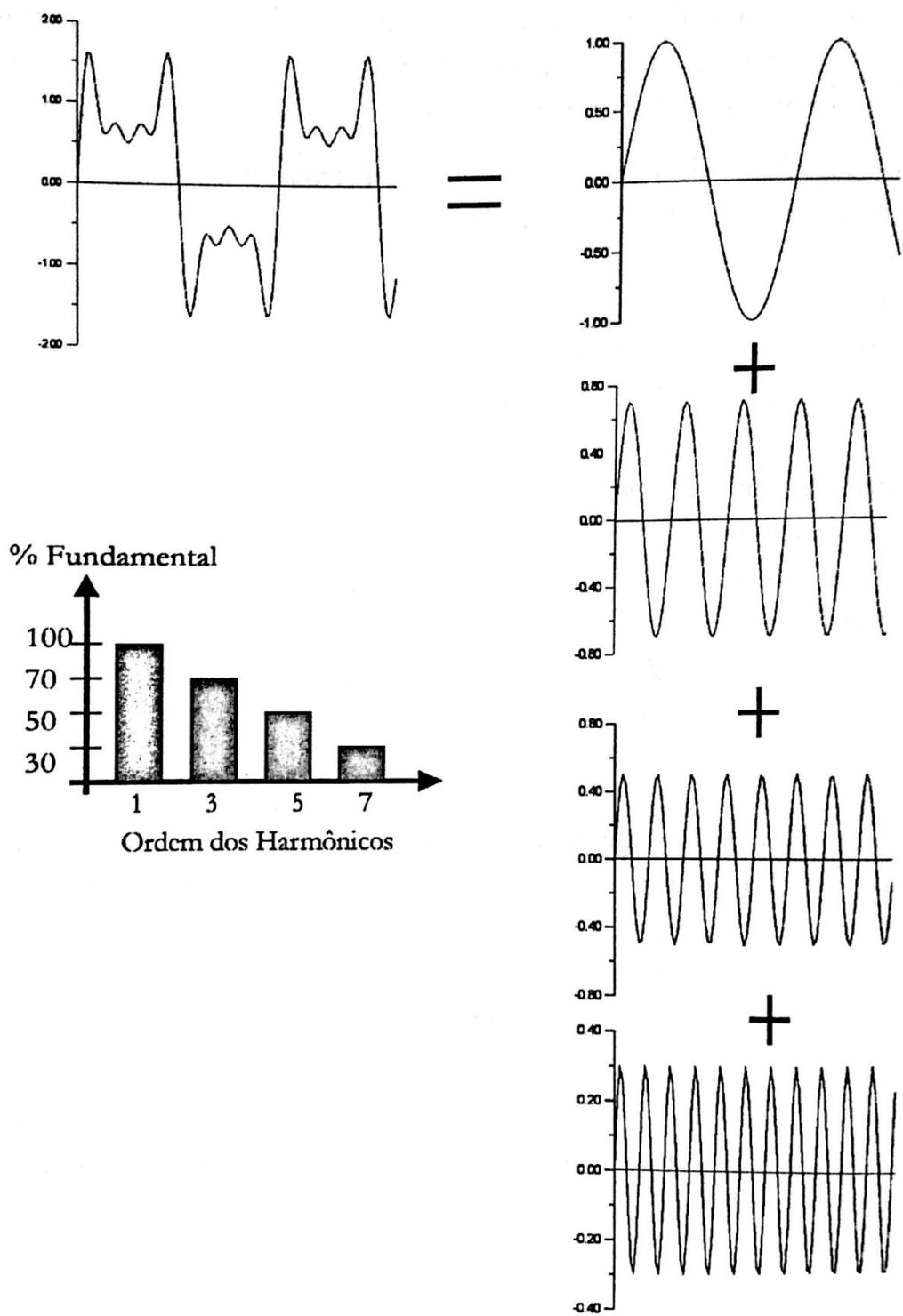


Figura 2.6- Sinal de tensão com harmônicos ímpares. [7]

Vários são os tipos de cargas não lineares que geram frequências harmônicas. A maioria delas trabalha com correntes não senoidais. Existem também outros tipos de fenômenos ou arranjos que podem levar um dispositivo ou equipamento a se comportar como uma carga não linear. Entre eles, pode-se citar:

- Saturação do núcleo magnético de transformadores;
- Corrente *inrush* do transformador;
- Fornos elétricos a arcos;
- Pontes trifásicas;
- Computadores e impressoras;
- Computadores e impressoras;
- Compensadores estáticos [VAr];
- Televisores;
- Fornos de micro-ondas;
- Reatores eletrônicos e eletromagnéticos;
- Conversores DC;
- Controladores de velocidade de motores.

Os conversores estáticos de potência são as principais fontes de correntes harmônicas que causam grande preocupação na atualidade. Englobando inversores e retificadores, eles podem ser divididos em três grupos com relação à geração de harmônicos: conversores de grande, média e baixa potência. Este trabalho se atenta a conversores de grande potência que são mais presentes no meio industrial e em geradores eólicos.

3. Campanha de Qualidade de Energia

3.1. Introdução

Campanha de Qualidade é o nome dado ao procedimento de gerenciamento de indicadores de qualidade de energia em um certo ponto de acoplamento comum (PAC). O principal objetivo deste gerenciamento é a prevenção de violações dos valores de referência globais estabelecidos no submódulo 2.2. A responsabilidade da gerência é do ONS a quem compete manter o desempenho da rede básica dentro dos padrões estabelecidos.

Os indicadores relacionados aos fenômenos de flutuação, desequilíbrio e distorção harmônica da tensão devem ser obtidos através de campanhas de medição que têm como objetivo identificar barramentos cujo desempenho esteja aquém do estabelecido.

O ONS contratou o CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) para elaborar as metodologias e os procedimentos a serem seguidos nestas campanhas de medição de indicadores de flutuação, desequilíbrio e distorção harmônica de tensão. Existem dois tipos de campanhas:

- Campanha “Normal” – O serviço será contratado pelo ONS. O agente transmissor detentor do ativo será convidado a apresentar proposta. Os indicadores serão apurados em intervalos de 10 minutos durante sete dias consecutivos, os resultados enviados para o ONS e disponibilizados para todos os agentes.
- Campanha “Extraordinária” – Nas barras da Rede Básica onde houver registro de reclamações ou onde a presença de cargas não lineares ou especiais, cujo desempenho implique na ocorrência de valores expressivos dos indicadores, podem ser contratadas campanhas de medição contínuas. Nestes casos o ONS contratará preferencialmente o agente transmissor proprietário dos ativos. Os indicadores serão apurados em intervalos de 10 minutos durante um período de tempo a ser definido.

O ONS exige que esses estudos sejam realizados nas fases pré-operacional (Campanha de Tensão) e pós operacional (Campanha de Tensão e Corrente) da usina acessante.

3.2. Gerenciamento de Indicadores: Observações para Medições

De forma a se ter procedimentos padronizados nas campanhas de medição é necessário a observância de diversas precauções. Lembra-se que muitas vezes os equipamentos de medição ficarão armazenando os dados no campo e o prestador de serviços, ou a concessionária só terão acesso a estes após o período de sete dias. Portanto, a observância dos cuidados relatados visa minimizar o risco da obtenção de dados errados, não disponíveis, ou não válidos que necessariamente obrigariam a repetir a campanha por mais sete dias.

3.2.1. Período de Monitoramento

O período de monitoramento deve ser escolhido de modo a representar uma semana típica de operação do Sistema Elétrico e consumidores. Portanto, deve ser escolhido um período sem feriados ou desligamentos programados que possam tirar a representatividade dos dados obtidos.

Eventuais problemas de origem sistêmica ocorridos durante o período de monitoramento, (como por exemplo: manobras não programadas no sistema ou em cargas próximas que possam comprometer a representatividade da amostra diária) poderão ser compensadas com a repetição da monitoramento pelo período correspondente. Estes períodos terão a discretização mínima de um dia.

3.2.2. Desequilíbrio de Tensão

Em sistemas trifásicos, as tensões geradas nas três fases têm mesma amplitude e são defasadas de 120 graus elétricos. No entanto, as tensões percebidas nos sistemas de transmissão, distribuição e no consumidor final podem possuir diversos graus de desequilíbrios.

O principal efeito de distúrbios devidos a desequilíbrios de tensão na rede elétrica é o sobreaquecimento de motores trifásicos bem como sua interferência na proteção destes dispositivos. O desequilíbrio de tensão pode produzir desequilíbrio de corrente que, por sua vez, pode disparar a proteção de grandes motores trifásicos.

Entre as causas de desequilíbrios em sistemas de transmissão destacam-se:

- Subestações de onde partam, do barramento secundário, alimentações de ferrovias ou grandes veículos de tração monofásicos;
- Subestações de onde partam, do barramento secundário, alimentações de usinas siderúrgicas que utilizem fornos a arco;
- Existência de transformadores que operem, ainda que temporariamente, com uma fase aberta.
- Transposição incompleta ou assimétrica de linhas de transmissão.
- Operação de bancos de capacitores trifásicos com fusíveis queimados.

O submódulo 2.2 dos Procedimentos de Rede estabelece [2]:

- O indicador K é o resultado da divisão entre a componente de sequência negativa e a componente de sequência positiva da tensão expressa em percentagem desta última.
- A expressão do cálculo de desequilíbrio é:

$$FD\% = 100 \cdot \frac{V_-}{V_+}, \text{ ou}$$

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

Sendo:

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

FD% = Fator de desequilíbrio,

V- = Magnitude da tensão de sequência negativa (RMS),

V+ = Magnitude da tensão de sequência positiva (RMS),

Vab, Vbc, Vca = Magnitudes das tensões trifásicas de linha (RMS).

- O limite global do indicador K, ou padrão, corresponde a um nível de 2%. Esse valor serve para referência do planejamento elétrico em termos de QEE e que,

regulatoriamente, será estabelecido em resolução específica, após período experimental de coleta de dados.

- O nível representativo do indicador, que deve ser comparado com o padrão, na campanha de medição é obtido da seguinte forma:
 - Para cada período de 24 horas, estabelece-se o valor que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos.
 - O maior dos valores assim obtidos, nos sete dias da campanha, resulta no indicador KD95% que deve ser comparado ao padrão.
- Caso as componentes de tensão de sequência negativa variem de forma intermitente e repetitiva, será permitido que os limites especificados sejam ultrapassados até o dobro desde que a duração cumulativa, acima dos limites estabelecidos, não ultrapasse 5% do período de monitoramento.
- Os agentes devem agir junto aos seus usuários para evitar que cargas desbalanceadas ou equipamentos operando de forma desequilibrada comprometam o limite global estabelecido.

A apresentação dos resultados obtidos através da medição do indicador desequilíbrio de tensão é uma seção do documento da campanha de qualidade de energia e deve conter um gráfico do tipo linha mostrando a tendência do indicador K durante os sete dias de medição. A Figura 3.1 mostra um exemplo que foi feito através de uma planilha de cálculo em que na primeira coluna consta o dia e a hora da medição e na segunda coluna o indicador K correspondente.

Um histograma dos valores do indicador K obtidos durante a campanha. O histograma deverá conter um eixo horizontal com pelo menos dez categorias da variável aleatória K e dois eixos verticais: o primeiro contendo o número de ocorrências em cada categoria e o segundo contendo a probabilidade acumulada. A Figura 3.2 mostra o exemplo de um histograma feito com o auxílio de uma planilha de cálculo para os valores do indicador K mostrados na Figura 3.2.

E finalmente uma tabela contendo os sete valores de $K_{d95\%}$ e o valor de KD95% que será comparado ao padrão global.

É necessário também apresentar as seguintes informações:

- Substação(ões) medida(s);
- Barramento(s) medido(s);
- Período de medição indicando a hora inicial, com precisão de segundos, do primeiro dia que definirá cada período de 24 horas;
- Descrição das principais características do medidor utilizado:
 - Como se obtém o indicador K a cada 10 minutos: uma única amostra, média de várias amostras, integralização contínua, número de ciclos para cálculo de FFT e todas as outras informações disponíveis;
 - De que forma se externaliza os resultados a cada 10 minutos: papel impresso, arquivos gravados, conversão destes arquivos para o formato de planilha de cálculo, e outras situações. Ressalta-se que é imprescindível que a externalização do instrumento forneça o indicador K a cada 10 minutos bem como a data e hora de obtenção do mesmo.[3]

Tendência - K

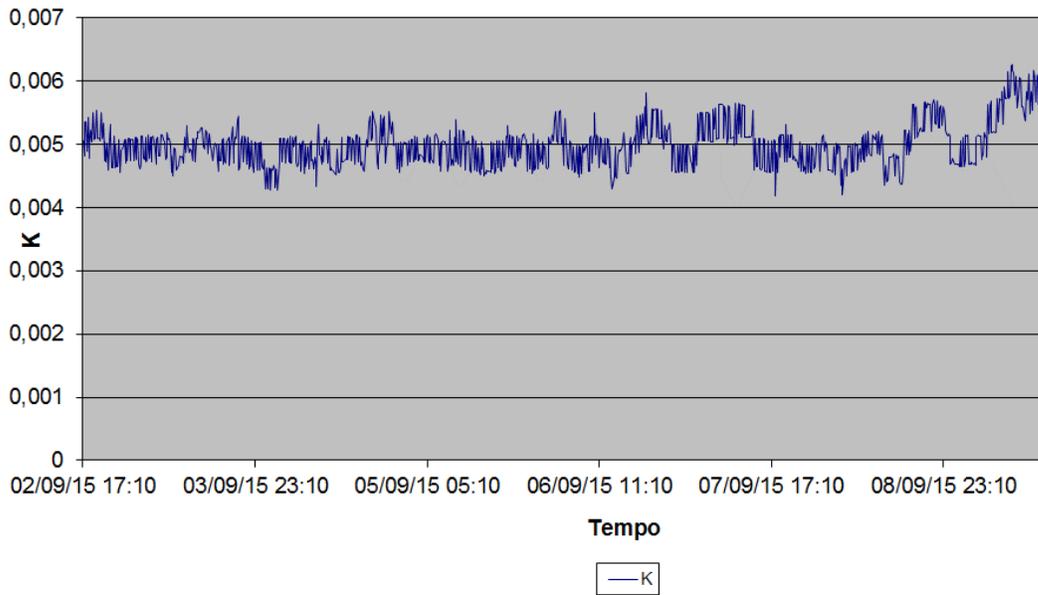


Figura 3.1 - Exemplo de gráfico de linha mostrando a tendência do indicador K

Histograma - K

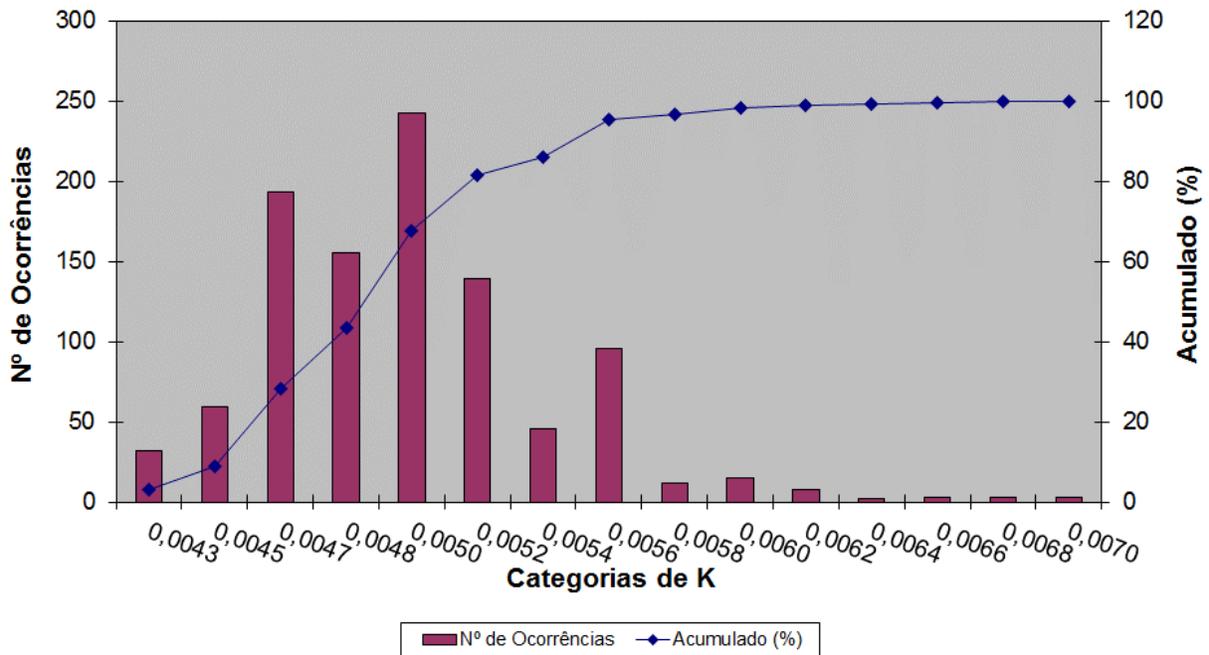


Figura 3.2 - Exemplo de histograma do indicador K durante os sete dias da campanha

3.2.3. Flutuação de Tensão

Para os critérios da campanha de qualidade apenas as cintilações luminosas (*flicker*) associadas às flutuações de tensão serão consideradas. Seus níveis de severidade são quantificados pelos indicadores Pst e Plt.

Devido ao caráter subjetivo do incômodo causado pela cintilação luminosa, adotaram-se dois limites para cada indicador no item anterior: Limite Global Inferior e Limite Global Superior; a Tabela 3.1 mostra estes padrões:

Tabela 3.1 - Qualidade da tensão quanto a flutuação

Qualidade da Tensão	Indicadores	Ação
Adequada	PstD95% e PltS95% < Limite Global Inferior	Nada a fazer
Estado de Observação	Limite Global Inferior < PstD95% ou PltS95% ≤ Limite Global Superior	Caso haja queixas de consumidores, ONS busca soluções junto aos agentes
Inadequada	PstD95% ou PltS95% > Limite Global Superior	ONS define ações mitigadoras após investigações

Os valores dos Limites Globais Inferiores e Superiores para flutuação de tensão são aqueles mostrados na Tabela 3.2, onde os valores foram definidos para sistemas de tensão secundária de 220 V e FT (Fator de Transferência) é a atenuação esperada entre as Redes Básica e Secundária de distribuição:

Tabela 3.2 - Limites Globais

Limite	PstD95%	PltS95%
Limite Global Inferior	1 pu/FT	0,8 pu/FT
Limite Global Superior	2 pu/FT	1,6 pu/FT

O Fator de Transferência deve ser obtido através da relação entre os indicadores PltS95% da Rede Básica e PltS95% do barramento de distribuição secundária eletricamente mais próximo, obtidos por medição. Caso o FT entre os barramentos em questão sejam desconhecidos, podem-se adotar os seguintes valores típicos:

Tabela 3.3 - Valores Típicos dos Fatores de Transferência (FT)

Tensão Nominal do Barramento	FT
≥ 230 kV	0,65
≥ 69 kV e < 230 kV	0,8
< 69 kV	1,0

Os níveis representativos dos indicadores, que devem ser comparados com os padrões, são obtidos da seguinte forma na campanha de medição:

- Para cada período de 24 horas estabelece-se o valor de Pst que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos. Chamam-se estes novos indicadores de Pstd95%.
- O maior valor do indicador Pstd95% obtido nos sete dias da campanha resulta no indicador PstD95% que deve ser comparado ao padrão.
- Durante os sete dias consecutivos estabelece-se o valor de Plt que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos. O indicador assim obtido chama-se PltS95%, que deve ser comparado ao padrão.

A medição terá de ser realizada no período de sete dias consecutivos, não sendo aceitas interrupções da medição ou descontinuidades nos registros dos indicadores Pst e Plt. Os instrumentos devem fornecer resultados de Pst para cada uma das três fases, em intervalos de 10 minutos, perfazendo um total de 1008 amostras consecutivas (7 dias) de Pst por fase.

Devem ser fornecidos resultados de Plt para cada uma das três fases, em intervalos de 10 minutos, perfazendo um total de 996 amostras consecutivas de Plt por fase.

Os indicadores de Pstd95%, correspondentes ao percentil de 95% das 144 amostras de Pst obtidas para cada fase em um dia de medição, devem ser calculados para cada fase em cada dia de medição, perfazendo um total de 7 valores por fase em cada campanha de medição. O indicador PstD95%, que deve ser comparado ao padrão, será o maior entre os 21 resultados de Pstd95%.

O indicador de PltS95% será o maior valor entre as três fases, correspondentes ao percentil de 95% das amostras de Plt obtidas para cada fase em uma semana de medição.

A apresentação dos resultados obtidos através da medição do indicador flutuação de tensão é uma seção do documento da campanha de qualidade de energia e deve conter três gráficos do tipo linha mostrando a tendência do indicador pst em cada uma das fases durante os sete dias de medição. A Figura 3.3 mostra um exemplo de gráfico tipo linha com o indicador Pst correspondente à fase A de uma campanha de medição de um gerador. O eixo horizontal possui informações de data e hora do registro de Pst, enquanto o eixo vertical possui informações do valor adimensional de Pst.

Três gráficos do tipo linha, mostrando a tendência do indicador Plt em cada uma das fases durante os sete dias de medição. A Figura 3.4 mostra um exemplo de gráfico tipo linha com o indicador Plt correspondente à fase A de uma campanha de medição de um gerador. O eixo horizontal possui informações de data e hora do registro de Plt, enquanto o eixo vertical possui informações do valor adimensional de Plt.

Três histogramas dos valores de Pst obtidos em cada fase medida durante a campanha. Cada histograma deverá conter um eixo horizontal com pelo menos dez categorias da variável aleatória Pst e dois eixos verticais: o primeiro contendo o número de ocorrências em cada categoria e o segundo contendo a probabilidade acumulada. A Figura 3.5 mostra um exemplo de um histograma correspondente aos valores de Pst mostrados no gráfico da Figura 3.3.

Três histogramas dos valores de Plt obtidos em cada fase medida durante a campanha. Cada histograma deverá conter um eixo horizontal com pelo menos dez categorias da variável aleatória Plt e dois eixos verticais: o primeiro contendo o número de ocorrências em cada categoria e o segundo contendo a probabilidade acumulada. A Figura 3.6 mostra um exemplo de um histograma correspondente aos valores de Plt mostrados no gráfico da Figura 3.4.

E finalmente uma Tabela contendo os sete valores de Pstd95% de cada fase durante os sete dias, o valor de PstD95% e o valor de PltS95%. A Tabela 3.4 dá um exemplo de tabela contendo um resumo dos indicadores de flutuação de tensão obtidos na campanha de medição.

É necessário também apresentar as seguintes informações:

- Substação(ões) medida(s);
- Barramento(s) medido(s);
- Período de medição indicando a hora inicial, com precisão de segundos, do primeiro dia que definirá cada período de 24 horas;
- Descrição das principais características do medidor utilizado:
 - Fabricante e modelo do instrumento de medição;
 - Tensão de referência utilizada;
 - Tipo de externalização dos resultados a cada 10 minutos: papel impresso, arquivos gravados, conversão destes arquivos para o formato de planilha de cálculo e outras situações. Ressalta-se que é imprescindível que a externalização do instrumento forneça o indicador Pst a cada 10 minutos, bem como a data e hora de obtenção do mesmo;
- Obtenção dos valores de Plt (medição direta ou pós-processamento).[3]

Tendência - Psta

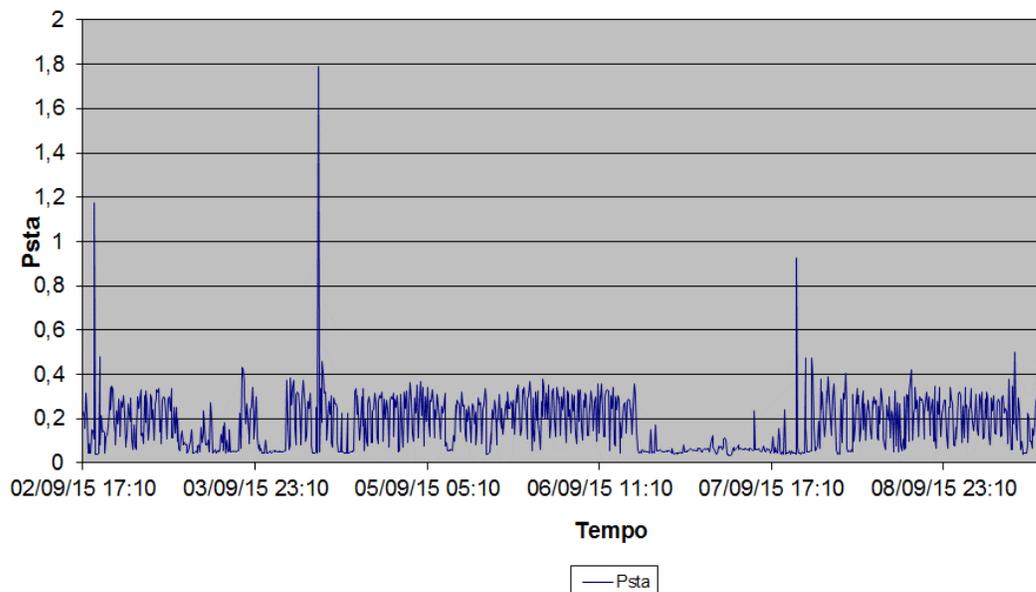


Figura 3.3 - Exemplo de gráfico tipo linha com valores de Pst medidos na fase A de uma campanha de medição de um gerador ao longo de uma semana

Tendência - PIta

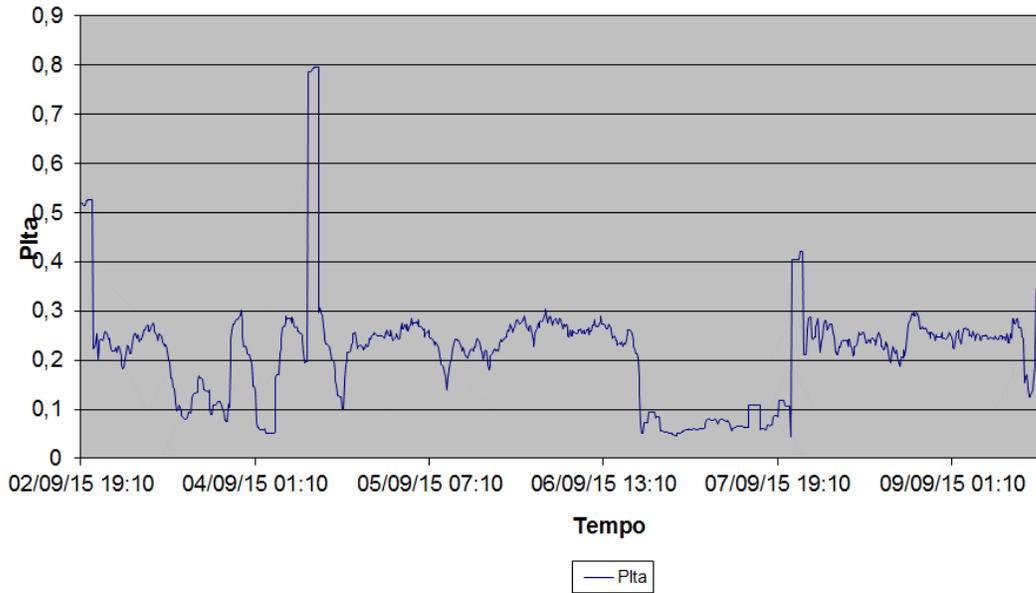


Figura 3.4 - Exemplo de gráfico tipo linha com valores de PIt medidos na fase A de uma campanha de medição de um gerador ao longo de uma semana

Histograma - Psta

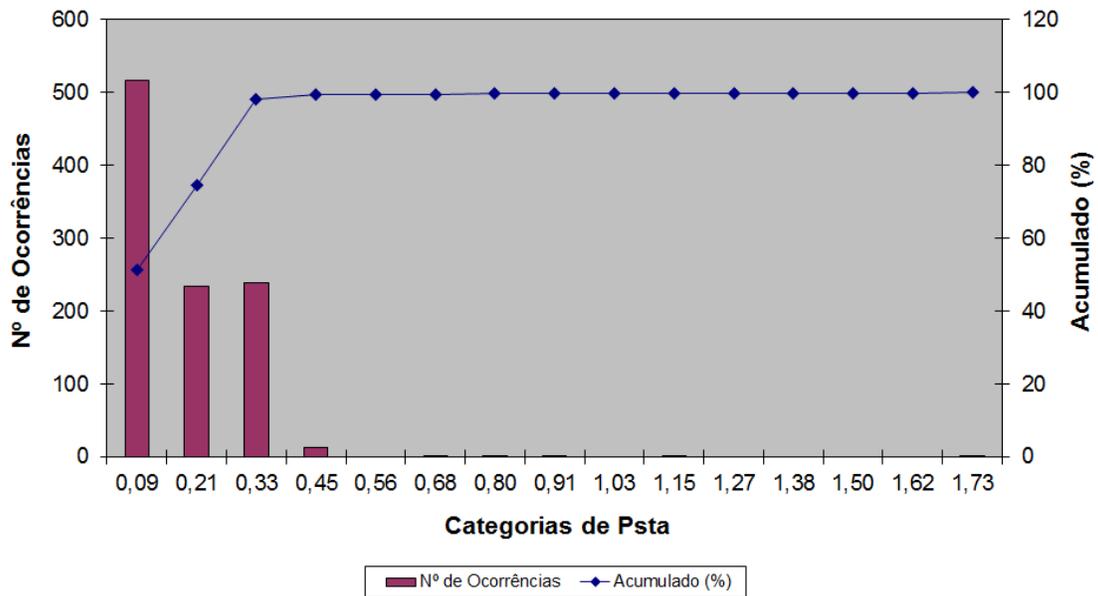


Figura 3.5 - Exemplo de histogramas com valores de Pst medidos na fase A de uma campanha de medição de um gerador ao longo de uma semana

Histograma - Plta

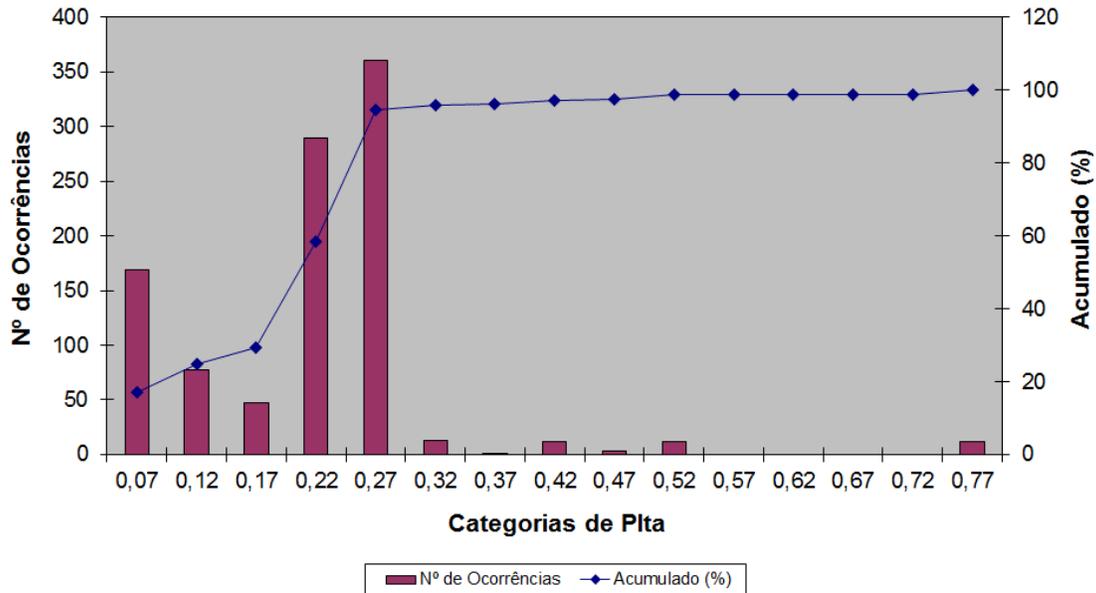


Figura 3.6 - Exemplo de histogramas com valores de Plt medidos na fase A de uma campanha de medição de um gerador ao longo de uma semana

Tabela 3.4 - Tabela com resumo de indicadores de flutuação de tensão obtidos em uma campanha de medição de um gerador ao longo de uma semana

	Pstd 95%							PstD 95%	PltS 95%
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7		
Fase A	0,332067	0,373087	0,32895	0,342024	0,122765	0,355838	0,349254	0,373087	0,349376
Fase B	0,351117	0,360186	0,340483	0,345716	0,140948	0,36668	0,357915		
Fase C	0,334172	0,34948	0,332365	0,35062	0,143895	0,358306	0,357699		

3.2.4. Distorção Harmônica

O indicador para avaliar o desempenho global quanto a harmônicos, em regime permanente, nos barramentos da Rede Básica, corresponde à distorção de tensão harmônica. A distorção harmônica total de tensão é definida pela seguinte equação:

$$DTHT = \sqrt{\sum_{n=2}^{50} V_n^2} (\%)$$

onde V_n é a tensão harmônica, em % da tensão fundamental, dada por $100 \cdot V_n/V_1$, V_n é a tensão harmônica de ordem n e V_1 é a tensão fundamental, ambas em V;

O valor de cada indicador de harmônico (distorção total ou individual) é o valor máximo, dentre as sete amostras obtidas para um período de 7 (sete) dias consecutivos, do percentil de 95% dos valores diários de cada indicador. Em outras palavras, o indicador que deve ser

comparado aos padrões estabelecidos nos Procedimentos de Rede é o valor máximo semanal do percentil de 95% diário dos indicadores.

Os padrões globais de tensões harmônicas de ordens 2 a 50, bem como o padrão para distorção harmônica total são apresentados na Tabela 3.5.

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3, 5, 7	5%			3, 5, 7	2%		
		2, 4, 6	2%			2, 4, 6	1%
9, 11, 13	3%			9, 11, 13	1,5%		
		≥ 8	1%			≥ 8	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥ 27	1%			≥ 27			
DTHT = 6%				DTHT = 3%			

A apuração dos indicadores de distorção harmônica de tensão será conduzida sob a forma de campanhas de medição de sete dias consecutivos, considerando valores dos indicadores integralizados em intervalos de 10 minutos;

Tal qual para a flutuação de tensão, também se adotam limites globais inferiores e superiores para a distorção harmônica de tensão. Os limites inferiores, dependendo do nível de tensão da barra do sistema, são aqueles mostrados enquanto que os limites superiores são:

- DTHT = 8% para sistemas com tensão nominal inferior a 69kV;
- DTHT = 4% para sistemas com tensão nominal igual ou superior a 69kV (Rede Básica);

A apresentação dos resultados obtidos através da medição do indicador distorção harmônica de tensão é uma seção do documento da campanha de qualidade de energia e deve conter as seguintes informações:

- Subestação(ões) medida(s);
- Barramento(s) medido(s);
- Período de medição indicando a hora inicial, com precisão de segundos, do primeiro dia que definirá cada período de 24 horas;
- Descrição das principais características do instrumento utilizado:
 - Fabricante e modelo do instrumento de medição;
 - Tipo de externalização dos resultados a cada 10 minutos: papel impresso, arquivos gravados, conversão destes arquivos para o formato de planilha de cálculo e outras situações. Ressalta-se que é imprescindível que a externalização do instrumento forneça os indicadores DTHT, V2, V3,..., V50 a cada 10 minutos, bem como a data e hora de obtenção do mesmo;
- Três gráficos do tipo linha, mostrando a tendência do indicador DTHT em cada uma das fases durante os sete dias de medição. A Figura 3.7 mostra um exemplo de gráfico tipo linha com o indicador DTHT correspondente à fase A de uma campanha de medição de um gerador real. Nestes gráficos a DTHT deve ser expressa em porcentagem da tensão nominal do sistema;
- Gráficos do tipo linha mostrando a tendência dos indicadores V2 a V50, em cada uma das fases, durante os sete dias de medição, cujo percentil de 95% de uma

semana seja superior a 0,4%. A Figura 3.8 mostra um exemplo de gráfico tipo linha com o indicador V3 correspondente à fase A de uma campanha de medição de um gerador real. Nestes gráficos os indicadores devem ser expressos em porcentagem da tensão nominal do sistema;

- Três histogramas dos valores de DTHT obtidos em cada fase medida durante a campanha. Cada histograma deverá conter um eixo horizontal com pelo menos dez categorias da variável aleatória DTHT e dois eixos verticais: o primeiro contendo o número de ocorrências em cada categoria e o segundo contendo a probabilidade acumulada. A Figura 3.9 mostra um exemplo de um histograma correspondente aos valores de DTHT mostrados no gráfico da Figura 3.7. Nestes gráficos a DTHT deve ser expressa em porcentagem da tensão nominal do sistema;
- Histogramas dos valores de V2 a V50, obtidos em cada fase medida durante a campanha, cujo percentil de 95% de uma semana seja superior a 0,4%. Cada histograma deverá conter um eixo horizontal com pelo menos dez categorias de valores do indicador em questão e dois eixos verticais: o primeiro contendo o número de ocorrências em cada categoria e o segundo contendo a probabilidade acumulada. A Figura 3.10 mostra um exemplo de um histograma correspondente aos valores de V3 mostrados no gráfico da Figura 3.8. Nestes gráficos os indicadores devem ser expressos em porcentagem da tensão nominal do sistema;
- Tabela contendo valores de DTHTD 95% e valores de harmônicos individuais (V2 95% a V50 95%), para cada fase, cujo percentil de 95% de uma semana seja superior a 0,4%. A tabela deverá conter também uma linha informando que os indicadores não mostrados foram inferiores a 0,4%. A Tabela 3.5 dá um exemplo de tabela contendo um resumo dos indicadores de distorção harmônica de tensão obtidos na campanha de medição. Nesta tabela os indicadores devem ser expressos em porcentagem da tensão nominal do sistema.[3]

Tendência - DTHTa

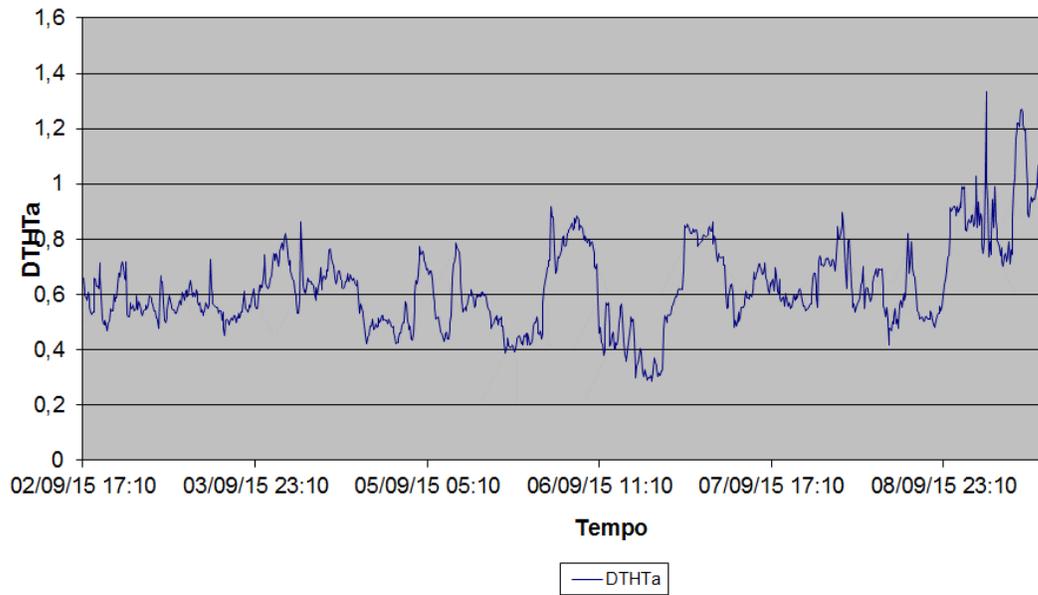


Figura 3.7 - Exemplo de gráfico tipo linha com valores de DTHT medidos na fase A de uma campanha de medição de um gerador ao longo de uma semana

Tendência - V5a

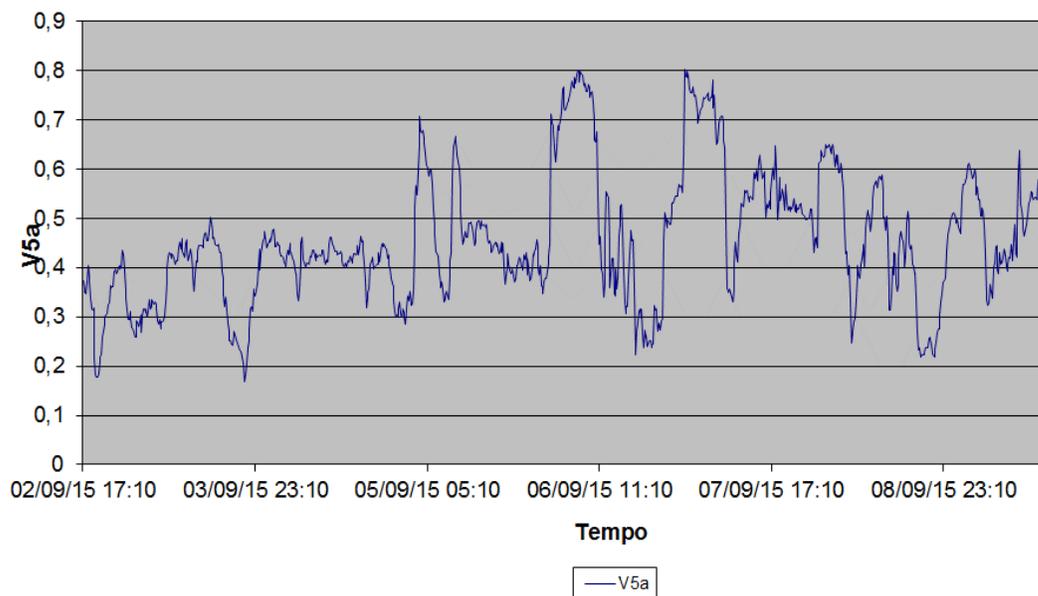


Figura 3.8 - Exemplo de gráfico tipo linha com valores de V5 medidos na fase A de uma campanha de medição de um gerador ao longo de uma semana

Histograma - DTHTa

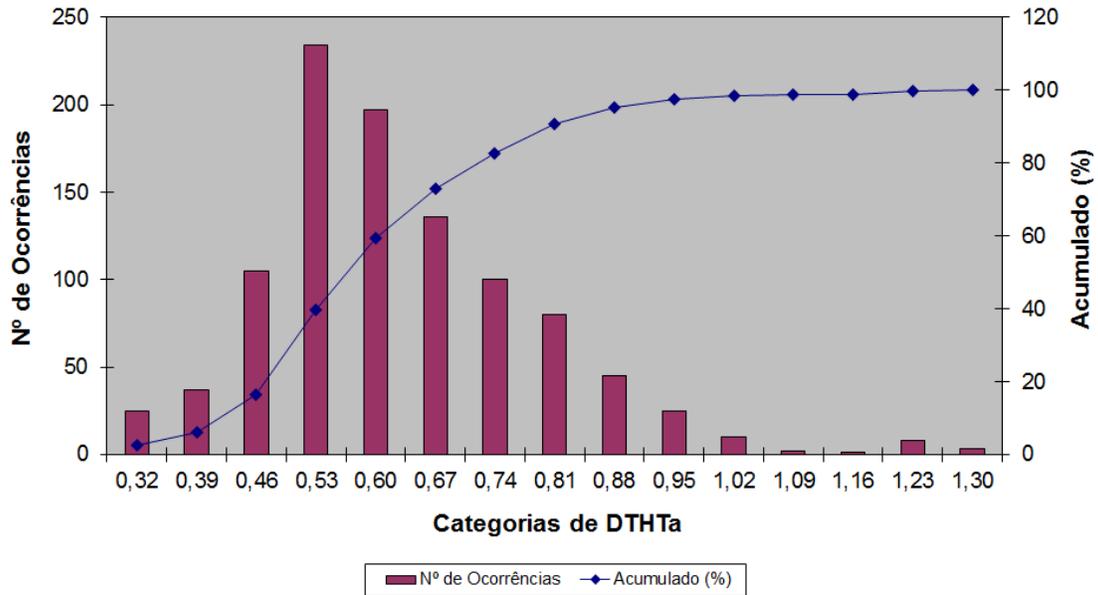


Figura 3.9 - Exemplo de histogramas com valores de DTHT medidos na fase A de uma campanha de medição de um gerador ao longo de uma semana

Histograma - V5a

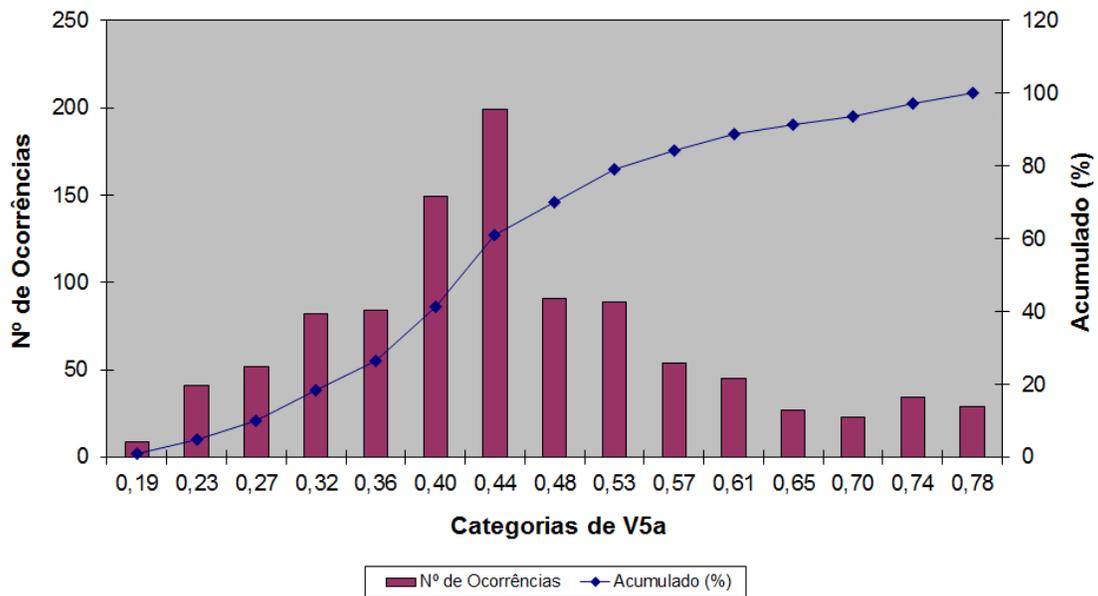


Figura 3.10 - Exemplo de histogramas com valores de V3 medidos na fase A de uma campanha de medição hipotética ao longo de uma semana

Tabela 3.5 - Tabela com resumo de indicadores de distorção harmônica de tensão obtidos em uma campanha de medição de um gerador de uma semana

Índices	Valores
DTHTaD95%	1,206601
DTHTbD95%	0,8541
DTHTcD95%	1,159991
V3bD95%	0,418476
V5aD95%	0,779844
V5bD95%	0,799673
V5cD95%	0,685556
V7aD95%	1,064162
V7bD95%	0,535415
V7cD95%	1,017203

3.3. Exportação dos Dados

Após concluída toda a aquisição e concepção dos gráficos e tabelas, o ONS exige a submissão das informações em basicamente 2 arquivos:

- Relatório contendo todas as informações da campanha: informações do ponto de medição, gráficos e tabelas segundo cada um dos indicadores;
- Planilha contendo dados utilizados para a gerar gráficos e tabelas.

3.4. Considerações Gerais para a Realização da Campanha

O relatório é analisado pelo ONS, e a planilha é inserida no banco de dados do operador. Dependendo dos resultados dos indicadores, o operador poderá solicitar nova campanha para ratificação dos resultados. Se os indicadores se apresentarem insatisfatórios, o operador exige a correção e solicita nova campanha para verificação dos novos indicadores.

Periodicamente o ONS solicita campanhas de qualidade de energia para a manutenção dos indicadores em níveis satisfatórios. Tanto a concessionária, quanto o cliente, devem ser responsáveis pela realização da campanha no ponto solicitado pelo operador.

4. Estudo de caso: Comparação dos indicadores pré-operacional e pós-operacional

4.1. Introdução

Para novas usinas acessantes à Rede Básico, o ONS exige que as campanhas de qualidade de energia sejam realizadas nas fases pré-operacional e pós-operacional, ou seja, antes da usina ser ligada ao PAC (ponto de acoplamento comum) e após a ligação ao PAC.

Diante dos estudos, é realizada a análise do impacto que o novo acessante teve no PAC, se os indicadores ultrapassarem os limites estabelecidos pelo PROREDE 2.8 “Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes”, podem ser tomadas uma série de ações que não cabe nesse trabalho explorar, mas que variam de realizar novas medições até instalar equipamentos de mitigação dos fenômenos ligados aos indicadores.

Esta seção apresenta cinco estudos pré-operacional e pós-operacional de campanha de qualidade de energia de cinco empreendimentos diferentes, localizados em diferentes estados brasileiros de usinas tanto eólicas quanto fotovoltaicas entre os anos 2016 e 2019.

Serão apresentados os indicadores de qualidade de energia pré-operacional e pós-operacional, mas para efeitos de sigilo da informação irei apresentar apenas o tipo da geração (eólica ou fotovoltaica), o estado no qual esse empreendimento opera, e serão referidos os diferentes casos pelas letras A, B, C, D e E.

Para cada um dos casos irei apresentar os resultados de cada um dos indicadores: desequilíbrio, flutuação e distorção harmônica de tensão em gráficos de tendências, histogramas e tabelas resumo. Bem como os limites globais definidos por norma, haverá repetição de informação desses limites para facilitar a visualização e comparação em cada caso.

4.2. Caso A: Pernambuco

O caso A se encontra no estado de Pernambuco e é uma usina de geração eólica que está em operação atualmente.

4.2.1. Estudos de campanha de qualidade de energia

A campanha de qualidade pré-operacional foi realizada entre os dias 21/05/2016 e 28/05/2016. O multi-medidor utilizado foi o ION7650 da Schneider Electric que é homologado para esse tipo de medição. O ponto de medição escolhido foi o painel de proteção do bay deste empreendimento no barramento de 230kV.

A campanha de qualidade pós-operacional foi realizada entre os dias 20/04/2018 e 27/04/2018. O multi-medidor utilizado foi o ION7650 da Schneider Electric que é homologado para esse tipo de medição. O ponto de medição escolhido foi o painel de medição de faturamento da SE em questão.

4.2.1.1. Desequilíbrio de Tensão

A definição, método de medição e cálculo deste indicador seguem o procedimento explicado na seção 3.2.2 deste trabalho. Os resultados pré-operacionais e pós-operacionais obtidos na medição desse indicador foram os seguintes:

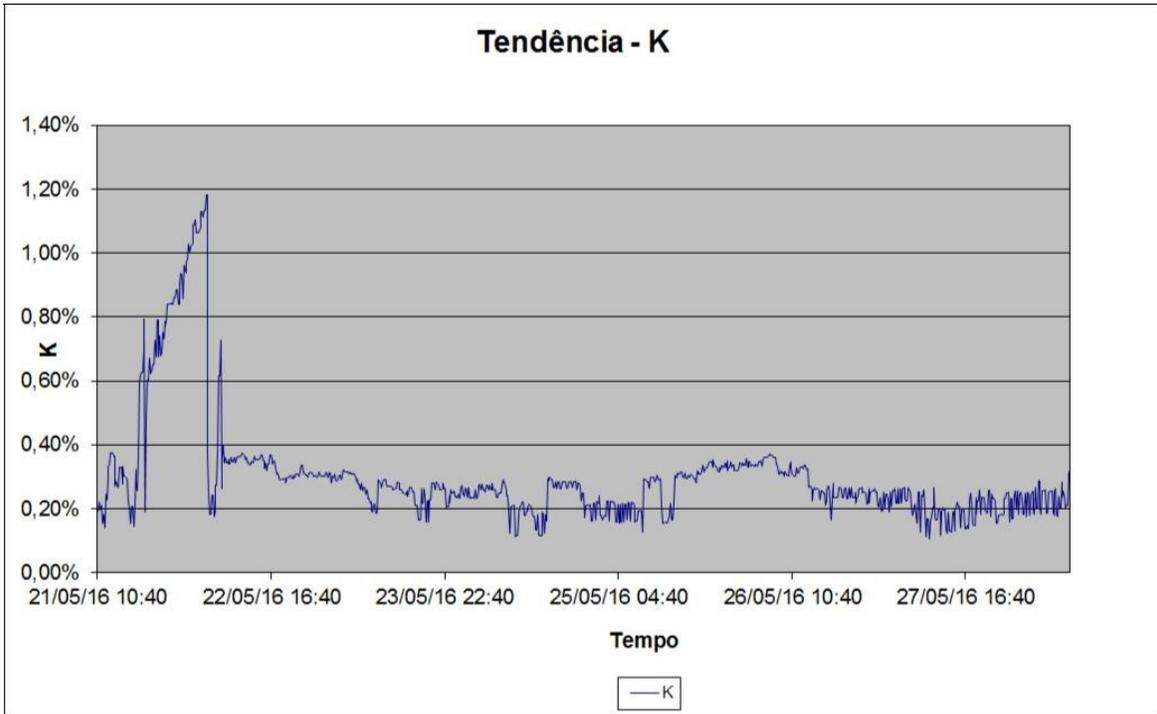


Figura 4.1 – Indicador de tendência K de desequilíbrio de tensão (pré-operação)

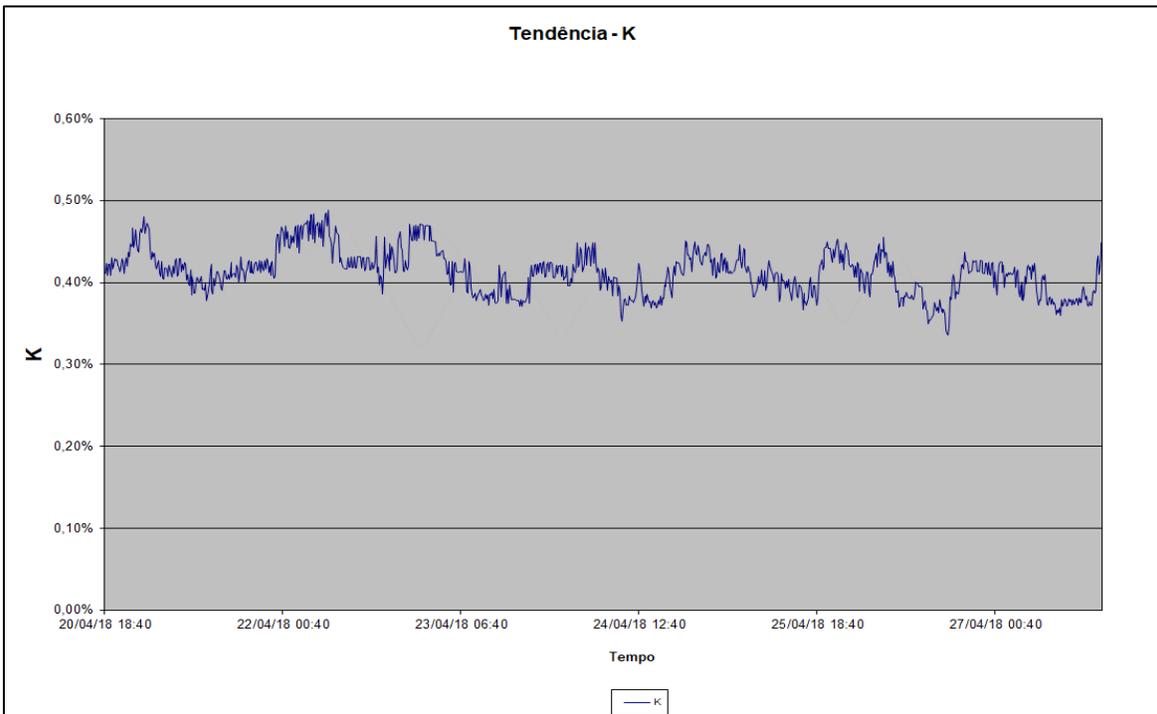


Figura 4.2 - Indicador de tendência K de desequilíbrio de tensão (pós operação)

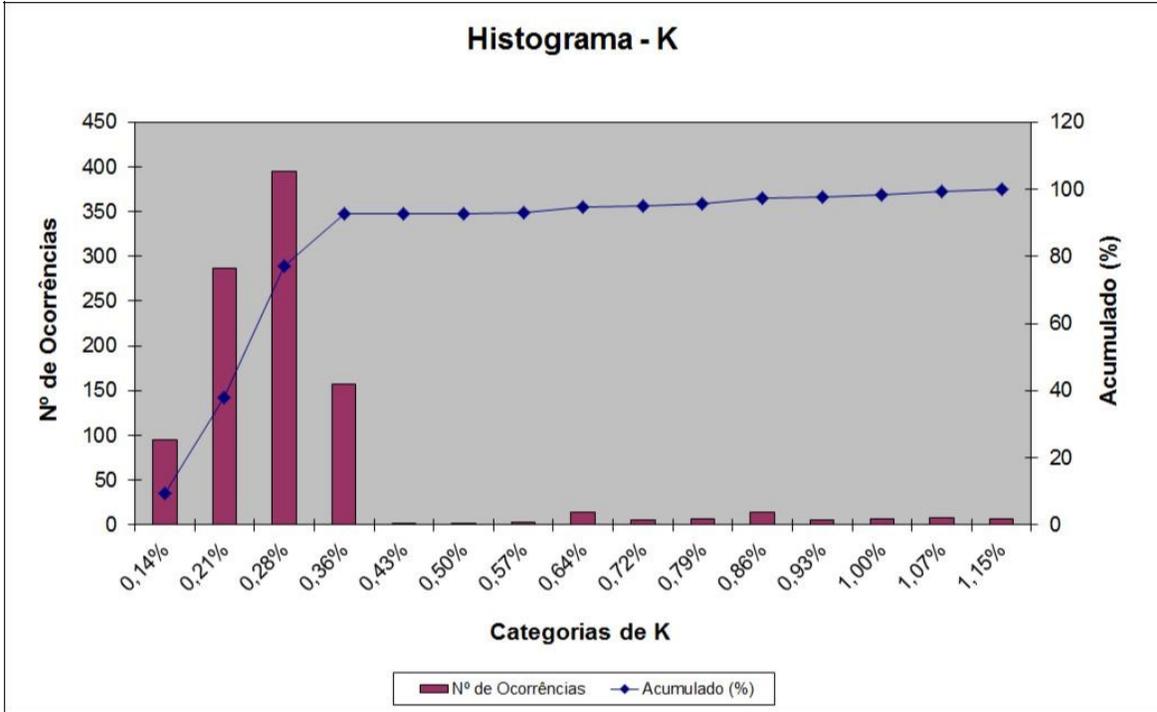


Figura 4.3 - Histograma do indicador de desequilíbrio de tensão K (pré-operação)

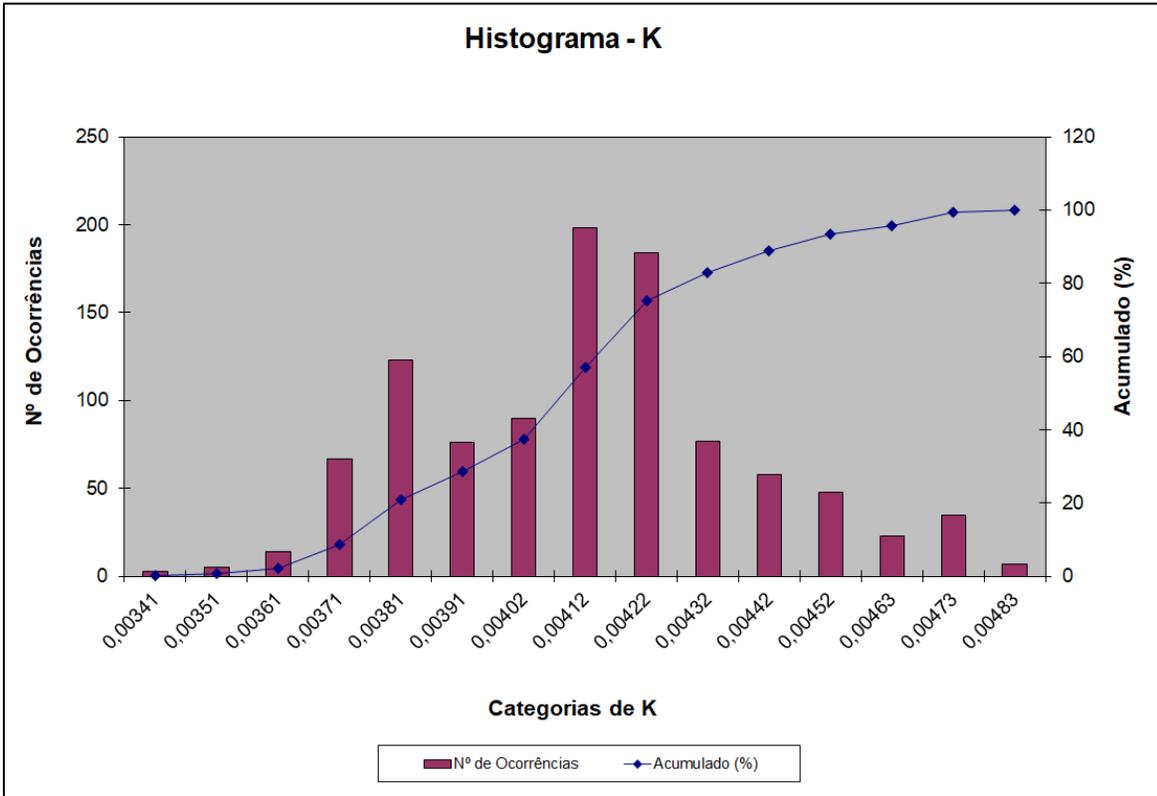


Figura 4.4 - Histograma do indicador de desequilíbrio de tensão K (pós operação)

KD95%		Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7
1,1035%		1,1035%	0,3663%	0,2842%	0,2928%	0,3610%	0,3269%	0,2621%

Tabela 4.1 - Tabela de fator KD95% do indicador de desequilíbrio K (pré-operação)

KD95%		Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7
0,4752%		0,4653%	0,4752%	0,4694%	0,4383%	0,4431%	0,4425%	0,4265%

Tabela 4.2 - Tabela de fator KD95% do indicador de desequilíbrio K (pós operação)

Com exceção do primeiro dia, o indicador de desequilíbrio pré-operacional é menor que o pós-operacional. Apesar de o indicador pré-operacional ter tido uma anomalia no primeiro dia, para efeitos de análise da ultrapassagem dos limites globais, foi considerado o valor de 1,1035%, que de todo modo está abaixo dos 2% previstos no PROREDE 2.8.

4.2.1.2. Flutuação de Tensão (Flicker)

A definição e método de medição e cálculo deste indicador foi explicado na seção 3.2.3 deste trabalho. Os resultados pré-operacionais e pós operacionais obtidos na medição desse indicador foram os seguintes:

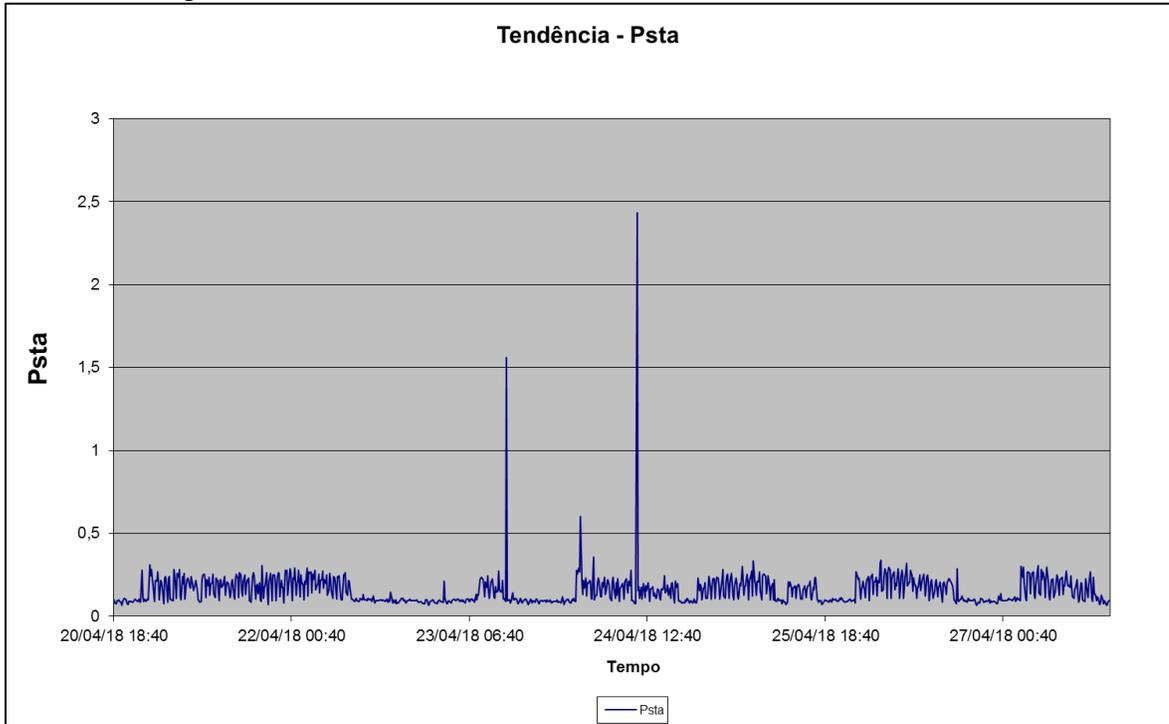


Figura 4.5 - Tendência do Indicador Pst Fase A (pré-operacional)

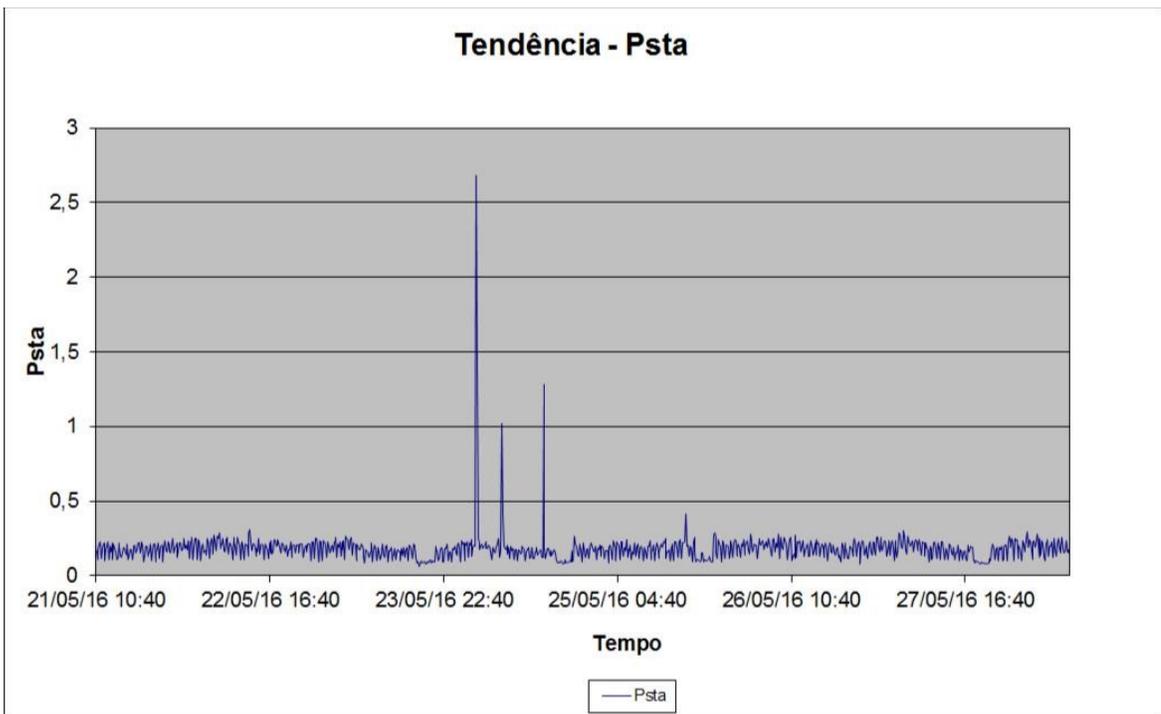


Figura 4.6 - Tendência do Indicador Pst Fase A (pós-operacional)

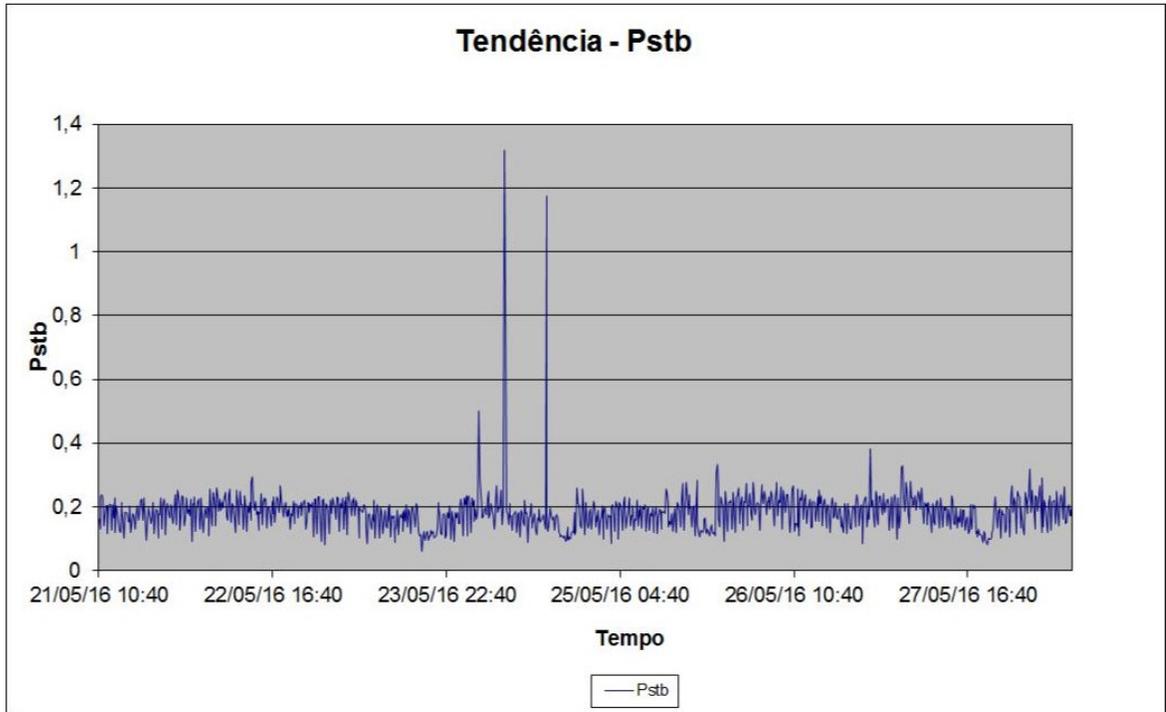


Figura 4.7 - Tendência do Indicador Pst Fase B (pré-operacional)

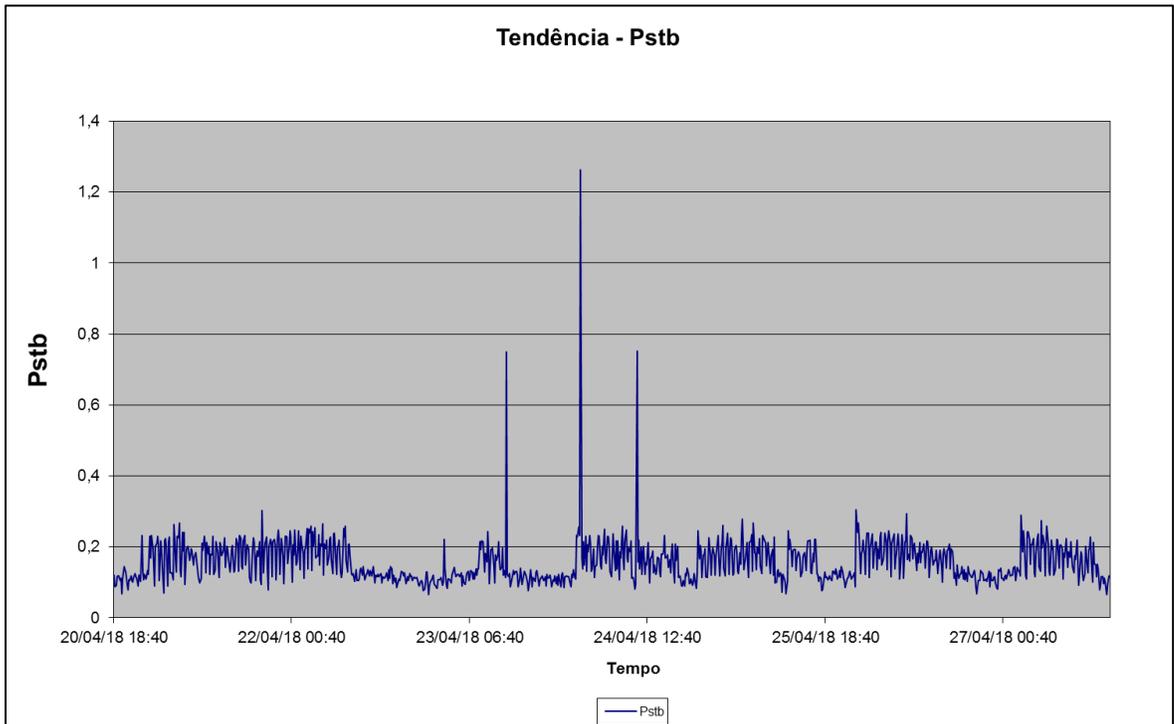


Figura 4.8 - Tendência do Indicador Pst Fase B (pós operacional)

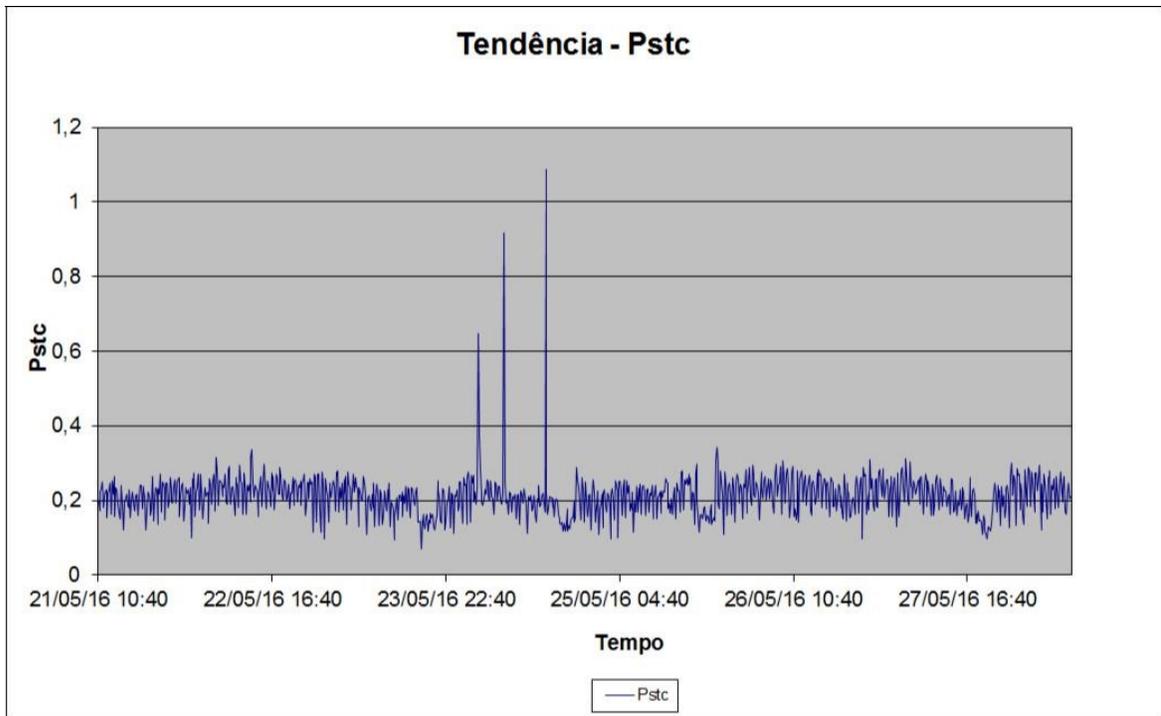


Figura 4.9 - Tendência do Indicador Pst Fase C (pré-operacional)

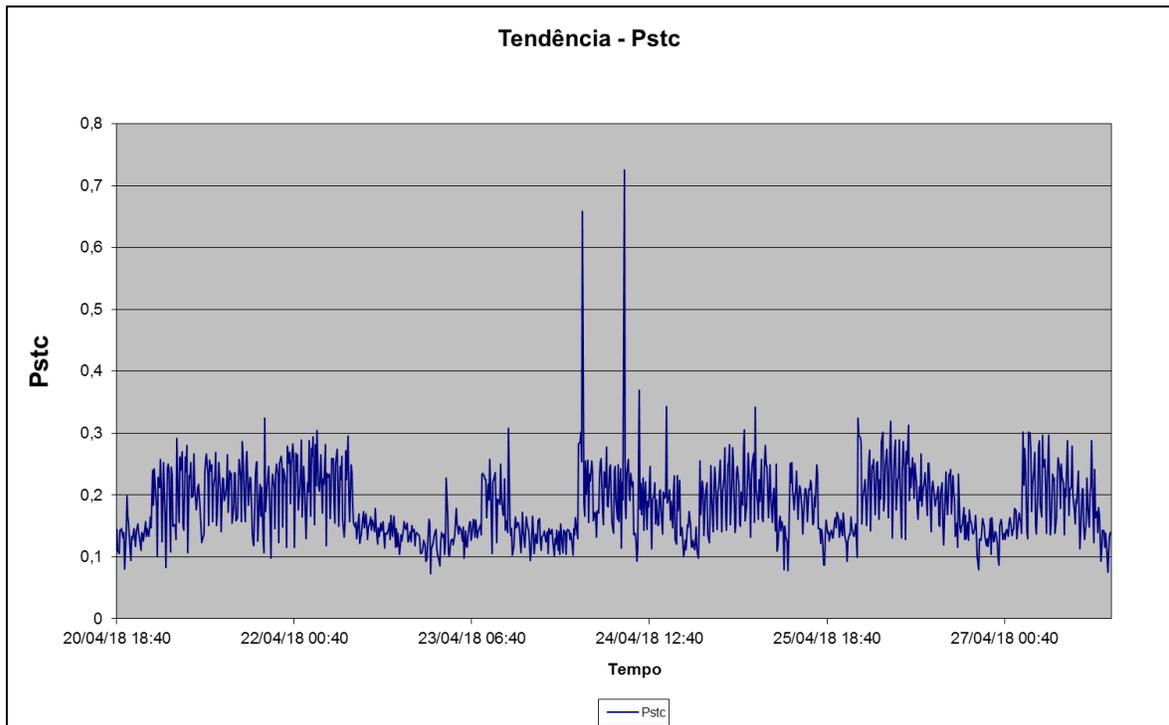


Figura 4.10 - Tendência do Indicador Pst Fase C (pós operacional)

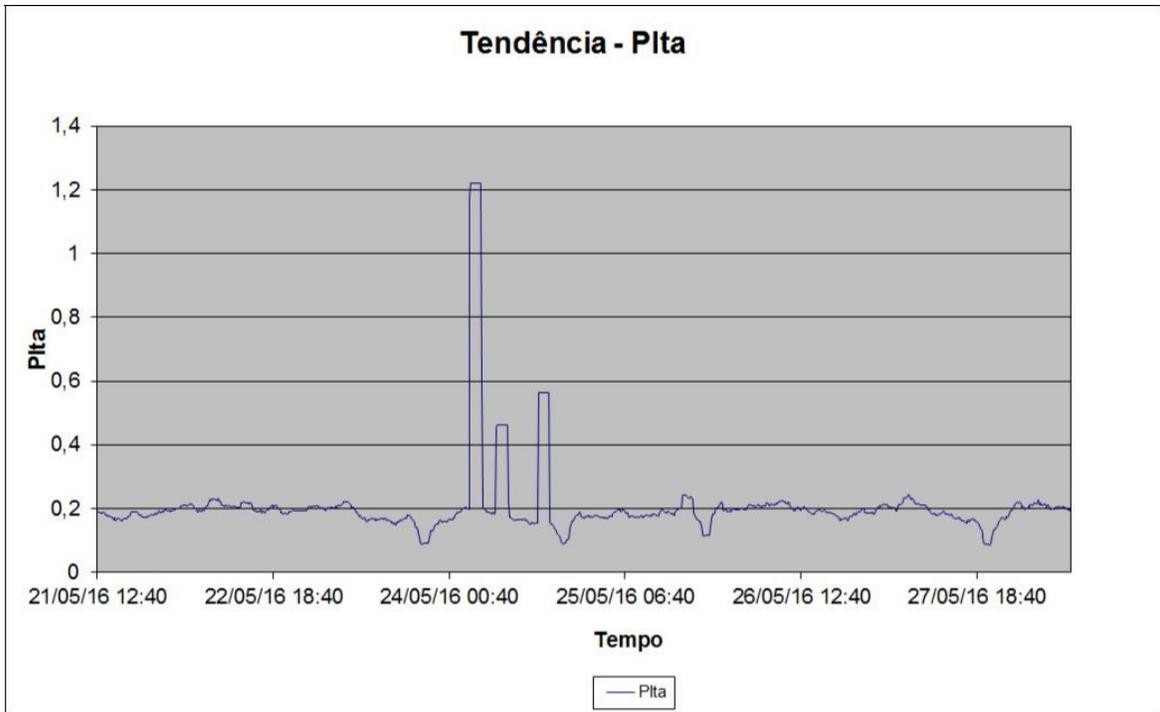


Figura 4.11 - Tendência do Indicador Plt Fase A (pré-operacional)

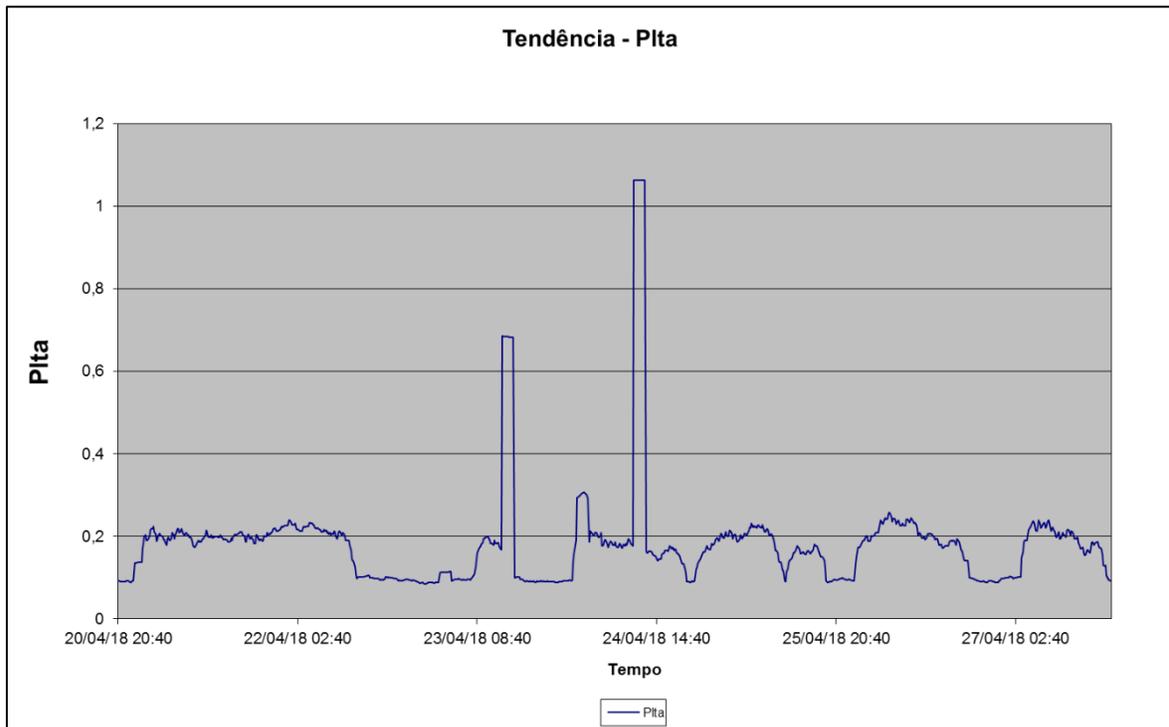


Figura 4.12 - Tendência do Indicador Plt Fase A (pós operacional)

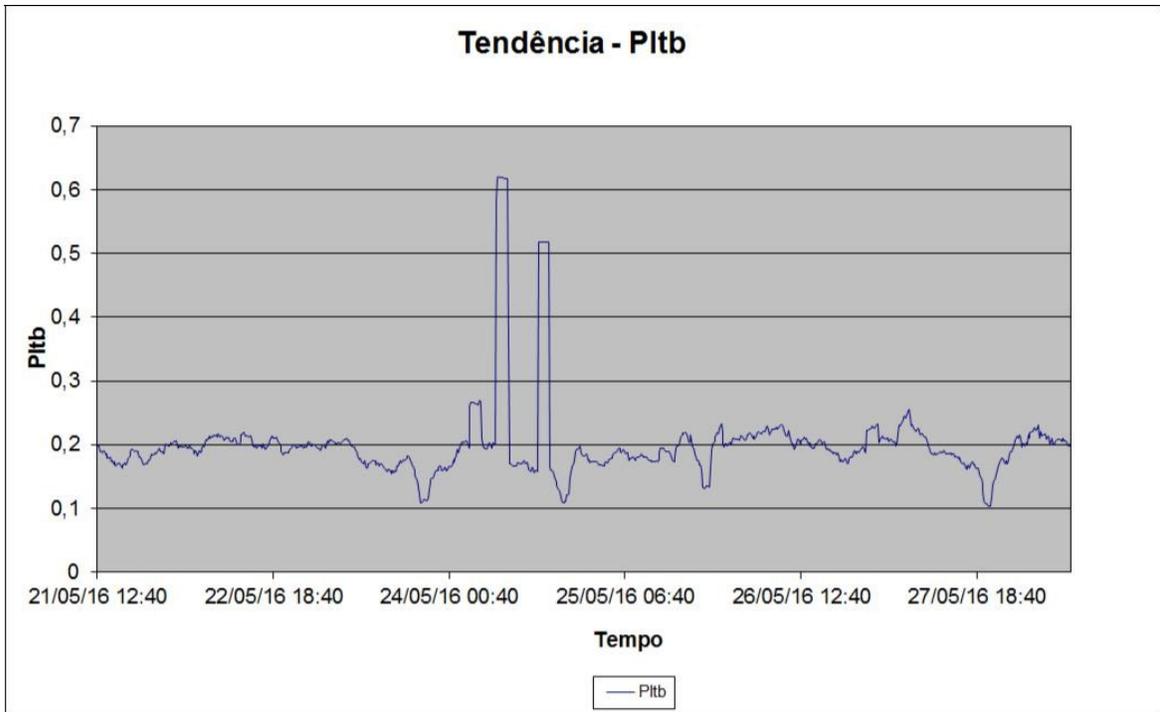


Figura 4.13 - Tendência do Indicador Plt Fase B (pré-operacional)

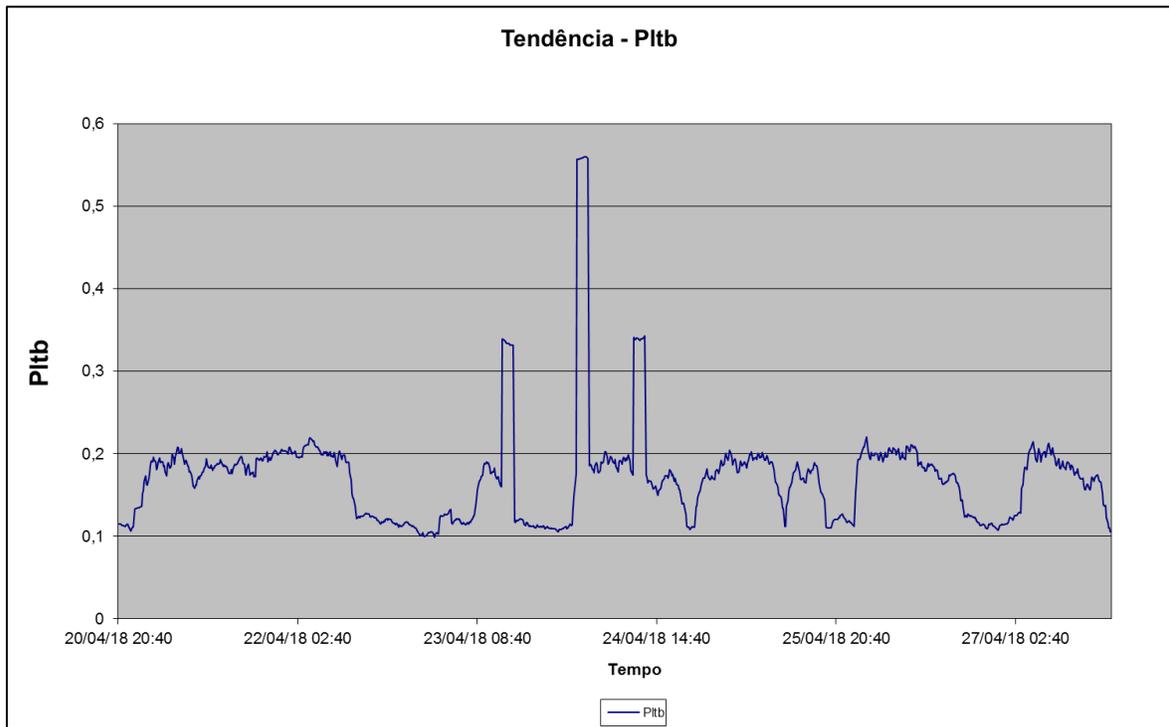


Figura 4.14 - Tendência do Indicador Plt Fase B (pós operacional)

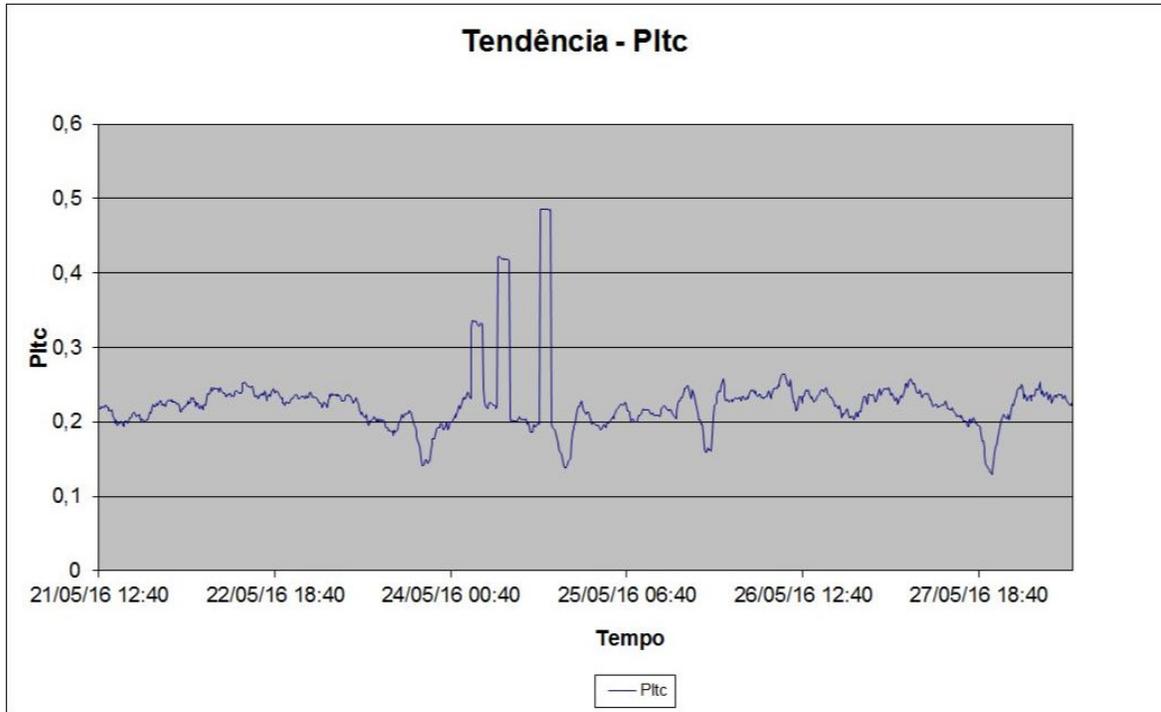


Figura 4.15 - Tendência do Indicador Plt Fase C (pré-operacional)

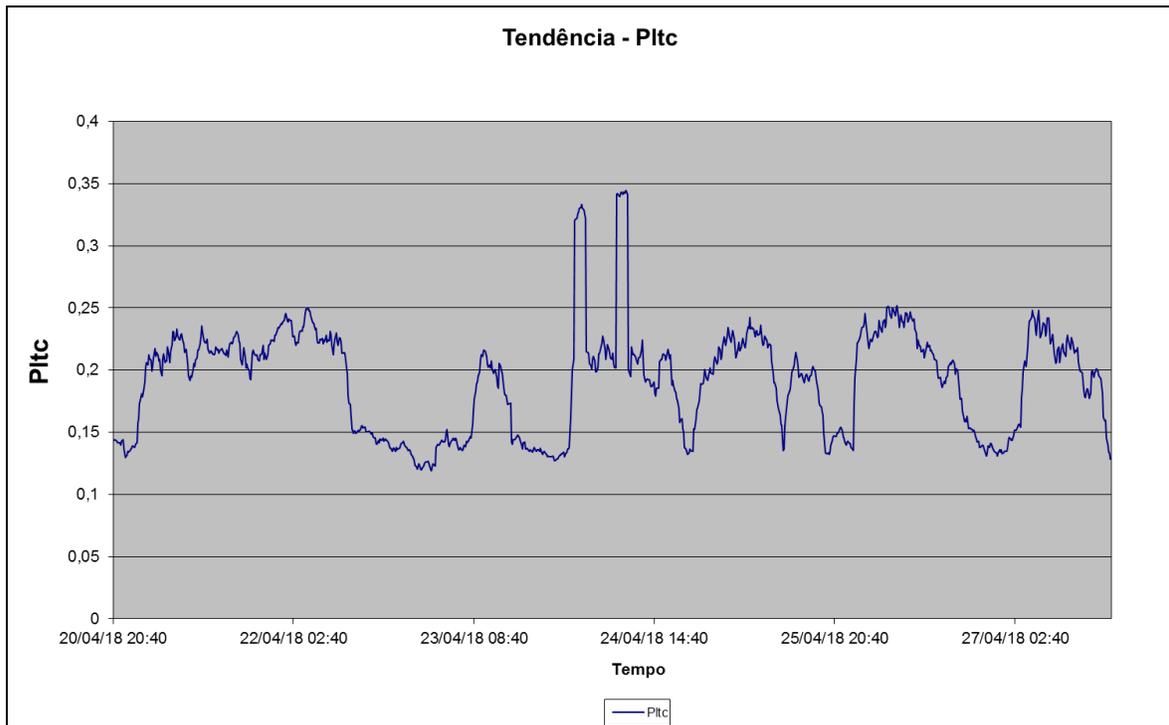


Figura 4.16 - Tendência do Indicador Plt Fase C (pós operacional)

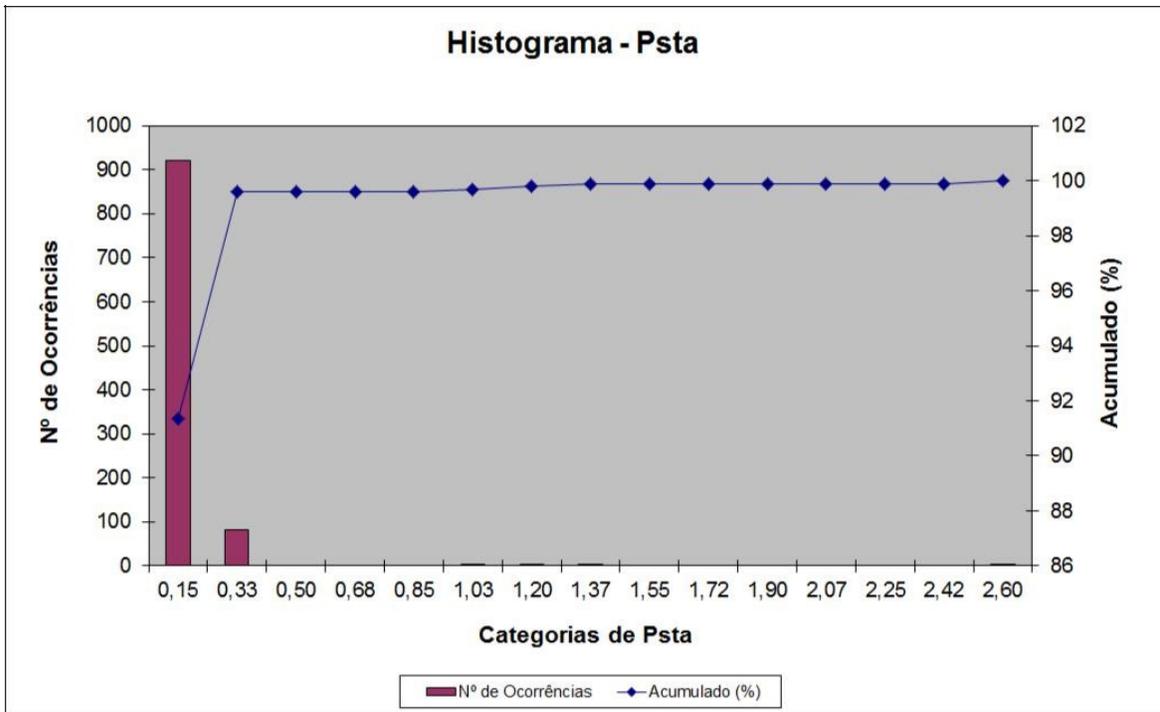


Figura 4.17 - Histograma do Indicador Pst Fase A (pré-operacional)

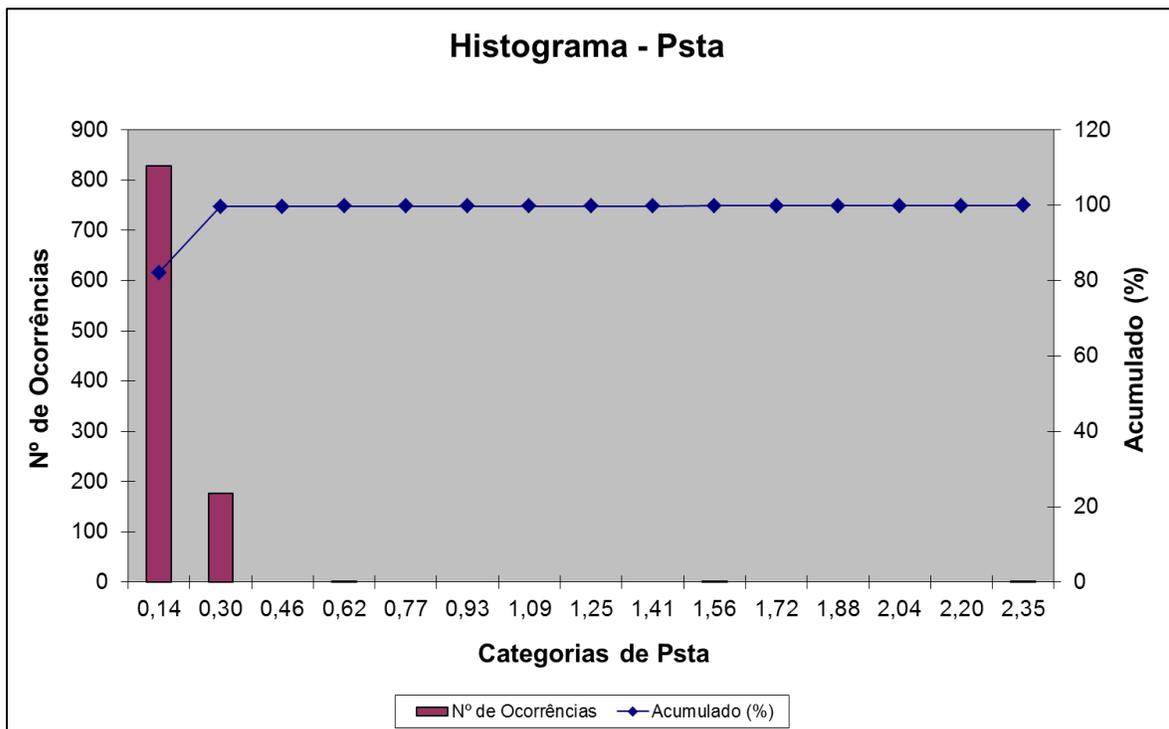


Figura 4.18 - Histograma do Indicador Pst Fase A (pós-operacional)

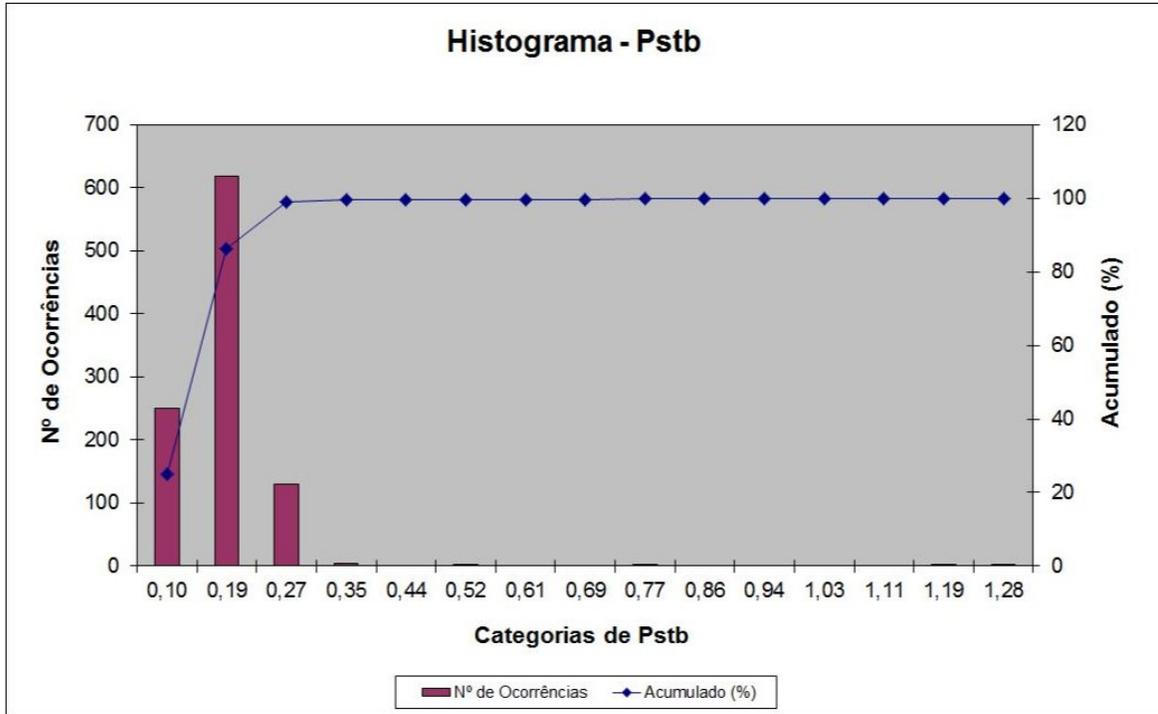


Figura 4.19 - Histograma do Indicador Pst Fase B (pré-operacional)

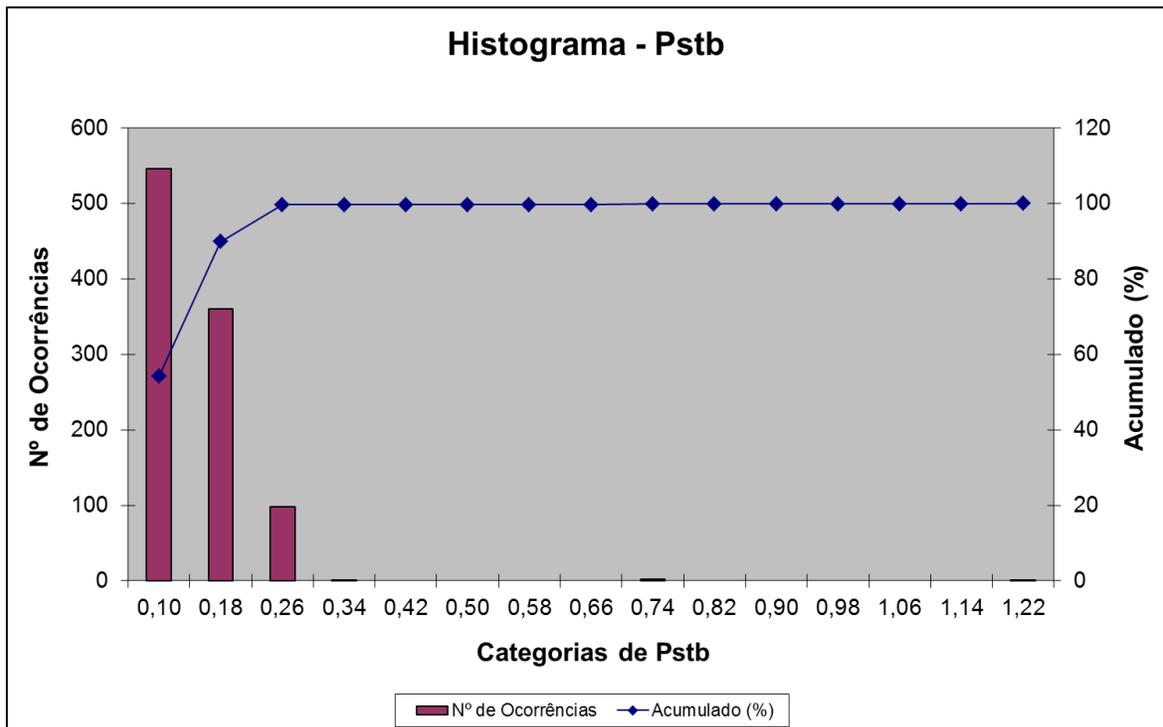


Figura 4.20 - Histograma do Indicador Pst Fase B (pós operacional)

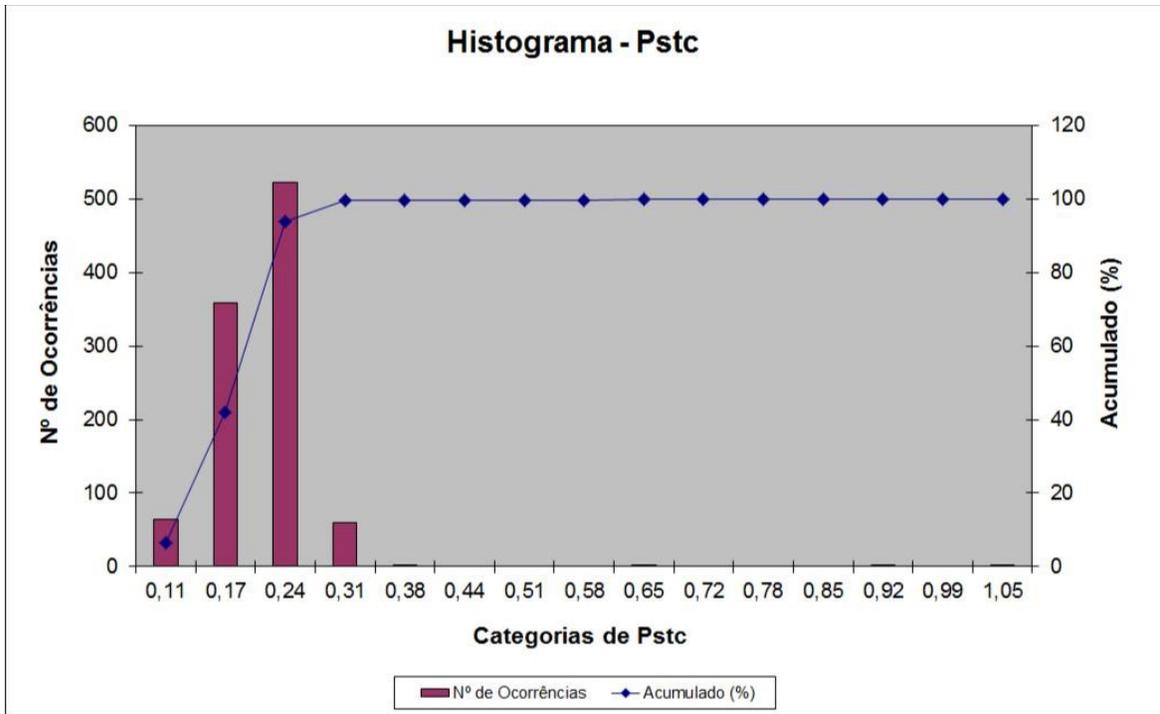


Figura 4.21 - Histograma do Indicador Pst Fase C (pré-operacional)

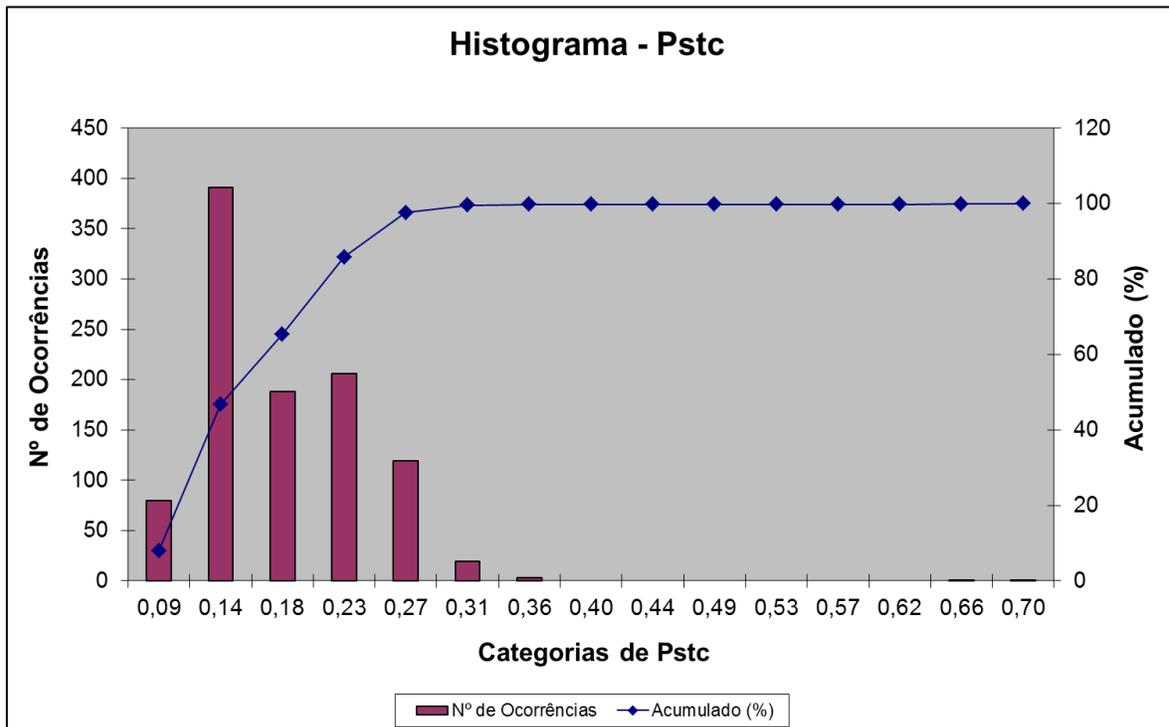


Figura 4.22 - Histograma do Indicador Pst Fase C (pós-operacional)

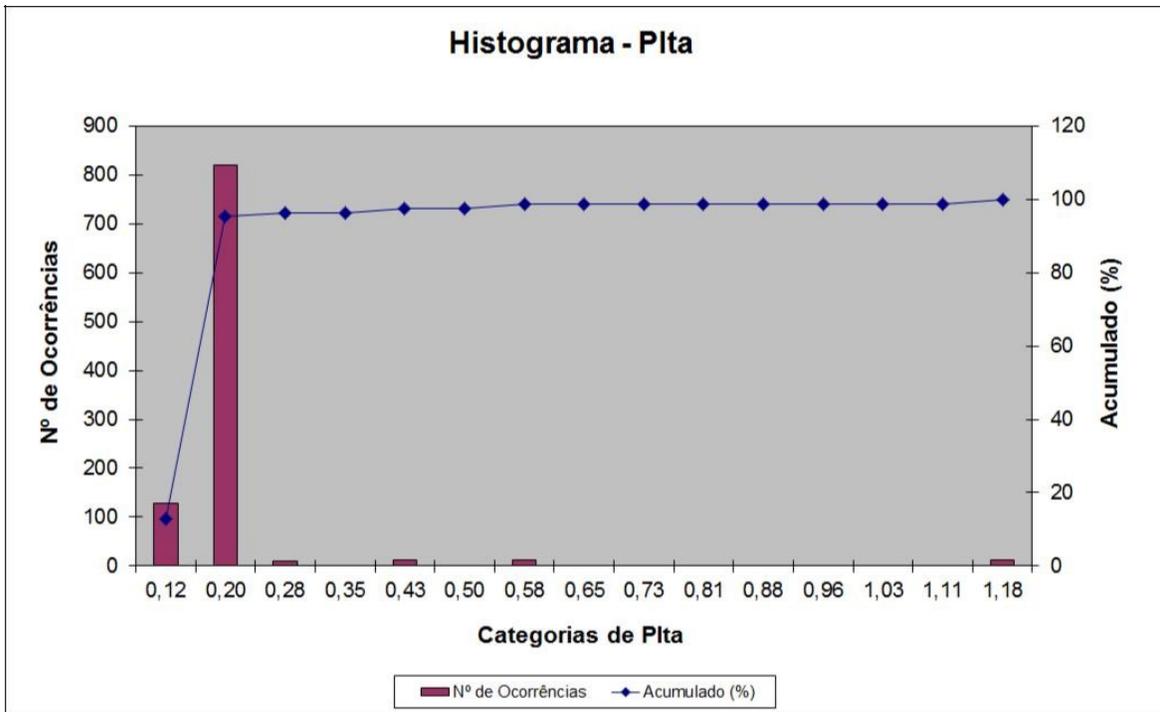


Figura 4.23 - Histograma do Indicador Plt Fase A (pré-operacional)

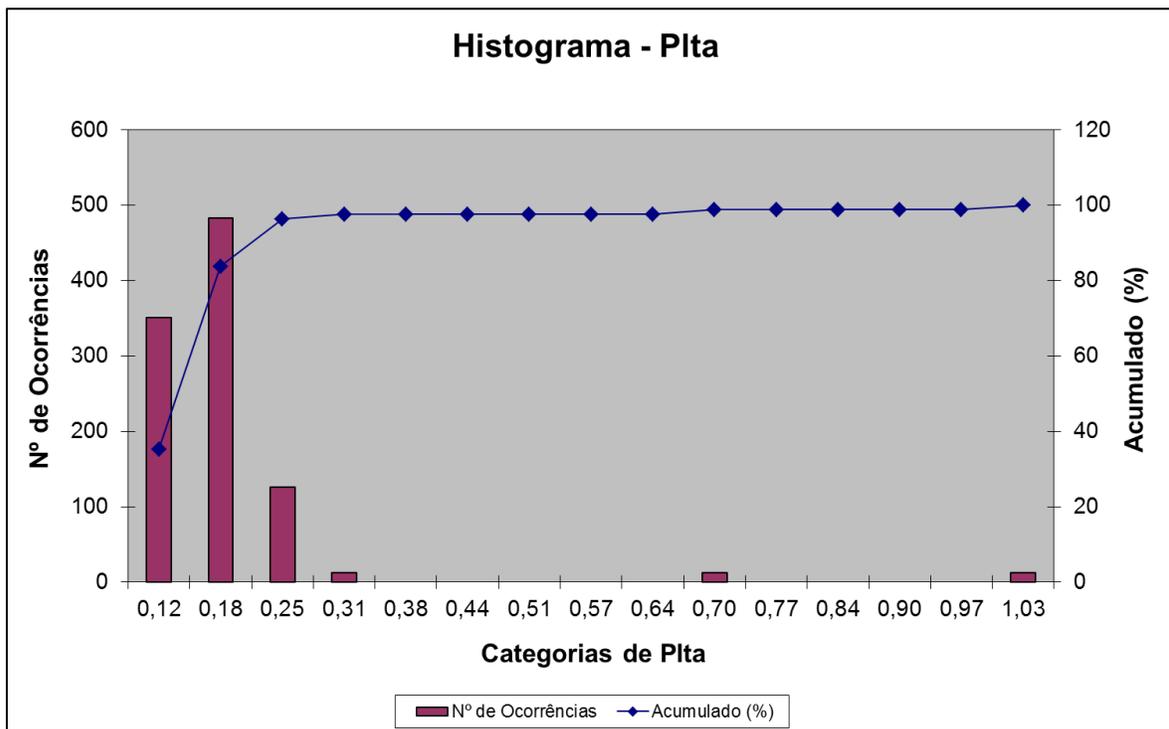


Figura 4.24 - Histograma do Indicador Pst Fase A (pós operacional)

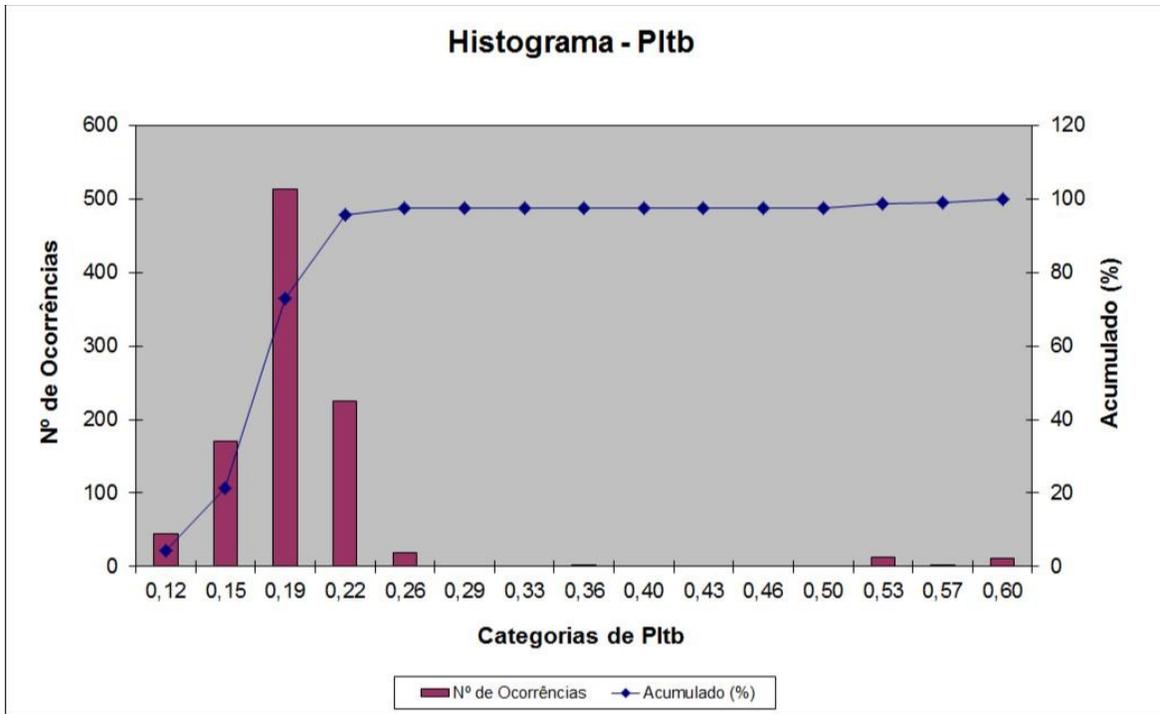


Figura 4.25 - Histograma do Indicador Plt Fase B (pré-operacional)

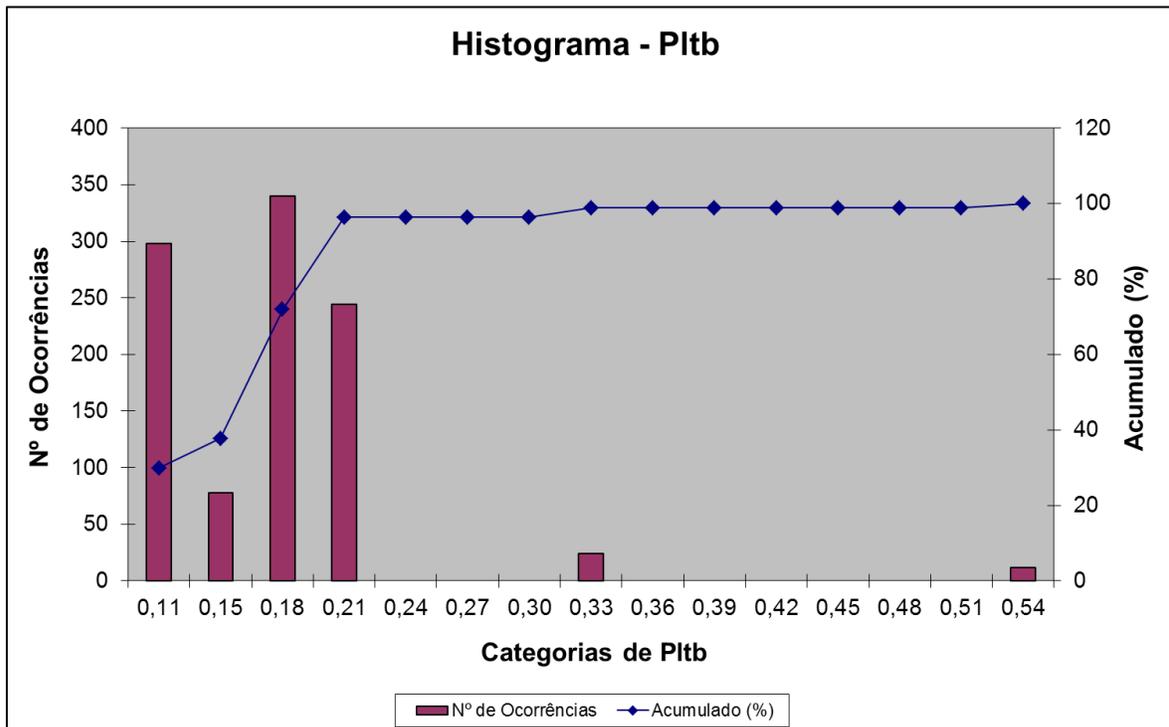


Figura 4.26 - Histograma do Indicador Pst Fase B (pós operacional)

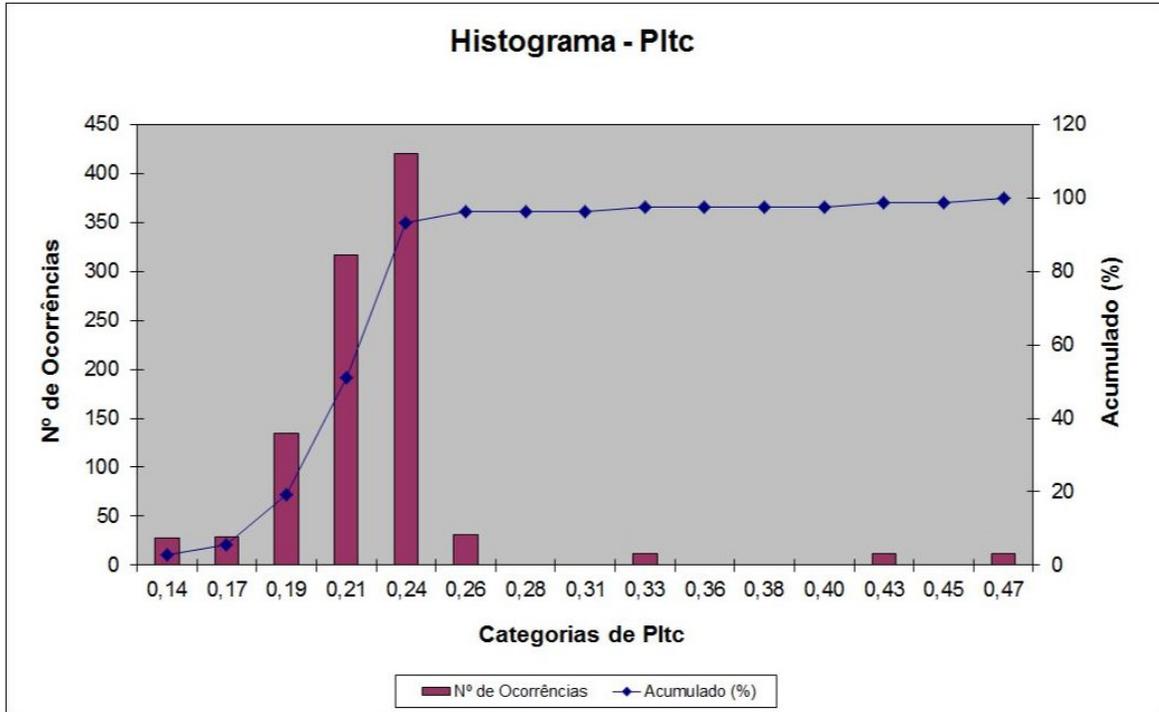


Figura 4.27 - Histograma do Indicador Pltc Fase C (pré-operacional)

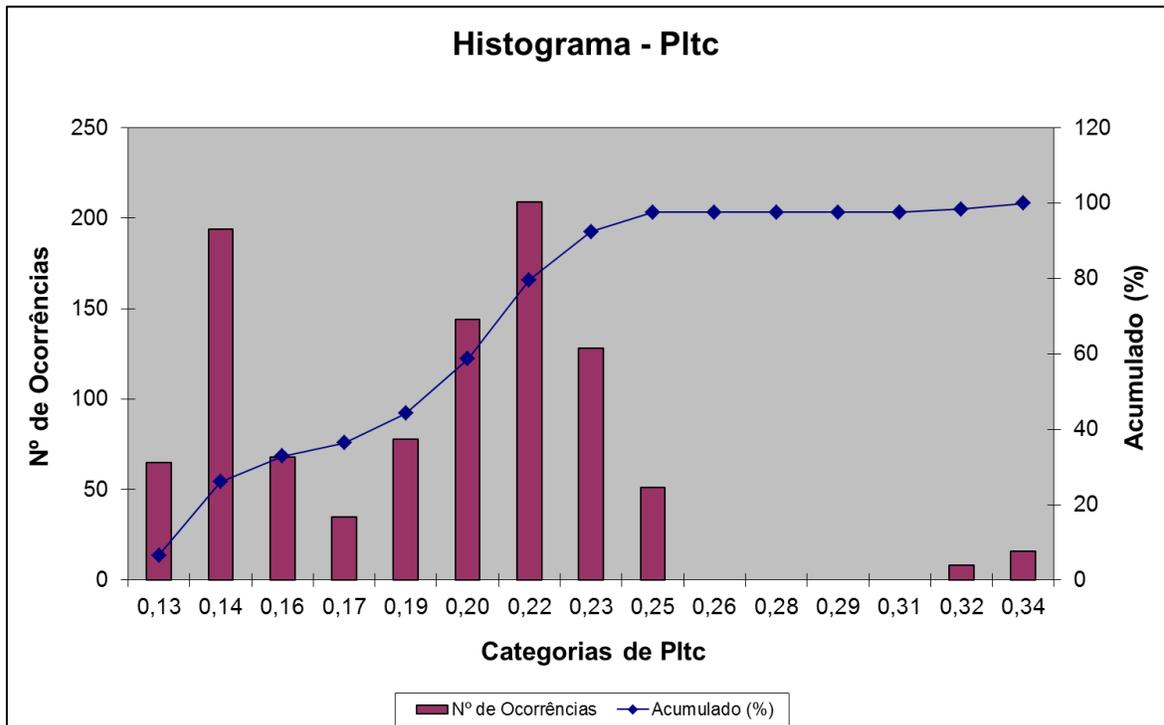


Figura 4.28 - Histograma do Indicador Pst Fase C (pós-operacional)

	Pstd 95%							PstD 95%	PltS 95%
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7		
Fase A	0,252444	0,247471	0,235788	0,224488	0,257909	0,258196	0,250247	0,294996	0,276771
Fase B	0,241182	0,23348	0,237384	0,219313	0,272831	0,25573	0,248797		
Fase C	0,270816	0,276011	0,260404	0,254143	0,294996	0,283878	0,275906		

Tabela 4.3 - Tabela de Indicadores PstD95% e Plt95%

	Pstd 95%							PstD 95%	PltS 95%
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7		
Fase A	0,261354	0,274515	0,218847	0,251065	0,253884	0,276869	0,269413	0,288664	0,275859
Fase B	0,231787	0,250207	0,197604	0,232917	0,233517	0,239213	0,232277		
Fase C	0,265983	0,281936	0,227632	0,275019	0,268013	0,288664	0,285951		

Tabela 4.4 - Tabela de Indicadores PstD95% e Plt95%

O indicador de flutuação não sofre muito influência por um novo acessante no PAC. Em ambos os casos os indicadores se mantiveram abaixo dos limites globais estabelecidos, que nesse caso de barramento de 230kV é segundo o PROREDE 2.8:

Limite	PstD95%	PltS95%
Limite Global Inferior	1,54pu	1,23pu
Limite Global superior	3,08pu	2,46pu

4.2.1.3. Distorção Harmônica de Tensão

Nesta seção irei apresentar os gráficos de distorções harmônicas totais e somente as individuais que foram comuns aos estudos pré-operacional e pós operacional, no final da seção apresentarei uma tabela que contém os harmônicos individuais mais significativos, independentes se tiverem sido comuns à duas etapas. Os resultados pré-operacionais e pós operacionais obtidos na medição desse indicador foram os seguintes:

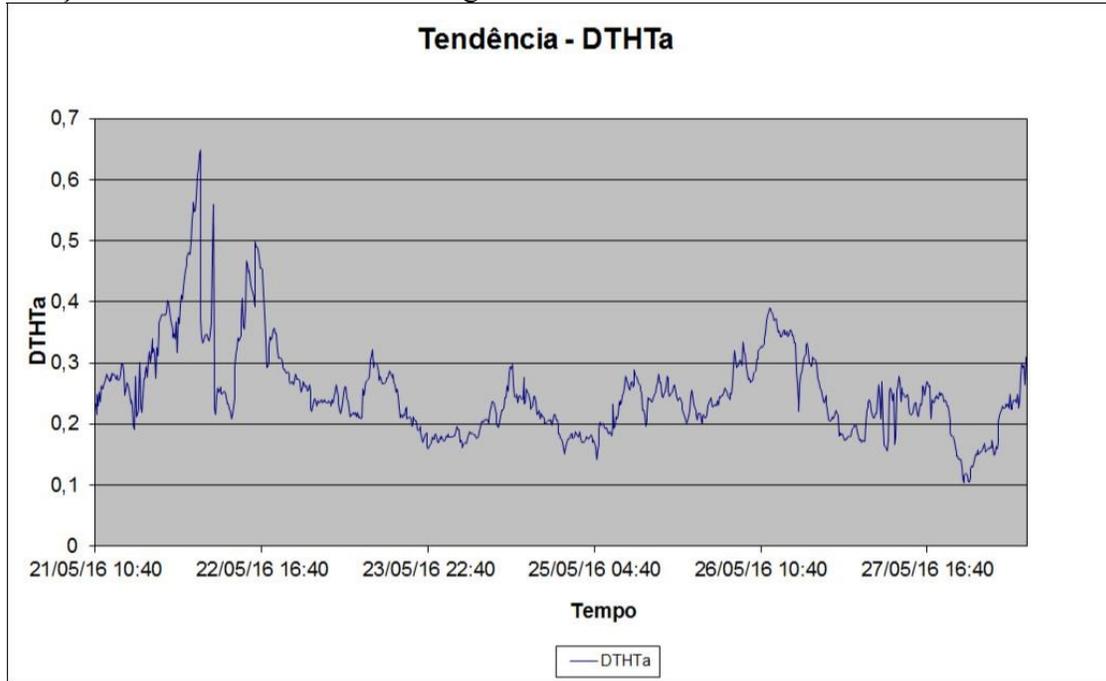


Figura 4.29 - Tendência Indicador DTHT Fase A (pré-operacional)

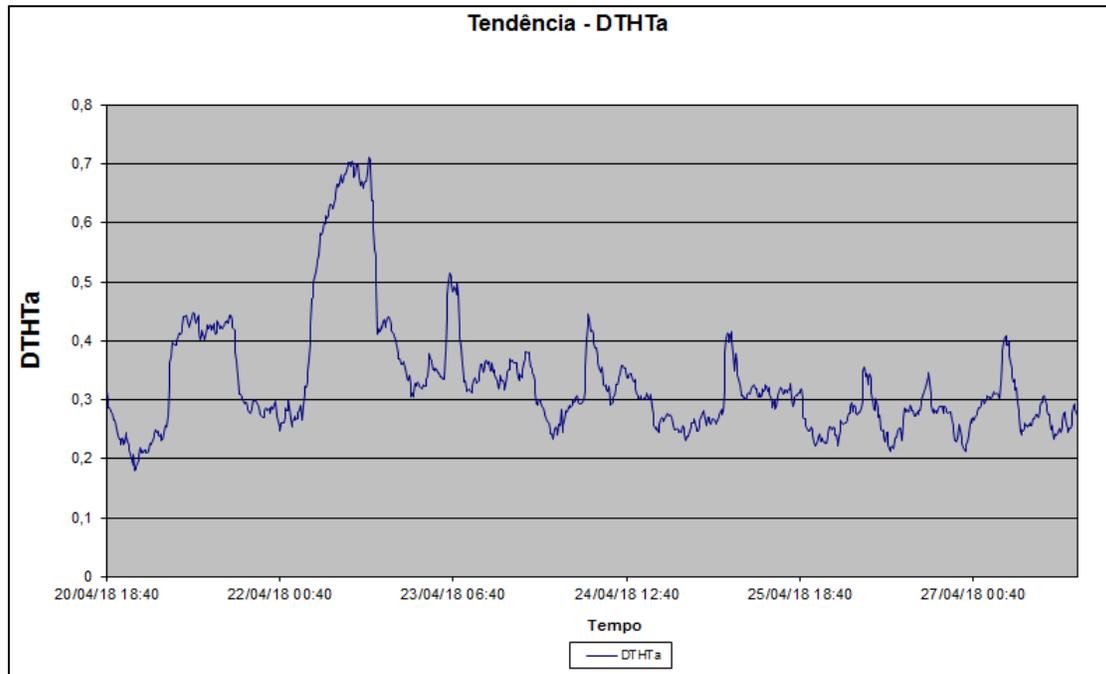


Figura 4.30 - Tendência Indicador DTHT Fase A (pós operacional)

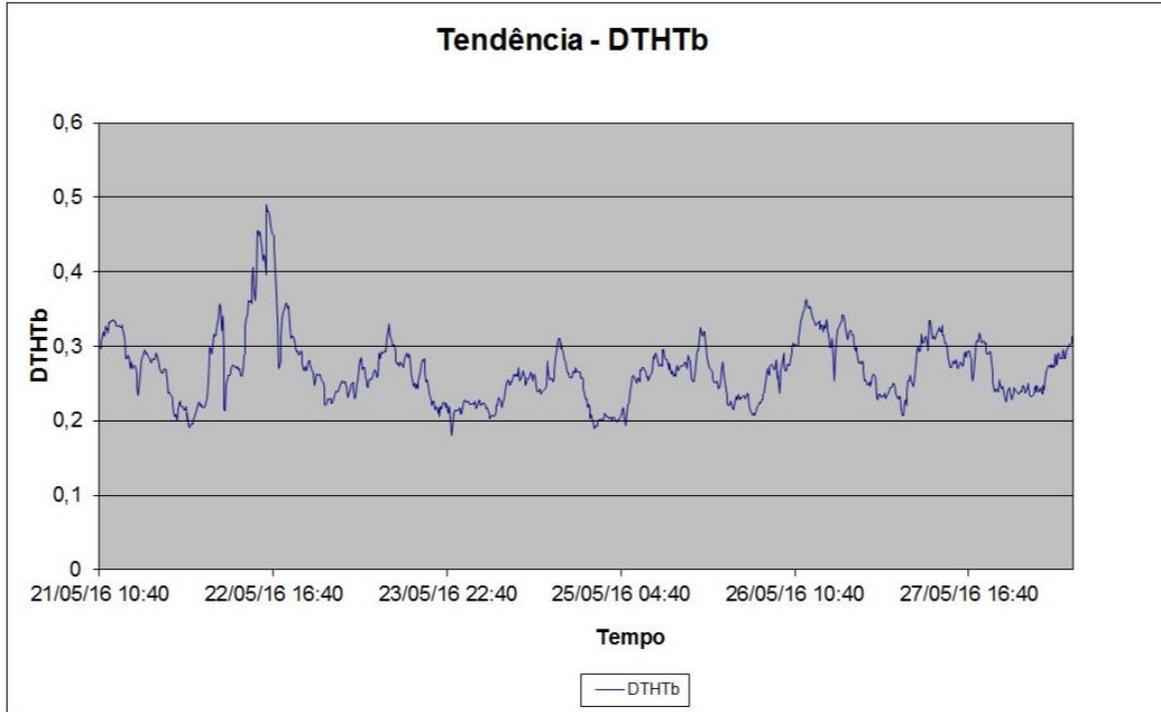


Figura 4.31 - Tendência Indicador DTHT Fase B (pré-operacional)

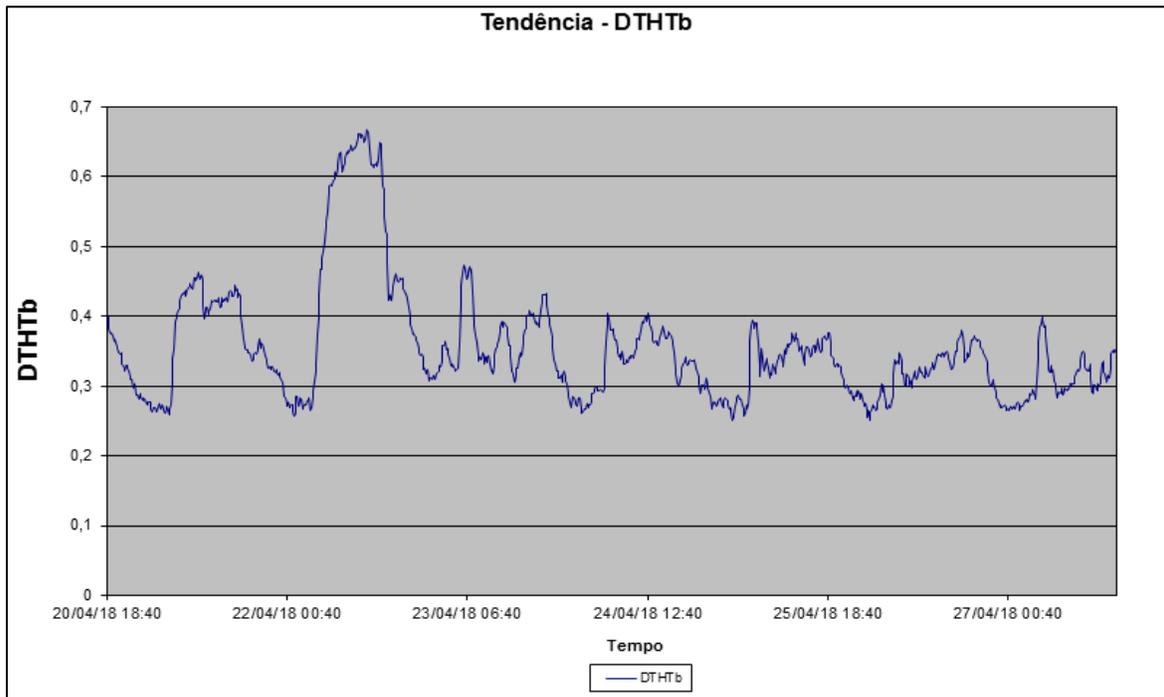


Figura 4.32 - Tendência Indicador DTHT Fase B (pós operacional)

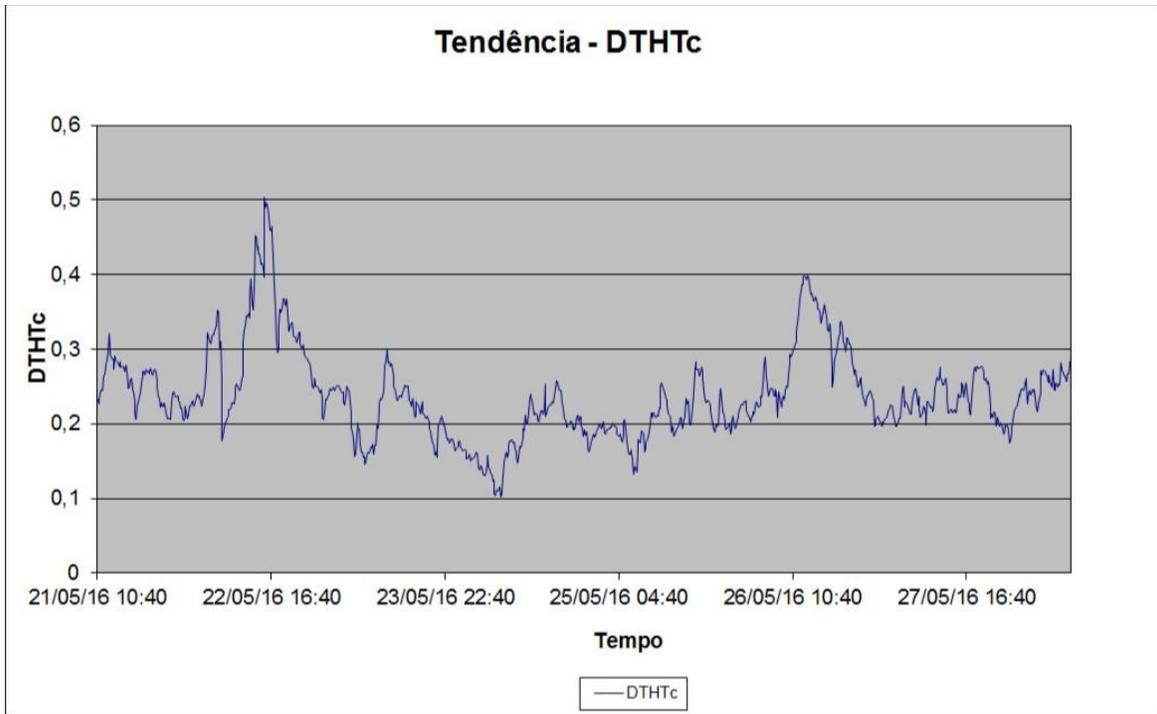


Figura 4.33 - Tendência Indicador DTHT Fase C (pré-operacional)

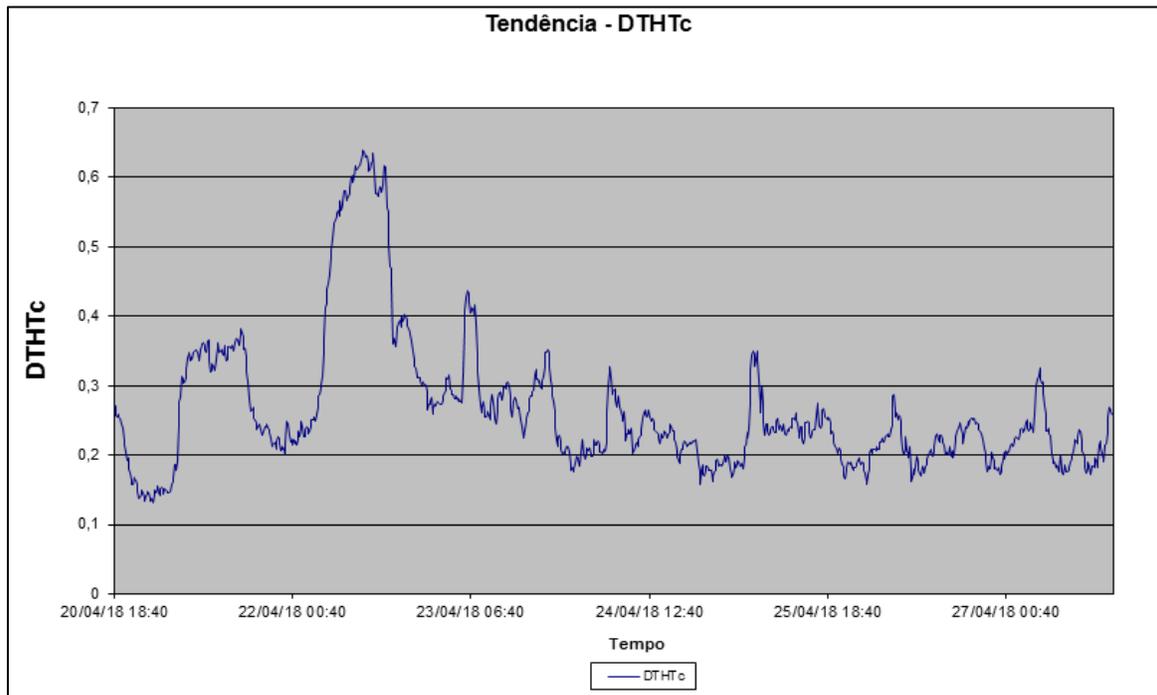


Figura 4.34 - Tendência Indicador DTHT Fase C (pós operacional)

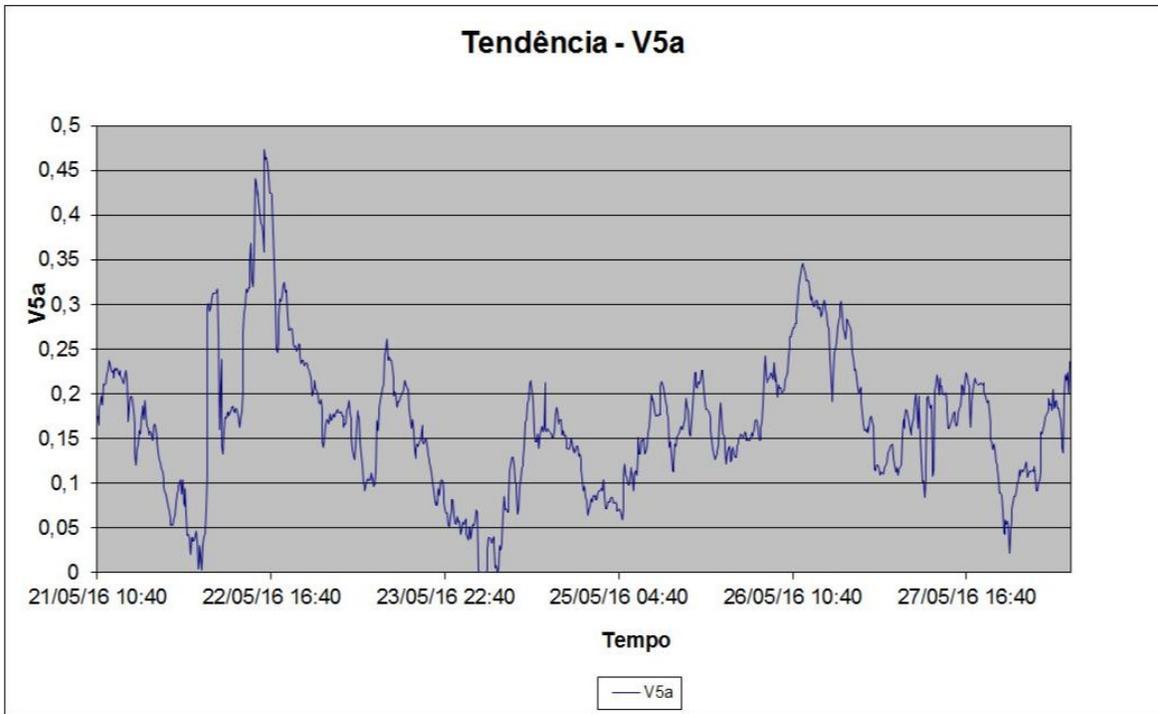


Figura 4.35 - Tendência Indicador DTH V5 Fase A (pré-operacional)

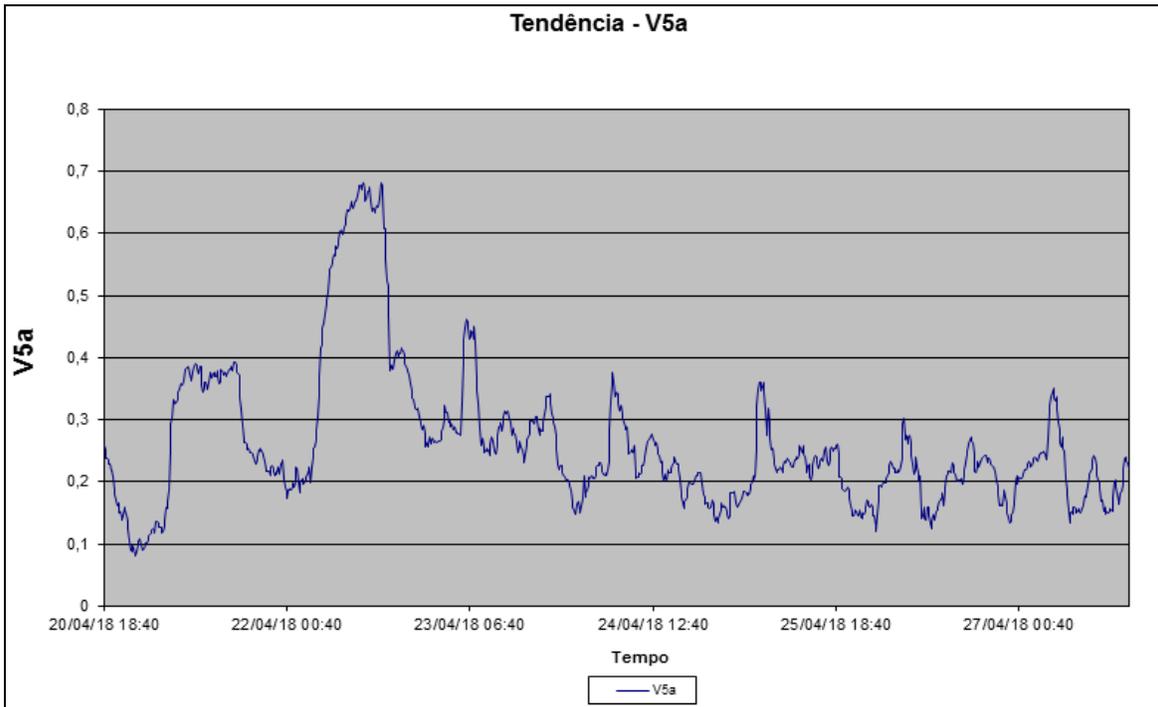


Figura 4.36 - Tendência Indicador DTH V5 Fase A (pós operacional)

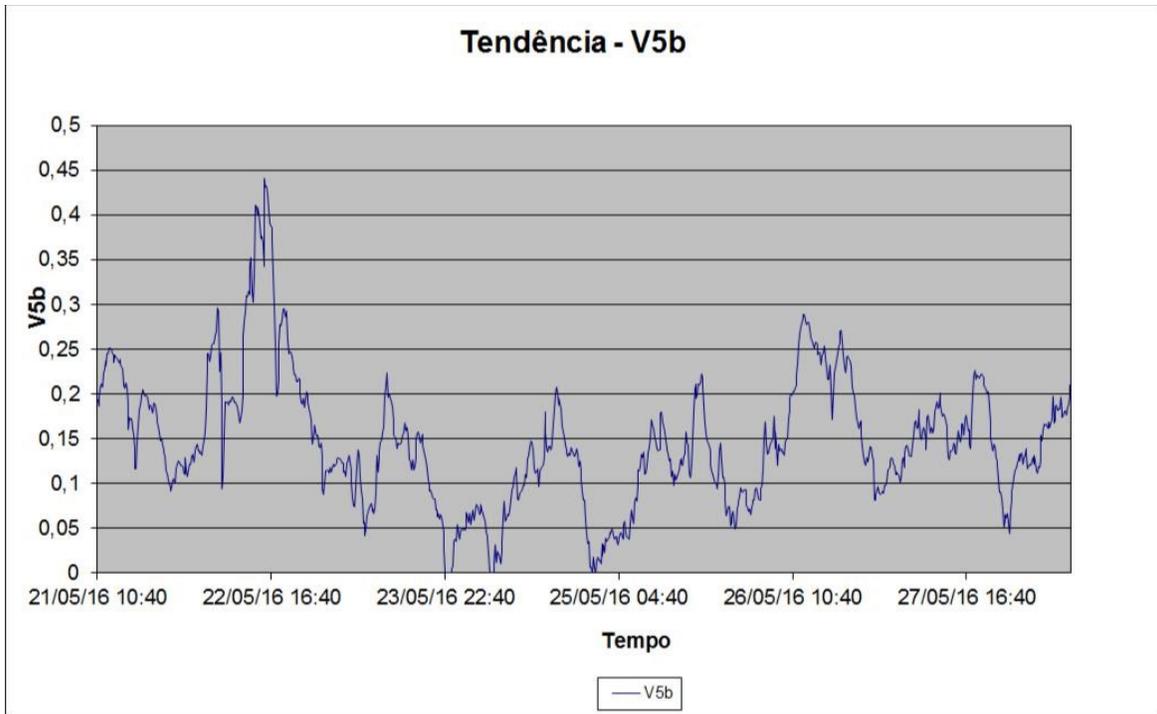


Figura 4.37 - Tendência Indicador DTH V5 Fase B (pré-operacional)

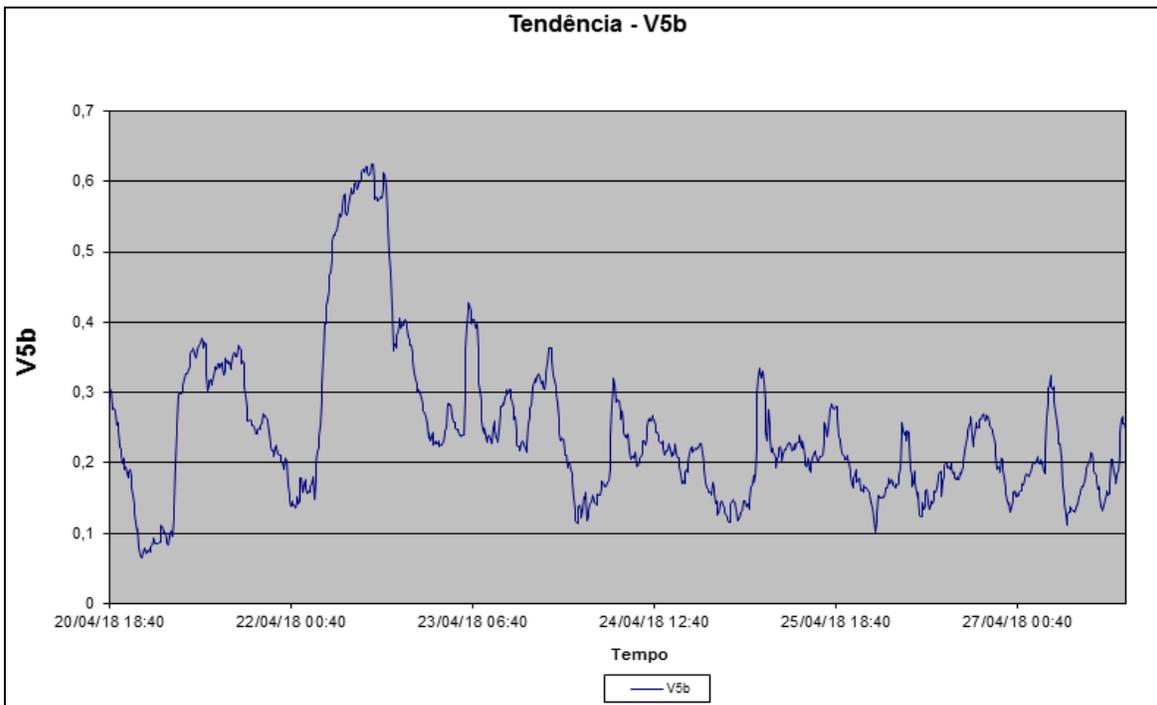


Figura 4.38 - Tendência Indicador DTH Fase B (pós operacional)

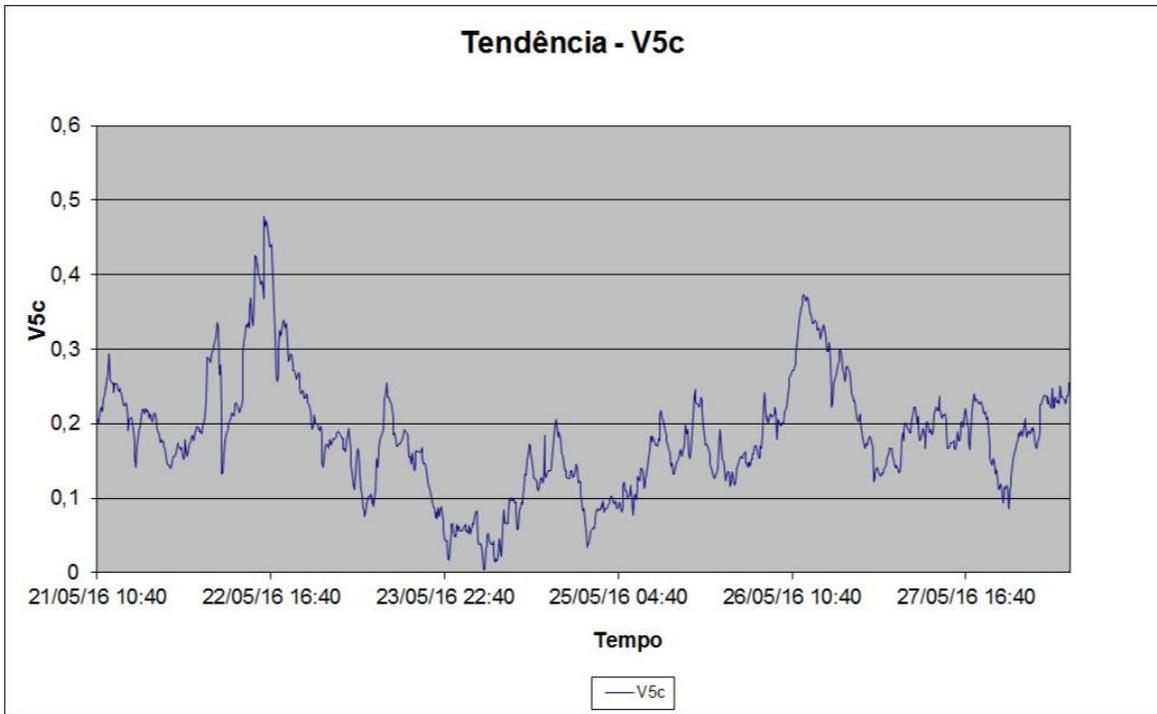


Figura 4.39 - Tendência Indicador DTH V5 Fase C (pré-operacional)

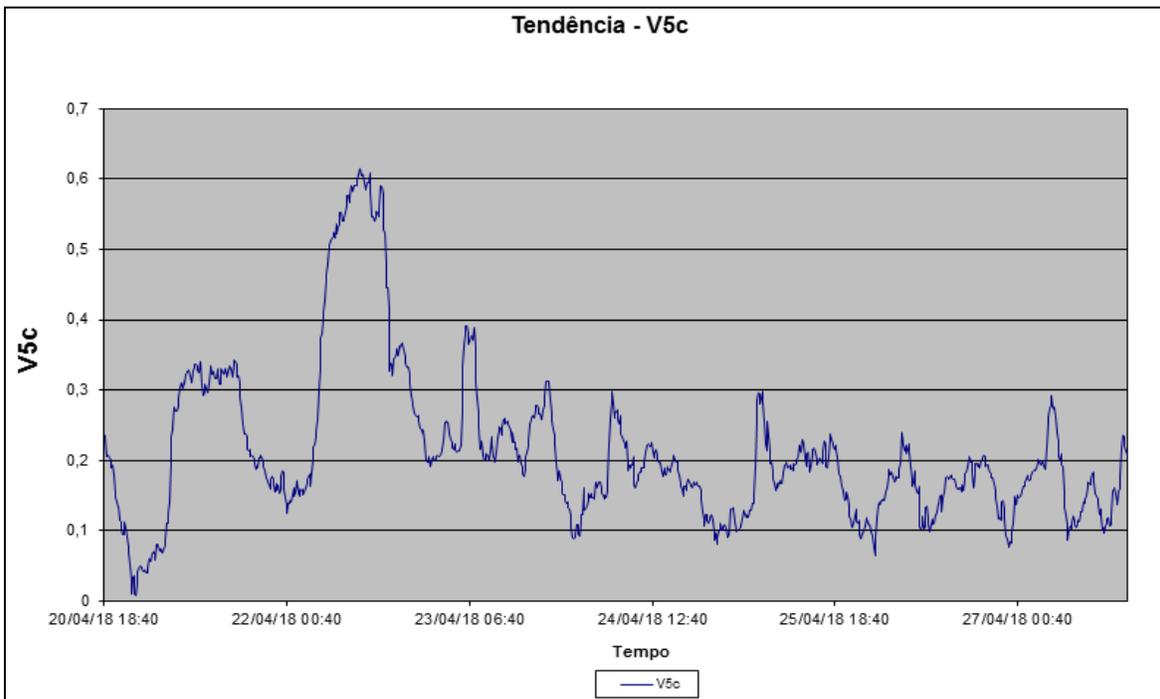


Figura 4.40 - Tendência Indicador DTH V5 Fase C (pós operacional)

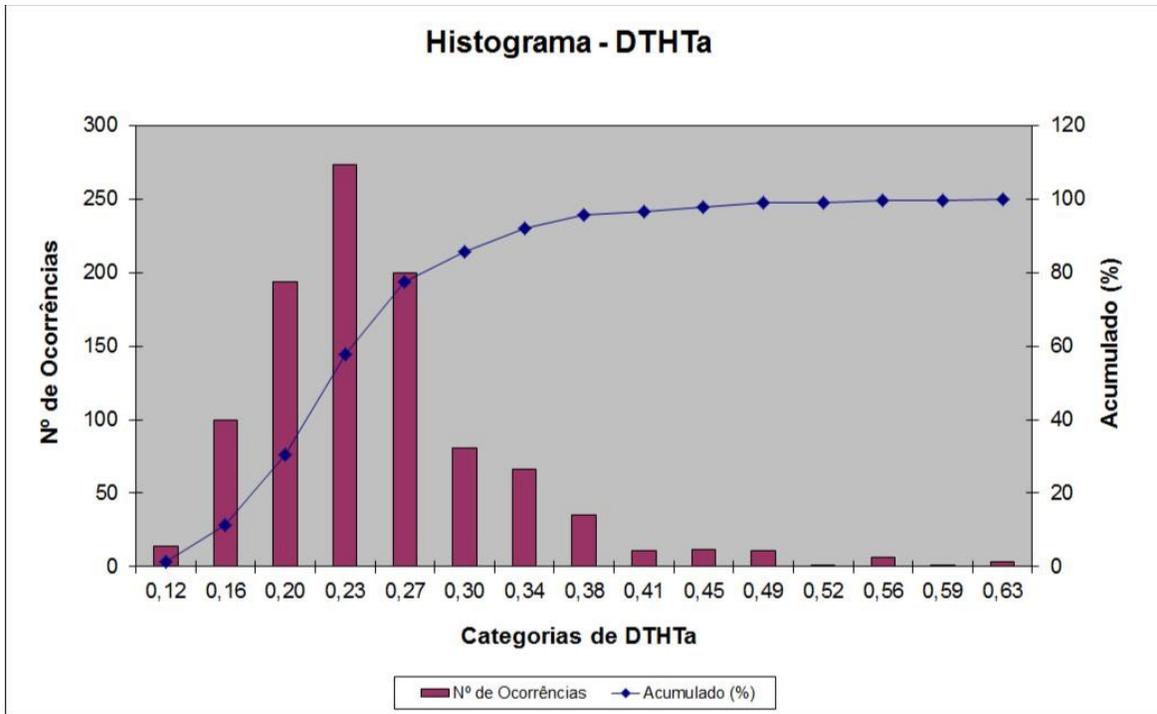


Figura 4.41 - Histograma Indicador DTHT Fase A (pré-operacional)

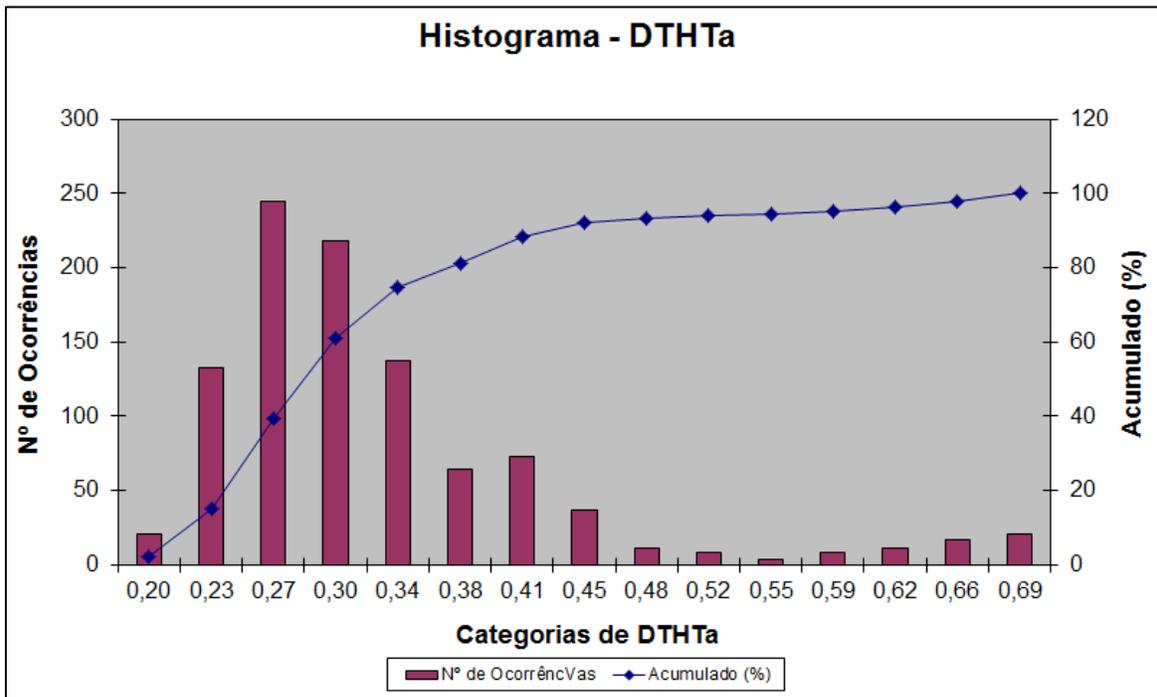


Figura 4.42 - Histograma Indicador DTHT Fase A (pós-operacional)

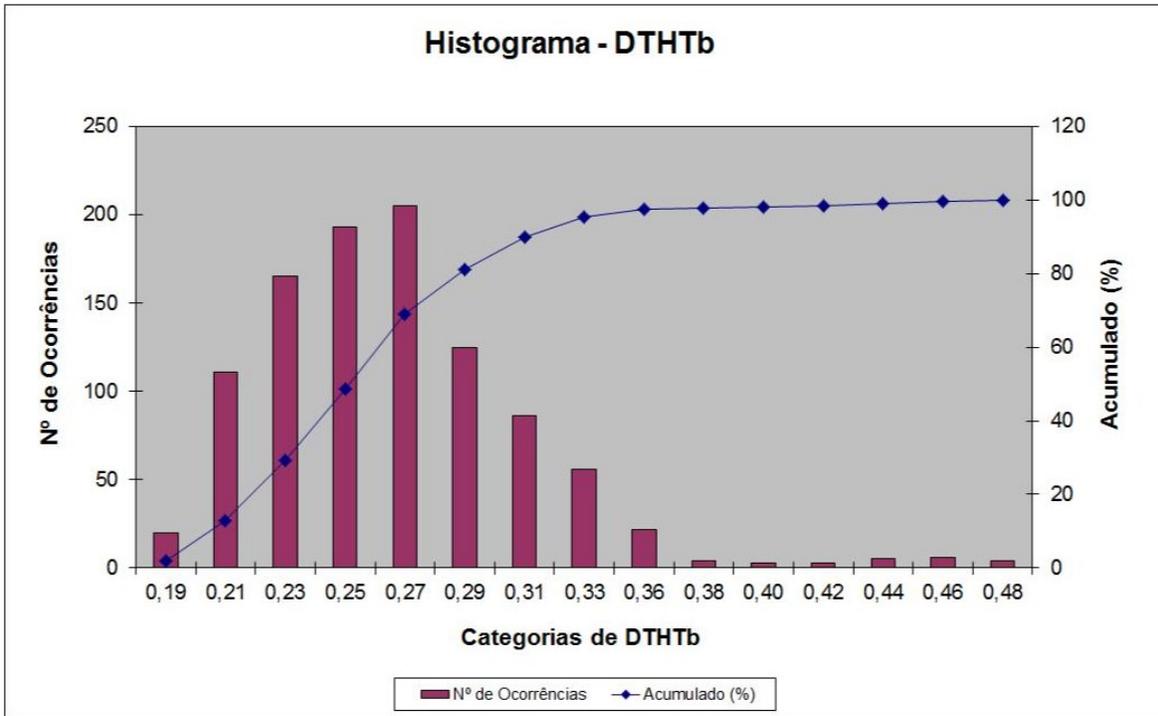


Figura 4.43 - Histograma Indicador DTHT Fase B (pré-operacional)

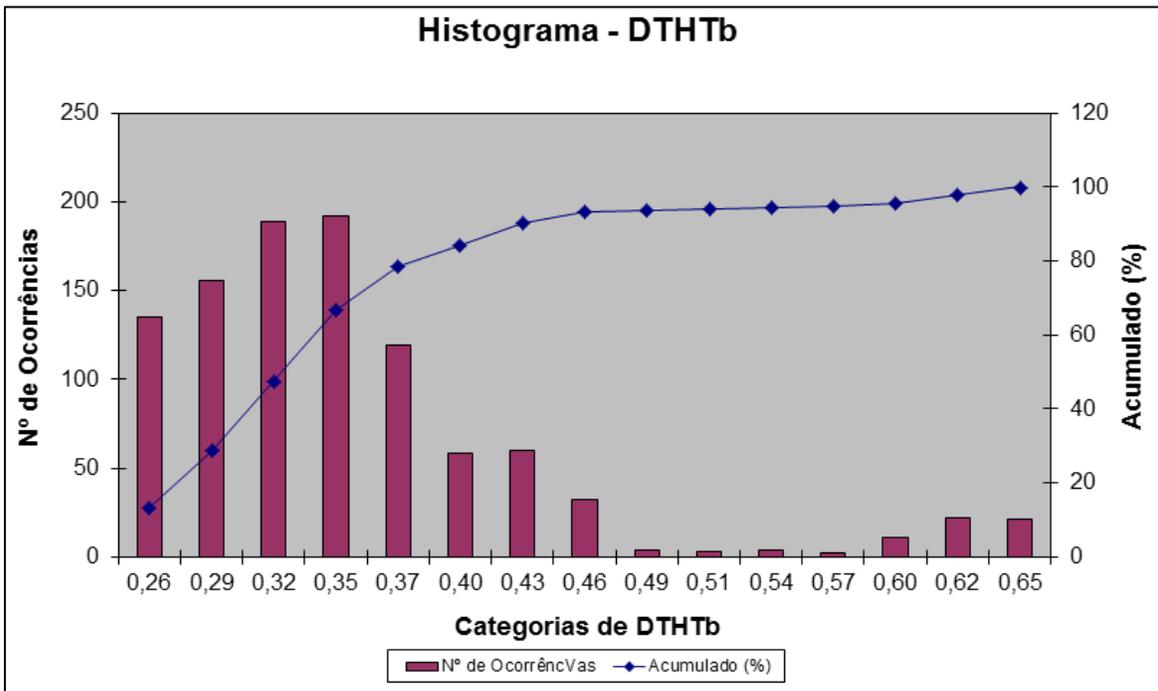


Figura 4.44 - Histograma Indicador DTHT Fase B (pós-operacional)

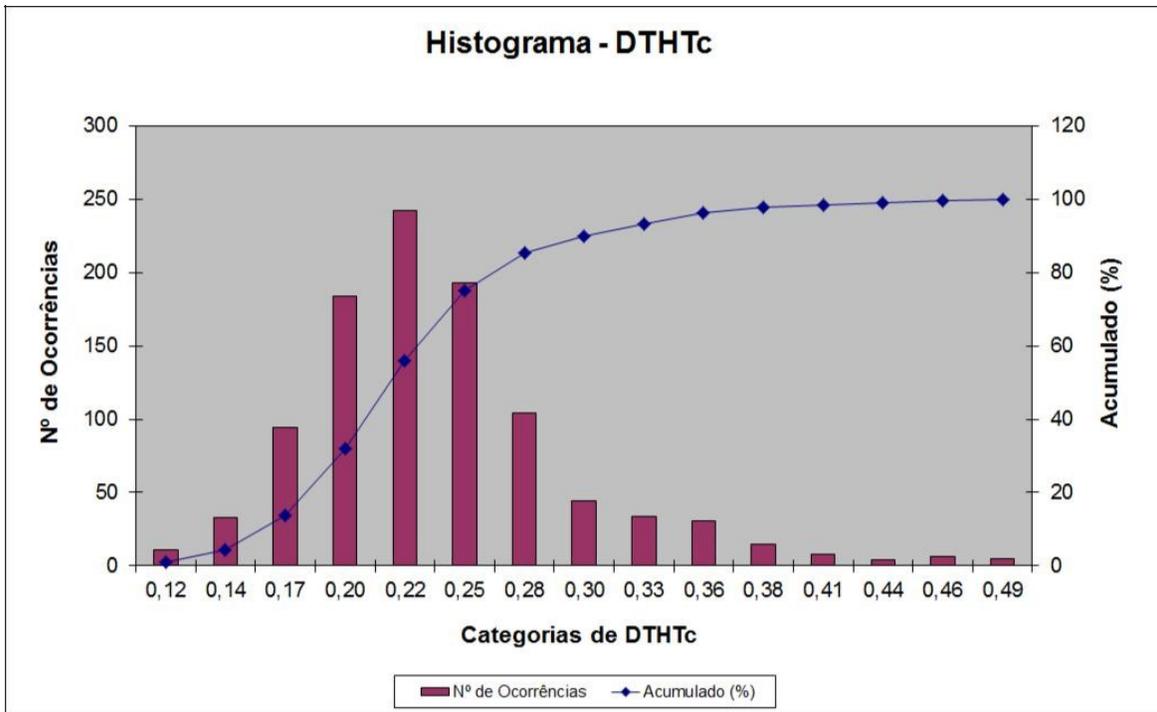


Figura 4.45 - Histograma Indicador DTHT Fase C (pré-operacional)

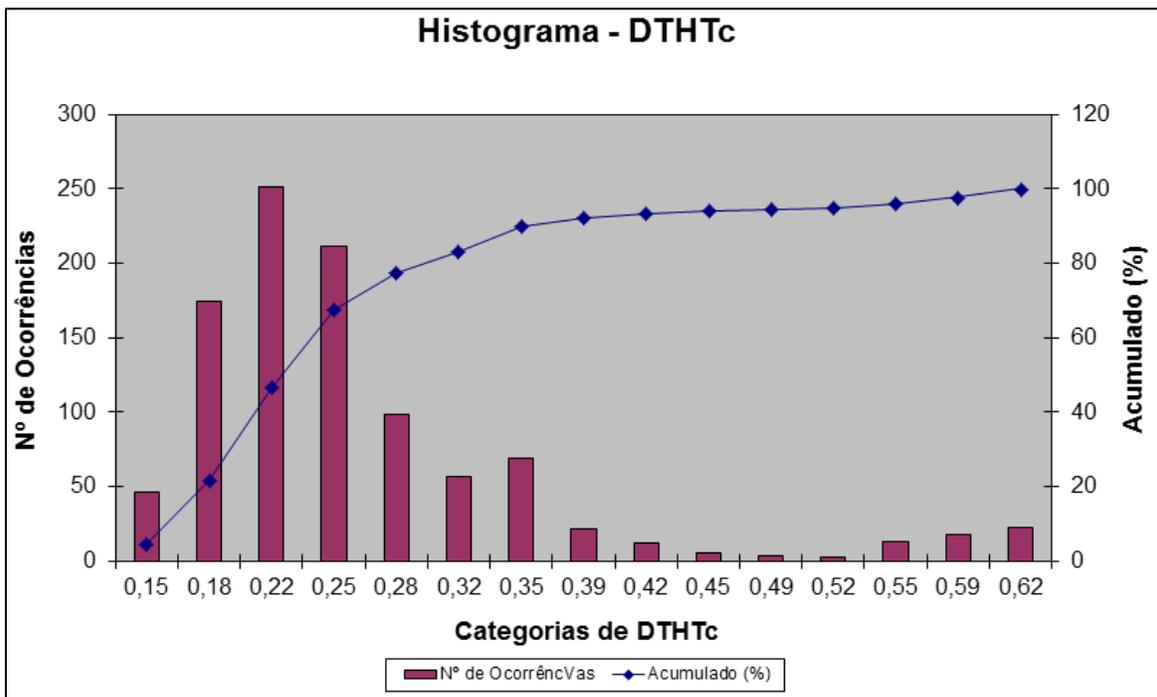


Figura 4.46 - Histograma Indicador DTHT Fase C (pós-operacional)

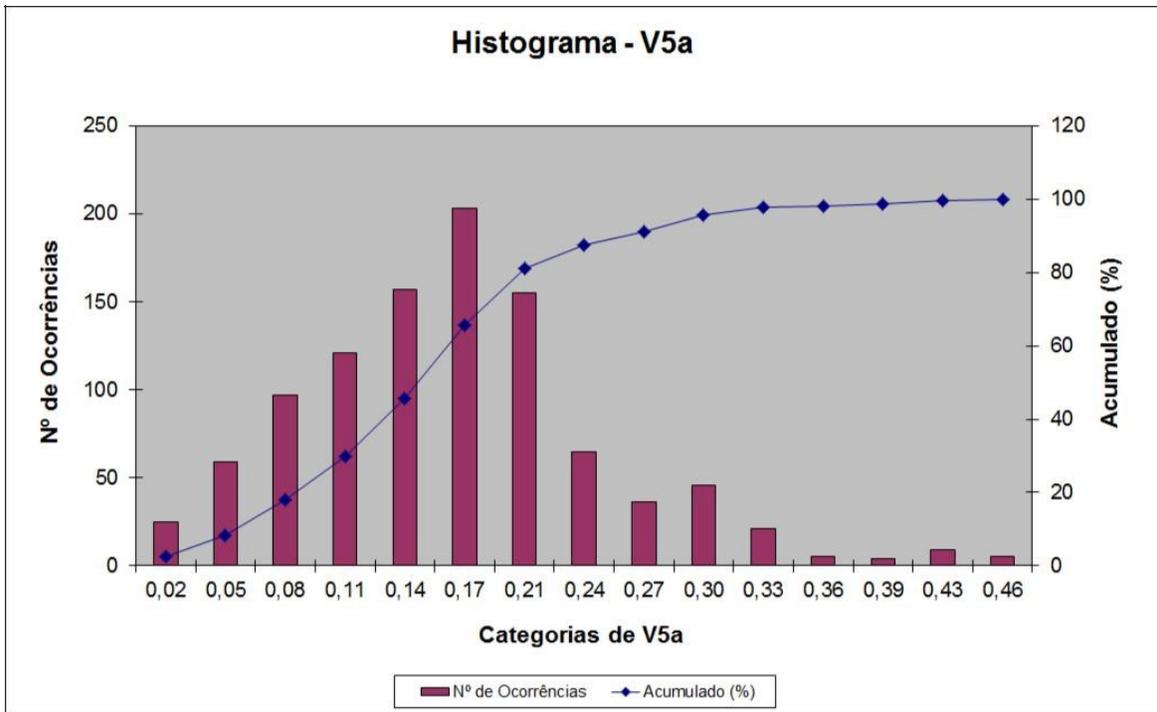


Figura 4.47 - Histograma Indicador DTH V5 Fase A (pré-operacional)

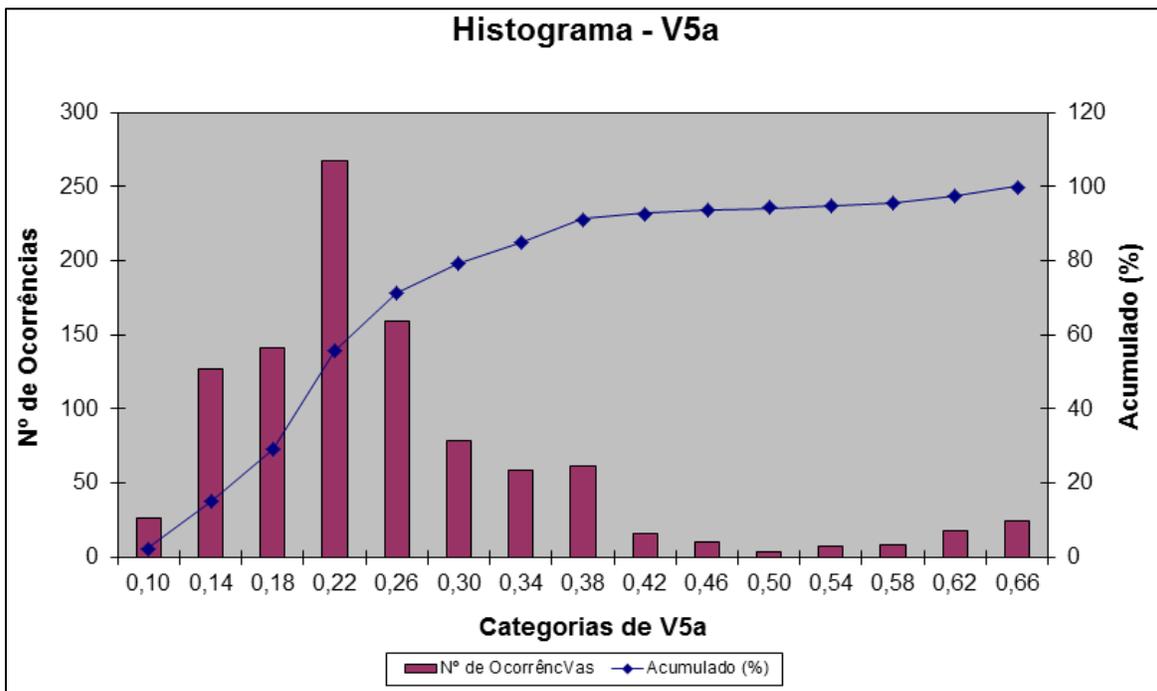


Figura 4.48 - Histograma Indicador DTH V5 Fase A (pós-operacional)

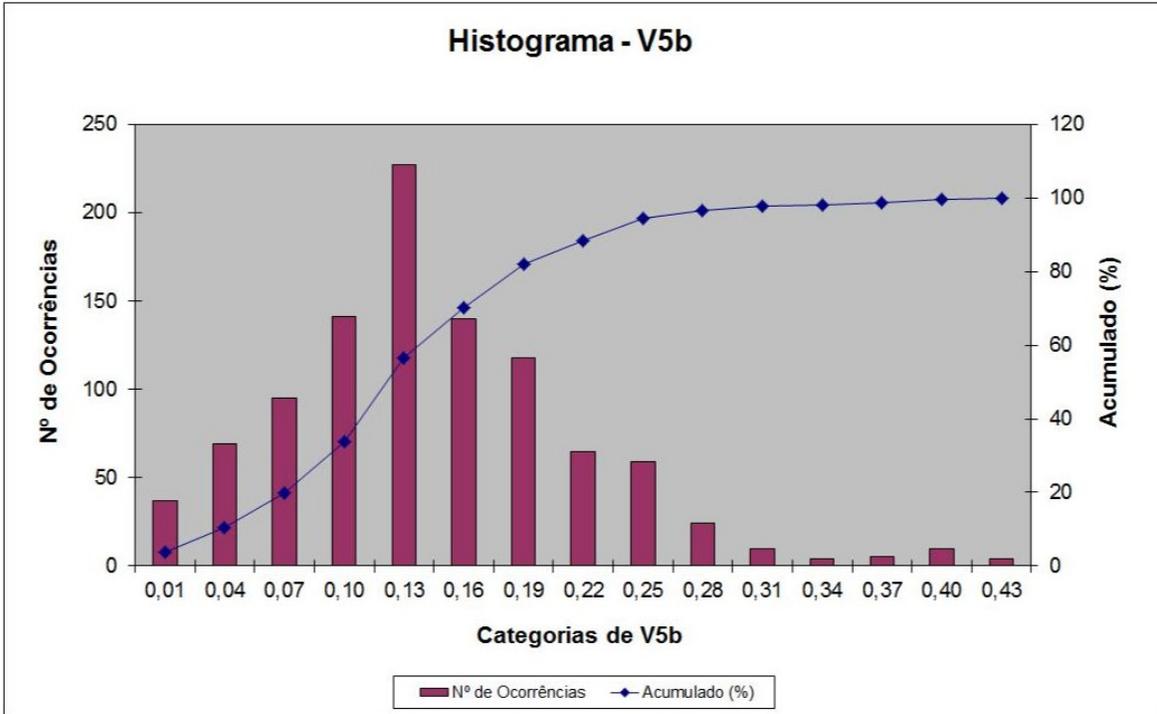


Figura 4.49 - Histograma Indicador DTH V5 Fase B (pré-operacional)

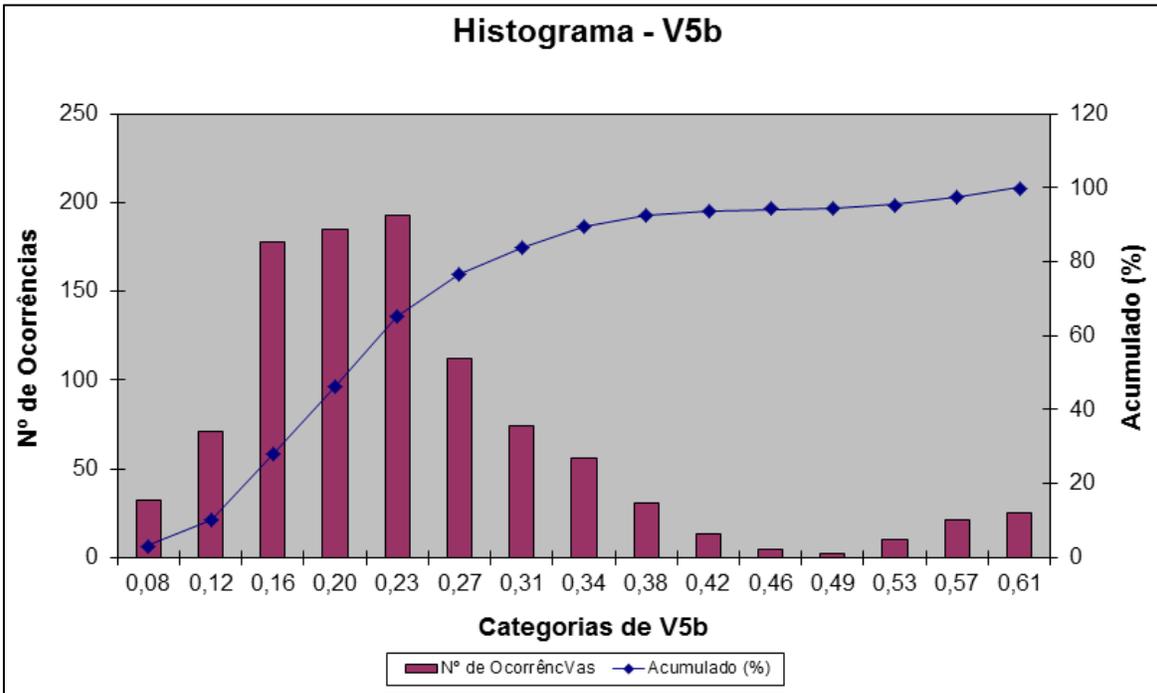


Figura 4.50 - Histograma Indicador DTH V5 Fase B (pós-operacional)

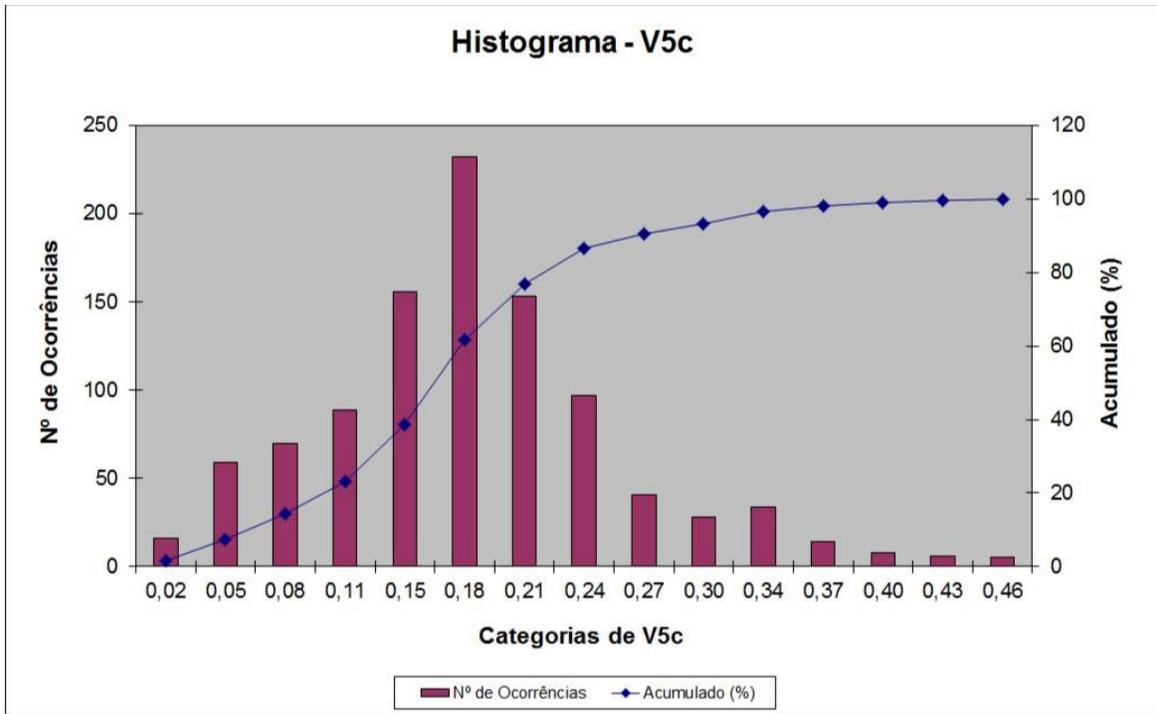


Figura 4.51 - Histograma Indicador DTH V5 Fase C (pré-operacional)

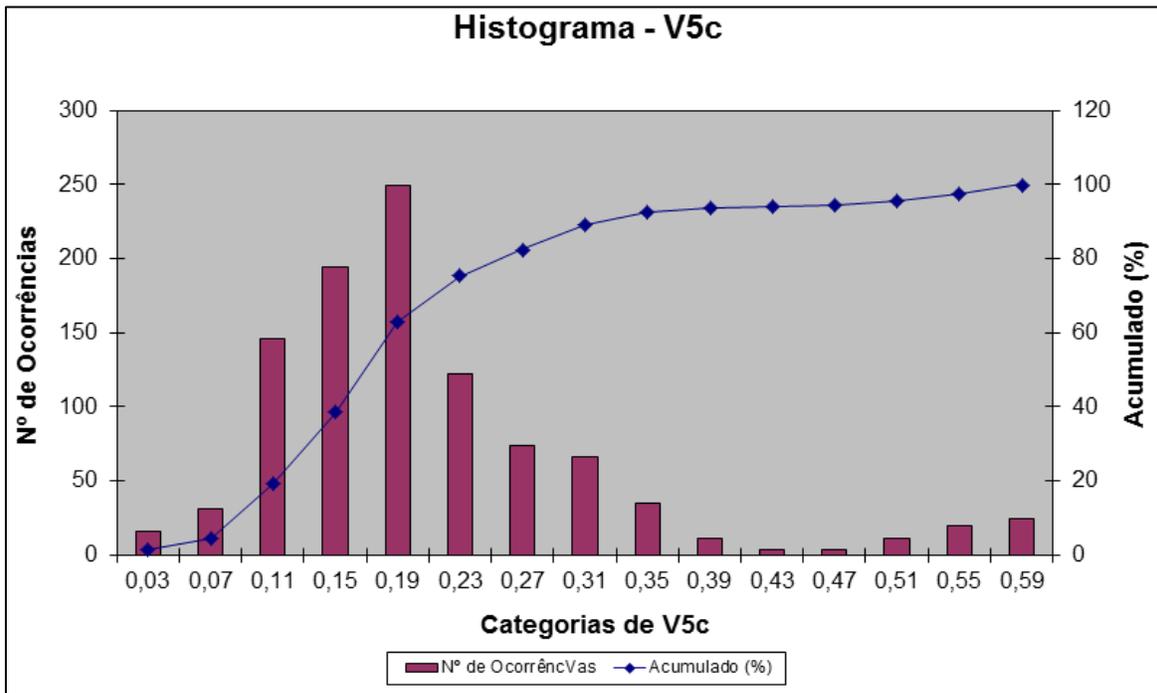


Figura 4.52 - Histograma Indicador DTH V5 Fase C (pós-operacional)

Índices	Valores
DTHTaD95%	0,550830555
DTHTbD95%	0,452765025
DTHTcD95%	0,45770037
V3aD95%	0,543389043
V5aD95%	0,426724346
V5bD95%	0,405402732
V5cD95%	0,436435413

Tabela 4.5 - Tabela de Indicadores DTHTD95%, e mais significativos V2S95% a V50S95% (pré-operacional)

Índices	Valores
DTHVaD95%	0,699146593
DTHVbD95%	0,655838278
DTHVcD95%	0,623700318
V5aD95%	0,671177715
V5bD95%	0,613443947
V5cD95%	0,597423792

Tabela 4.6 - Tabela de Indicadores DTHTD95%, e mais significativos entre V2S95% a V50S95% (pós operacional)

O indicador de harmônico pré-operacional é menor que o pós-operacional no geral. Ocorreu diferença na composição dos harmônicos pré-operação e pós operação, que foi o caso do 3º harmônico que não foi significativo na pós embora na pré ele tenha sido mais significativo. Apesar do aumento do conteúdo harmônico na rede, todos os limites globais estão abaixo do previsto no PROREDE 2.8.

4.2.2. Avaliação de Desempenho

Para avaliação de desempenho dos indicadores foram utilizados os limites indicados no submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede, 16/12/2016 [4].

4.2.2.1. Desequilíbrio de tensão

Nos barramentos da rede básica e nos barramentos de transformadores o limite global é de:

$$KD95\% \leq 2\%$$

O Resultado do indicador para o fator K obtido através dos valores da medição pré-operacional e pós operacional apresentaram os seguintes valores:

KD95%
1,1035%

Tabela 4.7 - Indicador de desequilíbrio K pré-operacional

KD95%
0,4752%

Tabela 4.8 - Indicador de desequilíbrio K pós-operacional

Portanto o indicador do fator K é menor do que o limite KD95% estabelecido.

4.2.2.2. Flutuação de Tensão

A tabela a seguir apresenta os limites globais inferior e superior para os indicadores relacionados ao fenômeno flutuação de tensão.

Limite	PstD95%	PltS95%
Limite global inferior	$1 pu / FT$	$0,8 pu / FT$
Limite global superior	$2 pu / FT$	$1,6 pu / FT$

Tabela 4.9: Limites para os indicadores PstD95% e Plt95%.

A tabela a seguir apresenta o fator de transferência Ft.

Barramento de tensão nominal ≥ 230 kV	$F_t = 0,65$
69 kV \leq Barramento de tensão nominal < 230 kV	$F_t = 0,8$
Barramento de tensão nominal < 69 kV	$F_t = 1,0$

Tabela 4.10: Fator de transferência F_t .

A tabela a seguir apresenta o fator de transferência F_t .

No caso A, o barramento é de 230kV.

A partir das tabelas anteriores foi utilizado o F_t 0.65 para obter os limites abaixo:

Limite	PstD95%	PltS95%
Limite Global Inferior	1,54 pu	1,23 pu
Limite Global Superior	3,08 pu	2,46 pu

Tabela 4.11: Limites globais inferior e superior para PstD95% e PltS95%.

Os indicadores seguintes foram obtidos a partir dos valores da medição pré-operacional e pós operacional:

PstD 95%	PltS 95%
0,294996	0,276771

Tabela 4.12 - Indicador de desequilíbrio PstD e PltS pré-operacional

PstD 95%	PltS 95%
0,2886649	0,275859

Tabela 4.13 - Indicador de desequilíbrio PstD e PltS pós operacional

Os indicadores PstD95% e o PltS95% se encontram menores do que os limites globais inferiores.

4.2.2.3. Harmônicas de tensão

A tabela seguinte apresenta os limites globais inferiores correspondentes aos indicadores de tensões harmônicas individuais de ordens 2 a 50 e DthtS95%.

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)
3, 5, 7	5%			3, 5, 7	2%		
		2, 4, 6	2%			2, 4, 6	1%
9, 11, 13	3%			9, 11, 13	1,5%		
		≥8	1%			≥8	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥27	1%			≥27	0,5%		
DTHTS95% = 6%				DTHTS95% = 3%			

Tabela 4.14: Limites globais inferiores para os indicadores de harmônicas de tensão.

Os limites globais de referência do barramento 230kV corresponde à tabela para $V \geq 69\text{kV}$.

Os indicadores referentes às harmônicas de tensão individuais de ordem 2 a 50 e totais se encontram abaixo dos limites globais inferiores.

Índices	Valores
DTHVaD95%	0,550830555
DTHVbD95%	0,452765025
DTHVcD95%	0,45770037
V3aD95%	0,543389043
V5aD95%	0,426724346
V5bD95%	0,405402732
V5cD95%	0,436435413

Tabela 4.15 - Indicadores estatísticos de harmônicas individuais e totais de tensão - mais significativos na pré-operação

Índices	Valores
DTHVaD95%	0,699146593
DTHVbD95%	0,655838278
DTHVcD95%	0,623700318
V5aD95%	0,671177715
V5bD95%	0,613443947
V5cD95%	0,597423792

Tabela 4.16: Indicadores estatísticos de harmônicas individuais e totais de tensão - mais significativos na pós operação

4.3. Caso B, C e D

Serão apresentados os dados dos casos B, C e D de forma mais compacta nesta seção, já que os fenômenos se repetem de maneira similar. Serão apresentadas também as tabelas resumos de cada indicador para cada etapa (pré-operação e pós operação).

4.3.1. Caso B: Estudos de campanha de qualidade de energia

O caso B se encontra no estado da Bahia e é uma usina de geração solar fotovoltaica que está em operação atualmente.

A campanha de qualidade pré-operacional foi realizada entre os dias 19/06/2018 e 26/06/2018. O multi-medidor utilizado foi o ION7650 da Schneider Electric que é homologado para esse tipo de medição. O ponto de medição escolhido foi o painel de medição de faturamento do bay deste empreendimento no barramento de 69kV.

A campanha de qualidade pós operacional foi realizada entre os dias 05/11/2018 e 11/11/2018, no entanto, devido à falta de dados nos dias 7 e 9, estes foram substituídos integralmente pelos dias 2 e 12. O multi-medidor utilizado foi o ION7650 da Schneider Electric que é homologado para esse tipo de medição. O ponto de medição escolhido foi o painel de medição de faturamento da SE em questão.

4.3.1.1. Desequilíbrio de Tensão

A definição, método de medição e cálculo deste indicador seguem o procedimento explicado na seção 3.2.2 deste trabalho. Os resultados pré-operacionais e pós operacionais obtidos na medição desse indicador foram os seguintes:

KD95%		Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7
0,7009%		0,6183%	0,5848%	0,6194%	0,6405%	0,6462%	0,5501%	0,7009%

Tabela 4.17 - Tabela de fator KD95% do indicador de desequilíbrio K (pré-operação)

KD95%		Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7
0,7443%		0,4594%	0,6897%	0,7040%	0,6945%	0,7443%	0,7229%	0,6808%

Tabela 4.18 - Tabela de fator KD95% do indicador de desequilíbrio K (pós operação)

Com exceção do segundo dia e do sétimo dia, o indicador de desequilíbrio pré-operacional é menor que o pós-operacional. Para efeitos de análise da ultrapassagem dos limites globais, foi considerado o valor de KD95%, que de todo modo está abaixo dos 2% previstos no PROREDE 2.8.

4.3.1.2. Flutuação de Tensão (Flicker)

A definição e método de medição e cálculo deste indicador já foi explicado na seção 3.2.3 deste trabalho. Os resultados pré-operacionais e pós operacionais obtidos na medição desse indicador foram os seguintes:

	Pstd 95%							PstD 95% PltS 95%	
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	PstD 95%	PltS 95%
Fase A	0,164914	0,132842	0,154253	0,134468	0,140544	0,140789	0,145896		
Fase B	0,15682	0,148109	0,167741	0,162039	0,146422	0,15345	0,151434		
Fase C	0,206686	0,194351	0,197016	0,196016	0,192793	0,197569	0,204597		

Tabela 4.19 - Tabela de Indicadores PstD95% e Plt95% (pré-operacional)

	Pstd 95%							PstD 95% PltS 95%	
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	PstD 95%	PltS 95%
Fase A	0,419809	0,317813	0,337716	0,323964	0,379174	0,249867	0,428993		
Fase B	0,699124	0,287733	0,293473	0,308331	0,392583	0,231662	0,362339		
Fase C	0,70683	0,350981	0,339858	0,332734	0,42572	0,299153	0,370827		

Tabela 4.20 - Tabela de Indicadores PstD95% e Plt95% (pós operacional)

O indicador de flutuação sofreu muita influência principalmente por causa do primeiro dia de medição da campanha pós operacional. Pode-se observar que houve um aumento da flutuação entre os dois períodos. Mas em ambos os casos os indicadores se mantiveram abaixo dos limites globais estabelecidos. Que nesse caso de barramento de 69kV é segundo o PROREDE 2.8:

Limite	PstD95%	PltS95%
Limite Global Inferior	1,25 pu	1 pu
Limite Global superior	2,5 pu	2 pu

4.3.1.3. Distorção Harmônica de Tensão

Os resultados pré-operacionais e pós operacionais obtidos na medição desse indicador foram os seguintes:

Índices	Valores
DTHTaD95%	1,344587
DTHTbD95%	1,576098
DTHTcD95%	1,259892
V3aD95%	0,669586
V3bD95%	0,439672
V5aD95%	1,193043
V5bD95%	1,469909
V5cD95%	1,16558
V7aD95%	0,462502
V7bD95%	0,522015

Tabela 4.21 - Tabela de Indicadores DTHTD95%, e mais significativos V2S95% a V50S95% (pré-operacional)

Índices	Valores
DTHTaD95%	1,663055
DTHTbD95%	1,857987
DTHTcD95%	1,442499
V3aD95%	0,462076
V5aD95%	1,434603
V5bD95%	1,673809
V5cD95%	1,333496
V7aD95%	0,616752
V7bD95%	0,64894
V7cD95%	0,403415

Tabela 4.22 - Tabela de Indicadores DTHTD95%, e mais significativos entre V2S95% a V50S95% (pós operacional)

O indicador de harmônico pré-operacional é menor que o pós-operacional no geral. Ocorreu diferença na composição dos harmônicos pré-operação e pós operação, que foi o caso do 3º, 5º e 7º harmônicos. Apesar do aumento do conteúdo harmônico na rede, todos os limites globais estão abaixo do previsto no PROREDE 2.8.

4.3.2. Avaliação de Desempenho

Para avaliação de desempenho dos indicadores foram utilizados os limites indicados no submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede, 16/12/2016 [4].

4.3.2.1. Desequilíbrio de tensão

Nos barramentos da rede básica e nos barramentos de transformadores o limite global é de:

$$KD95\% \leq 2\%$$

O Resultado do indicador para o fator K obtido através dos valores da medição pré-operacional e pós operacional apresentaram os seguintes valores:

KD95%
0,7009%

Tabela 4.23 - Indicador de desequilíbrio K pré-operacional

KD95%
0,7443%

Tabela 4.24 - Indicador de desequilíbrio K pós-operacional

Portanto o indicador do fator K é menor do que o limite KD95% estabelecido.

4.3.2.2. Flutuação de Tensão

A tabela seguinte apresenta os limites globais inferior e superior para os indicadores relacionados ao fenômeno flutuação de tensão.

Limite	PstD95%	PltS95%
Limite global inferior	$1 pu / FT$	$0,8 pu / FT$
Limite global superior	$2 pu / FT$	$1,6 pu / FT$

Tabela 4.25: Limites para os indicadores PstD95% e PltS95%.

A tabela a seguir apresenta o fator de transferência Ft.

Barramento de tensão nominal ≥ 230 kV	$Ft = 0,65$
69 kV \leq Barramento de tensão nominal < 230 kV	$Ft = 0,8$
Barramento de tensão nominal < 69 kV	$Ft = 1,0$

Tabela 4.26: Fator de transferência Ft.

A tabela a seguir apresenta o fator de transferência Ft.

No caso B, o barramento é de 69kV.

A partir das tabelas anteriores foi utilizado o Ft 0.65 para obter os limites abaixo:

Limite	PstD95%	PltS95%
Limite Global Inferior	1,25 pu	1 pu
Limite Global Superior	2,5 pu	2 pu

Tabela 4.27: Limites globais inferior e superior para PstD95% e PltS95%.

Os indicadores seguintes foram obtidos a partir dos valores da medição pré-operacional e pós operacional:

PstD 95%	PltS 95%
0,20669	0,19720

Tabela 4.28 - Indicador de desequilíbrio PstD e PltS pré-operacional

PstD 95%	PltS 95%
0,70683	0,36977

Tabela 4.29 - Indicador de desequilíbrio PstD e PltS pós operacional

Os indicadores PstD95% e o PltS95% se encontram menores do que os limites globais inferiores.

4.3.2.3. Harmônicas de tensão

A tabela seguinte apresenta os limites globais inferiores correspondentes aos indicadores de tensões harmônicas individuais de ordens 2 a 50 e DthtS95%.

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)
3, 5, 7	5%			3, 5, 7	2%		
		2, 4, 6	2%			2, 4, 6	1%
9, 11, 13	3%			9, 11, 13	1,5%		
		≥8	1%			≥8	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥27	1%			≥27	0,5%		
DTHTS95% = 6%				DTHTS95% = 3%			

Tabela 4.30: Limites globais inferiores para os indicadores de harmônicas de tensão.

A tensão no barramento 230kV corresponde à tabela para V < 69kV.

Os indicadores referentes às harmônicas de tensão individuais de ordem 2 a 50 e totais se encontram abaixo dos limites globais inferiores.

Índices	Valores
DTHTaD95%	1,344587
DTHTbD95%	1,576098
DTHTcD95%	1,259892
V3aD95%	0,669586
V3bD95%	0,439672
V5aD95%	1,193043
V5bD95%	1,469909
V5cD95%	1,16558
V7aD95%	0,462502
V7bD95%	0,522015

Tabela 4.31 - Indicadores estatísticos de harmônicas individuais e totais de tensão - mais significativos na pré-operação

Índices	Valores
DTHTaD95%	1,663055
DTHTbD95%	1,857987
DTHTcD95%	1,442499
V3aD95%	0,462076
V5aD95%	1,434603
V5bD95%	1,673809
V5cD95%	1,333496
V7aD95%	0,616752
V7bD95%	0,64894
V7cD95%	0,403415

Tabela 4.32: Indicadores estatísticos de harmônicas individuais e totais de tensão - mais significativos na pós operação

4.3.3. Caso C: Estudos de campanha de qualidade de energia

O caso C se encontra no estado da Bahia e é uma usina de geração solar fotovoltaica que está em operação atualmente.

A campanha de qualidade pré-operacional foi realizada entre os dias 07/08/2018 e 14/08/2018. O multi-medidor utilizado foi o ION7650 da Schneider Electric que é homologado para esse tipo de medição. O ponto de medição escolhido foi o painel de medição de faturamento do bay deste empreendimento no barramento de 230kV.

A campanha de qualidade pós operacional foi realizada entre os dias 11/04/2019 e 18/0/2019. O multi-medidor utilizado foi o ION7650 da Schneider Electric que é homologado para esse tipo de medição. O ponto de medição escolhido foi o painel de medição de faturamento da SE em questão.

4.3.3.1. Desequilíbrio de Tensão

A definição e método de medição e cálculo deste indicador já foi explicado na seção 3.2.2 deste trabalho. Os resultados pré-operacionais e pós operacionais obtidos na medição desse indicador foram os seguintes:

KD95%		Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7
0,4275%		0,4072%	0,4141%	0,3724%	0,3796%	0,4061%	0,4275%	0,4102%

Tabela 4.33 - Tabela de fator KD95% do indicador de desequilíbrio K (pré-operação)

KD95%		Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7
0,2825%		0,2203%	0,2549%	0,2784%	0,2793%	0,2825%	0,2803%	0,2700%

Tabela 4.34 - Tabela de fator KD95% do indicador de desequilíbrio K (pós operação)

O indicador de desequilíbrio pré-operacional foi maior que o pós-operacional em todos os casos. Para efeitos de análise da ultrapassagem dos limites globais, foi considerado o valor de KD95%, que de todo modo está abaixo dos 2% previstos no PROREDE 2.8.

4.3.3.2. Flutuação de Tensão (Flicker)

A definição e método de medição e cálculo deste indicador já foi explicado na seção 3.2.3 deste trabalho. Os resultados pré-operacionais e pós operacionais obtidos na medição desse indicador foram os seguintes:

	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	PstD 95%	PltS 95%
Fase A	0,116554	0,120799	0,118620	0,129969	0,190486	0,116615	0,114626	0,231976	0,220814
Fase B	0,141528	0,148638	0,143228	0,169867	0,170338	0,146041	0,142326		
Fase C	0,213178	0,224664	0,214790	0,229326	0,231976	0,217235	0,218925		

Tabela 4.35 - Tabela de Indicadores PstD95% e Plt95% (pré-operacional)

	Pstd 95%							PstD 95% PltS 95%	
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7		
Fase A	0,186097	0,186073	0,166868	0,165301	0,166347	0,172545	0,173419	0,233775	0,219673
Fase B	0,19876	0,20437	0,182418	0,175918	0,188162	0,185151	0,187471		
Fase C	0,219008	0,233775	0,217006	0,212811	0,216111	0,220896	0,217173		

Tabela 4.36 - Tabela de Indicadores PstD95% e Plt95% (pós operacional)

O indicador de flutuação não sofreu muita influência entre o período pré-operacional e o pós operacional. Mas em ambos os casos os indicadores se mantiveram abaixo dos limites globais estabelecidos. Que nesse caso de barramento de 230kV é segundo o PROREDE 2.8:

Limite	PstD95%	PltS95%
Limite Global Inferior	1,54 pu	1,23 pu
Limite Global superior	3,08 pu	2,46 pu

4.3.3.3. Distorção Harmônica de Tensão

Os resultados pré-operacionais e pós operacionais obtidos na medição desse indicador foram os seguintes:

Índices	Valores
DTHTaD95%	0,897567
DTHTbD95%	0,883561
DTHTcD95%	0,800528
V3cD95%	0,415852
V5aD95%	0,825541
V5bD95%	0,842516
V5cD95%	0,697870

Tabela 4.37 - Tabela de Indicadores DTHTD95%, e mais significativos V2S95% a V50S95% (pré-operacional)

Índices	Valores
DTHTaD95%	2,0503958
DTHTbD95%	2,0246428
DTHTcD95%	1,8911833
V3aD95%	1,0323809
V3bD95%	0,9895283
V3cD95%	0,9938248
V5aD95%	1,7473256
V5bD95%	1,7293229
V5cD95%	1,5776272
V7bD95%	0,4855226
V7cD95%	0,4587237

Tabela 4.38 - Tabela de Indicadores DTHTD95%, e mais significativos entre V2S95% a V50S95% (pós operacional)

O indicador de harmônico pré-operacional é menor que o pós-operacional no geral. Ocorreu diferença na composição dos harmônicos pré-operação e pós operação, que foi o caso do 3º, 5º e 7º harmônicos. Apesar do aumento do conteúdo harmônico na rede, todos os limites globais estão abaixo do previsto no PROREDE 2.8.

4.3.4. Avaliação de Desempenho

Para avaliação de desempenho dos indicadores foram utilizados os limites indicados no submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede, 16/12/2016 [4].

4.3.4.1. Desequilíbrio de tensão

Nos barramentos da rede básica e nos barramentos de transformadores o limite global é de:

$$KD95\% \leq 2\%$$

O Resultado do indicador para o fator K obtido através dos valores da medição pré-operacional e pós operacional apresentaram os seguintes valores:

KD95%
0,4275%

Tabela 4.39 - Indicador de desequilíbrio K pré-operacional

KD95%
0,2825%

Tabela 4.40 - Indicador de desequilíbrio K pós-operacional

Portanto o indicador do fator K é menor do que o limite KD95% estabelecido.

4.3.4.2. Flutuação de Tensão

A tabela seguinte apresenta os limites globais inferior e superior para os indicadores relacionados ao fenômeno flutuação de tensão.

Limite	PstD95%	PltS95%
Limite global inferior	$1 pu / FT$	$0,8 pu / FT$
Limite global superior	$2 pu / FT$	$1,6 pu / FT$

Tabela 4.41: Limites para os indicadores PstD95% e Plt95%.

A tabela a seguir apresenta o fator de transferência Ft.

Barramento de tensão nominal ≥ 230 kV	$F_t = 0,65$
69 kV \leq Barramento de tensão nominal < 230 kV	$F_t = 0,8$
Barramento de tensão nominal < 69 kV	$F_t = 1,0$

Tabela 4.42: Fator de transferência F_t .

A tabela a seguir apresenta o fator de transferência F_t .

No caso C, o barramento é de 230kV.

A partir das tabelas anteriores foi utilizado o F_t 0.65 para obter os limites abaixo:

Limite	PstD95%	PltS95%
Limite Global Inferior	1,54 pu	1,23 pu
Limite Global Superior	3,08 pu	2,46 pu

Tabela 4.43: Limites globais inferior e superior para PstD95% e PltS95%.

Os indicadores seguintes foram obtidos a partir dos valores da medição pré-operacional e pós operacional:

PstD 95%	PltS 95%
0,23198	0,22081

Tabela 4.44 - Indicador de desequilíbrio PstD e PltS pré-operacional

PstD 95%	PltS 95%
0,23377	0,21967

Tabela 4.45 - Indicador de desequilíbrio PstD e PltS pós operacional

Os indicadores PstD95% e o PltS95% se encontram menores do que os limites globais inferiores.

4.3.4.3. Harmônicas de tensão

A tabela seguinte apresenta os limites globais inferiores correspondentes aos indicadores de tensões harmônicas individuais de ordens 2 a 50 e DthtS95%.

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)
3, 5, 7	5%			3, 5, 7	2%		
		2, 4, 6	2%			2, 4, 6	1%
9, 11, 13	3%			9, 11, 13	1,5%		
		≥8	1%			≥8	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥27	1%			≥27	0,5%		
DTHTS95% = 6%				DTHTS95% = 3%			

Tabela 4.46: Limites globais inferiores para os indicadores de harmônicas de tensão.

A tensão no barramento 230kV corresponde à tabela para $V \geq 69\text{kV}$.

Os indicadores referentes às harmônicas de tensão individuais de ordem 2 a 50 e totais se encontram abaixo dos limites globais inferiores.

Índices	Valores
DTHTaD95%	0,897567
DTHTbD95%	0,883561
DTHTcD95%	0,800528
V3cD95%	0,415852
V5aD95%	0,825541
V5bD95%	0,842516
V5cD95%	0,697870

Tabela 4.47 - Indicadores estatísticos de harmônicas individuais e totais de tensão - mais significativos na pré-operação

Índices	Valores
DTHTaD95%	2,0503958
DTHTbD95%	2,0246428
DTHTcD95%	1,8911833
V3aD95%	1,0323809
V3bD95%	0,9895283
V3cD95%	0,9938248
V5aD95%	1,7473256
V5bD95%	1,7293229
V5cD95%	1,5776272
V7bD95%	0,4855226
V7cD95%	0,4587237

Tabela 4.48: Indicadores estatísticos de harmônicas individuais e totais de tensão - mais significativos na pós operação

4.3.5. Caso D: Estudos de campanha de qualidade de energia

O caso D se encontra no estado do Ceará e é uma usina de geração eólica que está em operação atualmente.

A campanha de qualidade pré-operacional foi realizada entre os dias 30/03/2017 e 06/04/2017. O multi-medidor utilizado foi o ION7650 da Schneider Electric que é homologado para esse tipo de medição. O ponto de medição escolhido foi o painel de medição de faturamento do bay deste empreendimento no barramento de 230kV.

A campanha de qualidade pós operacional foi realizada entre os dias 21/09/2017 e 28/09/2017. O multi-medidor utilizado foi o ION7650 da Schneider Electric que é homologado para esse tipo de medição. O ponto de medição escolhido foi o painel de medição de faturamento da SE em questão.

4.3.5.1. Desequilíbrio de Tensão

A definição e método de medição e cálculo deste indicador já foi explicado na seção 3.2.2 deste trabalho. Os resultados pré-operacionais e pós operacionais obtidos na medição desse indicador foram os seguintes:

KD95%		Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7
0,1691%		0,1338%	0,1590%	0,1564%	0,1691%	0,1634%	0,1654%	0,1606%

Tabela 4.49 - Tabela de fator KD95% do indicador de desequilíbrio K (pré-operação)

KD95%		Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7
0,3634%		0,2920%	0,2849%	0,3634%	0,3592%	0,3116%	0,2859%	0,2838%

Tabela 4.50 - Tabela de fator KD95% do indicador de desequilíbrio K (pós operação)

O indicador de desequilíbrio pré-operacional foi menor que o pós-operacional em todos os casos. Para efeitos de análise da ultrapassagem dos limites globais, foi considerado o valor de KD95%, que de todo modo está abaixo dos 2% previstos no PROREDE 2.8.

4.3.5.2. Flutuação de Tensão (Flicker)

A definição e método de medição e cálculo deste indicador já foi explicado na seção 3.2.3 deste trabalho. Os resultados pré-operacionais e pós operacionais obtidos na medição desse indicador foram os seguintes:

	Pstd 95%							PstD 95% PltS 95%	
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7		
Fase A	0,251135	0,218014	0,209414	0,218989	0,183763	0,195516	0,199035	0,258412	0,237279
Fase B	0,222234	0,234437	0,213325	0,208193	0,181522	0,182863	0,194275		
Fase C	0,251407	0,258412	0,230762	0,23449	0,224025	0,21635	0,222808		

Tabela 4.51 - Tabela de Indicadores Pstd95% e Plt95% (pré-operacional)

	Pstd 95%							PstD 95% PltS 95%	
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7		
Fase A	0,251546	0,240356	0,218625	0,24105	0,250011	0,207156	0,203987	0,340548	0,248629
Fase B	0,240408	0,225868	0,214115	0,27055	0,260521	0,2158	0,197808		
Fase C	0,251353	0,244719	0,244943	0,340548	0,277057	0,238524	0,220914		

Tabela 4.52 - Tabela de Indicadores Pstd95% e Plt95% (pós operacional)

O indicador de flutuação não sofreu muita influência entre o período pré-operacional e o pós operacional. Mas em ambos os casos os indicadores se mantiveram abaixo dos limites globais estabelecidos. Que nesse caso de barramento de 230kV é segundo o PROREDE 2.8:

Limite	PstD95%	PltS95%
Limite Global Inferior	1,54 pu	1,23 pu
Limite Global superior	3,08 pu	2,46 pu

4.3.5.3. Distorção Harmônica de Tensão

Os resultados pré-operacionais e pós operacionais obtidos na medição desse indicador foram os seguintes:

Índices	Valores
DTHTaD95%	1,79088
DTHTbD95%	1,965064
DTHTcD95%	1,02415
V3aD95%	1,119485
V3bD95%	0,695158
V3cD95%	0,562352
V5aD95%	1,1984
V5bD95%	1,756225
V5cD95%	0,844534
V7aD95%	0,790889
V7bD95%	0,718329

Tabela 4.53 - Tabela de Indicadores DTHTD95%, e mais significativos V2S95% a V50S95% (pré-operacional)

Índices	Valores
DTHTaD95%	1,760568357
DTHTbD95%	1,601208895
DTHTcD95%	0,735890612
V3aD95%	1,173659223
V3bD95%	0,765018377
V3cD95%	0,571147054
V5aD95%	1,21857059
V5bD95%	1,290257925
V5cD95%	0,513304839
V7aD95%	0,649959096
V7bD95%	0,665369838

Tabela 4.54 - Tabela de Indicadores DTHTD95%, e mais significativos entre V2S95% a V50S95% (pós operacional)

É o primeiro caso em que o indicador de harmônico pré-operacional é maior que o pós-operacional no geral. De qualquer forma, em ambas as etapas todos os limites globais estão abaixo do previsto no PROREDE 2.8.

4.3.6. Avaliação de Desempenho

Para avaliação de desempenho dos indicadores foram utilizados os limites indicados no submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede, 16/12/2016 [4].

4.3.6.1. Desequilíbrio de tensão

Nos barramentos da rede básica e nos barramentos de transformadores o limite global é de:

$$KD95\% \leq 2\%$$

O Resultado do indicador para o fator K obtido através dos valores da medição pré-operacional e pós operacional apresentaram os seguintes valores:

KD95%
0,1691%

Tabela 4.55 - Indicador de desequilíbrio K pré-operacional

KD95%
0,3634%

Tabela 4.56 - Indicador de desequilíbrio K pós-operacional

Portanto o indicador do fator K é menor do que o limite KD95% estabelecido.

4.3.6.2. Flutuação de Tensão

A tabela seguinte apresenta os limites globais inferior e superior para os indicadores relacionados ao fenômeno flutuação de tensão.

Limite	PstD95%	PltS95%
Limite global inferior	$1 pu / FT$	$0,8 pu / FT$
Limite global superior	$2 pu / FT$	$1,6 pu / FT$

Tabela 4.57: Limites para os indicadores PstD95% e Plt95%.

A tabela a seguir apresenta o fator de transferência Ft.

Barramento de tensão nominal ≥ 230 kV	$F_t = 0,65$
69 kV \leq Barramento de tensão nominal < 230 kV	$F_t = 0,8$
Barramento de tensão nominal < 69 kV	$F_t = 1,0$

Tabela 4.58: Fator de transferência F_t .

A tabela a seguir apresenta o fator de transferência F_t .

No caso D, o barramento é de 230kV.

A partir das tabelas anteriores foi utilizado o F_t 0.65 para obter os limites abaixo:

Limite	PstD95%	PltS95%
Limite Global Inferior	1,54 pu	1,23 pu
Limite Global Superior	3,08 pu	2,46 pu

Tabela 4.59: Limites globais inferior e superior para PstD95% e PltS95%.

Os indicadores seguintes foram obtidos a partir dos valores da medição pré-operacional e pós operacional:

PstD 95%	PltS 95%
0,25841	0,23728

Tabela 4.60 - Indicador de desequilíbrio PstD e PltS pré-operacional

PstD 95%	PltS 95%
0,34055	0,24863

Tabela 4.61 - Indicador de desequilíbrio PstD e PltS pós operacional

Os indicadores PstD95% e o PltS95% se encontram menores do que os limites globais inferiores.

4.3.6.3. Harmônicas de tensão

A tabela seguinte apresenta os limites globais inferiores correspondentes aos indicadores de tensões harmônicas individuais de ordens 2 a 50 e DthtS95%.

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)
3, 5, 7	5%			3, 5, 7	2%		
		2, 4, 6	2%			2, 4, 6	1%
9, 11, 13	3%			9, 11, 13	1,5%		
		≥8	1%			≥8	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥27	1%			≥27	0,5%		
DTHTS95% = 6%				DTHTS95% = 3%			

Tabela 4.62: Limites globais inferiores para os indicadores de harmônicas de tensão.

A tensão no barramento 230kV corresponde à tabela para $V \geq 69\text{kV}$.

Os indicadores referentes às harmônicas de tensão individuais de ordem 2 a 50 e totais se encontram abaixo dos limites globais inferiores.

Índices	Valores
DTHTaD95%	1,79088
DTHTbD95%	1,965064
DTHTcD95%	1,02415
V3aD95%	1,119485
V3bD95%	0,695158
V3cD95%	0,562352
V5aD95%	1,1984
V5bD95%	1,756225
V5cD95%	0,844534
V7aD95%	0,790889
V7bD95%	0,718329

Tabela 4.63 - Indicadores estatísticos de harmônicas individuais e totais de tensão - mais significativos na pré-operação

Índices	Valores
DTHTaD95%	1,760568357
DTHTbD95%	1,601208895
DTHTcD95%	0,735890612
V3aD95%	1,173659223
V3bD95%	0,765018377
V3cD95%	0,571147054
V5aD95%	1,21857059
V5bD95%	1,290257925
V5cD95%	0,513304839
V7aD95%	0,649959096
V7bD95%	0,665369838

Tabela 4.64: Indicadores estatísticos de harmônicas individuais e totais de tensão - mais significativos na pós operação

4.4. Caso E: Rio Grande do Norte

O caso E é diferente de todos os outros casos. Neste caso o empreendimento investiu na instalação em filtros ativos que foram instalados nos inversores de frequência para mitigar harmônicos de corrente após as medições pré-operacionais.

4.4.1. Caso E: Estudos de campanha de qualidade de energia

O caso E se encontra no estado da Rio Grande do Norte e é uma usina de geração eólica que está em operação atualmente.

A campanha de qualidade pré-operacional foi realizada entre os dias 19/06/2018 e 26/06/2018. O multi-medidor utilizado foi o ION7650 da Schneider Electric que é homologado para esse tipo de medição. O ponto de medição escolhido foi o painel de medição de faturamento do bay deste empreendimento no barramento de 230kV.

A campanha de qualidade pós operacional foi realizada entre os dias 05/11/2018 e 11/11/2018, no entanto, devido à falta de dados nos dias 7 e 9, estes foram substituídos integralmente pelos dias 2 e 12. O multi-medidor utilizado foi o ION7650 da Schneider Electric que é homologado para esse tipo de medição. O ponto de medição escolhido foi o painel de medição de faturamento da SE em questão.

4.4.1.1. Desequilíbrio de Tensão

A definição e método de medição e cálculo deste indicador já foi explicado na seção 3.2.2 deste trabalho. Os resultados pré-operacionais e pós operacionais obtidos na medição desse indicador foram os seguintes:

KD95%		Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7
0,3906%		0,3889%	0,3842%	0,3804%	0,3906%	0,3855%	0,3390%	0,3808%

Tabela 4.65 - Tabela de fator KD95% do indicador de desequilíbrio K (pré-operação)

KD95%		Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7
0,5458%		0,5218%	0,5382%	0,5458%	0,5321%	0,5035%	0,4710%	0,5320%

Tabela 4.66 - Tabela de fator KD95% do indicador de desequilíbrio K (pós operação)

Com exceção do segundo dia e do sétimo dia, o indicador de desequilíbrio pré-operacional é menor que o pós-operacional. Para efeitos de análise da ultrapassagem dos limites globais, foi considerado o valor de KD95%, que de todo modo está abaixo dos 2% previstos no PROREDE 2.8.

4.4.1.2. Flutuação de Tensão (Flicker)

A definição e método de medição e cálculo deste indicador já foi explicado na seção 3.2.3 deste trabalho. Os resultados pré-operacionais e pós operacionais obtidos na medição desse indicador foram os seguintes:

	Pstd 95%							PstD 95%	PltS 95%
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7		
Fase A	0,222443	0,210719	0,20722	0,212481	0,186337	0,173352	0,221382	0,24035	0,22693
Fase B	0,227924	0,220806	0,218212	0,223573	0,173573	0,178594	0,233237		
Fase C	0,228729	0,229635	0,223112	0,225293	0,191934	0,192547	0,24035		

Tabela 4.67 - Tabela de Indicadores PstD95% e Plt95% (pré-operacional)

	Pstd 95%							PstD 95%	PltS 95%
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7		
Fase A	0,196071	0,196068	0,200671	0,193461	0,195601	0,195331	0,197244	0,267427	0,258908
Fase B	0,203672	0,210901	0,212884	0,203019	0,203707	0,206447	0,210069		
Fase C	0,253723	0,257411	0,267427	0,25602	0,251351	0,251988	0,25931		

Tabela 4.68 - Tabela de Indicadores PstD95% e Plt95% (pós operacional)

O indicador de flutuação não sofreu muita influência entre o período pré-operacional e o pós operacional. Em ambos os casos os indicadores se mantiveram abaixo dos limites globais estabelecidos. Que nesse caso de barramento de 230kV é segundo o PROREDE 2.8:

Limite	PstD95%	PltS95%
Limite Global Inferior	1,54 pu	1,23 pu
Limite Global superior	3,08 pu	2,46 pu

4.4.1.3. Distorção Harmônica de Tensão

Os resultados pré-operacionais e pós operacionais obtidos na medição desse indicador foram os seguintes:

Índices	Valores
DTHTaD95	1,598886
DTHTbD95	1,748459
DTHTcD95	1,735285
V5aD95%	1,588716
V5bD95%	1,724941
V5cD95%	1,702541

Tabela 4.69 - Tabela de Indicadores DTHTD95%, e mais significativos V2S95% a V50S95% (pré-operacional)

Índices	Valores
DTHTaD95%	1,0090542
DTHTbD95%	1,0107206
DTHTcD95%	1,1112283
V5aD95%	0,8909708
V5bD95%	0,9340845
V5cD95%	0,8838201
V7aD95%	0,5647561
V7bD95%	0,5012333
V7cD95%	0,7538069

Tabela 4.70 - Tabela de Indicadores DTHTD95%, e mais significativos entre V2S95% a V50S95% (pós operacional)

O indicador de harmônico pré-operacional é maior que o pós-operacional no geral. Isso já era esperado pela instalação do filtro ativo nos inversores de frequência. Todos os limites globais estão abaixo do previsto no PROREDE 2.8.

4.4.2. Avaliação de Desempenho

Para avaliação de desempenho dos indicadores foram utilizados os limites indicados no submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede, 16/12/2016 [4].

4.4.2.1. Desequilíbrio de tensão

Nos barramentos da rede básica e nos barramentos de transformadores o limite global é de:

$$KD95\% \leq 2\%$$

O Resultado do indicador para o fator K obtido através dos valores da medição pré-operacional e pós operacional apresentaram os seguintes valores:

KD95%
0,3906%

Tabela 4.71 - Indicador de desequilíbrio K pré-operacional

KD95%
0,5458%

Tabela 4.72 - Indicador de desequilíbrio K pós-operacional

Portanto o indicador do fator K é menor do que o limite KD95% estabelecido.

4.4.2.2. Flutuação de Tensão

A tabela seguinte apresenta os limites globais inferior e superior para os indicadores relacionados ao fenômeno flutuação de tensão.

Limite	PstD95%	PltS95%
Limite global inferior	$1 pu / FT$	$0,8 pu / FT$
Limite global superior	$2 pu / FT$	$1,6 pu / FT$

Tabela 4.73: Limites para os indicadores PstD95% e Plt95%.

A tabela a seguir apresenta o fator de transferência Ft.

Barramento de tensão nominal ≥ 230 kV	$F_t = 0,65$
69 kV \leq Barramento de tensão nominal < 230 kV	$F_t = 0,8$
Barramento de tensão nominal < 69 kV	$F_t = 1,0$

Tabela 4.74: Fator de transferência F_t .

A tabela a seguir apresenta o fator de transferência F_t .

No caso E, o barramento é de 230kV.

A partir das tabelas anteriores foi utilizado o F_t 0.65 para obter os limites abaixo:

Limite	PstD95%	PltS95%
Limite Global Inferior	1,54 pu	1,23 pu
Limite Global Superior	3,08 pu	2,46 pu

Tabela 4.75: Limites globais inferior e superior para PstD95% e PltS95%.

Os indicadores seguintes foram obtidos a partir dos valores da medição pré-operacional e pós operacional:

PstD 95%	PltS 95%
0,24035	0,22693

Tabela 4.76 - Indicador de desequilíbrio PstD e PltS pré-operacional

PstD 95%	PltS 95%
0,26743	0,25891

Tabela 4.77 - Indicador de desequilíbrio PstD e PltS pós operacional

Os indicadores PstD95% e o PltS95% se encontram menores do que os limites globais inferiores.

4.4.2.3. Harmônicas de tensão

A tabela seguinte apresenta os limites globais inferiores correspondentes aos indicadores de tensões harmônicas individuais de ordens 2 a 50 e DthtS95%.

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)
3, 5, 7	5%			3, 5, 7	2%		
		2, 4, 6	2%			2, 4, 6	1%
9, 11, 13	3%			9, 11, 13	1,5%		
		≥8	1%			≥8	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥27	1%			≥27	0,5%		
DTHTS95% = 6%				DTHTS95% = 3%			

Tabela 4.78: Limites globais inferiores para os indicadores de harmônicas de tensão.

A tensão no barramento 230kV corresponde à tabela para $V \geq 69\text{kV}$.

Os indicadores referentes às harmônicas de tensão individuais de ordem 2 a 50 e totais se encontram abaixo dos limites globais inferiores.

Índices	Valores
DTHTaD95	1,598886
DTHTbD95	1,748459
DTHTcD95	1,735285
V5aD95%	1,588716
V5bD95%	1,724941
V5cD95%	1,702541

Tabela 4.79 - Indicadores estatísticos de harmônicas individuais e totais de tensão - mais significativos na pré-operação

Índices	Valores
DTHTaD95%	1,0090542
DTHTbD95%	1,0107206
DTHTcD95%	1,1112283
V5aD95%	0,8909708
V5bD95%	0,9340845
V5cD95%	0,8838201
V7aD95%	0,5647561
V7bD95%	0,5012333
V7cD95%	0,7538069

Tabela 4.80: Indicadores estatísticos de harmônicas individuais e totais de tensão - mais significativos na pós operação

5. Análise de Desempenho

Depois dessa série de resultados, será apresentado um resumo das comparações de indicadores pré-operacional e pós operacional de cada caso. Era de se esperar que todos os indicadores tivessem desempenho pior na etapa pós operacional, já que houve entrada de uma nova usina de característica predominantemente não linear, que é característico de fontes renováveis (nos casos analisados eólico e fotovoltaico). A exceção deveria ser apenas o caso em que foi instalado o filtro ativo para mitigação de todos os indicadores. Diante dos resultados levantados, segue um quadro comparativo:

	Estado	Tensão	Tipo	Desequilíbrio de Tensão	Flutuação de Tensão		Distorção Harmônica	Filtro Ativo
					PstD	PltS		
Caso A	PE	230kV	Eólico	Diminuiu na pós operação	Diminuiu na pós operação	Diminuiu na pós operação	Aumentou na pós operação	Não
Caso B	BA	69kV	Solar	Aumentou na pós operação	Não			
Caso C	BA	230kV	Solar	Aumentou na pós operação	Aumentou na pós operação	Diminuiu na pós operação	Aumentou na pós operação	Não
Caso D	CE	230kV	Eólico	Aumentou na pós operação	Aumentou na pós operação	Aumentou na pós operação	Diminuiu na pós operação	Não
Caso E	RN	230kV	Eólico	Aumentou na pós operação	Aumentou na pós operação	Aumentou na pós operação	Diminuiu na pós operação	Sim

Figura 5.1 - Quadro comparativo dos casos apresentados

As células destacadas foram as situações que não seguiram o que era esperado. O único caso que seguiu exatamente como esperado foi o caso B.

Em algumas situações o desempenho de um indicador foi prejudicado pelo fato de em um dos dias de medição ter ocorrido algum fenômeno anômalo no barramento.

Com relação específica ao indicador de distorção harmônica, o único caso que não seguiu o esperado foi o caso D.

As situações em que não se seguiu o esperado, a diferença não foi muito significativa e mesmo assim em todos os casos, quer seja na pré-operação, quer na pós operação, os limites globais não foram ultrapassados.

6. Conclusão

Observando a distribuição das principais fontes de energia elétrica existentes, fica evidente o expressivo crescimento da participação das fontes renováveis na esfera mundial. O Brasil é um dos países com significativa capacidade de ampliação da geração eólica e fotovoltaica. Uma grande inserção de geração a partir de fontes renováveis nas redes elétricas tem acontecido nas regiões com melhores perspectivas, que são as regiões Nordeste e Sul. Esse novo cenário torna necessário um planejamento adequado para disponibilizar a energia de forma segura, confiável e sem afetar a qualidade da energia elétrica do Sistema Elétrico Nacional.

A implantação da geração renovável na Rede Básica pode causar diversas alterações na qualidade da energia. No desenvolvimento deste trabalho, foram apresentados e discutidos os principais impactos e problemas de qualidade, como desequilíbrio de tensão, flutuações de tensão de curta e longa duração, desvio de frequência em regime permanente e distorções harmônicas de tensão em vários casos de empreendimentos que estão operacionais.

Devido às possíveis consequências do acesso de parques geradores à rede, foram apontadas as principais regras, normas, metodologias e procedimentos para realização das Campanhas de Medição dos Indicadores de Desempenho da qualidade de energia elétrica nos barramentos de fronteira. Estes procedimentos são de grande seriedade pois não permitem que os ingressantes na rede comprometam a excelência do serviço das concessionárias.

Os estudos de caso referentes às campanhas de medição foram apresentados para explicar a aplicação dos procedimentos. Os tratamentos de dados, cálculos e apresentações foram embasados nas diretrizes normativas do ONS. Os resultados da campanha de qualidade mostraram a importância das análises estatísticas e a mudança de desempenho entre pré e pós- operação.

De toda forma, ainda com o conteúdo apresentado, a metodologia de campanha de qualidade para geração de energia a partir de fontes renováveis carrega muitas discussões. Atualmente não existe uma norma que rege os procedimentos de medição para usinas fotovoltaicas, existem uma norma que o ONS se baseia que trata apenas de usinas eólicas IEC 61400-21, e mesmo assim esta norma é bastante abrangente e não consegue contemplar as situações reais dos empreendimentos. Torna-se interessante produzir estudos futuros sobre métodos de medição para uma melhor responsabilização sobre os indicadores, para imposição justa dos compromissos relativos à mitigação destes.

O ONS tem se mostrado disposto a chegar em um consenso a esse respeito, já organizou muitos encontros com as associações, fabricantes e geradores para definir um documento definitivo para campanhas de qualidade em usinas de geração de energia renovável (eólica e fotovoltaica). A tendência é que, em breve, a metodologia de campanha esteja bem mais consolidada que atualmente.

7. Referências

- [1] ONS, Procedimentos de Rede, Submódulo 1.1, O Operador Nacional do Sistema Elétrico e os Procedimentos de Rede: Visão geral, dezembro 2015 [*online em www.ons.org.br*]
- [2] ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 8 – Qualidade de Energia, dezembro 2015 [*online em www.ons.org.br*]
- [3] ONS - CEPEL, Definição das Metodologias e Procedimentos Necessários às Campanhas de Medição dos Indicadores de Desempenho, dezembro 2004
- [4] ONS, “Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes”, Procedimentos de Rede, Submódulo 2.8, dezembro 2015 [*online em www.ons.org.br*].
- [5] ONS, Instruções para Realização de Estudos e Medições de QEE Relacionados as Novos Acesso à Rede Básica – RE 2.1 057/2008 – VER.3, janeiro 2013.
- [6] CANOVA, Jairo Luiz, Proposta de Procedimento para a Medição da Qualidade de Energia Elétrica em um Barramento de 230kV do Sistema Interligado Nacional – PUC-RS, dissertação de mestrado, dezembro 2009.
- [7] Paulo Henrique Ramalho Pereira Gama. Conservação de Energia – Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos, 2ª Edição, 2001 Editora da EFEI. Capítulo 11 – Qualidade da Energia Elétrica.
- [8] Norma Internacional IEC 61400-21, “Wind Turbine Generators Systems – Part 21: Measurements and Assessment of Power Quality Characteristics of grid Connected Wind Turbines”.
- [9] 5ª Reunião do GT ONS – ABEólica. Workshop sobre Gerenciamento da QEE – Estudos e Campanha de Medição.