



Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática - CEEI
Departamento de Engenharia Elétrica – DEE
Engenharia Elétrica

João Victor Jales de Melo

**Campanha de Medição da QEE em Função do Acesso de Fontes Não
Lineares à Rede Elétrica: Um Estudo de Caso**

Trabalho de Conclusão de Curso

Campina Grande
2019

João Victor Jales de Melo

**Campanha de Medição da QEE em Função do Acesso de Fontes Não
Lineares à Rede Elétrica: Um Estudo de Caso**

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande, como parte
dos requisitos necessários à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

George Rossany Soares de Lira, D. Sc.

Campina Grande
2019

JOÃO VICTOR JALES DE MELO

CAMPANHA DE MEDIÇÃO DA QEE EM FUNÇÃO DO ACESSO DE FONTES NÃO LINEARES À
REDE ELÉTRICA: UM ESTUDO DE CASO

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande, como parte
dos requisitos necessários à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Luiz Augusto Medeiros Martins Nobrega
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador, UFCG

George Rossany Soares de Lira, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho a meus pais e amigos que acompanharam esta caminhada. Obrigado pela paciência.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, que me manteve firme em minhas convicções, foi apoio nos momentos difíceis e consolo nos tristes.

Agradeço a meus pais, em primeiro lugar a minha mãe, que me incentivou e lutou por minha decisão de ter uma vida de estudo, mesmo que distante dela e de toda a família, sempre me apoiou e escutou meus desabaços, e a meu pai, que sempre foi um exemplo de dedicação a sua profissão, família e amigos.

Também agradeço a meus colegas de curso, que foram a melhor turma, com os piqueniques, viagens e seções de estudos desesperados pré-provas.

Agradeço a minha família no LAT, os amigos do LEASE, que estavam sempre preparados para ajudar, nos projetos, nas provas ou nas descontrações, e que sempre tinham que testar a paciência nos vários treinos de apresentações e no nervosismo que vinha antes delas, me esperando na saída do LAT.

E em especial a Lenilson Barbosa, que me acompanhou em todos os PIBICs, TCC e Estágio, me ajudando e sendo um grande amigo, e a George Lira, por quase 4 anos de orientação e amizade, por aguentar um aluno tão insistente.

“[...]A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer.

Resumo

Atualmente a rede elétrica está cada vez mais preenchida por novas fontes de geração, muitas delas com características não lineares. As fontes eólicas e solares são especialmente preocupantes para os órgãos regulamentadores e fiscalizadores do sistema elétrico. É sabida a contribuição de fontes não lineares em distúrbios da qualidade da energia, o que pode gerar imensos gastos com queima e mal funcionamento dos equipamentos do sistema, de tal modo a existir uma série de exigências quando da entrada destas fontes no sistema elétrico. Neste sentido, este trabalho tem o objetivo de analisar campanhas de medição da qualidade da energia elétrica em redes de distribuição, uma das etapas para a entrada de cargas ou fontes não lineares ao sistema, descrevendo as recomendações, análises, etapas e resultados obtidos com estas medições. Todas as análises são feitas seguindo as recomendações dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica Nacional (PRODIST) e Procedimentos de Rede (PROREDE).

Palavras-chave: Qualidade da Energia Elétrica; PRODIST; Campanhas de Medição.

Abstract

Currently the power grid is increasingly filled by new generation sources, many of them with non-linear characteristics. Distributed generation, wind and solar sources are of particular concern to the regulatory and supervisory bodies of the electricity system. It is known the contribution of non-linear sources with disturbances of the power quality, which can generate immense expenses with burning and malfunction of the system equipment, in such a way to exist a series of requirements for the entrance of these sources to the electrical system. In this sense, this work has the objective of analyzing measurement campaigns of power quality in distribution systems, one of the steps for the entry of non-linear loads or sources to the system, describing the recommendations, analyzes, steps and results obtained with these measurements. All analyzes are done following the recommendations of the National Electric Energy Distribution Procedures (PRODIST) and Network Procedures (PROREDE).

Keywords: Power Quality; PRODIST; Measurement Campaigns.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distúrbios na qualidade da energia (b-Surto de tensão; c-Distúrbio oscilatório; d-Sag; e- Interrupção; f-Swell; g-Distorção Harmônica;h-Notch).....	11
Figura 2 - Sag devido a partida de um motor.	13
Figura 3 - Swell devido uma falta fase-terra.	14
Figura 4 - Transitório impulsivo.....	16
Figura 5 - Transitório oscilatório.....	17
Figura 6 - Sinal de corrente com distorção harmônica e os respectivos harmônicos.	18
Figura 7 - Corte de tensão.	19
Figura 8 - DRP e DRC sem fonte solar.	21
Figura 9 - DRP e DRC com fonte solar.....	21
Figura 10 - Distribuição acumulada complementar da sensação de cintilação.....	25
Figura 11 - Conexão dos terminais do medidor à régua de bornes no ponto de medição da subestação 69/13,8 kV.....	33
Figura 12 - Medidor instalado na casa de faturamento.....	34
Figura 13 - Nexus 1500.....	35
Figura 14 - Severidade de flutuação de tensão de curta duração (Pst) para a fase “A” – Período de 15/03/2019 à 21/03/2019.....	37
Figura 15 - Severidade de flutuação de tensão de curta duração (Pst) para a fase “B” – Período de 15/03/2019 à 21/03/2019.....	37
Figura 16 - Severidade de flutuação de tensão de curta duração (Pst) para a fase “C” – Período de 15/03/2019 à 21/03/2019.....	38
Figura 17 - Severidade de flutuação de tensão de longa duração (Plt) para a fase “A” – Período de 15/03/2019 à 21/03/2019.....	39
Figura 18 - Severidade de flutuação de tensão de longa duração (Plt) para a fase “B” – Período de 15/03/2019 à 21/03/2019.....	39
Figura 19 - Severidade de flutuação de tensão de longa duração (Plt) para a fase “C” – Período de 15/03/2019 à 21/03/2019.....	39
Figura 20 - Fator de desequilíbrio de tensão medido (FD) – Período de 15/03/2019 à 21/03/2019.....	41
Figura 21 - Distorção harmônica total de tensão (DHT) para a fase “A” – Período de 15/03/2019 à 21/03/2019.....	42
Figura 22 - Distorção harmônica total de tensão (DHT) para a fase “B” – Período de 15/03/2019 à 21/03/2019.....	42
Figura 23 - Distorção harmônica total de tensão (DHT) para a fase “C” – Período de 15/03/2019 à 21/03/2019.....	42
Figura 24 - Conexão dos terminais do medidor na régua de bornes no ponto de medição da subestação 69/13,8 kV.....	45
Figura 25 - Medidor instalado na casa de comando.	46
Figura 26 – Arranjo para teste de amplitude.	47

Figura 27 - Severidade de flutuação de tensão de curta duração (Pst) para a fase “A” – Período de 26/06/2019 à 04/07/2019.....	49
Figura 28 - Severidade de flutuação de tensão de curta duração (Pst) para a fase “B” – Período de 26/06/2019 à 04/07/2019.....	49
Figura 29 - Severidade de flutuação de tensão de curta duração (Pst) para a fase “C” – Período de 26/06/2019 à 04/07/2019.....	50
Figura 30 - Severidade de flutuação de tensão de longa duração (Plt) para a fase “A” – Período de 26/06/2019 à 04/07/2019.....	51
Figura 31 - Severidade de flutuação de tensão de longa duração (Plt) para a fase “B” – Período de 26/06/2019 à 04/07/2019.....	51
Figura 32 - Severidade de flutuação de tensão de longa duração (Plt) para a fase “C” – Período de 26/06/2019 à 04/07/2019.....	52
Figura 33 - Fator de desequilíbrio de tensão medido (FD) – Período de 26/06/2019 à 04/07/2019.....	53
Figura 34 - Distorção harmônica total de tensão (DHT) para a fase “A” – Período de 26/06/2019 à 04/07/2019.....	54
Figura 35 - Distorção harmônica total de tensão (DHT) para a fase “B” – Período de 26/06/2019 à 04/07/2019.....	55
Figura 36 - Distorção harmônica total de tensão (DHT) para a fase “C” – Período de 26/06/2019 à 04/07/2019.....	55
Figura 37 – Comparação da Distorção Harmônica Total da fase “A” para os 7 dias de medição.....	58
Figura 38 – Comparação do Fator de Desequilíbrio de tensão para os 7 dias de medição.....	58
Figura 39 – Comparação do índice Pst para a fase “A” durante os 7 dias.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variação de curta duração.	12
Tabela 2 - Terminologia dos indicadores de flutuação de tensão.	25
Tabela 3 - Limites de <i>Pst95%</i> para diferentes valores de tensão.	26
Tabela 4 - Terminologia dos indicadores de desequilíbrio de tensão.	26
Tabela 5 - Limites para o desequilíbrio de tensão.	27
Tabela 6 - Terminologia dos indicadores da distorção harmônica.	27
Tabela 7 - Limites para as distorções harmônicas de tensão.	29
Tabela 8 – Resultados para severidade de flutuação de tensão de curta e longa duração.	40
Tabela 9 - Flutuação de tensão - Comparação com os limites globais.	40
Tabela 10 - Desequilíbrio de tensão - Comparação com os limites globais.	41
Tabela 11 – Indicadores estatísticos de distorção harmônica total de tensão.	43
Tabela 12 - Limites para as distorções harmônicas de tensão – Comparação com os limites globais.	43
Tabela 13 - Resultados para severidade de flutuação de tensão de curta e longa duração.	52
Tabela 14 - Flutuação de tensão - Comparação com os limites globais.	53
Tabela 15 - Desequilíbrio de tensão - Comparação com os limites globais.	54
Tabela 16 - Distorção harmônica total de tensão.	56
Tabela 17 - Limites para as distorções harmônicas de tensão – Comparação com os limites globais.	56

Sumário

Agradecimentos	vi
Resumo	ii
Abstract	iii
Sumário	7
1 Introdução.....	9
1.1 Objetivos Gerais e Específicos	10
1.2 Organização do Texto	10
2 Fundamentação Teórica.....	11
2.1 Qualidade da Energia Elétrica.....	11
2.2 Variação de Curta Duração	12
2.2.1 Afundamento de curta duração (<i>Sag</i>)	12
2.2.2 Elevação de curta duração (<i>Swell</i>).....	13
2.2.3 Interrupções	14
2.3 Variação de Longa Duração.....	14
2.3.1 Elevação de tensão sustentada	14
2.3.2 Afundamento de tensão sustentada.....	15
2.3.3 Interrupção sustentada	15
2.3.4 Desequilíbrio de tensão	15
2.4 Transitórios	16
2.5 Alterações na Forma	17
2.5.1 Harmônicos.....	17
2.5.2 Inter-harmônicos.....	18
2.5.3 Contes de tensão (<i>Notches</i>).....	19
3 A Entrada de Novas Fontes Geradoras e Seu Impacto no Sistema Elétrico	20
4 PRODIST	23
4.1 Módulo 8.....	23
4.1.1 Qualidade do produto	24
5 Instruções para Realização de Estudos e Medições da QEE	30
6 Campanhas de Medição da Qualidade da Energia.....	32
6.1 Estudo de Caso 1.....	32
6.1.1 Ponto de Acoplamento Comum (PAC)	33
6.1.2 Medidor Utilizado.....	34
6.1.3 Testes Mínimos Realizados	35
6.1.4 Resultados - Campanha de Medição Pré-Operatória da QEE em uma Planta Solar.....	36
6.1.4.1 Flutuação de tensão	36
6.1.4.2 Desequilíbrio de tensão	40
6.1.4.3 Distorção harmônica	41
6.2 Estudo de Caso 2.....	44
6.2.1 Ponto de Acoplamento Comum (PAC)	45

6.2.2	Medidor Utilizado.....	46
6.2.3	Testes Mínimos Realizados	47
6.2.4	Resultados - Campanha de Medição Pós-Operatória da QEE em uma Planta Solar	48
6.2.4.1	Flutuação de tensão	48
6.2.4.1	Desequilíbrio de tensão	53
6.2.4.1	Distorção harmônica	54
6.3	Resultados	57
7	Conclusões.....	60
7.1	Trabalhos futuros	60
	Referências	61
	Anexo A – Teste de Amplitude de Sinal (Pré-Operatória).....	64
	Anexo B – Teste de Sequência de Fase (Pré-Operatória).....	66
	Anexo C – Teste de Amplitude de Sinal (Pós-Operatória).....	68
	Anexo D – Teste de Sequência de Fase (Pós-Operatória)	70

1 INTRODUÇÃO

Na atualidade fontes como a eólica e a solar têm cada vez mais importância e recebem grandes investimentos, em especial no nordeste do Brasil, onde as condições naturais são propícias a sua instalação. Estas fontes apresentam-se como potenciais agentes comprometedores do desempenho da rede elétrica, principalmente devido a suas características intermitentes que refletem em baixos índices da qualidade da energia.

Dentre as principais consequências dos distúrbios da qualidade da energia elétrica (QEE) estão as perdas pelo aquecimento em máquinas rotativas, queima ou mau funcionamento de equipamentos eletrônicos, interferência nos mecanismos de operação de equipamentos de proteção, problemas de ressonância e aumento das perdas por aquecimento em banco de capacitores paralelos (TEIXEIRA, 2009). Todo este conjunto de problemas acabam por gerar um imenso gasto aos usuários da rede elétrica, sendo estimado a perda de 79 bilhões ao ano nos EUA (LACOMMARE, 2006).

Deste modo, existe a necessidade da análise dessas novas unidades geradoras, fundamentada em indicadores da qualidade da energia elétrica, como sugerido no módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2018) e submódulo 2.8 do PROREDE (ONS, 2016a). Para isso, anteriormente ao acesso de um novo gerador a rede elétrica de distribuição ou de transmissão, são necessários uma série de estudos e medições que comprovem a não perturbação do sistema elétrico pelo novo acessante e indiquem os possíveis meios para mitigá-la caso exista. Esses procedimentos devem seguir o módulo 3 do PRODIST (ANEEL, 2017) para o acesso a rede de distribuição, e o submódulo 3.6 do PROREDE (ONS, 2016b) para rede de transmissão.

Diante da importância dos trabalhos de medição e análise da qualidade da energia elétrica na entrada de novas fontes ao sistema, este trabalho busca estudar os principais indicadores da qualidade da energia utilizados e realizar um estudo de caso sobre campanhas de medição da QEE, antes e após o acesso de uma planta solar de grande porte a rede de distribuição, verificando a conformidade com os indicadores e os principais procedimentos realizados nesta atividade.

1.1 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O objetivo geral deste trabalho é estudar campanhas de medição da qualidade da energia, de acordo com as normativas atuais vigentes, antes da entrada de uma nova fonte geradora de característica não linear (solar), e após a entrada de uma fonte semelhante, por meio de uma campanha pré-operatória e pós-operatória de medição, observando sua importância para a manutenção dos parâmetros do sistema.

Como objetivos específicos estão:

- Realizar levantamento dos principais distúrbios que afetam a qualidade da energia em função da conexão de fontes alternativas de energia;
- Determinar relação entre a entrada de uma nova fonte e a existência ou não de efeitos sobre a qualidade da energia.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, começando por este capítulo introdutório.

O Capítulo 2 apresenta uma fundamentação teórica sobre os principais distúrbios da qualidade da energia, criando uma base para as discussões dos próximos capítulos.

No Capítulo 3 é mostrada uma breve visão sobre os impactos das novas fontes na rede elétrica, observando a necessidade de se estudar e monitorar potenciais geradores de distúrbios elétricos, como a entrada de novas fontes ao sistema.

No Capítulo 4 é apresentada uma visão básica sobre as recomendações do módulo 8 do PRODIST, os limites e formas de calcular os parâmetros de interesse na qualidade da energia elétrica.

O Capítulo 5 é dedicado a dois estudos de caso sobre campanhas de medição da qualidade da energia, uma pré-operacional e outra pós-operacional, explicando todos os passos realizados para efetuar as medições e por fim os seus resultados.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho e sugestões para sua continuidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

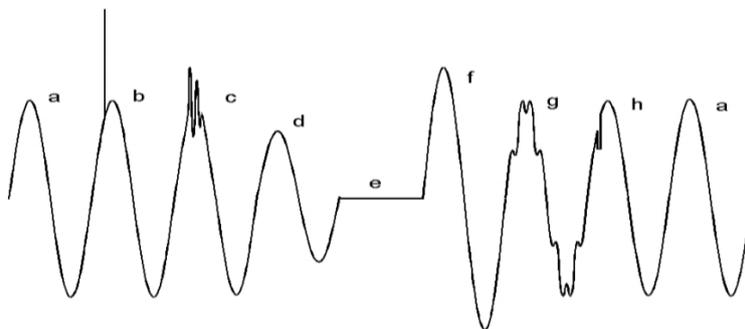
Nesta seção, são apresentados os conceitos teóricos que ajudarão o entendimento das normas referentes as medições e estudos necessários à entrada de fontes geradoras a rede de distribuição ou transmissão. Os fundamentos relativos aos distúrbios na qualidade da energia, tais quais, harmônicos, inter-harmônicos, desequilíbrio de tensão, afundamento de curta duração (*sag*), elevação de curta duração (*swell*), cortes de tensão (*notches*), cintilação (*flicker*), transitórios e interrupções, serão apresentados a seguir, segundo definição do *IEEE 1159* (2009).

2.1 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Distúrbios no sistema elétrico são comuns e podem ocorrer tanto devido a fenômenos naturais quanto a causas internas, como manobras ou ao próprio funcionamento do sistema elétrico. Esse conjunto de problemas afeta a qualidade da energia elétrica (QEE), criando os chamados distúrbios na qualidade da energia.

São considerados distúrbios na QEE quaisquer alterações em tensão, corrente ou frequência que possam vir a causar falha, má operação, redução da vida útil ou defeito permanente em um equipamento ligado ao sistema elétrico (DUGAN et al., 2004). Entre estes, os principais que podem ser citados são: harmônicos, inter-harmônicos, desequilíbrio de tensão, afundamento de curta duração (*sag*), elevação de curta duração (*swell*), cortes de tensão (*notches*), cintilação (*flicker*), transitórios e interrupções. Na Figura 1 são apresentados a maioria destes distúrbios.

Figura 1 - Distúrbios na qualidade da energia (b-Surto de tensão; c-Distúrbio oscilatório; d-Sag; e-Interrupção; f-Swell; g-Distorção Harmônica;h-Notch).



Fonte: Bronzeado et al. (1997).

- a) Tensão normal;
- b) Surto de tensão;
- c) Transitório;
- d) Afundamento de curta duração (*Sag*);
- e) Interrupção;
- f) Elevação de curta duração (*Swell*);
- g) Distorção Harmônica;
- h) Cortes (*Notchs*).

2.2 VARIAÇÃO DE CURTA DURAÇÃO

São distúrbios relacionados a tensão com duração de até 1 minuto. As variações de curta duração podem ser classificadas em três categorias: Instantâneas, momentâneas e temporárias, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Variação de curta duração.

Distúrbio	Tempo
Instantâneo	0,5 ciclos – 30 ciclos
Momentâneo	30 ciclos – 3 segundos
Temporário	3 segundos – 1 minuto

Fonte: Adaptado de *IEEE Std 1159-2009* (2009).

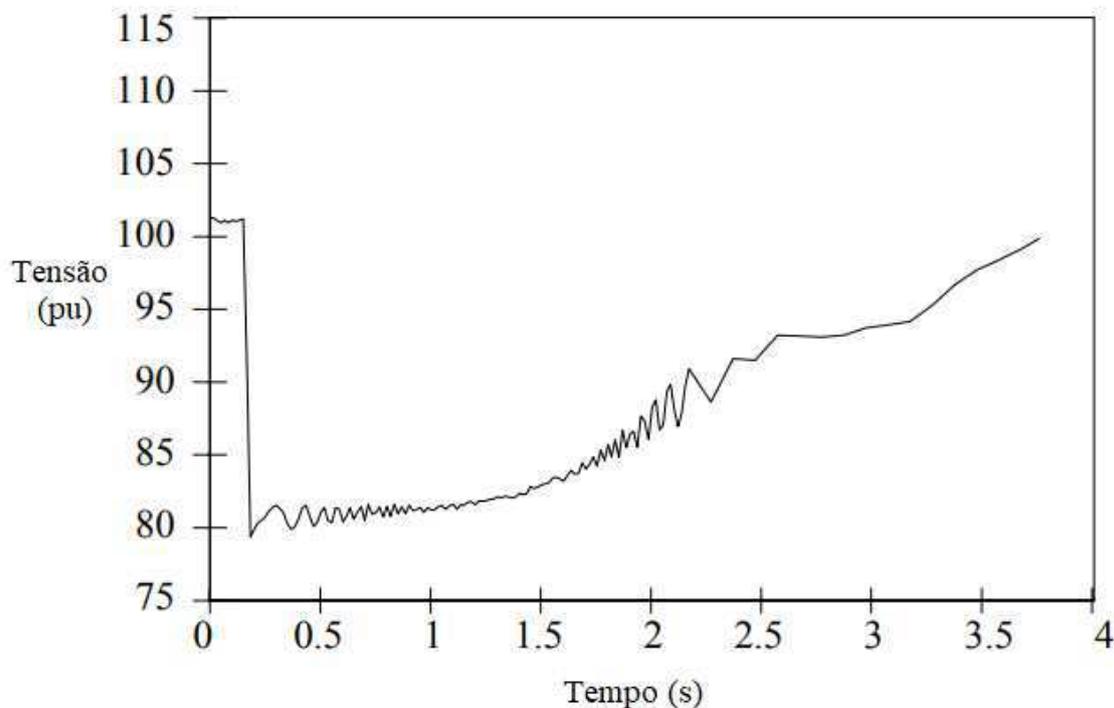
2.2.1 AFUNDAMENTO DE CURTA DURAÇÃO (*SAG*)

Os *sags* (afundamentos) são distúrbios na amplitude de tensão que ocorrem na faixa da frequência nominal da rede elétrica, 60 Hz (LOPEZ, 2001). Basicamente, são caracterizados por afundamentos em amplitude, que podem variar em tempo, de ciclos da senoide até um minuto.

Segundo definição do *IEEE* pela *Standard IEEE 1159-2009* (*IEEE*, 2009), *sag* é uma queda no valor *rms* da tensão entre 0,1 e 0,9 pu por uma duração de 0,5 ciclos à 1 minutos. Geralmente este tipo de distorção está ligada a faltas fase-terra no sistema, porém também pode ser causada pela entrada de cargas muito pesadas, como é o caso de

fornos a arco ou na partida de motores. Na Figura 2 pode ser visto o *sag* devido a partida de um motor.

Figura 2 - Sag devido a partida de um motor.



Fonte: Adaptado de IEEE Std 1159-2009 (2009).

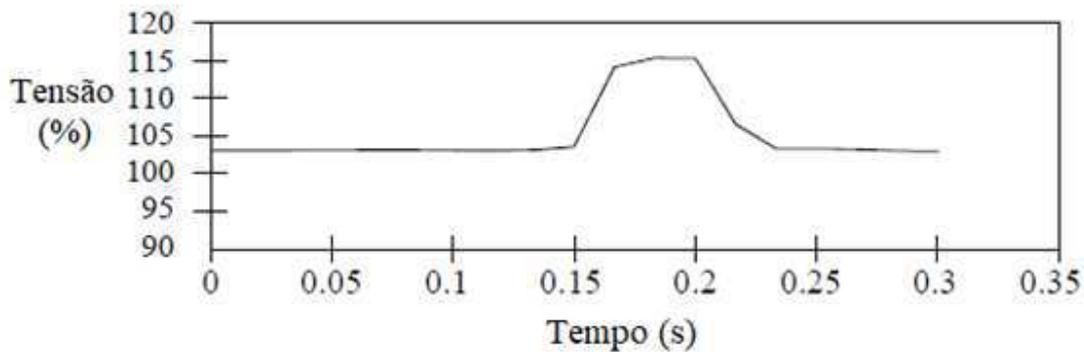
Os *sags* podem ter sua classificação dividida em instantâneos, momentâneos e temporários como mostra a Tabela 1.

2.2.2 ELEVAÇÃO DE CURTA DURAÇÃO (*SWELL*)

Swell ou elevações de tensão de curta duração é um distúrbio em que o nível de tensão permanece maior que o normal por alguns ciclos, na faixa de frequência nominal da rede, semelhante ao que ocorre com o *sag*.

O *swell* ocorre na situação oposta ao *sag*, pela saída de grandes cargas por exemplo, mas apresenta efeitos geralmente mais destrutivos, muitas vezes queimando equipamentos. Semelhante ao *sag*, uma falta fase-terra pode causar um *swell*, porém para este caso o distúrbio acontece nas fases sem falta. Esse caso é mostrado na Figura 3.

Segundo definição da *IEEE Std 11590-2009* (IEEE, 2009), *swell* é um aumento no valor *rms* da tensão para um nível acima de 1,1 pu, por uma duração entre 0,5 ciclos e 1 minuto.

Figura 3 - Swell devido uma falta fase-terra.

Fonte: Adaptado de IEEE Std 1159-2009 (2009).

O *Swell* também pode ser classificado como instantâneo, momentâneo e temporário, seguindo o que mostra a Tabela 1.

2.2.3 INTERRUPÇÕES

O distúrbio denominado interrupção ocorre quando o nível da tensão cai abaixo de 0,1 pu por um tempo entre 0,5 ciclos e 1 minuto. Dentro deste tempo a interrupção pode ainda ser classificada como momentânea (0,5 ciclos a 3 segundos) ou temporária (3 segundos a 1 minuto).

Geralmente as interrupções são causadas por faltas, falhas em equipamentos ou pelo mau funcionamento dos sistemas de controle. Quando causadas por faltas, estas podem ser precedidas de *sags* de tensão, que ocorrem entre o tempo do início da falta e a atuação da proteção.

2.3 VARIAÇÃO DE LONGA DURAÇÃO

As variações de longa duração são consideradas distúrbios de regime permanente, com período superior a 1 minuto, que podem ser caracterizados como desvios que ocorrem no valor eficaz da tensão, na frequência do sistema (PAULILO, 2013).

2.3.1 ELEVAÇÃO DE TENSÃO SUSTENTADA

A elevação de tensão sustentada ou sobretensão é a elevação do valor *rms* da tensão a um patamar superior a 1,1 pu (tipicamente entre 1,1 e 1,2 pu) por mais de 1

minuto. Geralmente este tipo de distúrbio é causado por problemas de compensação reativa do sistema, saída de cargas ou escolha incorreta do *tap* do transformador.

2.3.2 AFUNDAMENTO DE TENSÃO SUSTENTADA

O afundamento de tensão sustentada ou subtensão é o afundamento do valor *rms* da tensão a um patamar inferior a 0,9 pu (tipicamente entre 0,8 e 0,9 pu) por mais de 1 minuto. São, em geral, causados pela entrada de cargas, retirada de bancos de capacitores ou pelo funcionamento de alimentadores sobrecarregados.

2.3.3 INTERRUPÇÃO SUSTENTADA

Além das interrupções momentâneas e temporárias (variações de curta duração) existem as interrupções sustentadas, com mais de 1 min de duração. São caracterizadas pela redução do nível de tensão abaixo de 0,1 pu por um tempo superior a 1 minuto, apresentando tensão tipicamente de 0 pu.

Este tipo de distúrbio pode ser causado por falhas em disjuntores, queima de fusíveis, falhas de componentes do circuito alimentador ou por desligamentos programados para manutenção (PAULILO, 2013), e por isso geralmente necessitam da intervenção humana para o retorno do sistema a operação.

2.3.4 DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Um sistema trifásico equilibrado apresenta tensões e correntes com mesma amplitude e fases defasadas de 120°, uma em relação a outra. O estado de desequilíbrio é justamente a fuga desta norma, tendo tensões e correntes com amplitudes diferentes e fases não defasadas de 120°. Os maiores causadores do desequilíbrio são: Existência de cargas desequilibradas entre as fases; Impedância do sistema elétrico; Tensão terminal dos geradores.

Segundo o IEEE (IEEE, 2009), o desbalanceamento pode ser calculado pela razão entre a componente de sequência negativa e a positiva, como é mostrado na equação 1.

$$\%Desbalanceamento = \frac{V_{neg}}{V_{Pos}} 100\%. \quad (1)$$

Os principais problemas causados por este distúrbio são o aparecimento de correntes de sequência negativa na rede, reduzindo a capacidade dos transformadores e

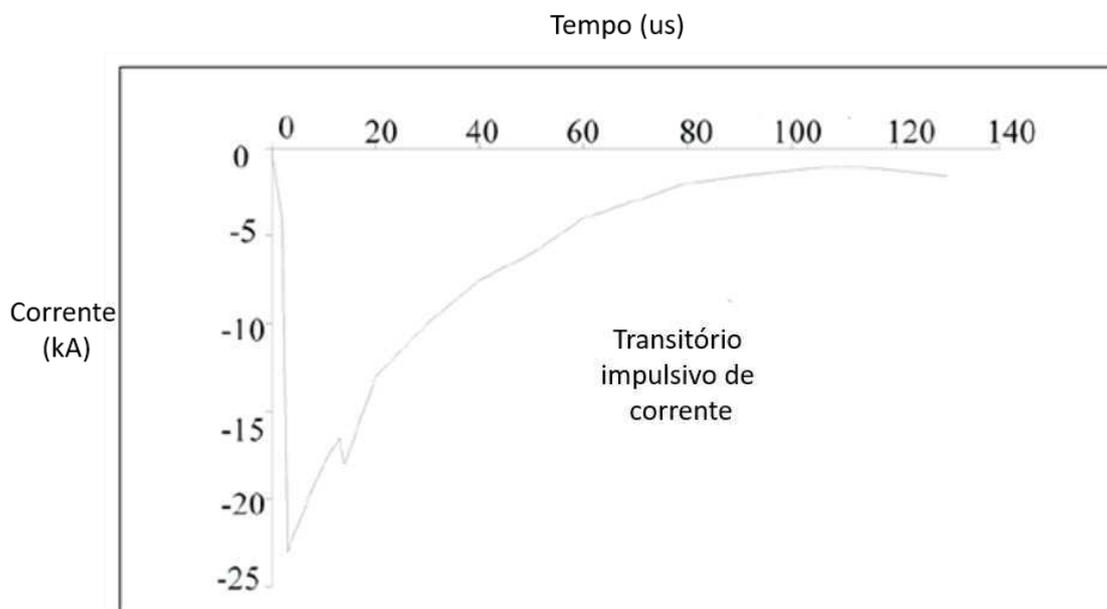
condutores de transmitir potência útil, além de diversos problemas com eficiência e vida útil de motores de indução.

2.4 TRANSITÓRIOS

O termo transitório é utilizado para representar sinais indesejados e em geral de curta duração, geralmente com amplitude elevada, que destoam da normalidade da rede elétrica. Estes podem ser distúrbios tanto de corrente quanto de tensão e ter polaridade positiva ou negativa.

Os transitórios têm duas classificações, impulsivos e oscilatórios. Os transitórios impulsivos, em geral, têm causa relacionada a descargas atmosféricas. A Figura 4, retirada da *Std IEEE 1159-2009 (IEEE, 2009)*, representa um transitório impulsivo típico.

Figura 4 - Transitório impulsivo.



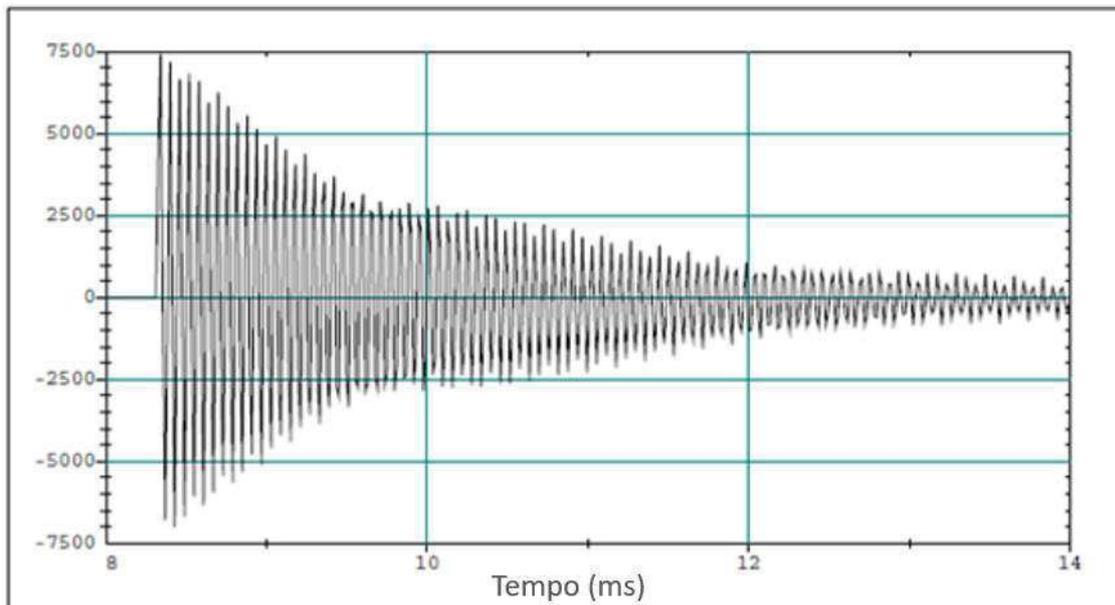
Fonte: IEEE (2009).

Estes distúrbios, como mostrado na imagem, podem ser representados por sua amplitude, tempo de subida e tempo de descida, ou também por seu conteúdo espectral.

Já os transitórios oscilatórios apresentam uma duração maior a depender de sua causa. Estes são relacionados a chaveamentos ou mudanças na característica da rede elétrica, como energização de bancos de capacitores e transformadores e eliminação de faltas. A energização de bancos de capacitores, por exemplo, pode levar a oscilações entre

300 hz e 900 hz com magnitude máxima de 2 pu (ARRUDA, 2003). Na Figura 5 é mostrado um transitório oscilatório.

Figura 5 - Transitório oscilatório.



Fonte: IEEE (2009).

2.5 ALTERAÇÕES NA FORMA

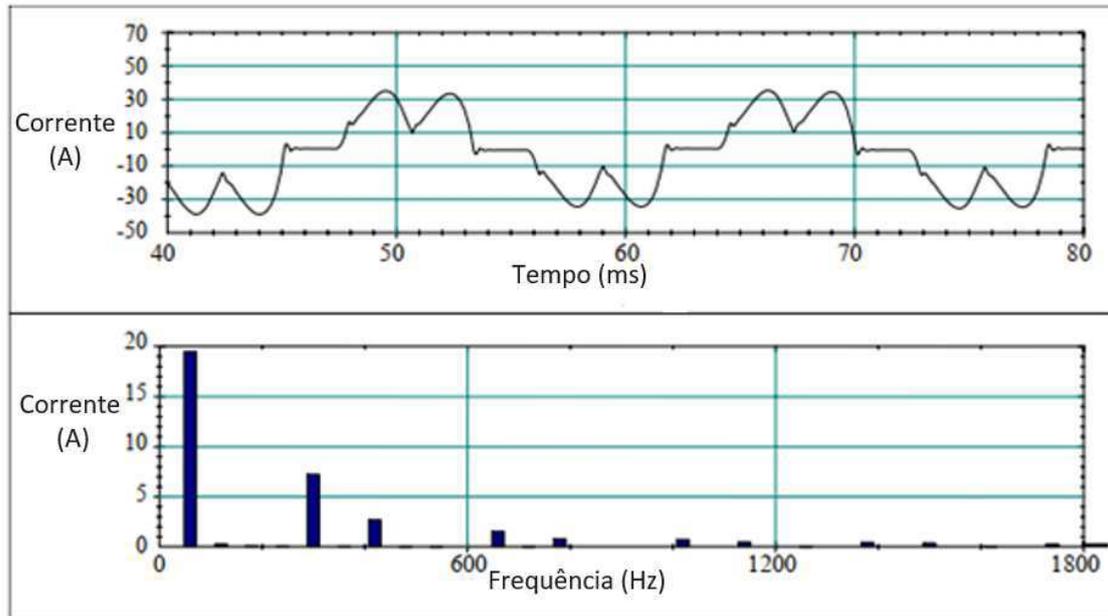
As alterações na forma de onda presentes em frequências diferentes da fundamental são consideradas distorções harmônicas. Estas podem ser múltiplas ou submúltiplas da fundamental e causam diversos problemas ao sistema.

2.5.1 HARMÔNICOS

Harmônicos são sinais senoidais de tensão ou corrente, múltiplos da frequência fundamental da rede. Estes sinais aparecem somados aos sinais de frequência fundamental, criando distorções de forma de onda, conhecidas como distorções harmônicas. Geralmente é associado a cargas não lineares, principalmente equipamentos da eletrônica de potência. Na Figura 6 pode ser visto um sinal distorcido pelo efeito dos harmônicos. Nela são vistos, na parte superior, um sinal de corrente com grande quantidade de harmônicos de frequências elevadas, e na parte inferior, a descrição das amplitudes individuais de cada harmônico presente na onda mostrada.

Harmônicos são extremamente prejudiciais ao sistema elétrico, em especial para equipamentos eletrônicos, podendo causar, desde mal funcionamento até queima.

Figura 6 - Sinal de corrente com distorção harmônica e os respectivos harmônicos.



Fonte: Adaptado de IEEE Std 1159-2009 (2009).

2.5.2 INTER-HARMÔNICOS

Uma inter-harmônica é um sinal de frequência não-inteira, localizada entre duas harmônicas da fundamental. A IEC 61000-2-1 a define como frequências múltiplas não inteiras da fundamental, que podem aparecer como frequências discretas ou como um espectro de larga faixa (IEC 61000-2-1, 1990).

Em geral, as inter-harmônicas tem os mesmos efeitos prejudiciais dos harmônicos. As suas principais fontes são (CHAPMAN, 2002):

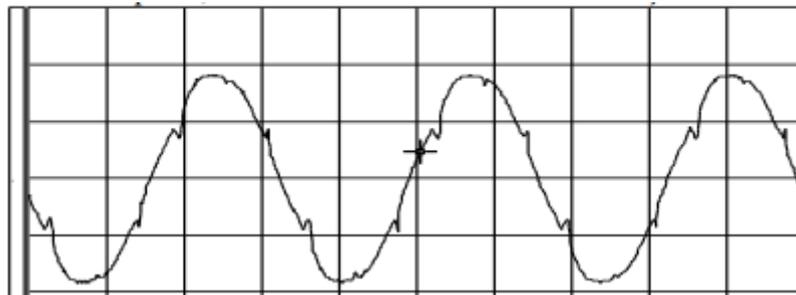
- Cargas que utilizam arco elétrico;
- Acionadores elétricos de carga variável;
- Conversores estáticos;
- Controladores de onda.

2.5.3 CONTEDES DE TENSÃO (*NOTCHES*)

Notches ou cortes de tensão são distúrbios na tensão causados pela operação normal de circuitos eletrônicos de grande potência. Eles ocorrem quando a corrente comuta entre duas fases, havendo momentaneamente um curto-circuito entre estas.

Os *notches* são eventos periódicos que ocorrem na tensão e que podem causar tanto distúrbios transitórios quanto harmônicos. Na Figura 7 é representado este evento.

Figura 7 - Corte de tensão.



Fonte: Adaptado de Deckmann (2017).

3 A ENTRADA DE NOVAS FONTES GERADORAS E SEU IMPACTO NO SISTEMA ELÉTRICO

O crescimento de demanda no sistema elétrico apresentado atualmente, seja pelo crescimento populacional ou pelo crescimento da indústria, fomenta a utilização de novas fontes de energia visando proporcionar um fornecimento de energia contínuo e de boa qualidade. Casos especiais são a geração solar e eólica no nordeste do Brasil que tem apresentado um crescimento vertiginoso. Entre janeiro e setembro de 2018 a geração de energia eólica cresceu 17,5 % (CCEE, 2019), enquanto que a para a energia solar é estimado um salto de 44 % no ano de 2019 (COSTA, 2019).

Por serem fontes intermitentes e que se acoplam ao sistema por meio de inversores, as energias solar e eólica podem afetar a estabilidade do sistema, tornar a sua operação mais complexa e afetar os níveis da QEE. Alguns problemas que podem surgir são:

- Variação de tensão terminal em regime permanente;
- Regulação de potência ativa;
- Variação de frequência;
- Distorções harmônicas;
- Desequilíbrio de tensão.

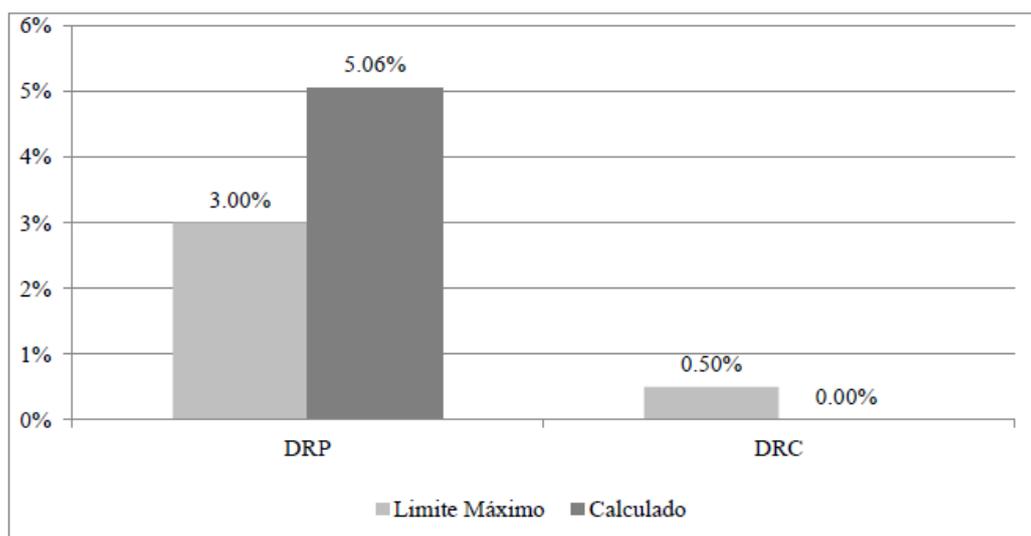
Diversos trabalhos (LOWENBERGE, 2013; DIAS, 2016; ALVES, 2018) demonstram a preocupação com a estabilidade do sistema e com os critérios de variação de tensão devido a inserção de fontes renováveis. Com relação a geração eólica, em Lovenberge (2013) são estudados sistemas com 5 e 32 barras e é mostrado que nem sempre a conexão de um gerador em determinado ponto traz benefícios ao sistema. Em certos pontos de acoplamento a conexão de um gerador pode criar elevações de tensão e sobrecargas na rede, provocando a perda de estabilidade no sistema.

Bonelli (2010) modela uma unidade eólica e simula os indicadores da qualidade da energia, verificando condições harmônicas, critérios de tensão nominal, flutuações de tensão, entre outros parâmetros, mostrando a importância de estudar o impacto destas fontes no sistema elétrico.

Quanto a fontes solares, alguns trabalhos verificam sua contribuição em relação aos distúrbios na rede elétrica. Silva (2015), por exemplo, estuda o efeito da geração solar

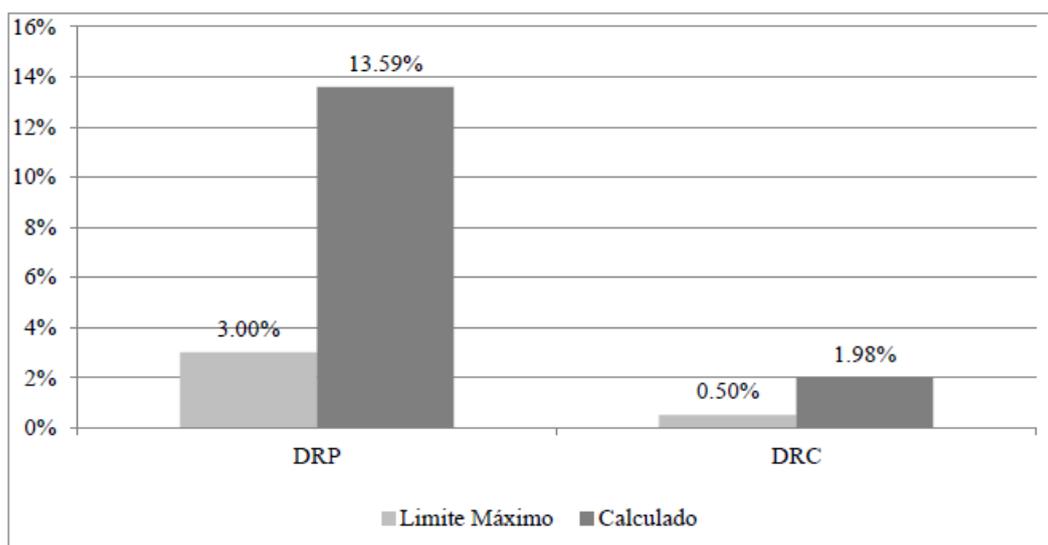
em uma residência, observando que os critérios de tensão são prejudicados após a instalação do sistema gerador. Nas Figuras 8 e 9 podem ser vistos os índices DRP (duração relativa para transgressão de tensão precária) e DRC (duração relativa para transgressão de tensão crítica) calculados por Silva (2015). Estes parâmetros mensuram por quanto tempo um sistema está sendo alimentado por uma fonte com tensão precária ou crítica respectivamente, sendo as definições de tensões precárias e críticas estabelecidas pela ANEEL por meio do módulo 8 do PRODIST.

Figura 8 - DRP e DRC sem fonte solar.



Fonte: Silva (2015).

Figura 9 - DRP e DRC com fonte solar.



Fonte: Silva (2015).

Como pode ser observado, tanto os valores de tensão precária quanto crítica são bastante agravados após a instalação do sistema solar, estando ambos acima do limite estipulado.

O trabalho de Silva (2015) apresenta a resposta de uma geração em específico que não correspondeu às expectativas de qualidade da energia, o que não faz com que se possa generalizar que fontes de geração solar tragam prejuízo a qualidade da energia do sistema. Contudo, o certo é que são necessários estudos sobre o impacto de cada geração, eólica ou solar, e que existam limites para os distúrbios que estas geram quando conectadas ao sistema elétrico. Por isso normas e recomendações especiais para a entrada destas fontes são impostas, tanto na rede básica de alta tensão, quanto nas redes de distribuição, de modo a prezar pela continuidade do serviço dentro de limites que não prejudiquem o sistema elétrico. Em especial existem o módulo 2.8 do PROREDE (ONS, 2016a) e o módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2018) que são válidos, respectivamente, para redes de transmissão e distribuição.

4 PRODIST

O PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) são um agrupamento de procedimentos, normas e recomendações para o sistema de distribuição de energia elétrica, que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas. Disponibilizado pela ANEEL, nele são considerados sistemas com tensão menor ou igual a 69 kV ou redes acima de 69 kV sob responsabilidade de empresas distribuidoras. Um documento semelhante existe para a rede de transmissão, o PROREDE (Procedimentos de Rede), usado em tensões superiores a 69 kV.

Como o estudo deste trabalho é focado em campanhas de medição da qualidade da energia de plantas solares que escoam sua potência por linhas de 69 kV no sistema de distribuição, apresentada no capítulo 5, neste capítulo serão mostradas algumas noções sobre o módulo 8 do PRODIST que poderão ser úteis nas análises.

4.1 MÓDULO 8

O módulo 8 do PRODIST estabelece os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, abordando a qualidade do produto (energia elétrica), do serviço prestado e do tratamento a reclamações, conceituando parâmetros e impondo limites. Uma vez que este trabalho trata da qualidade da energia elétrica como produto, neste capítulo serão tratados apenas os conceitos da seção 8.1 referentes a qualidade do produto no PRODIST.

Os procedimentos de qualidade da energia detalhados pelo documento da ANEEL devem ser seguidos por:

- Consumidores com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição;
- Centrais geradoras;
- Distribuidoras;
- Agentes importadores ou exportadores de energia elétrica;
- Transmissoras detentoras de instalações não classificadas como rede básica integrantes de outorgas de geração e/ou concessões de transmissão;
- Operador Nacional do Sistema Elétrico.

O foco deste trabalho está nas centrais geradoras.

4.1.1 QUALIDADE DO PRODUTO

Nesta seção são descritos fenômenos da QEE estabelecidos pelo PRODIST como críticos, citando critérios de amostragem na sua medição, seus valores de referência e os limites aceitáveis. Os indicadores apresentados no módulo 8 do PRODIST são:

- Tensão em Regime Permanente;
- Fator de Potência;
- Distorção Harmônicos;
- Desequilíbrio de Tensão;
- Flutuação de Tensão;
- Variação de Tensão de Curta Duração;
- Variação de Frequência.

Serão apresentados apenas os indicadores de interesse para o estudo na campanha de medição apresentada neste trabalho. Seguindo instruções específicas do ONS, na NT 009/2016 – Rev. 02, datada de março de 2018 (ONS, 2018), os indicadores estudados neste capítulo serão:

- Flutuação de tensão;
- Desequilíbrio de tensão;
- Distorção harmônica de tensão.

Os medidores utilizados nas campanhas de medição deverão ser equipamentos que operam segundo o princípio da amostragem digital. Poderão ser utilizados medidores das classes S ou A, conforme norma vigente da IEC 61000-4-30 (2015).

a) Flutuação de Tensão

A flutuação de tensão é um fenômeno caracterizado pela variação aleatória, ou seja, é um evento repetitivo ou esporádico em que o valor eficaz de tensão varia, podendo criar uma situação de desconforto pela mudança de intensidade luminosa das lâmpadas. Os indicadores da flutuação de tensão tentam estimar o desconforto com essa variação.

São utilizados 3 indicadores apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Terminologia dos indicadores de flutuação de tensão.

Identificação da Grandeza	Símbolo
Severidade de flutuação de tensão de curta duração	Pst
Severidade de flutuação de tensão de longa duração	Plt
Valor do indicador de Pst que foi superado em apenas 5% das leituras válidas	$Pst95\%$

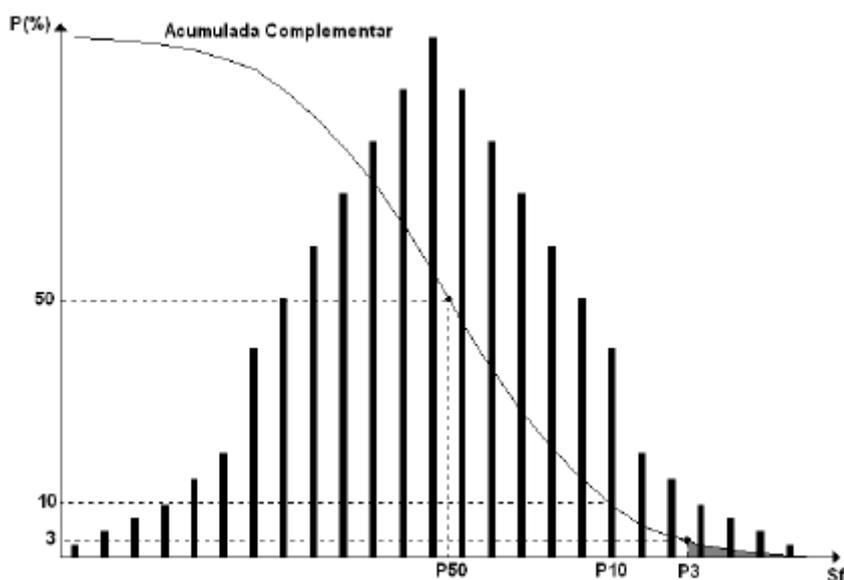
Fonte: ANEEL (2018).

O valor para Pst é calculado pela expressão:

$$Pst = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (2)$$

em que P_i ($i = 0,1; 1; 3; 10; 50$) correspondem ao nível de flutuação de tensão que foi ultrapassado durante $i\%$ do tempo, obtido a partir da função de distribuição acumulada complementar, como estabelecido na norma IEC 61000-4-15 (2010).

A função de distribuição acumulada nos dá uma maneira de descrever como as probabilidades são associadas aos valores ou aos intervalos de valores de uma variável aleatória. Como pode ser visto na Figura 10, a partir da distribuição acumulada complementar da flutuação de tensão podem ser obtidos os valores dos P_i s. Recorrendo a Figura, o ponto P_3 seria um valor não ultrapassado em 3 % dos dados, o P_{10} o valor não ultrapassado em 10 % dos dados, e de forma análoga ao casos seguintes.

Figura 10 - Distribuição acumulada complementar da sensação de cintilação.

Fonte: ANEEL (2018).

O valor Plt corresponde a um valor representativo de doze (12) amostras consecutivas de Pst , como estabelecido pela equação 3.

$$Plt = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (Pst_i)^3} \quad (3)$$

O indicador $Pst95\%$, como definição na tabela 2, é o valor de flutuação que não é superado em 95% dos casos. Este pode ser retirado diretamente da função de distribuição acumulada complementar.

As medições de flutuação de tensão devem ser realizadas por meio do registro de 1008 leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada. Deste modo o parâmetro Pst será tomado em intervalos de 10 minutos, enquanto que Plt em intervalos de 2 horas (12 intervalos de 10 minutos).

Limites para os indicadores:

São estipulados limites para a flutuação do valor do $Pst95\%$. Não é estipulado limite para os indicadores de longa duração. Para cada faixa de tensão corresponde um limite máximo, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Limites de $Pst95\%$ para diferentes valores de tensão.

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

Fonte: ANEEL (2018).

b) Desequilíbrio de Tensão

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

São usados 2 indicadores para desequilíbrio de tensão. Estes são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Terminologia dos indicadores de desequilíbrio de tensão.

Identificação da Grandeza	Símbolo
---------------------------	---------

Fator de desequilíbrio de tensão	<i>FD</i>
Valor do indicador <i>FD</i> que só é superado em 5% das medições	<i>FD95%</i>

Fonte: Adaptado de ANEEL (2018).

O indicador *FD* é calculado como apresentado no capítulo 2, página 15, deste trabalho. Como sua definição, o indicador *FD95%* será o valor de *FD* que não é superado em 95% das medições.

As medições de fator de desequilíbrio de tensão devem ser realizadas por meio do registro de 1008 leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada, semelhante a flutuação de tensão.

Limites para os indicadores:

São criados limites para o indicador de desequilíbrio de tensão *FD95%*. Estes são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Limites para o desequilíbrio de tensão.

Indicador	Tensão Nominal	
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$
<i>FD95%</i>	3 %	2 %

Fonte: ANEEL (2018).

c) Distorção Harmônica de Tensão

As distorções harmônicas são fenômenos associados a existência de harmônicos causando deformações na forma da onda da tensão e corrente em relação a senoide de frequência fundamental.

Para quantificar sua presença existem uma sequência de indicadores, os quais são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Terminologia dos indicadores da distorção harmônica.

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem <i>h</i>	<i>DIT_h%</i>
Distorção harmônica total de tensão	<i>DTT%</i>

Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTT_p\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTT_i\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DTT_3\%$
Valor do indicador $DTT\%$ que foi superado em apenas 5% das medições	$DTT_{95\%}$
Valor do indicador $DTT_p\%$ que foi superado em apenas 5% das medições	$DTT_p_{95\%}$
Valor do indicador $DTT_i\%$ que foi superado em apenas 5% das medições	$DTT_i_{95\%}$
Valor do indicador $DTT_3\%$ que foi superado em apenas 5% das medições	$DTT_3_{95\%}$

Fonte: Adaptado de ANEEL (2018).

As expressões para o cálculo dos indicadores da distorção harmônica são apresentadas nas equações 4 a 8.

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100. \quad (4)$$

Sendo:

V_h = Tensão harmônica de ordem h .

V_1 = Tensão harmônica da ordem fundamental.

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}}{V_1} \times 100. \quad (5)$$

Sendo:

V_h = Tensão harmônica de ordem h .

V_1 = Tensão harmônica da ordem fundamental.

h = Todas as ordens harmônicas.

$hmax$ = Ordem harmônica máxima do medidor.

$$DTT_p\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hp} V_h^2}}{V_1} \times 100. \quad (6)$$

V_h = Tensão harmônica de ordem h .

V_1 = Tensão harmônica da ordem fundamental.

h = Todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3.

h_p = Ordem harmônica máxima par e não múltipla de 3.

$$DTT_i \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_h^2}}{V_1} \times 100. \quad (7)$$

V_h = Tensão harmônica de ordem h .

V_1 = Tensão harmônica da ordem fundamental.

h = Todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3.

h_i = Ordem harmônica máxima ímpar e não múltipla de 3.

$$DTT_3 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (8)$$

V_h = Tensão harmônica de ordem h .

V_1 = Tensão harmônica da ordem fundamental.

h = Todas as ordens harmônicas múltiplas de 3.

h_3 = Ordem harmônica máxima múltipla de 3.

Mais uma vez, as medições da distorção harmônica de tensão devem ser realizadas por meio do registro de 1008 leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada, semelhante a flutuação de tensão e desequilíbrio de tensão.

Limites para os indicadores:

Os limites para os indicadores são estabelecidos pelo módulo 8 do PRODIST com relação as distorções harmônicas totais. Estes são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Limites para as distorções harmônicas de tensão.

Indicador	Tensão Nominal		
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
$DTT_{95\%}$	10,0%	8,0%	5,0%
$DTT_p 95\%$	2,5%	2,0%	1,0%
$DTT_i 95\%$	7,5%	6,0%	4,0%
$DTT_3 95\%$	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: ANEEL (2018).

5 INSTRUÇÕES PARA REALIZAÇÃO DE ESTUDOS E MEDIÇÕES DA QEE

De acordo com o submódulo 2.8 do PROREDE (ONS, 2016a), módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2018) e outros documentos como (ONS, 2018), devem ser realizadas análises fundamentadas em indicadores da qualidade da energia quando solicitado acesso de agentes de geração cujas instalações não lineares possam comprometer o desempenho da rede de distribuição ou transmissão. Como mencionado no Capítulo 4, os indicadores de maior interesse são a flutuação de tensão, desequilíbrio de tensão e distorção harmônica.

A análise da qualidade da energia, quanto ao acesso de aerogeradores/inversores, é geralmente formada por:

- Estudos da qualidade da energia;
- Campanha de medição pré-operatória;
- Campanha de monitoramento;
- Campanha de medição pós-operatória;
- Campanha de medição de corrente, a depender da necessidade.

a) Estudos da qualidade da energia

Os estudos da qualidade da energia são realizados sob responsabilidade do agente gerador, em forma de relatório, incluindo informações detalhadas quanto aos dados, modelos e metodologias utilizadas, bem como os resultados obtidos e as possíveis recomendações para ações a serem tomadas em casos de necessidade de adequação aos limites estabelecidos (ONS, 2016a). São uma série de estudos e simulações sobre os impactos que a fonte geradora pode trazer a rede que terá acesso. O ONS disponibiliza um guia para realização destes trabalhos no submódulo 23.3 (ONS, 2010).

b) Campanhas de pré e pós-operação

As campanhas de medição pré-operatória e pós-operatória são etapas necessárias da análise da QEE e visam verificar o desempenho da rede quanto aos seus indicadores no ponto de acoplamento comum (PAC), entre a unidade geradora e a rede de distribuição

ou transmissão. Essas campanhas devem ocorrer em dois momentos, um imediatamente antes à entrada em operação (pré-operatória) e outro após a entrada em operação (pós-operatória). Cada uma deve ser realizada por um período de 7 dias consecutivos.

As campanhas de pré e pós-operação tem grande importância, pois possibilitam traçar um paralelo, real e sem necessidade de simulações, do impacto da nova fonte geradora no sistema, diferente do que ocorre nos estudos da qualidade da energia.

O pré-operatório verifica as condições locais de tensão da rede sem a nova fonte geradora, sendo umas das formas de informar se tem ou não capacidade de receber uma nova fonte e se é necessário reforçar o sistema de distribuição ou transmissão. Juntamente com o estudo da qualidade da energia, é etapa obrigatória para a obtenção do parecer de acesso à rede.

O pós-operatório verifica os indicadores de tensão após a entrada da nova fonte, observando o cumprimento dos mínimos padrões de qualidade do fornecimento de energia. Os resultados da campanha podem impor, em caso de detecção de distúrbios que extrapolem limites operacionais, restrições à geração e contrapartidas a serem tomadas pelo gerador em função da melhoria da qualidade da energia.

c) Campanha de monitoramento

Medição da distorção harmônica de tensão realizada quando, no acesso de fontes eólicas ou fotovoltaicas, não for implementada solução de filtragem, geralmente indicada pelo estudo da qualidade da energia. Caso seja identificada alguma violação dos limites de distorção harmônica, o funcionamento do parque deve ser restringido a um número máximo de aerogeradores/inversores que permita o reestabelecimento dos limites.

d) Campanha de medição de corrente

Também é possível haver, dependendo da necessidade e recomendações do estudo da qualidade da energia realizado, uma campanha de medição de correntes harmônicas na saída de equipamentos não lineares da instalação. Geralmente este tipo de medição é realizado no acesso de fontes solares ou eólicas.

6 CAMPANHAS DE MEDIÇÃO DA QUALIDADE DA ENERGIA

Neste capítulo serão apresentados dois estudos de caso sobre campanhas de medição da qualidade da energia, referentes a entrada de centrais geradoras fotovoltaicas (UFVs) na rede de distribuição. Destas, uma será campanha de medição da qualidade da energia pré-operatória e outra pós-operatória.

6.1 ESTUDO DE CASO 1

A campanha de medição apresentada neste subtópico é uma medição pré-operatória utilizada como pré-requisito ao acesso de uma grande usina solar fotovoltaica (29,0 MWac) na rede de distribuição. Deste modo, a metodologia utilizada na medição e a análise dos indicadores são baseados nos documentos do PRODIST, módulo 8 e módulo 3 (ANEEL, 2018; ANEEL, 2017). Em caso de não existência de recomendações explícitas nestes documentos também é possível recorrer aos Procedimentos de Rede (ONS, 2016a).

Durante 7 dias foi realizada uma campanha de medição da qualidade da energia, denominada campanha pré-operatória, para o acesso de uma nova usina fotovoltaica a rede de distribuição do estado de Pernambuco. Todo o procedimento, medições e análises dos dados foram feitos segundo recomendações das normas vigentes.

A campanha de medição tem como objetivo determinar os indicadores de tensão, flutuação, desequilíbrio e distorção harmônica, antes da entrada em operação da fonte, no ponto de acoplamento comum (PAC) imediatamente anterior à conexão da fonte geradora com a rede de distribuição ou transmissão.

A usina solar fotovoltaica tem uma capacidade de conversão de 29 MWac e se conecta a um barramento de 34,5 kV em uma subestação 69/34,5 kV. A saída de 69 kV é interligada a uma subestação 69/13,8 kV de responsabilidade da empresa de distribuição local, por meio de uma linha de aproximadamente 1 km.

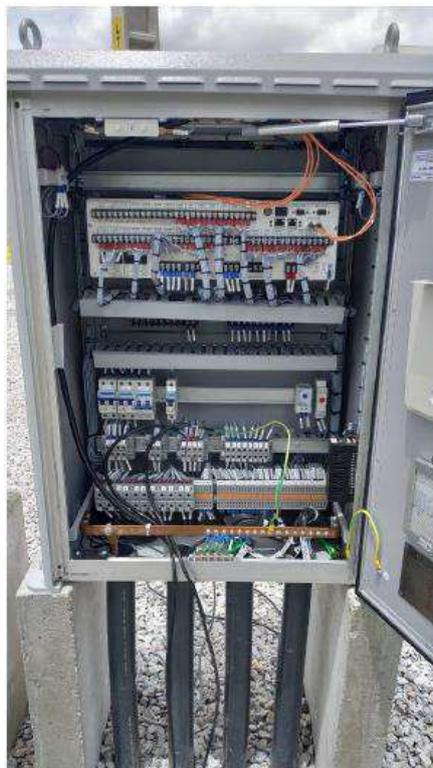
6.1.1 PONTO DE ACOPLAMENTO COMUM (PAC)

Conforme procedimentos vigentes, as medições da QEE foram realizadas no PAC, na conexão entre o agente gerador e a rede de distribuição. Neste caso a subestação 69/13,8 kV.

A subestação em questão tem 5 linhas de saída pelo lado de 13,8 kV, 4 alimentam 3 pequenas cidades e uma região rural e uma linha alimenta diretamente uma estação elevatória de uma indústria de tratamento de esgoto.

Buscando atender requisitos técnicos de segurança, os terminais do equipamento de medição foram instalados na régua de bornes localizada no quadro de medição da subestação, onde se encontram as saídas do TP (Transformador de Potencial), como mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Conexão dos terminais do medidor à régua de bornes no ponto de medição da subestação 69/13,8 kV.



Fonte: Próprio autor.

Como forma de proteger o equipamento de medição de chuvas ou intempéries, este foi instalado na casa de comando, local onde são armazenados os equipamentos de medição, proteção e controle da subestação, como mostra a Figura 12.

Figura 12 - Medidor instalado na casa de faturamento.



Fonte: Próprio autor.

6.1.2 MEDIDOR UTILIZADO

O medidor utilizado durante toda a campanha de medição foi o analisador da qualidade da energia *Nexus 1500*, modelo 141-0132789232, de fabricação da *Electro Industries/Gauge Tech*. O analisador é classificado como um qualímetro classe A, conforme norma vigente da IEC 61000-4-30 (2015), é homologado pelo ONS como um dos medidores para campanhas de medição da qualidade da energia e possui certificado de calibração recente. Suas principais características são as seguintes:

- Entradas de tensão: V1, V2, V3, Vref (até 600 V fase-fase);
- Entradas de corrente: I1, I2, I3, Iref;
- Forma de onda: 512 amostras por ciclo;
- Frequência: 45 – 69,9 Hz;
- Entradas digitais: 8 entradas – S1 a S8;

- Relés: 4 saídas de relés;
- Saídas de estado sólido: 04 saídas de estado sólido;
- Comunicação: Protocolos de comunicação *Modbus* TCP/IP, ASCII/RTU, DNP 3.0, porta ótica ANSI, USB 1.1/2.0, porta virtual COM, RJ-45 porta *Ethernet*10/100BaseT, 2 portas RS485 (opcionais).

Na Figura 13 é mostrado o modelo do qualímetro utilizado.

Figura 13 - Nexus 1500.



Fonte: Electro Industries (2014).

6.1.3 TESTES MÍNIMOS REALIZADOS

Antes de começar a campanha de medição propriamente dita, é recomendada a realização de testes de sequência de fases e amplitude de sinal, conforme nota técnica do ONS (ONS, 2007). Esse procedimento busca possíveis falhas no analisador da qualidade da energia, nas ligações ou no próprio transformador de potencial.

a) Teste de amplitude de sinal

Neste teste todas as fases do instrumento de medição devem estar conectadas entre uma única fase e o neutro do transdutor, medindo suas amplitudes de tensão por no mínimo 30 minutos.

O objetivo deste teste é verificar possíveis incoerências nos dados medidos nas diferentes fases do medidor. Caso a amplitude das 3 fases apresente variação superior que 5% entre si a campanha de medição deve ser suspensa devido, possivelmente, a problemas com o equipamento medidor.

Neste momento, para possibilitar uma maior quantidade de amostras, o *Nexus* foi configurado para capturar dados a cada minuto. No Anexo A são disponibilizados os

dados deste teste, onde não foi verificado nenhuma variação superior a 5 % entre as fases, atestando o sucesso do teste.

b) Teste de sequência de fases

As 3 fases do *Nexus* e o neutro devem ser conectadas ao secundário do TP e, durante um período não inferior a 30 minutos, medir o valor FD (%) referente ao desequilíbrio das fases.

O objetivo deste teste é verificar se a sequência de fases está correta, evitando erros durante a campanha de medições. Se eventualmente o valor do indicador superar 10%, possivelmente teremos um dos seguintes problemas:

- Inversão de sequência de fases. Se for este o caso, duas fases devem ser invertidas e o teste reiniciado.
- Sinais discrepantes vindos de outras fontes. Neste caso a origem do problema deve ser estudada.

Neste momento, mais uma vez, para possibilitar uma maior quantidade de amostras, o *Nexus* foi configurado para capturar dados a cada minuto. No Anexo B são disponibilizados os dados deste teste, onde não foi verificado nenhum valor superior a 10%, validando o teste.

6.1.4 RESULTADOS - CAMPANHA DE MEDIÇÃO PRÉ-OPERATÓRIA DA QEE EM UMA PLANTA SOLAR

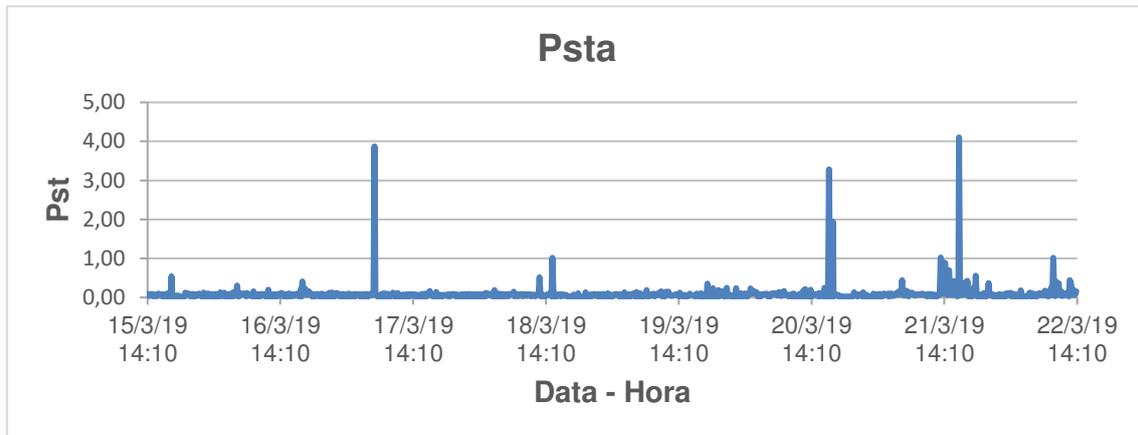
Finalizados os testes mínimos em campo, apresentados anteriormente, a campanha de medições foi iniciada. Entre os dias 15/03/2019 e 21/03/2019 foi realizada a medição contínua dos parâmetros: Flutuação de tensão, desequilíbrio de tensão e distorção harmônica de tensão.

A seguir são apresentados e analisados os resultados dos indicadores, conforme descrito no módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2018) e no capítulo 4 deste trabalho.

6.1.4.1 FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

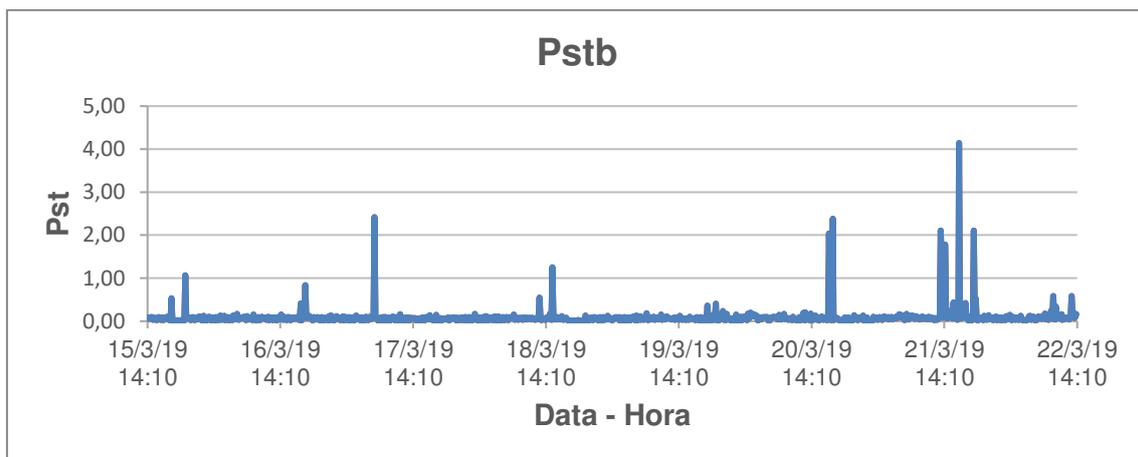
Nas Figuras 14, 15 e 16 são apresentados os dados para severidade de flutuação de tensão de curta duração (Pst) para as 3 fases no ponto de acoplamento comum.

Figura 14 - Severidade de flutuação de tensão de curta duração (Pst) para a fase “A” – Período de 15/03/2019 à 21/03/2019.



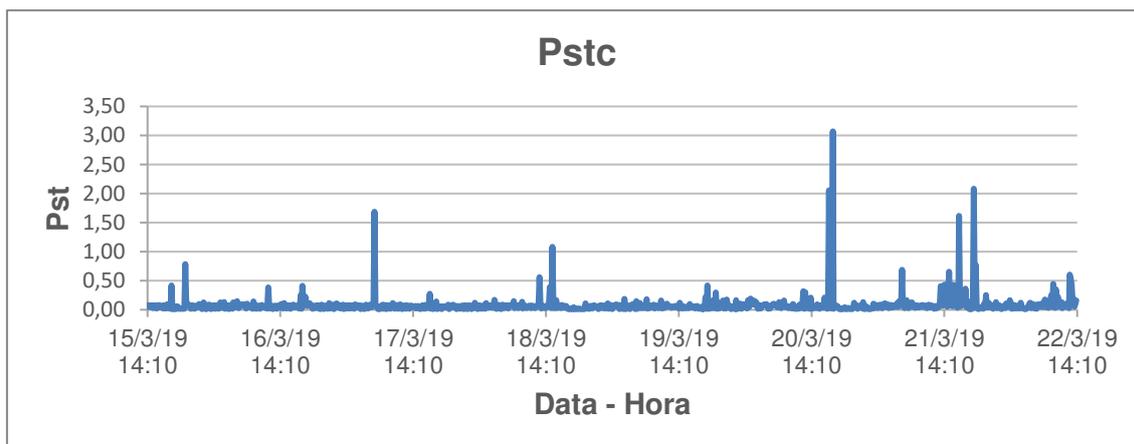
Fonte: Próprio autor.

Figura 15 - Severidade de flutuação de tensão de curta duração (Pst) para a fase “B” – Período de 15/03/2019 à 21/03/2019.



Fonte: Próprio autor.

Figura 16 - Severidade de flutuação de tensão de curta duração (Pst) para a fase “C” – Período de 15/03/2019 à 21/03/2019.



Fonte: Próprio autor.

Como pode ser observado nas Figuras 14 a 16, durante os 7 dias da campanha de medição, puderam ser observados 4 eventos em que houve acentuada elevação do indicador severidade de flutuação de tensão. Nestes 4 eventos pode ser percebida, simultaneamente, elevação em todas as fases. Possíveis causas são mudanças na configuração do sistema, chaveamentos de linhas próximas ou entrada e saída de grandes cargas.

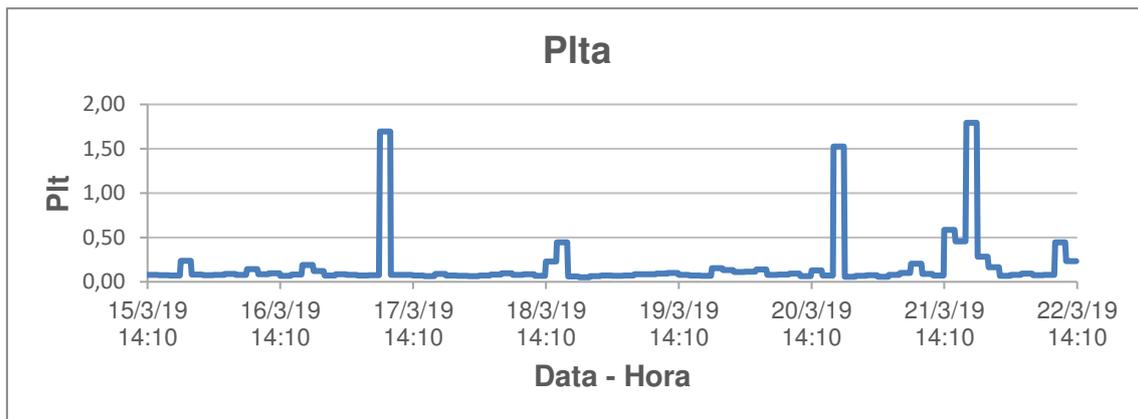
Uma informação que pode ajudar na identificação da causa destas flutuações é o horário em que aconteceram:

- 1 – Domingo (17/03) as 7:10
- 2 – Segunda (18/03) as 15:20
- 3 – Quarta (20/03) as 17:20
- 4 – Quinta (21/03) as 16:50 – 19:30

O terceiro e quarto eventos podem ter causa especulada como saída de cargas do sistema, devido ao horário em que ocorreram e dias da semana. Já o primeiro e segundo podem ser associados a manobras no sistema, que podem ocasionar elevações de tensão de curta duração.

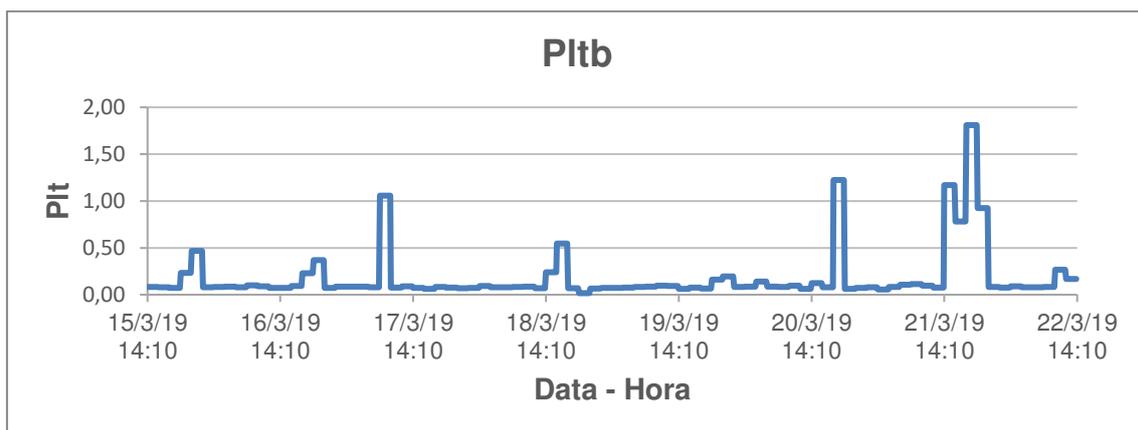
Nas Figuras 17, 18 e 19 são mostrados os índices Plta, Pltb e Pltc.

Figura 17 - Severidade de flutuação de tensão de longa duração (Plt) para a fase “A” – Período de 15/03/2019 à 21/03/2019.



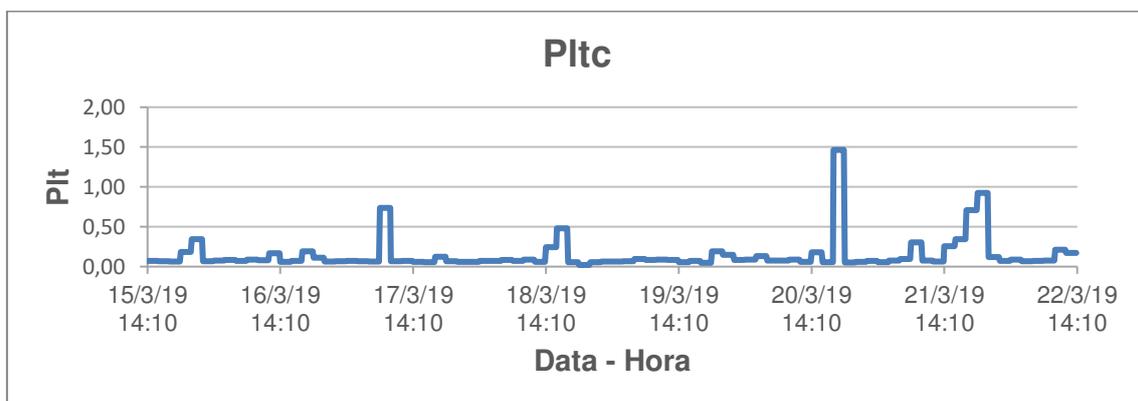
Fonte: Próprio autor.

Figura 18 - Severidade de flutuação de tensão de longa duração (Plt) para a fase “B” – Período de 15/03/2019 à 21/03/2019.



Fonte: Próprio autor.

Figura 19 - Severidade de flutuação de tensão de longa duração (Plt) para a fase “C” – Período de 15/03/2019 à 21/03/2019.



Fonte: Próprio autor.

O resultado para a severidade da flutuação de tensão de longa duração mostrou-se semelhante à de curta duração, seguindo o mesmo padrão, embora com valores menores. Isso se deve a este indicador ser formado por um conjunto de 12 valores de Pst. Como a maior parte das amostras tem Pst abaixo de 0,1 os valores de Plt tornam-se mais baixos, mesmo que ocorra um pico de flutuação de tensão.

O maior valor medido para a flutuação de tensão ocorreu no dia 21/03 às 16h50, com um pico momentâneo de 4,14 pu na fase B (Pstb). Porém, na maior parte do período monitorado a flutuação se manteve abaixo de 0,1 pu, fazendo com que os indicadores estatísticos de severidade de flutuação de tensão se mantivessem baixos, como mostra a Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados para severidade de flutuação de tensão de curta e longa duração.

Psta95%	Pstb95%	Pstc95%	Plta95%	Pltb95%	Pltc95%
0,42	0,43	0,44	0,46	0,93	0,48

Fonte: ANEEL (2018).

Comparando os resultados com os limites impostas pelo módulo 8 do PRODIST, é observado que, quanto a severidade da flutuação de tensão, os limites globais não são violados. Isso pode ser visto na Tabela 9.

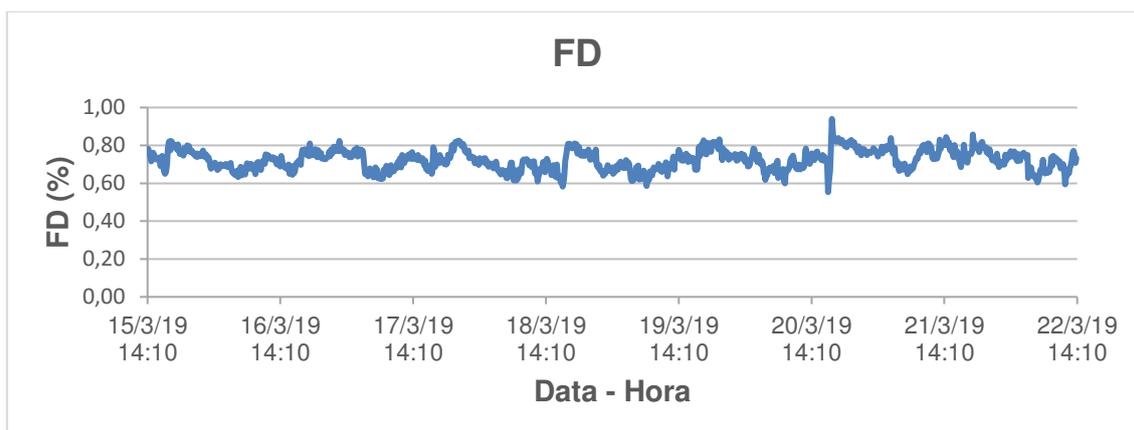
Tabela 9 - Flutuação de tensão - Comparação com os limites globais.

Flutuação	Fase	Valor medido (pu)	Limites globais (pu)
Pst95%	A	0,42	2,00
	B	0,43	2,00
	C	0,44	2,00

Fonte: Próprio autor.

6.1.4.2 DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

O fator de desequilíbrio FD (%) foi calculado e os seus resultados, obtidos em medições com intervalos de 10 minutos, foram usados para gerar o gráfico da Figura 20.

Figura 20 - Fator de desequilíbrio de tensão medido (FD) – Período de 15/03/2019 à 21/03/2019.

Fonte: Próprio autor.

Como pode ser percebido pelo gráfico, o valor do fator de desequilíbrio se manteve estável próximo a 0,8 % durante os 7 dias de medição.

O valor de FD95%, equivalente ao fator de desequilíbrio que não é superado em 95 % das medições, foi determinado e comparado com o limite recomendado pelo módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2018). O resultado é visto na Tabela 10.

Tabela 10 - Desequilíbrio de tensão - Comparação com os limites globais.

Desequilíbrio de Tensão	Valor medido (%)	Limites globais (%)
FD95%	0,83	2,00

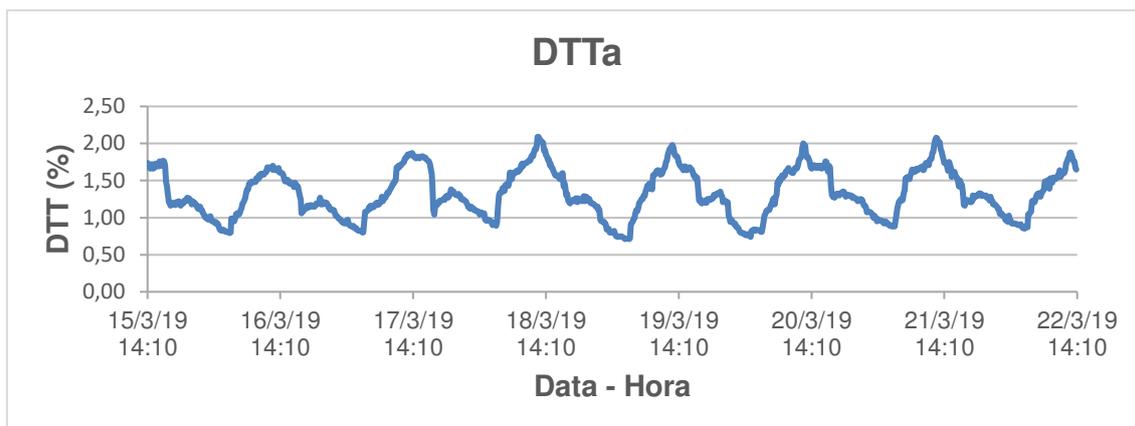
Fonte: Próprio autor.

Sendo o valor FD95% inferior a 2%, pode-se dizer que, quanto ao desequilíbrio de tensão, os limites globais não são violados.

6.1.4.3 DISTORÇÃO HARMÔNICA

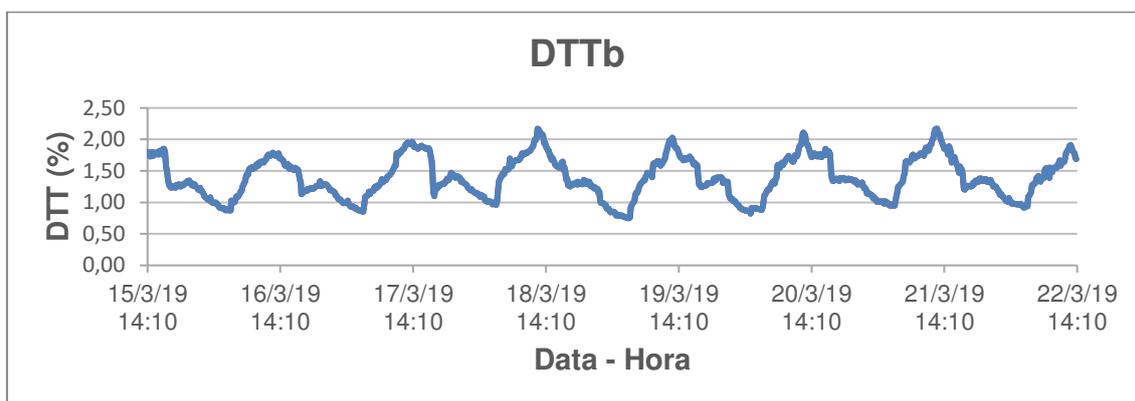
Semelhante aos outros indicadores, a distorção harmônica total de tensão foi medida em intervalos de 10 minutos utilizando o medidor da qualidade da energia *Nexus* 1500. Foram contabilizadas as primeiras 50 harmônicas. Os resultados para cada fase foram utilizados para gerar os gráficos nas Figuras 21, 22 e 23.

Figura 21 - Distorsão harmônica total de tensão (DHT) para a fase “A” – Período de 15/03/2019 à 21/03/2019.



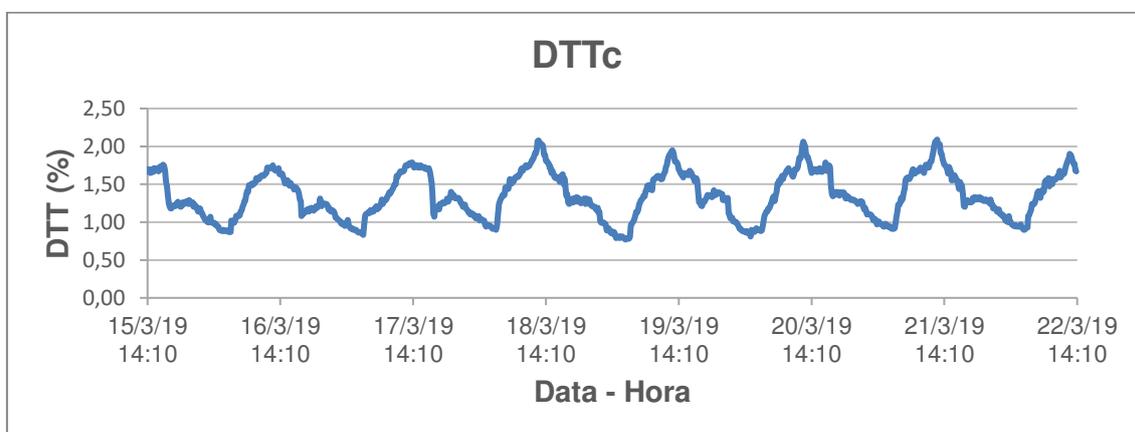
Fonte: Próprio autor.

Figura 22 - Distorsão harmônica total de tensão (DHT) para a fase “B” – Período de 15/03/2019 à 21/03/2019.



Fonte: Próprio autor.

Figura 23 - Distorsão harmônica total de tensão (DHT) para a fase “C” – Período de 15/03/2019 à 21/03/2019.



Fonte: Próprio autor.

Como é facilmente percebido pelos gráficos, a distorção harmônica total apresenta uma característica cíclica, tendo picos ao meio dia, por volta das 12:50, e vales nas madrugadas, por volta de 03:00.

Uma característica interessante que pode ser percebida são descontinuidades que se repetem todos os dias por volta das 17:30. Neste horário pode ser notada uma queda na distorção harmônica de aproximadamente 0,5 % em todas as fases. Uma possível causa destas variações abruptas é o início do horário de ponta as 17:30, estipulado pela distribuidora da região. A subestação em questão alimenta uma indústria de tratamento de esgoto que, possivelmente, reduz sua produção durante o horário de ponta, criando este efeito no barramento da subestação estudada.

Os indicadores estatísticos $DTT_{p95\%}$, $DTT_{i95\%}$, $DTT_{395\%}$ e $DTT_{95\%}$, conforme módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2018), os quais não são superados em 95% das medições, foram calculados e são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Indicadores estatísticos de distorção harmônica total de tensão.

Distorção Harmônica Total	Fase A	Fase B	Fase C
$DTT_{95\%}$	1,96	2,02	1,94
$DTT_{p95\%}$	0,07	0,07	0,07
$DTT_{i95\%}$	1,82	1,89	1,78
$DTT_{395\%}$	0,23	0,24	0,46

Fonte: Próprio autor.

Comparando os resultados com os limites globais estipulados por norma (ANEEL, 2018), verifica-se que todos os indicadores, quanto a distorção harmônica de tensão, não foram violados. Isso é mostrado na Tabela 12.

Tabela 12 - Limites para as distorções harmônicas de tensão – Comparação com os limites globais.

Distorção Harmônica Total	Fase	Valor Medido	Limites Globais $69\text{ kV} \leq V_n < 230\text{ kV}$
$DTT_{95\%}$	A	1,96	5,0%
	B	2,02	

	C	1,94	
<i>DTT_p95%</i>	A	0,07	1,0%
	B	0,07	
	C	0,07	
<i>DTT_i95%</i>	A	1,82	4,0%
	B	1,89	
	C	1,78	
<i>DTT₃95%</i>	A	0,23	3,0%
	B	0,24	
	C	0,46	

Fonte: ANEEL (2018).

6.2 ESTUDO DE CASO 2

A campanha de medição apresentada neste subtópico é uma medição pós-operatória, obrigatória após a entrada de uma nova fonte geradora a rede elétrica. A Usina Solar Fotovoltaica estudada tem capacidade instalada de aproximadamente 62 MW e de conversão de 112 MWac, sendo conectada à rede de distribuição do estado da Paraíba.

Deste modo, a metodologia utilizada na medição e a análise dos indicadores, semelhante ao caso apresentado no tópico 5.2, são baseados nos documentos do PRODIST, módulo 8 e módulo 3 (ANEEL, 2018; ANEEL, 2017). Em caso de não existência de recomendações explícitas nestes documentos também é possível recorrer aos Procedimentos de Rede (ONS, 2016a).

A campanha de medição pós-operatória tem como objetivo principal determinar os indicadores de tensão, flutuação, desequilíbrio e distorção harmônica, após a entrada em operação da fonte no ponto de acoplamento comum (PAC), imediatamente anterior à conexão com a rede de distribuição ou transmissão. Com esses dados, a campanha de medição pode estimar a conformidade da qualidade da energia com os limites estipulados e o consequente efeito da conexão da fonte ao sistema.

A configuração da ligação da UFV estudada ao ponto de acoplamento é idêntica ao encontrado no Estudo de Caso 1. A UFV se conecta a um barramento de 34,5 kV em uma subestação 69/34,5 kV. A saída de 69 kV é interligada a uma subestação 69/13,8 kV

de responsabilidade da empresa de distribuição local, por meio de uma linha de aproximadamente 2 km.

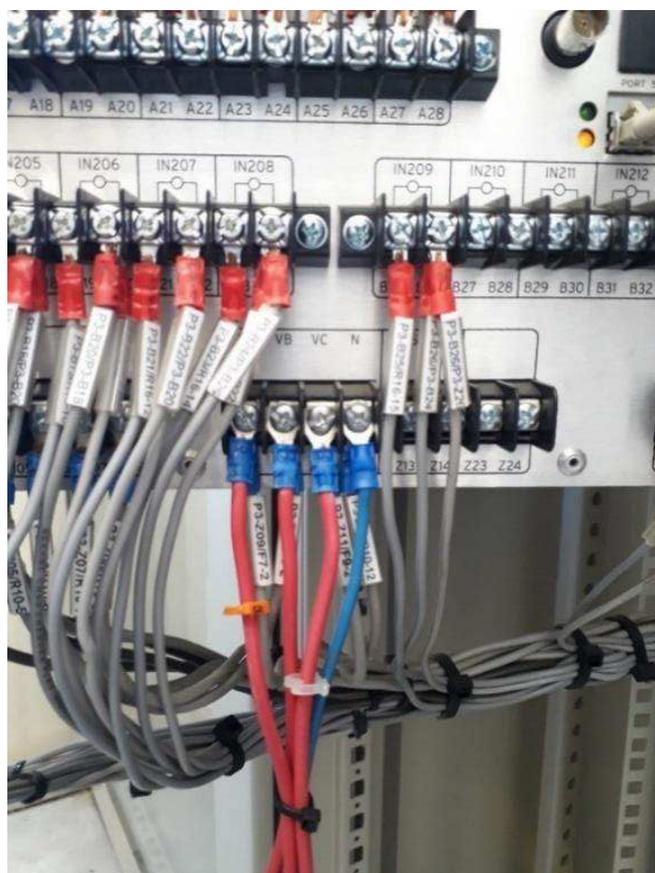
O ponto de acoplamento comum (PAC) foi considerado na subestação de conexão com a rede de distribuição.

6.2.1 PONTO DE ACOPLAMENTO COMUM (PAC)

Conforme procedimentos vigentes, as medições de QEE são realizadas no PAC, na conexão entre o agente gerador e a rede de distribuição. Neste caso a subestação 69/13,8 kV.

Buscando atender requisitos técnicos de segurança, os terminais do equipamento de medição foram instalados na régua de bornes localizada no quadro de medição da subestação, onde se encontram as saídas do TP (Transformador de Potencial), como mostrado na Figura 24.

Figura 24 - Conexão dos terminais do medidor na régua de bornes no ponto de medição da subestação 69/13,8 kV.



Fonte: Próprio autor.

O quadro de medição fica localizado dentro da casa de comando, o ambiente é fechado e livre de intempéries que possam prejudicar tanto o equipamento de medição quanto os quadros da subestação. Na Figura 25 é mostrado o medidor conectado ao quadro.

Figura 25 - Medidor instalado na casa de comando.



Fonte: Próprio autor.

6.2.2 MEDIDOR UTILIZADO

Foi utilizado o mesmo analisador da qualidade da energia apresentado e descrito no tópico 5.2.2.

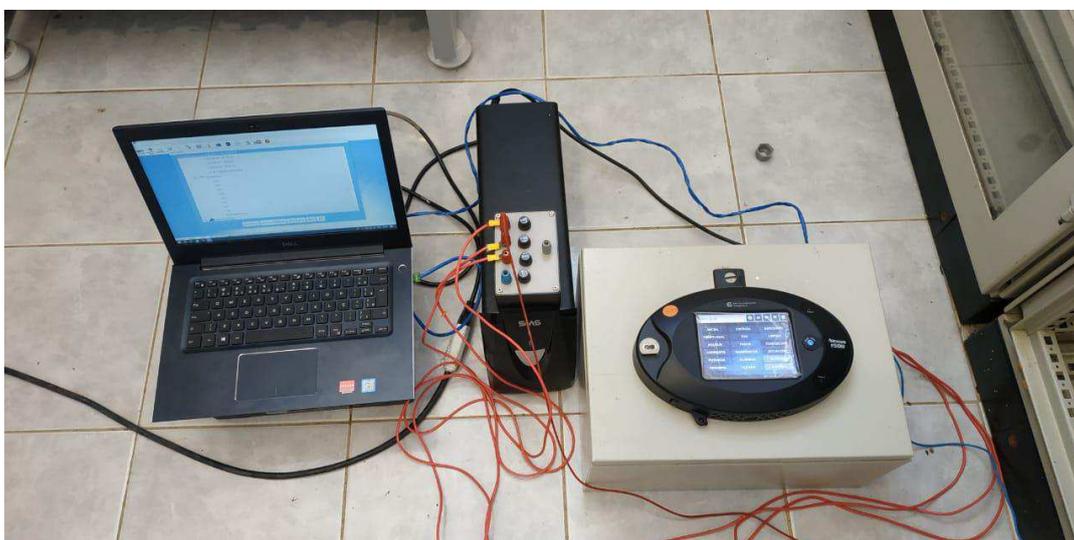
6.2.3 TESTES MÍNIMOS REALIZADOS

Os testes de sequência de fase e amplitude foram realizados seguindo a mesma metodologia utilizada na medição do Estudo de Caso 1. Os resultados são descritos a seguir.

a) Teste de amplitude de sinal

Neste teste todas as fases do instrumento de medição devem estar conectadas entre uma única fase e o neutro do transdutor, medindo amplitude de tensão por no mínimo 30 minutos. Para fazer a conexão das 3 fases foi utilizado um pequeno conector montado especialmente para esta finalidade. Na Figura 26 pode ser visto esse arranjo.

Figura 26 – Arranjo para teste de amplitude.



Fonte: Próprio autor.

Neste momento, para possibilitar uma maior quantidade de amostras, o *Nexus* foi configurado para capturar dados a cada minuto. No Anexo A são disponibilizados os dados deste teste, onde não foi verificada nenhuma variação superior a 5 % entre as fases. A maior variação foi de 0,9 %, verificando o sucesso do teste.

b) Teste de sequência de fases

As 3 fases do *Nexus* e o neutro devem ser conectadas ao secundário do TP e, durante um período não inferior a 30 minutos, medir o valor FD (%) referente ao desequilíbrio das fases. O arranjo para este teste é o mesmo mostrado na Figura 25.

O objetivo deste teste é verificar se a sequência de fases está correta, evitando erros durante a campanha de medições. Se eventualmente o valor do indicador superar 10%, possivelmente teremos um dos seguintes problemas:

- Inversão de sequência de fases. Se for este o caso, duas fases devem ser invertidas e o teste reiniciado.
- Sinais discrepantes vindos de outras fontes. Neste caso a origem do problema deve ser estudada.

No Anexo B são disponibilizados os dados deste teste, onde o maior valor verificado foi 1,25%, inferior a 10%, comprovando o sucesso do teste.

6.2.4 RESULTADOS - CAMPANHA DE MEDIÇÃO PÓS-OPERATÓRIA DA QEE EM UMA PLANTA SOLAR

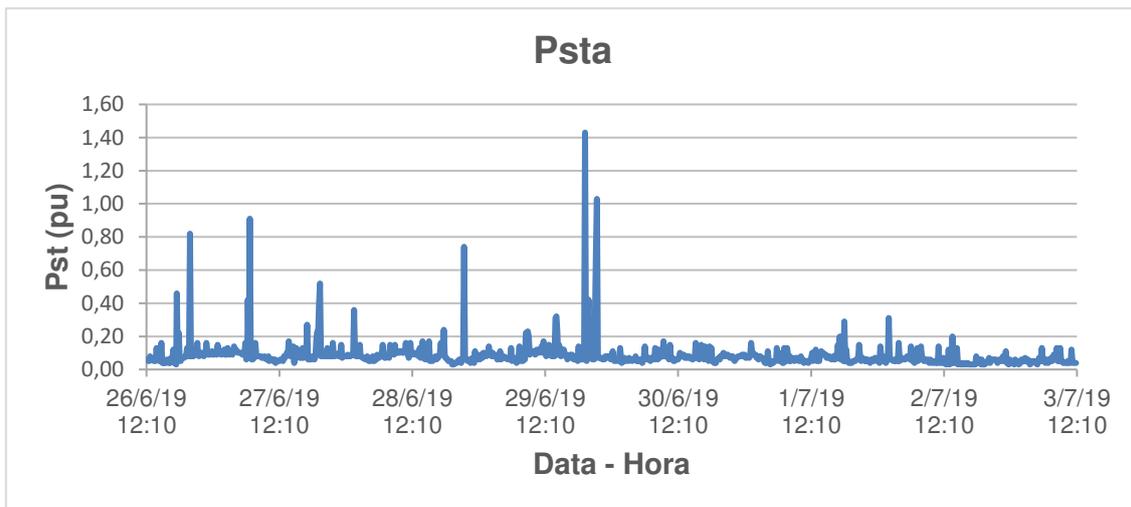
Finalizados os testes mínimos em campo, apresentados anteriormente, a campanha de medições foi iniciada. Entre os dias 26/06/2019 e 04/07/2019 foi realizada a medição contínua dos parâmetros: Flutuação de tensão, desequilíbrio de tensão e distorção harmônica de tensão.

A seguir são apresentados e analisados os resultados dos indicadores, conforme descrito no módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2018).

6.2.4.1 FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

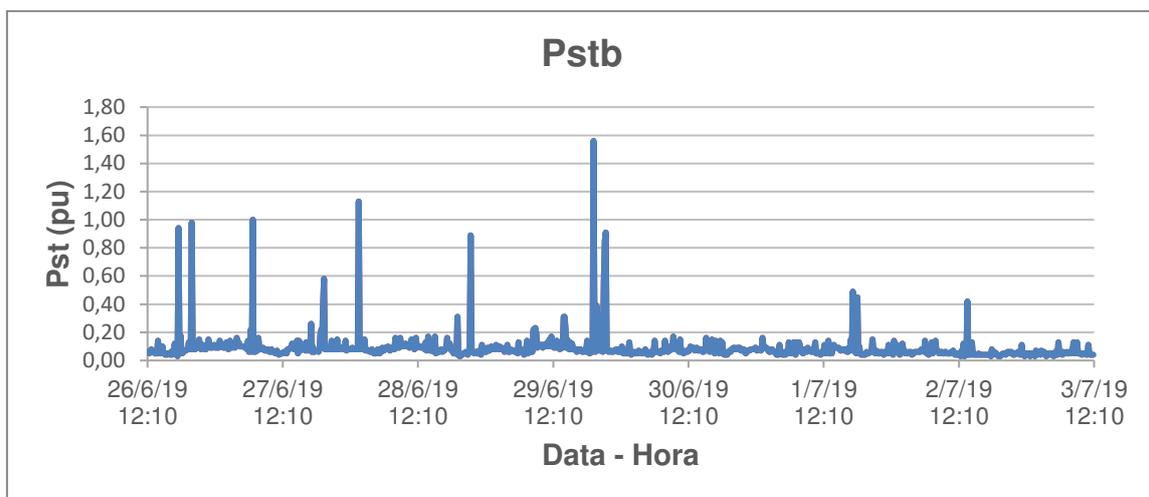
Nas Figuras 27, 28 e 29 são apresentados os dados para severidade de flutuação de tensão de curta duração (Pst) para as 3 fases no ponto de acoplamento comum.

Figura 27 - Severidade de flutuação de tensão de curta duração (Pst) para a fase “A” – Período de 26/06/2019 à 04/07/2019.



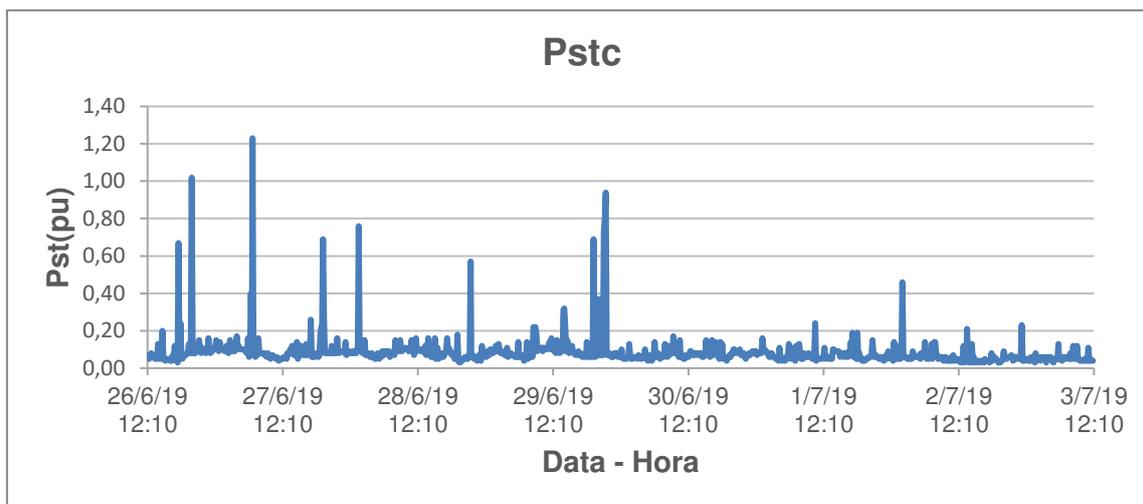
Fonte: Próprio autor.

Figura 28 - Severidade de flutuação de tensão de curta duração (Pst) para a fase “B” – Período de 26/06/2019 à 04/07/2019.



Fonte: Próprio autor.

Figura 29 - Severidade de flutuação de tensão de curta duração (Pst) para a fase “C” – Período de 26/06/2019 à 04/07/2019.



Fonte: Próprio autor.

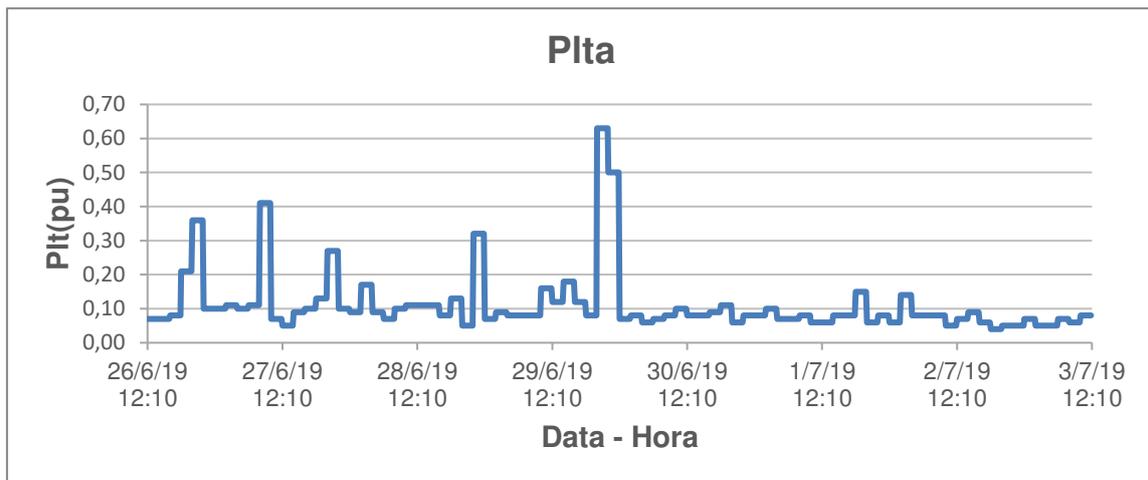
Como pode ser observado nas Figuras 27 a 29, durante os 7 dias da campanha de medição, puderam ser notados 5 eventos em que houve acentuada elevação do indicador severidade de flutuação de tensão, todos nos 4 primeiros dias. Nestes 5 eventos pode ser percebida elevação em todas as fases simultaneamente.

Já que os distúrbios não são periódicos e não persistem durante toda a campanha de medições, estando os dias 30, 01, 02 e 03/07 com parâmetros de flutuação de tensão inferiores a 0,5 pu e não havendo nenhum evento informado pela geradora, possíveis causas para estes distúrbios são mudanças na configuração do sistema, chaveamentos de linhas próximas ou entrada e saída de grandes cargas.

Ainda é possível notar que, mesmo nos maiores picos do indicador Pst, em nenhum momento foi ultrapassado 2 pu, o que ocorreu em alguns casos para o Estudo de Caso 1.

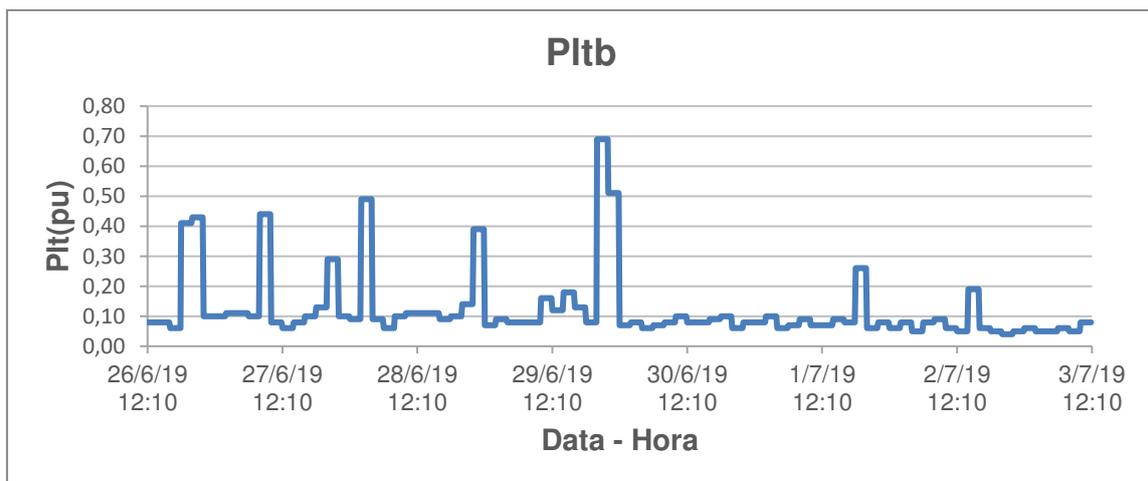
Nas Figuras 30, 31 e 32 são mostrados os índices Plta, Pltb e Pltc.

Figura 30 - Severidade de flutuação de tensão de longa duração (Plt) para a fase “A” – Período de 26/06/2019 à 04/07/2019.



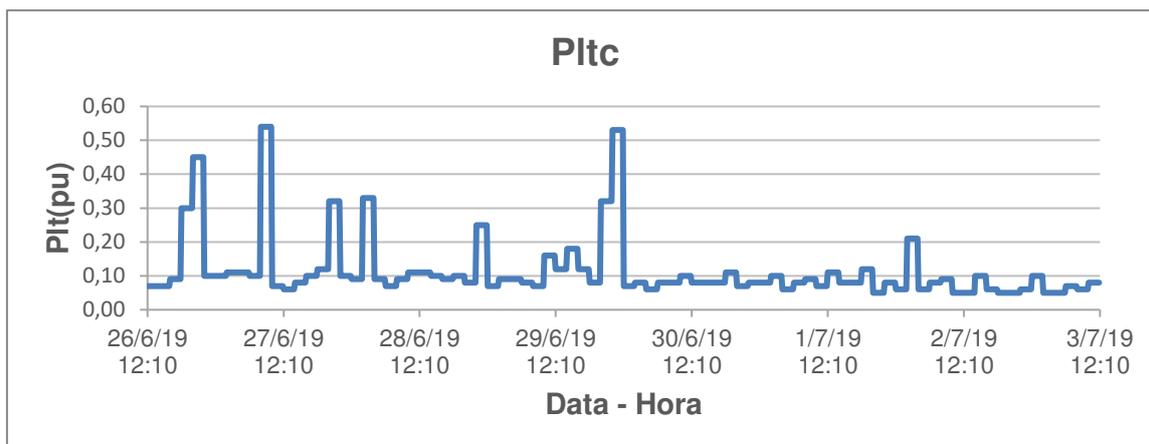
Fonte: Próprio autor.

Figura 31 - Severidade de flutuação de tensão de longa duração (Plt) para a fase “B” – Período de 26/06/2019 à 04/07/2019.



Fonte: Próprio autor.

Figura 32 - Severidade de flutuação de tensão de longa duração (Plt) para a fase “C” – Período de 26/06/2019 à 04/07/2019.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados para a severidade da flutuação de tensão de longa duração mostraram-se semelhantes à de curta duração, seguindo o mesmo padrão, embora com valores menores. Isso se deve a este indicador ser formado por um conjunto de 12 valores de Pst. Como a maior parte das amostras tem Pst abaixo de 0,1 os valores de Plt tornam-se mais baixos, mesmo que ocorra um pico de flutuação de tensão.

O maior valor medido ocorreu no dia 29/06 as 19:20, com um pico momentâneo de 1,56 pu na fase B (Pstb) (Para o Estudo de Caso 1 o valor foi de 4,14 pu). Porém, na maior parte do período monitorado a flutuação se manteve abaixo de 0,1 pu, fazendo com que os indicadores estatísticos de severidade de flutuação de tensão se mantivessem baixos, como mostra a Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados para severidade de flutuação de tensão de curta e longa duração.

Psta95%	Pstb95%	Pstc95%	Plta95%	Pltb95%	Pltc95%
0,24	0,31	0,22	0,32	0,43	0,32

Fonte: ANEEL (2018).

Se comparados aos resultados do Estudo de Caso 1, a flutuação de tensão deste estudo se manteve por volta de 30% menor.

Comparando os resultados com os limites impostas pelo módulo 8 do PRODIST, é observado que, quanto a severidade da flutuação de tensão, os limites globais não são violados. Isso pode ser visto na Tabela 14.

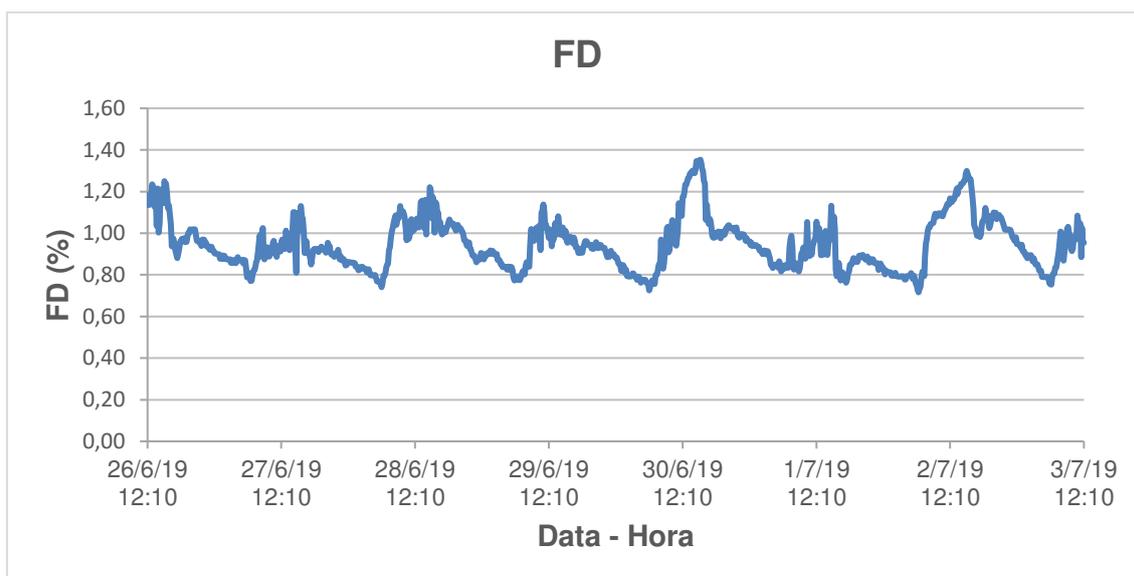
Tabela 14 - Flutuação de tensão - Comparação com os limites globais.

Flutuação	Fase	Valor medido (pu)	Limites globais (pu)
Pst95%	A	0,24	2,00
	B	0,31	2,00
	C	0,22	2,00

Fonte: Próprio autor.

6.2.4.1 DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

O fator de desequilíbrio FD (%) foi calculado e os seus resultados, obtidos em medições com intervalos de 10 minutos, foram usados para gerar o gráfico da Figura 33.

Figura 33 - Fator de desequilíbrio de tensão medido (FD) – Período de 26/06/2019 à 04/07/2019.

Fonte: Próprio autor.

Como pode ser percebido pelo gráfico, o valor do fator de desequilíbrio se manteve estável próximo a 1% durante os sete dias de medição.

O valor de FD95%, equivalente ao fator de desequilíbrio que não é superado em 95% das medições, foi determinado e comparado com o limite recomendado pelo módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2018). O resultado é apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 - Desequilíbrio de tensão - Comparação com os limites globais.

Desequilíbrio de Tensão	Valor medido (%)	Limites globais (%)
FD95%	1,30	2,00

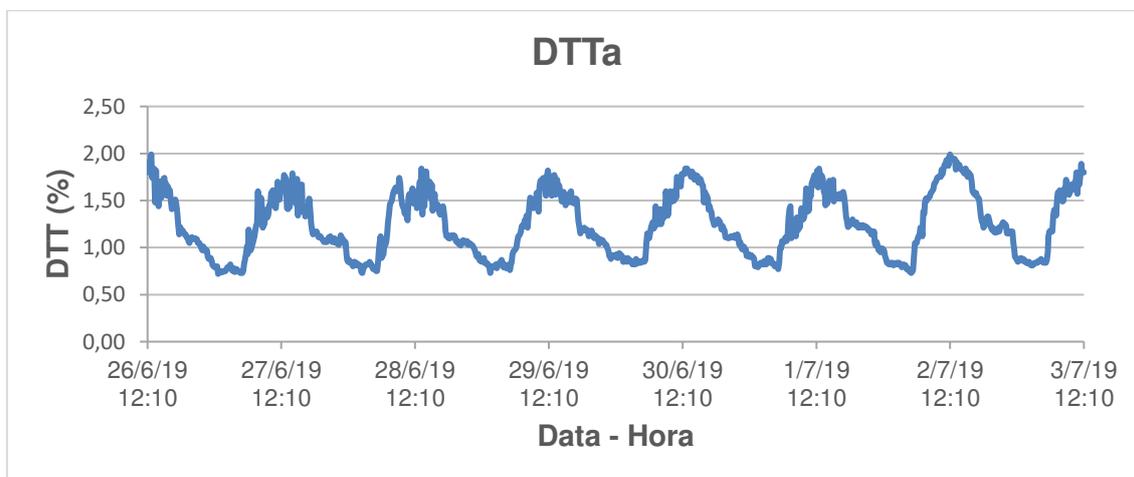
Fonte: Próprio autor.

Sendo o valor FD95% inferior a 2%, pode-se dizer que, quanto ao desequilíbrio de tensão, os limites globais não são violados.

6.2.4.1 DISTRORÇÃO HARMÔNICA

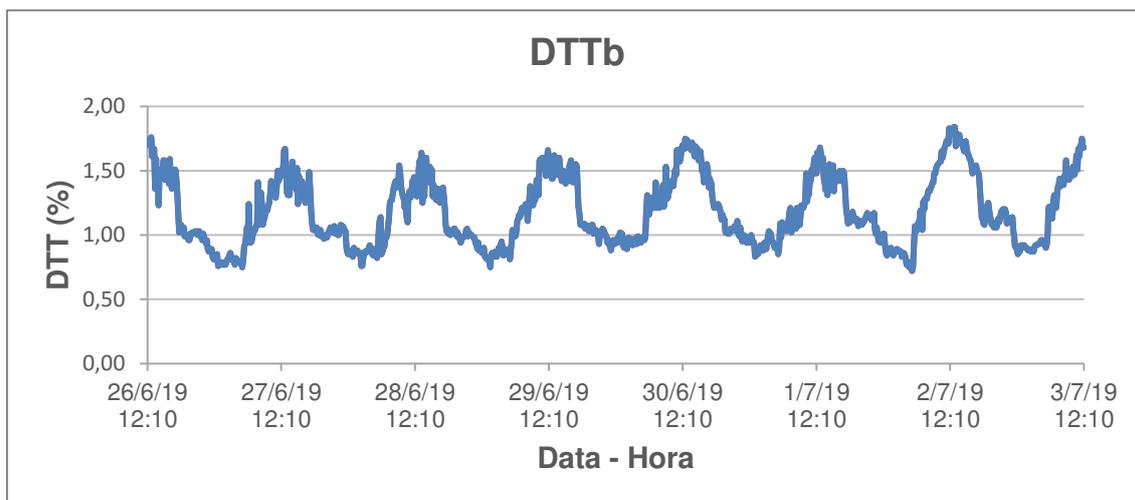
Semelhante aos outros indicadores, a distorção harmônica total de tensão foi medida em intervalos de 10 minutos utilizando o medidor da qualidade da energia *Nexus* 1500. Foram contabilizadas as primeiras 50 harmônicas. Os resultados para cada fase foram utilizados para gerar os gráficos nas Figuras 34, 35 e 36.

Figura 34 - Distorção harmônica total de tensão (DHT) para a fase “A” – Período de 26/06/2019 à 04/07/2019.



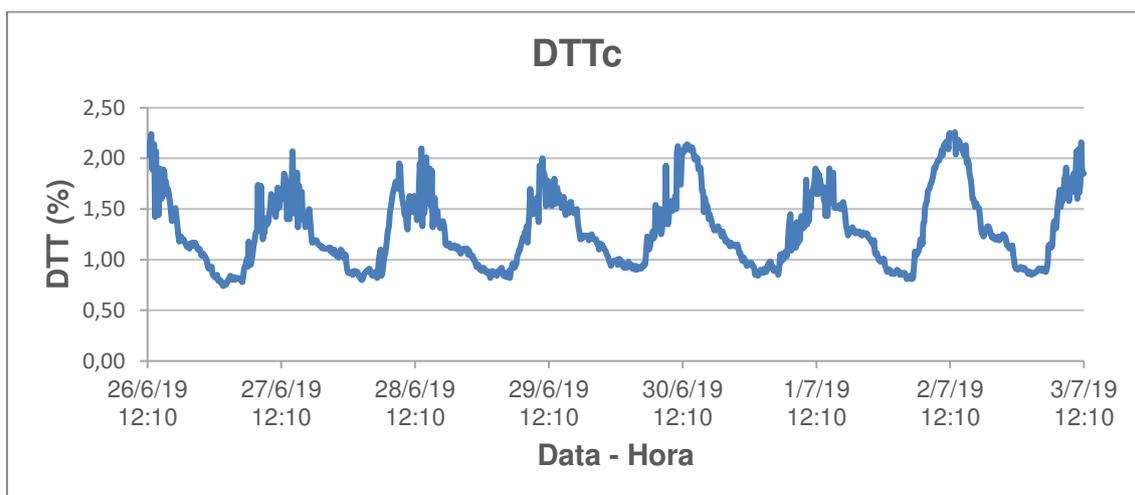
Fonte: Próprio autor.

Figura 35 - Distorção harmônica total de tensão (DHT) para a fase “B” – Período de 26/06/2019 à 04/07/2019.



Fonte: Próprio autor.

Figura 36 - Distorção harmônica total de tensão (DHT) para a fase “C” – Período de 26/06/2019 à 04/07/2019.



Fonte: Próprio autor.

As DHTs das tensões apresentam comportamento semelhante ao visto no Estudo de Caso 1, uma característica cíclica, tendo picos ao meio dia, por voltas das 12:50, e vales nas madrugadas, por volta de 03:00. Isso se deve em grande parte a curva de demanda do sistema elétrico.

Mais uma vez, em consonância com o Estudo de Caso 1, são percebidas descontinuidades que se repetem todos os dias por volta das 17:30. Neste horário pode ser notada uma queda na distorção harmônica de aproximadamente 0,4 % em todas as fases. Uma possível causa destas variações abruptas é o início do horário de ponta as

17:30, estipulado pela distribuidora da região. Durante o horário de ponta é comum que empresas reduzam seu consumo, ou utilizem fonte própria por meio de geradores a diesel.

Os indicadores estatísticos $DTT_{p95\%}$, $DTT_{i95\%}$, $DTT_{395\%}$ e $DTT_{95\%}$, conforme módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2018), os quais não são superados em 95% das medições, foram calculados e são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Distorção harmônica total de tensão.

Distorção Harmônica Total	Fase A	Fase B	Fase C
$DTT_{95\%}$	1,89	1,78	2,18
$DTT_{p95\%}$	0,44	0,42	0,37
$DTT_{i95\%}$	1,64	0,42	0,37
$DTT_{395\%}$	0,59	0,42	0,37

Fonte: Próprio autor.

Pode ser percebida uma elevação no indicador $DTT_{p95\%}$ se comparado ao Estudo de Caso 1. Uma possível explicação é a contribuição dos inversores da planta solar. De todo modo o indicador $DTT_{p95\%}$ permanecem dentro do estipulado por norma, não representando agravante ao sistema.

Comparando todos os resultados de distorção harmônica com os limites globais estipulados por norma (ANEEL, 2018), verifica-se que todos os indicadores não foram violados. Isso é mostrado na Tabela 17.

Tabela 17 - Limites para as distorções harmônicas de tensão – Comparação com os limites globais.

Distorção Harmônica Total	Fase	Valor Medido	Limites Globais $69\text{ kV} \leq V_n < 230\text{ kV}$
$DTT_{95\%}$	A	1,89	5,0%
	B	1,78	
	C	2,18	
$DTT_{p95\%}$	A	0,44	1,0%
	B	0,42	
	C	0,37	

<i>DTT_i95%</i>	A	1,64	4,0%
	B	0,42	
	C	0,37	
<i>DTT₃95%</i>	A	0,59	3,0%
	B	0,42	
	C	0,37	

Fonte: ANEEL (2018).

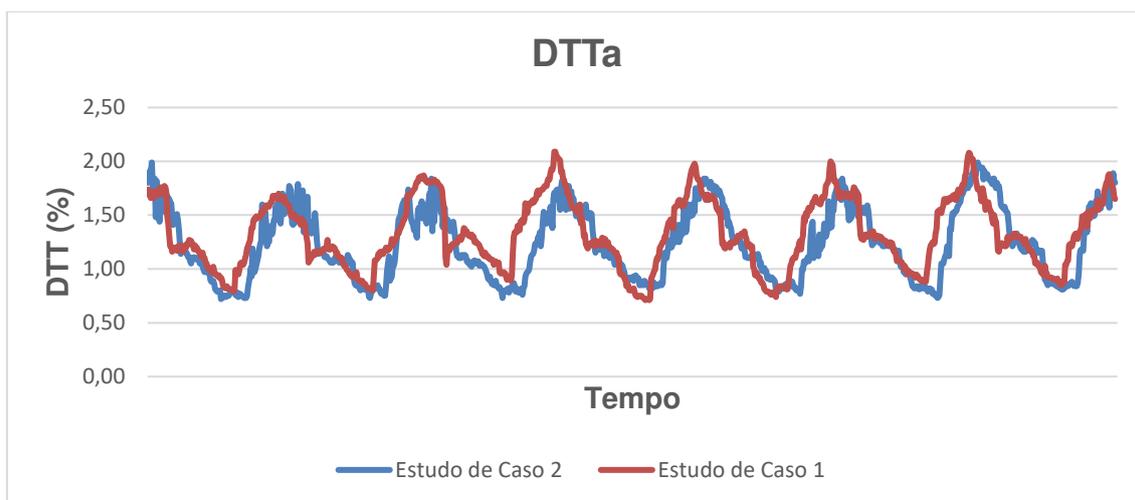
6.3 RESULTADOS

Observando individualmente os resultados do Estudo de Caso 1, pela conformidade dos parâmetros da qualidade da energia com os limites impostos pelos órgãos regulamentadores, pode ser dito que o sistema é capaz de receber a nova fonte de geração.

Do mesmo modo, observando individualmente os resultados do Estudo de Caso 2, pela conformidade dos parâmetros da qualidade da energia com os limites impostos pelos órgãos regulamentadores, pode ser dito que a fonte geradora não está inserindo distúrbios significativos na rede e que, por sua vez, a rede permanece saudável quanto a qualidade da energia.

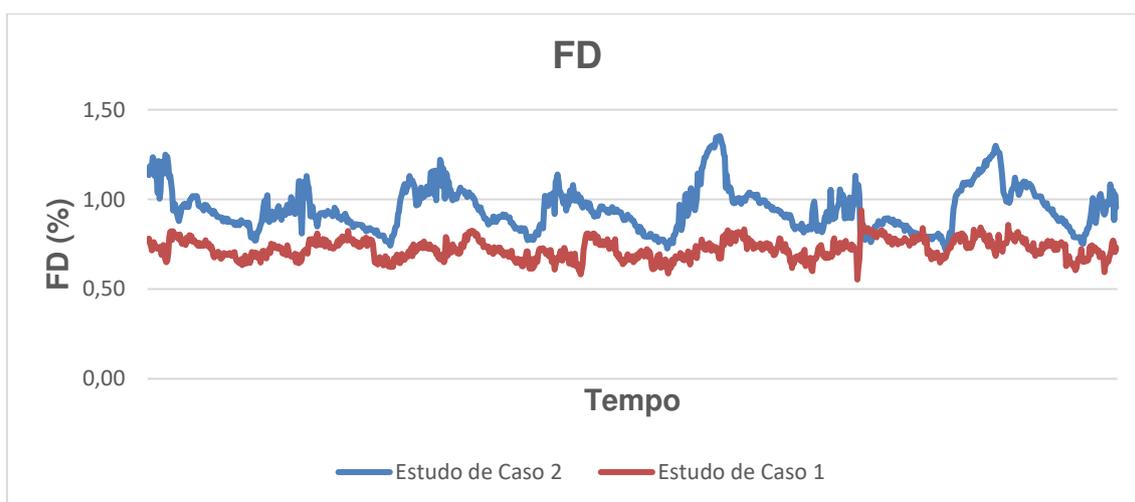
Comparando o resultado dos dois estudos de caso temos o mostrado nas Figuras 37, 38 e 39.

Embora as medições dos dois estudos de caso não sejam referentes a mesma UFV, estando em pontos distintos da rede elétrica e deste modo não podendo ser traçada uma relação direta entre os resultados, ainda é possível verificar que o comportamento geral das curvas dos indicadores estudados são similares para os sistemas sem e com central de geração fotovoltaica (Estudos de Caso 1 e 2 respectivamente), em especial para a distorção harmônica, Figura 37.

Figura 37 – Comparação da Distorção Harmônica Total da fase “A” para os 7 dias de medição.

Fonte: Próprio autor.

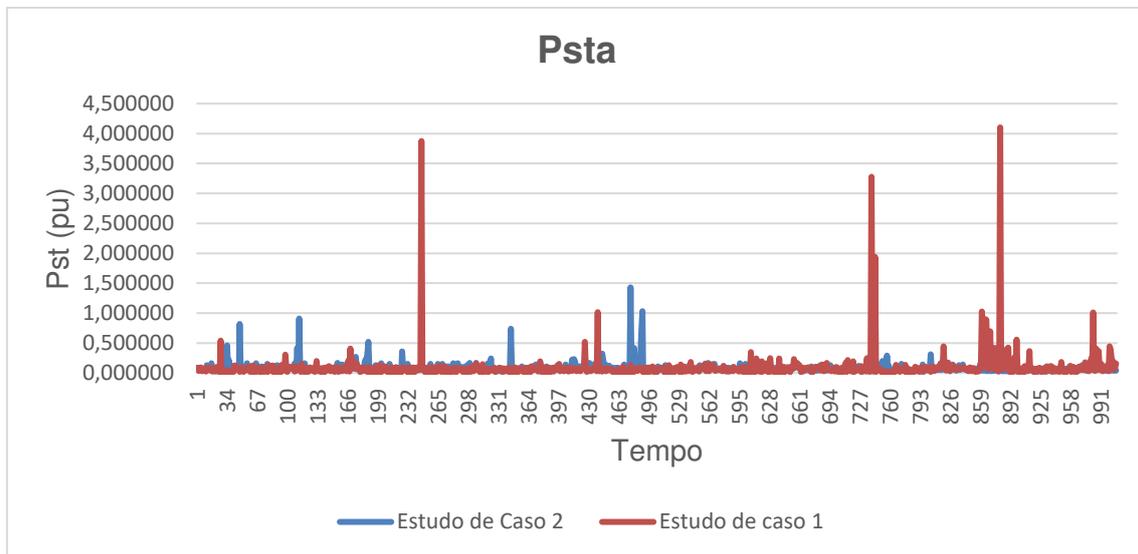
O único parâmetro do Estudo de Caso 2 que se manteve acima dos resultados do Estudo de Caso 1 foi o fator de desequilíbrio de tensão, apresentado na figura 38. Este dado pode ter relação com a inserção da fonte, porém não é possível afirmar com total certeza, já que as medições são de subestações diferentes e conseqüentemente apresentam cargas e disposição distintas. Mesmo assim, como já mostrado no tópico 5.3.4.1, o valor do desequilíbrio se manteve dentro dos valores recomendados, não sendo preocupação para a qualidade da energia.

Figura 38 – Comparação do Fator de Desequilíbrio de tensão para os 7 dias de medição.

Fonte: Próprio autor.

Em contrapartida a elevação percebida no desequilíbrio de tensão, os valores de severidade de flutuação de tensão no Estudo de Caso 2 se mantiveram bem abaixo se comparado com o Estudo de Caso 1, o que é mostrado na Figura 39.

Figura 39 – Comparação do índice Pst para a fase “A” durante os 7 dias.



Fonte: Próprio autor.

Deste modo, pode se dizer que, pelo comportamento dos indicadores, não sendo afetados de forma acentuada pela nova fonte inserida, o Estudo de Caso 2 obteve benefícios com a utilização da nova fonte. Foi aumentada a capacidade do sistema de suprir cargas sem serem afetados de forma severa por distúrbios da qualidade da energia.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho cumpre com sua proposta inicial, estudando as recomendações feitas pela ANEEL e ONS no que diz respeito a entrada de fontes de característica não linear, estudando duas campanhas de medição da QEE, verificando as condições de uma rede de distribuição que irá receber uma fonte geradora e de uma que já tem uma UFV em funcionamento.

Este trabalho contribui com a literatura mostrando a importância das campanhas de medição da qualidade da energia, descrevendo os procedimentos e resultados de uma campanha real.

Os dados medidos durante os 7 dias das campanhas de medição comprovaram a conformidade das redes quanto aos limites dos principais distúrbios da QEE. Os resultados analisados neste trabalho podem ser usados para a confecção de laudos técnicos que confirmem a não interferência da geração no sistema elétrico.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalho futuro é planejada a realização de uma campanha de medição pós-operatória para a central geradora do Estudo de Caso 1 que possa servir como contraponto a campanha de pré-operação já realizada, verificando as condições da rede elétrica após a entrada da nova fonte e o real impacto sofrido nos indicadores da QEE, de modo a identifica-los para a mesma configuração de sistema.

REFERÊNCIAS

ALVES, M. Rocha, LIRA, G. R. Soares de. **Análise do desempenho de sistema típico devido à inserção de geração eólica**. XV Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande. 2018.

ARRUDA, Elcio Franklin de. **Análise de distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica utilizando a transformada Wavelet**. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ANEEL, Módulo 3 (PRODIST). **Acesso ao Sistema de Distribuição-Rev. 7**, Brasil, 2017.

ANEEL, Módulo 8 (PRODIST). **Qualidade da Energia Elétrica-Rev. 7**, Brasil, 2018.

BRONZEADO, H. et al. **Uma Proposta de Nomenclatura Nacional de Termos e Definições Associados à Qualidade de Energia Elétrica**. In: Anais II SBQEE-Seminário Brasileiro da Qualidade da Energia Elétrica, Itajubá, Brasil, Nov. 1997.

BONELLI, Arthur Fernando et al. **Modelagem e simulação de unidade eólica para estudos de indicadores de qualidade da energia elétrica**. 2010.

CCEE, **Geração de energia eólica cresce 17,5 % em 2018**. Disponível em: https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/noticias-opiniao/noticias/noticiaeitura?contentid=CCEE_643765&_afzLoop=571612303036901&_adf.ctrl-state=bxok1pqp_2#!%40%40%3Fcontentid%3DCCEE_643765%26_afzLoop%3D571612303036901%26_adf.ctrl-state%3Dbxok1pqp_6, acessado em: 11/07/2019.

COSTA, Luciano. **Energia solar deve crescer 44 % no Brasil em 2019 com o impulso de geração distribuição**. Disponível em: <https://epocanegocios.globo.com/Economia/noticia/2019/01/epoca-negocios-energia-solar-deve-crescer-44-no-brasil-em-2019-com-impulso-de-geracao-distribuida.html>, acessado em: 11/07/2019.

CHAPMAN, David. **Guia de Aplicação de Qualidade de Energia**. Copper Development Association, 2002.

DUGAN, Roger C. et al. **Electrical power systems quality**. 1996.

DECKMANN, Sigmar Maureen; POMILIO, José Antenor. **Avaliação da qualidade da energia elétrica**. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/antenor/pdf/qualidade/b5.pdf>, 2017.

DIAS, Ramon Araújo; NEVES, Washington. **Estudo da curva p-v para aptidão do ponto de integração de parques eólicos ao sistema elétrico**. 2016.

ELECTRO INDUSTRIES/GAUGETECH. **Nexus 1500: Installation & Operation Manual**. Nova Iorque – EUA, 2014.

IEEE P 1159 WORKING GROUP et al. **Recommended practice for monitoring electric power quality**. Technical report, 2009.

IEC 61000-2-1, **Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 2: Environment – Section 1: Description of the Environment – Electromagnetic Environment for Low-Frequency Conducted Disturbances and Signalling in Public Power Supply Systems**. 1990.

IEC 61000-4-30, **Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods**. 2015.

IEC 61000-4-15, **Testing and Measurement Techniques - Flickermeter. Functional and Design Specifications. Basic EMC Publication**. 2010.

LACOMMARE, Kristina Hamachi; ETO, Joseph H. **Cost of power interruptions to electricity consumers in the United States (US)**. Energy, v. 31, n. 12, p. 1845-1855. 2006.

LOPEZ, Ricardo Aldabó. **Qualidade na energia elétrica**. Artliber, 2001.

LÖWENBERG, V. V. **Análise dos limites máximos de inserção de geração eólica em redes de distribuição conforme a variação de tensão de regime permanente**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, 2013.

Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, **Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede - Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes**. Revisão 2016.12, Dez, 2016a.

Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, **Submódulo 3.6 dos Procedimentos de Rede – Requisitos Técnicos Mínimos para a Conexão às Instalações de Transmissão**. Revisão 2016.12, Dez, 2016b.

Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), **Instruções para Realização de Estudos e Medições de QEE Relacionados aos Novos Acessos à Rede Básica para Parques Eólicos, Solares e Consumidores Livres, ONS NT 009/2016 – REV.02**, Mar, 2018.

Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), **Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos**. ONS NT 009/2016 – REV.1.1, Jun, 2010.

Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), **Definição das Metodologias e Procedimentos Necessários às Campanhas de Medição dos Indicadores de Desempenho**. Dez, 2007.

PAULILO, Gilson; TEIXEIRA, Mateus. **Qualidade de energia: Capítulo IV - Variações de tensão de longa duração**. O Setor Elétrico, Maio, 2013.

SILVA, Júlia Beust da. **Impacto da geração solar fotovoltaica conectada à rede de distribuição na qualidade de energia elétrica: estudo de caso**. 2015.

TEIXEIRA, Douglas Ângelo. **Análise das distorções harmônicas: Estudo de caso de um sistema industrial**. 2009.

TEIXEIRA, Wendell William. **Análise da qualidade de energia elétrica proveniente de uma planta solar fotovoltaica conectada à rede de distribuição de energia**. 2015.

ANEXO A – TESTE DE AMPLITUDE DE SINAL (PRÉ- OPERATÓRIA)

Data - Hora	Fase A	Fase B	Fase C
15/03/2019 11:07	39805,70	39807,27	39807,58
15/03/2019 11:08	39851,48	39853,14	39854,48
15/03/2019 11:09	39839,85	39841,90	39842,07
15/03/2019 11:10	39854,61	39857,24	39856,37
15/03/2019 11:11	39820,92	39822,95	39823,59
15/03/2019 11:12	39853,09	39855,16	39856,13
15/03/2019 11:13	39842,70	39841,91	39841,24
15/03/2019 11:14	39894,30	39894,88	39894,94
15/03/2019 11:15	39871,36	39873,03	39872,42
15/03/2019 11:16	39889,19	39890,40	39891,22
15/03/2019 11:17	39915,62	39916,22	39917,57
15/03/2019 11:18	39891,35	39894,17	39893,01
15/03/2019 11:19	39904,16	39906,91	39906,93
15/03/2019 11:20	39910,46	39912,82	39911,24
15/03/2019 11:21	39882,07	39884,74	39882,97
15/03/2019 11:22	39910,58	39912,65	39910,78
15/03/2019 11:23	39903,22	39906,53	39904,87
15/03/2019 11:24	39853,44	39856,25	39854,78
15/03/2019 11:25	39839,55	39842,31	39840,82
15/03/2019 11:26	39869,22	39871,86	39871,50
15/03/2019 11:27	39936,45	39939,70	39938,75
15/03/2019 11:28	39918,56	39921,54	39920,24
15/03/2019 11:29	39917,94	39921,32	39920,80
15/03/2019 11:30	39965,17	39966,79	39966,43
15/03/2019 11:31	39952,70	39953,44	39953,72
15/03/2019 11:32	39946,99	39948,98	39947,81
15/03/2019 11:33	39962,59	39963,33	39963,69

15/03/2019 11:34	39959,50	39959,42	39959,14
15/03/2019 11:35	40051,97	40053,22	40052,26
15/03/2019 11:36	40047,43	40048,49	40047,93

Fonte: Próprio autor.

ANEXO B – TESTE DE SEQUÊNCIA DE FASE (PRÉ-OPERATÓRIA)

Data - Hora	FD (%)
15/03/2019 12:00	0,65
15/03/2019 12:01	0,63
15/03/2019 12:02	0,65
15/03/2019 12:03	0,64
15/03/2019 12:04	0,65
15/03/2019 12:05	0,65
15/03/2019 12:06	0,63
15/03/2019 12:07	0,64
15/03/2019 12:08	0,62
15/03/2019 12:09	0,65
15/03/2019 12:10	0,64
15/03/2019 12:11	0,65
15/03/2019 12:12	0,67
15/03/2019 12:13	0,64
15/03/2019 12:14	0,66
15/03/2019 12:15	0,63
15/03/2019 12:16	0,67
15/03/2019 12:17	0,67
15/03/2019 12:18	0,66
15/03/2019 12:19	0,67
15/03/2019 12:20	0,65
15/03/2019 12:21	0,67
15/03/2019 12:22	0,68
15/03/2019 12:23	0,66
15/03/2019 12:24	0,65
15/03/2019 12:25	0,65
15/03/2019 12:26	0,64

15/03/2019 12:27	0,64
15/03/2019 12:28	0,65
15/03/2019 12:29	0,64

Fonte: Próprio autor.

ANEXO C – TESTE DE AMPLITUDE DE SINAL (PÓS- OPERATÓRIA)

Data - Hora	Fase A	Fase B	Fase C
26/06/2019 10:22	70408,09	69200,38	69610,37
26/06/2019 10:23	70252,12	69044,57	69442,38
26/06/2019 10:24	69998,35	68789,02	69182,57
26/06/2019 10:25	70336,82	69127,78	69522,94
26/06/2019 10:26	70216,57	68994,51	69388,48
26/06/2019 10:27	70368,39	69145,70	69549,71
26/06/2019 10:28	70427,26	69201,14	69593,72
26/06/2019 10:29	70077,94	68859,69	69254,53
26/06/2019 10:30	70140,59	68913,39	69319,52
26/06/2019 10:31	70447,17	69218,36	69637,82
26/06/2019 10:32	70373,98	69138,23	69544,96
26/06/2019 10:33	70096,26	68880,54	69275,03
26/06/2019 10:34	69969,41	68760,98	69154,41
26/06/2019 10:35	70157,20	68954,08	69359,21
26/06/2019 10:36	70087,55	68885,79	69286,23
26/06/2019 10:37	70079,11	68871,88	69284,29
26/06/2019 10:38	70321,90	69096,09	69513,04
26/06/2019 10:39	70213,20	68995,51	69404,34
26/06/2019 10:40	70159,63	68928,19	69343,05
26/06/2019 10:41	70076,55	68843,13	69242,08
26/06/2019 10:42	70371,99	69119,30	69512,71
26/06/2019 10:43	70505,90	69259,20	69652,64
26/06/2019 10:44	70669,48	69410,82	69830,50
26/06/2019 10:45	70788,92	69542,33	69960,76
26/06/2019 10:46	70549,41	69313,45	69723,94
26/06/2019 10:47	70634,56	69372,70	69800,69
26/06/2019 10:48	70642,60	69409,40	69824,21

26/06/2019 10:49	70676,57	69457,55	69865,18
26/06/2019 10:50	70865,46	69644,94	70060,89
26/06/2019 10:51	70868,19	69644,09	70062,80
26/06/2019 10:52	70879,26	69646,65	70080,85

Fonte: Próprio autor.

ANEXO D – TESTE DE SEQUÊNCIA DE FASE (PÓS-OPERATÓRIA)

Data - Hora	FD (%)
26/06/2019 12:10	1,144641
26/06/2019 12:20	1,135345
26/06/2019 12:30	1,185119
26/06/2019 12:40	1,169415
26/06/2019 12:50	1,191015
26/06/2019 13:00	1,23494
26/06/2019 13:10	1,221167
26/06/2019 13:20	1,129518
26/06/2019 13:30	1,192993
26/06/2019 13:40	1,128838
26/06/2019 13:50	1,035725
26/06/2019 14:00	1,214635
26/06/2019 14:10	1,003745
26/06/2019 14:20	1,045713
26/06/2019 14:30	1,195457
26/06/2019 14:40	1,210039
26/06/2019 14:50	1,189945
26/06/2019 15:00	1,143791
26/06/2019 15:10	1,25
26/06/2019 15:20	1,238621
26/06/2019 15:30	1,237144
26/06/2019 15:40	1,19403
26/06/2019 15:50	1,121915
26/06/2019 16:00	1,133313
26/06/2019 16:10	1,08939
26/06/2019 16:20	1,044153

26/06/2019 16:30	0,937221
26/06/2019 16:40	0,971454
26/06/2019 16:50	0,974075
26/06/2019 17:00	0,949653

Fonte: Próprio autor.