

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

MARIANA COSTA FALCÃO

ANÁLISE DO IMPACTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE  
DE DISTRIBUIÇÃO NA QUALIDADE DA ENERGIA DE UMA *SMART CITY*

Ilha Solteira

2015

MARIANA COSTA FALCÃO

ANÁLISE DO IMPACTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE  
DE DISTRIBUIÇÃO NA QUALIDADE DA ENERGIA DE UMA *SMART CITY*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista – UNESP – Campus de Ilha Solteira, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.  
Área de Conhecimento: Automação.

**Prof. Dr. FALCONDES JOSÉ MENDES DE SEIXAS**  
Orientador

**Prof. Dr. DIONÍZIO PASCHOARELI JÚNIOR**  
Coorientador

Ilha Solteira

2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

F181a Falcão, Mariana Costa.  
Análise do impacto de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição na qualidade da energia de uma smart city: análise do impacto de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição na qualidade da energia de uma smart city / Mariana Costa Falcão. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2015 95 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2015

Orientador: Falcondes José Mendes de Seixas  
Co-orientador: Dionízio Paschoareli Júnior  
Inclui bibliografia

1. Qualidade de energia. 2. Geração distribuída de energia. 3. Smart city. 4. Smart grid. 5. Medidores inteligentes. 6. Sistemas fotovoltaicos.



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

### CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO:** ANÁLISE DO IMPACTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADO À REDE DE DISTRIBUIÇÃO NA QUALIDADE DA ENERGIA DE UMA SMART CITY


**AUTORA:** MARIANA COSTA FALCÃO

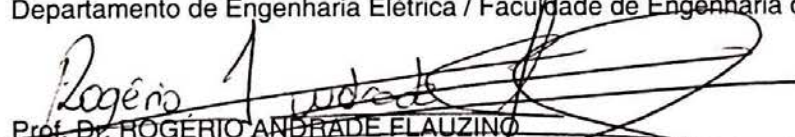
**ORIENTADOR:** Prof. Dr. FALCONDES JOSE MENDES DE SEIXAS

**CO-ORIENTADOR:** Prof. Dr. DIONIZIO PASCHOARELI JUNIOR

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica ,  
Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. FALCONDES JOSE MENDES DE SEIXAS  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. FÁBIO BERTEQUINI LEÃO  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. ROGÉRIO ANBRÁDE FLAUZINO  
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação / Universidade de São Paulo

Data da realização: 28 de maio de 2015.

À minha querida voinha Non. Saudades ontem,  
hoje, amanhã e sempre!

## AGRADECIMENTOS

A **Deus**,

Por sempre me confortar nas dificuldades e por iluminar cada passo que dou, pois sei que foram todos planejados por Ele.

Aos meus pais **Erivan Gonçalves da Costa** e **Antonio Eduardo Campos Falcão**,

Pela força e incentivo que me ofereceram nessa jornada e por acreditarem em mim mesmo nos momentos em que eu deixava de acreditar.

Ao meu amor **Lucas Rangel de Oliveira**,

Pelo seu carinho, pelo seu companheirismo e por estar ao meu lado em todos os momentos dessa jornada.

Aos meus irmãos **Marcela Costa** e **Bruno da Costa Pacífico**,

Pelo carinho, cuidado e por estarem sempre presentes, mesmo com a grande distância que nos separa.

Aos meus sobrinhos **Daniel**, **Belinha**, **Pernambuco** e **Joaquim**,

Por me ensinarem todos os dias que o amor não vê distâncias.

Ao meus orientadores **Falcondes José Mendes de Seixas** e **Dionízio Paschoareli Júnior**,

Por acreditarem no meu trabalho e pelo auxílio constante. Sem vocês esse trabalho não teria sido possível.

Às minhas queridas amigas **Carol**, **Loanda** e **Gisele**,

Pelas risadas, pelas broncas, pelas loucuras e por todos os momentos que compartilhamos.

À **Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira**,

Por oferecer um curso de qualidade com professores e funcionários maravilhosos. O suporte e a amizade foram essenciais para a minha vida acadêmica.

À **ELEKTRO**,

Por fornecer informações sobre a rede estudada neste trabalho e pela disposição de seus funcionários que sempre estão prontos para ajudar.

Ao **CNPq**,

Pelo auxílio financeiro fornecido para a realização deste trabalho.

“A alegria não chega apenas no encontro do achado mas faz parte do processo da busca. E ensinar e aprender não podem dar-se fora da procura, fora da boniteza e da alegria.”

**Paulo Freire**

## RESUMO

Este trabalho apresenta análises do impacto da conexão de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição na qualidade de energia elétrica em três consumidores de uma cidade aonde está se iniciando um projeto de *Smart City*. É utilizado como referência para as análises o módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST). As análises realizadas são de grande importância para se ter uma avaliação de como a qualidade da energia elétrica dos consumidores será afetada quando os sistemas fotovoltaicos forem conectados às suas residências, aos seus estabelecimentos ou até às suas indústrias. Os conceitos apresentados no levantamento bibliográfico foram utilizados para a compreensão tanto da temática de *Smart Cities* e *Smart Grid*, como dos problemas de qualidade de energia elétrica que foram analisados. Os resultados das medições de qualidade de energia são analisados a partir de uma comparação dos parâmetros encontrados antes e após a instalação dos sistemas fotovoltaicos nos consumidores. Ao se observar as diferenças entre os resultados foi possível concluir quais foram os impactos causados pela presença da fonte de geração distribuída em questão.

**Palavras chave** – Qualidade de energia. Geração distribuída de energia. Smart City. Smart Grid. Medidores inteligentes. Sistemas fotovoltaicos.



## ABSTRACT

This paper presents analysis of the impact of PV systems connected to the distribution network in the electric power quality in three consumers in a city where is launching a Smart City project. It is used as a reference for the analysis the module 8 of Distribution Procedures (PRODIST). The analyzes are of great importance to have an evaluation of how the consumers power quality will be affected when PV systems are connected to their homes, their businesses or even to their industries. The concepts presented in the literature were used for the understanding subjects such as Smart Cities, Smart Grid and power quality problems. The results of power quality measurements are analyzed from a comparison of estimated coefficients before and after the installation of photovoltaic systems on consumers. By observing the differences between the results it was possible to conclude which the impacts were caused by the presence of the source of distributed generation in question.

**Keywords** - Power quality. Distributed power generation. Smart city. Smart grid. Smart meters. PV systems.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1-</b> Áreas de aplicação dos conceitos de Smart City. ....	19
<b>Figura 2-</b> Esquemático da estrutura de uma <i>Smart Grid</i> . ....	20
<b>Figura 3-</b> Esquemático da estrutura da rede elétrica convencional. ....	20
<b>Figura 4-</b> Áreas para aplicação de <i>Smart Grid</i> . ....	21
<b>Figura 5-</b> Motivadores para implantação de Smart Grids. ....	23
<b>Figura 6-</b> Valores anuais do DEC brasileiro. ....	24
<b>Figura 7 -</b> Diagrama em blocos genérico de um medidor eletrônico de energia elétrica. ....	31
<b>Figura 8-</b> Diagrama em blocos de um medidor inteligente. ....	33
<b>Figura 9-</b> Medidor NANSEN Spectrum K ART. ....	35
<b>Figura 10 -</b> Medidores ECIL MD2400 (a) e MD3400(b). ....	36
<b>Figura 11-</b> Medidores ITRON Aurum (a) e Centron (b). ....	36
<b>Figura 12 -</b> Distúrbios de qualidade de energia e suas características. ....	38
<b>Figura 13-</b> Forma de onda distorcida e sua representação em série de Fourier. ....	39
<b>Figura 14-</b> Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração. ....	44
<b>Figura 16-</b> Esquema da conexão do FLUKE 1760 na rede de distribuição. ....	46
<b>Figura 17-</b> Tensão RMS média do Fórum antes da instalação do SFCR. ....	48
<b>Figura 18-</b> Tensão RMS média do Fórum após a instalação do SFCR. ....	48
<b>Figura 19-</b> Tensão RMS máximo do Fórum antes da instalação do SFCR. ....	49
<b>Figura 20-</b> Tensão RMS máximo do Fórum após a instalação do SFCR. ....	50
<b>Figura 21-</b> Tensão RMS mínimo do Fórum antes da instalação do SFCR. ....	50
<b>Figura 22-</b> Tensão RMS mínimo do Fórum após a instalação do SFCR. ....	51
<b>Figura 23-</b> Fator de Potência do Fórum antes da instalação do SFCR. ....	51
<b>Figura 24-</b> Fator de Potência do Fórum após a instalação do SFCR. ....	52
<b>Figura 25-</b> Desequilíbrio de Tensão do Fórum antes da instalação do SFCR. ....	52
<b>Figura 26-</b> Desequilíbrio de Tensão do Fórum após a instalação do SFCR. ....	53
<b>Figura 27-</b> DHT da Tensão do Fórum antes da instalação do SFCR. ....	53
<b>Figura 28-</b> DHT da Tensão do Fórum após a instalação do SFCR. ....	54
<b>Figura 29-</b> Espectro Harmônico da Tensão do Fórum antes da instalação do SFCR. ....	54
<b>Figura 30-</b> Espectro Harmônico da Tensão do Fórum após a instalação do SFCR. ....	55
<b>Figura 31-</b> Pst do Fórum antes da instalação do SFCR. ....	55
<b>Figura 32-</b> Pst do Fórum após a instalação do SFCR. ....	56
<b>Figura 33-</b> Plt do Fórum antes da instalação do SFCR. ....	56

<b>Figura 34-</b> Plt do Fórum após a instalação do SFCR. ....	57
<b>Figura 35-</b> Tensão RMS média da Escola antes da instalação do SFCR. ....	59
<b>Figura 36-</b> Tensão RMS média da Escola após a instalação do SFCR. ....	60
<b>Figura 37-</b> Tensão RMS máximo da Escola antes da instalação do SFCR. ....	60
<b>Figura 38-</b> Tensão RMS máximo da Escola após a instalação do SFCR. ....	61
<b>Figura 39-</b> Tensão RMS mínimo da Escola antes da instalação do SFCR. ....	61
<b>Figura 40-</b> Tensão RMS mínimo da Escola após a instalação do SFCR. ....	62
<b>Figura 41-</b> Fator de Potência da Escola antes da instalação do SFCR. ....	63
<b>Figura 42-</b> Fator de Potência da Escola após a instalação do SFCR. ....	63
<b>Figura 43-</b> Desequilíbrio de Tensão da Escola antes da instalação do SFCR. ....	64
<b>Figura 44-</b> Desequilíbrio de Tensão da Escola após a instalação do SFCR. ....	64
<b>Figura 45-</b> DHT da Tensão da Escola antes da instalação do SFCR. ....	65
<b>Figura 46-</b> DHT da Tensão da Escola após a instalação do SFCR. ....	66
<b>Figura 47-</b> Espectro Harmônico da Tensão da Escola antes da instalação do SFCR. ....	66
<b>Figura 48-</b> Espectro Harmônico da Tensão da Escola após a instalação do SFCR. ....	67
<b>Figura 49-</b> Pst da Escola antes da instalação do SFCR. ....	67
<b>Figura 50-</b> Pst da Escola após a instalação do SFCR. ....	68
<b>Figura 51-</b> Plt da Escola antes da instalação do SFCR. ....	68
<b>Figura 52-</b> Plt da Escola após a instalação do SFCR. ....	69
<b>Figura 53-</b> Tensão RMS média da Residência antes da instalação do SFCR. ....	71
<b>Figura 54-</b> Tensão RMS média da Residência após a instalação do SFCR. ....	72
<b>Figura 55-</b> Tensão RMS máximo da Residência antes da instalação do SFCR. ....	72
<b>Figura 56-</b> Tensão RMS máximo da Residência após a instalação do SFCR. ....	73
<b>Figura 57-</b> Tensão RMS mínimo da Residência antes da instalação do SFCR. ....	73
<b>Figura 58-</b> Tensão RMS mínimo da Residência após a instalação do SFCR. ....	74
<b>Figura 59-</b> Fator de Potência da Residência antes da instalação do SFCR. ....	75
<b>Figura 60-</b> Fator de Potência da Residência após a instalação do SFCR. ....	75
<b>Figura 61-</b> DHT da Tensão da Residência antes da instalação do SFCR. ....	76
<b>Figura 62-</b> DHT da Tensão da Residência após a instalação do SFCR. ....	76
<b>Figura 63-</b> Espectro Harmônico da Tensão da Residência antes da instalação do SFCR. ....	77
<b>Figura 64-</b> Espectro Harmônico da Tensão da Residência após a instalação do SFCR. ....	77
<b>Figura 65-</b> DHT da Corrente do Fórum antes da instalação do SFCR. ....	79
<b>Figura 66-</b> DHT da Corrente do Fórum após a instalação do SFCR. ....	80
<b>Figura 67-</b> Espectro Harmônico da Corrente do Fórum antes da instalação do SFCR. ....	80

<b>Figura 68-</b> Espectro Harmônico da Corrente do Fórum após a instalação do SFCR. ....	81
<b>Figura 69-</b> DHT da Corrente da Escola antes da instalação do SFCR. ....	81
<b>Figura 70-</b> DHT da Corrente da Escola após a instalação do SFCR. ....	82
<b>Figura 71-</b> Espectro Harmônico da Corrente da Escola antes da instalação do SFCR. ....	82
<b>Figura 72-</b> Espectro Harmônico da Corrente da Escola após a instalação do SFCR. ....	83
<b>Figura 73-</b> Potência Ativa do Fórum antes da instalação do SFCR. ....	83
<b>Figura 74-</b> Potência Ativa do Fórum após a instalação do SFCR. ....	84
<b>Figura 75-</b> Potência Ativa da Escola antes da instalação do SFCR. ....	85
<b>Figura 76-</b> Potência Ativa da Escola após a instalação do SFCR. ....	85
<b>Figura 77-</b> Potência Ativa da Residência antes da instalação do SFCR. ....	86
<b>Figura 78-</b> Potência Ativa da Residência após a instalação do SFCR. ....	86
<b>Figura 79-</b> Curvas de Potência ativa características de consumidores e do SFCR. ....	87
<b>Figura 80-</b> Curvas de Potência ativa características de consumidores considerando o efeito do SFCR. ....	88

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1-</b> Faixas aplicadas às tensões nominais inferiores a 1kV.....	43
<b>Tabela 2-</b> Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental).....	43

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DIT <sub>h</sub>	Distorção Harmônica Individual de Tensão de Ordem h
DHT	Distorção Harmônica Total da Corrente.
DTT	Distorção Harmônica Total de Tensão
FD	Fator de Desequilíbrio
FP	Fator de Potência
IBM	International Business Machines
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
Plt	Severidade de Flutuação de Longa Duração
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
Pst	Severidade de Flutuação de Curta Duração
PV	Photovoltaic
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RMS	Root Mean Square
RTM	Regulamento Técnico
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	MOTIVAÇÃO	15
1.2	OBJETIVO	16
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
1.4	PUBLICAÇÕES	17
<b>2</b>	<b>SMART CITY E SMART GRID</b>	<b>18</b>
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	18
2.2	MOTIVADORES, BENEFÍCIOS E DESAFIOS DE UMA <i>SMART GRID</i>	22
<b>2.2.1</b>	<b>Exemplos de aplicações internacionais de <i>Smart Grids</i></b>	26
2.3	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA	26
<b>2.3.1</b>	<b>Benefícios e desafios da geração distribuída</b>	27
<b>2.3.2</b>	<b>SFCR e seus impactos na qualidade da energia</b>	28
<b>2.3.3</b>	<b>Normas e regulamentações</b>	29
2.4	SISTEMAS DE MEDIÇÃO INTELIGENTES	30
<b>2.4.1</b>	<b>Diferenças entre medidores eletrônicos convencionais e inteligentes</b>	31
<b>2.4.2</b>	<b>Normas e regulamentações</b>	34
<b>2.4.3</b>	<b>Medidores utilizados no projeto</b>	35
2.5	CONCLUSÕES	36
<b>3</b>	<b>QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA</b>	<b>37</b>
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	37
3.2	PROBLEMAS DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	39
3.3	NORMAS E REGULAMENTAÇÕES	41
<b>3.3.1</b>	<b>PRODIST módulo 8</b>	42
3.4	CONCLUSÕES	44
<b>4</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES</b>	<b>46</b>
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	46
4.2	RESULTADOS DAS MEDIÇÕES NO FÓRUM	47
<b>4.2.1</b>	<b>Variação da tensão</b>	47
<b>4.2.2</b>	<b>Fator de potência</b>	51
<b>4.2.3</b>	<b>Desequilíbrio de tensão</b>	52
<b>4.2.4</b>	<b>Harmônicos de tensão</b>	53
<b>4.2.5</b>	<b>Flutuação de tensão</b>	55
<b>4.2.6</b>	<b>Análise dos resultados</b>	57
4.3	RESULTADOS DAS MEDIÇÕES NA ESCOLA MUNICIPAL	58

<b>4.3.1</b>	<b>Variação da tensão</b>	<b>59</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Fator de potência</b>	<b>62</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Desequilíbrio de tensão</b>	<b>64</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Harmônicos de tensão</b>	<b>65</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Flutuação de tensão</b>	<b>67</b>
<b>4.3.6</b>	<b>Análise dos resultados</b>	<b>69</b>
<b>4.4</b>	<b>RESULTADOS DAS MEDIÇÕES NA RESIDÊNCIA</b>	<b>70</b>
<b>4.4.1</b>	<b>Variação da tensão</b>	<b>71</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Fator de potência</b>	<b>74</b>
<b>4.4.3</b>	<b>Harmônicos de tensão</b>	<b>75</b>
<b>4.4.4</b>	<b>Análise dos resultados</b>	<b>78</b>
<b>4.5</b>	<b>OUTROS RESULTADOS</b>	<b>78</b>
<b>4.5.1</b>	<b>Harmônicos de corrente</b>	<b>79</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Potência ativa</b>	<b>83</b>
<b>4.5.3</b>	<b>Análise dos resultados</b>	<b>87</b>
<b>4.6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>88</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>89</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>91</b>



## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 MOTIVAÇÃO

Com o passar dos anos, a demanda por energia elétrica tem crescido cada vez mais. Isso acontece por diversos motivos: mais pessoas têm acesso à energia, aqueles que possuíam acesso adquirem novas cargas, aumento da produção industrial, entre outros. Ao mesmo tempo, tem-se a necessidade de diminuir a utilização de fontes de energia elétrica que utilizam combustíveis fósseis. Para solucionar esses e outros problemas, tem-se a busca por novas fontes de energia que causem menos impactos ambientais.

Dentre as fontes alternativas de energia tem-se a fotovoltaica e a eólica. As duas fontes são renováveis e possuem grande potencial de geração na maioria dos territórios. Entretanto, para conectar essas fontes na rede de distribuição já existente, observa-se uma problemática. Como os consumidores já possuem uma conexão com a rede de distribuição principal, tem-se um fluxo de energia elétrica já especificado. Com a conexão de, por exemplo, sistemas fotovoltaicos diretamente nesses consumidores, quando o sistema estiver gerando mais do que o consumidor necessita, esse excesso será observado como um fluxo de energia do consumidor para a rede de distribuição, sendo assim, contrário ao fluxo utilizado pela rede.

Outro problema observado é a forma como esse consumo e produção de energia é contabilizado pela concessionária. Tem-se que os medidores de faturamento utilizados nas redes de distribuição não são capazes de realizar leituras corretas quando o fluxo de energia é bidirecional. Desta forma, tem-se a necessidade de utilizar novos medidores, os eletrônicos, que conseguem, além de outras funcionalidade, realizar o faturamento de um consumidor que também gera energia elétrica.

Para que essas e outras tecnologias fossem incorporadas tem-se a necessidade de aplicar um novo conceito de rede de energia elétrica. Uma rede que seja capaz de utilizar as novas tecnologias e utilizar a energia elétrica de uma forma eficiente. Esta nova rede foi chamada de *Smart Grid*.

Atualmente, um dos assuntos mais estudados no que se trata de redes de energia elétrica são as *Smart Grids*. A aplicação dessas novas tecnologias apresentam novas soluções, mas também criam novas problemáticas para o sistema. Em geral, tem-se geração distribuída com fontes renováveis de energia em uma *Smart Grid*. Para inserir fontes como, por exemplo, painéis fotovoltaicos são necessários inversores para converter a energia de contínua para alternada. Apesar de ser uma fonte de recursos inesgotáveis, a aplicação desses inversores pode

causar alguns problemas que prejudicam a qualidade da energia. Desta forma, para se ter uma rede que observe os padrões de qualidade de energia elétrica, é necessário fazer uma avaliação do comportamento da rede antes da instalação das tecnologias necessárias para torná-la uma *Smart Grid* e, também, é necessário comparar esses resultados com os que forem encontrados após a instalação dos novos componentes da rede.

*Smart grid* é uma das vertentes necessárias para a aplicação das *Smart Cities*, ou cidades inteligentes. Ao contrário do que alguns pensam, *smart grid* não é sinônimo de *smart city*, mas sim uma de suas aplicações. Para se obter uma cidade inteligente é necessária uma rede de energia elétrica inteligente, entretanto outras áreas como, por exemplo, educação, saúde e transporte, também precisam apresentar soluções inteligentes para que a cidade possa ser considerada uma *smart city*.

## 1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem como foco a análise da qualidade da energia elétrica em três consumidores de uma rede de distribuição que está em processo de transição para *Smart Grid*. Esses consumidores em especial receberam a instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) para que, além de utilizar a energia fornecida pelos painéis, fosse possível enviar o excedente dessa energia elétrica produzida para a rede de distribuição. Assim, comparando-se as medições antes e depois da instalação do SFCR nos consumidores, tem-se a análise do impacto que esses sistemas causam na qualidade da energia elétrica.

A fornecimento de uma energia com qualidade e dentro dos padrões estabelecidos por norma é uma das obrigações das concessionárias. Desta forma, tem-se que a avaliação dos parâmetros de qualidade é de grande importância tanto para as concessionárias que recebem o faturamento em relação à energia que é consumida, como para os consumidores que buscam receber uma energia elétrica de qualidade e que não prejudique as cargas que ele possui.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O Capítulo 1 apresenta a motivação e o objetivo do trabalho, assim como uma breve introdução relacionada com o conteúdo desenvolvido no texto.

No Capítulo 2 tem-se a apresentação dos conceitos de *Smart City* e *Smart Grid* e quais as diferenças entre os dois. Também aborda sobre geração distribuída, desde os seus conceitos

até os seus benefícios e desafios. Outra vertente estudada é a dos medidores inteligentes, que são a peça chave para utilização de *smart grids*.

Já no Capítulo 3 são apresentados conceitos de qualidade de energia elétrica e os padrões utilizados no Brasil. A norma apresentada nesse capítulo é utilizada como referência para as análises deste trabalho.

O Capítulo 4 apresenta os resultados das medições realizadas e a análise desses resultados. Também são apresentados outros resultados interessantes para análise que não estão descritos na norma utilizada.

Por fim, no Capítulo 5, tem-se as conclusões e também possibilidades para trabalhos futuros.

#### 1.4 PUBLICAÇÕES

No decorrer da elaboração desta pesquisa, os seguintes trabalhos foram apresentados em eventos científicos.

- FALCÃO, M. C. et al “Impacto da Geração Fotovoltaica Distribuída em Parâmetros da Qualidade da Energia Elétrica”. In: XI CBQEE, 2015, Campina Grande/PB.
- FALCÃO, M. C. et al “Impacto dos Conversores Estáticos na Qualidade da Energia e no Sistema de Medição de uma *Smart City*”. In: XI INDUSCON – 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, 2014, Juiz de Fora/MG.

## 2 SMART CITY E SMART GRID

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o passar dos anos novas tecnologias são exploradas e aplicadas por todo o mundo. As revoluções vão desde a telefonia até os eletrodomésticos. As inovações tornam-se mais complexas e com a capacidade de se conectar à outras tecnologias. A busca pela conectividade deu princípio à ideia da *International Business Machines* (IBM) em novembro de 2008 quando elaborou o conceito de *Smart Earth* (Terra Inteligente). A ideia principal da *Smart Earth* é proporcionar um ambiente que possua sensores desde túneis até equipamentos médicos. Assim, utilizando tecnologias de comunicação com e sem fio seria possível obter uma real conexão entre objetos e pessoas. Com essa conexão, problemas como trânsito seriam solucionados automaticamente pois todo o fluxo de carros seria monitorado e controlado remotamente (SHI LU, 2011). O início da *Smart Earth* vem com a *Smart City* (Cidade Inteligente).

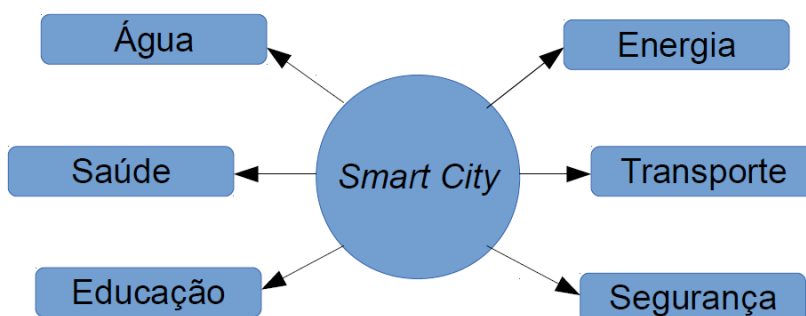
Segundo Lazaroiu (2012), o conceito de *Smart City* pode ser alcançado utilizando diversas tecnologias de informação e comunicação que podem se conectar com outras soluções como: água, eletricidade, consumo de gás, sistemas de aquecimento, segurança pública, mobilidade e gestão de resíduos. Em seu trabalho, é utilizada uma metodologia para avaliar o quanto a cidade é inteligente. Para quantificar esse valor de “inteligência” os seguintes setores são analisadas: Governo, Qualidade de Vida, Pessoas, Meio ambiente, Mobilidade e Economia.

Já a definição de *Smart City* proposta por Liyanage (2013) leva em consideração o desenvolvimento das qualidades morais da sociedade e se necessidades básicas de qualidade são fornecidas, entre elas, alimentação, água, educação, entre outros. Neste trabalho afirma-se que para inserir sistemas com tecnologias complexas, é necessário se certificar que as pessoas da cidade estão recebendo um nível mínimo de serviços. Afirma-se que, para se conseguir uma *Smart City*, deve ter uma população inteligente, com um estilo de vida inteligente, trabalhando para alcançar os objetivos físicos de forma pacífica e calma, sendo gentil com todos os seres vivos.

Assim, uma cidade pode ser considerada mais inteligente se possuir um sistema de transportes ou um sistema de reciclagem e reaproveitamento de recursos mais eficientes. De fato a cidade torna-se inteligente nesses setores, entretanto, para este trabalho, a *Smart City* será definida como uma cidade que possui uma conexão entre a população e a cidade, ou seja, a população pode interagir com as informações que a cidade fornece e também pode alterar parâmetros dependendo da sua necessidade.

Na figura 1 é possível observar algumas vertentes da *Smart City*.

**Figura 1-** Áreas de aplicação dos conceitos de *Smart City*.



Fonte: Elaboração da própria autora.

As áreas apresentadas na figura 1 tornariam a cidade mais inteligente e algumas das soluções possíveis seriam as seguintes:

- **Água:** Com maior controle e monitoramento, o fornecimento de água e saneamento seria mais eficiente. Além de proporcionar maior qualidade da água fornecida e consumo mais consciente do consumidor;
- **Energia:** Através de uma rede inteligente de energia elétrica é possível um melhor controle do fluxo de energia, assim como a redução de perdas do sistema;
- **Saúde:** Utilizando sistemas automatizados para realização de cirurgias, seria possível médicos realizarem diversas operações remotamente;
- **Transporte:** Com um controle do fluxo dos meios de transporte, assim como informações sobre a quantidade de passageiros e seus destinos, seria possível organizar e tornar o sistema mais eficiente;
- **Educação:** Acesso fácil à informação, cursos a distância melhor aplicados, maior conectividade do aluno, seriam algumas das melhorias dessa área;
- **Segurança:** Com sistemas inteligentes de monitoramento e câmeras conectadas à um centro de operações, ocorrências seriam atendidas e evitadas com mais agilidade e eficiência.

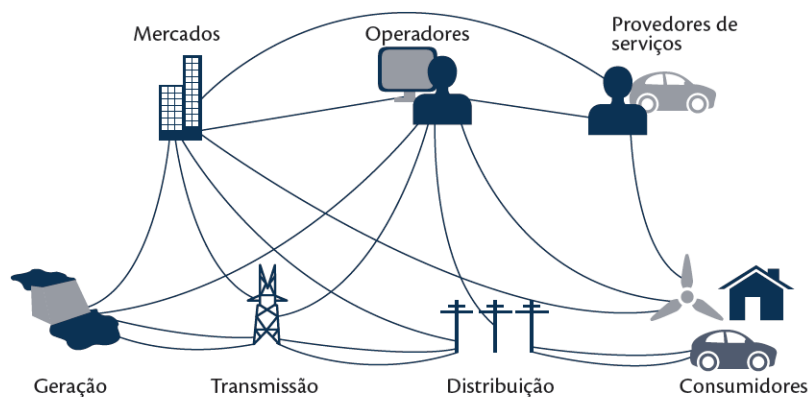
Nota-se um ponto em comum nessas áreas: eficiência. Ou seja, para a cidade tornar-se mais inteligente deve-se sempre buscar a melhor forma de utilizar os recursos, diminuindo os erros e eventuais perdas. Portanto, a *Smart City* busca sempre o sistema sustentável.

Dentre as áreas citadas, o assunto explorado nesse trabalho é a utilização inteligente da energia elétrica. Quando uma rede de energia elétrica é considerada inteligente, denomina-se *Smart Grid*. Apesar de ser uma das vertentes da *Smart City*, muitos nomeiam aplicações de

*Smart Grids* como *Smart City*. Para melhor compreensão do assunto, propõe-se uma conceituação de *Smart Grid*.

A definição proposta por Gellings é que “a *Smart Grid* é a utilização de sensores, comunicações, capacidade computacional e controle para aumentar as funcionalidades do sistema de fornecimento de energia” (GELLINGS, 2009). A partir dessa definição, tem-se que *Smart Grid* é a utilização de tecnologias avançadas para controlar e gerenciar tanto o fluxo da energia elétrica como da informação, ou seja, tudo estará interligado e a informação será fornecida em tempo real. Na figura 2 tem-se um esquema de como funciona a *Smart Grid*.

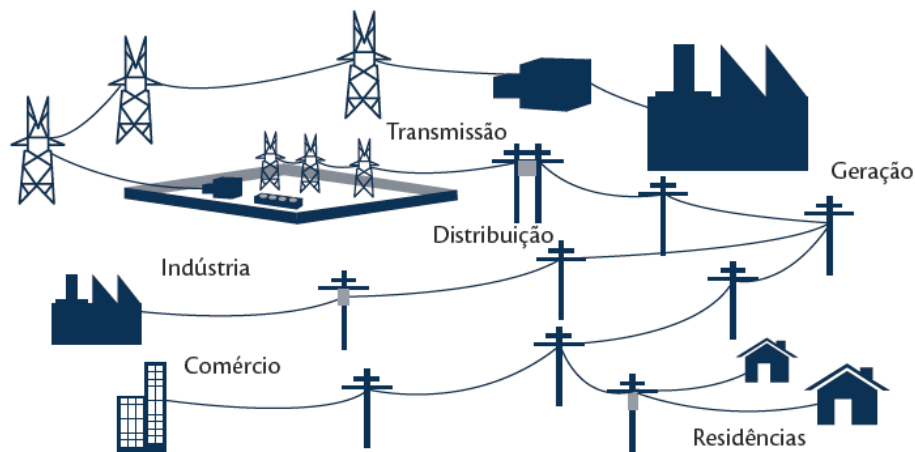
**Figura 2-** Esquemático da estrutura de uma *Smart Grid*.



Fonte: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos- CGEE (2012).

Na figura 3 é possível observar um esquema da rede elétrica convencional.

**Figura 3-** Esquemático da estrutura da rede elétrica convencional.



Fonte: CGEE (2012).

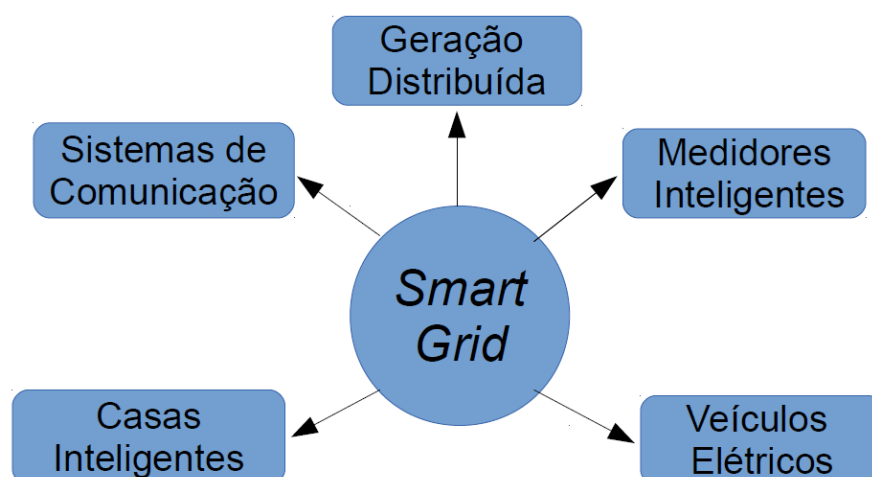
Nota-se a grande diferença da *Smart Grid* para a rede convencional. O fluxo de energia na rede convencional é unidirecional e o sistema é hierárquico. Na *Smart Grid* o fluxo é bidirecional e tudo está conectado e interligado. Outra diferença é que na rede convencional a

informação só pode ser acessada de forma local e em um simples banco de dados, já na *Smart Grid* a informação pode ser acessada em qualquer lugar e em tempo real.

Do desenvolvimento da tecnologia da microgeração, surgiram as *Smart Grids*. Com fluxo bidirecional, o consumidor pode instalar fontes de geração de energia de pequeno porte, como é representado pela hélice de três pás no consumidor da figura 2. Desta forma, além de produzir energia para uso próprio, o consumidor também poderá vender a energia excedente para a concessionária.

As aplicações de *Smart Grids* variam dependendo dos recursos oferecidos e das características do local de instalação. Para este trabalho, torna-se interessante observar as particularidades da *Smart Grid* nas redes de distribuição de energia elétrica. Na figura 4 a seguir, são apresentadas cinco grandes vertentes que são as mais utilizadas e necessárias para esse tipo de aplicação.

**Figura 4-** Áreas para aplicação de *Smart Grid*.



Fonte: Elaboração da própria autora.

As cinco vertentes apresentadas na figura 4 são de grande importância para a implantação de uma *Smart Grid* e a seguir tem-se um breve resumo sobre cada uma delas:

- **Geração Distribuída:** Utiliza, normalmente, fontes de energia renováveis de pequeno porte (micro e minigeração) conectadas à rede através do consumidor ou diretamente na rede de distribuição, instaladas pela concessionária.
- **Medidores Inteligente:** São o elemento chave para a implantação da *Smart Grid*, já que podem monitorar o fluxo da energia elétrica e sua qualidade, assim como permitem a comunicação direta entre a concessionária e o consumidor.

- **Sistemas de Comunicação:** Um sistema que permita o tráfego bidirecional de informações é uma das principais características da *Smart Grid*. Apesar de não ser abordado neste trabalho, estudos e pesquisas nessa vertente são vitais para a implantação da *Smart Grid*.
- **Casas Inteligentes:** Utilizando tecnologias avançadas de automação residencial, essa vertente busca conectar os equipamentos eletrônicos e os eletrodomésticos à uma rede residencial que permita um gerenciamento e uma economia no consumo de energia elétrica. Apesar do termo “casas” ser utilizado, essas soluções não são exclusivamente para consumidores residenciais.
- **Veículos Elétricos:** Com a busca pela redução dos impactos ambientais, essa vertente é muito interessante na implantação de uma *Smart Grid*. Apesar de não ser o foco deste trabalho, por ser uma carga móvel, seu impacto na qualidade da energia também deve ser considerado.

No próximo tópico serão abordados os benefícios e desafios de uma *Smart Grid*, assim como alguns exemplos de aplicações.

## 2.2 MOTIVADORES, BENEFÍCIOS E DESAFIOS DE UMA *SMART GRID*

Atualmente há uma grande demanda por redes de energia elétrica mais eficientes. Entretanto, os problemas e as necessidades diferem entre países e regiões. Consequentemente, os motivadores para implantação de *Smart Grids* também serão diferentes dependendo da localidade. Na figura 5, tem-se um resumo dos motivadores do Brasil, da União Europeia, dos Estados Unidos e do Japão.



**Figura 5-** Motivadores para implantação de Smart Grids.

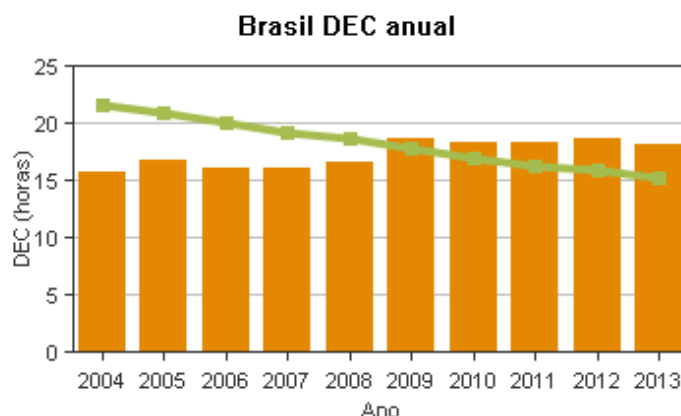
Motivadores	Brasil	União Europeia	Estados Unidos	Japão
1	Perdas: -Redução de perdas não técnicas	Energia Limpa: -Inserção de fontes renováveis -Redução de emissões	Desenvolvimento da atividade econômica: -Criação de empregos e avanço industrial -Aumento da competitividade	Energia Limpa: -Inserção de fontes renováveis -Redução de emissões
2	Confiabilidade: -Melhoria da continuidade	Segurança Energética: -Eficiência Energética -Integração dos mercados europeus	Operacionais: -Redução dos custos operacionais -Gestão de ativos	Comunidades digitais: -Geração e armazenamento distribuídos -Carros elétricos -Compartilhamento de infraestrutura
3	Segurança Energética: -Eficiência Energética -Crescimento sustentável	Liberalização: -Competição (mercado livre) -Novos serviços	Confiabilidade: -Gerenciamento em desastres naturais -Segurança cibernética -Melhoria da continuidade	Desenvolvimento da atividade econômica: -Exportação de tecnologia -Ampliação do mercado
4	Operacionais: -Redução dos custos operacionais -Gestão de ativos	Operacionais: -Redução dos custos operacionais -Gestão de ativos	Segurança Energética: -Eficiência Energética -Integração de carros elétricos e geração distribuída	Confiabilidade: -Gerenciamento em desastres naturais -Operação e interligação do sistema

Fonte: Lamin (2013).

A partir dos fatores citados na figura 5, no Brasil podemos exemplificar dois fatores motivadores que são: melhorar a qualidade do serviço e reduzir do consumo no horário de pico.

Um dos principais índices para avaliar a qualidade do serviço é a Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC). Esse índice, segundo o Módulo 1 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST), é o “*intervalo de tempo que, em média, no período de apuração, em cada unidade consumidora do conjunto considerado ocorreu descontinuidade da distribuição de energia elétrica*”.(AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL,2015a)

Na figura 6 tem-se os valores anuais medidos do DEC brasileiro de 2004 a 2013, representados pelas barras, e a linha representa o valor limite para o DEC no mesmo período.

**Figura 6-** Valores anuais do DEC brasileiro.

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica- ANEEL (2014).

Nota-se que os valores medidos estão acima do limite determinado pela ANEEL. Em comparação com outros países, o DEC nacional é considerado altíssimo. Tem-se como exemplo o DEC, em minutos, dos seguintes países: Estados Unidos, 214, França, 53, Holanda, 29 e Japão, 6. Esses dados mostram a necessidade de melhorar a qualidade do serviço no Brasil.

Existem várias estratégias para diminuir o consumo no horário de pico. Entre elas pode-se citar a aplicação da Tarifa Branca. Essa tarifa promove um custo maior nos horários de ponta e um custo menor nos horários fora de ponta em comparação com a tarifa atual. Entretanto, por falta de medidores eletrônicos, essa tarifa ainda não foi implementada.

Os motivadores para a implantação das *Smart Grids* são muitos e, por isso, essas redes inteligentes podem promover diversos benefícios, solucionando ou diminuindo o efeito dos problemas apontados.

Para a política energética brasileira, as *Smart Grids* podem fornecer os seguintes benefícios (CGEE, 2012):

- Promoção da segurança energética;
- Redução da assimetria de informações;
- Promoção da diversificação da matriz energética;
- Estímulo ao uso eficiente do sistema elétrico.

Com a *Smart Grid*, o consumidor terá acesso a mais informações sobre a rede e, desta forma, ele poderá aumentar a sua eficiência energética utilizando de forma mais consciente a energia elétrica e, conseqüentemente, observará uma redução dos seus custos. Também existe a possibilidade do consumidor que possui fontes próprias de geração de energia vender a energia excedente. Um outro benefício é a melhora da relação com a concessionária e dos serviços prestados pela mesma.

Para a concessionária, podem-se citar os seguintes benefícios (CGEE, 2012):

- Aumentar a eficiência operacional;
- Aumentar e fortalecer o relacionamento com os clientes;
- Otimizar os investimentos;
- Aumentar a confiabilidade;
- Preparar o ambiente para a microgeração distribuída;
- Redução de perdas técnicas e não técnicas;
- Gerenciamento de informações em tempo real.

Com uma rede que possui medidores inteligentes, sistemas de automação de redes de distribuição que podem informar dados, atuando automaticamente e de forma coordenada, controle de geradores distribuídos, controle de cargas, entre outras características, as concessionárias tem acesso a novas informações, gerando grandes avanços no monitoramento, planejamento, operação e manutenção. Toda essa mudança ocasiona a necessidade de reestruturar a gestão do sistema, gerando um grande salto, e também um grande desafio (TOLEDO, 2012).

Um grande desafio para a inserção de *Smart Grids* no Brasil é o perfil conservador do setor elétrico. Como algumas ações na rede elétrica podem impactar desde a qualidade do serviço até o faturamento, o setor mantém-se resistente à novas tecnologias. Uma mudança na visão das áreas operacionais das distribuidoras é necessária para uma implantação em grande escala de *Smart Grids* (TOLEDO, 2012).

Além desses desafios, também existem as barreiras tecnológicas. Pode-se citar as seguintes (TOLEDO, 2012):

- Mudança dos medidores de faturamento;
- Automação das redes aéreas e subterrâneas;
- Integração da geração distribuída;
- Cargas especiais (veículos elétricos);
- Armazenamento, processamento e fornecimento de dados para geração de informação.

Desta forma, muitos estudos devem ser realizados antes de implementar uma *Smart Grid*, pois, além dos desafios citados, o investimento é consideravelmente alto. Na tese de Lamin, é possível observar uma análise de impacto regulatório das *Smarts Grids* no Brasil onde todos os fatores de custo e benefício foram considerados (LAMIN, 2013).

### 2.2.1 Exemplos de aplicações internacionais de *Smart Grids*

Atualmente, um dos assuntos mais discutidos, na área de engenharia elétrica, são as *Smart Grids*. Como um exemplo no cenário internacional é interessante citar o caso dos Estados Unidos. A inserção dos projetos de *Smart Grids* foi impulsionada a partir de 2009, quando o governo federal americano forneceu US\$ 3,4 bilhões para tais iniciativas. Apesar disso, grande parte desses investimentos foi direcionada para soluções de geração distribuída e armazenamento, pois a matriz energética americana é baseada em fontes de energia não renováveis (termoelétricas e nucleares) (TOLEDO, 2012).

No Brasil, o interesse por *Smart Grids* vem crescendo e isso se comprova com o grupo criado pelo Ministério de Minas e Energia com o objetivo de estudar as redes inteligentes e a sua viabilidade no país (TOLEDO, 2012). Diversas concessionárias possuem projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) onde, de modo geral, grandes quantidades de medidores inteligentes são implementados nas redes de distribuição. Um grande projeto que pode ser citado é o da InovCity da EDP Bandeirante na cidade de Aparecida – SP, onde 10000 medidores já foram instalados. Esse foi um dos primeiros projetos piloto de implantação de *Smart Grid* no Brasil. É possível consultar no site Redes Inteligentes Brasil (RIB, 2015) a maioria dos projetos piloto que estão sendo implantados no país e em que fase do projeto estão. Também é possível ter acesso a link dos projetos de outros países como Estados Unidos e Canadá.

## 2.3 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA

Muitos que estudam *Smart Grids* também estudam Geração Distribuída, pois considera-se que as duas tecnologias se complementam. Portanto, torna-se interessante incluir um capítulo sobre este tema.

Em busca de eficiência e flexibilidade, a Geração Distribuída passou a ser uma ótima alternativa para os sistemas de energia convencionais já insuficientes para a demanda global. A Geração Distribuída facilita a utilização de diversas fontes de energia buscando sempre a melhor qualidade e confiabilidade do sistema. Além disso, a utilização de fontes não convencionais e renováveis de energia foi popularizada. Apesar de ter um alto custo de instalação e a necessidade de um período de tempo para começar a ser mais econômica, a energia renovável é essencial pela diminuição da emissão de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e pelo esgotamento progressivo das reservas de combustíveis fósseis, principalmente petróleo e carvão natural.

Com isso, é possível perceber que ocorre um crescimento constante da utilização de fontes alternativas nos sistemas de energia elétrica, que são normalmente de menor capacidade que as tradicionais. Estas fontes contribuem para a diversificação da matriz energética, aumentando a confiabilidade da geração. Podem, ainda, garantir o suprimento de energia para regiões que fiquem isoladas do sistema principal de alimentação devido algum problema na rede.

Apesar de sofrer pequenas variações dependendo da fonte utilizada, o conceito de Geração Distribuída é bem definido. Este trabalho utilizará como referência a definição adotada pela ANEEL no Módulo 1 do PRODIST, no qual define-se que Geração Distribuída é composta por centrais geradoras de qualquer potência. Essas centrais geradoras podem possuir instalações conectadas diretamente ao sistemas elétrico de distribuição ou através das instalações dos consumidores. A sua operação pode ser realizada em paralelo ou de forma isolada e despachadas, ou não, pelo ONS (ANEEL, 2015a).

### **2.3.1 Benefícios e desafios da geração distribuída**

Para compreender os benefícios da instalação da Geração Distribuída é necessário observar os seus efeitos em perspectivas diferentes. É na perspectiva do consumidor que esse tipo de geração oferece mais benefícios. Isso ocorre pois o consumidor consegue produzir a energia elétrica que irá consumir e ainda pode vender a energia que for excedente. Na perspectiva da concessionária, como adiamento de investimento no setor e melhoria na qualidade do serviço de energia elétrica, proporcionando maior estabilidade de tensão e uma curva de carga com menores variações durante o dia. Na perspectiva da rede elétrica em geral, observa-se uma redução das perdas nas redes de transmissão e distribuição, assim como um sistema com menores impactos ambientais, já que, as fontes utilizadas são em sua grande maioria renováveis. Também atribui-se à utilização de geração distribuída a flexibilização do sistema, permitindo que ele se recupere mais rapidamente com possíveis faltas. (DUGAN, 2003)

Observa-se que existem muitos benefícios atribuídos à utilização desta tecnologia, entretanto, os desafios vêm de encontro com eles. Pode-se citar os seguintes:

- Problemas de Qualidade de Energia;
- Dificuldade para a conexão das fontes na rede;
- Trabalhar com um fluxo bidirecional em um sistema que foi projetado para trabalhar com um fluxo unidirecional;

- Custos iniciais elevados para compra e instalação de equipamentos;
- Com a geração muito próxima ao consumidor, tem-se que tomar cuidado com a segurança, pois acidentes graves podem ocorrer;
- Dificuldade para coordenar a proteção do sistema.

Sendo assim, a utilização da Geração Distribuída deve ser bem planejada e estudada para que a sua implantação seja, no saldo geral, positiva e que os seus desafios e impactos sejam previstos e solucionados.

### **2.3.2 SFCR e seus impactos na qualidade da energia**

A geração de origem solar é a que possui a menor participação em potência instalada entre as fontes utilizadas no Brasil, com apenas 0,01% do total (ANEEL, 2015c). Segundo a nota técnica DEA 19/14 do EPE, o potencial estimado desse tipo de geração corresponde a 2,3 vezes o consumo elétrico residencial em 2013. Tem-se, então, que trata-se de uma fonte de energia que serviria como uma alternativa para a matriz energética brasileira (EPE, 2014).

A instalação de sistemas fotovoltaicos apresentou um grande crescimento nos últimos anos. Antes essa tecnologia era utilizada, principalmente, em sistemas isolados. Apesar disso, atualmente, observa-se que 95% desses sistemas tratam-se de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2014). Os SFCR podem ser conectados de duas formas diferentes: centralizados ou descentralizados. A primeira forma refere-se à sistemas que produzem energia através de grandes centrais fotovoltaicas e a segunda forma refere-se a conexão desses sistemas diretamente no consumidor. Para este trabalho, os SFCR se referem ao segundo tipo, onde esses sistemas são conectados à rede através dos consumidores.

A inserção dos SFCR pode ocasionar impactos diretos ou indiretos na qualidade da energia elétrica. Esses impactos podem tanto ser benéficos quanto maléficos para a rede de distribuição aonde o sistema é conectado. Podem-se citar:

- Alteração no Perfil de Tensão: Podem ser observados valores que ultrapassam os limites estabelecidos;
- Flutuações de tensão: Como a produção de energia é intermitente, pode ocasionar a variação do valor eficaz da tensão da rede.
- Injeção de harmônicos de corrente: Devido ao uso de inversores comutados pela linha e cargas não lineares conectadas à rede.

- Desequilíbrios entre fases: Ocorrem, principalmente, devido a presença de inversores monofásicos.
- Harmônico de Tensão: Com a elevação do nível da tensão, pode ser observada uma diminuição no conteúdo harmônico de tensão.
- Ilhamento não intencional: Se a unidade geradora continuar fornecendo energia para uma parcela da rede que deveria estar desenergizada, corre-se o risco de acidentes.
- Sistema de Proteção: Problemas de atuação da proteção decorrentes da bidirecionalidade da potência.

Desta forma, tem-se que analisar a qualidade da energia elétrica do local aonde será instalado o SFCR antes e depois da sua instalação para verificar se a energia fornecida aos consumidores está dentro dos padrões exigidos.

### **2.3.3 Normas e regulamentações**

No que diz respeito a normas e regulamentações que englobam a Geração Distribuída, nota-se uma evolução nos últimos anos. A princípio, a preocupação estava em normalizar as instalações fotovoltaicas. Esta normalização ocorreu com as normas ABNT NBR 11704 de 2008 e ABNT NBR IEC 62116 de 2012 que, respectivamente, classificam os sistemas fotovoltaicos e determinam os procedimentos de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT, 2008, 2012).

Já com a resolução 482 de 17 abril de 2012, a ANEEL estabeleceu as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências (ANEEL, 2012b). A resolução normativa 517 de 11 de dezembro de 2012 (ANEEL, 2012d), altera a resolução 482 e o Módulo 3 do PRODIST (ANEEL, 2012a).

Em 2013, a ABNT NBR 16150 determinou as características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição e os procedimentos de ensaio de conformidade dos sistemas fotovoltaicos (ABNT, 2013).

A ABNT NBR 16149 de 1 de março de 2014, determina, para sistemas fotovoltaicos, as características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição (ABNT, 2014a). E, em 6 de abril de 2014, passou a valer a ABNT NBR 16274, que determina os requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (ABNT, 2014b).

## 2.4 SISTEMAS DE MEDIÇÃO INTELIGENTES

Os medidores inteligentes são equipamentos fundamentais para uma *Smart Grid*. Por esse motivo, muitas vezes os sistemas de medição inteligentes são tidos como sinônimos de redes elétricas inteligentes. Uma *Smart Grid* implica em muitas vertentes, as quais foram apresentadas anteriormente neste capítulo, e os medidores inteligentes vêm para possibilitar a implementação deste tipo de rede.

Medidor inteligente, segundo Depuru (2011), trata-se de um dispositivo que além de medir o consumo de energia, fornece informações adicionais para a concessionária. Esse medidor é capaz de realizar medições em tempo real como valores de tensão, ângulo de fase e frequência, além de informar os dados com segurança.

É muito comum encontrar a aplicação de um sistema de medição inteligente sendo classificado como *Smart Grid*. Não se pode discordar de que a utilização de medidores eletrônicos, sejam eles convencionais ou inteligentes, torna a rede de energia elétrica mais “inteligente”. Entretanto, *Smart Grids* são redes que possuem diversas funcionalidades e a utilização de medidores eletrônicos é apenas uma das ferramentas que possibilitam a sua implantação.

A importância dos medidores inteligentes para uma *Smart Grid* pode ser comprovada a partir das razões listadas a seguir:

- Faz as medições necessárias e gera dados para o faturamento, ou seja, a remuneração do setor elétrico depende diretamente dos medidores;
- Serve como ponte entre o consumidor e a concessionária, pois fornece informações para os dois;
- Com as diversas informações cedidas pelo medidor é possível otimizar a gestão da demanda, melhorando a eficiência energética.
- Medidores bidirecionais permitem que o consumidor torne-se também produtor de energia elétrica e possa vender a energia excedente para a concessionária.

Entretanto, como é colocado por Krishnamurti (2012), para que um sistema de medição inteligente tenha sucesso é necessário que o consumidor possua informações para que compreenda como os medidores inteligentes funcionam e quais as vantagens que eles oferecem tanto para os próprios consumidores quanto para a concessionária. Deve-se, então, ter uma atenção especial em como esse conhecimento deve ser passado para os consumidores.



Para melhor compreensão do tópico, torna-se necessário uma explicação sobre os medidores eletrônicos convencionais para então, posteriormente, explicar como os medidores inteligentes funcionam (TOLEDO, 2012).

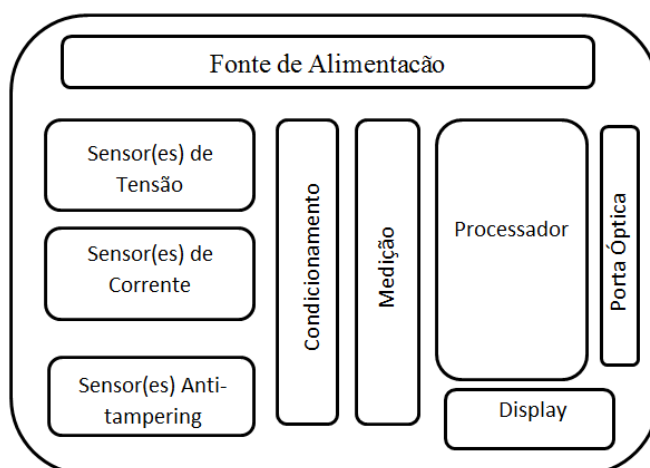
### 2.4.1 Diferenças entre medidores eletrônicos convencionais e inteligentes

Apesar dos medidores inteligentes serem muito semelhantes aos convencionais, torna-se interessante abordar as características de cada um deles e suas diferenças. A seguir tem-se essa comparação.

#### 2.4.1.1 Medidores eletrônicos convencionais

Para uma análise mais direta, utiliza-se o diagrama em blocos da estrutura geral de um medidor eletrônico apresentado na figura 7 a seguir.

**Figura 7** - Diagrama em blocos genérico de um medidor eletrônico de energia elétrica.



Fonte: Toledo (2012).

Normalmente, esses medidores eletrônicos apresentam três tipos de sensores:

- Sensores de Tensão: formados por divisores resistivos compostos de resistores de precisão;
- Sensores de Corrente: formados por resistores Shunt, transformadores de corrente ou sensores de efeito *hall*;
- Sensores Anti-Tampering: se houver qualquer violação no medidor, esse sensor envia um sinal elétrico para condicionamento.

Em seguida, os sinais elétricos fornecidos pelos sensores são condicionados para então adquirir magnitudes compatíveis com os circuitos de digitalização nos circuitos de processamento do medidor. Desta forma, os sinais são digitalizados e enviados ao bloco de

Medição para que os cálculos metrológicos do medidor sejam realizados e, em seguida, computados pelo Processador (TOLEDO, 2012).

Podem ser aplicadas soluções diversas para realizar os cálculos e gerenciar o medidor eletrônico. A solução mais utilizada, e também a de menor custo, consiste em utilizar apenas uma unidade de processamento, seja ela um microcontrolador ou um processador digital de sinais, para então realizar todas as funções do medidor. Medidores eletrônicos mais complexos podem apresentar um chip construído especificamente para realizar os cálculos de funções metrológicas e um microcontrolador para realizar funções como gerenciamento de comunicação, memórias e funções antifraude, entre outras (TOLEDO, 2012).

Os medidores eletrônicos podem ainda agregar outras funções. Isso ocorre pois as medições realizadas por ele são armazenadas digitalmente. Desta forma, tem-se uma gama de aplicações para tornar os medidores cada vez mais inteligentes.

#### **2.4.1.2 Medidores eletrônicos inteligentes**

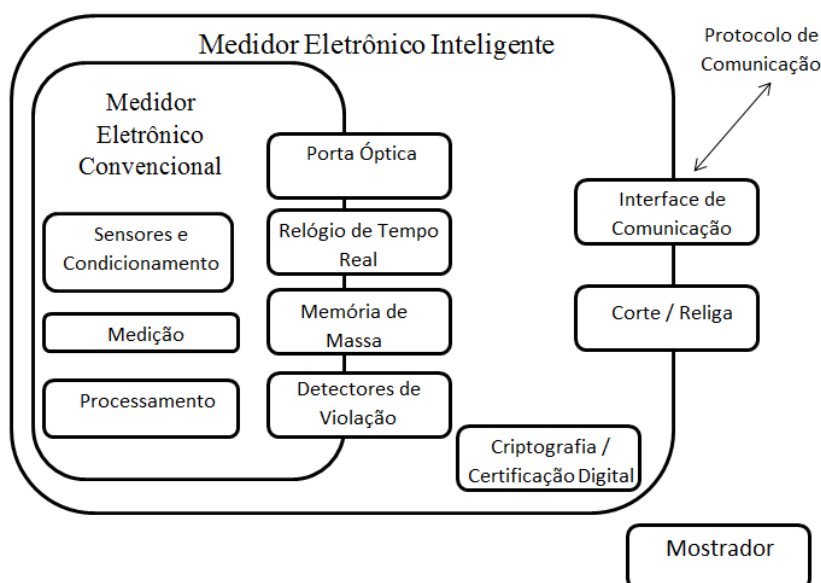
Os medidores inteligentes vêm como uma otimização dos medidores eletrônicos. A princípio os parâmetros necessários para que um medidor eletrônico fosse considerado inteligente não possuíam uma regra geral. Isso mudou quando a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), com a Audiência Pública 43/2010 fez uma proposta com as seguintes funcionalidades mínimas de um medidor inteligente:

- Fazer a medição dos seguintes valores: Eficaz instantâneo de tensão, Energia ativa e Energia reativa indutiva (apenas para 60Hz);
- Possuir um relé para ações remotas de corte e religamento;
- Computar os valores de demanda ativa e reativa;
- Calcular os índices de qualidade do fornecimento:
  - -DIC: Duração de interrupção individual por unidade consumidora ou ponto de conexão,
  - -FIC: frequência de interrupção individual,
  - -DMIC: Duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou ponto de conexão,
  - -DRC: Duração relativa da transgressão de tensão crítica,
  - -DRP: Duração relativa da transgressão de tensão precária;
- Possuir quatro postos horários para tarifas horosazonais;
- Possuir módulo de comunicação bidirecional;
- Comunicar-se utilizando protocolo de comunicação público.

Existem outras funcionalidades que também podem ser aplicadas dependendo do tipo do mercado em que o medidor for inserido. Entre elas temos o pré-pagamento e a detecção de fraude (ANEEL, 2010).

Na figura 8 é possível observar o diagrama em blocos das partes componentes dos medidores eletrônicos inteligentes.

**Figura 8-** Diagrama em blocos de um medidor inteligente.



Fonte: Toledo (2012).

Os blocos do medidor eletrônico convencional funcionam da mesma forma que foi apresentada anteriormente. Os blocos Porta Óptica, Relógio de tempo real, Memória de Massa e Detectores de Violação são comuns para os medidores eletrônicos convencionais e inteligentes. O bloco Relógio de tempo real é essencial para auxiliar o controle das funções que dependem de informações como as diferentes tarifas dependendo dos horários, as datas das faturas e para qualquer alteração necessária na reposição de demanda. A operação dos detectores de violação é bastante complexa, pois vários podem ser o tipos de violações que o medidor pode sofrer (TOLEDO, 2012).

Com o objetivo de utilizar o canal de comunicação para interação entre a concessionária e o consumidor, um display remoto avançado deve ser aplicado. Em um primeiro momento os displays remotos eram utilizados somente para fornecer algumas informações obrigatórias aos consumidores e não possuíam nenhuma interatividade com os mesmos. Entretanto, os displays remotos avançados possibilitam a interação direta do consumidor com a concessionária, fazendo com que o medidor inteligente funcione como uma ponte entre os dois.

## **2.4.2 Normas e regulamentações**

Estudar os medidores inteligentes também consiste em saber as normas e regulamentações que determinam como esses equipamentos devem operar. No que diz respeito aos medidores eletrônicos tem-se que a ABNT normaliza, o INMETRO regulamenta e a ANEEL regula. Nos tópicos a seguir são observadas as normas e regulamentações vigentes atualmente no Brasil.

### **2.4.2.1 ABNT/NBR14519:2000, ABNT/NBR14520:2000 e ABNT/NBR14521:2000**

A Norma Brasileira (NBR) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) ABNT/NBR14519:2000 descreve detalhadamente como devem ser as características mínimas que os medidores eletrônicos devem possuir para serem aplicados, sejam eles monofásicos ou polifásicos. Nessa norma os medidores são separados por índice de classe D, C, B e A. Esse índice define o erro percentual que pode ser admitido (ABNT, 2000a).

A norma ABNT/NBR14520:2000 descreve como os medidores eletrônicos, os quais estão dentro da norma ABNT/NBR14519:2000, devem ser ensaiados, as condições gerais dos ensaios e como os resultados devem ser interpretados (ABNT, 2000b).

Por fim, a norma ABNT/NBR14521:2000 estabelece as condições para a aceitação de lotes de medidores eletrônicos, apenas para novos medidores (ABNT, 2000c).

### **2.4.2.2 Portarias INMETRO 587/2012 e 401/2013**

A portaria INMETRO 587 de 05/11/2012 aprova o Regulamento Técnico Metrológico (RTM) para medidores eletrônicos de energia elétrica ativa e/ou reativa, monofásicos e polifásicos, inclusive os reconicionados (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA- INMETRO, 2012).

Já a portaria INMETRO 401 de 15/08/2013 é uma revisão da 587/2012, onde são estabelecidos requisitos adicionais aos presentes no RTM aprovado na 587/2012, que devem ser observados na apreciação técnica de modelo de medidores de múltipla tarifação de medição de energia elétrica (INMETRO, 2013).

Para serem utilizados, todos os medidores eletrônicos (inteligentes ou convencionais) tem que ser aprovados pela INMETRO, de acordo com as RTMs citadas anteriormente.

### 2.4.2.3 PRODIST – Módulo 5

Os Procedimentos de Distribuição (PRODIST) são utilizados como base para a padronizar e normatizar o que for relativo aos sistemas brasileiros de distribuição de energia elétrica. Separado em 9 módulos, torna-se de interesse para este capítulo o Módulos 5.

O Módulo 5 discorre sobre os sistemas de medição e estabelece alguns requisitos para a utilização dos medidores eletrônicos de faturamento (ANEEL, 2011). Além deste Módulo 5, a ANEEL estabelece na Resolução Normativa nº 502, de 7 de agosto de 2012, que regulamenta sistemas de medição de energia elétrica de unidades consumidoras do Grupo B (ANEEL, 2012c).

### 2.4.3 Medidores utilizados no projeto

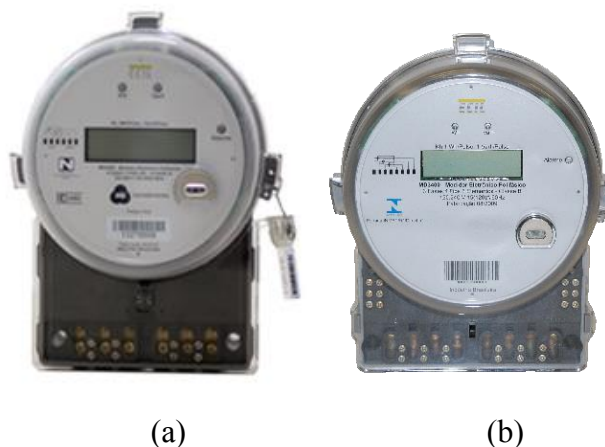
Existem diversos fabricantes de medidores inteligentes no mercado brasileiro e com o passar do tempo a competição está cada vez maior. Os medidores utilizados no projeto de *Smart City* foram fornecidos pelas empresas NANSEN, ECIL e ITRON. Da empresa NANSEN, utilizou-se o medidor Spectrum K ART, que está representado na figura 9. Da empresa ECIL foram utilizados os modelos MD2400 e MD3500, que estão representados na figura 10. Por fim, da empresa ITRON foram utilizados os modelos Centron e Aurum, que estão representados na figura 11.

**Figura 9-** Medidor NANSEN Spectrum K ART.



Fonte: Nansen (2015).

**Figura 10** - Medidores ECIL MD2400 (a) e MD3400(b).



(a) (b)

Fonte: ECIL (2014a, 2014b).

**Figura 11**- Medidores ITRON Aurum (a) e Centron (b).



(a) (b)

Fontes: Itron (2015a, 2015b).

## 2.5 CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentadas alguns conceitos importantes para este trabalho. Observou-se que, para se obter uma *Smart City*, é necessário realizar mudanças em diversas áreas. Torna-se necessário fazer modificações não só na cidade como também na forma que as pessoas se comportam.

Apresentou-se também a conceituação de *Smart Grid*, Geração Distribuída e Medidores Inteligentes. Esses conceitos são importantes para a compreensão de como esses sistemas são utilizados para tornar a rede de distribuição e a cidade mais inteligentes.

Observa-se que uma *smart city* busca formas mais eficientes de utilizar os recursos, não se esquecendo dos impactos que pode causar ao meio ambiente.

### 3 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com os avanços tecnológicos, os equipamentos tornaram-se cada vez mais sensíveis a perturbações na rede a que estão conectados, ao passo que provocam mais distúrbios do que antes. Com isso, tornou-se essencial avaliar, controlar e melhorar a qualidade da energia elétrica. Tanto a corrente quanto a tensão são objetos de estudo para se compreender os problemas que podem ser encontrados nos sistemas de energia elétrica.

Avaliar, controlar e melhorar a qualidade da energia são importantes para obter um sistema mais eficiente e sustentável. Melhorar a eficiência energética gera benefícios para a concessionária, para o consumidor e para o meio ambiente.

Segundo Dugan, a definição de problema de qualidade de energia elétrica é “qualquer problema na energia manifestado em variações de tensão, corrente ou frequência que resultam em falha ou operação incorreta do equipamento do consumidor” (DUGAN, 2003).

O motivo para avaliar e solucionar os problemas de qualidade de energia vem, principalmente, do interesse econômico. Esses problemas podem causar perdas consideráveis de receita. Em alguns seguimentos industriais, interrupções no fornecimento de energia provocam paradas na produção e para reestabelecer o funcionamento da linha produtiva podem ser necessárias horas. Dependendo do negócio envolvido, essas horas podem significar milhares de reais. Para a concessionária, os problemas de qualidade de energia diminuem, por exemplo, a confiabilidade dos consumidores na empresa. Para o consumidor comercial, problemas no fornecimento e na qualidade da energia impactam diretamente na receita. Para o consumidor residencial, esses problemas não são tão impactantes quanto para os outros envolvidos, entretanto, com a crescente utilização da internet até para realizar trabalhos e negócios, tornam esse consumidor mais sensível a interrupções ou variações no fornecimento de energia elétrica (DUGAN, 2003).

Os principais problemas de qualidade de energia, suas causas, efeitos e soluções estão relacionados na figura 12 (SILVA, 2008).

**Figura 12 - Distúrbios de qualidade de energia e suas características.**

Tipo do Distúrbio	Causas Típicas	Efeitos	Soluções
<b>Transitórios Impulsivos</b>	- Descargas atmosféricas; - Chaveamentos de banco de capacitores e/ou cargas.	- Excitação de circuitos ressonantes; - Redução da vida útil de motores, geradores, transformadores, etc.	- Filtros; - Supressores de surto; - Transformadores de isoladores.
<b>Transitórios Oscilatórios</b>	- Descargas atmosféricas; - Chaveamentos de: capacitores, linhas, cabos, cargas e transformadores.	- Mau funcionamento de equipamentos controlados eletronicamente, conversores de potência, etc.; - Redução da vida útil de motores, geradores, transformadores, etc.	- Filtros; - Supressores de surto; - Transformadores isoladores.
<b>Sub e Sobreensões</b>	- Partidas de motores; - Variações de cargas; - Chaveamento de capacitores.	- Pequena redução na velocidade dos motores de indução e no reativo dos bancos de capacitores; - Falhas em equipamentos eletrônicos; - Redução da vida útil de máquinas rotativas, transformadores, cabos, disjuntores, TP's e TC's; - Operação indevida de relés de proteção.	- Reguladores de tensão; - Fontes de energia de reserva; - Chaves estáticas; - Geradores de energia.
<b>Interrupções</b>	- Curto-circuito; - Operação de disjuntores; - Manutenção.	- Falha de equipamentos eletrônicos e de iluminação; - Desligamento de equipamentos; - Interrupção do processo produtivo (altos custos);	- Fontes de energia sobressalentes; - Sistemas "nobrek"; - Geradores de energia.
<b>Desequilíbrios</b>	- Fornos a arco; - Cargas monofásicas e bifásicas; - Assimetrias entre as impedâncias.	- Redução da vida útil de motores de indução e máquinas síncronas; - Geração, pelos retificadores, de 3º harmônico e seus múltiplos.	- Operação simétrica; - Dispositivos de compensação.
<b>Nível CC</b>	- Operação ideal de retificadores de meia onda, etc.	- Saturação de transformadores; - Corrosão eletrolítica de eletrodos de aterramento e de outros conectores.	- Filtros.
<b>Harmônicos</b>	- Cargas não lineares.	- Sobreaquecimento de cabos, transformadores e motores de indução; - Danificação de capacitores, etc.	- Filtros; - Transformadores isoladores.
<b>Interharmônicos</b>	- Conversores estáticos de potência; - Cicloconversores; - Motores de indução; - Equipamentos a arco, etc.	- Interferência na transmissão de sinais "carrier"; - Indução de "flicker" visual no "display" de equipamentos.	- Filtros.
<b>Ruídos</b>	- Chaveamento de equipamentos eletrônicos de potência; - Radiações eletromagnéticas.	- Distúrbios em equipamentos eletrônicos (computadores e controladores programáveis).	- Aterramento das instalações; - Filtros.
<b>Oscilações de Tensão</b>	- Cargas intermitentes; - Fornos a arco; - Partidas de motores.	- "Flicker"; - Oscilação de potência e torque nas máquinas elétricas; - Queda de rendimento de equipamentos elétricos; - Interferência nos sistemas de Proteção.	- Sistemas estáticos de compensação de reativos; - Capacitores série.
<b>Variações de Frequência</b>	- Perda de geração, perda de linhas de transmissão, etc.	- Pode causar danos severos nos geradores e nas palhetas das turbinas, etc.	

Fonte: Silva (2008).



Levando em consideração que as medições presentes nesse trabalho foram realizadas em baixa tensão, diretamente nos consumidores residenciais e comerciais, os parâmetros e seus respectivos valores de referência utilizados neste trabalho são os seguintes: tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variações de tensão de curta duração.

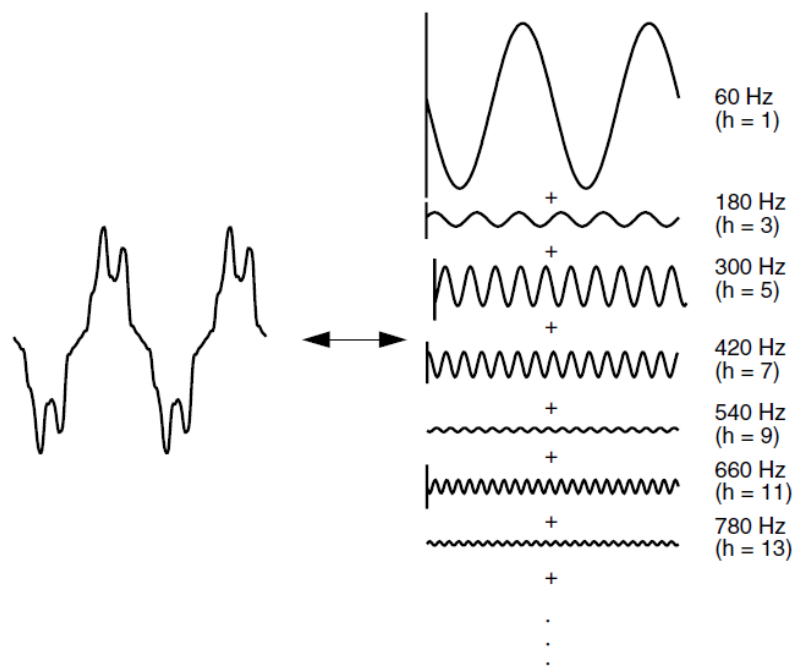
No tópico seguinte são estudados os problemas de qualidade de energia elétrica que foram analisados nas medições realizadas.

### 3.2 PROBLEMAS DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Um dos principais problemas de qualidade de energia elétrica são os harmônicos. As distorções harmônicas existem devido às características não lineares de equipamentos e cargas conectadas ao sistema de fornecimento de energia e que são, normalmente, fontes de corrente que injetam harmônicos de corrente no circuito e acabam por resultar em distorções de tensão.

Como é possível observar na figura 13, qualquer forma de onda periódica distorcida pode ser representada pela soma de senóides. Tem-se uma senóide que possui a mesma frequência do sinal original e as demais senóides que possuem frequências múltiplas do sinal original, as harmônicas (DUGAN, 2003).

**Figura 13-** Forma de onda distorcida e sua representação em série de Fourier.



Fonte: Dugan (2003).

As distorções harmônicas são avaliadas, no módulo 8 do PRODIST, quantificando as contribuições individuais de cada ordem harmônica (distorção harmônica individual de tensão de ordem h -  $DIT_h\%$ ) e a contribuição total de todas as ordens (Distorção harmônica total de tensão - DTT%) sendo estes calculados utilizando as expressões seguintes (ANEEL, 2015b):

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (1)$$

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

Os efeitos das distorções harmônicas podem ser observados em diversas situações. Em motores e geradores observam-se os seguintes problemas:

- Aumento das Perdas no Ferro e no Cobre;
- Diminuição da eficiência e do torque disponível;
- Oscilações mecânicas, vibrações devido a torques em sentido oposto;
- Aumento do ruído audível (torques pulsantes);

Nos capacitores, os efeitos são:

- Reatância capacitiva é reduzida aumentando-se as correntes ( $I_h$ )
- Aumento das perdas / elevação de temperatura / redução da vida útil
- Problemas relacionados com ressonâncias série e/ou paralela (Sobrecorrentes e/ou sobretensões harmônicas; Risco de explosão).

Esses são apenas alguns dos problemas que os harmônicos podem causar no sistema.

O fator de potência é a relação entre a potência ativa e a aparente que um equipamento consome. Entretanto, quando um sistema apresenta distorções harmônicas de corrente, há um impacto direto no valor do fator de potência, como é possível observar na equação a seguir:

$$FP = \frac{\cos\phi_1}{\sqrt{1+DHT^2}} \quad (3)$$

onde:

FP – fator de potência;

$\phi_1$  - defasagem entre as componentes fundamentais de tensão e de corrente;

DHT – distorção harmônica total da corrente.

Nota-se que, dependendo do valor da defasagem entre as componentes fundamentais de tensão e de corrente, o fator de potência também pode ser prejudicado.

Um problema de qualidade da energia muito comum é a flutuação da tensão, mais conhecido como “flicker”. Quando há uma variação na magnitude da tensão, normalmente também haverá variação no fluxo de energia para os equipamentos. Se a variação for muito grande ou em uma faixa de frequência crítica pode afetar o funcionamento dos equipamentos. Esses casos, onde a variação da tensão afeta o comportamento das cargas são muito raros, a não ser quando se tratam de cargas de iluminação. Os olhos humanos são muito sensíveis, portanto conseguem captar pequenas variações luminosas que dão a impressão de tremulação.

Um sistema trifásico equilibrado é aquele no qual as tensões de fase possuem amplitudes idênticas e defasamentos angulares de  $120^\circ$ . Sendo assim, sistemas que apresentem características diferentes dessas são considerados desequilibrados. Desta forma, tem-se que os desequilíbrios de tensão estão ligados com as mudanças de padrões de uma rede elétrica. Através da metodologia das componentes simétricas, é possível representar tensões desequilibradas através de componentes equilibradas. Essas componentes podem ser de sequência zero, positiva ou negativa. Para saber o nível de desequilíbrio, deve-se calcular o fator de desequilíbrio (FD). Seu valor será igual à Componente de Sequência Negativa dividida pela Componente de Sequência Positiva.

Os afundamentos e elevações de tensão são definidos como variações na magnitude do RMS da tensão. Os afundamentos são caracterizados por reduções do valor normal por um tempo que varia de meio ciclo a vários segundos. As elevações normalmente tem uma duração na mesma faixa dos afundamentos e são mais raras. São caracterizadas por acréscimos no valor normal da tensão e sua principal causa são falhas da fase-terra. Afundamentos e elevações de tensão que duram mais de três minutos são chamados de sobre tensão e subtensão.

Interrupções podem ser longas ou curtas. É um evento de qualidade de energia onde a tensão do consumidor ou do terminal do equipamento cai para um valor inferior a 0,1 pu e permanece por um determinado período, dependendo de quanto tempo durar essa interrupção pode-se caracterizar como longa ou curta. Longas interrupções é uma das mais antigas e severas preocupações de qualidade de energia. O PRODIST determina que se a interrupção possuir uma duração maior ou igual à 3 minutos é definida como interrupção de longa duração (ANEEL, 2015a).

### 3.3 NORMAS E REGULAMENTAÇÕES

Existem diversas normas e regulamentações para avaliar a qualidade da energia elétrica. Podem-se citar as seguintes: IEC 61000, IEEE Std. 519, EN50160 e Módulo 8 do PRODIST.

As análises realizadas nesse trabalho estão baseadas nos valores de referência propostos na seção 8.1 do Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2015b).

### 3.3.1 PRODIST módulo 8

O Módulo 8 discorre sobre qualidade de energia e estabelece todas as faixas aceitáveis de distorções determinando, inclusive, como devem ser feitas as medições. Os seus objetivos são os seguintes (ANEEL, 2015b):

- Estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica - QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado.
- Para a qualidade do produto, este módulo define a terminologia, caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos que possibilitem à ANEEL fixar padrões para os indicadores de QEE.
- Para a qualidade dos serviços prestados, este módulo estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades.

Os procedimentos definidos no módulo são aplicados a:

- Consumidores com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição;
- Produtores de energia;
- Distribuidoras;
- Agentes importadores ou exportadores de energia elétrica;
- Transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão - DIT;
- Operador Nacional do Sistema – ONS.

A qualidade do produto em regime permanente é avaliada a partir dos seguintes parâmetros: tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variações de tensão de curta duração e variação de frequência. Busca não somente a qualidade do produto como também do serviço (ANEEL,2015b).

Apesar do desequilíbrio de tensão não possuir um valor de referência para baixa tensão, será considerado o valor de referência proposto na consulta pública nº18/2014 que provavelmente será utilizado na revisão 7 do módulo 8.

- Tensão em regime permanente: Na tabela 1 tem-se as faixas de valores de referência aplicadas às tensões inferiores a 1kV. Com esta tabela determina-se se o nível de tensão de atendimento está com um valor adequado, precário ou crítico.

**Tabela 1-** Faixas aplicadas às tensões nominais inferiores a 1kV.

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão Nominal (TN)
Adequada	$0,92TN \leq TL \leq 1,05TN$
Precária	$0,87TN \leq TL \leq 0,92TN$ ou $1,05TN < TL \leq 1,06TN$
Crítica	$TL < 0,87TN$ ou $TL > 1,06 TN$

Fonte: ANEEL (2015b).

- Fator de potência: O valor medido do fator de potência no ponto de conexão deve estar entre 0,92 e 1 indutivo ou 1 e 0,92 capacitivo.
- Desequilíbrio da Tensão: Apesar de não ser aplicado para baixa tensão, será utilizado o valor de referência de 3%, como foi explicado anteriormente.
- Harmônicos: O valor da distorção harmônica total de tensão (DTT%) deve ser menor que 10% para tensões no barramento inferiores a 1kV. As distorções harmônicas individuais (DIT<sub>h</sub>%) devem seguir a tabela 2.

**Tabela 2-** Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental)

Ordem Harmônica		Ímpares não múltiplas de 3											
		5	7	11	13	17	19	23	25	>25			
DIT <sub>h</sub> [%]	V <sub>N</sub> ≤1kV	7,5	6,5	4,5	4	2,5	2	2	2	1,5			
Ordem Harmônica		Ímpares múltiplas de 3					Pares						
		3	9	15	21	>21	2	4	6	8	10	12	>12
DIT <sub>h</sub> [%]	V <sub>N</sub> ≤1kV	6,5	2	1	1	1	2,5	1,5	1	1	1	1	1

Fonte: ANEEL (2015b).

- Flutuação de Tensão: Trata-se de uma variação aleatória, repentina ou esporádica no valor eficaz da tensão. Pst são severidades de curta duração e sua medição deve ser realizada durante um dia. Plt são severidades de longa duração e sua medição deve ser realizada durante uma semana. Para serem considerados adequados, os valores de Pst e Plt devem ser menores que 1pu.

- Variação de Tensão de Curta Duração: São desvios significativos no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo. Esses eventos são classificados de acordo com a figura 14 a seguir.

**Figura 14-** Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração.

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

Fonte: ANEEL (2015b).

### 3.4 CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou alguns problemas de qualidade de energia elétrica e o módulo 8 do PRODIST que é utilizado nesse trabalho como referência para as análises dos resultados experimentais que serão apresentados no próximo capítulo.

Para se avaliar a qualidade de energia elétrica é necessário primeiro conhecer os problemas que podem ocorrer para então ser possível afirmar o motivo deles serem observados nas medições.

Com a realização da consulta pública nº18/2014, algumas mudanças são propostas para avaliar os parâmetros de desequilíbrios, distorções harmônicas, variações de curta duração e

flutuação, referentes à tensão. Observa-se uma busca pelo aperfeiçoamento do módulo 8, utilizando normas internacionais como referência. Tem-se que parâmetros como, por exemplo, harmônicos de corrente não são incluídos na norma pois as mudanças devem ser feitas levando em consideração à realidade das limitações da rede de distribuição brasileira e das concessionárias.

## 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

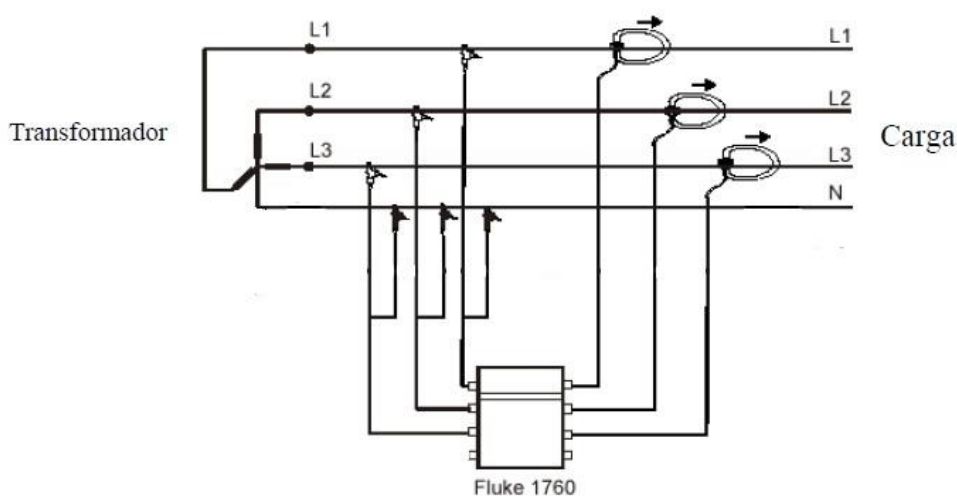
Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais das medições de qualidade de energia elétrica realizadas em três unidades consumidoras: um Fórum, uma Escola Municipal e uma residência. Esses foram os três primeiros pontos de instalação dos SFCR em uma cidade onde tem-se um projeto de *smart city*. As potências dos SFCR instalados são: 17,15 kWp para o Fórum, 22,29kWp para a Escola Municipal e 2kWp para a residência.

Foram realizadas medições nas três unidades consumidoras antes e depois da instalação dos SFCR. Essa metodologia foi escolhida para que fosse possível observar quais os impactos da instalação dos SFCR nos parâmetros de qualidade de energia elétrica.

Utilizou-se o medidor de qualidade de energia FLUKE 1760. O medidor registra, de forma contínua, valores RMS, assim como os valores mínimos e máximos correspondentes para tensão, corrente, potências (ativa, reativa e aparente), kWh, oscilação, desequilíbrios, frequência, harmônicos e interharmônicos. A conexão entre o medidor e o computador é realizada através de um cabo Ethernet.

Para analisar o padrão de entrada das unidades consumidoras o medidor FLUKE 1760 foi conectado como mostra a figura 16. A carga na figura 16 representa as unidades consumidoras. L1, L2 e L3 representam as três fases medidas e N o neutro.

**Figura 15-** Esquema da conexão do FLUKE 1760 na rede de distribuição.



Fonte: Rodríguez (2010).



O medidor utiliza o software PQ Analyze tanto para receber as diretrizes para as medições, quanto para acessar as medições realizadas. Quando as medições são acessadas no software, o mesmo já fornece automaticamente uma comparação dos resultados com a norma EN50160. Os limites de comparação podem ser alterados pelo operador do medidor antes de conectá-lo no local da medição.

As análises foram realizadas comparando os resultados encontrados nas medições com o Módulo 8 do PRODIST. Também foram apresentados outros resultados: a curva de carga dos consumidores em questão e a distorção harmônica de corrente do Fórum e da Escola.

Como residência é monofásica a três fios, não foi possível analisar o desequilíbrio da tensão e flutuação pois o software de aquisição de dados realiza os cálculos considerando as três fases.

Nos tópicos seguintes são apresentados e analisados os resultados experimentais. Ao fim de cada tópico tem-se a análise comparativa dos parâmetros de qualidade de energia elétrica observados.

## 4.2 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES NO FÓRUM

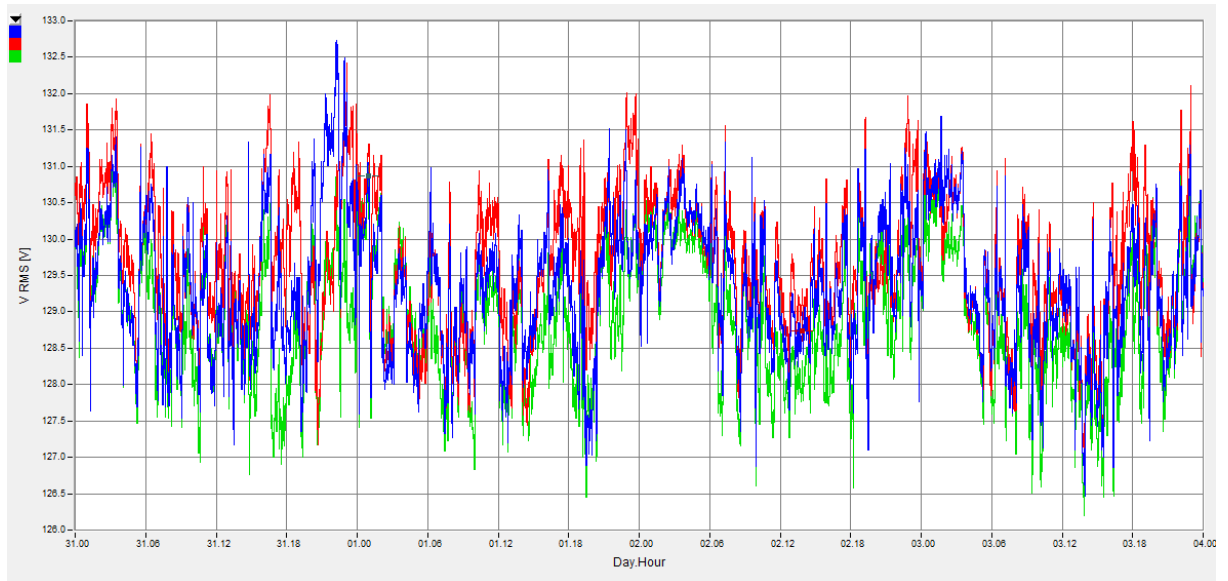
As medições no Fórum foram realizadas entre os dias 31 de outubro e 04 de novembro de 2014, antes da instalação do SFCR, e entre os dias 9 e 13 de novembro de 2014, após a instalação, de acordo com a metodologia apresentada anteriormente. Em todas as figuras, as curvas com as cores azul, vermelha e verde representam as três fases L1, L2 e L3. A seguir tem-se os resultados para a variação da tensão, fator de potência, desequilíbrio de tensão, harmônico de tensão e flutuação da tensão.

### 4.2.1 Variação da tensão

Neste tópico serão apresentados os resultados das variações do valor eficaz da tensão antes e após a instalação do SFCR. As linhas amarela e marrom representam, respectivamente, os limites crítico e precário dos valores de referência da tensão em regime permanente apresentados na tabela 1.

A curva da variação do valor eficaz médio da tensão está representada na figura 17 antes da instalação do SFCR. Pode-se observar que os valores das três fases permanecem dentro dos limites estabelecidos no módulo 8 do PRODIST .

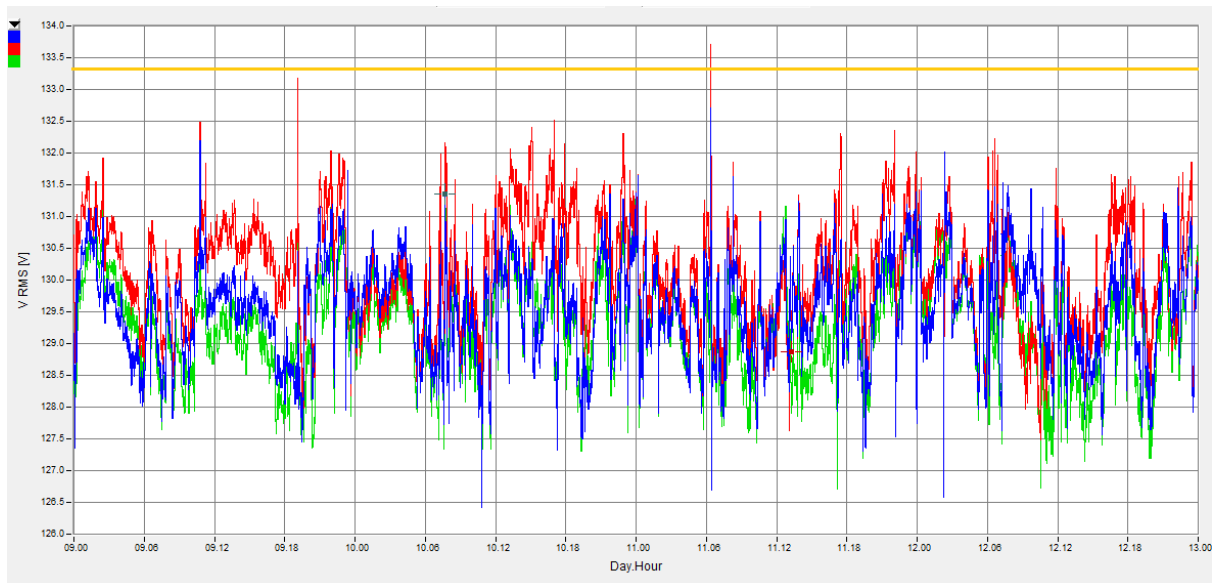
**Figura 16-** Tensão RMS média do Fórum antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

A curva da variação do valor eficaz médio da tensão está representada na figura 18, após a instalação do SFCR. Pode-se observar que próximo do dia 11 às 6h ocorre uma violação do limite crítico máximo. Apesar disso, não são observadas variações de curta duração. Nota-se que os valores das tensões estão um pouco maiores que os encontrados antes da instalação do SFCR.

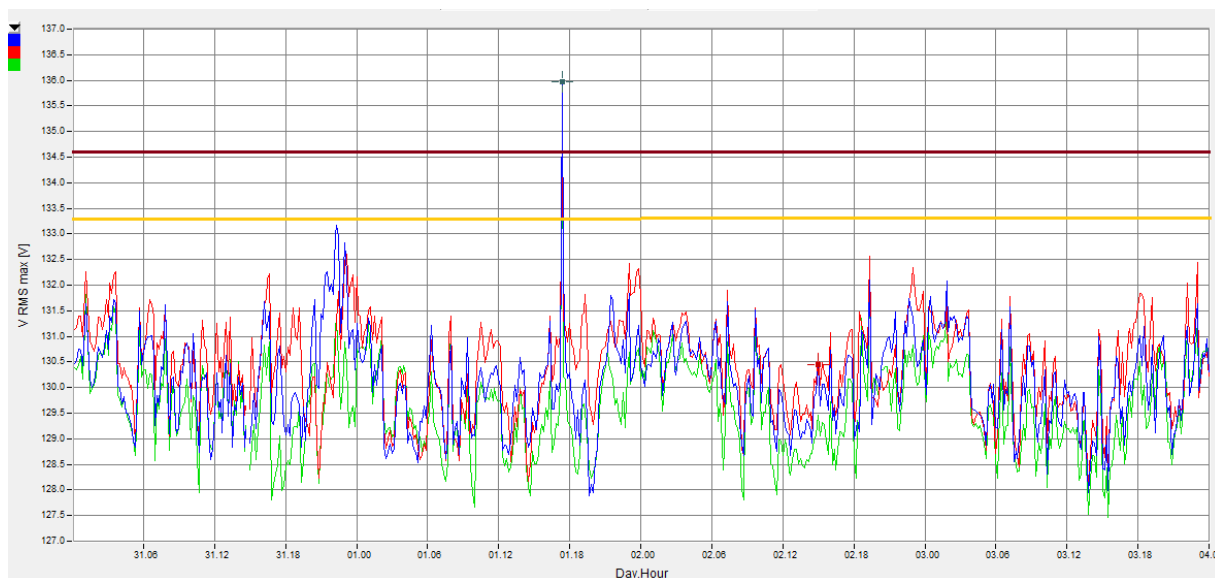
**Figura 17-** Tensão RMS média do Fórum após a instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Ao se observar a curva da variação do valor eficaz máximo da tensão antes do SFCR, representada na figura 19, tem-se que os limites máximos da tabela 1 e da figura 14 foram ultrapassados. Observa-se um valor de tensão precário, entretanto não se enquadra nas variações de curta duração.

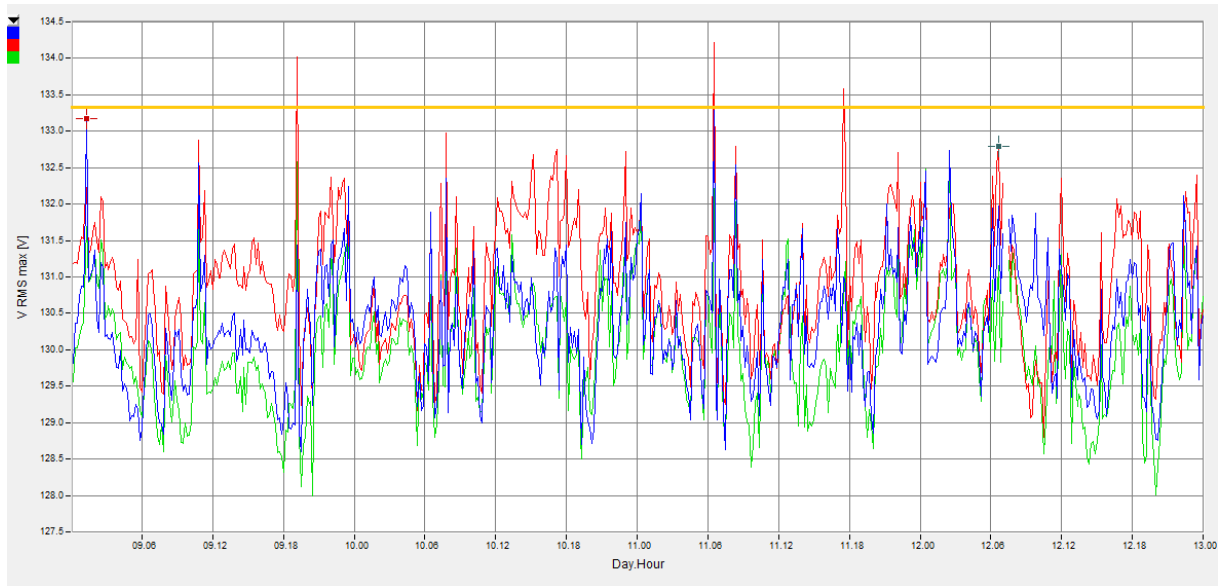
**Figura 18-** Tensão RMS máximo do Fórum antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Ao se observar a curva da variação do valor eficaz máximo da tensão após o SFCR, representada na figura 20, tem-se que os limites máximos foram ultrapassados. Apesar do valor que ultrapassou os limites antes da instalação do SFCR ter sido maior que os encontrados após a instalação, tem-se que, na figura 21, é possível observar o limite crítico sendo ultrapassado em três situações distintas, enquanto que na figura 20 ocorreu apenas uma vez.

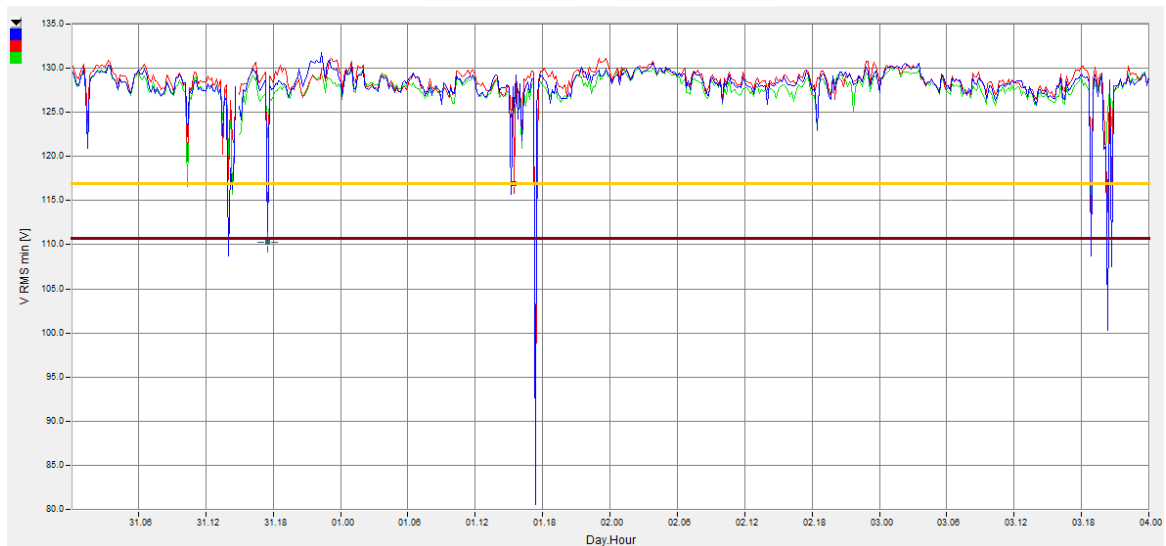
**Figura 19-** Tensão RMS máximo do Fórum após a instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

A curva da variação do valor eficaz mínimo da tensão antes do SFCR, representada na figura 21, apresenta alguns valores fora dos limites crítico e precário da tensão em regime permanente. Desses valores, tem-se oito afundamentos temporários de tensão.

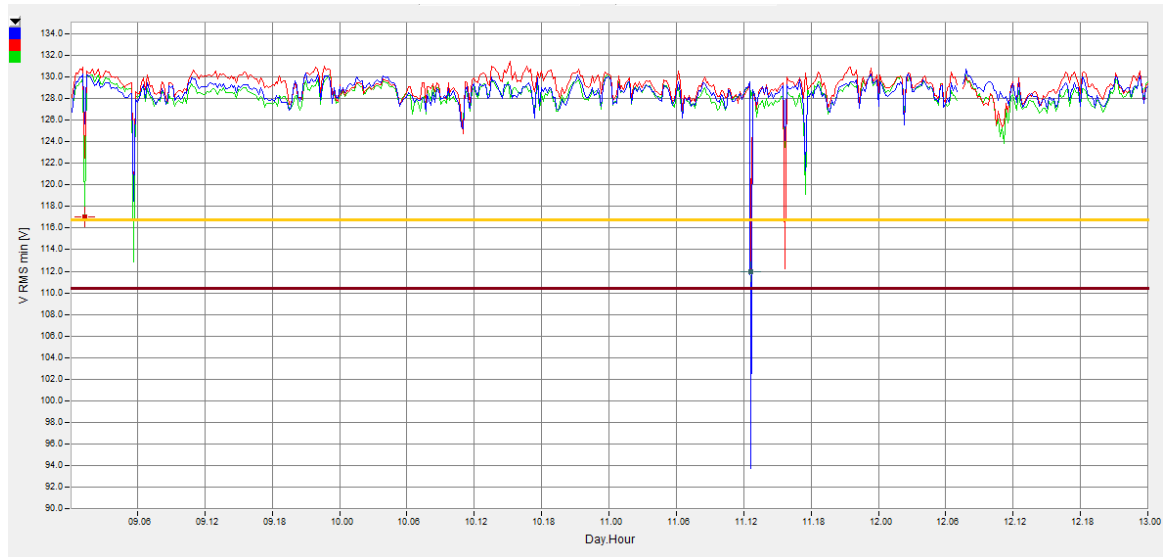
**Figura 20-** Tensão RMS mínimo do Fórum antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

A curva da variação do valor eficaz mínimo da tensão após o SFCR, representada na figura 22, apresenta alguns valores fora dos limites determinados na norma. São observados apenas três afundamentos temporários de tensão, ou seja, tem-se uma diminuição na quantidade de valores que ultrapassaram os limites.

**Figura 21-** Tensão RMS mínimo do Fórum após a instalação do SFCR.



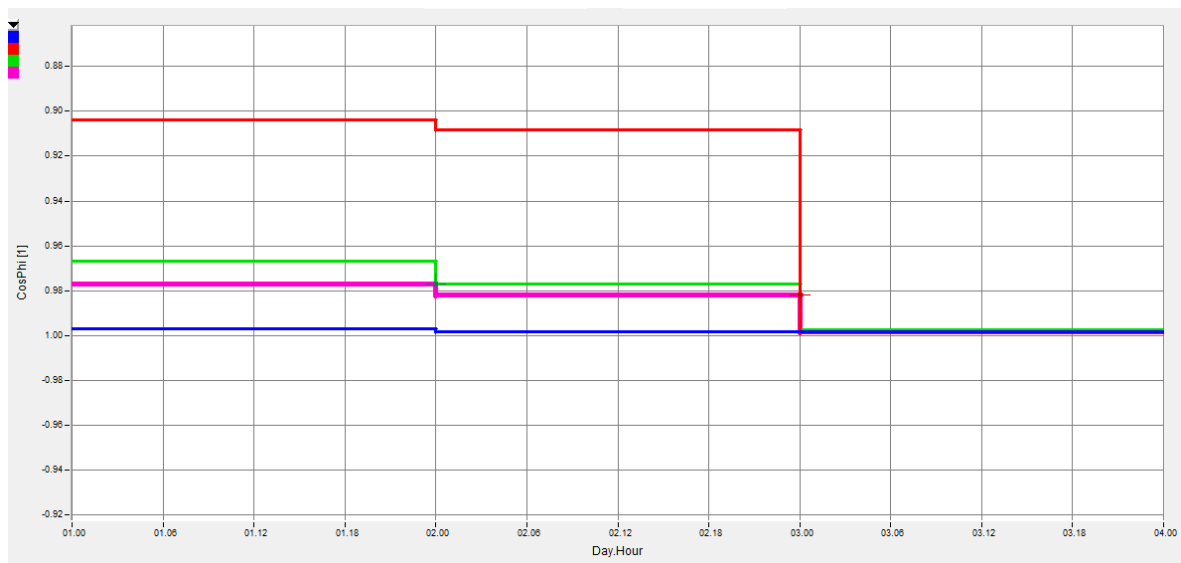
Fonte: Elaboração da própria autora.

#### 4.2.2 Fator de potência

Neste tópico serão apresentados os resultados do valor médio diário do fator de potência antes e após a instalação dos SFCR. A curva de cor rosa representa o fator de potência soma das três fases.

Na figura 23 tem-se os valores de fator de potência diários antes da instalação do SFCR. Nota-se que a curva rosa do fator de potência soma possui valores entre 0,97 e 1. Os dias 1 e 2 de novembro, onde são observados os menores valores do fator de potência, foram, respectivamente, sábado e domingo.

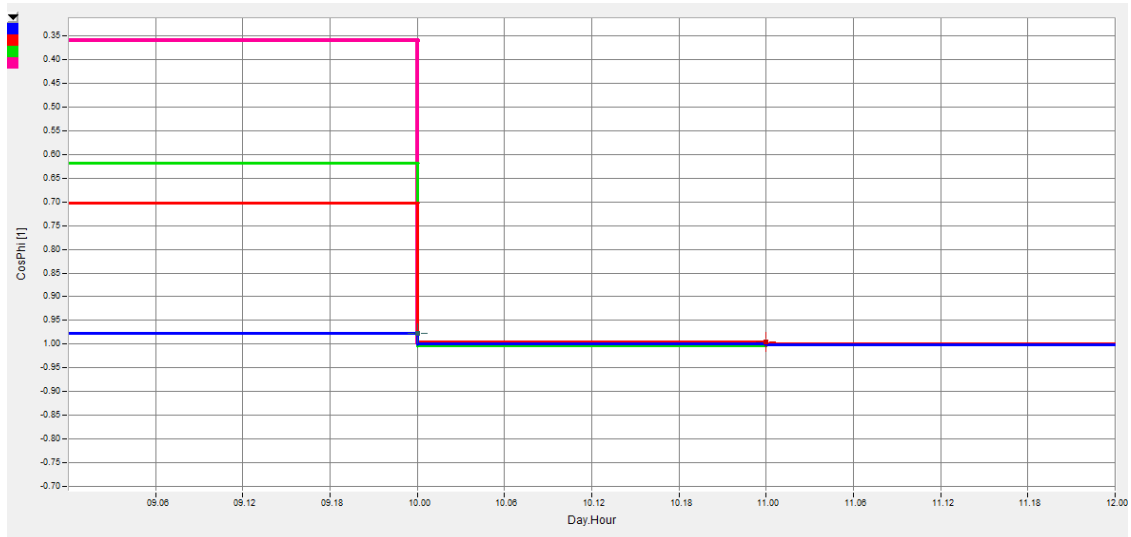
**Figura 22-** Fator de Potência do Fórum antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Na figura 24 tem-se os valores de fator de potência diários após a instalação do SFCR. Nota-se que a curva rosa do fator de potência soma possui valores entre 0,35 e 1. O dia 9 de novembro, onde é observado os menores valores do fator de potência, foi um domingo.

**Figura 23-** Fator de Potência do Fórum após a instalação do SFCR.



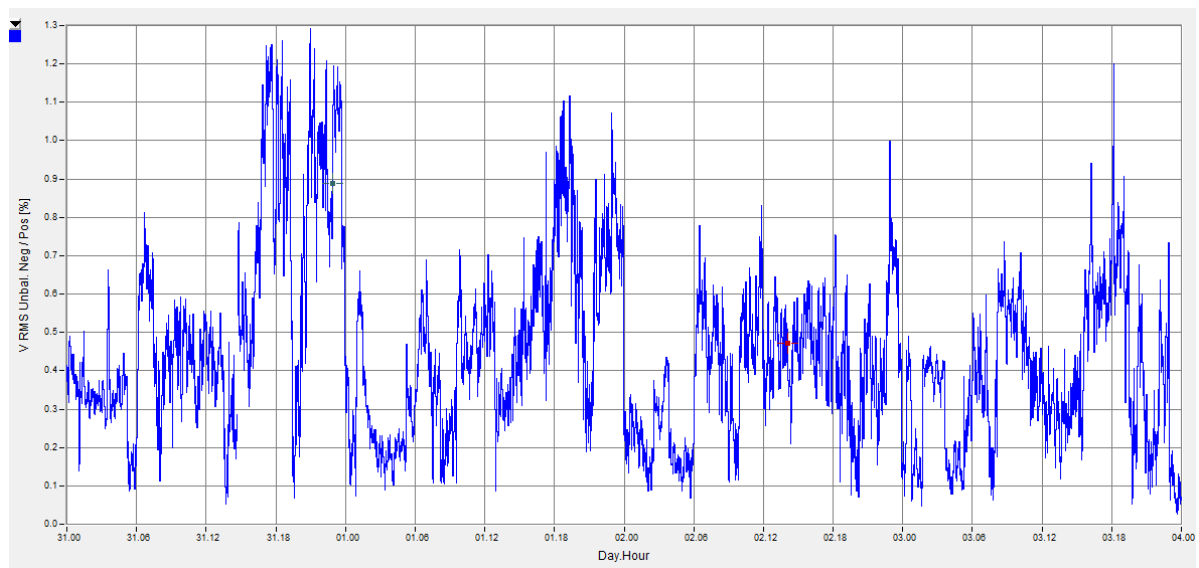
Fonte: Elaboração da própria autora.

#### 4.2.3 Desequilíbrio de tensão

Neste tópico serão apresentados os resultados do desequilíbrio de tensão antes e após a instalação do SFCR.

Na figura 25, tem-se a curva do desequilíbrio de tensão antes da instalação dos SFCR. Nota-se que os valores não ultrapassam 1,3%.

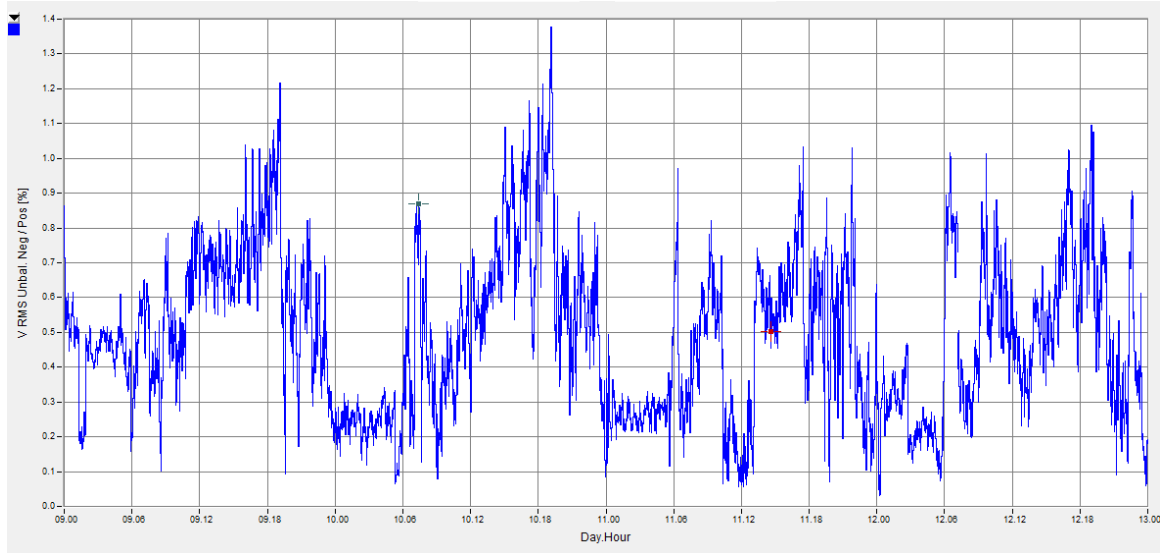
**Figura 24-** Desequilíbrio de Tensão do Fórum antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Na figura 26, tem-se a curva do desequilíbrio de tensão após a instalação do SFCR. Nota-se que os valores aumentam ligeiramente, entretanto não ultrapassam o valor de 1,4%.

**Figura 25-** Desequilíbrio de Tensão do Fórum após a instalação do SFCR.



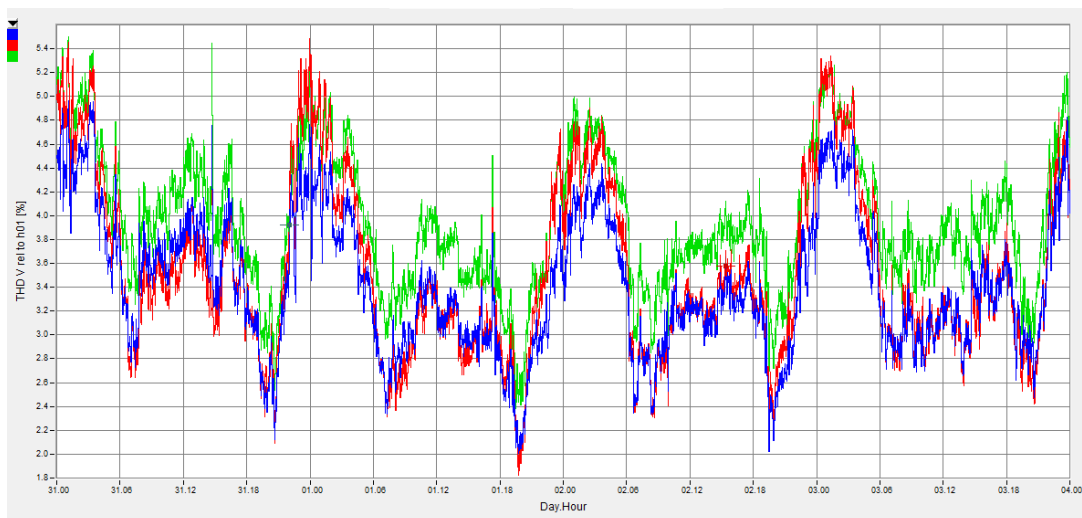
Fonte: Elaboração da própria autora.

#### 4.2.4 Harmônicos de tensão

Neste tópico serão apresentados os resultados de distorção harmônica total da tensão e o espectro da distorção harmônica individual da tensão antes e após a instalação do SFCR. As percentagens são relativas ao valor da tensão fundamental.

Na figura 27 tem-se a curva com os valores de distorção harmônica total da tensão antes da instalação do SFCR. Nota-se que os valores máximos encontrados estão por volta de 5,4%.

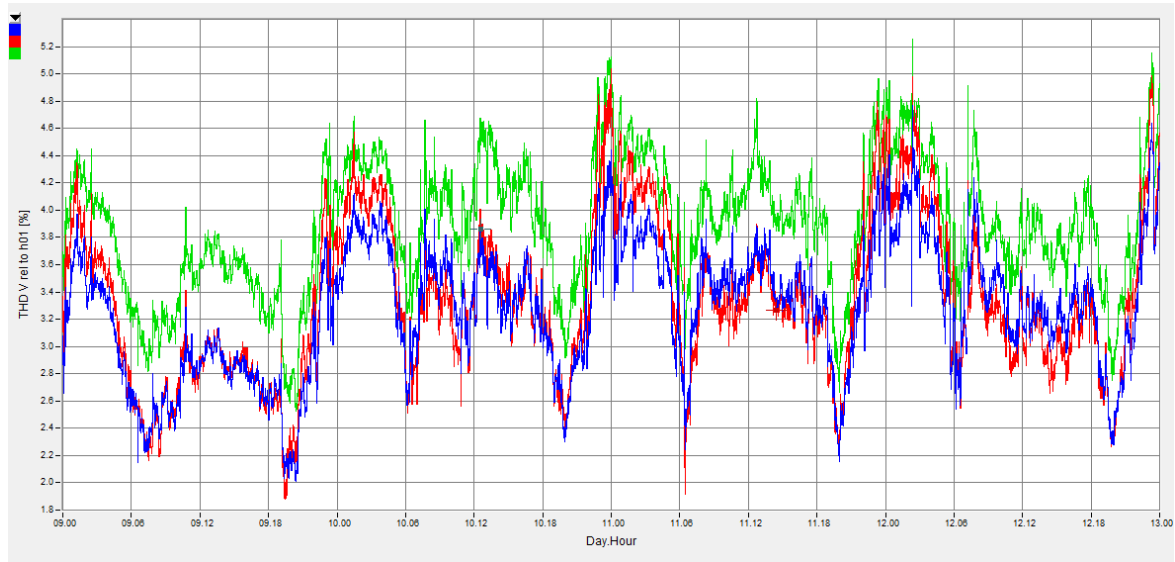
**Figura 26-** DHT da Tensão do Fórum antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Na figura 28 tem-se a curva com os valores de distorção harmônica total da tensão após a instalação do SFCR. Nota-se que os valores máximos encontrados estão por volta de 5,2%, caracterizando uma ligeira melhora em relação aos valores encontrados anteriormente.

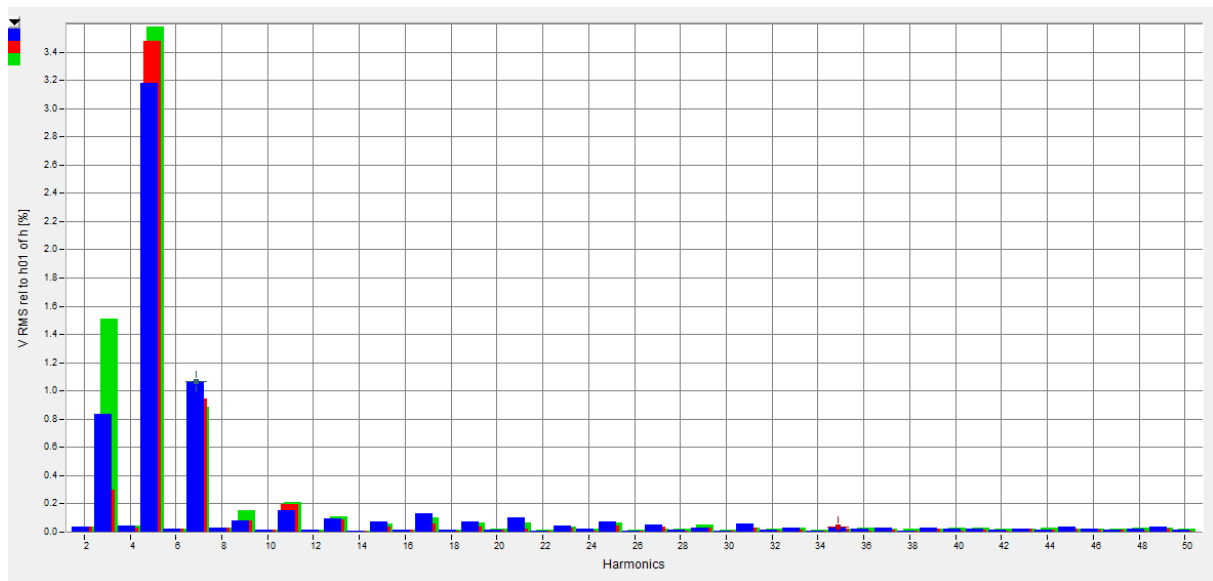
**Figura 27-** DHT da Tensão do Fórum após a instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Na figura 29 tem-se o espectro com os valores de distorção harmônica individual da tensão antes da instalação do SFCR. Comparando-se os valores do espectro com a tabela 2, nota-se que os valores máximos encontrados estão de acordo com os valores de referência.

**Figura 28-** Espectro Harmônico da Tensão do Fórum antes da instalação do SFCR.

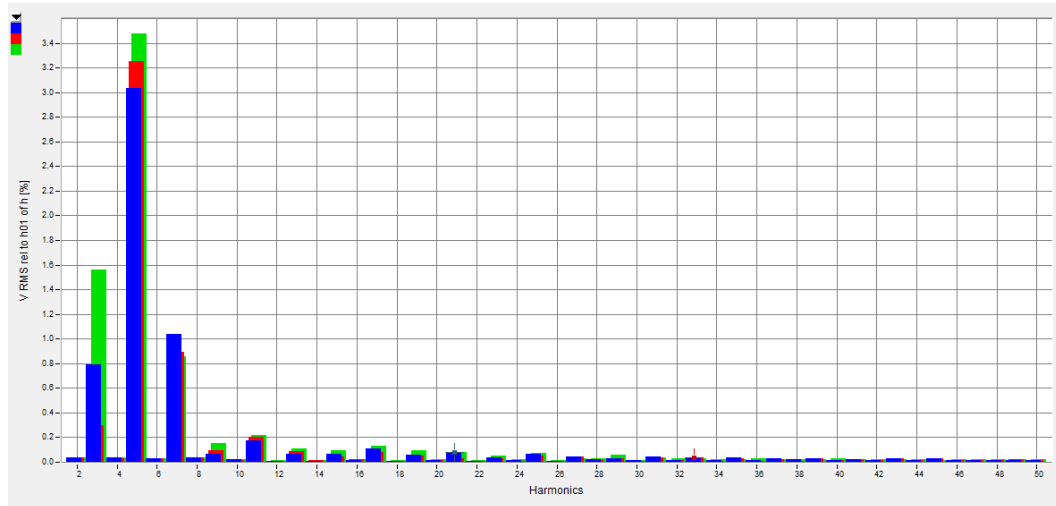


Fonte: Elaboração da própria autora.



Na figura 30 tem-se o espectro com os valores de distorção harmônica individual da tensão após a instalação do SFCR. Comparando-se os valores do espectro com a tabela 2, nota-se que os valores máximos encontrados estão de acordo com os valores de referência. Em geral, observa-se que os valores apresentam pequenas melhoras em relação à figura 29, apesar da terceira harmônica apresentar ligeiro aumento.

**Figura 29-** Espectro Harmônico da Tensão do Fórum após a instalação do SFCR.



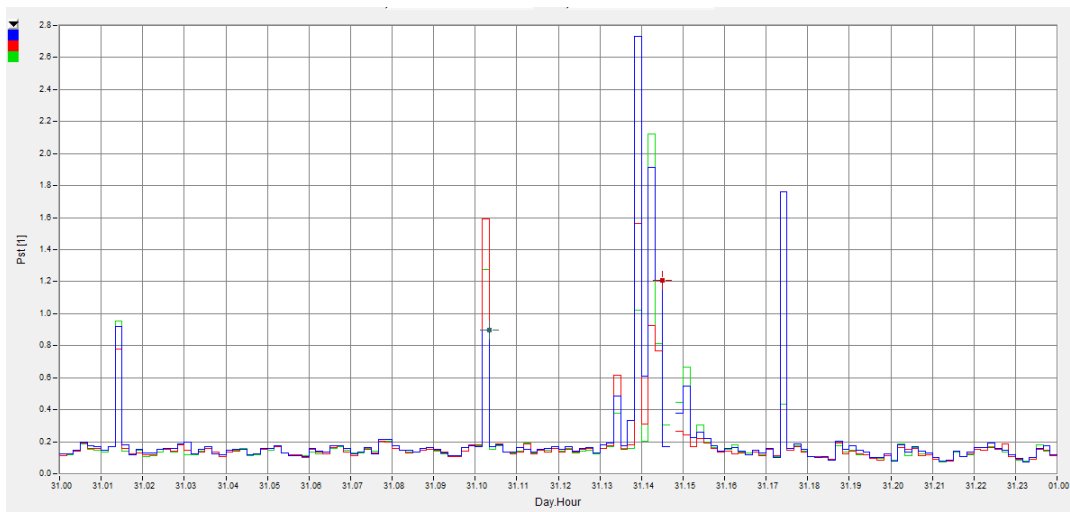
Fonte: Elaboração da própria autora.

#### 4.2.5 Flutuação de tensão

Neste tópico serão apresentados os resultados de flutuação de tensão antes e após a instalação do SFCR. As figuras 31 e 32 apresentam o comportamento do indicador Pst para as duas situações.

Considerando os resultados apresentados na figura 31, tem-se que 97,67% dos valores medidos estão na faixa adequada.

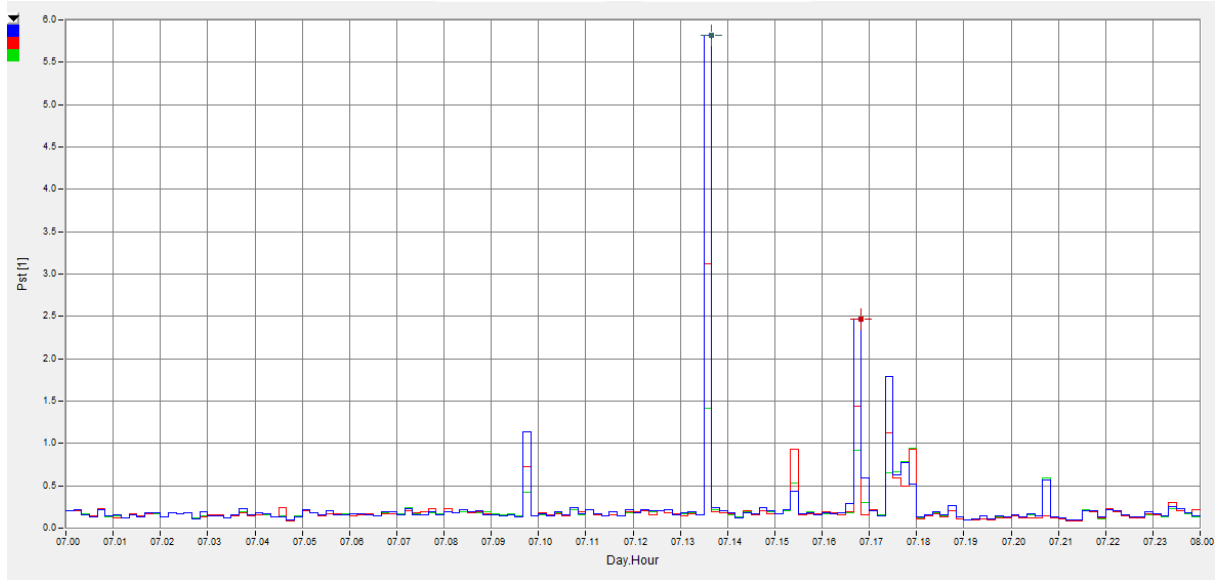
**Figura 30-** Pst do Fórum antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Em relação à figura 32, tem-se que 98,15% dos dados apresentam valores considerados adequados.

**Figura 31-** Pst do Fórum após a instalação do SFCR.

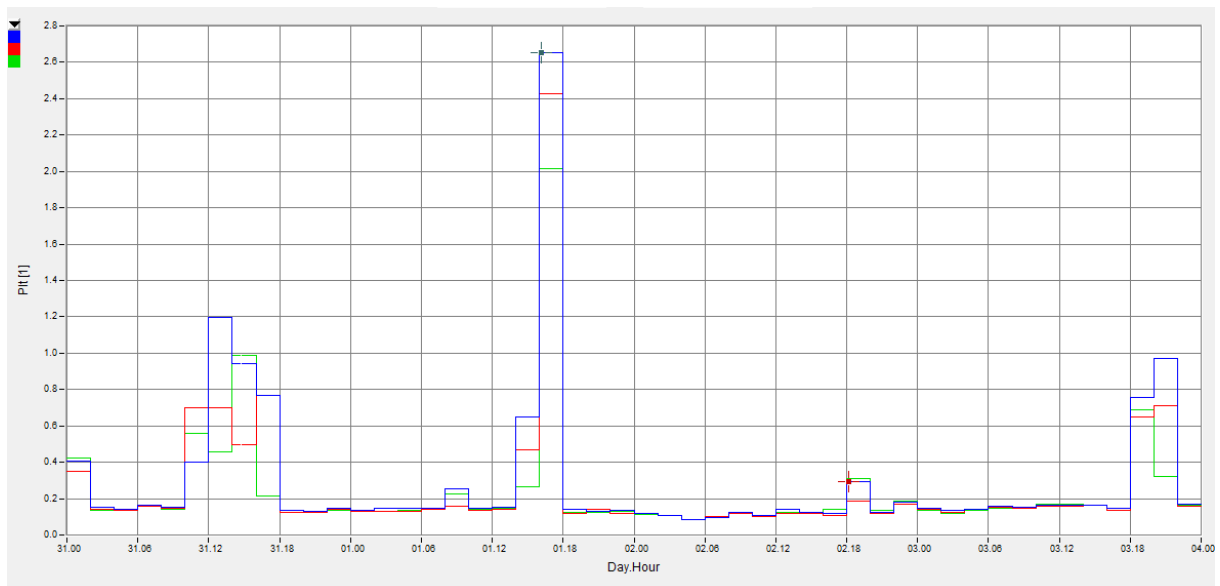


Fonte: Elaboração da própria autora.

Nas figuras 33 e 34 tem-se, respectivamente, o comportamento do indicador Plt para as medições antes e depois da instalação do SFCR.

Tem-se que, considerando a figura 33, 97,21% dos valores medidos podem ser classificados como adequados.

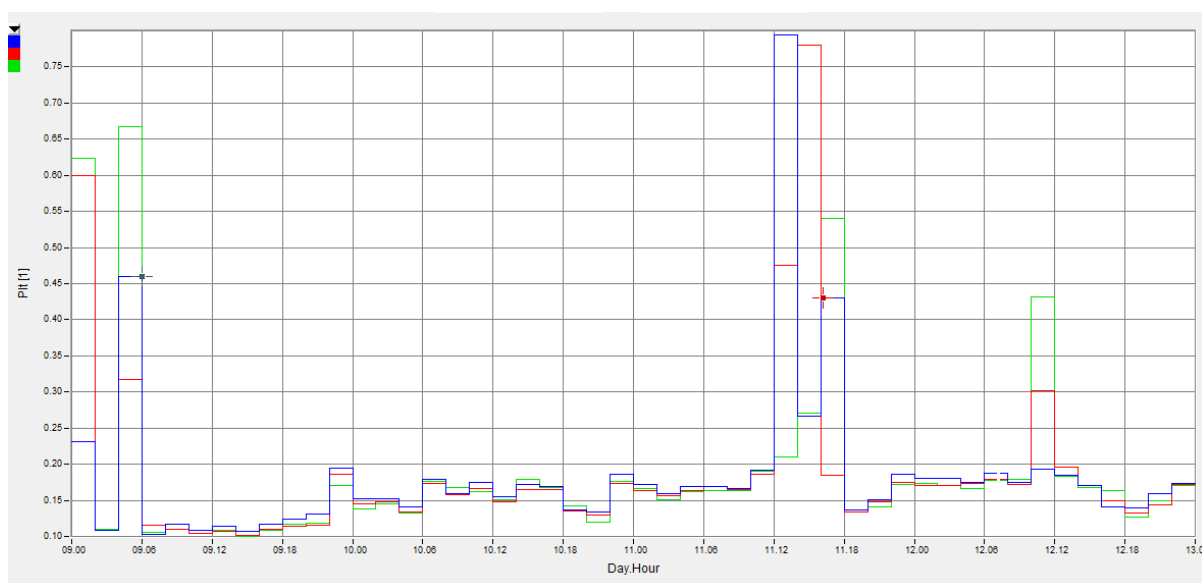
**Figura 32-** Plt do Fórum antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Na figura 34, observa-se que 100% dos dados se encontram dentro da faixa adequada.

**Figura 33-** Plt do Fórum após a instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

#### 4.2.6 Análise dos resultados

Com os resultados apresentados nesse item 4.2, tem-se que, para as variações do valor eficaz da tensão, o seu valor médio apresentou um pequeno aumento em comparação com os valores apresentados antes da instalação do SFCR, sendo que, em um momento da medição, observou-se um valor que ultrapassou o limite crítico para tensões em regime permanente, entretanto esse valor não chega a ser classificado como variação da tensão de curta duração.

Para os valores máximos da tensão eficaz, antes da instalação do SFCR, observa-se um valor que ultrapassou o limite precário para tensões em regime permanente, apesar disso, todos os outros valores estavam dentro do limite adequado. Por outro lado, quando o SFCR foi instalado, observou-se um ligeiro aumento nos valores das tensões e o limite crítico foi ultrapassado em três situações distintas, apesar de não serem considerados variações da tensão de curta duração.

Nessas duas situações, onde o valor máximo é ultrapassado, observa-se um comportamento característico do SFCR, pois, como foi visto no capítulo 2, com a sua instalação, tem-se uma elevação no nível da tensão que podem ocasionar valores fora dos limites, apesar desse efeito ser indireto.

Para os valores mínimos da tensão eficaz, antes da instalação do SFCR, observam-se oito afundamentos temporários de tensão. Já nas medições após a instalação, têm-se três

afundamentos temporários de tensão. Essa diminuição nos afundamentos pode ser atribuída ao efeito indireto do SFCR em elevar o nível da tensão.

O fator de potência antes da instalação do SFCR apresentava valores muito próximos de 1, o que é considerado excelente. Entretanto, quando o sistema foi instalado, o fator de potência apresentou um valor próximo de 0,35 no fim de semana. Como nesses dias o valor da carga no consumidor é mínimo e o SFCR não fornece potência reativa, tem-se que pode-se observar uma redução no fator de potência na conexão do sistema com a rede de distribuição.

Os valores de desequilíbrio de tensão encontrados nas curvas antes e após a instalação do SFCR são menores do que 2%, valor utilizado por várias normas internacionais e bem menores que os 3% que provavelmente será utilizado no módulo 8 do PRODIST para baixas tensões. Observa-se um ligeiro aumento no desequilíbrio, entretanto não foi um fator impactante nesse caso.

Sobre os harmônicos de tensão, pode-se observar que os valores tanto da distorção harmônica total quanto do espectro das componentes harmônicas apresentaram ligeira melhora após a instalação do SFCR. Com o aumento no nível da tensão, esse era um resultado esperado. Tem-se que os valores encontrados respeitam a norma.

Os índices Pst e Plt apresentaram uma melhora após a instalação do SFCR pois estão diretamente ligados às variações da tensão. Como ocorreram menos afundamentos, conseqüentemente, a flutuação de tensão foi menor, apresentando mais valores de Pst e Plt dentro da faixa adequada. Desta forma, quando o SFCR é indiretamente responsável pelo aumento do nível da tensão, diminuindo as variações, esse efeito também será responsável por uma melhora nos índices de flutuação de tensão.

#### 4.3 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES NA ESCOLA MUNICIPAL

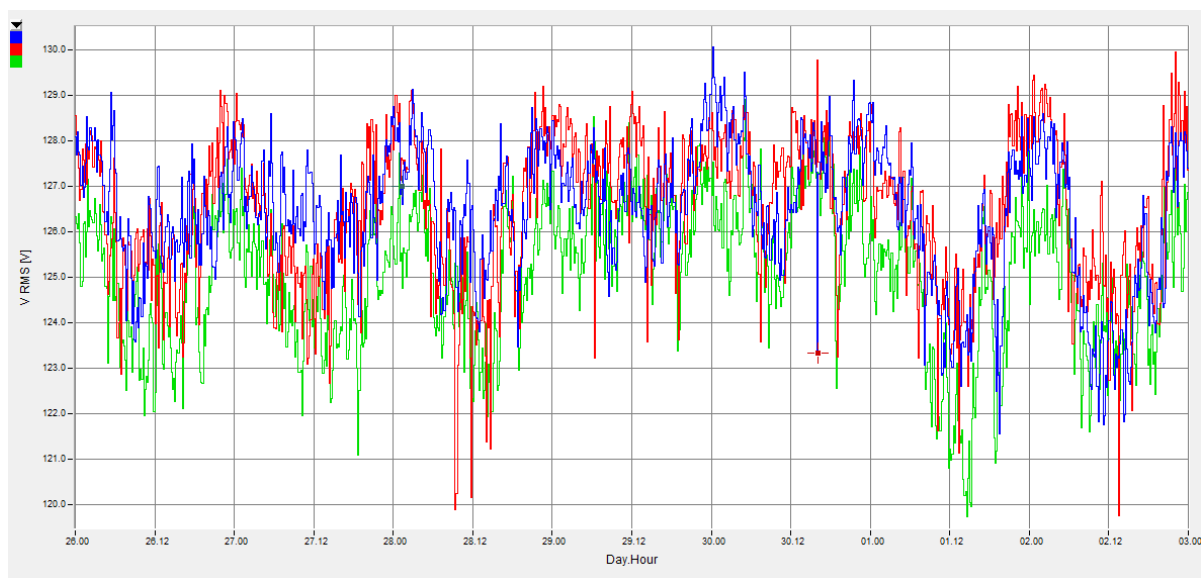
As medições na Escola Municipal foram realizadas entre os dias 26 de novembro e 03 de dezembro de 2014, antes da instalação do SFCR, e entre os dias 04 e 11 de dezembro de 2014, após a instalação, de acordo com a metodologia apresentada anteriormente. Em todas as figuras, as curvas com as cores azul, vermelha e verde representam as três fases L1, L2 e L3. A seguir tem-se os resultados para a variação da tensão, fator de potência, desequilíbrio de tensão, harmônicos de tensão e flutuação da tensão.

### 4.3.1 Variação da tensão

Neste tópico serão apresentados os resultados das variações do valor eficaz da tensão antes e após a instalação do SFCR. As linhas amarela e marrom representam, respectivamente, os limites crítico e precário dos valores de referência da tensão em regime permanente apresentados na tabela 1.

A curva da variação do valor eficaz médio da tensão está representada na figura 35 antes da instalação do SFCR. Pode-se observar que os valores das três fases permanecem dentro dos limites estabelecidos no módulo 8 do PRODIST .

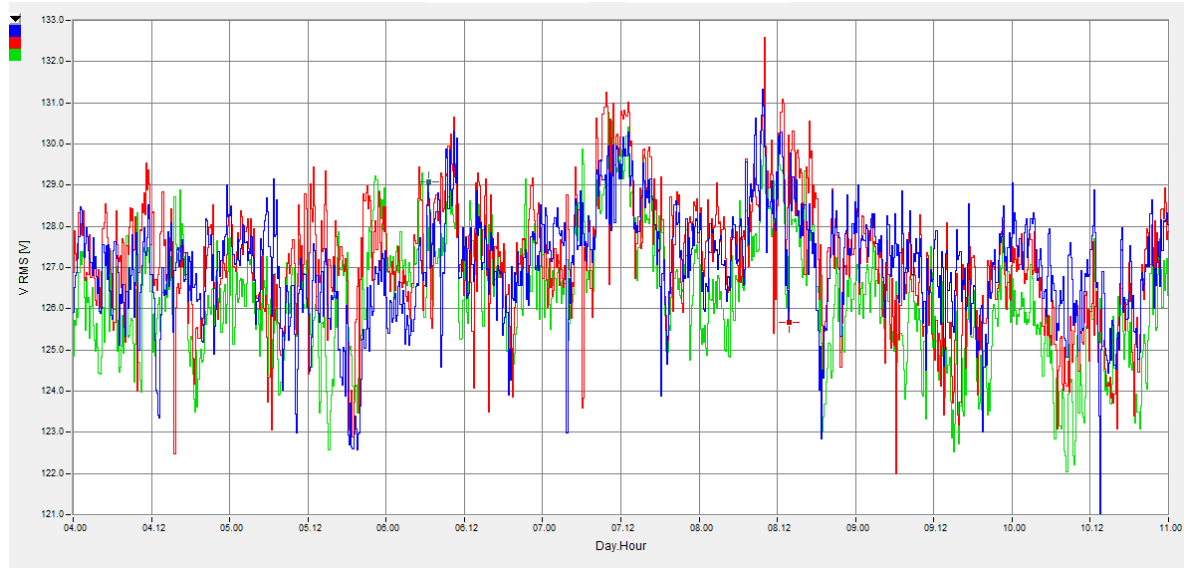
**Figura 34-** Tensão RMS média da Escola antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

A curva da variação do valor eficaz médio da tensão está representada na figura 36, após a instalação do SFCR. Pode-se observar que os limites não são ultrapassados, entretanto nota-se que os valores das tensões estão um pouco maiores que os encontrados antes da instalação do SFCR.

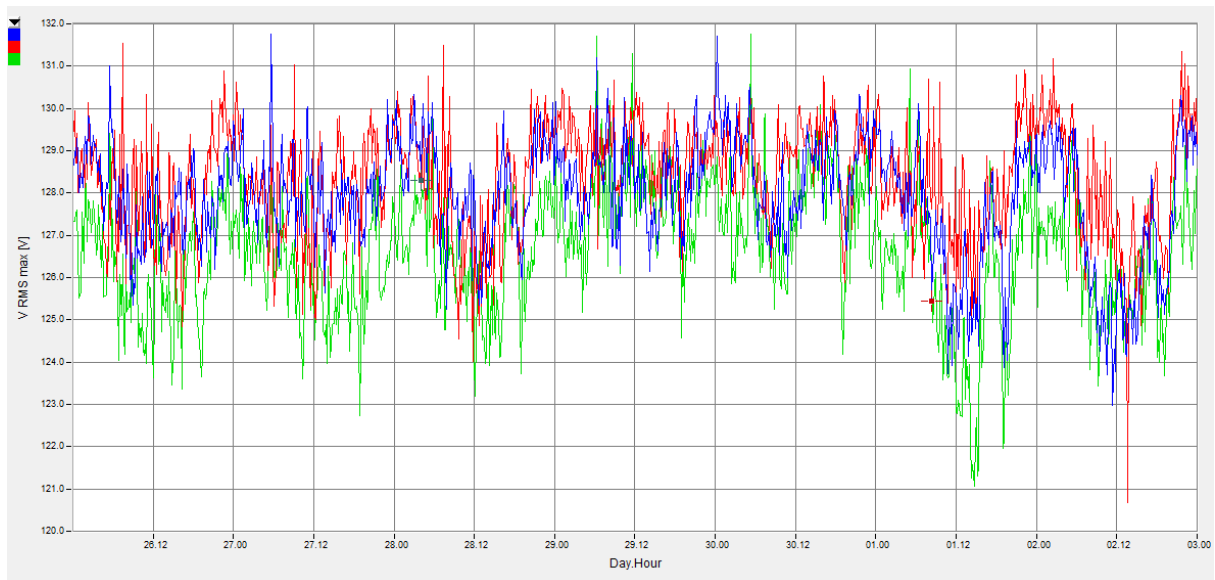
**Figura 35-** Tensão RMS média da Escola após a instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Ao se observar a curva da variação do valor eficaz máximo da tensão antes do SFCR, representada na figura 37, tem-se que os limites máximos da tabela 1 e da figura 14 não foram ultrapassados.

**Figura 36-** Tensão RMS máximo da Escola antes da instalação do SFCR.

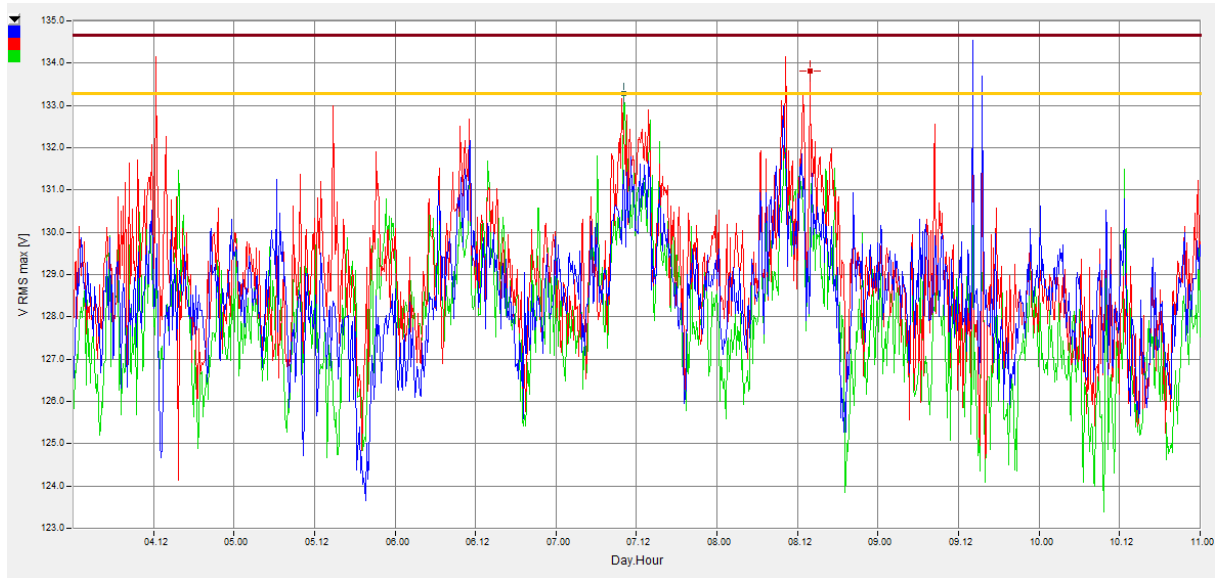


Fonte: Elaboração da própria autora.

Ao se observar a curva da variação do valor eficaz máximo da tensão após o SFCR, representada na figura 38, tem-se que os limites máximos foram ultrapassados. Nota-se que após a instalação do SFCR os valores da tensão estão um pouco maiores que os encontrados

antes e esse aumento foi suficiente para que em alguns momentos a tensão apresente valores fora da referência estabelecida para a tensão em regime permanente. Não foram apresentados valores que caracterizassem como variações de curta duração.

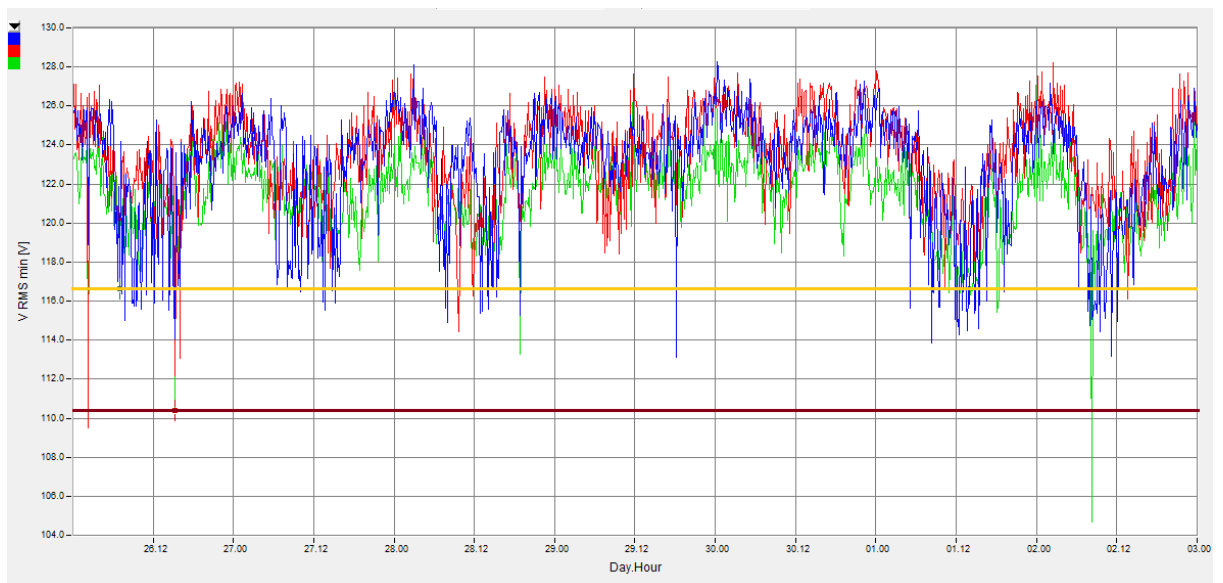
**Figura 37-** Tensão RMS máximo da Escola após a instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

A curva da variação do valor eficaz mínimo da tensão antes do SFCR, representada na figura 39, apresenta alguns valores fora dos limites crítico e precário determinados na norma. Observam-se quatro afundamentos temporários de tensão e quatro subtensões.

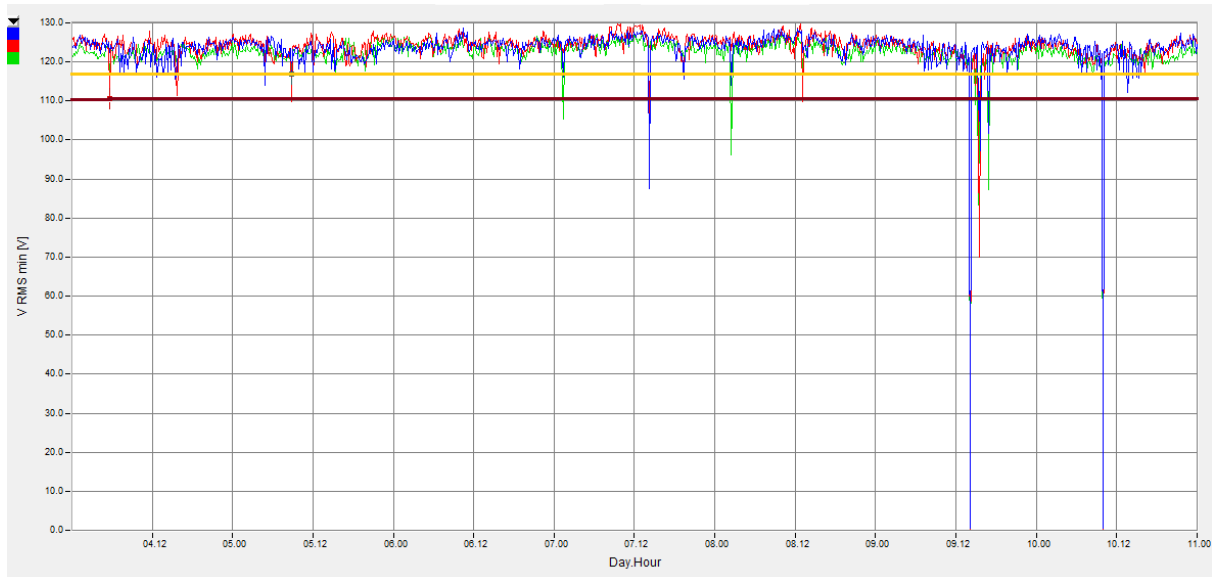
**Figura 38-** Tensão RMS mínimo da Escola antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

A curva da variação do valor eficaz mínimo da tensão após o SFCR, representada na figura 40, apresenta alguns valores fora dos limites determinados na norma. Observa-se um afundamento temporário de tensão, onze subtensões e duas interrupções de longa duração. As duas interrupções apresentaram uma duração de aproximadamente 20 minutos cada.

**Figura 39-** Tensão RMS mínimo da Escola após a instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

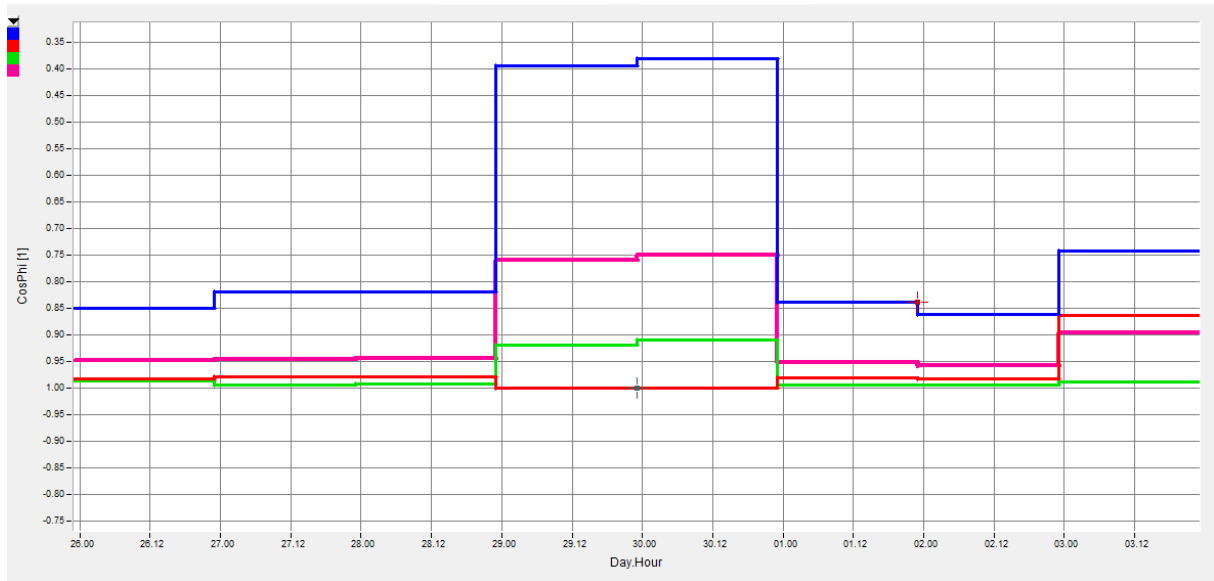
### 4.3.2 Fator de potência

Neste tópico serão apresentados os resultados do valor médio diário do fator de potência antes e após a instalação dos SFCR. A curva de cor rosa representa o fator de potência soma das três fases.

Na figura 41 tem-se os valores de fator de potência diários antes da instalação do SFCR. Nota-se que a curva rosa do fator de potência soma possui valores entre 0,75 e 0,95. Os dias 29 e 30 de novembro, onde são observados os menores valores do fator de potência, foram, respectivamente, sábado e domingo.



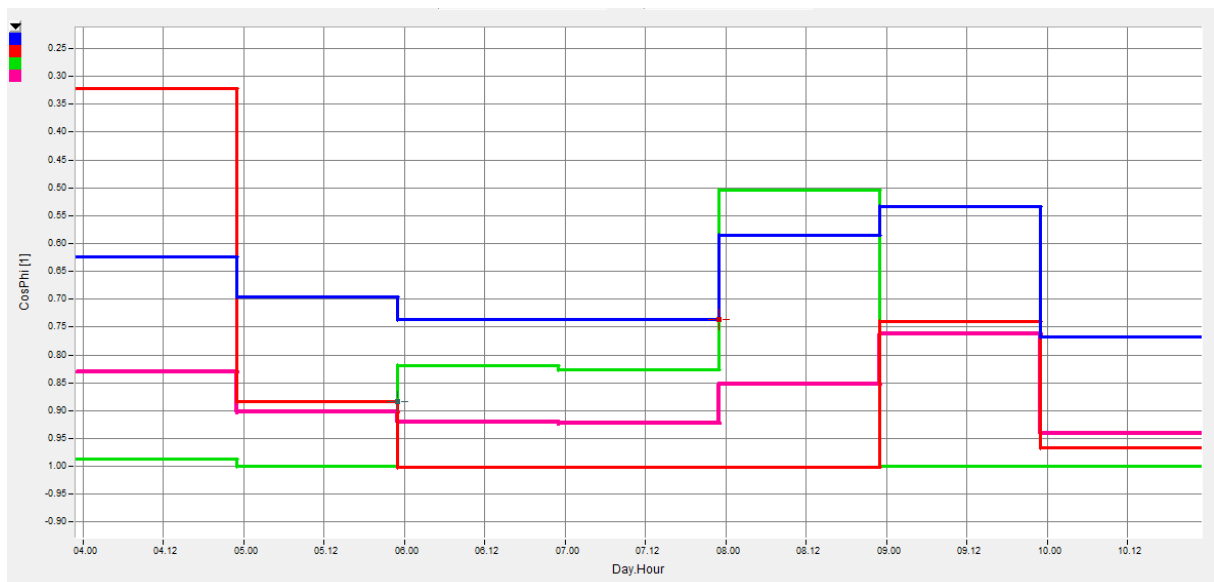
**Figura 40-** Fator de Potência da Escola antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Na figura 42 tem-se os valores de fator de potência diários após a instalação do SFCR. Nota-se que a curva rosa do fator de potência soma possui valores entre 0,75 e 0,94. Os dias 6 e 7 de dezembro foram, respectivamente, sábado e domingo.

**Figura 41-** Fator de Potência da Escola após a instalação do SFCR.



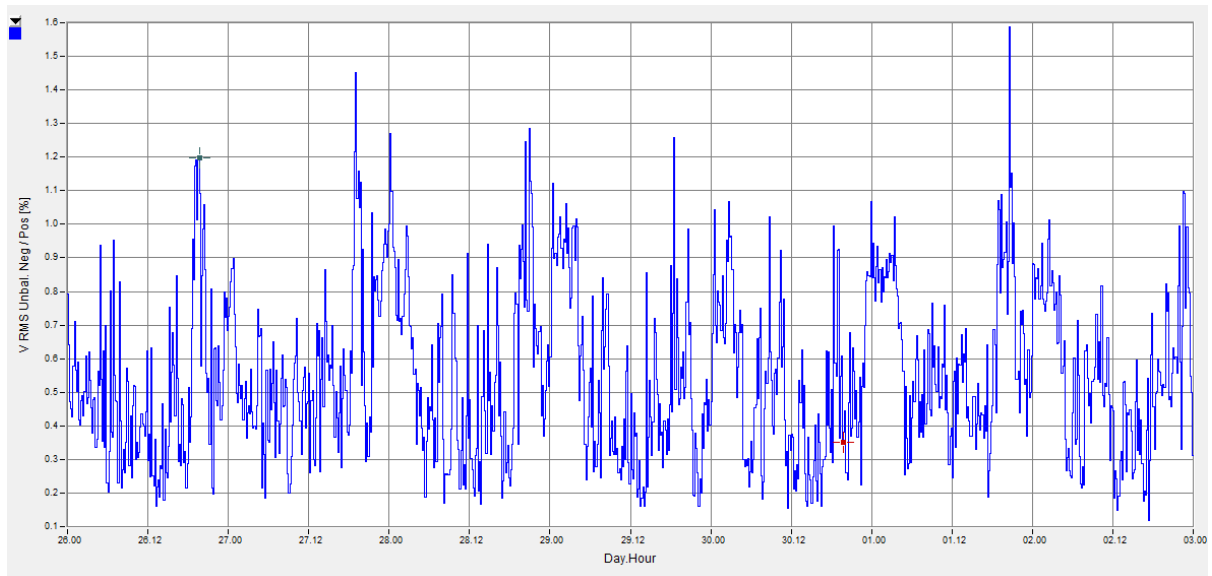
Fonte: Elaboração da própria autora.

### 4.3.3 Desequilíbrio de tensão

Neste tópico serão apresentados os resultados do desequilíbrio de tensão antes e após a instalação do SFCR.

Na figura 43, tem-se a curva do desequilíbrio de tensão antes da instalação dos SFCR. Nota-se que os valores não ultrapassam 1,6%.

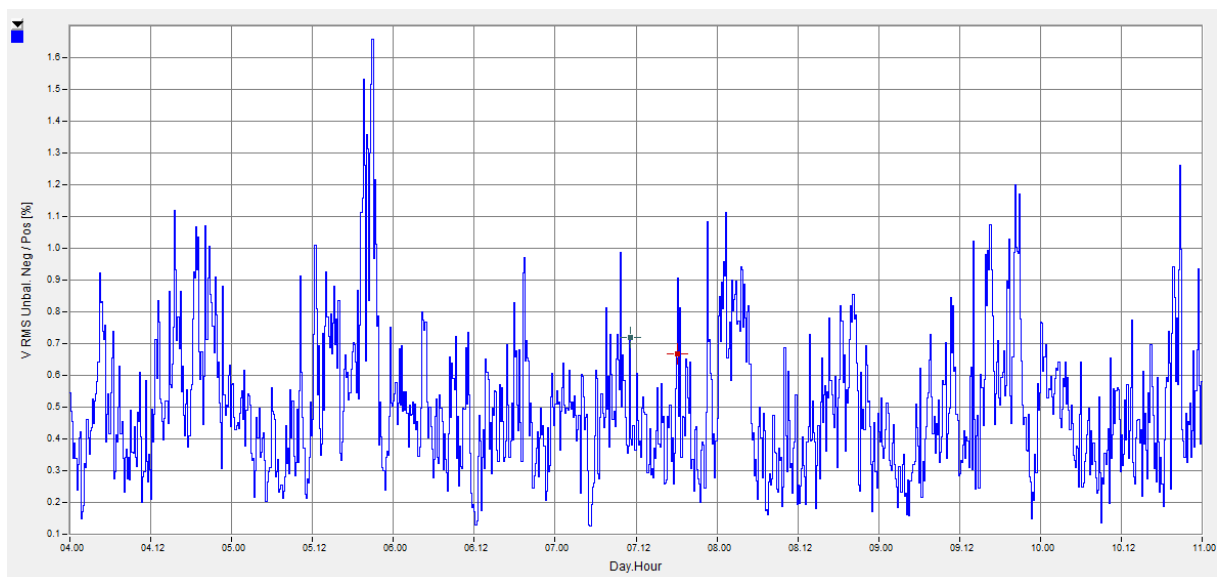
**Figura 42-** Desequilíbrio de Tensão da Escola antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Na figura 44, tem-se a curva do desequilíbrio de tensão após a instalação do SFCR. Nota-se que os valores aumentam ligeiramente, entretanto não ultrapassam o valor de 1,7%.

**Figura 43-** Desequilíbrio de Tensão da Escola após a instalação do SFCR.



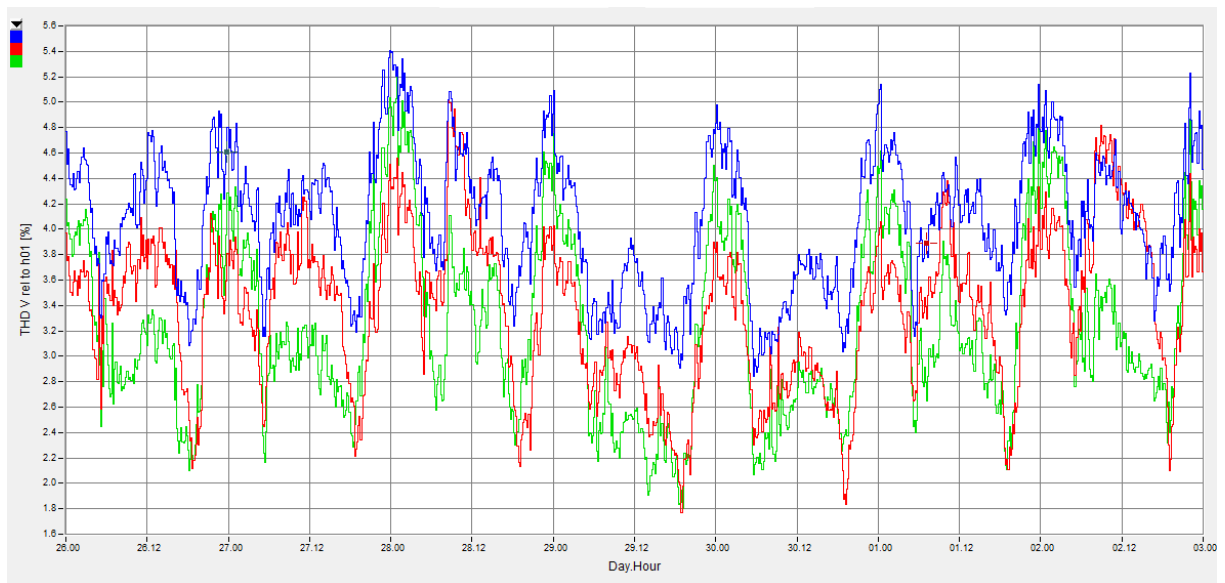
Fonte: Elaboração da própria autora.

#### 4.3.4 Harmônicos de tensão

Neste tópico serão apresentados os resultados de distorção harmônica total da tensão e o espectro da distorção harmônica individual da tensão antes e após a instalação do SFCR. As percentagens são relativas ao valor da tensão fundamental.

Na figura 45 tem-se a curva com os valores de distorção harmônica total da tensão antes da instalação do SFCR. Nota-se que os valores máximos encontrados estão por volta de 5,4%.

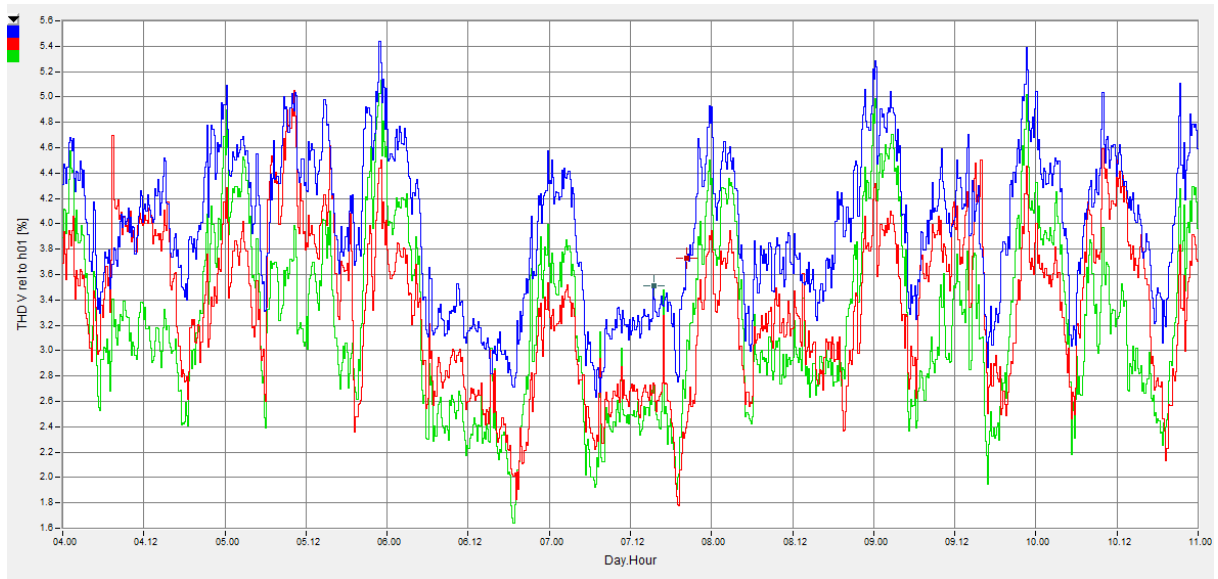
**Figura 44-** DHT da Tensão da Escola antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Na figura 46 tem-se a curva com os valores de distorção harmônica total da tensão após a instalação do SFCR. Nota-se que os valores máximos encontrados estão por volta de 5,5%, entretanto não se observa grandes mudanças em comparação com as medições anteriores.

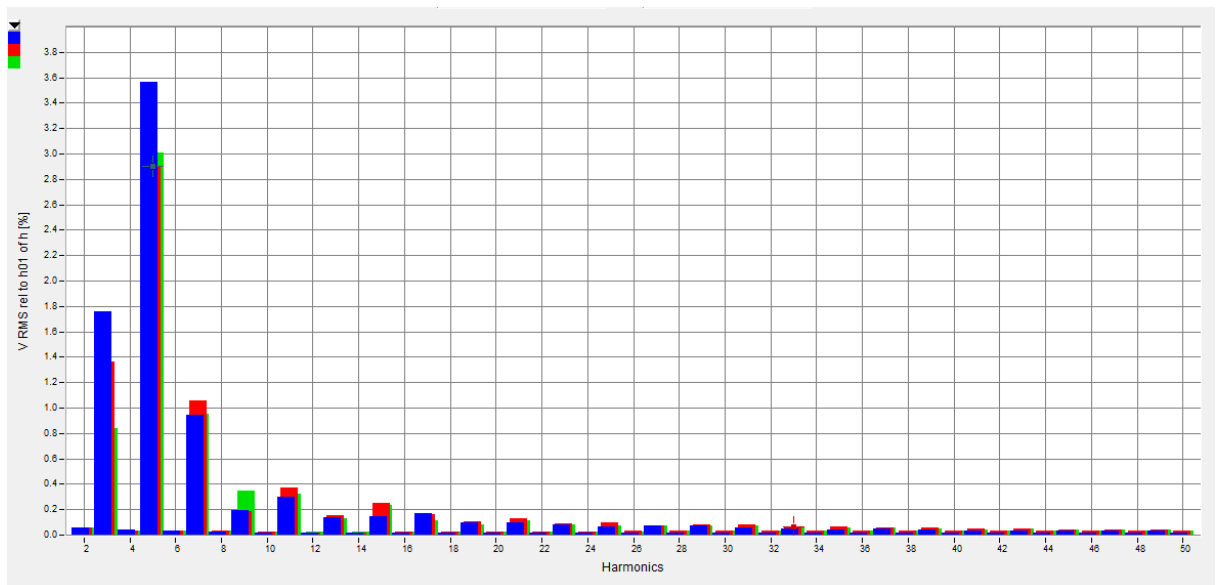
**Figura 45-** DHT da Tensão da Escola após a instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Na figura 47 tem-se espectro com os valores de distorção harmônica individual da tensão antes da instalação do SFCR. Comparando-se os valores do espectro com a tabela 2, nota-se que os valores máximos encontrados estão de acordo com os valores de referência.

**Figura 46-** Espectro Harmônico da Tensão da Escola antes da instalação do SFCR.

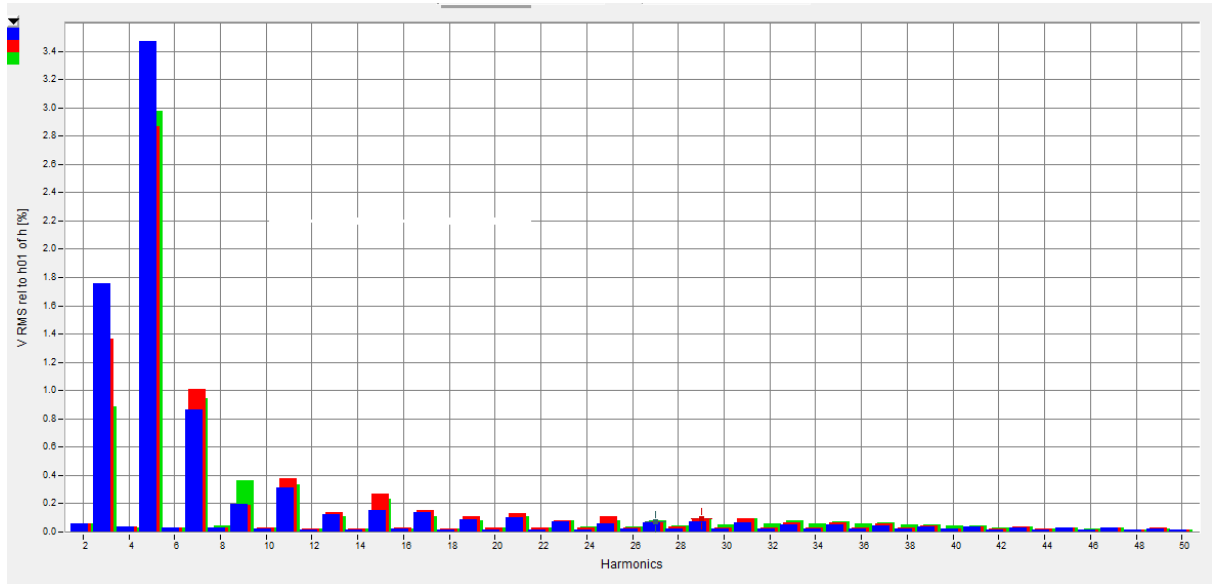


Fonte: Elaboração da própria autora.

Na figura 48 tem-se espectro com os valores de distorção harmônica individual da tensão após a instalação do SFCR. Comparando-se os valores do espectro com a tabela 2, nota-

se que os valores máximos encontrados estão de acordo com os valores de referência. Observa-se também que os valores não apresentam mudanças significativas em relação à figura 47.

**Figura 47-** Espectro Harmônico da Tensão da Escola após a instalação do SFCR.



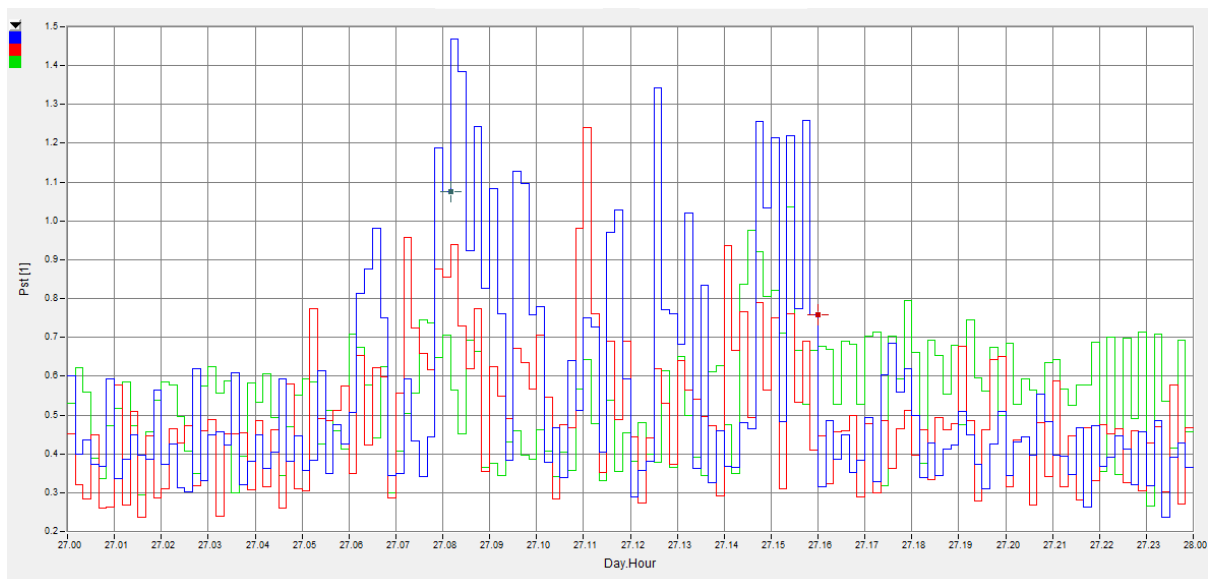
Fonte: Elaboração da própria autora.

### 4.3.5 Flutuação de tensão

Neste tópico serão apresentados os resultados de flutuação de tensão antes e após a instalação do SFCR. As figuras 49 e 50 apresentam o comportamento do indicador Pst para as duas situações.

Dos dados apresentados na figura 49 tem-se que 95,83% dos valores são classificados como adequados.

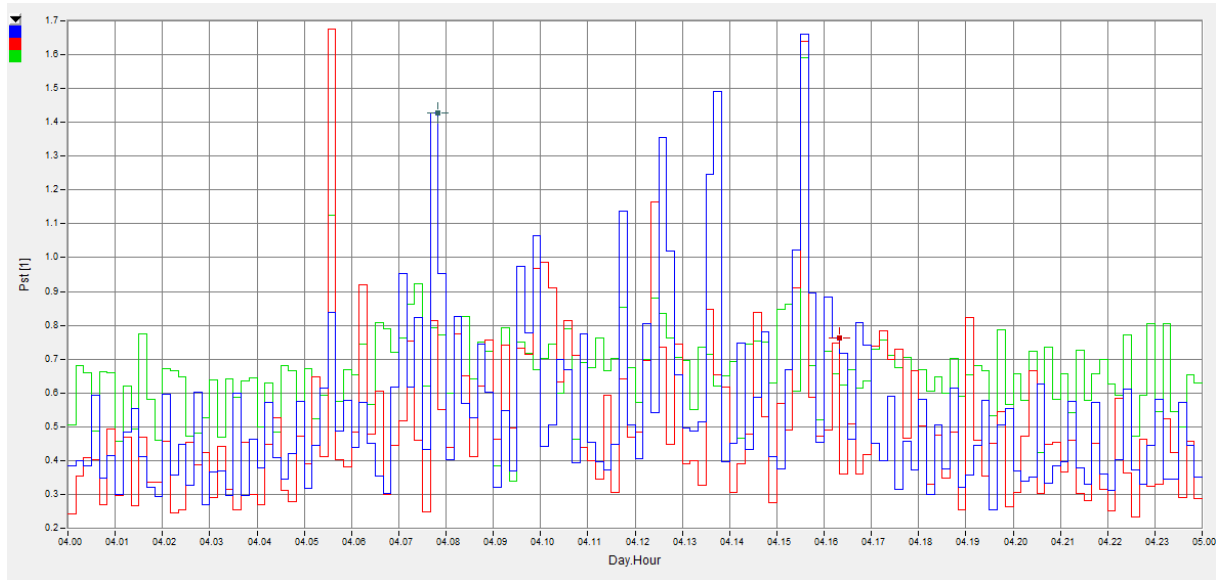
**Figura 48-** Pst da Escola antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

A figura 50 apresenta os dados do indicador Pst após a instalação do SFCR. Tem-se que 96,76% dos valores medidos são adequados.

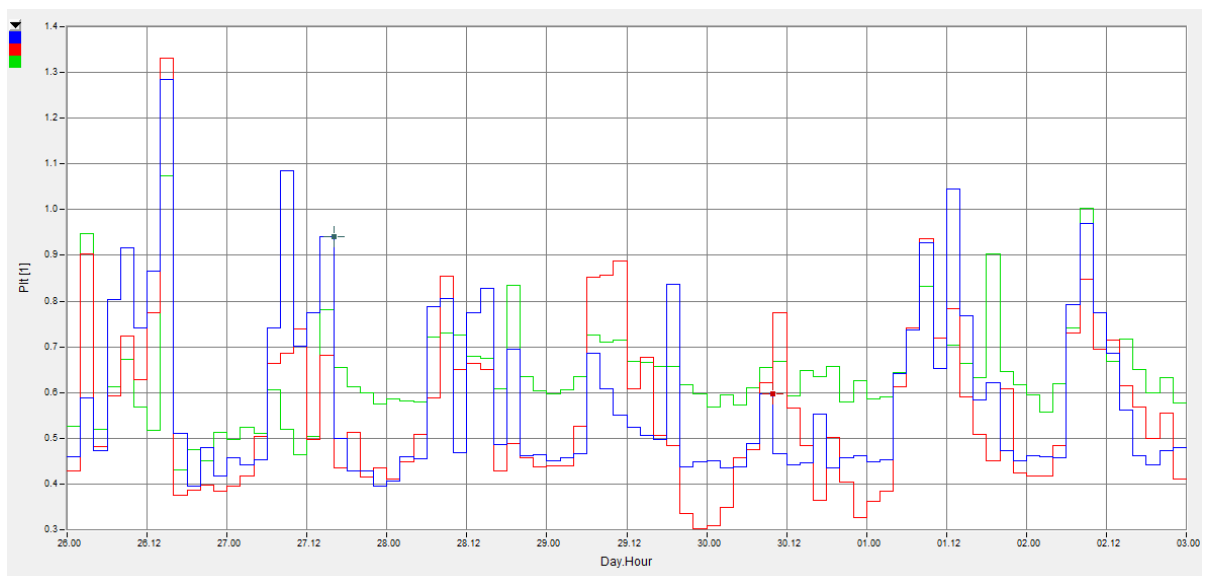
**Figura 49-** Pst da Escola após a instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Nas figuras 51 e 52 tem-se o comportamento do indicador Plt. Na figura 51, onde são apresentadas as medições antes da instalação do SFCR, tem-se que 97,62% dos valores se enquadram na faixa adequada.

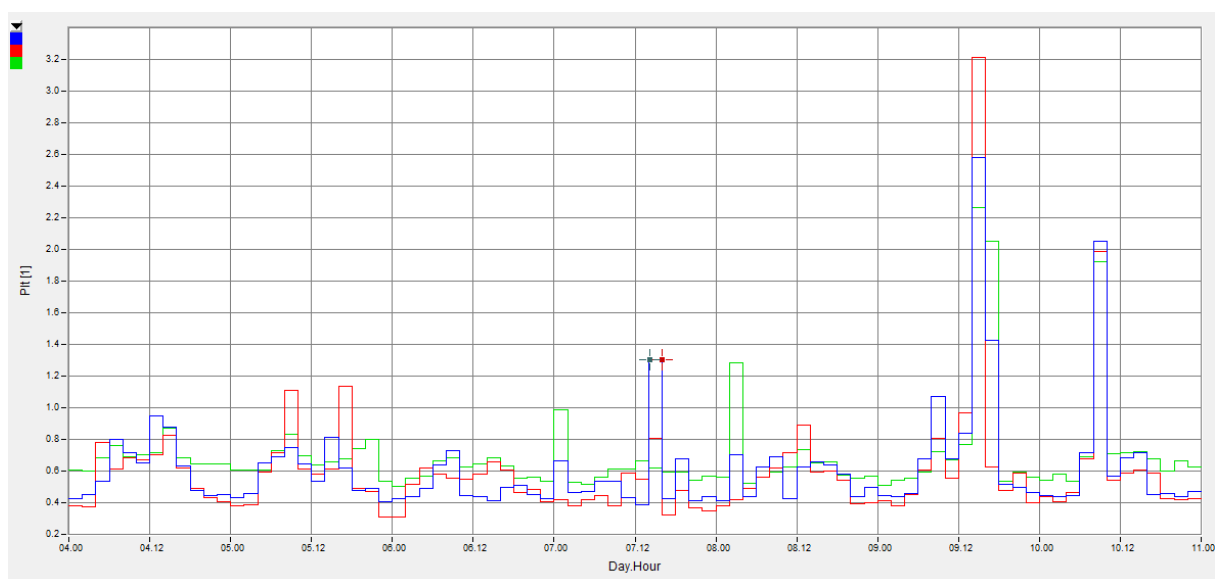
**Figura 50-** Plt da Escola antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Já na figura 52, 94,84% das medições se situam em valores adequados.

**Figura 51-** Plt da Escola após a instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

#### 4.3.6 Análise dos resultados

Com os resultados apresentados nesse item 4.3, tem-se que, para as variações do valor eficaz da tensão, o seu valor médio apresentou um pequeno aumento em comparação com os valores apresentados antes da instalação do SFCR, entretanto, nenhum valor ultrapassou os limites estabelecidos.

Para os valores máximos da tensão eficaz, antes da instalação do SFCR, observa-se que nenhum valor ultrapassou os limites para tensões em regime permanente. Por outro lado, quando o SFCR foi instalado, observou-se um ligeiro aumento nos valores das tensões e o limite crítico foi ultrapassado em alguns momentos, apesar de não serem considerados variações da tensão de curta duração.

Nessas situações, onde o valor máximo é ultrapassado, observa-se um comportamento característico do SFCR, pois, como foi visto no capítulo 2, com a sua instalação, tem-se uma elevação no nível da tensão que pode ocasionar valores fora dos limites, apesar desse efeito ser indireto.

Para os valores mínimos da tensão eficaz, antes da instalação do SFCR, observam-se quatro afundamentos temporários de tensão e quatro subtensões. Já nas medições após a instalação, têm-se um afundamento temporário de tensão, onze subtensões e duas interrupções de 20 minutos cada. Segundo Martinez, os afundamentos de tensão observados em redes de distribuição estão diretamente ligados à atuação dos dispositivos de proteção, então,

provavelmente os problemas encontrados nas medições não foram causados pelo SFCR (MARTINEZ-VELASCO, 2007).

O fator de potência antes da instalação do SFCR apresentava valores entre 0,75 e 0,95. Os menores valores são observados no fim de semana, quando a carga no consumidor em questão é mínima. Quando o sistema foi instalado, o fator de potência apresentou valores entre 0,75 e 0,94. Desta forma, observa-se que o fator de potência não apresentou mudanças consideráveis no seu valor.

Assim como ocorreu nas medições do Fórum, os valores de desequilíbrio de tensão encontrados nas curvas antes e após a instalação do SFCR são menores do que 2%, valor utilizado por várias normas internacionais e bem menores que os 3% que provavelmente será utilizado no módulo 8 do PRODIST para baixas tensões. Observa-se um ligeiro aumento no desequilíbrio, entretanto não foi um fator impactante nesse caso.

Sobre os harmônicos de tensão, pode-se observar que os valores tanto da distorção harmônica total quanto do espectro das componentes harmônicas apresentaram uma ligeira elevação em seus valores após a instalação do SFCR. Essa pequena diferença pode ser atribuída à presença de cargas não lineares conectadas no consumidor ou próximo dele. Apesar disso, os valores encontrados respeitam a norma.

O índice Pst apresentou uma ligeira melhora após a instalação do SFCR, isso ocorreu pois com a elevação do nível da tensão, esperam-se menos flutuações na tensão, entretanto o mesmo não aconteceu com o índice Plt apresentaram uma ligeira piora após a instalação do SFCR pois estão diretamente ligados às diversas variações da tensão que ocorreram no período. Como ocorreram afundamentos, subtensões e interrupções, conseqüentemente, a flutuação de tensão foi maior, apresentando menos valores de Plt dentro da faixa adequada. Desta forma, tem-se que a piora desse parâmetro está ligada às variações de tensão de curta e longa duração.

#### 4.4 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES NA RESIDÊNCIA

As medições na residência foram realizadas entre os dias 13 e 21 de outubro de 2014, antes da instalação do SFCR, e entre os dias 22 e 30 de outubro de 2014, após a instalação, de acordo com a metodologia apresentada anteriormente. Em todas as figuras, as curvas com as cores azul e verde representam as duas fases L1 e L2. A seguir tem-se os resultados para a variação da tensão, fator de potência e harmônicos de tensão.

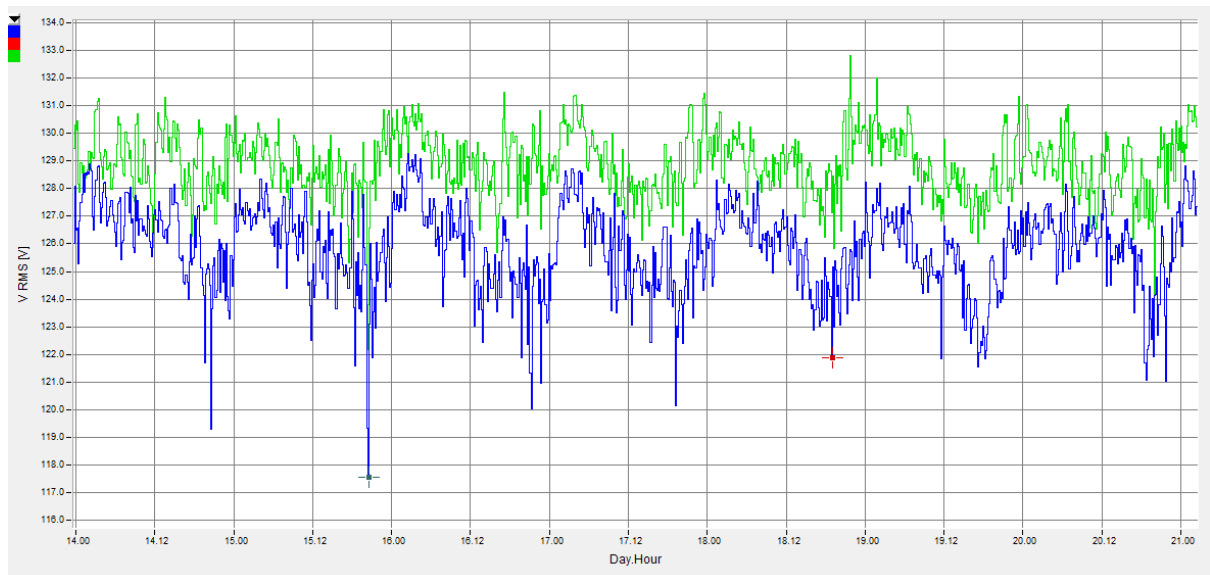


#### 4.4.1 Variação da tensão

Neste tópico serão apresentados os resultados das variações do valor eficaz da tensão antes e após a instalação do SFCR. As linhas amarela e marrom representam, respectivamente, os limites crítico e precário dos valores de referência da tensão em regime permanente apresentados na tabela 1.

A curva da variação do valor eficaz médio da tensão está representada na figura 53 antes da instalação do SFCR. Pode-se observar que os valores das duas fases permanecem dentro dos limites estabelecidos no módulo 8 do PRODIST .

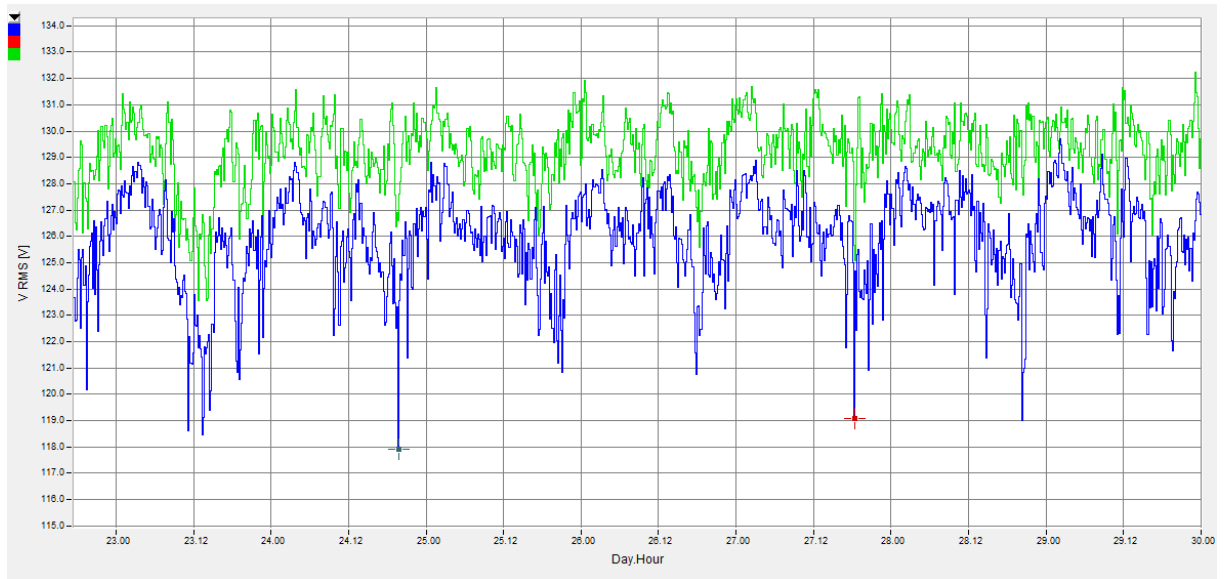
**Figura 52-** Tensão RMS média da Residência antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

A curva da variação do valor eficaz médio da tensão está representada na figura 54, após a instalação do SFCR. Pode-se observar que os limites não são ultrapassados, entretanto nota-se que os valores das tensões estão um pouco maiores que os encontrados antes da instalação do SFCR.

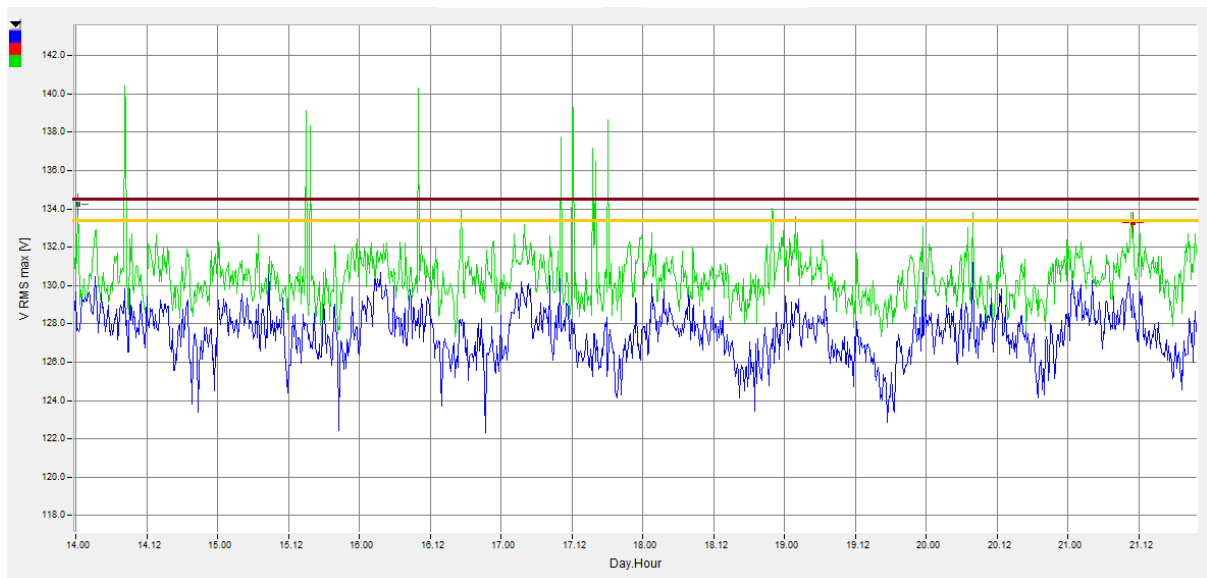
**Figura 53-** Tensão RMS média da Residência após a instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Ao se observar a curva da variação do valor eficaz máximo da tensão antes do SFCR, representada na figura 55, tem-se que os limites máximos da tabela 1 e da figura 14 foram ultrapassados. Tem-se uma medição de sobretensão e uma elevação temporária de tensão.

**Figura 54-** Tensão RMS máximo da Residência antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Ao se observar a curva da variação do valor eficaz máximo da tensão após o SFCR, representada na figura 56, tem-se que os limites máximos foram ultrapassados. Nota-se que após a instalação do SFCR os valores da tensão estão um pouco maiores que os encontrados

antes e esse aumento foi suficiente para que em alguns momentos a tensão apresente valores fora da referência estabelecida pela norma. Notam-se quatro medições de elevação temporária de tensão.

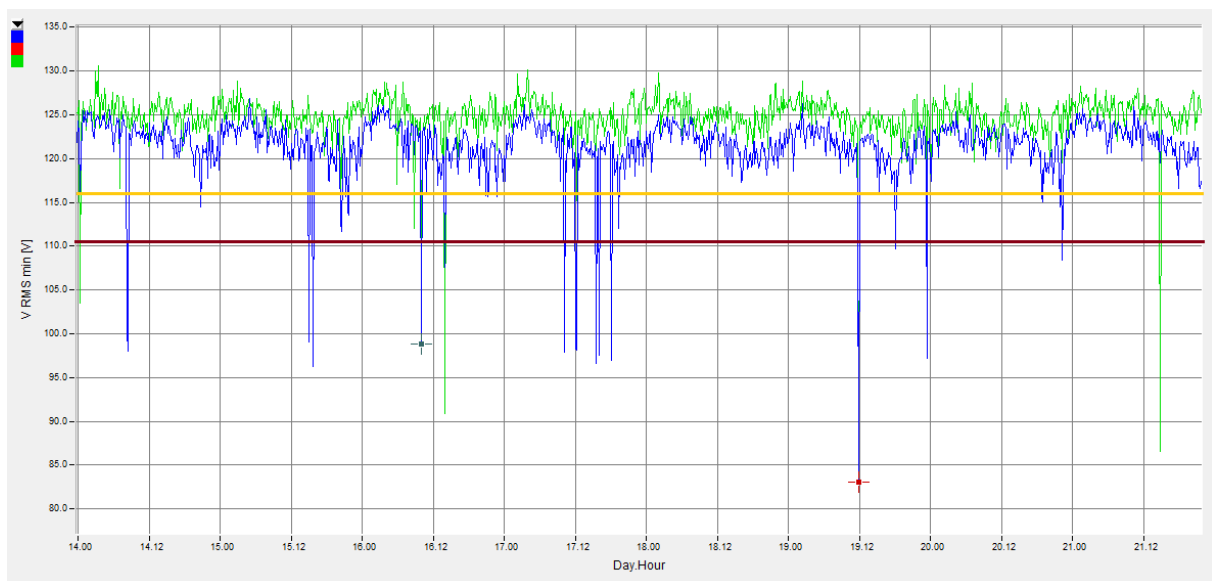
**Figura 55-** Tensão RMS máximo da Residência após a instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

A curva da variação do valor eficaz mínimo da tensão antes do SFCR, representada na figura 57, apresenta alguns valores fora dos limites determinados na norma. São observados três afundamentos temporários de tensão e treze subtensões.

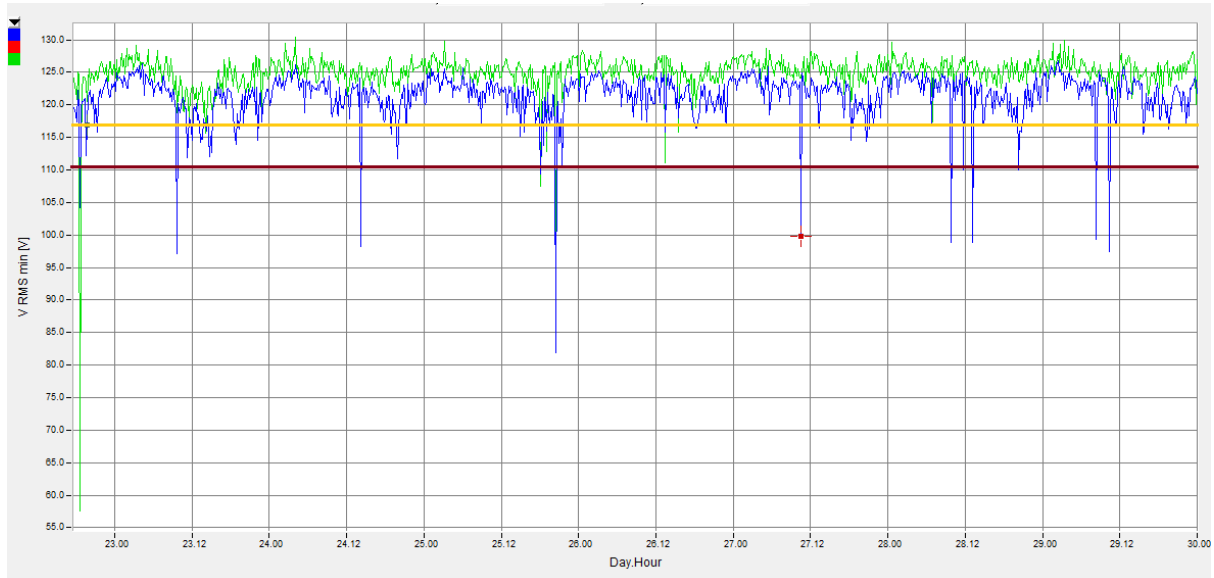
**Figura 56-** Tensão RMS mínimo da Residência antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

A curva da variação do valor eficaz mínimo da tensão após o SFCR, representada na figura 58, apresenta alguns valores fora dos limites determinados na norma. São observados dois afundamentos temporários de tensão e dezenove subtensões.

**Figura 57-** Tensão RMS mínimo da Residência após a instalação do SFCR.



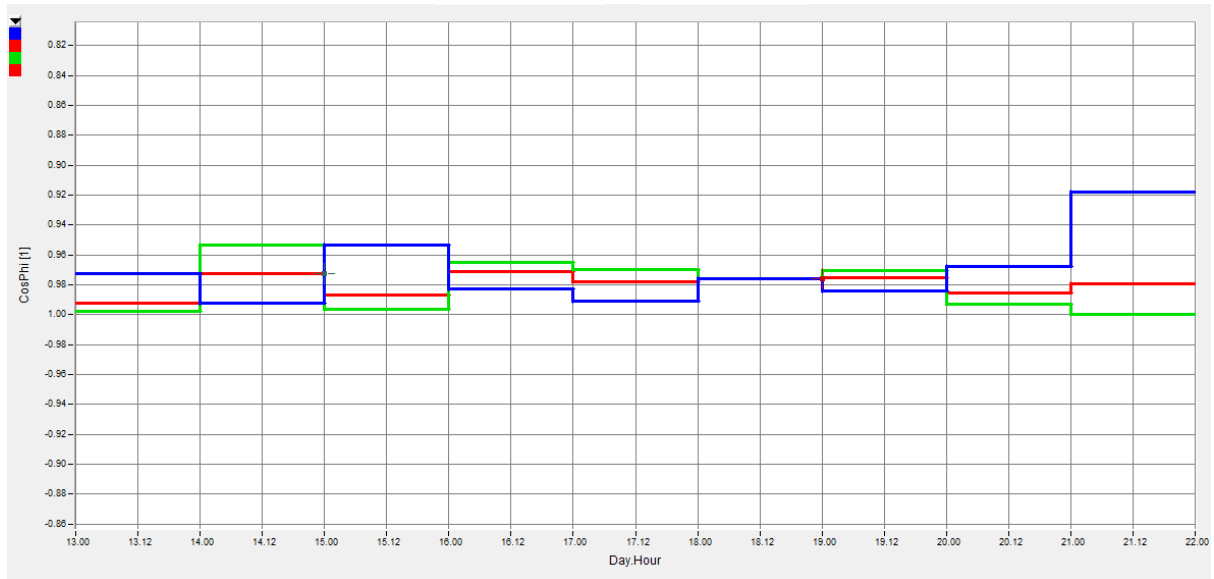
Fonte: Elaboração da própria autora.

#### 4.4.2 Fator de potência

Neste tópico serão apresentados os resultados do valor médio diário do fator de potência antes e após a instalação dos SFCR. A curva de cor vermelha representa o fator de potência soma das duas fases.

Na figura 59 tem-se os valores de fator de potência diários antes da instalação do SFCR. Nota-se que a curva rosa do fator de potência soma possui valores entre 0,97 e 0,99.

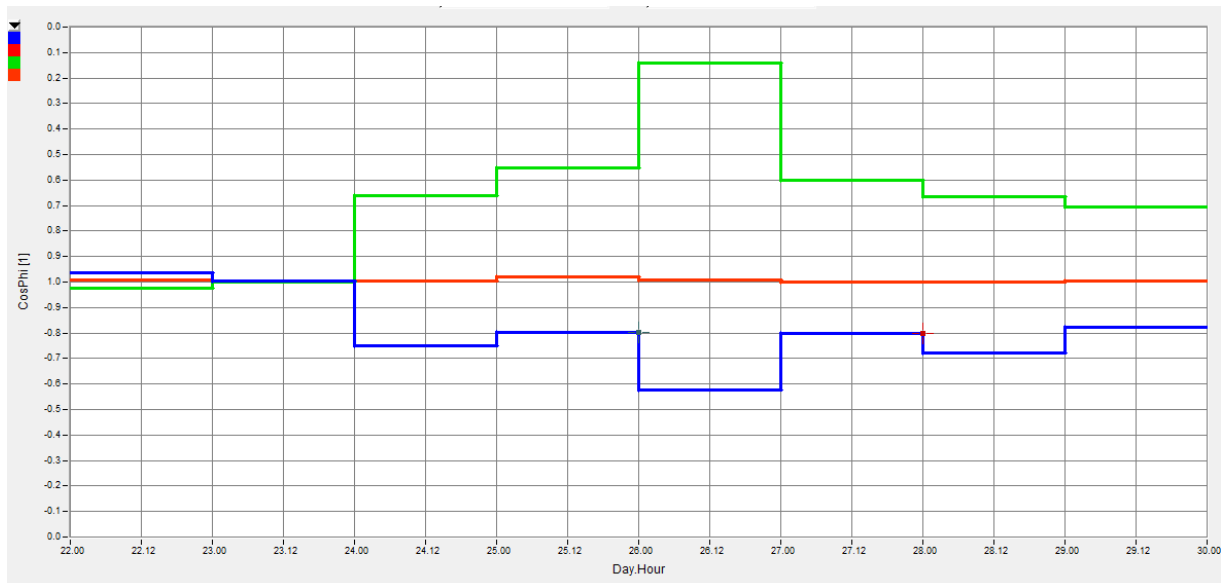
**Figura 58-** Fator de Potência da Residência antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Na figura 60 tem-se os valores de fator de potência diários antes da instalação do SFCR. Nota-se que a curva rosa do fator de potência soma possui valores entre 0,979 e 0,99.

**Figura 59-** Fator de Potência da Residência após a instalação do SFCR.



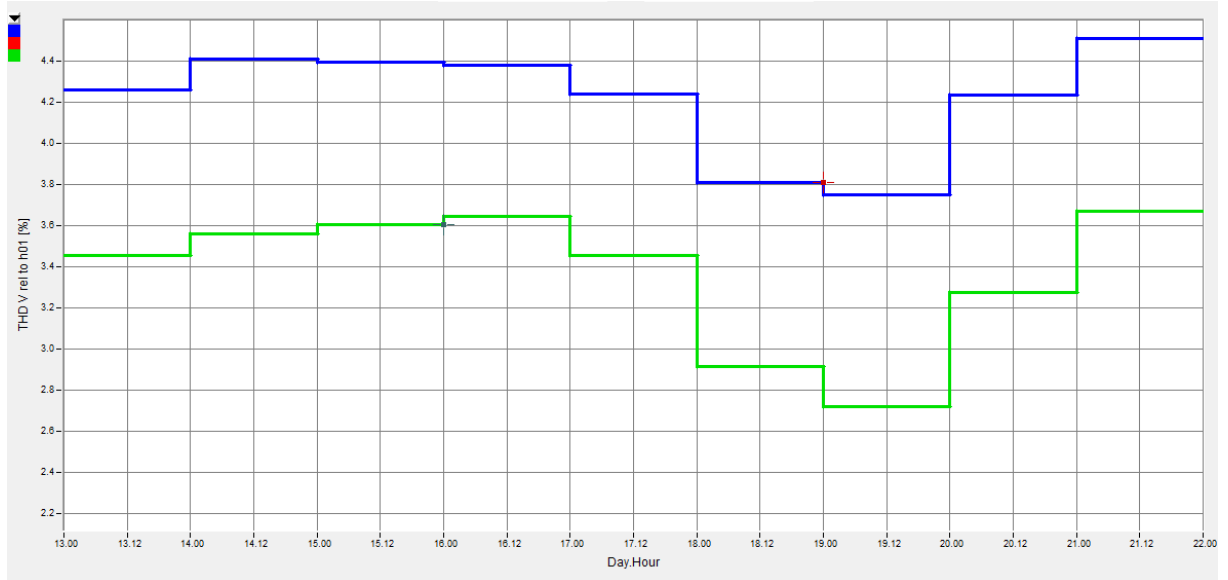
Fonte: Elaboração da própria autora.

#### 4.4.3 Harmônicos de tensão

Neste tópico serão apresentados os resultados de distorção harmônica total da tensão e o espectro da distorção harmônica individual da tensão antes e após a instalação do SFCR. As percentagens são relativas ao valor da tensão fundamental.

Na figura 61 tem-se a curva com os valores de distorção harmônica total da tensão antes da instalação do SFCR. Nota-se que os valores máximos encontrados estão por volta de 4,6%.

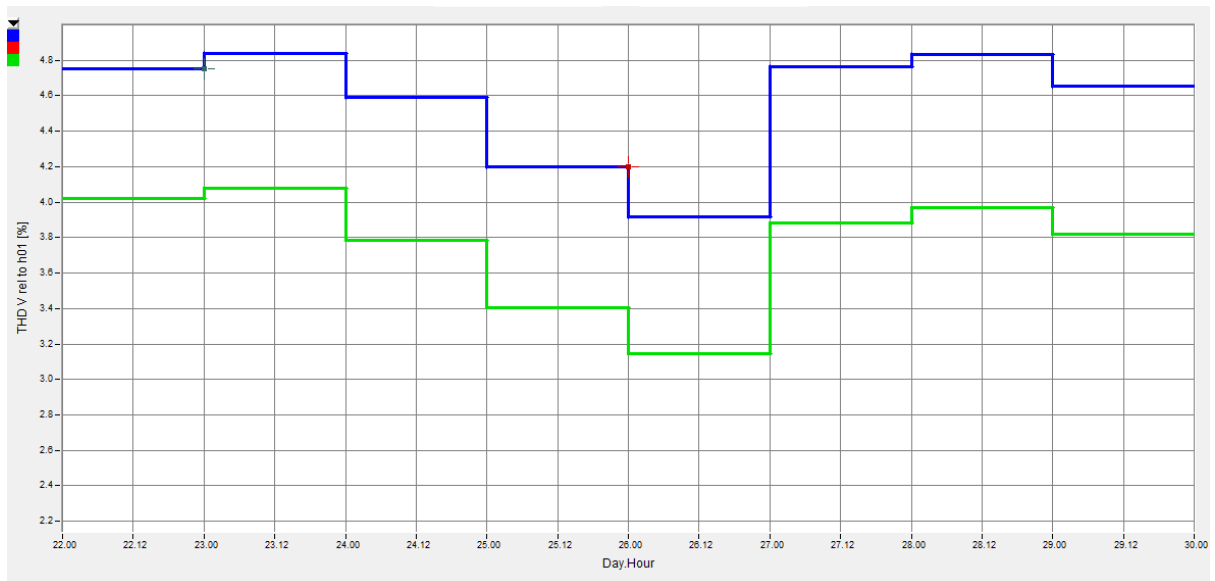
**Figura 60-** DHT da Tensão da Residência antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Na figura 62 tem-se a curva com os valores de distorção harmônica total da tensão após a instalação do SFCR. Nota-se que os valores máximos encontrados estão por volta de 4,9%, caracterizando um pequeno aumento em relação aos valores encontrados anteriormente.

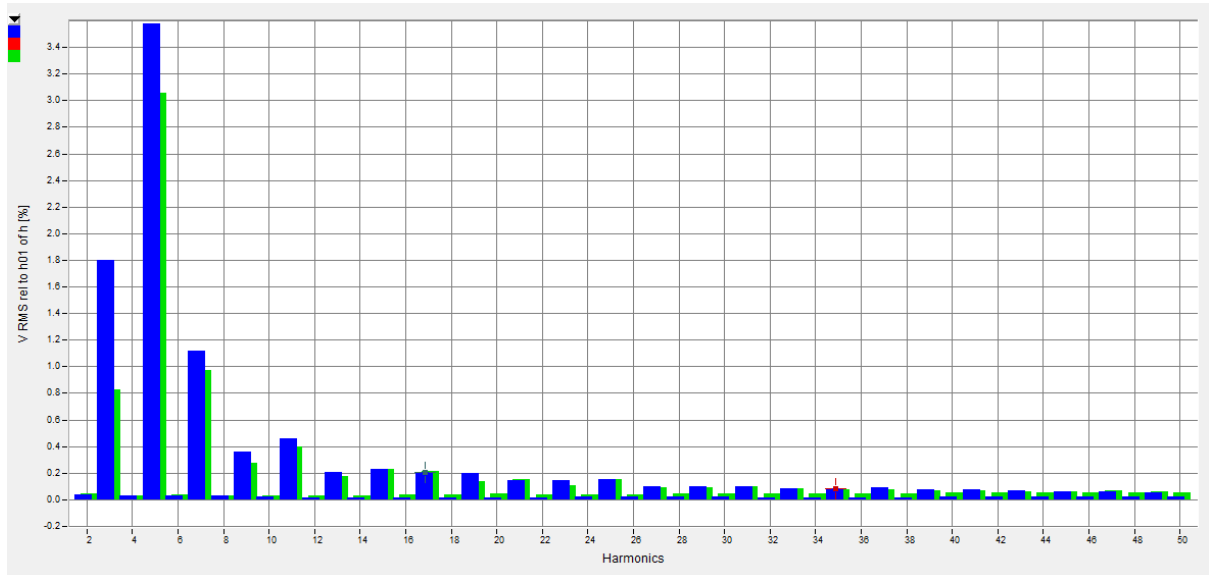
**Figura 61-** DHT da Tensão da Residência após a instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Na figura 63 tem-se o espectro com os valores de distorção harmônica individual da tensão antes da instalação do SFCR. Comparando-se os valores do espectro com a tabela 2, nota-se que os valores máximos encontrados estão de acordo com os valores de referência.

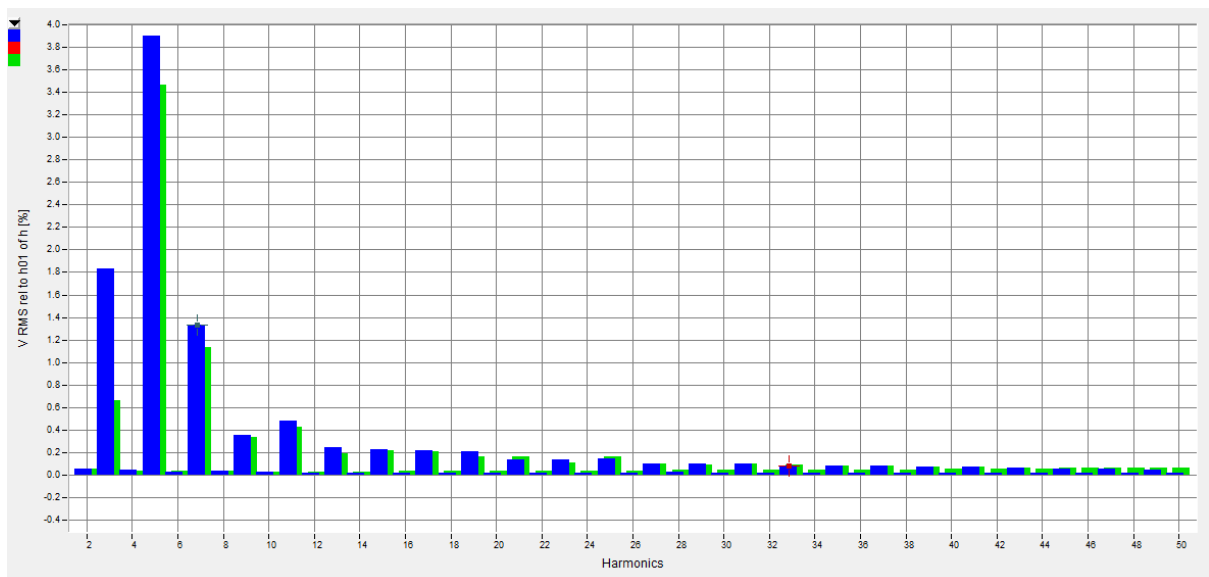
**Figura 62-** Espectro Harmônico da Tensão da Residência antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Na figura 64 tem-se o espectro com os valores de distorção harmônica individual da tensão após a instalação do SFCR. Comparando-se os valores do espectro com a tabela 2, nota-se que os valores máximos encontrados estão de acordo com os valores de referência. Observa-se também que os valores apresentam um pequeno aumento em relação à figura 63.

**Figura 63-** Espectro Harmônico da Tensão da Residência após a instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

#### 4.4.4 Análise dos resultados

Com os resultados apresentados nesse item 4.4, tem-se que, para as variações do valor eficaz da tensão, o seu valor médio apresentou um pequeno aumento em comparação com os valores apresentados antes da instalação do SFCR, entretanto, não foram observados valores que ultrapassassem os limites determinados.

Para os valores máximos da tensão eficaz, antes da instalação do SFCR, observam-se valores que ultrapassaram os limites crítico e precário para tensões em regime permanente. Desses valores, tem-se duas variações de curta duração: uma sobretensão e uma elevação temporária de tensão. Quando o SFCR foi instalado, observou-se um ligeiro aumento nos valores das tensões e os limites crítico e precário foram ultrapassados novamente. Nesta situação observam-se quatro elevações temporárias de tensão.

Nessas duas situações, onde o valor máximo é ultrapassado, observa-se um comportamento característico do SFCR, pois, como foi visto no capítulo 2, com a sua instalação, tem-se uma elevação no nível da tensão que pode ocasionar valores fora dos limites, apesar desse efeito ser indireto.

Para os valores mínimos da tensão eficaz, antes da instalação do SFCR, observam-se três afundamentos temporários de tensão e treze subtensões. Já nas medições após a instalação, têm-se dois afundamentos temporários de tensão e dezenove subtensões. Como foi explicado anteriormente, esses afundamentos estão diretamente ligados à atuação do sistema de proteção.

O fator de potência antes da instalação do SFCR apresentava valores muito próximos de 1, o que é considerado excelente. Quando o sistema foi instalado, o fator de potência não apresentou mudanças consideráveis em seu valor médio, apesar das curvas de cada fase apresentarem certas variações, o valor final permaneceu dentro dos limites da norma.

Sobre os harmônicos de tensão, pode-se observar que os valores tanto da distorção harmônica total quanto do espectro das componentes harmônicas apresentaram uma ligeira elevação em seus valores após a instalação do SFCR. Da mesma forma que foi observado nos resultados da Escola, tem-se que essa pequena diferença pode ser atribuída à presença de cargas não lineares. Apesar disso, os valores encontrados respeitam a norma.

#### 4.5 OUTROS RESULTADOS

Os resultados apresentados nos tópicos anteriores foram comparados com o módulo 8 do PRODIST, entretanto, a norma não leva em consideração os harmônicos de corrente. Como foi apresentado no capítulo 2, o SFCR pode ser responsável por correntes com elevado conteúdo



harmônico. Desta forma, neste tópico serão apresentados os valores de distorção harmônica total e o espectro harmônico da corrente.

Outro resultado interessante de se avaliar é a curva de carga dos consumidores. Assim é possível observar as mudanças que a potência ativa apresenta com a utilização dos SFCR pelos consumidores.

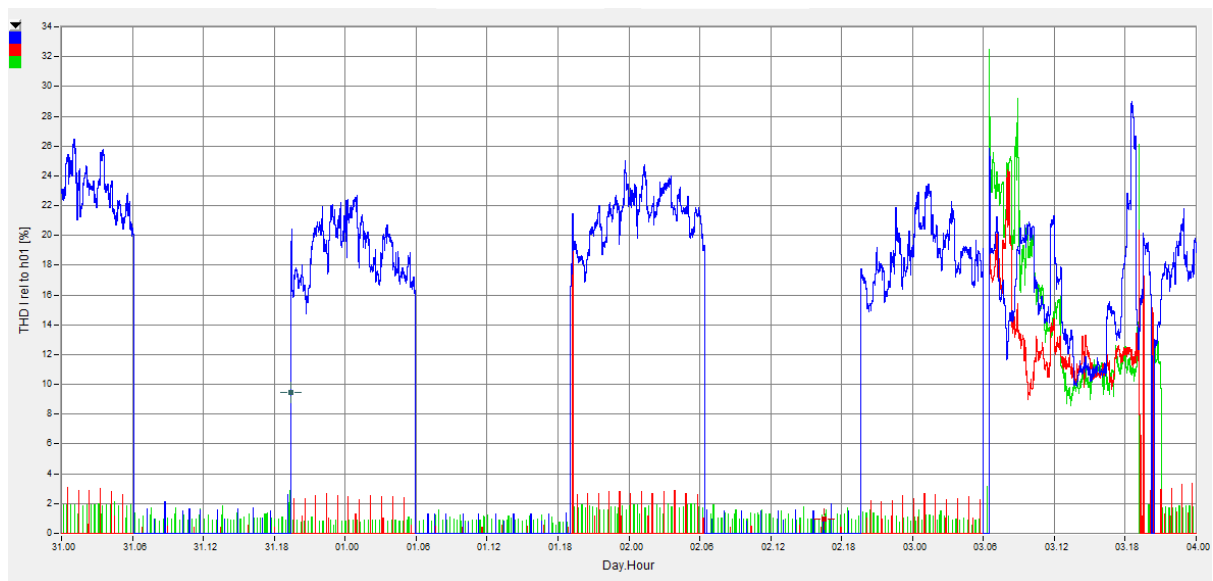
#### 4.5.1 Harmônicos de corrente

Neste tópico serão apresentados os resultados da distorção harmônica total e do espectro harmônico da corrente para o Fórum e a Escola.

##### 4.5.1.1 Harmônicos de corrente do fórum

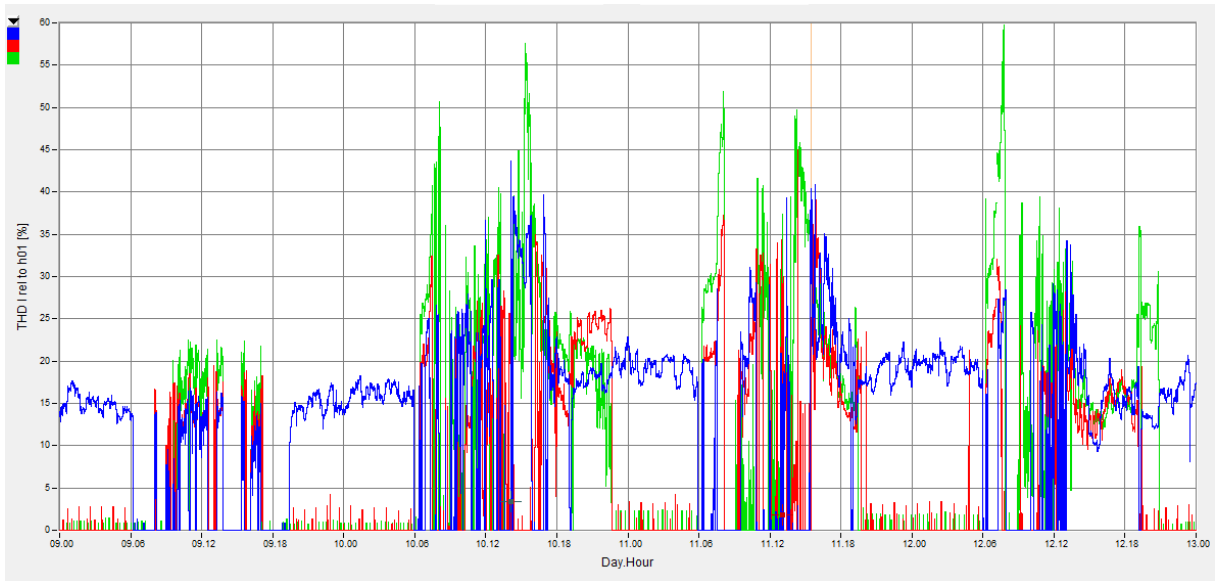
As figuras 65 e 66 apresentam os valores de distorção harmônica de corrente antes e após a instalação do SFCR no Fórum. É possível observar um aumento considerável nos valores entre as 6h da manhã e as 18h, quando as cargas do consumidor são acionadas. No período da noite, não são observadas grandes alterações.

**Figura 64-** DHT da Corrente do Fórum antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

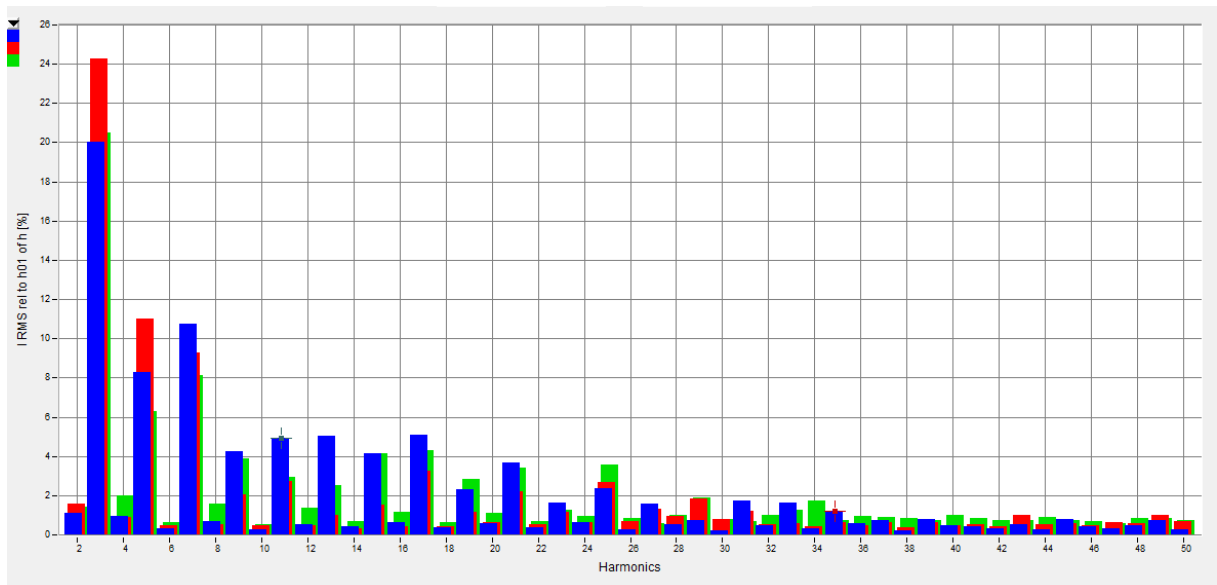
**Figura 65-** DHT da Corrente do Fórum após a instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

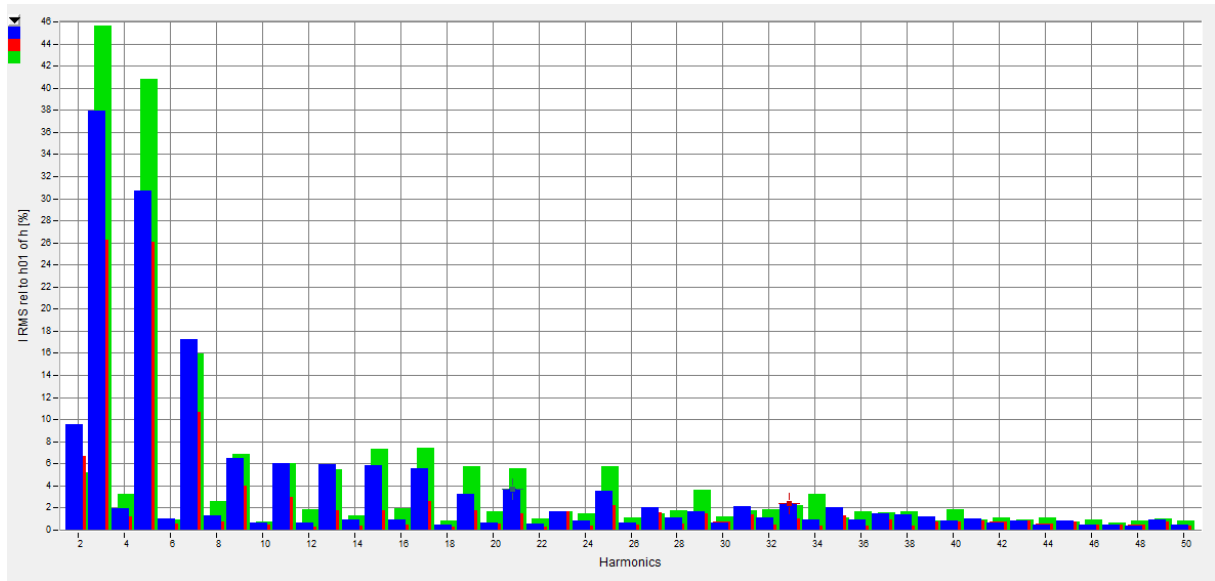
Nas figura 67 e 68 observa-se o espectro harmônico da corrente antes e após a instalação dos SFCR. Nota-se uma elevação das componentes, principalmente as de 3ª e 5ª ordem.

**Figura 66-** Espectro Harmônico da Corrente do Fórum antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

**Figura 67-** Espectro Harmônico da Corrente do Fórum após a instalação do SFCR.

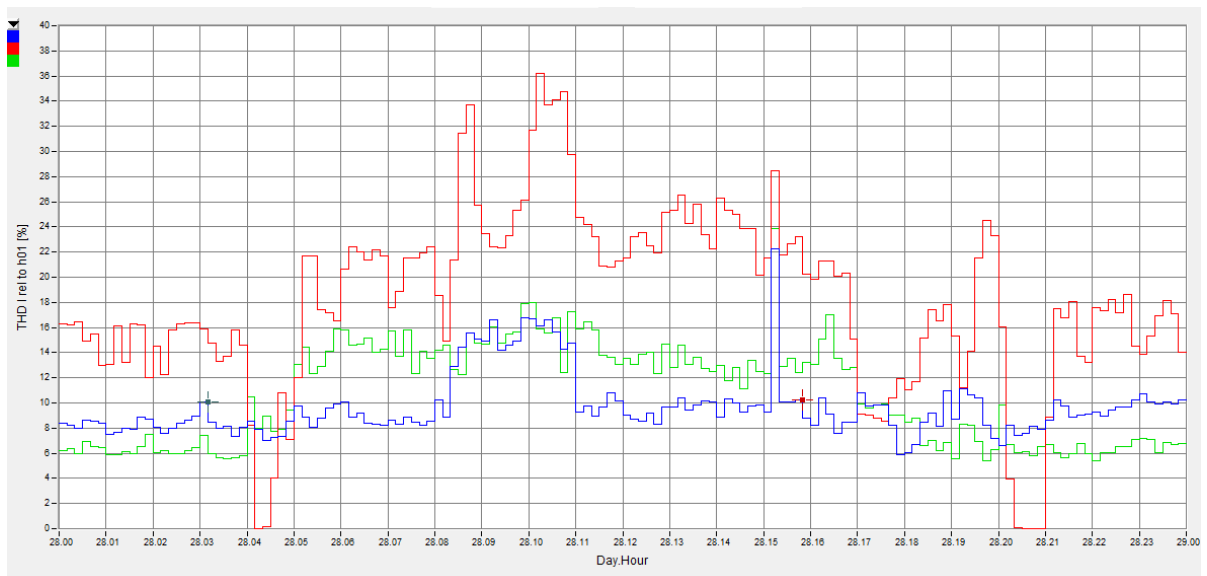


Fonte: Elaboração da própria autora.

#### 4.5.1.2 Harmônicos de corrente da escola

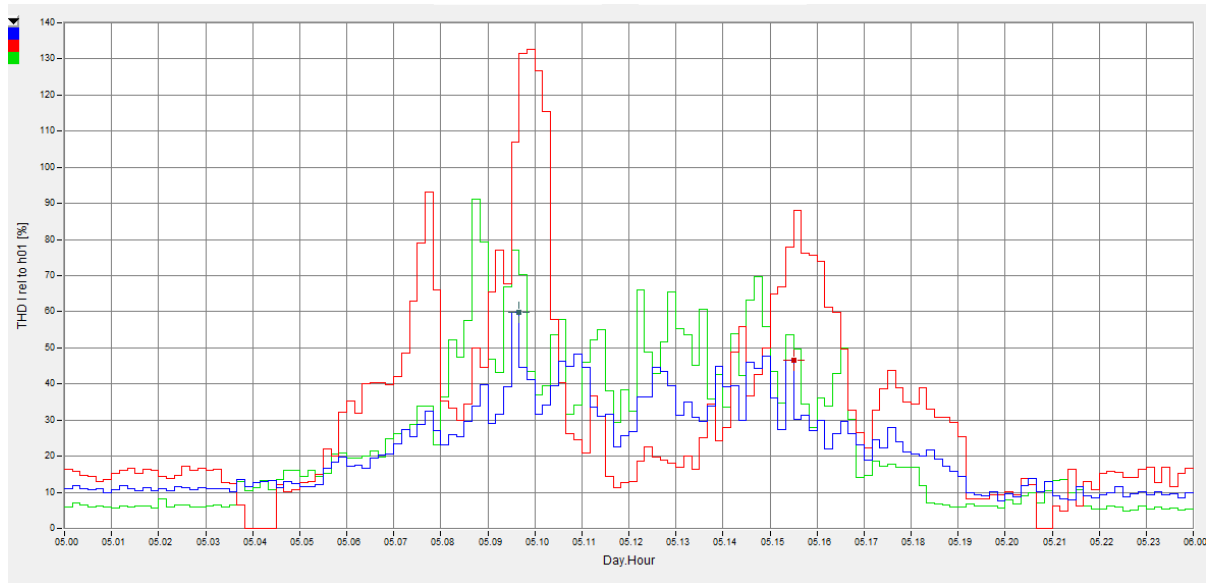
As figuras 69 e 70 apresentam os valores de distorção harmônica de corrente antes e após a instalação do SFCR na Escola. Fica evidente o aumento do valor da distorção por volta das 6h da manhã, atingindo picos de até 130% em uma das fases, e diminui novamente próximo das 18h. Esse comportamento é semelhante ao que aconteceu no Fórum.

**Figura 68-** DHT da Corrente da Escola antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

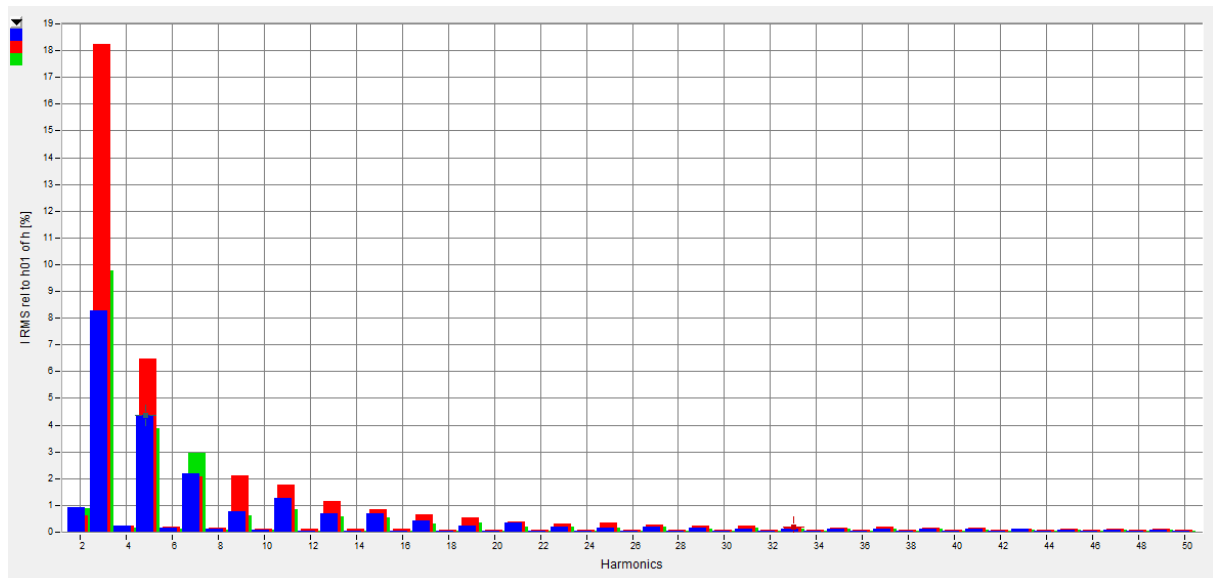
**Figura 69-** DHT da Corrente da Escola após a instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

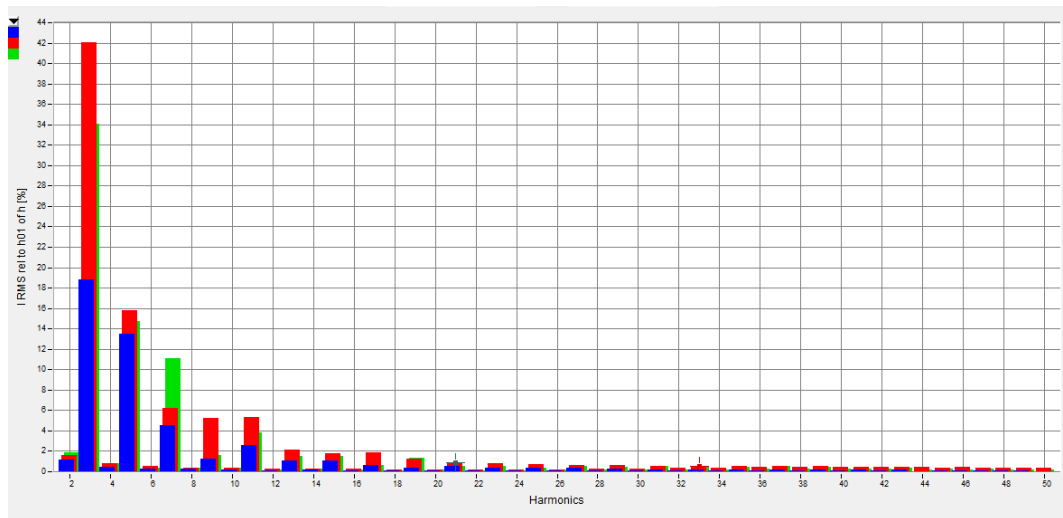
Nas figura 71 e 72 observa-se o espectro harmônico da corrente antes e após a instalação dos SFCR. Nota-se uma elevação das componentes, principalmente as de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordem.

**Figura 70-** Espectro Harmônico da Corrente da Escola antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

**Figura 71-** Espectro Harmônico da Corrente da Escola após a instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

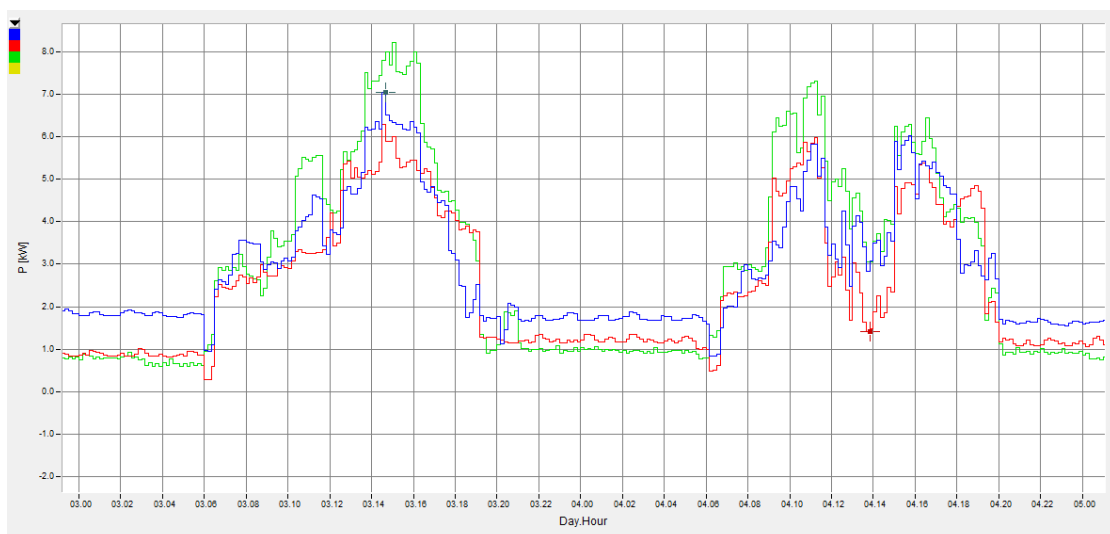
#### 4.5.2 Potência ativa

Neste tópico são apresentadas as curvas de carga para os três consumidores. Sabe-se que, à medida que a irradiação solar aumenta, observa-se um crescimento proporcional da potência ativa do local onde o SFCR é conectado.

##### 4.5.2.1 Potência ativa do fórum

Na figura 73 tem-se a curva da potência ativa no Fórum antes da instalação do SFCR. Nota-se que existe uma variação na curva de um dia para o outro. Isto ocorre pois, dependendo das atividades que forem realizadas, as cargas no consumidor são ligadas e desligadas.

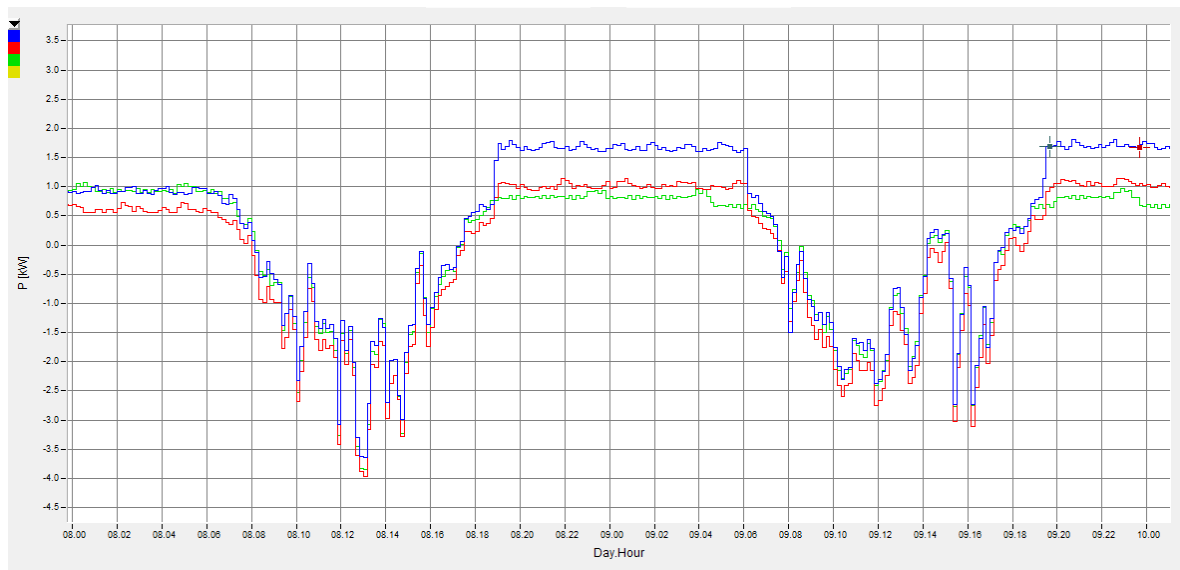
**Figura 72-** Potência Ativa do Fórum antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Já na figura 74, observa-se a curva da potência ativa no Fórum após a instalação do SFCR. A curva agora apresenta valores negativos entre as 6h e as 18h. Nesse intervalo o SFCR está fornecendo a potência para o sistema e esses valores negativos são proporcionais à geração proveniente do SFCR, que por sua vez são proporcionais à irradiação solar. A potência negativa indica que o excedente de potência que é gerado pelo SFCR está sendo injetado na rede de distribuição, com um fluxo reverso.

**Figura 73-** Potência Ativa do Fórum após a instalação do SFCR.

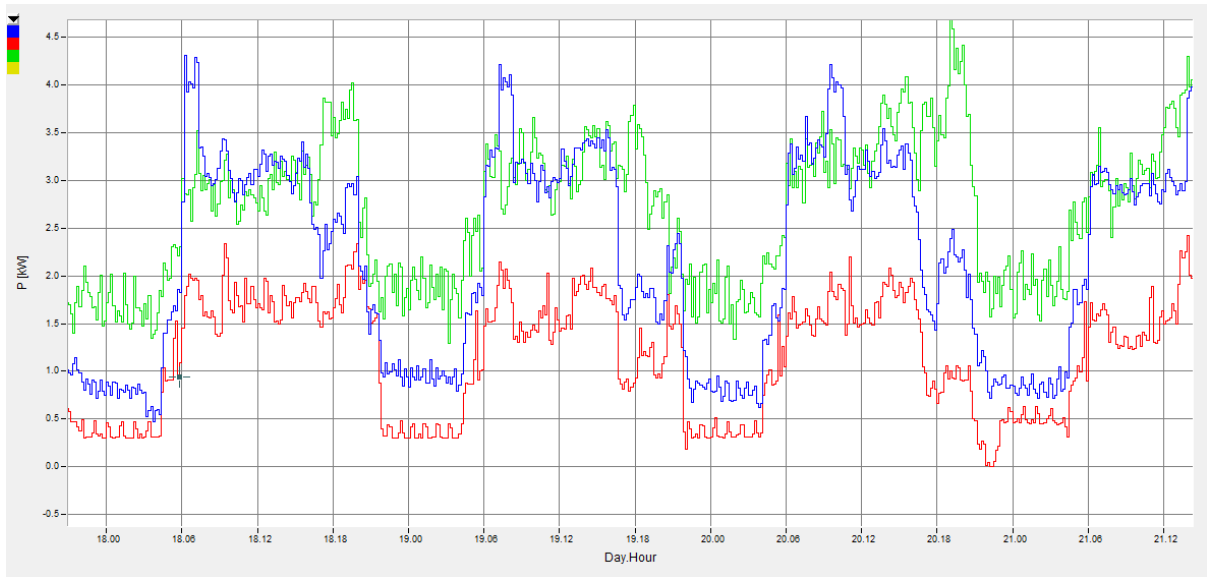


Fonte: Elaboração da própria autora.

#### 4.5.2.2 Potência ativa da escola

Tem-se, na figura 75, a curva da potência ativa na escola antes da instalação do SFCR. Observa-se que o consumo aumenta por volta das 6h, indicando o início das atividades na escola, e varia até por volta das 21h, onde retorna ao consumo mínimo. Essa curva irá modificar seu perfil de acordo com as atividades diárias da escola.

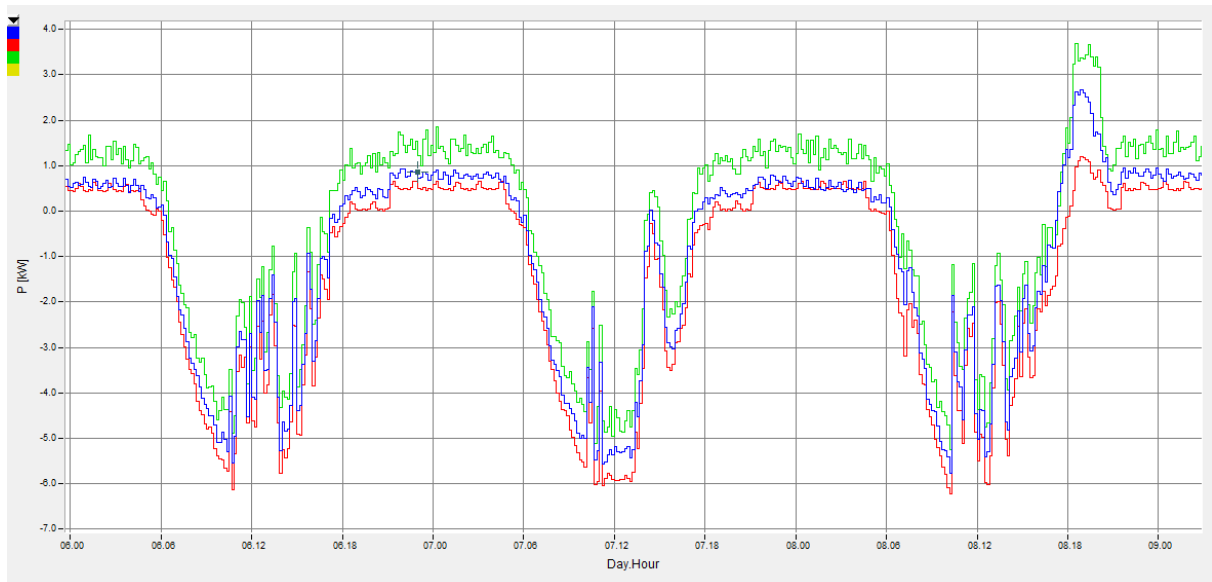
**Figura 74-** Potência Ativa da Escola antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Observa-se a curva da potência ativa na escola após a instalação do SFCR na figura 76. A curva agora apresenta valores negativos entre as 6h e as 18h. Nesse intervalo o SFCR está fornecendo a potência para o sistema, da mesma forma como foi observado no Fórum.

**Figura 75-** Potência Ativa da Escola após a instalação do SFCR.



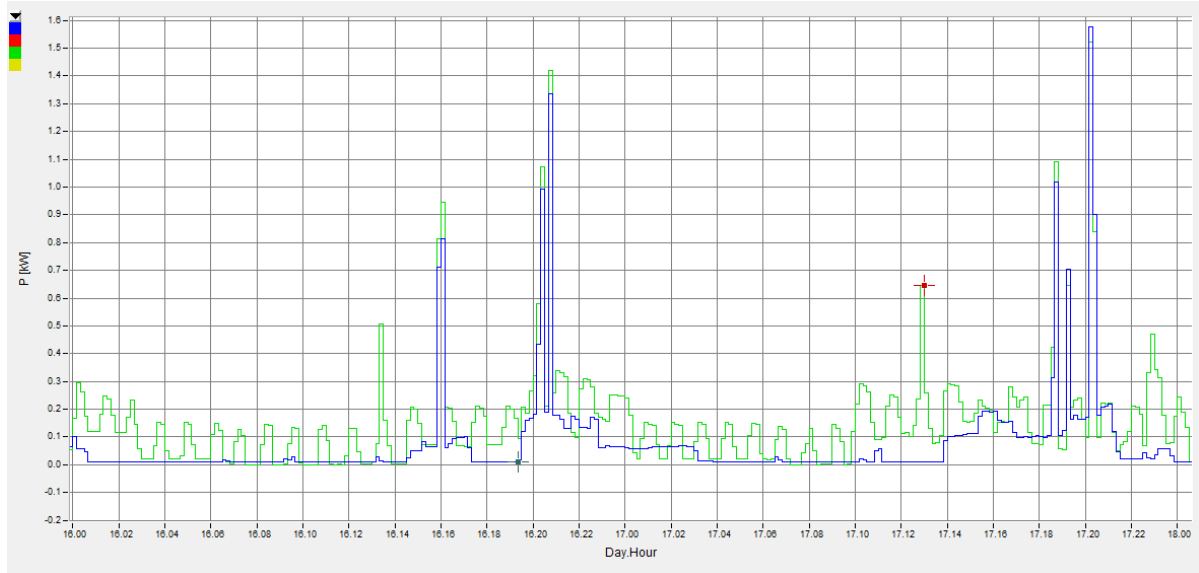
Fonte: Elaboração da própria autora.

#### 4.5.2.3 Potência ativa da residência

Tem-se, na figura 77, a curva da potência ativa na residência antes da instalação do SFCR. Observam-se picos de consumo às 16h e entre as 20h e 21h no primeiro dia. Já no

segundo dia, os picos estão entre as 18h e 21h. Esse consumo é considerado característico de uma residência.

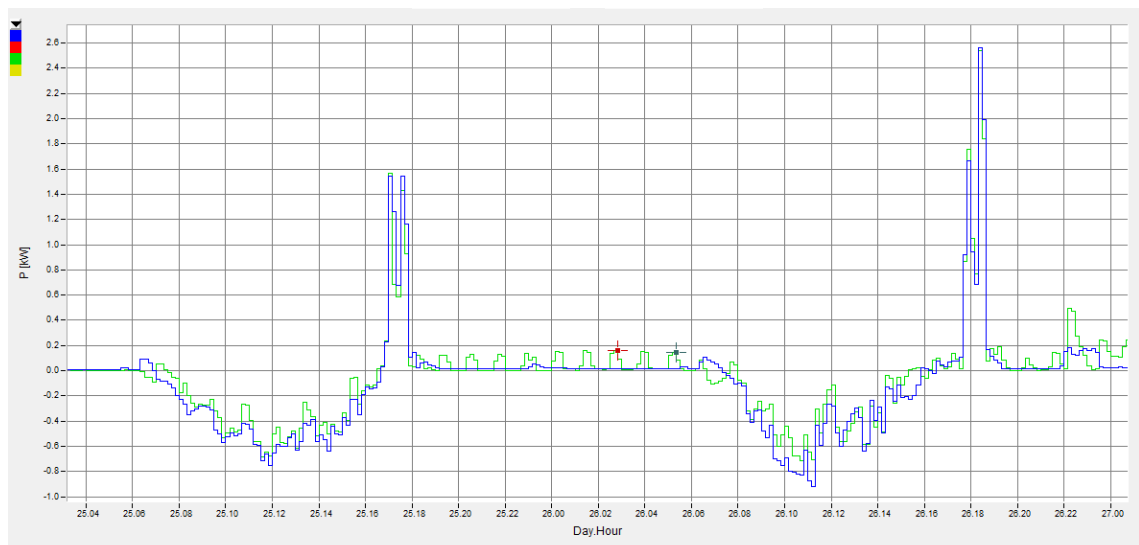
**Figura 76-** Potência Ativa da Residência antes da instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Na curva da potência ativa na residência após a instalação do SFCR, observada na figura 78, tem-se que a curva ainda apresenta os picos de consumo característicos de uma residência. Observou-se que no primeiro dia os picos ocorreram entre as 17h e 18h e no segundo dia os picos ocorreram entre as 18h e 19h. Entre as 6h e 18h tem-se que a curva de potência passa a apresentar valores negativos proporcionais à geração do SFCR, da mesma forma que foi observado do Fórum e na Escola.

**Figura 77-** Potência Ativa da Residência após a instalação do SFCR.



Fonte: Elaboração da própria autora.

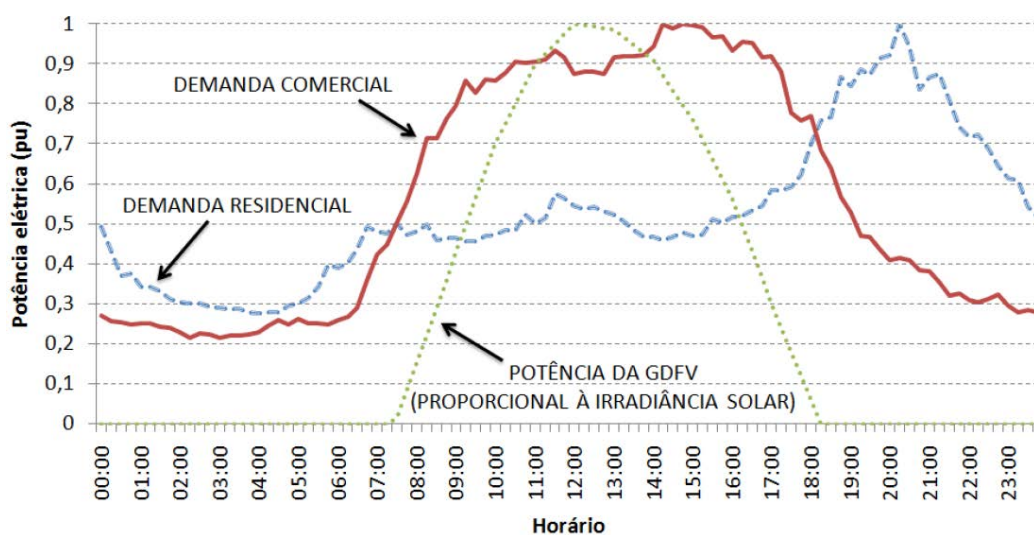


### 4.5.3 Análise dos resultados

Com os resultados apresentados nesse item 4.5, tem-se que, as distorções harmônicas de corrente foram impactadas diretamente pela presença do SFCR. Tanto os valores das distorções harmônicas totais quanto os espectros harmônicos apresentaram grandes elevações em seus valores. Esse impacto nos harmônicos de corrente se dá, principalmente, pela presença dos inversores dos SFCR. Deve-se, então, ter uma atenção especial com esse parâmetro de qualidade de energia elétrica.

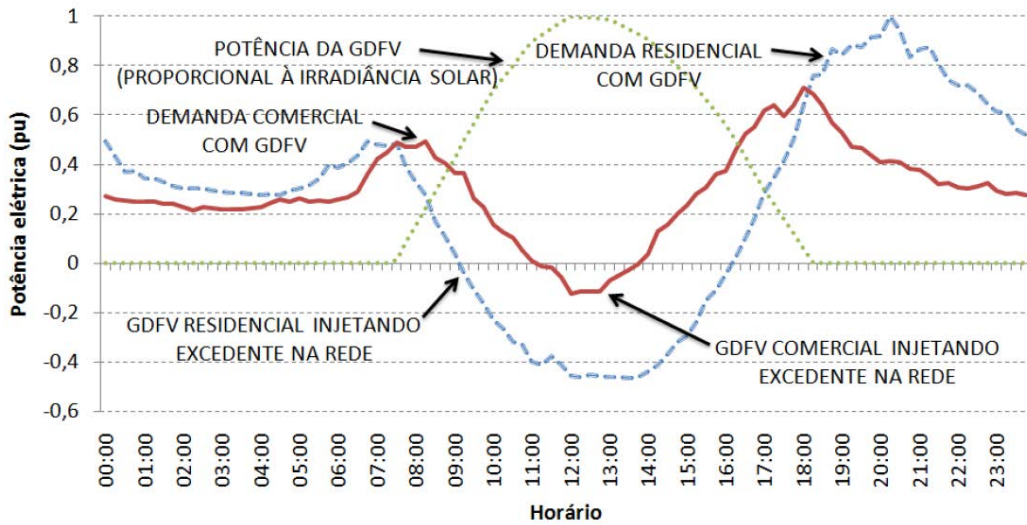
Com relação às curvas de carga apresentadas no item, pode-se dizer que eram comportamentos esperados para a potência ativa dos consumidores. Como é possível observar nas figuras 79 e 80 a seguir, tem-se o comportamento da potência ativa antes e após a utilização da potência ativa fornecida pelo SFCR. Os valores negativos de potência ativa representam o fluxo de potência contrário ao fornecido pela rede de distribuição. Portanto, nesses valores negativos de potência ativa, pode-se concluir que os consumidores estão fornecendo energia elétrica para a rede. Os medidores inteligentes são capazes de medir o fluxo nos quatro quadrantes e registrar quanto foi consumido e quanto foi cedido pelo consumidor. Na figura tem-se a sigla GDFV que significa geração distribuída com sistemas fotovoltaicos.

**Figura 78-** Curvas de Potência ativa características de consumidores e do SFCR.



Fonte: Shayani (2010).

**Figura 79-** Curvas de Potência ativa características de consumidores considerando o efeito do SFCR.



Fonte: Shayani (2010).

#### 4.6 CONCLUSÕES

Neste capítulo foi apresentada a metodologia utilizada nas medições e as características do medidor FLUKE 1760. Apesar do software PQ Analyze possuir uma interface amigável, teve-se certa dificuldade para compreender como se obter os resultados e como utilizar as funções que o software oferece, entretanto, com o tempo de uso, foi possível superar essa problemática.

Com as análises dos resultados apresentados para os três consumidores, foi possível concluir que, mesmo com a instalação dos SFCR, a qualidade de energia elétrica observada estava, de uma forma geral, dentro dos padrões e limites estabelecidos no módulo 8 do PRODIST. Entretanto, observou-se também o grande impacto do sistema no conteúdo harmônico da corrente. Essa característica pode causar diversos problemas na rede de distribuição e, sendo assim, deve ser estudada e corrigida.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi possível fazer uma análise qualitativa de algumas características das *Smart Cities* e *Smart Grids* e observar que elas estão sujeitas a vários problemas de qualidade de energia, principalmente pela utilização da Geração Distribuída. Identificar e avaliar esses problemas é um dos principais objetivos desta pesquisa.

Fez-se um levantamento sobre os problemas relacionados à qualidade de energia e foi possível observar que a maioria deles podem ser encontrados na *Smart Grid*, provando a pertinência do estudo proposto no trabalho.

Foi possível adquirir informações sobre os medidores eletrônicos convencionais e inteligentes e seus respectivos funcionamentos. Esse estudo é de extrema importância, pois os medidores inteligentes são elementos chave das *Smart Grids*.

Tornou-se necessário também buscar as normas e regulamentações que regem os aspectos ligados à *Smart Grid*. Sendo assim, foram estudadas as normas referentes à Geração Distribuída, aos medidores eletrônicos e à qualidade da energia elétrica. Notou-se uma evolução nesse quesito nos últimos anos. Isso vem da preocupação de normalizar e fiscalizar melhor essas modificações na rede.

Utilizando a pesquisa realizada como referência, no Capítulo 4 são apresentados os resultados e as discussões relacionados às medições de qualidade de energia realizadas em três consumidores. A partir das análises realizadas, foi possível chegar nas seguintes conclusões:

- Como algumas dificuldades foram encontradas para a utilização do software PQ Analyze, sugere-se a elaboração de um tutorial em português para auxiliar outros que venham a utilizar o programa em questão. Esse tutorial poderá ser apresentado em forma de um curso de curta duração;
- Tem-se uma elevação no nível da tensão que causou, em algumas situações, valores de tensão que ultrapassaram os limites determinados pela norma;
- Os afundamentos de tensão podem ser causados, por exemplo, por falhas na atuação da proteção ou serem eventos aleatórios;
- O desequilíbrio da tensão apresenta uma ligeira elevação em seu valor, mas não ultrapassa os limites da norma;
- Os harmônicos de tensão apresentam valores dentro dos limites da norma, apesar de ser possível observar ligeiras elevações, causadas principalmente por cargas não lineares;

- A flutuação depende diretamente dos valores de tensão. Se forem observados eventos de variação de tensão de curta ou longa duração, independente da fonte desses problemas, a flutuação apresentará mais valores fora da faixa adequada. Entretanto, se uma elevação no nível da tensão contribuir para a diminuição desses eventos, pode-se atribuir a melhora desse parâmetro indiretamente ao SFCR;
- Pelas curvas de carga dos consumidores é possível observar a mudança do perfil da demanda tanto para o consumidor residencial quanto para os consumidores comerciais (Fórum e Escola). É interessante observar que quando a curva torna-se negativa, observa-se o fluxo de potência do consumidor para a rede de distribuição;
- Nota-se uma elevação considerável do conteúdo harmônico da corrente que foi provocada diretamente pela presença do SFCR.

A distorção harmônica de corrente, apresentada na última conclusão, pode ser responsável por diversos problemas em equipamentos como transformadores, motores e geradores, capacitores, entre outros. Um equipamento que pode ser influenciado por essas distorções são os medidores inteligentes. Em seu trabalho, Silva apresenta resultados que comprovam o impacto dessas distorções nos resultados dos medidores eletrônicos (SILVA, 2008). Pode-se então avaliar quais seriam os impactos desse problema nos medidores inteligentes, pois o seu funcionamento de forma adequada é vital para um faturamento correto.

Por fim, pode-se concluir que as análises realizadas forneceram resultados esperados de acordo com a pesquisa realizada e que a qualidade da energia elétrica nos consumidores atende, de forma geral, os limites estipulados pelo módulo 8 do PRODIST.

A continuação da pesquisa pode seguir os seguintes tópicos:

- Impacto das distorções harmônicas de corrente no sistema de medição inteligente;
- Estudo para inserção de fontes de geração distribuída de forma a causar mínimos impactos na qualidade da energia elétrica da cidade do projeto de *smart city*;
- Realização de novas análises de qualidade de energia elétrica considerando a instalação de fontes de geração distribuída em novos consumidores.
- Eficiência energética em uma *Smart City* através de métodos para minimizar os problemas de qualidade de energia elétrica.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL. **Audiência pública número 43/2010**. [S.l.: s.n.], 2010. Disponível em: <  
[www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2010/043/apresentacao/aes\\_brasil\\_ap\\_043\\_2010.pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2010/043/apresentacao/aes_brasil_ap_043_2010.pdf)>. Acesso em: 1 julh 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL. **Indicadores de qualidade: valores anuais DEC e FEC**. [S.l. : s.n., 2015?]. Disponível em: <  
[www.aneel.gov.br/aplicacoes/indicadores\\_de\\_qualidade/pesquisaGeral.cfm](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/indicadores_de_qualidade/pesquisaGeral.cfm)>. Acesso em: 1 julh 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL. **PRODIST módulo 5 revisão 2**. [S.l.: s.n.], 2011. Disponível em: <  
[http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo5\\_Revisao\\_2.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo5_Revisao_2.pdf)>. Acesso em: 1 julh 2014

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL. **PRODIST módulo 1 revisão 7**. [S.l.: s.n.], 2015. Disponível em: <  
[www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo1\\_Revisao\\_6.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo1_Revisao_6.pdf)>. Acesso em: 1 abr 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL. **PRODIST Módulo 8 Revisão 6**. [S.l.: s.n.], 2015. Disponível em: <  
[http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8\\_Revis%C3%A3o\\_4.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_4.pdf)>. Acesso em: 1 fev 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL. **Banco de Informações de Geração – BIG**. Brasília, DF.: [s.n.], 2015c. Disponível em: <  
<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/Combustivel.cfm>>. Acesso em: 1 mar 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL. **PRODIST módulo 3 revisão 5**. [S.l. : s.n.], 2012a. Disponível em: <  
[www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo3\\_Revisao\\_5\\_Retifica%C3%A7%C3%A3o\\_1.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo3_Revisao_5_Retifica%C3%A7%C3%A3o_1.pdf)>, 2012a. Acesso em: 1 julh 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL. Resolução Normativa 482, de 17 de abril de 2012. 2012b. Disponível em: <  
<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 1 julh 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL. Resolução Normativa 502, de 7de de agosto de 2012. 2012c. Disponível em: <  
[www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012502.pdf](http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012502.pdf)>. Acesso em: 1 julh 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL. Resolução Normativa 517, de 17 de abril de 2012. 2012d. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012517.pdf>>. Acesso em: 1 julh 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. - **NBR 11704**: sistemas fotovoltaicos - classificação. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. **NBR 14519**: medidores eletrônicos de energia elétrica (estáticos) – especificação. Rio de Janeiro, 2000a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. **NBR 14520**: medidores eletrônicos de energia elétrica (estáticos) - método de ensaio. Rio de Janeiro, 2000b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. **NBR 14521**: aceitação de lotes de medidores eletrônicos – procedimentos. Rio de Janeiro, 2000c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. **NBR 16149**: Sistemas fotovoltaicos (FV) – características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. Rio de Janeiro, 2014a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. **NBR 16150**: sistemas fotovoltaicos (FV) — características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição — procedimento de ensaio de conformidade. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. **NBR 16274**: sistemas fotovoltaicos conectados à rede — requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho. Rio de Janeiro, 2014b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. **NBR IEC 62116**: procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Rio de Janeiro, 2012.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS- CGEE. **Redes elétricas inteligentes**: contexto nacional. [S.l.: s.n.], 2012.

DEPURU, S. et al. Smart meters for power grid challenges, issues, advantages and status. In: POWER SYSTEMS CONFERENCE AND EXPOSITION- PSCE, 2011, Phoenix. **Proceedings...** Phoenix: [s.n.], 2011. p. 20-23.

DUGAN, R. C. et al. **Electrical power systems quality**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

ECIL ENERGIA. **Medidor MD2400**. [S.l.: s.n., 2014?]. Disponível em: <[www.ecilenergia.com.br/md2400.html](http://www.ecilenergia.com.br/md2400.html)>. Acesso em: 1 julh 2014.

ECIL ENERGIA. **Medidor MD3400**. [S.l.: s.n., 2014?]. Disponível em: <[www.ecilenergia.com.br/md3400.html](http://www.ecilenergia.com.br/md3400.html)>. Acesso em: 1 julh 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA- EPE. **Inserção da geração fotovoltaica distribuída no Brasil: condicionantes e impactos**. [S.l.: s.n.], 2014. (Nota Técnica DEA, 19/14

FLUKE. **Medidor de qualidade FLUKE 1760**. [S.l.: s.n., 2014?]. Disponível em: <<http://www.fluke.com/fluke/brpt/Ferramentas-de-Qualidade-de-Energia/Logging-Power-Meters/Fluke-1760.htm?PID=56031>>. Acesso em: 1 julh 2014.

GELLINGS, C. W. **The smart grid: enabling energy efficiency and demand response**. Lilburn: Published by The Fairmont Press, 2009.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA- INMETRO. Portaria 401, de 15 de agosto de 2013. Disponível em: <[www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002012.pdf](http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002012.pdf)>. Acesso em: 1 julh 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA- INMETRO. Portaria 587, de 5 de novembro de 2012. Disponível em: <[www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001929.pdf](http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001929.pdf)>. Acesso em: 1 julh 2014.

ITRON. **Medidores de energia elétrica**. [S.l.: s.n.], 2015a. Disponível em: <[www.mapenergia.com.br/sites/default/files/arquivos\\_de\\_produtos/aurum\\_openway.pdf](http://www.mapenergia.com.br/sites/default/files/arquivos_de_produtos/aurum_openway.pdf)>. Acesso em: 1 mar 2015.

ITRON. **Medidores de energia elétrica**. [S.l.: s.n.], 2015b. Disponível em: <[www.mapenergia.com.br/sites/default/files/arquivos\\_de\\_produtos/centron\\_openway.pdf](http://www.mapenergia.com.br/sites/default/files/arquivos_de_produtos/centron_openway.pdf)>. Acesso em: 1 mar 2015.

KRISHNAMURTI, T. et al. Preparing for smart grid technologies: a behavioral decision research approach to understanding consumer expectations about smart meters. **Energy Policy**, London, v. 41, 2012.

LAMIN, H. **Análise de impacto regulatório da implantação de redes inteligentes no Brasil**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)- Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.

LAZAROIU, G. C.; ROSCIA, M. Definition methodology for the smart cities model. **Energy**, Rondebosch, v. 47, n. 1, p. 326-332, 2012.

LIYANAGE, C. P.; MARASINGHE, A. Planning smart meal in a smart city foa a smart living. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIOMETRICS AND KANSEI ENGINEERING, 2013, Tokyo. **Conference...** Tokyo: [s.n.], 2013. p. 166-171.

MARTINEZ-VELASCO, J. A. et al. Distributed generation impact on voltage sags in distribution networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL POWER QUALITY AND UTILISATION, 9., 2007, Barcelona. **Conference...** Barcelona; [s.n.], 2007.

NANSEN. **Medidores de energia elétrica**. [S.l.: s.n., 2015?] Disponível em: < [www.nansen.com.br/produtos\\_medidores\\_eletronicos\\_polifasicos\\_kart.php](http://www.nansen.com.br/produtos_medidores_eletronicos_polifasicos_kart.php) >. Acesso em: mar 2015.

REDES inteligentes Brasil- RIB [S.l.: s.n., 2015?]. Disponível em: < [www.redesinteligentesbrasil.org.br](http://www.redesinteligentesbrasil.org.br) >. Acesso em: 1 mar 2015.

RODRÍGUEZ, M. A. T. et al. **Diagnóstico de la calidad de la energía mediante monitereo en la red de distribución interna en la planta bloqim tomando como referencia la regulación CONELEC 004/01**. Ecuador: [s.n.], 2010. Projeto de graduação apresentada à Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Guayaquil.

SHAYANI, R. A. **Método para determinação do limite de penetração da geração distribuída fotovoltaica em redes radiais de distribuição**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)- Universidade de Brasília, 2010.

SHI LU. **The Smart city's systematic application and implementation in China**. Beijing China: IEEE., 2011.

SILVA, L. C. E. **Efeitos das distorções harmônicas (tensões e correntes) e desequilíbrios (tensões) em medidores eletrônicos trifásicos de energia elétrica ativa**. 2008. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, 2008.

TOLEDO, F. et al. **Desvendando as redes elétricas inteligentes**. Rio de Janeiro: Brasport, 2012.