

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



**DESENVOLVIMENTO E
IMPLEMENTAÇÃO DE UMA
METODOLOGIA PARA AGREGAÇÃO
TEMPORAL DE ÂNGULOS DE FASE DE
COMPONENTES HARMÔNICAS**

Guilherme Leal Xavier

Uberlândia
2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE
UMA METODOLOGIA PARA AGREGAÇÃO
TEMPORAL DE ÂNGULOS DE FASE DE
COMPONENTES HARMÔNICAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como requisito para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

BANCA EXAMINADORA:

José Rubens Macedo Junior, Dr – UFU (Orientador)

José Wilson Resende, PhD – UFU

Mateus Duarte Teixeira, Dr – UFPR

Domingos Sávio Lyrio Simonetti, Dr – UFES

Isaque Nogueira Gondim, Dr – UFU

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

X3 2020	<p>Xavier, Guilherme Leal, 1983- Desenvolvimento E Implementação De Uma Metodologia Para Agregação Temporal De Ângulos De Fase De Componentes Harmônicas [recurso eletrônico] / Guilherme Leal Xavier. - 2020.</p> <p>Orientador: José Rubens Macedo Junior. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.te.2020.648 Inclui bibliografia.</p> <p>1. Engenharia elétrica. I. Macedo Junior, José Rubens ,1972-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.3</p>
------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA AGREGAÇÃO TEMPORAL DE ÂNGULOS DE FASE DE COMPONENTES HARMÔNICAS

Guilherme Leal Xavier

Tese apresentada por Guilherme Leal Xavier à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Prof. José Rubens Macedo Junior, Dr.
Orientador

Prof. José Roberto Camacho, PhD
Coordenador do Curso de Pós-Graduação



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, 275, PPGEELT				
Data:	Dezenove de outubro de dois mil e vinte	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	12:00
Matrícula do Discente:	11623EEL004				
Nome do Discente:	Guilherme Leal Xavier				
Título do Trabalho:	Desenvolvimento e implementação de uma metodologia para agregação temporal de ângulos de fase de componentes harmônicas				
Área de concentração:	Título: Desenvolvimento de uma nova metodologia para quantificação das perdas técnicas da distribuição em condições distorcidas e desequilibradas Agência Financiadora: ENERGISA S.A. / P&D ANEEL Início: 27/07/2018 Término: 26/07/2020 No. do Projeto na agência: PD-00404- 1803/2018 Professor Coordenador: José Rubens Macedo Junior				
Linha de pesquisa:	Sistemas de energia elétrica				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Distribuição de energia elétrica				

Reuniu-se por meio de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Isaque Nogueira Gondim - FEELT/UFU; José Wilson Resende - FEELT/UFU; Domingos Sávio Lyrio Simonetti - UFES; Mateus Duarte Teixeira - UFPR; José Rubens Macedo Junior - FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). José Rubens Macedo Junior, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Isaque Nogueira Gondim, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/10/2020, às 12:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mateus Duarte Teixeira, Usuário Externo**, em 19/10/2020, às 12:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Rubens Macedo Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/10/2020, às 12:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Wilson Resende, Usuário Externo**, em 19/10/2020, às 12:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Domingos Sávio Lyrio SimoneG, Usuário Externo**, em 20/10/2020, às 09:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2279517** e o código CRC **0E816944**.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, Aginaldo e Altiva, por sempre estarem ao meu lado me ajudando e incentivando em todas as minhas decisões, e ao sobrinho Emmanuel, pelas alegrias proporcionadas com sua vinda e pela esperança de um mundo mais digno para todos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pela força e coragem em todos os momentos da minha vida, principalmente nas horas difíceis em que mais precisei, mostrando-me sempre o melhor caminho a ser seguido.

Ao professor José Rubens Macedo Junior, meus agradecimentos pela orientação, apoio, amizade e confiança depositada, imprescindíveis para realização deste trabalho e também para uma melhor formação profissional e pessoal.

À minha família, em especial ao meu pai Aguinaldo Gonçalves Xavier e à minha mãe Altiva Leal Borges Xavier, pelo carinho, dedicação e apoio que sempre me proporcionaram, e, principalmente, pela oportunidade proporcionada para que este trabalho pudesse ter sido realizado. Aos meus irmãos Maria Carolina Xavier e Filipe Leal Xavier, por sempre torcerem por mim e me incentivarem em todos os momentos de minha vida. Aos sobrinhos Lucca e Emmanuel, pelas alegrias e pela esperança de um mundo mais justo e correto.

À minha namorada Graziela Batista de Souza, pela compreensão e pelo carinho, não podendo esquecer-se das palavras de incentivo nos momentos difíceis, da força e do estímulo que foram essenciais para desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos da universidade, em especial aos colegas do laboratório LADEE, Eduardo Tavares, Gabriel Miyasaka, Lara Braz, Raphael Barata, Rodrigo Nobis, Isabela Novais e Lucas pela amizade, apoio e agradável convivência durante esta jornada.

Aos professores da pós-graduação pela amizade e auxílio mediante aos conhecimentos transmitidos.

Aos demais funcionários do programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e da instituição como um todo.

À CAPES pelo subsídio financeiro.

Ao grupo Energisa e ao grupo Light pelo suporte financeiro por meio de seus programas de Pesquisa e Desenvolvimento.

À Sigmasys Engenharia, em especial ao Felipe Pregnoatto, pela ajuda na implementação da proposta e fornecimento do medidor de Qualidade da Energia Elétrica.

À Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade oferecida na forma de licença para realização do doutorado.

Aos professores da UFV *campus* Rio Paranaíba, em especial a prof. Rejane Nascentes que não mediu esforços para que eu pudesse sair de licença para realizar o doutorado.

RESUMO

Atualmente, as normas que definem os protocolos e procedimentos para medição dos parâmetros de Qualidade da Energia Elétrica, a exemplo das distorções harmônicas, baseiam-se apenas na quantificação das amplitudes das tensões e das correntes em cada uma das frequências harmônicas. Assim, os ângulos de fase das componentes harmônicas, necessários para alguns tipos de análises em se tratando de sistemas elétricos, são simplesmente ignorados. Diante deste cenário, o presente trabalho visa colaborar para o tema, propondo uma metodologia para realizar as agregações temporais dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente. O embasamento para a proposição desta nova técnica está no conceito das energias harmônicas associadas aos períodos de agregação. Inicialmente, realizou-se uma análise a respeito do comportamento dos ângulos de fase das componentes harmônicas, de tensão e de corrente, considerando cargas isoladas, instalações alimentadas por redes de baixa tensão e um alimentador de distribuição em média tensão. A partir destas análises, verificou-se uma prevalência dos fluxos de potências harmônicas, onde os mesmos podem estar no sentido fonte-carga ou carga-fonte. Todas as análises foram realizadas com base em diversas medições realizadas, tanto em laboratório, quanto em campo, considerando a aquisição das formas de onda de tensão e de corrente. Na sequência dos trabalhos, foi então desenvolvida a metodologia proposta, contemplando desde os desenvolvimentos analíticos necessários até sua implementação em *hardware* em um medidor de parâmetros de qualidade da energia elétrica, através de uma parceria com um fabricante nacional de medidores. O equipamento desenvolvido foi submetido a uma bateria de testes para verificar a conformidade das medições dos ângulos de fase, para finalmente, ser instalado em algumas instalações elétricas reais com o objetivo de promover a realização de uma pequena campanha de medições. Os resultados obtidos demonstraram a total convergência da metodologia proposta para os propósitos almejados, sendo que comparações realizadas entre a metodologia desenvolvida e outras poucas metodologias existentes na literatura técnica internacional demonstrou, de forma inequívoca, a grande relevância da metodologia desenvolvida neste trabalho.

Palavras-chave: Ângulo de fase das componentes harmônicas, fluxo de potência harmônico, prevalência do fasor harmônico, parâmetros de medição.

ABSTRACT

Currently, the standards that define the protocols and procedures for measuring power quality parameters, such as harmonic distortions, are based only on quantifying the amplitudes of voltages and currents in each of the harmonic frequencies. Thus, the phase angles of the harmonic components, necessary for some types of analysis in power systems, are simply ignored. In view of this scenario, the present work aims to collaborate on the theme, proposing a methodology to perform the time aggregations of the phase angles of the harmonic components of voltage and current. The basis for proposing this new technique is the concept of harmonic energies associated with time intervals of aggregation. Initially, an analysis was carried out regarding the behavior of the phase angles of the harmonic voltage and current components, considering: individual loads (like some home appliances), low voltage customers and a medium voltage distribution feeder. From these analyzes, there was a prevalence of harmonic power flows, where they can be in the source-load or load-source direction. All analyzes were performed based on several measurements performed, both in the laboratory and in the field, considering the acquisition of voltage and current waveforms. Next, the proposed methodology was then developed, covering the necessary analytical developments to its implementation in hardware in a power quality meter, through a partnership with a national meter manufacturer. The developed device was submitted to a set of tests to verify the conformity of the measurements regarding the phase angles, to finally be installed in some real electrical installations in order to promote the realization of a small measurement campaign. The results obtained demonstrated the total convergence of the proposed methodology for the intended purposes, and comparisons made between the developed methodology and other few existing methodologies in the international technical literature demonstrated, unequivocally, the great relevance of the methodology developed in this work.

Keywords: Harmonic phase angle, harmonic power flow, prevailing harmonic phasor, measurement parameters.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

Introdução20

1.1	<i>Contextualização do tema e revisão bibliográfica.....</i>	22
1.2	<i>Contribuições da Tese.....</i>	26
1.3	<i>Estrutura da Tese.....</i>	27

CAPÍTULO II

Fundamentos teóricos.....29

2.1	<i>Processamento dos sinais elétricos.....</i>	29
2.2	<i>Deslocamento do ângulo de fase.....</i>	31
2.3	<i>Efeitos dos ângulos de fase das componentes harmônicas.....</i>	33
2.4	<i>Normalização para medição das amplitudes das componentes harmônicas de tensão e de corrente.....</i>	36
2.4.1	<i>Norma IEC 61000-4-7.....</i>	37
2.4.2	<i>Norma IEC 61000-4-30.....</i>	40
2.5	<i>Agregação do ângulo de fase das componentes harmônicas segundo referências bibliográficas.....</i>	44
2.6	<i>Agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas adotado por medidores comerciais.....</i>	46
2.7	<i>Considerações finais.....</i>	47

CAPÍTULO III

Análise do comportamento dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente.....49

3.1	<i>Metodologia da medição.....</i>	49
3.2	<i>Cargas individuais alimentadas em baixa tensão.....</i>	51
3.2.1	<i>Lâmpada fluorescente compacta.....</i>	51
3.2.2	<i>Lâmpada LED.....</i>	54
3.2.3	<i>Televisão 32”</i>	57
3.2.4	<i>Micro-ondas.....</i>	60

3.2.5	<i>Computador desktop com monitor.....</i>	63
3.3	<i>Instalações elétricas em baixa tensão.....</i>	66
3.3.1	<i>Instalação residencial.....</i>	67
3.3.2	<i>Instalação comercial.....</i>	71
3.4	<i>Alimentador de distribuição em média tensão.....</i>	74
3.5	<i>Considerações finais.....</i>	77

CAPÍTULO IV

Avaliação dos métodos existentes na literatura para agregação temporal dos ângulos de fase.....78

4.1	<i>Medição em uma instalação residencial com intervalo de tempo igual a 10 minutos.....</i>	78
4.2	<i>Fluxo de energia harmônica.....</i>	82
4.3	<i>Metodologias para agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas.....</i>	84
4.3.1	<i>Resultados para o Método 1 e Método 2.....</i>	85
4.4	<i>Considerações finais.....</i>	91

CAPÍTULO V

Proposta para agregação temporal dos ângulos de fase das componentes harmônicas.....93

5.1	<i>Base da metodologia proposta.....</i>	93
5.2	<i>Estrutura geral para os instrumentos de medição com a implementação da metodologia proposta.....</i>	95
5.2.1	<i>Definição da referência dos ângulos de fase.....</i>	95
5.2.2	<i>Agrupamento dos ângulos de fase.....</i>	97
5.2.3	<i>Agregação dos ângulos de fase.....</i>	99
5.2.4	<i>Visão geral da metodologia proposta.....</i>	100
5.3	<i>Avaliação de desempenho da metodologia proposta.....</i>	101
5.4	<i>Análise comparativa entre a metodologia proposta e os métodos encontrados na literatura...105</i>	
5.5	<i>Considerações finais.....</i>	107

CAPÍTULO VI

Implementação da metodologia proposta.....109

6.1	<i>Analisador de qualidade da energia elétrica com a metodologia implementada.....</i>	<i>109</i>
6.2	<i>Testes de desempenho do medidor em laboratório.....</i>	<i>111</i>
6.2.1	<i>Teste I: Grandezas fixas e V_A na referência.....</i>	<i>114</i>
6.2.2	<i>Teste II: Grandezas fixas e V_A deslocada em 30°.....</i>	<i>116</i>
6.2.3	<i>Teste III: Grandezas alternando a cada intervalo de 1 minuto.....</i>	<i>120</i>
6.2.4	<i>Teste IV: Dois intervalos de grandezas, sendo 1 mantido sem corrente.....</i>	<i>122</i>
6.3	<i>Minicampanha de medição.....</i>	<i>124</i>
6.3.1	<i>Instalação residencial.....</i>	<i>125</i>
6.3.1.1	<i>Residência 1.....</i>	<i>125</i>
6.3.1.2	<i>Residência 2.....</i>	<i>128</i>
6.3.1.3	<i>Residência 3 – com sistema de geração fotovoltaica.....</i>	<i>130</i>
6.3.2	<i>Instalação comercial.....</i>	<i>132</i>
6.3.2.1	<i>Comercial 1.....</i>	<i>133</i>
6.3.2.2	<i>Comercial 2.....</i>	<i>135</i>
6.3.3	<i>Instalação industrial.....</i>	<i>138</i>
6.3.3.1	<i>Industrial 1.....</i>	<i>138</i>
6.3.3.2	<i>Industrial 2.....</i>	<i>140</i>
6.3.4	<i>Considerações finais.....</i>	<i>143</i>

CAPÍTULO VII

Conclusões..... 145

7.1	<i>Propostas para trabalhos futuros.....</i>	<i>148</i>
7.2	<i>Trabalhos publicados ao longo do doutorado.....</i>	<i>149</i>

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 – Convenção adotada para o fluxo de potência harmônica em quatro quadrantes.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2.1 – Forma de onda do sinal em estudo.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 2.2 – Forma de onda do sinal em estudo - modificado.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 2.3 – Forma de onda do sinal em estudo.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 2.4 – Forma de onda do sinal em estudo.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 2.5 – Espectro harmônico do sinal em estudo.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 2.6 – Espectro harmônico do sinal em estudo.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 2.7 – Espectro harmônico do sinal em estudo.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 2.8 – Estrutura geral para instrumentos de medição, adaptado da IEC 61000-4-7.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 2.9 – Representação gráfica do grupo harmônico e grupo inter-harmônico.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 2.10 – Representação gráfica do subgrupo harmônico e subgrupo inter-harmônico.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 2.11 – Representação gráfica da agregação de 180 ciclos.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 2.12 – Representação gráfica da agregação de 10 minutos e 2 horas.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 3.1 – Medição de 24 horas da LFC. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 3.2 – Medição de 24 horas da LFC. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 3.3 – Medição de 24 horas da LFC. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 3.4 – Medição de 24 horas da LFC. (a) tensão e (b) corrente de 9ª ordem harmônica.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 3.5 – Medição de 24 horas da LFC. (a) tensão e (b) corrente de 11ª ordem harmônica.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 3.6 – Medição de 24 horas da LFC. (a) tensão e (b) corrente de 13ª ordem harmônica.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 3.7 – Medição de 24 horas da lâmpada LED. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica..</i>	<i>55</i>
<i>Figura 3.8 – Medição de 24 horas da lâmpada LED. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica..</i>	<i>55</i>
<i>Figura 3.9 – Medição de 24 horas da lâmpada LED. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica..</i>	<i>56</i>
<i>Figura 3.10 – Medição de 24 horas da lâmpada LED. (a) tensão e (b) corrente de 9ª ordem harmônica.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 3.11 – Medição de 24 horas da lâmpada LED. (a) tensão e (b) corrente de 11ª ordem harmônica.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 3.12 – Medição de 24 horas da lâmpada LED. (a) tensão e (b) corrente de 13ª ordem harmônica.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 3.13 – Medição de 2 minutos da TV. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 3.14 – Medição de 2 minutos da TV. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 3.15 – Medição de 2 minutos da TV. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 3.16 – Medição de 2 minutos da TV. (a) tensão e (b) corrente de 9ª ordem harmônica.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 3.17 – Medição de 2 minutos da TV. (a) tensão e (b) corrente de 11ª ordem harmônica.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 3.18 – Medição de 2 minutos da TV. (a) tensão e (b) corrente de 13ª ordem harmônica.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 3.19 – Medição de 2 minutos do micro-ondas. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica.....</i>	<i>61</i>

<i>Figura 3.20 – Medição de 2 minutos do micro-ondas. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 3.21 – Medição de 2 minutos do micro-ondas. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 3.22 – Medição de 2 minutos do micro-ondas. (a) tensão e (b) corrente de 9ª ordem harmônica.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 3.23 – Medição de 2 minutos do micro-ondas. (a) tensão e (b) corrente de 11ª ordem harmônica.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 3.24 – Medição de 2 minutos do micro-ondas. (a) tensão e (b) corrente de 13ª ordem harmônica.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 3.25 – Medição de 24 horas do computador. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 3.26 – Medição de 24 horas do computador. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica...64</i>	<i>64</i>
<i>Figura 3.27 – Medição de 24 horas do computador. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica...65</i>	<i>65</i>
<i>Figura 3.28 – Medição de 24 horas do computador. (a) tensão e (b) corrente de 9ª ordem harmônica...65</i>	<i>65</i>
<i>Figura 3.29 – Medição de 24 horas do computador. (a) tensão e (b) corrente de 11ª ordem harmônica.66</i>	<i>66</i>
<i>Figura 3.30 – Medição de 24 horas do computador. (a) tensão e (b) corrente de 13ª ordem harmônica.66</i>	<i>66</i>
<i>Figura 3.31 – Medição de 24 horas em uma instalação residencial. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica com ampliação de uma determinada região do gráfico.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 3.32 – Medição de 24 horas em uma instalação residencial. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica com ampliação de uma determinada região do gráfico.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 3.33 – Medição de 24 horas em uma instalação residencial. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica com ampliação de uma determinada região do gráfico.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 3.34 – Medição de 24 horas em uma instalação residencial. (a) tensão e (b) corrente de 9ª ordem harmônica com ampliação de uma determinada região do gráfico.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 3.35 – Medição de 24 horas em uma instalação residencial. (a) tensão e (b) corrente de 11ª ordem harmônica.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 3.36 – Medição de 24 horas em uma instalação residencial. (a) tensão e (b) corrente de 13ª ordem harmônica.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 3.37 – Medição de 24 horas em uma instalação comercial. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 3.38 – Medição de 24 horas em uma instalação comercial. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 3.39 – Medição de 24 horas em uma instalação comercial. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 3.40 – Medição de 24 horas em uma instalação comercial. (a) tensão e (b) corrente de 9ª ordem harmônica.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 3.41 – Medição de 24 horas em uma instalação comercial. (a) tensão e (b) corrente de 11ª ordem harmônica.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 3.42 – Medição de 24 horas em uma instalação comercial. (a) tensão e (b) corrente de 13ª ordem harmônica.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 3.43 – Medição de 24 horas de um alimentador de distribuição em média tensão. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.....</i>	<i>75</i>

<i>Figura 3.44 – Medição de 24 horas de um alimentador de distribuição em média tensão. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 3.45 – Medição de 24 horas de um alimentador de distribuição em média tensão. (a) tensão e (b) corrente de 11ª ordem harmônica.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 3.46 – Medição de 24 horas de um alimentador de distribuição em média tensão. (a) tensão e (b) corrente de 13ª ordem harmônica.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 4.1 - Forma de onda da tensão e corrente medida durante intervalo de 10 minutos.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 4.2 – Corrente harmônica em plano polar: (a) 3ª harmônica. (b) 5ª harmônica. (c) 7ª harmônica. (d) 9ª harmônica. (e) 11ª harmônica. (f) 13ª harmônica.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 4.3 – Corrente harmônica em plano polar com fasor agregado pelo método 1: (a) 3ª harmônica.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 4.4 – Corrente harmônica em plano polar com fasor agregado pelo método 2: (a) 3ª harmônica. (b) 5ª harmônica. (c) 7ª harmônica. (d) 9ª harmônica. (e) 11ª harmônica. (f) 13ª harmônica.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 5.1 – Representação gráfica de uma agregação do ângulo de fase para a 3ª ordem harmônica, a partir das potências harmônicas, para um intervalo com 5 janelas de dados.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 5.2 – Estrutura geral para instrumentos de medição, adaptado da IEC 61000-4-7, considerando a proposta para a agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 5.3 – Representação dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente com a tensão fundamental na referência.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 5.4 – Fluxograma para determinação dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 5.5 – Fasor da corrente harmônica adotando as amplitudes e os ângulos de fase agregados: (a) 3ª harmônica. (b) 5ª harmônica. (c) 7ª harmônica. (d) 9ª harmônica. (e) 11ª harmônica. (f) 13ª harmônica.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 6.1 - Analisador de Qualidade da Energia Elétrica PQSYSWEB modelo AIW.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 6.2 - Conexão dos canais de tensão e de corrente da fonte CMC 256 plus.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 6.3 - Estrutura laboratorial de testes do medidor.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 6.4 – Demonstração da variação temporal dos dois ciclos do Teste III.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 6.5 – Demonstração da variação temporal dos dois ciclos do Teste IV.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 6.6 – Medidor conectado na instalação residencial 1.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 6.7 – Medição de 24 horas na instalação residencial 1. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 6.8 – Medição de 24 horas na instalação residencial 1. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 6.9 – Medição de 24 horas na instalação residencial 1. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 6.10 – Comportamento das correntes harmônicas registradas para a instalação residencial 1 durante 24 horas de medição. (a) amplitude de 3ª harmônica, (b) ângulo de fase para 3ª harmônica, (c) amplitude de 5ª harmônica, (d) ângulo de fase para 5ª harmônica, (e) amplitude de 7ª harmônica e (f) ângulo de fase para 7ª harmônica.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 6.11 – Medição de 24 horas na instalação residencial 2. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica.....</i>	<i>128</i>
<i>Figura 6.12 – Medição de 24 horas na instalação residencial 2. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.....</i>	<i>129</i>

<i>Figura 6.13 – Medição de 24 horas na instalação residencial 2. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 6.14 – Comportamento das correntes harmônicas registradas para a instalação residencial 2 durante 24 horas de medição. (a) amplitude de 3ª harmônica, (b) ângulo de fase para 3ª harmônica, (c) amplitude de 5ª harmônica, (d) ângulo de fase para 5ª harmônica, (e) amplitude de 7ª harmônica e (f) ângulo de fase para 7ª harmônica.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 6.15 – Medição de 24 horas na instalação residencial 3. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica.....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 6.16 – Medição de 24 horas na instalação residencial 3. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 6.17 – Medição de 24 horas na instalação residencial 3. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 6.18 – Comportamento das correntes harmônicas registradas para a instalação residencial 3 durante 24 horas de medição. (a) amplitude de 3ª harmônica, (b) ângulo de fase para 3ª harmônica, (c) amplitude de 5ª harmônica, (d) ângulo de fase para 5ª harmônica, (e) amplitude de 7ª harmônica e (f) ângulo de fase para 7ª harmônica.....</i>	<i>132</i>
<i>Figura 6.19 – Medidor conectado na instalação comercial 1.....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 6.20 – Medição de 7 dias da instalação comercial 1. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica</i>	<i>134</i>
<i>Figura 6.21 – Medição de 7 dias da instalação comercial 1. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.....</i>	<i>134</i>
<i>Figura 6.22 – Medição de 7 dias da instalação comercial 1. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.....</i>	<i>135</i>
<i>Figura 6.23 – Comportamento das correntes harmônicas registradas para a instalação comercial 1 durante 24 horas de medição. (a) amplitude de 3ª harmônica, (b) ângulo de fase para 3ª harmônica, (c) amplitude de 5ª harmônica, (d) ângulo de fase para 5ª harmônica, (e) amplitude de 7ª harmônica e (f) ângulo de fase para 7ª harmônica.....</i>	<i>135</i>
<i>Figura 6.24 – Medição de 7 dias da instalação comercial 2. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica.....</i>	<i>136</i>
<i>Figura 6.25 – Medição de 7 dias da instalação comercial 2. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.....</i>	<i>136</i>
<i>Figura 6.26 – Medição de 7 dias da instalação comercial 2. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.....</i>	<i>137</i>
<i>Figura 6.27 – Comportamento das correntes harmônicas registradas para a instalação comercial 2 durante 24 horas de medição. (a) amplitude de 3ª harmônica, (b) ângulo de fase para 3ª harmônica, (c) amplitude de 5ª harmônica, (d) ângulo de fase para 5ª harmônica, (e) amplitude de 7ª harmônica e (f) ângulo de fase para 7ª harmônica.....</i>	<i>137</i>
<i>Figura 6.28 – Medidor conectado na instalação industrial 1.....</i>	<i>138</i>
<i>Figura 6.29 – Medição de 7 dias da instalação industrial 1. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica.....</i>	<i>139</i>
<i>Figura 6.30 – Medição de 7 dias da instalação industrial 1. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.....</i>	<i>139</i>
<i>Figura 6.31 – Medição de 7 dias da instalação industrial 1. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.....</i>	<i>140</i>
<i>Figura 6.32 – Comportamento das correntes harmônicas registradas para a instalação industrial 1 durante 24 horas de medição. (a) amplitude de 3ª harmônica, (b) ângulo de fase para 3ª harmônica, (c)</i>	

<i>amplitude de 5ª harmônica, (d) ângulo de fase para 5ª harmônica, (e) amplitude de 7ª harmônica e (f) ângulo de fase para 7ª harmônica.....</i>	<i>140</i>
<i>Figura 6.33 – Medidor conectado na instalação industrial 2.....</i>	<i>141</i>
<i>Figura 6.34 – Medição de 7 dias da instalação industrial 2. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica.....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 6.35 – Medição de 7 dias da instalação industrial 2. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 6.36 – Medição de 7 dias da instalação industrial 2. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 6.37 – Comportamento das correntes harmônicas registradas para a instalação industrial 2 durante 24 horas de medição. (a) amplitude de 3ª harmônica, (b) ângulo de fase para 3ª harmônica, (c) amplitude de 5ª harmônica, (d) ângulo de fase para 5ª harmônica, (e) amplitude de 7ª harmônica e (f) ângulo de fase para 7ª harmônica.....</i>	<i>143</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 4.1 – Fluxo de energia harmônica ativa total do intervalo de medição de 10 minutos.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabela 4.2 – Ângulo de fase agregado de 10 minutos para as componentes harmônicas de tensão e corrente – Método 1.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 4.3 – Ângulo de fase agregado de 10 minutos para as componentes harmônicas de tensão e corrente – Método 2.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 4.4 – Amplitude da tensão e corrente harmônica utilizando a agregação de 10 minutos utilizando a metodologia da IEC.</i>	<i>86</i>
<i>Tabela 4.5 – Energia harmônica ativa calculada utilizando as amplitudes agregadas pelo método da IEC e os ângulos de fase das componentes harmônicas agregado pelo Método 1.....</i>	<i>88</i>
<i>Tabela 4.6 – Energia harmônica ativa calculada utilizando as amplitudes agregadas pelo método da IEC e os ângulos de fase das componentes harmônicas agregado pelo Método 2.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabela 4.7 – Diferença entre o fluxo de energia harmônica ativa durante os 10 minutos de medição e o calculado pelos valores agregados.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabela 5.1 – Resultados obtidos para os ângulos de fase agregados de 10 minutos para as componentes harmônicas de tensão e corrente adotando a metodologia proposta.....</i>	<i>102</i>
<i>Tabela 5.2 - Energia harmônica ativa calculada utilizando as amplitudes agregadas pelo método da IEC e os ângulos de fase agregados conforme metodologia proposta.....</i>	<i>103</i>
<i>Tabela 5.3 – Ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente agregados para o intervalo de tempo igual a 10 minutos utilizando a metodologia proposta, o Método 1 e o Método 2... </i>	<i>105</i>
<i>Tabela 5.4 – Energias harmônicas ativas de referência e calculadas utilizando os ângulos de fase agregados segundo a metodologia proposta, o Método 1 e o Método 2.....</i>	<i>106</i>
<i>Tabela 5.5 – Diferença percentual entre as energias harmônicas ativas de referência e calculadas utilizando os ângulos de fase agregados segundo a metodologia proposta, o Método 1 e o Método 2..</i>	<i>107</i>
<i>Tabela 6.1 – Características técnicas do medidor.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabela 6.2 – Precisão das grandezas mensuráveis.....</i>	<i>111</i>
<i>Tabela 6.3 – Teste I – Tensão: Amplitudes e ângulos de fase fixos ao longo de 10 minutos.....</i>	<i>115</i>
<i>Tabela 6.4 – Teste I – Corrente: Amplitudes e ângulos de fase fixos ao longo de 10 minutos.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabela 6.5 – Dados referentes as tensões e as correntes implementadas na fonte programável para o Teste II, ângulo de fase da tensão fundamental da fase A deslocado em 30° da referência.....</i>	<i>117</i>
<i>Tabela 6.6 – Teste II – Tensão: Amplitudes e ângulos de fase fixos ao longo de 10 minutos.....</i>	<i>118</i>
<i>Tabela 6.7 – Teste II – Corrente: Amplitudes e ângulos de fase fixos ao longo de 10 minutos.....</i>	<i>119</i>
<i>Tabela 6.8 – Teste III – Tensão: Amplitudes e ângulos de fase dos dois ciclos variáveis ao longo de 10 minutos.....</i>	<i>121</i>
<i>Tabela 6.9 – Teste III – Corrente: Amplitudes e ângulos de fase dos dois ciclos variáveis ao longo de 10 minutos.....</i>	<i>121</i>
<i>Tabela 6.10 – Teste III – Tensão: Amplitudes e ângulos de fase resultantes do período de 10 minutos. </i>	<i>122</i>
<i>Tabela 6.11 – Teste III – Corrente: Amplitudes e ângulos de fase resultantes do período de 10 minutos.....</i>	<i>122</i>
<i>Tabela 6.12 – Teste IV – Tensão: Amplitudes e ângulos de fase resultantes do período de 10 minutos. </i>	<i>123</i>
<i>Tabela 6.13 – Teste IV – Corrente: Amplitudes e ângulos fase resultantes do período de 10 minutos..</i>	<i>123</i>

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

QEE	Qualidade da Energia Elétrica
TDF	Transformada Discreta de Fourier
h	Ordem harmônica
P_h	Potência harmônica ativa de ordem h
V_h	Amplitude das componentes harmônicas de tensão de ordem h
ϕ_{vh}	Ângulo de fase das componentes harmônicas de tensão de ordem h
I_h	Amplitude das componentes harmônicas de corrente de ordem h
ϕ_{ih}	Ângulo de fase das componentes harmônicas de corrente de ordem h
θ_h	Ângulo de defasagem entre a tensão e corrente harmônica de ordem h
ϕ_{ref}	Ângulo de fase situado na referência (0°)
Q_h	Potência harmônica reativa de ordem h
c_0	Componente contínua do sinal
k	Ordem da componente espectral
c_k	Amplitude da componente espectral de ordem k
ϕ_k	Ângulo de fase da componente espectral de ordem k ;
f_1	Frequência da componente fundamental
N	Número de amostras por ciclo de um sinal contínuo
T_s	Frequência de amostragem
T	Período do sinal
P	Quantidade de ciclos na janela amostral
i	Valor incremental
C_{180}	Valor eficaz resultante da agregação de 180 ciclos de medição
C_{12}	Registros resultantes da medição de 12 ciclos
N_{180}	Número de valores de entrada para a agregação dos 180 ciclos
C_{10min}	Valor eficaz resultante da agregação de 10 minutos de medição
C_{12}	Registros medidos de 12 ciclos
N_{10min}	Número de valores de entrada para a agregação dos 10 minutos
C_{2h}	Valor eficaz resultante da agregação de 2 horas de medição
$PR_{ag,h}$	Nível de prevalência dos ângulos de fase agregados de ordem h
TP	Transformador de potencial
TC	Transformador de corrente
EA_{12h}	Energia harmônica ativa, de ordem h , da janela de 12 ciclos
EA_{10h}	Energia harmônica ativa resultante da agregação de 10 minutos
ϕ'_{vh}	Ângulo de fase das componentes harmônicas de tensão corrigido de acordo com a referência (tensão fundamental da fase A)

ϕ'_{lh}	Ângulo de fase das componentes harmônicas de corrente corrigido de acordo com a referência adotada (tensão fundamental da fase A)
ϕ_{V1}	Ângulo de fase da tensão fundamental da fase A de cada janela de 12 ciclos (referência)
$E_{A,h}$	Energia harmônica ativa de ordem h referente a janela de 12 ciclos
$E_{R,h}$	Energia harmônica reativa de ordem h referente a janela de 12 ciclos
Δt_1	Intervalo de tempo referente a janela de 12 ciclos
n	Ordem harmônica referente ao agrupamento das componentes harmônicas
$E_{A,sg,n}$	Grupo da energia harmônica ativa de ordem n referente a janela de 12 ciclos
$E_{R,sg,n}$	Grupo da energia harmônica reativa de ordem n referente a janela de 12 ciclos
$E_{A,sg,n}$	Subgrupo da energia harmônica ativa de ordem n referente a janela de 12 ciclos
$E_{R,sg,n}$	Subgrupo da energia harmônica reativa de ordem n referente a janela de 12 ciclos
$\phi_{Vag,n}$	Ângulo de fase das componentes harmônicas de tensão agregado
$E_{ag A,n}$	Energia harmônica ativa agregada de ordem n
$E_{ag R,n}$	Energia harmônica reativa agregada de ordem n
$\phi_{Iag,n}$	Ângulo de fase das componentes harmônicas de corrente agregado
$\phi_{Vag,n}$	Ângulo de fase das componentes harmônicas de tensão agregado
$\theta_{ag,n}$	Defasamento angular entre a tensão e a corrente harmônica agregado
$V_{ag,n}$	Amplitude eficaz da tensão harmônica agregada conforme norma IEC
$I_{ag,n}$	Amplitude eficaz da corrente harmônica agregada conforme norma IEC
Δt_2	Intervalo de tempo referente a agregação temporal

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, notadamente em função da ascensão das políticas de sustentabilidade e meio ambiente em todo o mundo, é cada vez mais evidente a evolução tecnológica na geração, transmissão, distribuição e consumo da energia elétrica, devido, sobretudo, à busca por soluções energéticas mais eficientes. Neste contexto, em decorrência da crescente utilização de cargas eletrônicas, com características não-lineares, surgem nos sistemas elétricos fenômenos ou perturbações que podem ser traduzidos em prejuízos tanto para os consumidores, quanto para as concessionárias de distribuição e transmissão de energia elétrica. A designação “não-linear”, para caracterização de cargas elétricas sob o ponto de vista da Qualidade da Energia Elétrica (QEE), é utilizada para representar aquelas cargas que fundamentalmente não obedecem à lei de Ohm [1]. Ou seja, aquelas cargas nas quais a relação entre a tensão aplicada e a corrente resultante não pode ser matematicamente representada por uma função linear. Assim, como decorrência direta dessa não-linearidade, verifica-se o surgimento de um dos principais fenômenos associados com a Qualidade da Energia Elétrica: a distorção harmônica [2].

Em função do surgimento das distorções nas formas de onda da corrente e, conseqüentemente, da tensão, tem-se, dentre outros impactos, o incremento das perdas técnicas nos sistemas de distribuição e transmissão da energia elétrica [3], representando dezenas de milhões de reais em prejuízos para as diversas concessionárias do setor elétrico. Nesse contexto, a quantificação da parcela de perdas associada à circulação de correntes harmônicas nas redes elétricas pode ser realizada de duas formas: (i) através de sua medição direta, demandando a existência de uma quantidade expressiva de medidores, o que poderia ser mais oneroso para as concessionárias do que o próprio incremento das perdas técnicas promovido pelas correntes harmônicas; ou (ii) através da realização de estudos de fluxo harmônico, da mesma forma como atualmente as concessionárias quantificam as perdas técnicas na frequência fundamental através de estudos convencionais de fluxo de carga.

De qualquer forma, ainda que sejam realizados estudos de fluxo harmônico para quantificação das perdas associadas ao fluxo de correntes harmônicas nas redes elétricas, verificam-se grandes dificuldades com relação a uma modelagem matemática precisa para representação das diversas cargas existentes, de modo que, em termos práticos, se faz necessária

a realização de pequenas campanhas de medição visando a caracterização, ainda que estatística, das emissões de correntes harmônicas em pontos específicos do sistema.

Por outro lado, também são necessárias medições específicas visando a caracterização das tensões e correntes harmônicas quando da realização de estudos para dimensionamento de soluções para atenuação dos efeitos decorrentes da circulação das correntes harmônicas nas redes elétricas, a exemplo dos filtros harmônicos passivos [4]. Em ambos os casos, a caracterização da tensão e da corrente harmônica nos diferentes pontos de medição, em cada frequência, deve ser baseada em dois atributos essenciais: amplitude (ou módulo) e ângulo de fase.

Atualmente, a metodologia para quantificação das amplitudes das tensões e correntes harmônicas, através de medições digitais, são estabelecidas por normas de abrangência mundial, a exemplo das normas IEC 61.000-4-7 [5] e IEC 61.000-4-30 [6]. Praticamente todos os medidores de parâmetros de qualidade da energia elétrica, disponíveis comercialmente, baseiam-se nos protocolos e procedimentos estabelecidos por essas normas para medição das amplitudes das tensões e das correntes harmônicas. Outro aspecto importante, no contexto dessas normas, é que as amplitudes destas grandezas são quantificadas considerando-se agregações temporais com duração de 12 e 180 ciclos da frequência fundamental de 60 Hz, assim como uma agregação temporal com duração de 10 minutos, sendo esse último o tempo de agregação mais utilizado no contexto das medições de parâmetros da Qualidade da Energia Elétrica.

Ao mesmo tempo em que a metodologia de agregação das amplitudes das tensões e correntes harmônicas, para intervalos de tempo específicos, encontra-se consolidada, o mesmo não se observa no caso da agregação dos ângulos de fase dessas componentes para esses mesmos intervalos de tempo. Na verdade, atualmente não existem metodologias padronizadas para esse propósito.

Dessa forma, considerando-se que as medições de parâmetros de Qualidade da Energia Elétrica têm como resultado prático apenas os valores das amplitudes das tensões e correntes harmônicas individuais agregadas de 10 minutos, qual seria o valor do ângulo de fase correspondente para essas duas grandezas no mesmo intervalo de tempo? Em termos físicos e elétricos, apesar da pergunta parecer não possuir um sentido prático, uma vez que os fasores de tensão e corrente harmônica podem variar muito dentro de uma janela de tempo de 10 minutos,

ela é de suma importância para solução dos problemas práticos abordados anteriormente, em destaque para a produção de insumos para realização de estudos de fluxo de potência harmônico, visando, dentre outros objetivos, o cálculo das perdas técnicas nos sistemas de distribuição de energia devido à circulação de correntes harmônicas.

Diante do exposto, surge a presente Tese de Doutorado, a qual se encontra totalmente direcionada para a elaboração de uma metodologia para agregação temporal dos ângulos de fase das tensões e das correntes harmônicas.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Atualmente, existe uma intensa preocupação por parte dos agentes responsáveis pelo setor elétrico, tanto a nível nacional quanto internacional, no tocante aos assuntos relacionados com a normatização dos valores de referência para os níveis das distorções harmônicas de tensão e para emissão de correntes harmônicas de cargas e instalações presentes nos sistemas elétricos de potência. No entanto, todas as recomendações encontradas em diferentes normas, apresentam valores de referência baseados em amplitudes harmônicas, sem nenhuma consideração quanto aos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente.

Como já mencionado, a utilização dos ângulos de fase das componentes harmônicas é necessária em vários tipos de análises em sistemas elétricos, com destaque para os estudos de fluxo de potência harmônica.

Os estudos de fluxo harmônico apresentam a identificação da direcionalidade do fluxo de potência para uma determinada frequência harmônica, podendo o mesmo ocorrer tanto no sentido da fonte de alimentação na frequência fundamental para a carga, quanto no sentido contrário, ou seja, da carga para a fonte. Para as componentes harmônicas de tensão e corrente de mesma ordem, o sentido do fluxo da corrente pode ser determinado pela diferença angular entre essas duas grandezas. Assim, por exemplo, adotando-se o sinal de uma tensão harmônica de ordem h como referência, caso o ângulo de fase da corrente (ϕ_{ih}) esteja situado no intervalo de $270^\circ < \phi_{ih} < 90^\circ$, o sentido da corrente será da fonte para a carga. De outra forma, caso o ângulo de fase da corrente harmônica esteja situado no intervalo de $90^\circ < \phi_{ih} < 270^\circ$, o fluxo da corrente harmônica se fará no sentido da carga para a fonte [7] [8]. Analiticamente, essa constatação pode ser obtida diretamente do sinal da potência ativa associada com as tensões e correntes harmônicas de mesma ordem, conforme equação (1.1).

$$P_h = V_h I_h \cos(\theta_h) = V_h I_h \cos(\phi_{vh} - \phi_{ih}) \quad (1.1)$$

Sendo,

P_h a potência harmônica ativa de ordem h ;

V_h a amplitude da tensão harmônica de ordem h ;

I_h a amplitude da corrente harmônica de ordem h ;

θ_h o ângulo de defasagem entre a tensão e corrente harmônica de ordem h ;

ϕ_{vh} o ângulo de fase da tensão harmônica de ordem h ;

ϕ_{ih} o ângulo de fase da corrente harmônica de ordem h .

Adicionalmente, as possíveis condições de fluxo de potência estão apresentadas na Figura 1.1, onde a tensão harmônica está situada na referência ($\phi_{ref} = 0^\circ$) e o fasor da corrente harmônica poderá estar situado em qualquer uma das oito situações possíveis. Da análise da equação (1.1), assim como da Figura 1.1, observa-se que P_h será positivo, indicando um fluxo de potência harmônica ativa no sentido da fonte para a carga, sempre que o fasor de I_h estiver no 1º ou 4º quadrante, Figura 1.1 (a), (e) e (f). Da mesma forma, P_h será negativo, indicando um fluxo de potência harmônica ativa no sentido da carga para a fonte, sempre que o fasor de I_h estiver no 2º ou 3º quadrante, Figura 1.1 (b), (g) e (h). Adicionalmente, não haverá fluxo de potência harmônica ativa quando $\phi_{ih} = \pm 90^\circ$, Figura 1.1 (c) e (d). Cabe ainda destacar que a mesma análise pode ser feita considerando o fluxo da potência harmônica reativa para a ordem harmônica h , conforme também mostrado na Figura 1.1.

Nos estudos de fluxo de potência harmônico, as cargas do tipo não-linear podem ser representadas por fontes de correntes, método de injeção de corrente, sendo que para sistemas envolvendo mais de uma carga não-linear, o desconhecimento dos ângulos de fase das componentes harmônicas irá ocasionar resultados inconsistentes [9].

Outra aplicação que necessita dos ângulos de fase das componentes harmônicas é apresentada em [10]. Neste trabalho é apresentada uma metodologia intitulada como “método simplificado para estimação do potencial de cancelamento do nível harmônico em uma rede elétrica”. Esta metodologia é dividida em duas partes, denominadas cancelamento primário e cancelamento secundário. Na primeira parte, o cancelamento primário é definido em relação ao nível da corrente harmônica circulante no sistema, enquanto o segundo método se refere ao cancelamento da magnitude da tensão harmônica no sistema. Basicamente está relacionado com

a tensão e a corrente presentes no sistema antes e após a conexão de uma nova carga não-linear. Dessa forma a magnitude da tensão e corrente harmônica resultante podem ser reduzidas devido a diversidade dos ângulos de fase, de cada tipo de carga, em cada ordem harmônica.

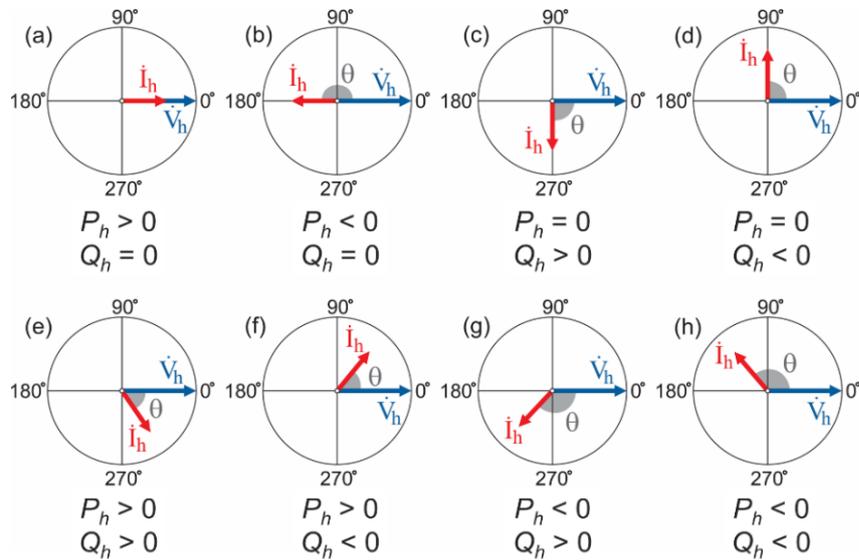


Figura 1.1 – Convenção adotada para o fluxo de potência harmônica em quatro quadrantes.

Neste contexto, diferentes equipamentos conectados à rede elétrica podem consumir ou injetar correntes harmônicas com diferentes amplitudes e ângulos de fase para cada ordem harmônica. Consequentemente, as interações entre essas correntes podem resultar tanto no incremento da corrente no sistema como, podem também, resultar em uma redução ou, até mesmo, no cancelamento da corrente em uma determinada ordem harmônica. À vista disto, desconectar uma carga do tipo não-linear da rede, que está injetando uma certa corrente harmônica, pode resultar na redução da distorção harmônica deste ponto, como pode também aumentar, impactando nas tensões harmônicas de outros usuários e nas correntes que fluem pela rede elétrica, a qual está diretamente relacionada com as perdas elétricas nos condutores [11].

Uma vez que, tanto a tensão quanto a corrente harmônica possuem ângulos de fase, duas relações podem ser obtidas no que tange a defasagem angular entre essas duas grandezas. Primeiramente, o ângulo entre a corrente harmônica e a tensão harmônica, para a mesma ordem, é intitulado ângulo de fase relativo, enquanto que o ângulo entre a corrente harmônica e a tensão fundamental é o ângulo de fase absoluto [12].

O ângulo de fase relativo pode ser utilizado para a avaliação dos fluxos de potência harmônica [13], atribuição de responsabilidade utilizando o método de fluxo de potência [14],

cálculos elétricos em condições distorcidas [3] e em estudos de propagação harmônica em redes de distribuição [15].

O ângulo de fase absoluto pode ser utilizado em outros tipos de análises e estudos envolvendo o sistema elétrico, sendo principalmente utilizado em estudos de estimação do potencial cancelamento do nível harmônico [10], no estudo da performance de relés de proteção [16] e no estudo do somatório das correntes harmônicas de diferentes cargas perturbadoras [17].

Constata-se que o uso do ângulo de fase das componentes harmônicas é oportuno para vários tipos de análises em se tratando de sistemas elétricos de potência. Assim sendo, a medição englobando não apenas a amplitude da componente harmônica, mas também o seu ângulo de fase tem grande relevância em diferentes aplicações. Porém, o ângulo de fase varia de forma proporcional com a aleatoriedade de cargas, pois este é dependente dos equipamentos conectados na rede. Neste contexto, surge uma questão de suma relevância: qual seria a metodologia conveniente para realizar a agregação do ângulo de fase, para cada componente harmônica, representativo de uma janela de tempo definida? Alguns fabricantes de equipamentos de medição disponibilizam resultados para o ângulo de fase das componentes harmônicas, todavia ainda não existe uma metodologia consolidada para se obter um valor de ângulo agregado por intervalos de tempo. Assim, por exemplo, qual seria o ângulo de uma determinada corrente de 5ª harmônica (em relação à tensão de mesma ordem) considerando-se um valor agregado de 10 minutos de medição?

Alguns fabricantes utilizam o ângulo resultante de apenas uma determinada janela da Transformada de Fourier para caracterizar o ângulo de fase das componentes harmônicas em um determinado intervalo de tempo de medição. Contudo, este valor não representa de forma física a característica real do intervalo de medição. Assim, é notória a falta de uma metodologia específica para tal propósito, em detrimento às metodologias já consolidadas para agregação temporal das amplitudes das componentes harmônicas de tensão e de corrente. Neste contexto, portanto, surge a presente Tese de Doutorado com o objetivo de desenvolver uma nova metodologia para agregação temporal dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente.

O tema relacionado ao ângulo de fase representativo das componentes harmônicas de uma medição cujo valor deve ser agregado, representa um tópico de pesquisa na área da Qualidade da Energia Elétrica com poucas publicações até o momento. Em [10] é apresentado

um estudo de avaliação da prevalência de emissões de correntes harmônicas em redes de baixa tensão. Neste caso a agregação do ângulo harmônico é feita utilizando a soma fasorial das correntes harmônicas. Assim, o ângulo de fase das componentes harmônicas é o argumento da soma fasorial das correntes dentro de um intervalo de tempo. No capítulo 2 será apresentado esta metodologia com mais detalhes. No referido trabalho é apresentado ainda uma análise da prevalência das correntes harmônicas de 3ª e 5ª ordem para instalações em baixa tensão, assim como resultados de um estudo que analisa o comportamento do ângulo de fase das componentes harmônicas em redes de outros países. Em outros trabalhos dos mesmos autores são analisados o comportamento de algumas cargas isoladas, instalações em baixa tensão e em subestações, como pode ser visto em [12], [17], [18] e [19]. Outro trabalho que analisou o ângulo de fase das componentes harmônicas foi o trabalho [20], que utilizou a mesma metodologia dos trabalhos citados anteriormente. Neste trabalho foi analisado a predominância dos ângulos de fase para a 5ª e 7ª ordens harmônicas em uma rede elétrica com a presença de usinas renováveis.

Diante da conjuntura apresentada, e devido à ausência de um consenso sobre o mecanismo de agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente, fica evidenciada a importância de uma metodologia específica para realização desta agregação, a qual poderá ser futuramente incorporada aos documentos normativos sobre o tema.

1.2 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

A principal contribuição desta Tese de Doutorado está associada a elaboração e proposição de uma metodologia para realizar as agregações dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente. Para esse propósito, serão considerados os seguintes objetivos específicos:

- Síntese da normatização atual para medição de distorções harmônicas;
- Apresentação da metodologia de agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas encontradas em diferentes referências bibliográficas;
- Análise dos ângulos de fase das componentes harmônicas para cargas isoladas conectadas na rede elétrica da concessionária local;
- Análise dos ângulos de fase das componentes harmônicas para instalações elétricas em baixa tensão;

- Elaboração e proposição de uma metodologia para agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e corrente, baseada no conceito da energia harmônica associada aos períodos de agregação;
- Avaliação comparativa da metodologia proposta com outras alternativas apresentadas na literatura;
- Testes laboratoriais utilizando um medidor com a metodologia proposta implementada;
- Medição em campo utilizando um medidor com a metodologia proposta implementada.

Para alcançar os objetivos específicos propostos serão realizadas modelagens matemáticas, simulações computacionais, assim como diversas medições em ambiente laboratorial e em instalações elétricas reais.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

Com o intuito de atender aos objetivos estabelecidos, o presente documento encontra-se estruturado, a partir deste ponto, da seguinte forma:

Capítulo 2 - Apresentação dos fundamentos teóricos sobre as ferramentas matemáticas utilizadas para o cálculo das amplitudes e dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente, utilizadas por medidores de parâmetros de QEE. Realização de uma síntese das principais normas internacionais abordando a obtenção dos valores agregados para as amplitudes das tensões e das correntes harmônicas. Por fim, neste capítulo serão apresentadas e analisadas outras técnicas para agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas, proposta por outros pesquisadores.

Capítulo 3 - Análise do comportamento dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente a partir de medições realizadas em cargas individuais, conectadas na rede de distribuição de energia elétrica da concessionária local, instalações residenciais e comerciais e por fim, um alimentador em média tensão. O objetivo deste capítulo é analisar através do defasamento angular entre a tensão e a corrente harmônica se o fluxo de potência harmônica ativa prevalece no sentido fonte-carga ou carga-fonte.

Capítulo 4 – Utilizando-se de uma medição de formas de onda de tensão e de corrente em uma instalação elétrica real, é realizada uma análise dos fluxos das energias harmônicas no ponto de monitoração. Estes resultados serão utilizados como base para comparação das grandezas resultantes das agregações. As amplitudes serão agregadas segundo as orientações da norma IEC 61.000-4-30 e os ângulos de fase das componentes harmônicas serão agregadas segundo as metodologias presentes nas referências bibliográficas.

Capítulo 5 - Apresentação da metodologia proposta para realizar as agregações temporais dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente. Neste capítulo é apresentado ainda, as modificações propostas na estrutura geral para instrumentos de medição presente na IEC 61.000-4-7. Finalmente, é feito uma avaliação de desempenho da metodologia proposta, adotando como base comparativa os fluxos de energias harmônicas resultantes de uma medição real.

Capítulo 6 - Implementação da metodologia proposta em um medidor disponível comercialmente. São apresentadas as principais características técnicas deste equipamento, assim como as precisões das grandezas mensuráveis. Com objetivo de avaliar a performance do medidor frente as agregações dos ângulos de fase, são apresentados os resultados de uma bateria de testes realizada em laboratório. Finalmente, são apresentados os resultados obtidos em uma minicampanha de medição considerando instalações elétricas reais. Estas medições têm como objetivo contribuir para o levantamento da tipologia harmônica de instalações elétricas em baixa tensão, tanto para as amplitudes, quanto também para os ângulos de fase.

Capítulo 7 - Apresentação das conclusões gerais do trabalho, assim como sugestões para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Uma vez delineado os objetivos e as contribuições para o presente trabalho, o qual tem por meta definir uma metodologia para agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente, este capítulo destina-se a apresentar os embasamentos teóricos associados ao tema. Dessa forma, inicialmente é apresentado a definição matemática adotada para quantificar as componentes de frequência, em termos de amplitudes e de ângulos de fase, dos sinais de tensão e de corrente das redes elétricas. Na sequência, através de equações e exemplos, será apresentado de forma bem elementar a relevância do ângulo de fase na forma de onda de um sinal, tanto no deslocamento de uma referência angular quanto no erro no processo de cálculo do ângulo de fase.

Somado a tais diretrizes, o capítulo em pauta contempla ainda, a apresentação de uma síntese das normas para medição das amplitudes das componentes harmônicas de tensão e de corrente utilizadas atualmente, bem como a metodologia para agregação destas amplitudes durante intervalos de tempos definidos. Por fim, será também apresentada uma metodologia, proposta por outros autores, para agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas, bem como a técnica utilizada para quantificar o quanto os ângulos de fase agregados estão ou não em concordância com os fasores originais.

2.1 PROCESSAMENTO DOS SINAIS ELÉTRICOS

Os sinais de tensão e de corrente presentes nas redes elétricas são caracterizados como analógico, ou seja, eles assumem um valor para cada instante de tempo. As leituras desses sinais no domínio do tempo são realizadas pelos equipamentos de medição e, para que eles sejam processados, é necessário que eles sejam amostrados. Este processo de amostragem, consiste em capturar os valores do sinal no domínio do tempo em intervalos de tempos uniformemente distribuídos.

Desta forma, a taxa de amostragem de um sinal está diretamente associada com a quantidade de amostras do sinal analógico coletadas em uma determinada unidade de instante de tempo. A taxa de amostragem pode ser expressa em amostras por unidade de tempo ou simplesmente em Hertz. A taxa amostral está diretamente relacionada com a fidelidade do sinal digital, quanto maior a taxa de amostragem de um sinal discreto, maior será a quantidade de pontos no mesmo intervalo de tempo e, dessa forma, maior será a precisão do sinal digital, ou

sinal discreto, em relação ao sinal analógico, ou contínuo. Segundo o Teorema de Nyquist, a frequência de amostragem de um sinal analógico, para que o mesmo possa posteriormente ser reconstituído com o mínimo de perda de informações, deve ser maior que duas vezes a maior frequência do espectro desse sinal. Assim sendo, para um sinal cuja taxa amostral é de 64 amostras por ciclo, por exemplo, é possível obter as amplitudes e os ângulos de fase até a 32ª ordem harmônica.

As informações contidas nos sinais de tensão e de corrente no domínio do tempo nem sempre são de grande valia para as análises de padrões de conformidade da rede, como por exemplo as distorções harmônicas de tensão. Desta forma, a conversão para o domínio da frequência se torna mais apropriado para tal situação, resultando nas amplitudes, frequências e ângulos de fase para cada ordem harmônica do sinal em questão.

Uma forma bem difundida para obter os valores no domínio da frequência, a partir de um sinal no domínio do tempo, é utilizando a ferramenta matemática denominada Transformada de Fourier (TF). Por este teorema, qualquer sinal distorcido pode ser decomposto em um somatório de ondas senoidais, com frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental, conforme apresentado na equação (2.1).

$$f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \text{sen}(k(2\pi f_1)t + \varphi_k) \quad (2.1)$$

Onde:

c_0 = componente contínua do sinal $f(t)$;

k = ordem da componente espectral;

c_k = amplitude da componente espectral de ordem k ;

φ_k = ângulo de fase da componente espectral de ordem k ;

f_1 = frequência da componente fundamental.

Dentro da família das transformadas de Fourier, quando se trabalha com sinais periódicos e discretos, a Transformada Discreta de Fourier (TDF) é a técnica mais apropriada para uso, sendo esta possível de ser implementada em processadores de medidores de parâmetros de energia elétrica.

Dessa forma, um sinal contínuo $f(t)$ amostrado a uma frequência de N amostras por ciclo, ou seja, $T_s = T/N$, onde T_s representa a frequência de amostragem e T o período do sinal, a TDF para este sinal pode ser obtida pela equação (2.2).

$$F(\omega_k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{-j(2\pi/N)nk} \quad (2.2)$$

Onde:

$F(\omega_k)$ = Espectro de $f(n)$;

k = ordem harmônica (0, 1, ..., $N-1$);

$$\omega_k = \left(\frac{2\pi}{T_s N} \right) k = \left(\frac{2\pi}{T} \right) k.$$

A partir desta equação tem-se a representação no domínio da frequência de um sinal no domínio do tempo. O domínio da frequência apresenta os valores em módulo e ângulo de fase do sinal presentes para diversas frequências. O módulo quantifica a intensidade ou amplitude, enquanto que o ângulo de fase representa o deslocamento angular na determinada frequência. A resolução espectral depende do tamanho da janela amostrada, ou seja, a quantidade de ciclos do sinal em que se aplicou o cálculo da TDF. A resolução espectral de uma janela é determinada de acordo com a equação (2.3).

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{pT} = \frac{2\pi f}{p} = \frac{\omega_1}{p} \quad (2.3)$$

Onde:

$\Delta\omega$ é a resolução espectral em frequência do espectro do sinal amostrado (rad/s);

p é o número de ciclos da janela de amostragem;

T é o período do sinal amostrado;

ω_1 é a frequência fundamental do sinal.

2.2 DESLOCAMENTO DO ÂNGULO DE FASE

Aplicando-se a TDF para um sinal no domínio do tempo, os ângulos de fase resultantes para todas as ordens harmônicas estão referenciados para o início da janela do sinal (instante zero). A título de exemplo, tem-se uma forma de onda hipotética de uma tensão distorcida apresentada na Figura 2.1 e definida pela equação (2.4). Esta forma de onda distorcida é

composta por uma componente fundamental (sinal vermelho) de frequência igual a 60 Hz e uma 5ª harmônica (sinal azul). A componente fundamental tem um ângulo de fase de -50° enquanto que a 5ª harmônica possui o ângulo de fase igual a -150° , ambos medidos a partir do início da janela. Todavia, as frequências de ambas são diferentes, resultando em escalas de ângulos de fase também diferentes. A componente de 5ª ordem está a uma frequência angular superior a componente fundamental, ela se desloca cinco vezes mais rápido do que a fundamental. Consequentemente a 5ª harmônica completa 5 ciclos ($5 \times 360^\circ$) enquanto a fundamental completa um ciclo (360°).

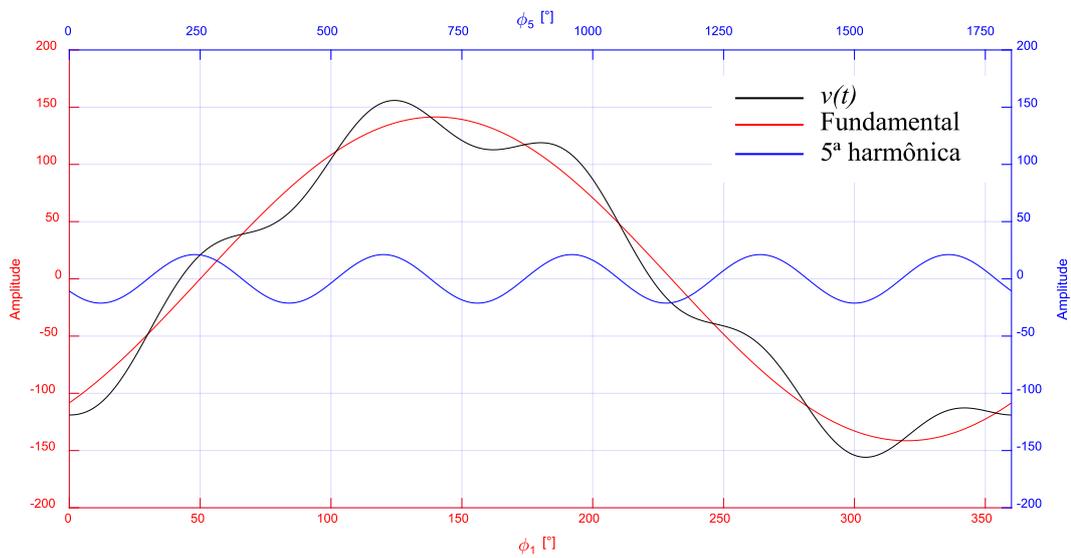


Figura 2.1 – Forma de onda do sinal em estudo.

$$v(t) = 100\sqrt{2}\text{sen}((2\pi f)t - 50) + 15\sqrt{2}\text{sen}(5(2\pi f)t - 150) \quad (2.4)$$

Em uma medição, dependendo da janela adotada na aplicação da TDF diferentes referências de tempo inicial para a onda podem ser selecionadas como referência para os ângulos de fase. Geralmente, em algumas análises de medições em redes de energia elétrica, a referência do ângulo de fase da componente fundamental de tensão, para uma determinada fase, precisa ser sincronizada com o tempo inicial, necessitando assim, alterar o ângulo de fase de forma que este seja adotado como referência (0°). Mudanças na referência de tempo inicial equivale a alterar a posição da janela de medição e, com ela, os valores dos ângulos de fase. Neste caso, as mudanças na referência de tempo inicial da forma de onda pode ser aplicada,

porém deve-se sempre levar em consideração as diferentes escalas de tempo para as diferentes ordens harmônicas.

Voltando ao exemplo apresentado anteriormente e com objetivo de mudar a referência de tempo inicial da forma de onda da equação (2.4), passando o ângulo de fase da componente fundamental para referência, ou seja, 0° , deve-se deslocar esta componente somando 50° graus, enquanto que a componente de 5ª harmônica deve ser acrescentado de 5 vezes o ângulo da fundamental, ou seja, somar 250° . Como esta já possuía um ângulo de fase igual a -150° , acrescentando 250° , resultará em um ângulo de fase igual a 100° , conforme apresentado na equação (2.5). Na Figura 2.2 tem-se a forma de onda deste novo sinal, juntamente com a onda de frequência fundamental e de 5ª ordem harmônica. É possível notar que a onda apenas deslocou-se, mantendo o mesmo formato.

$$v(t) = 100\sqrt{2}\text{sen}((2\pi f)t + 0) + 15\sqrt{2}\text{sen}(5(2\pi f)t + 100) \quad (2.5)$$

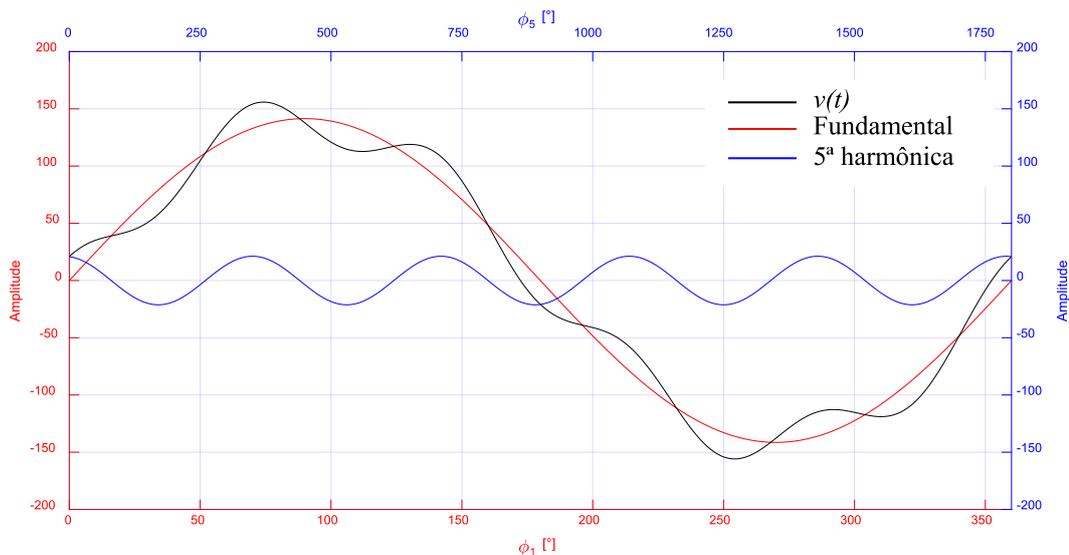


Figura 2.2 – Forma de onda do sinal em estudo - modificado.

2.3 EFEITOS DOS ÂNGULOS DE FASE DAS COMPONENTES HARMÔNICAS

Fundamentalmente, erros no cálculo do ângulo de fase das componentes harmônicas, podem impactar de forma significativa em análises de distorção de grandezas elétricas. Um simples erro no cálculo do ângulo através da TDF ou mesmo no deslocamento da forma de onda para mudança de referência do tempo inicial, pode modificar a forma de onda

significativamente, sem alterar as amplitudes de cada harmônica. Dessa forma, para exemplificar melhor esta situação, tem-se uma forma de onda hipotética de tensão distorcida, com a presença das componentes de 3ª e 5ª ordens harmônicas, representada pela equação (2.6). A forma de onda desta tensão distorcida original é apresentada na Figura 2.3.

$$v(t) = 100\sqrt{2}\text{sen}((2\pi f)t - 30) + 30\sqrt{2}\text{sen}(3(2\pi f)t + 220) + 20\sqrt{2}\text{sen}(5(2\pi f)t - 135) \quad (2.6)$$

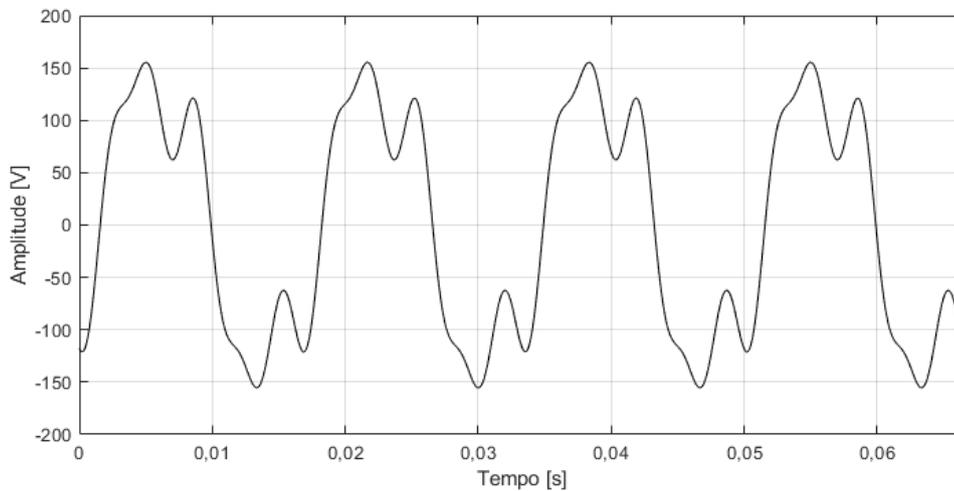


Figura 2.3 – Forma de onda do sinal em estudo.

O simples fato de alterar o sinal de uma das harmônicas pode resultar em uma mudança drástica na forma de onda resultante. Assim, por exemplo, invertendo-se o sinal da 3ª harmônica na equação (2.6), ou seja, rotacionar o respectivo fasor em 180°, obtém-se o novo sinal apresentado na equação (2.7), sendo que agora a forma de onda assume a característica mostrada na Figura 2.4. Comparando-se as Figuras 2.3 e 2.4, é possível notar que não se trata de um mesmo sinal. Nesse sentido, verifica-se que o valor de pico da onda, que antes se situava em torno de 150 volts, passa a ser de aproximadamente 200 volts. Este fato pode acarretar em análises errôneas quanto ao comportamento de equipamentos conectados neste sistema. Finalmente, apesar das diferenças visíveis nas formas de onda, ao se analisar apenas os espectros de amplitudes dessas mesmas formas de onda, surge um conceito equivocado de que se tratam de sinais idênticos, uma vez que os espectros de frequência (em termos de amplitudes), mostrados na Figura 2.5, serão idênticos. Em outras palavras, não é possível reproduzir uma determinada forma de onda apenas conhecendo-se o seu espectro de amplitudes harmônicas.

$$v(t) = 100\sqrt{2}\text{sen}((2\pi f)t - 30) + 30\sqrt{2}\text{sen}(3(2\pi f)t + 40) + 20\sqrt{2}\text{sen}(5(2\pi f)t - 135) \quad (2.7)$$

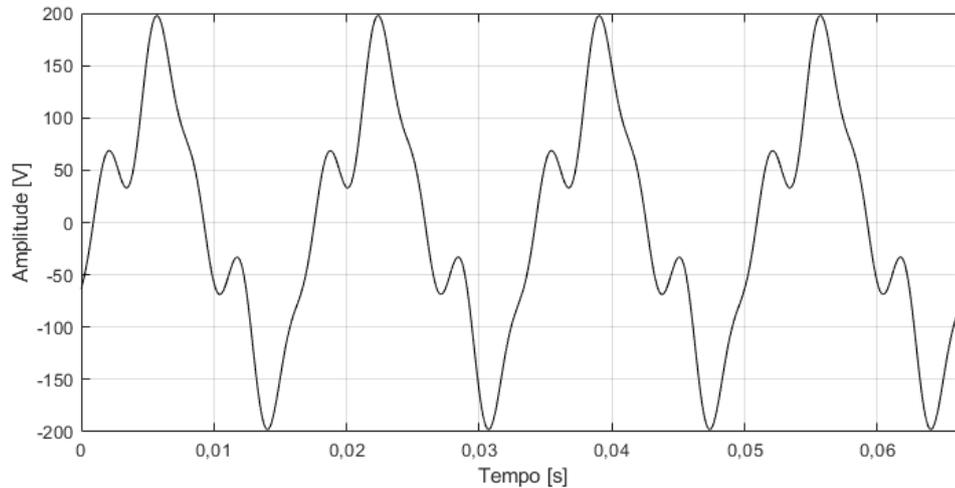


Figura 2.4 – Forma de onda do sinal em estudo.

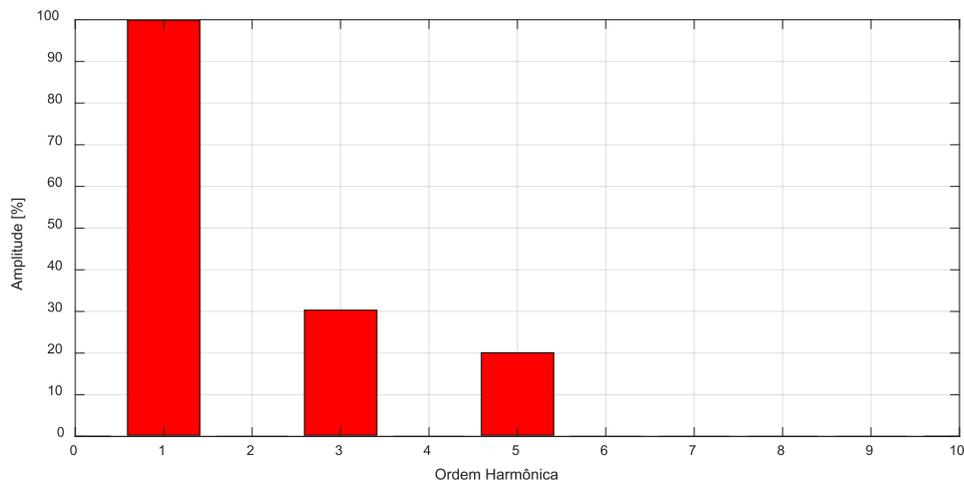


Figura 2.5 – Espectro harmônico do sinal em estudo (amplitude).

Em contrapartida, quando se analisam os ângulos de fase das diferentes componentes harmônicas é possível identificar a inversão de polaridade na tensão de 3ª harmônica. Na Figuras 2.6 e 2.7, são apresentados, respectivamente, os ângulos de fase das componentes harmônicas para a forma de onda original e para a forma de onda com a inversão da polaridade da tensão de 3ª harmônica. Por este exemplo fica claro que, uma dada composição harmônica pode apresentar efeitos que não são perceptíveis apenas pela simples verificação dos valores eficazes ou mesmo do espectro de frequências em termos de amplitude.

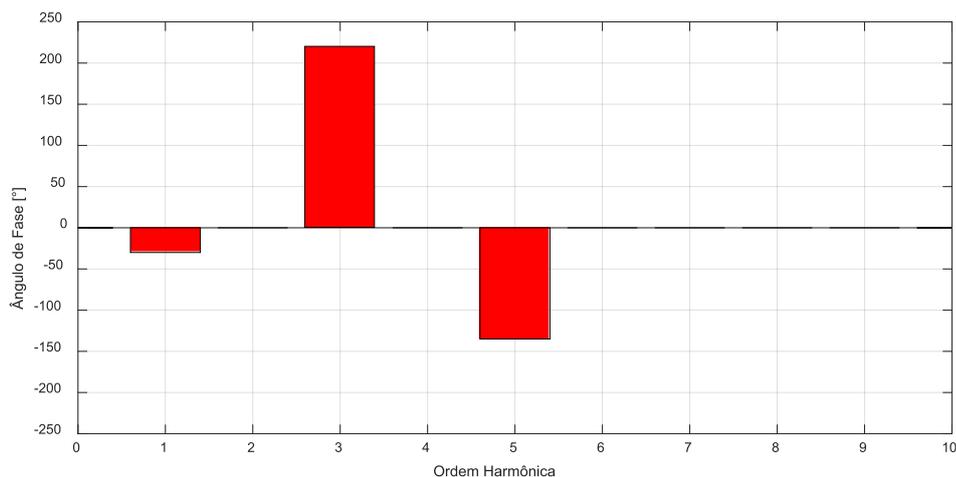


Figura 2.6 – Espectro harmônico do sinal em estudo (ângulo de fase).

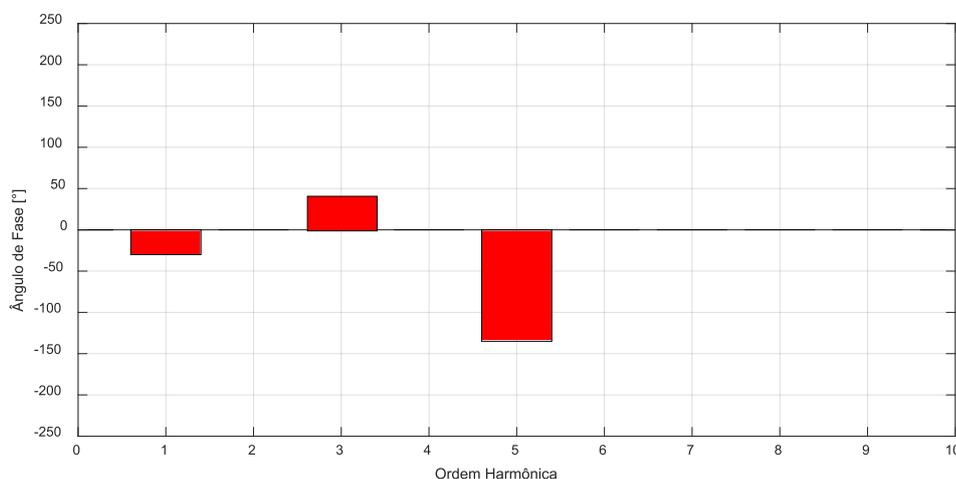


Figura 2.7 – Espectro harmônico do sinal em estudo (ângulo de fase).

2.4 NORMALIZAÇÃO PARA MEDIÇÃO DAS AMPLITUDES DAS COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO E DE CORRENTE

Com advento de algumas normas nacionais, a monitoração da QEE vem se tornando uma prática cada vez mais comum e necessária, tanto para os agentes responsáveis pela distribuição da energia elétrica como também para os consumidores. Este fato está fazendo com que as empresas especializadas na concepção dos instrumentos de medição busquem uma melhoria contínua em seus produtos. Atualmente, os medidores seguem as definições e padronizações publicadas nas normas da IEC.

No contexto da QEE, duas normas da IEC são merecedoras de destaque, que são a IEC 61.000-4-7 e a IEC 61.000-4-30. A primeira traz as recomendações técnicas para teste e

medição que os medidores de QEE devem seguir para uso em sistemas de fornecimento de energia e equipamentos. Enquanto que a segunda, abrange as técnicas e os métodos de medição de uma série de parâmetros de QEE, de forma que fenômenos registrados por dois equipamentos distintos apresentem o mesmo resultado.

O foco deste trabalho está voltado para as harmônicas e inter-harmônicas, por isto será aqui apresentado apenas as partes das normas que tratam deste assunto em específico.

2.4.1 Norma IEC 61.000-4-7

A norma IEC 61.000-4-7 destina-se a instrumentação para medição das componentes espectrais de sinais com frequência inferior a 9 kHz, em sistemas de fornecimento de energia com 50 ou 60 Hz. A estrutura geral recomendada para os instrumentos de medição de tensões e de correntes harmônicas e inter-harmônicas é apresentado na Figura 2.8. Os blocos iniciais do instrumento principal constituem o pré-processamento dos sinais, que compreende o circuito de entrada com filtro *anti-aliasing*, o conversor A/D incluindo unidade de amostragem e a unidade de sincronismo e modelagem de janelas para processamento da TDF (bloco geração de frequência de amostragem e conversão de amostragem).

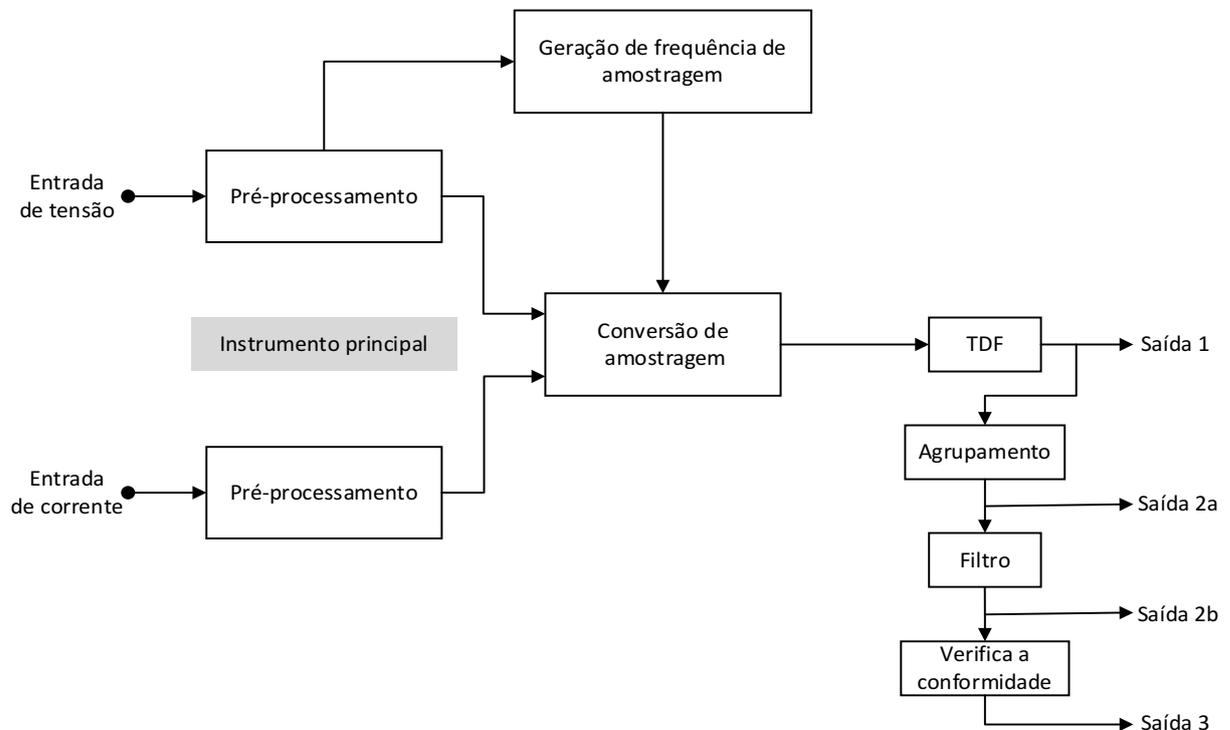


Figura 2.8 – Estrutura geral para instrumentos de medição, adaptado da IEC 61.000-4-7.

O cálculo da TDF pode ser feito conforme equação (2.2), no qual apresenta como resultado a tensão e/ou corrente em amplitude e ângulo de fase para cada frequência espectral. A IEC recomenda aplicar a TDF considerando a utilização de janelas retangulares com duração de 12 ciclos consecutivos, para sistemas com frequência de 60 Hz. Adotando este intervalo, a resolução espectral resultante para os sinais de entrada será de 5 Hz, conforme pode ser confirmado pela equação (2.3). Desta forma, a saída 1 é basicamente o resultado da Transformada de Fourier para o sinal de tensão e/ou corrente de entrada, apresentando as amplitudes e os ângulos de fase para cada janela de 12 ciclos com resolução espectral de 5 Hz.

Para simplificar a análise e visando minimizar os erros associados ao fenômeno do espalhamento espectral, outras saídas são definidas, como no caso da saída 2a. Para obter os dados desta saída, a norma considera a aplicação de dois diferentes métodos, denominados como grupos e subgrupos de harmônicas e inter-harmônicas. O objetivo da aplicação destes métodos é agrupar os valores eficazes do espectro resultante, reduzindo os erros devido ao espalhamento espectral e estabelecer sua respectiva magnitude.

Os valores eficazes que compõe o grupo harmônico, que é a primeira forma de agrupamento, podem ser obtido, para sistemas em 60 Hz, de acordo com a equação (2.8). Já o grupo inter-harmônico pode ser calculado pela equação (2.9).

$$G_{g,h}^2 = \frac{C_{k-6}^2}{2} + \sum_{i=-5}^5 C_{k+i}^2 + \frac{C_{k+6}^2}{2} \quad (2.8)$$

$$G_{ig,h}^2 = \sum_{i=1}^{11} C_{k+i}^2 \quad (2.9)$$

Sendo:

$G_{g,h}$ = valor eficaz equivalente do Grupo harmônico de ordem h ;

$G_{ig,h}$ = valor eficaz equivalente do Grupo inter-harmônico de ordem h ;

C_k = valor eficaz da componente espectral de frequência k ;

i = valor incremental.

A Figura 2.9 ilustra de forma didática o cálculo do grupo harmônico e inter-harmônico, considerando um determinado espectro de frequência. O grupo harmônico 1 é resultante do agrupamento dos valores eficazes em torno da componente de 60 Hz. Conforme definido pela equação (2.8), os cinco valores adjacentes a cada componente harmônica múltipla de 60 são

acrescentadas em sua totalidade a magnitude de ordem h , enquanto que a componente de frequência que está exatamente ao meio de duas componentes de ordem inteira, deve ser considerado a metade da amplitude para cada ordem harmônica inteira, ou seja, metade para ordem harmônica inteira a esquerda e a outra metade para a da direita. Já o grupo inter-harmônico, é definido como o somatório dos quadrados das amplitudes de frequência não múltiplas de 60 entre cada ordem harmônica, ou seja, os 11 valores entre cada ordem múltipla de 60 são agrupados formando um valor definido como grupo inter-harmônico.

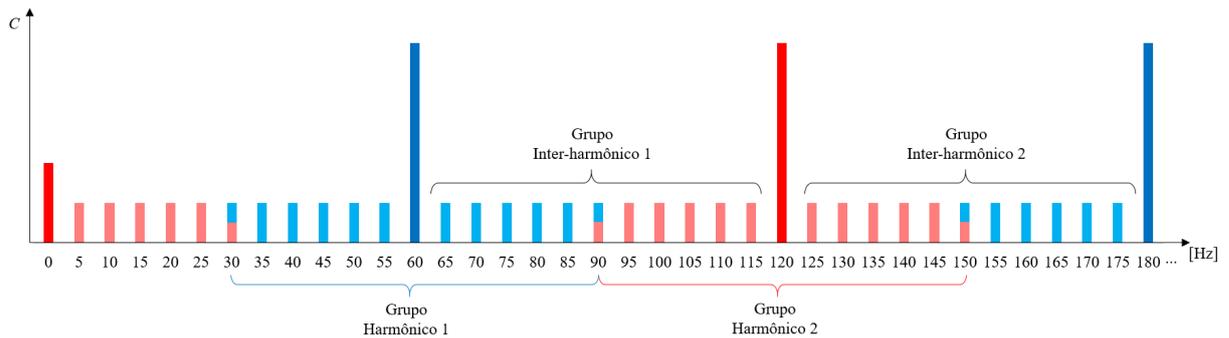


Figura 2.9 – Representação gráfica do grupo harmônico e grupo inter-harmônico.

O segundo método de agrupamento está associado com a criação de subgrupos harmônicos e inter-harmônicos. Para sistemas em 60 Hz, os valores eficazes equivalentes aos subgrupos harmônicos podem ser obtidos de acordo com a equação (2.10), enquanto que os valores para os subgrupos inter-harmônicos são dados pela equação (2.11).

$$G_{sg,h}^2 = \sum_{i=-1}^1 C_{k+i}^2 \quad (2.10)$$

$$G_{isg,h}^2 = \sum_{i=2}^{10} C_{k+i}^2 \quad (2.11)$$

Sendo:

$G_{sg,h}$ = valor eficaz equivalente do Subgrupo harmônico de ordem h ;

$G_{isg,h}$ = valor eficaz equivalente do Subgrupo inter-harmônico de ordem h ;

C_k = valor eficaz da componente espectral de frequência k ;

i = valor incremental.

Da mesma forma que foi feito anteriormente, a Figura 2.10 apresenta de forma gráfica o agrupamento pelo método dos subgrupos. O subgrupo harmônico é dado pelo agrupamento dos dois valores mais próximos, sendo um de cada lado, da componente harmônica múltipla da

frequência fundamental. Já o subgrupo inter-harmônico é o agrupamento dos demais valores, ou seja, deve-se agrupar os 9 valores entre as ordens harmônicas, exceto os valores utilizados no subgrupo harmônico.

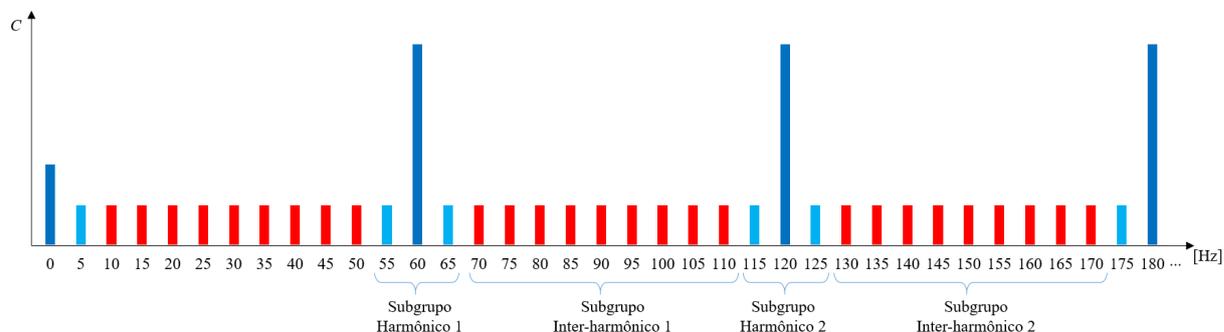


Figura 2.10 – Representação gráfica do subgrupo harmônico e subgrupo inter-harmônico.

Uma vez que o agrupamento harmônico é realizado utilizando apenas os valores referentes as amplitudes, a partir da saída 2a, as grandezas referentes aos ângulos de fase das componentes harmônicas, resultantes da TDF, são perdidos. Apenas os dados na saída 1 possuem os ângulos de fase das componentes harmônicas, todavia, esses dados são associados apenas para cada janela de 12 ciclos.

Retornando a Figura 2.8, tem-se ainda a aplicação de um filtro, saída 2b, com função de suavização dos resultados para fornecer uma saída mais estável, o que facilita a obtenção de medições comparáveis entre dois instrumentos conectados ao mesmo sinal da rede. O filtro recomendado pela norma é um filtro do tipo passa-baixa de primeira ordem. Por fim, é feita uma verificação de conformidade dos resultados de acordo com os requisitos de precisão para a medição de tensão e de corrente definidos por esta norma.

2.4.2 Norma IEC 61.000-4-30

Nesta norma são definidos os métodos para medição e interpretação dos resultados de parâmetros da QEE em sistemas de alimentação em corrente alternada. Os métodos de medição são descritos de forma que os resultados alcançados sejam confiáveis independentemente do método de implementação de cada fabricante. Esta norma se limita aos fenômenos de tensão, sendo os seguintes parâmetros considerados: frequência do sistema, magnitude da tensão de alimentação, cintilação luminosa, afundamento e elevação de tensão, interrupções de tensão, tensões transitórias, desequilíbrio de tensão, harmônicos e inter-harmônicos de tensão e variações rápidas de tensão. Como o foco do trabalho é o ângulo de fase das componentes

harmônicas, será apresentado aqui apenas a parte da norma referente as harmônicas e inter-harmônicas.

Inicialmente, esta norma define três classificações de medidores para os parâmetros associados a QEE, que são os medidores classe A, S e B. Esta classificação se dá pelo motivo das diversas dificuldades encontradas para atendimento a todas as definições da norma.

Os medidores de classe A atendem plenamente o que é definido em norma. Estes medidores são utilizados quando se necessita de medições precisas, como por exemplo em aplicações contratuais que podem exigir soluções de disputa judicial ou em verificações de conformidade com padrões. Ao utilizar dois medidores distintos do tipo classe A, para mensurar os mesmos sinais, ambos medidores devem apresentar os mesmos resultados, dentro da incerteza especificada para o parâmetro.

Os medidores do tipo classe S atendem a norma em partes, possivelmente com um conjunto limitado de parâmetros, com isso não apresentam grandes precisões e são utilizados basicamente para fins estatísticos, como por exemplo em pesquisas ou avaliações de QEE. Neste caso, medidores classe S de diferentes fabricantes podem apresentar resultados distintos, para determinados parâmetros, ao medir os mesmos sinais.

Medidores classe B englobam os medidores existentes no mercado que não enquadram nos critérios estabelecidos pela norma. A finalidade desta classificação pela norma é evitar a continuidade de fabricação de projetos obsoletos de muitos instrumentos existentes. Ressalta-se que medidores classe B não são recomendados para novos projetos.

A norma IEC 61.000-4-7 define os critérios para medição das tensões harmônicas que resultam em valores de 12 ciclos em grupo ou subgrupos. Porém, quando pretende-se analisar as tensões harmônicas fruto de uma medição, a norma IEC 61.000-4-30 estabelece diferentes procedimentos para agregações das amplitudes em intervalos de tempos pré-definidos. Estas agregações são realizadas visando a redução da necessidade de memória e esforço computacional por parte dos medidores. Dessa forma, para sistemas de fornecimento com frequência igual a 60 Hz, os valores de 12 ciclos devem ser agregados em três intervalos adicionais, que são:

- Agregação de 180 ciclos;
- Agregação de 10 minutos;
- Agregação de 2 horas.

Segundo a IEC 61.000-4-30, todas as agregações das amplitudes devem ser realizadas utilizando a raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos valores de entrada. Na Figura 2.11, tem-se a representação gráfica do algoritmo para agregação temporal de 180 ciclos, enquanto que na Figura 2.12, tem-se a representação das agregações de 10 minutos e de 2 horas.

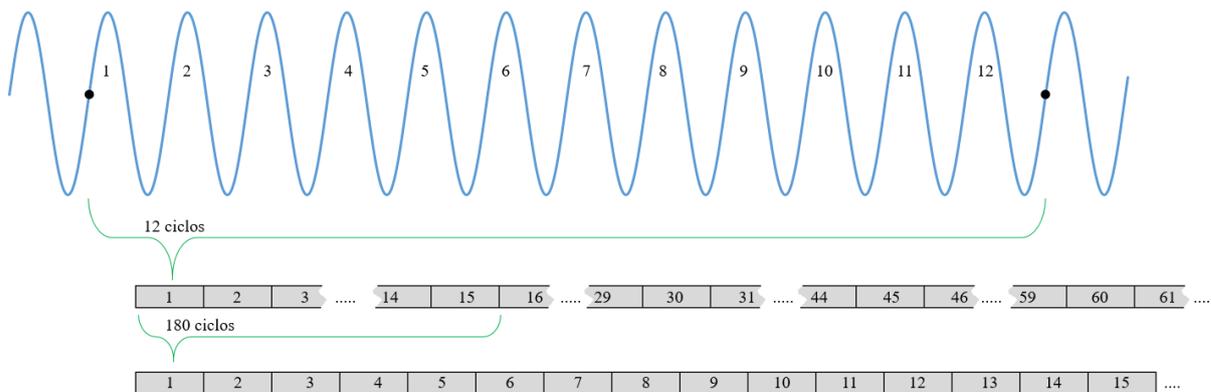


Figura 2.11 – Representação gráfica da agregação temporal de 180 ciclos.

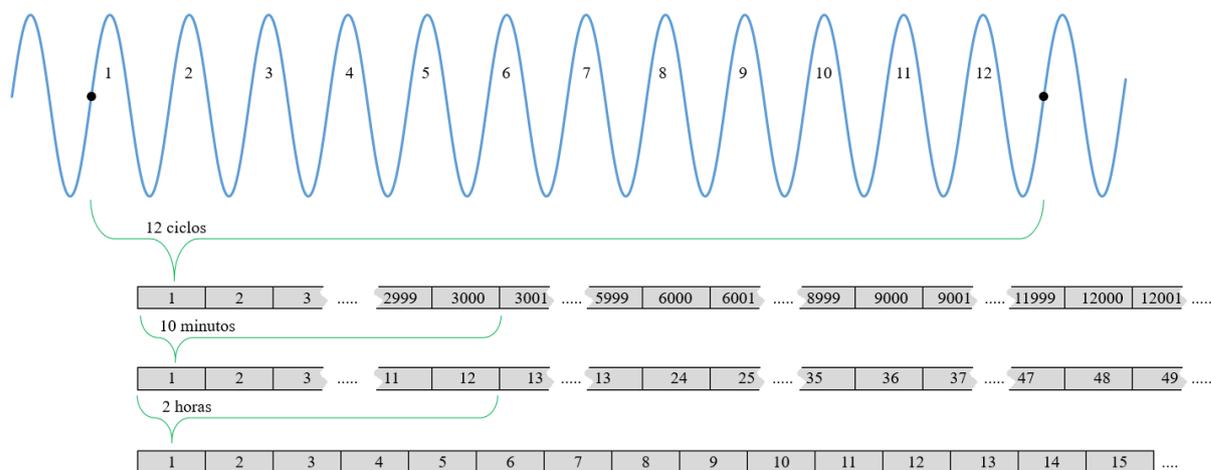


Figura 2.12 – Representação gráfica da agregação temporal de 10 minutos e 2 horas.

O primeiro nível de agrupamento é o intervalo de agregação de 180 ciclos, que é composto por 15 registros sequenciais de valores de 12 ciclos. A agregação de 180 ciclos pode ser obtido pela equação (2.12), sendo que esta agregação não se dá por tempo e sim por ciclos. A razão de isto acontecer é que a duração dos ciclos é referente a frequência da rede, a qual pode estar variando e não necessariamente fixa em 60 Hz. Dessa forma, não se pode garantir que os 180 ciclos estão no intervalo de tempo exato de 3 segundos. Assim, a norma em questão traz recomendações quanto ao sincronismo do relógio de tempo real do medidor.

$$C_{180} = \sqrt{\frac{1}{N_{180}} \sum_{i=1}^{N_{180}} C_{12(i)}^2} \quad (2.12)$$

Onde:

C_{180} = valor eficaz resultante da agregação de 180 ciclos de medição;

C_{12} = registros medidos de 12 ciclos;

N_{180} = número de valores de entrada para a agregação dos 180 ciclos;

i = valor incremental.

O segundo grupo das agregações é o agrupamento de 10 minutos. Os dados relativos ao intervalo de 10 minutos devem ser agregados a partir dos intervalos de tempo de 12 ciclos. O cálculo desta agregação é dado pela equação (2.13). Da mesma forma em que se levantou a questão da frequência no caso anterior, aqui também pode ocorrer variações da quantidade de valores de entrada para a agregação de 10 minutos. Se a frequência do sistema permanecer constante nos 60 Hz, existirão 3.000 blocos de 12 ciclos, porém caso ela seja menor, serão menos blocos e, conseqüentemente, se for maior, mais blocos. Por este motivo que a norma recomenda uma sincronização a cada intervalo de tempo de medição. Todavia, como esta questão não faz parte do escopo deste trabalho, ela não será levantada com maiores detalhes.

$$C_{10\min} = \sqrt{\frac{1}{N_{10\min}} \sum_{i=1}^{N_{10\min}} C_{12(i)}^2} \quad (2.13)$$

Sendo:

$C_{10\min}$ = valor eficaz resultante da agregação de 10 minutos de medição;

C_{12} = registros medidos de 12 ciclos;

$N_{10\min}$ = número de valores de entrada para a agregação dos 10 minutos;

i = valor incremental.

Por fim, os dados para o intervalo de agregação de 2 horas devem ser agregados a partir de 12 intervalos de 10 minutos, sendo calculado conforme a equação (2.14).

$$C_{2h} = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} C_{10\min(i)}^2} \quad (2.14)$$

Onde:

C_{2h} = valor eficaz resultante da agregação de 2 horas de medição;

$C_{10\min}$ = registros agregados de 10 minutos;

i = valor incremental.

No anexo A.6 da IEC 61.000-4-30, consta que as amplitudes das correntes harmônicas podem ser determinadas da mesma forma que apresentado para as tensões harmônicas. Contudo, assim como no caso das tensões, são apresentadas apenas as agregações para as amplitudes, enquanto que os ângulos de fase foram desprezados.

2.5 AGREGAÇÃO DOS ÂNGULOS DE FASE DAS COMPONENTES HARMÔNICAS SEGUNDO REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Atualmente existe uma pequena quantidade de trabalhos que tratam o tema referente as agregações temporais dos ângulos de fase das componentes harmônicas. Um dos principais trabalhos encontrados foi [10], onde a metodologia proposta para realizar as agregações dos ângulos de fase é fundamentada na soma fasorial dos registros de 12 ciclos oriundos da TDF.

Conforme apresentado anteriormente, a IEC 61.000-4-7 fornece para cada intervalo de 12 ciclos uma magnitude eficaz (Y_h) e um ângulo de fase (φ_h) para cada componente espectral de ordem h , que pode ser representado pelo fasor da equação (2.15). Neste caso, Y pode ser substituído pela tensão (V) ou pela corrente (I).

$$\dot{Y}_h = Y_h \angle \varphi_h \quad (2.15)$$

Uma vez realizado as agregações temporais, tem-se apenas um único fasor resultante do intervalo de tempo, podendo este ser, por exemplo, igual a 10 minutos. Este vetor agregado pode ser dado na forma da equação (2.16).

$$\dot{Y}_{ag,h} = Y_{ag,h} \angle \varphi_{ag,h} \quad (2.16)$$

Sendo:

$\dot{Y}_{ag,h}$ = fasor resultante da agregação, de ordem h ;

$Y_{ag,h}$ = módulo do fasor agregado de ordem h ;

$\varphi_{ag,h}$ = ângulo de fase para o fasor agregado de ordem h .

O fasor agregado pode ser calculado para qualquer intervalo de agregação, porém a recomendação é utilizar os intervalos propostos pela IEC 61.000-4-30, apresentado no tópico anterior. Em [10], as amplitudes e os ângulos de fase são agregados de forma distintas. As

amplitudes seguem os padrões apresentados pela IEC 61.000-4-30, conforme apresentado na equação (2.17).

$$Y_{ag,h} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{h,i})^2} \quad (2.17)$$

Sendo n a quantidade de registros que serão agregados, por exemplo, para o intervalo de agregação de 180 ciclos, o n equivale a 15 registros (na frequência de 60 Hz).

Para os ângulos de fase das componentes harmônicas, a proposta apresentada em [10] é realizar a soma fasorial dos registros individuais de 12 ciclos, de acordo com o intervalo de tempo desejado para agregação, e obter o ângulo do fasor resultante, isto para cada ordem harmônica, relacionado com a amplitude agregada $Y_{ag,h}$, conforme equação (2.18).

$$\varphi_{ag,h} = \arg\left(\sum_{i=1}^n \dot{Y}_{h,i}\right) \quad (2.18)$$

Nesta referência é apresentado ainda, que em caso de uma grande variação dos ângulos de fase, isto para uma determinada ordem, a informação do ângulo de fase do fasor harmônico agregado perde o seu significado, pois uma grande variação pode resultar em um ângulo agregado que não é referenciado em nenhum instante durante a agregação. Para avaliar o nível de prevalência do ângulo de fase agregado de uma determinada componente harmônica, ou seja, quantificar o nível de variação dos fasores das componentes harmônicas em relação ao valor agregado, é utilizada a equação (2.19).

$$PR_{ag,h} = \frac{\left|\sum_{i=1}^n \dot{Y}_{h,i}\right|}{\sum_{i=1}^n \left|\dot{Y}_{h,i}\right|} \quad (2.19)$$

Para quantificar o quanto o ângulo de fase agregado está ou não em concordância com os fasores originais, [10] criaram quatro faixas de classificação para o nível de prevalência. Essas faixas foram determinadas através de abrangentes simulações probabilísticas. Portanto, esses intervalos/classes são baseados em múltiplos conjuntos de dados sintéticos com diferentes níveis de dispersão, normalmente distribuídas para as magnitudes e para os ângulos de fase. Esta parte da pesquisa não foi minuciosamente dissertada pelos autores de [10], apenas apresentada de forma sintetizada. As quatro faixas de prevalência são:

- Alta Prevalência ($PR_{ag,h} \geq 0,95$): Os fasores harmônicos, para a ordem h , possuem baixa aleatoriedade. O ângulo de fase agregado das componentes harmônicas dentro do intervalo de tempo tem uma incerteza muito baixa.
- Média Prevalência ($0,95 > PR_{ag,h} \geq 0,89$): Os fasores harmônicos individuais ainda possuem uma boa similaridade, dessa forma o ângulo de fase agregado tem baixa incerteza.
- Baixa Prevalência ($0,89 > PR_{ag,h} \geq 0,8$): Os fasores harmônicos para ordem h estão mais dispersos, porém uma tendência geral ainda pode ser identificada. A incerteza do ângulo de fase agregado ainda é aceitável.
- Sem Prevalência ($PR_{ag,h} < 0,8$): Os fasores harmônicos, de ordem h , estão bem dispersos em mais de dois quadrantes, não sendo mais identificado uma prevalência. Neste caso, não é recomendado utilizar o ângulo de fase agregado, pois ele não tem significado real, sendo assim descartado a agregação do mesmo.

2.6 AGREGAÇÃO DOS ÂNGULOS DE FASE DAS COMPONENTES HARMÔNICAS ADOTADO POR MEDIDORES COMERCIAIS

Nos trabalhos apresentados na revisão bibliográfica, verificou-se que não existem equipamentos disponibilizados de forma comercial ou mesmo em fase de testes, com a implementação da metodologia apresentada no tópico anterior. Uma vez que tal metodologia não é abordada em normas, alguns fabricantes optam em apresentar apenas as amplitudes agregadas das componentes harmônicas, desprezando o ângulo de fase. Entretanto, alguns fabricantes de medidores de parâmetros de energia elétrica já decidiram implementar tal ferramenta e fornecem alguns modelos de medidores que além de apresentar as amplitudes das componentes harmônicas, fornecem também os ângulos de fase, mesmo não havendo a normatização para realizar este procedimento. Todavia, a metodologia implementada nos equipamentos, para agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas, não é apresentada de forma clara e seus resultados podem apresentar divergências com a realidade.

O medidor comercial apresentado em [21] é um exemplo de analisador de parâmetros de qualidade da energia elétrica que disponibiliza o recurso de medição dos ângulos de fase das componentes harmônicas. Este equipamento fornece, além dos ângulos de fase das

componentes harmônicas, o ângulo de fase predominante e uma relação do ângulo predominante, que é o nível de prevalência do ângulo de fase da componente harmônica durante o intervalo de tempo da agregação.

Outro equipamento, disponível no mercado, que apresenta os ângulos de fase das componentes harmônicas durante uma medição é o analisador apresentado em [22]. Em contato com este fabricante, foi repassado a informação de que este modelo não realiza a agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas. Os resultados para os ângulos de fase das componentes harmônicas, apresentado no visor do equipamento, são referentes ao resultado da TDF da última janela de 12 ciclos do intervalo de agregação. Portanto, os ângulos de fase apresentados para as componentes harmônicas são apenas uma amostra dentro de uma determinada janela de agregação.

Vale salientar que, como ainda não existe nenhuma definição padronizada para agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas, os fabricantes de equipamentos que optam por implementar tal metodologia muitas vezes utilizam de métodos que estão em fase de discussão e que ainda não apresentam resultados consolidados.

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou a conceituação utilizada para a quantificação, em termos de amplitudes e ângulos de fase, das tensões e das correntes harmônicas provenientes de uma forma de onda amostral no domínio do tempo. A técnica apresentada é a aplicação da Transformada Discreta de Fourier, sendo a resolução em frequência do espectro, tanto para as amplitudes quanto para os ângulos de fase, dependente do número de ciclos existentes na janela de aplicação da TDF. Já a máxima frequência de um espectro está associada a taxa de amostragem do sinal, ou seja, a quantidade de pontos existentes por ciclo.

Outro aspecto abordado neste capítulo foi quanto a relevância dos ângulos de fase para as componentes harmônicas na forma de onda de um sinal. Foi apresentado que, para alterar a referência de tempo inicial de uma forma de onda distorcida, ou seja, alterar o ângulo de fase da componente fundamental para 0° , deve-se considerar as diferentes frequências em cada ordem harmônica. Cada componente de frequência deve ter seu ângulo de fase modificado de acordo com sua escala de tempo, de modo a manter sempre a mesma forma de onda independente da referência adotada. Outro fato de suma importância, diz respeito a equívocos

nos cálculos dos ângulos de fase em uma determinada frequência, que pode alterar significativamente a forma de onda do sinal original. Duas formas de ondas distintas podem apresentar o mesmo espectro harmônico de amplitudes, porém com diferentes espectros de ângulos de fase.

Em seguida, apresentou-se em síntese, as duas normas internacionais que norteiam as medições das amplitudes das componentes harmônicas de tensão e de corrente utilizadas atualmente, a IEC 61.000-4-7 e a IEC 61.000-4-30. A primeira está direcionada aos procedimentos de cálculo que o medidor deve proceder, como por exemplo, a TDF e os agrupamentos em frequência. A outra norma apresenta a metodologia para agregação das amplitudes para janelas de tempo definidas. Estas normas contemplam apenas as amplitudes harmônicas, sendo os ângulos de fase resultantes do bloco da TDF desconsiderados, tanto nos agrupamentos quanto nas agregações temporais.

Finalmente, realizou-se uma abordagem acerca de uma metodologia encontrada na literatura. Nesta metodologia, as agregações das amplitudes seguem as definições das normas da IEC. Já no caso dos ângulos de fase, os valores agregados são os argumentos dos números complexos referentes ao somatório de todos os fasores dentro de um intervalo de tempo definido, tanto para as tensões quanto para as correntes. Como forma de análise destes ângulos de fase agregados, definiu-se um método para quantificar quanto os ângulos de fase agregados estão ou não em concordância com os fasores originais. Para avaliar o nível de prevalência dos ângulos de fase agregados das componentes harmônicas, apresentou-se quatro faixas de classificação, indo desde o nível de alta prevalência até o nível considerado sem prevalência.

3. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS ÂNGULOS DE FASE DAS COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO E DE CORRENTE

Atualmente, existe uma enorme gama de equipamentos elétricos conectados aos sistemas elétricos. Essas cargas, na sua grande maioria, são designadas como “não-lineares” pelo motivo da corrente não obedecer a lei de Ohm, conforme já exposto anteriormente. Assim sendo, como decorrência direta de sua não-linearidade, verifica-se o surgimento de correntes em frequências múltiplas ou não da frequência fundamental. Nos estudos de fluxo de potência harmônica, a carga do tipo não-linear deve ser contemplada através de uma representação matemática, em que caracterize a sua amplitude e seu ângulo de fase, sendo este último determinante do sentido do fluxo de potência harmônica, que pode ser tanto no sentido carga-fonte, quanto no sentido fonte-carga.

Neste contexto, este capítulo encontra-se direcionado na análise dos ângulos de fase das componentes harmônicas para equipamentos comumente encontrados em instalações elétricas em baixa tensão. A partir desta análise, é possível definir o sentido do fluxo de potência harmônica destes equipamentos quando conectados à rede de forma isolada. Na sequência, será analisado a corrente harmônica de instalações elétricas conectadas em baixa tensão. Por fim, será apresentado o comportamento das correntes harmônicas em um alimentador de média tensão.

3.1 METODOLOGIA DA MEDIÇÃO

Para alcançar o objetivo traçado para este capítulo, o qual está direcionado para a análise do defasamento angular entre as tensões e as correntes harmônicas de equipamentos operando de forma isolada, de instalações conectadas à rede elétrica em baixa tensão e ainda de um alimentador em média tensão, se faz necessário a realização de uma minicampanha de medição. Para obter as medições referentes as tensões de alimentação dos equipamentos, ou das instalações, juntamente com as correntes no ponto de conexão, utilizou-se de um analisador de qualidade da energia elétrica, modelo Marh-21 da RMS. Com este equipamento é possível registrar as formas de onda das tensões e das correntes, em um sistema trifásico, com a taxa amostral de 64 amostras por ciclo. Os métodos de registro das formas de onda podem ser tanto no modo de tempo ininterrupto como no modo de captura, sendo que este último, possibilita a aquisição da forma de onda de um ciclo dentro de uma janela de tempo pré-determinada pelo

usuário. A capacidade de armazenamento dos dados registrados na opção de medição contínua é de 2 minutos, enquanto que no modo de captura, depende do intervalo de tempo definido entre os registros dos ciclos. Neste trabalho utilizou-se dos dois modos de registro, sendo definido de acordo com o propósito da medição. Inicialmente, almejava-se analisar o comportamento dos ângulos de fase das componentes harmônicas ao longo de um dia inteiro de medição, porém como o medidor não possui capacidade de armazenamento de dados suficiente para tal procedimento, adotou-se a estratégia de registrar um ciclo completo a cada intervalo de tempo igual a um minuto, durante 24 horas de medição. No entanto, para alguns equipamentos, como por exemplo o micro-ondas, realizou-se a medição com registro de forma de onda no modo contínuo durante 2 minutos, pois manter este tipo de equipamento em operação durante 24 horas ininterruptas pode danificá-lo.

Os testes realizados com os equipamentos operando de forma isolada ocorreram em ambiente laboratorial. Inicialmente, conectou-se os equipamentos à rede da distribuidora de energia elétrica local (CEMIG), cuja tensão nominal é de 127/220V. Já as medições referentes às instalações elétricas aconteceram em campo, registrando-se, durante 24 horas, as formas de onda das tensões e das correntes de um ciclo a cada um minuto. No caso do alimentador de média tensão, a medição ocorreu em uma subestação da CEMIG, onde este alimentador atende, na sua maioria, instalações do tipo residencial e comercial.

Após a realização das medições, os dados foram processados utilizando o *software* MATLAB[®] no qual desenvolveu-se um código para processamento dos cálculos da TDF e plotagem dos resultados. Os resultados serão apresentados na forma de gráfico em coordenadas polares, onde cada ponto no plano representa a amplitude e o ângulo de fase oriundos do cálculo da TDF para a janela de um ciclo. Desta forma, serão apresentados um plano de coordenadas polares para a tensão harmônica, sendo adotado como referência a tensão na frequência fundamental, e um outro para a corrente harmônica de mesma ordem. Neste caso, a referência será a tensão harmônica de mesma frequência da corrente. Serão apresentados apenas as ordens harmônicas de maior relevância, sendo descartados aquelas de amplitudes irrelevantes. Para retratar melhor a densidade dos pontos dentro de uma “nuvem de dados”, adotou-se a representação em “mapa de calor”, na qual utiliza-se uma escala de cores para evidenciar a quantidade de pontos em uma determinada região. A escala de cores segue na sequência do azul passando pelo verde e amarelo até chegar ao vermelho, onde as menores ocorrências são na cor azul e as maiores são representadas na cor vermelha.

3.2 CARGAS INDIVIDUAIS ALIMENTADAS EM BAIXA TENSÃO

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos para algumas cargas elétricas conectadas à rede elétrica de baixa tensão da concessionária local. As cargas aqui apresentadas foram definidas com base na disponibilidade em laboratório para realização dos testes almejados.

Os equipamentos elétricos analisados, com suas características nominais, foram os seguintes:

- Lâmpada fluorescente compacta (LFC), 34 W – 127 V;
- Lâmpada LED, 6 W – 127~220 V;
- TV LED 32”, 30 W – 90~240 V;
- Micro-ondas, 900 W – 220 V;
- Computador desktop com monitor, 600 W – 100~240 V.

3.2.1 Lâmpada fluorescente compacta

Para realizar este teste, inicialmente conectou-se uma lâmpada fluorescente compacta de 34 W de potência à rede da distribuidora de energia elétrica local. A lâmpada permaneceu ligada durante 24 horas, sendo registrada a forma de onda de um ciclo da tensão e da corrente a cada intervalo de um minuto. Assim, foram registrados 1.440 ciclos ao longo das 24 horas.

Da Figura 3.1 até a Figura 3.6, têm-se o comportamento da tensão e da corrente para as ordens harmônicas ímpares da 3ª até a 13ª ordem harmônica. É perceptível notar que, conforme a frequência aumenta, as amplitudes seguem uma tendência de redução, enquanto que a dispersão dos pontos dentro da “nuvem de dados” aumenta. Ao longo do dia é possível notar pela “nuvem de dados” da corrente harmônica para a 3ª, 5ª e 7ª ordens harmônicas, que o fluxo de energia ativa são bem definidos no sentido carga-fonte. Para a 9ª ordem harmônica, no entanto, a “nuvem de dados” apresentou-se mais dispersa, alterando entre um fluxo de potência harmônica ativa nos sentidos carga-fonte, nulo (capacitivo) e fonte-carga.

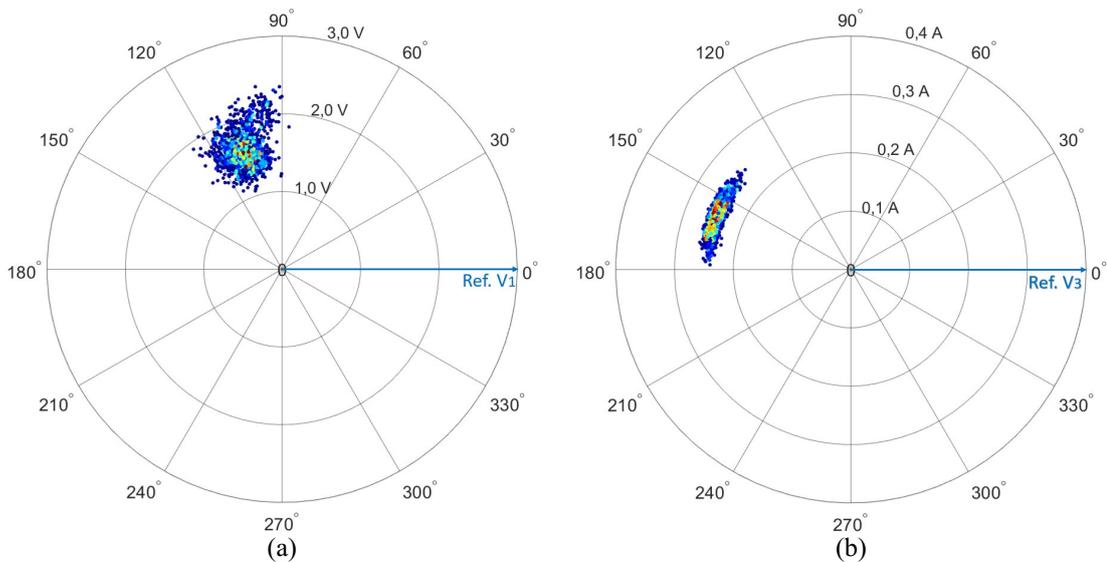


Figura 3.1 – Medição de 24 horas da LFC. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica.

Os pontos coloridos indicados na Figura 3.1, assim como em todas as figuras similares apresentadas neste documento, representam as extremidades dos fasores de tensão e de corrente, para cada ordem harmônica, com origem no centro do sistema de coordenadas polares.

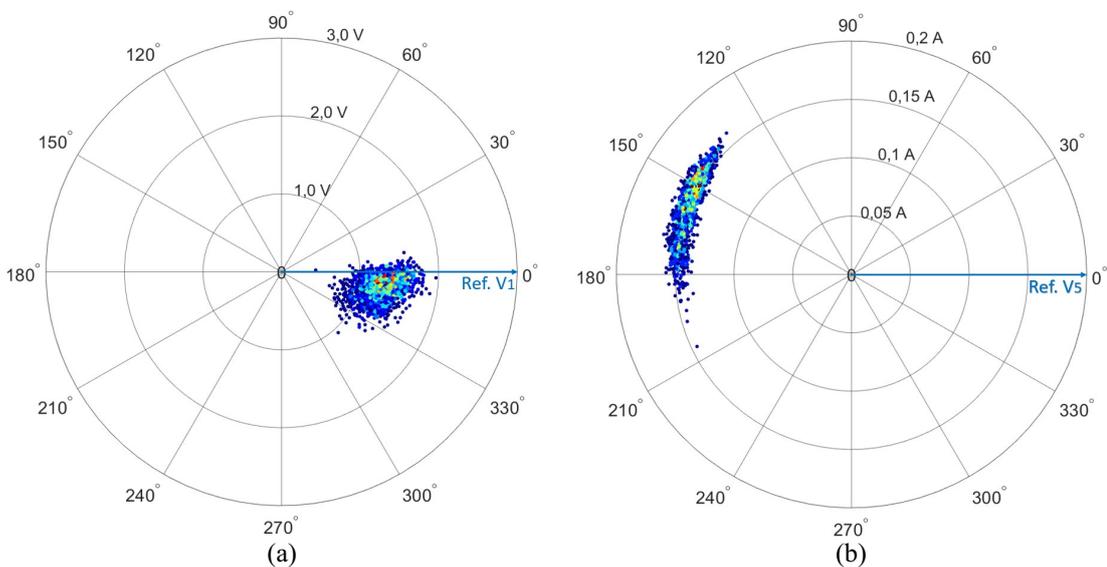


Figura 3.2 – Medição de 24 horas da LFC. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.

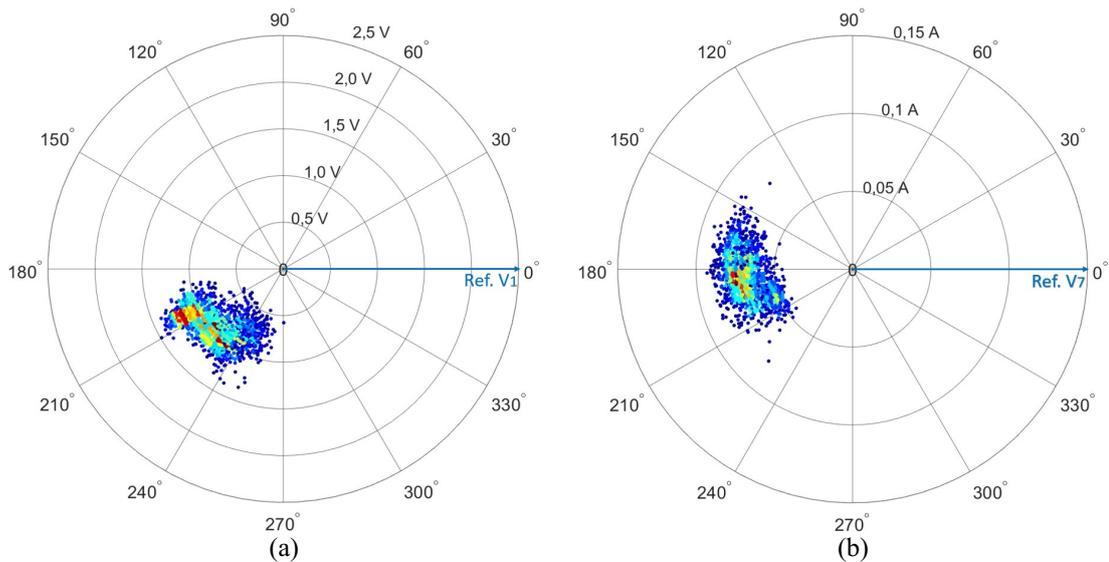


Figura 3.3 – Medição de 24 horas da LFC. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.

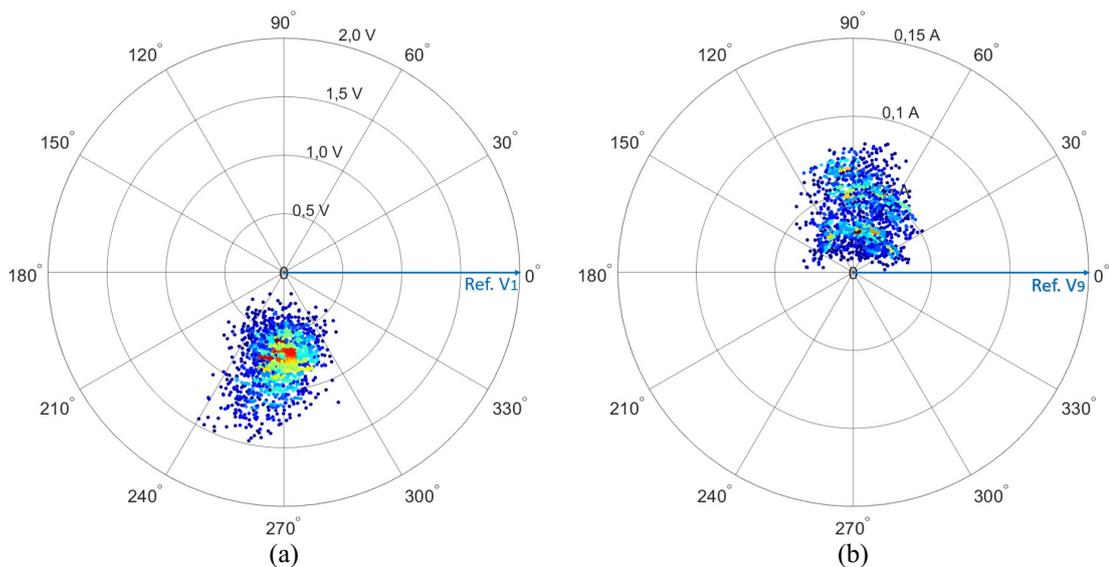


Figura 3.4 – Medição de 24 horas da LFC. (a) tensão e (b) corrente de 9ª ordem harmônica.

No caso da 11ª e 13ª ordens harmônicas, é possível observar nos gráficos das tensões das Figuras 3.5(a) e 3.6(a) comportamentos distintos em termos de quadrante de localização. Este fato impactou diretamente nas correntes harmônicas, sendo possível notar que o fluxo de potência harmônica ativa inverteu de sentido em determinados períodos do dia, conforme mostrado nas Figuras 3.5(b) e 3.6(b).

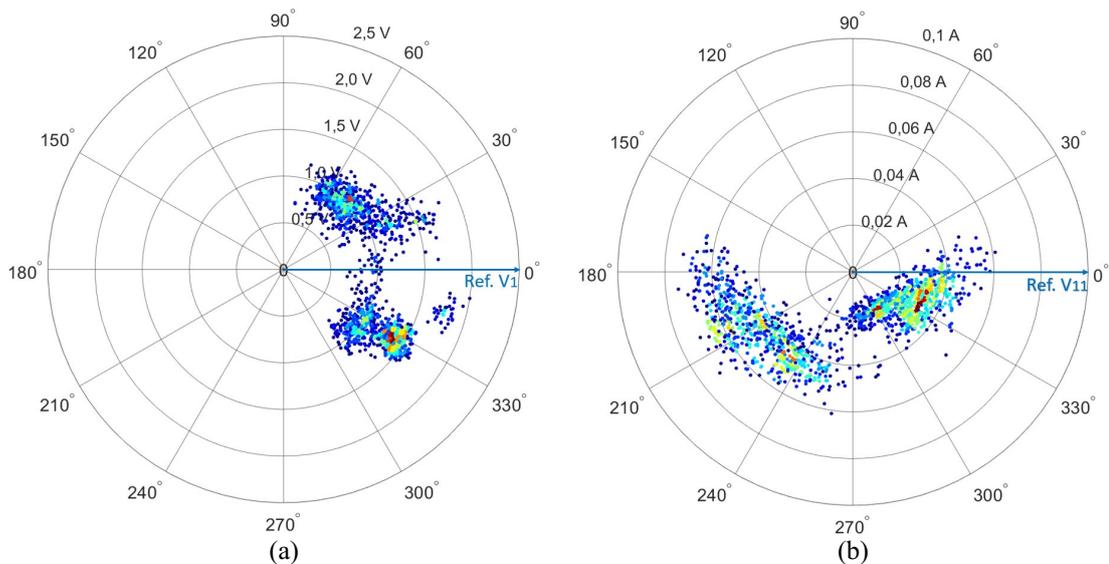


Figura 3.5 – Medição de 24 horas da LFC. (a) tensão e (b) corrente de 11ª ordem harmônica.

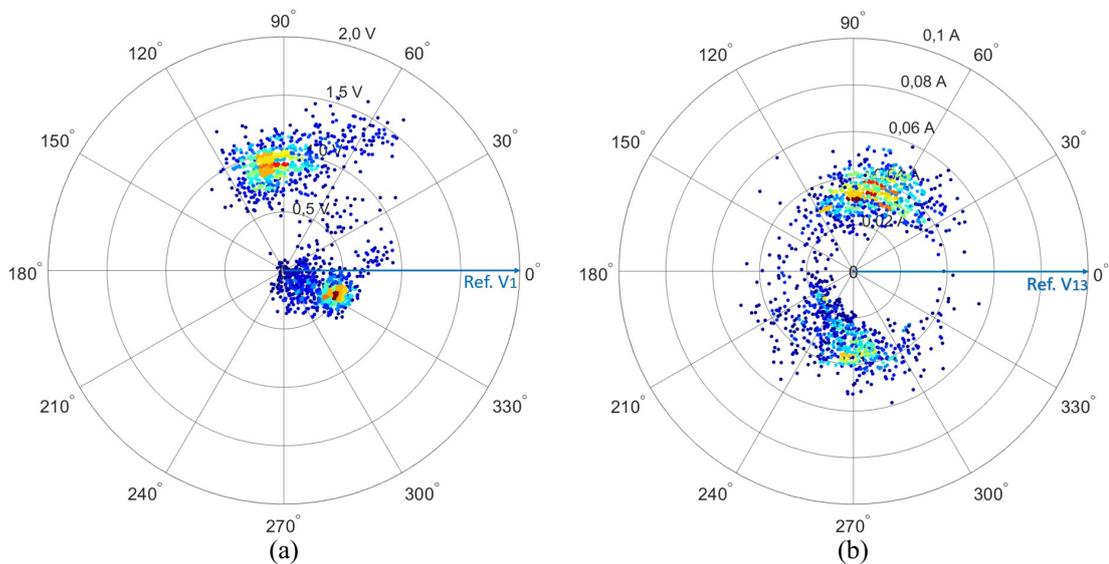


Figura 3.6 – Medição de 24 horas da LFC. (a) tensão e (b) corrente de 13ª ordem harmônica.

3.2.2 Lâmpada LED

O segundo equipamento a ser testado foi a lâmpada LED de 6W. Os pontos representativos das tensões e das correntes harmônicas, resultantes da TDF de cada janela de um ciclo, estão apresentados, para cada ordem harmônica, da Figura 3.7 até a Figura 3.12. Neste caso, as tensões harmônicas do sistema de alimentação apresentaram comportamentos similares ao caso da LFC apresentada anteriormente, novamente com destaque para a 11ª e 13ª ordens harmônicas, nas quais presenciam duas “nuvens de dados” em posições distintas no plano. Já no caso das correntes harmônicas, nota-se algumas alterações de comportamento quando comparado com a LFC, representadas no sentido do fluxo de potência harmônica.

Nota-se que os pontos representativos das correntes para a 3ª e 5ª ordens harmônicas, apresentados respectivamente na Figura 3.7(b) e na Figura 3.8(b), mantiveram-se praticamente no 2º quadrante, representando assim, um fluxo de potência harmônica ativa no sentido carga-fonte, de forma similar ao outro tipo de lâmpada apresentado anteriormente.

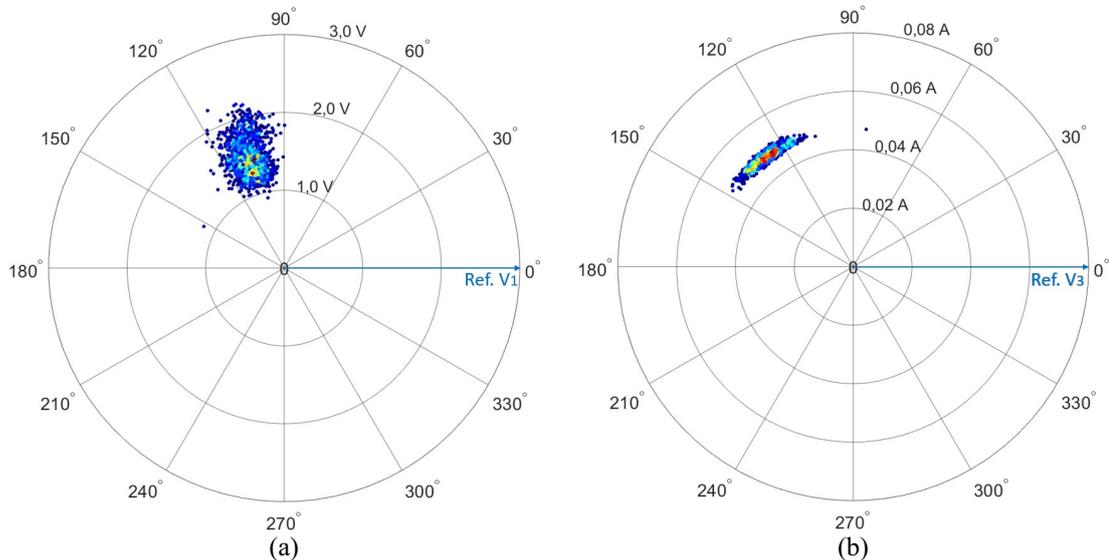


Figura 3.7 – Medição de 24 horas da lâmpada LED. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica.

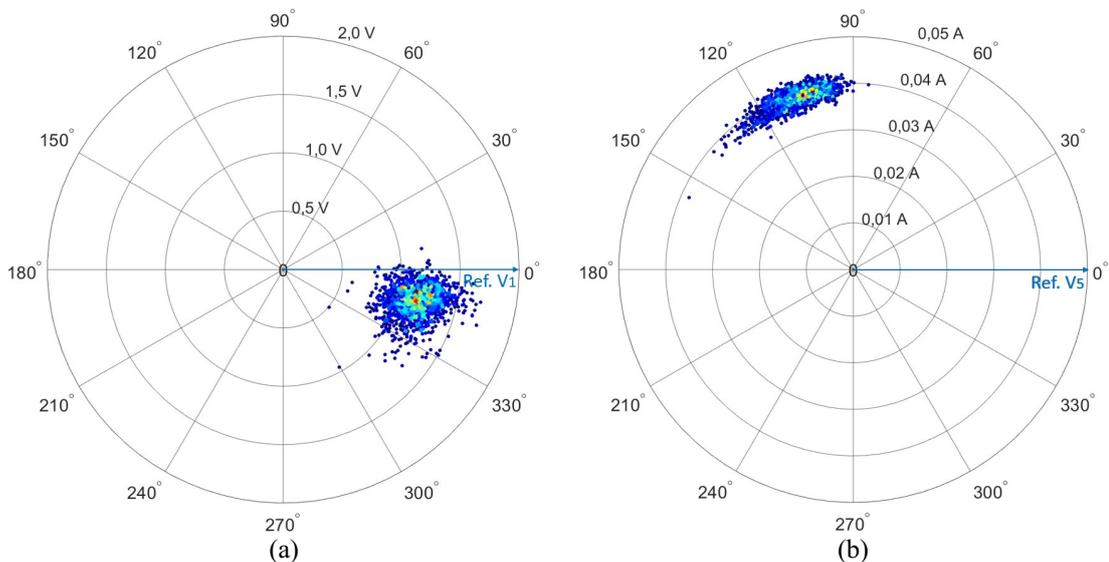


Figura 3.8 – Medição de 24 horas da lâmpada LED. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.

Para a 7ª ordem harmônica, a “nuvem de dados” representativa da corrente harmônica comportou-se de forma dispersa, com pontos no 2º e 3º quadrantes, conforme apresentado em Figura 3.9(b). Entretanto, de acordo com a referência de cores, percebe-se uma maior prevalência do fluxo de potência harmônica ativa no sentido carga-fonte.

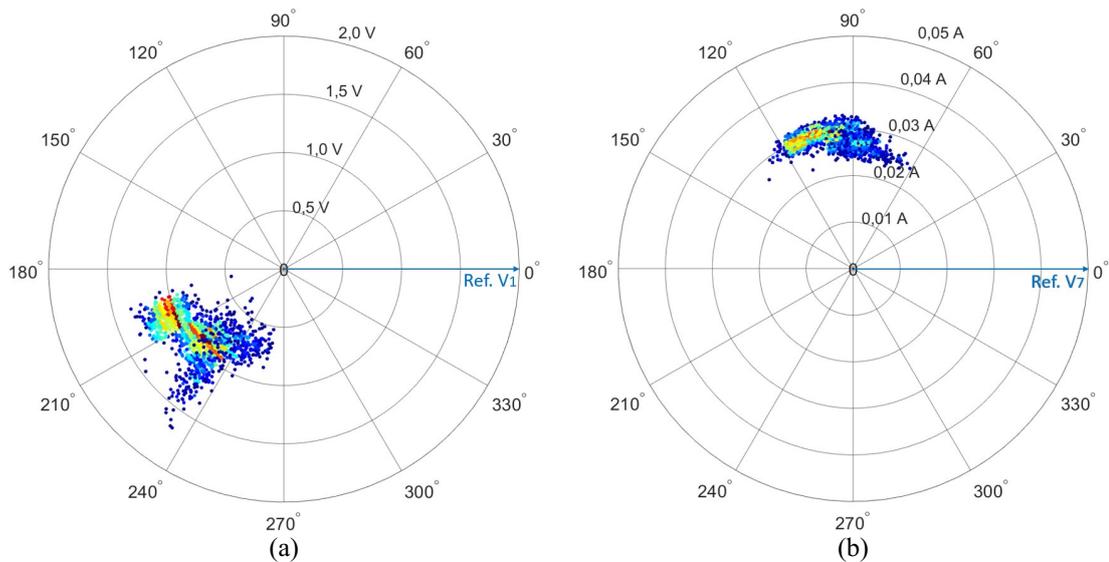


Figura 3.9 – Medição de 24 horas da lâmpada LED. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.

Com base nos pontos representativos das correntes harmônicas de 9ª ordem, apesar de uma maior dispersão, é notório pela maior densidade de dados, representada na cor mais avermelhada, que o fluxo de potência ativa harmônico se manteve predominantemente no sentido fonte-carga, conforme apresentado na Figura 3.10(b).

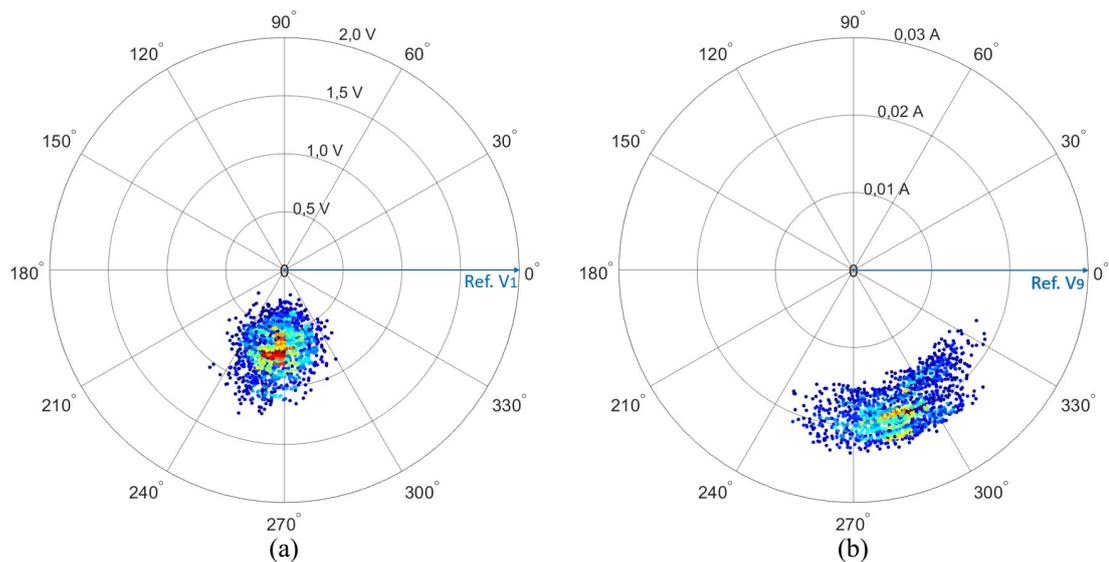


Figura 3.10 – Medição de 24 horas da lâmpada LED. (a) tensão e (b) corrente de 9ª ordem harmônica.

Analisando agora o comportamento para a 11ª e 13ª ordens harmônicas, em relação a localização no plano polar, as tensões harmônicas apresentaram comportamentos distintos em determinados instantes do dia, conforme pode ser visualizado nas Figuras 3.11(a) e 3.12(a). Este fato impactou novamente nas correntes harmônicas do equipamento em análise, onde pode-se notar pelas Figuras 3.11(b) e 3.12(b), que o sentido do fluxo de potência harmônica ativa foi ora no sentido carga-fonte, ora fonte-carga.

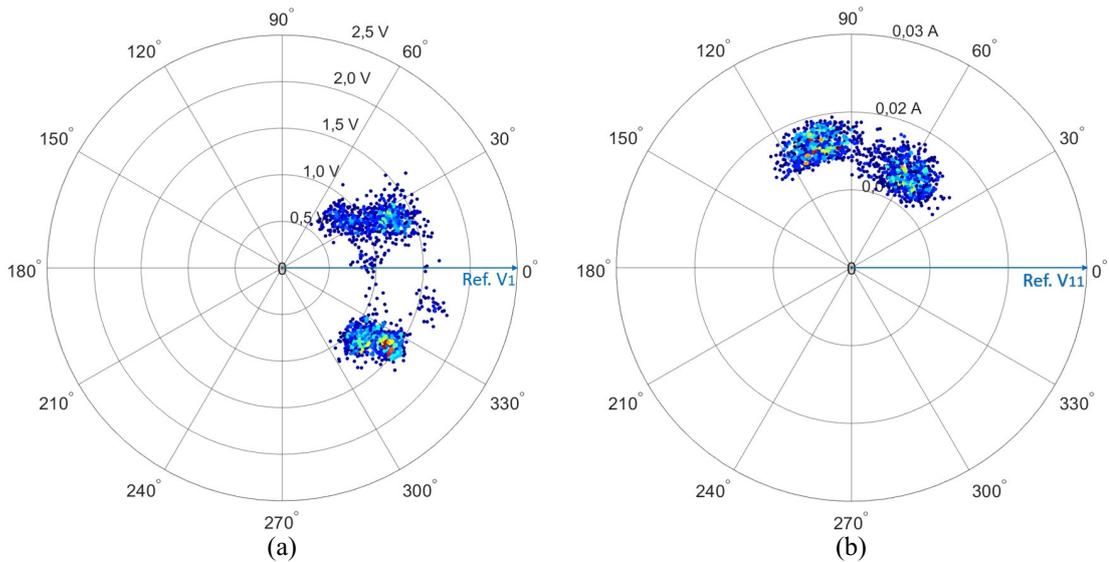


Figura 3.11 – Medição de 24 horas da lâmpada LED. (a) tensão e (b) corrente de 11ª ordem harmônica.

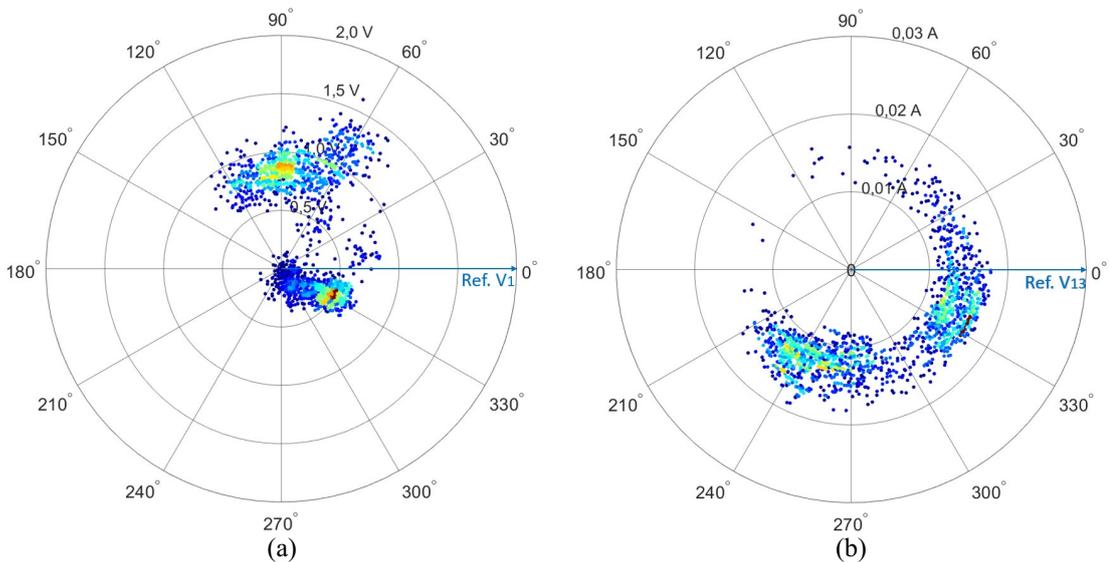


Figura 3.12 – Medição de 24 horas da lâmpada LED. (a) tensão e (b) corrente de 13ª ordem harmônica.

3.2.3 Televisão LED 32”

A próxima carga não-linear a ser testada é um aparelho de televisão que é comumente encontrado em instalações residenciais e comerciais. Os resultados referentes ao comportamento das tensões e das correntes, para as ordens harmônicas em análise, estão apresentados na sequência da Figura 3.13 até a Figura 3.18.

Analisando os gráficos das correntes harmônicas, através das Figuras 3.13(b) e 3.14(b), correspondente a 3ª e 7ª ordens harmônicas respectivamente, é possível notar que os fluxos de potência harmônica ativa, em ambas as frequências, se mantiveram na mesma direção ao longo das 24 horas de medição, ou seja, sentido este definido como carga-fonte.

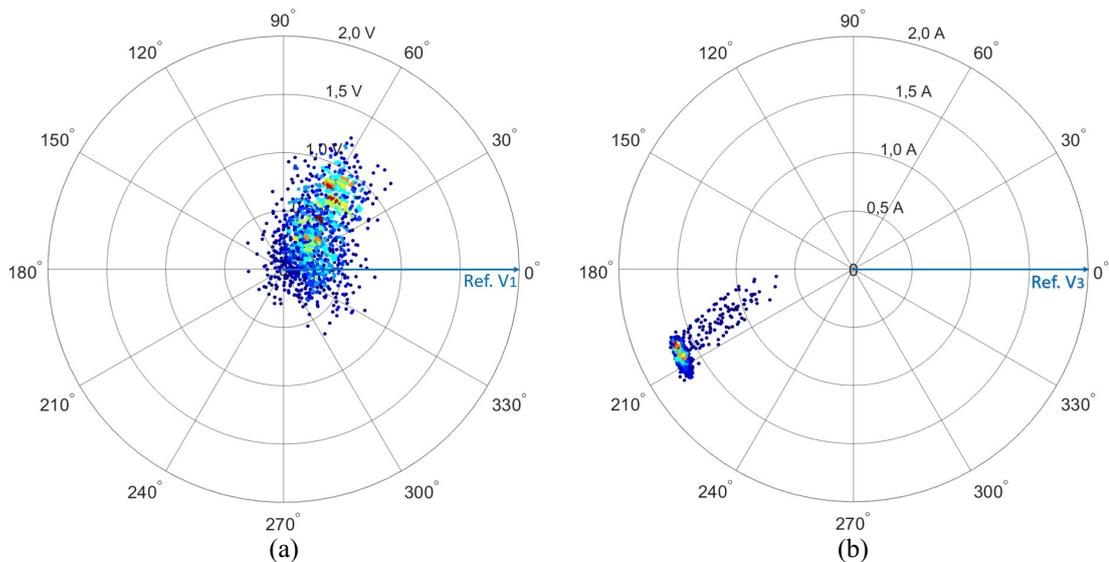


Figura 3.13 – Medição de 24 horas da TV. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica.

O fluxo de potência ativa, para a 5ª ordem harmônica, também se mostrou em um sentido bem definido, com todos os pontos localizados no 1º quadrante, conforme pode ser visto na Figura 3.14(b). Deste modo, o fluxo de potência harmônica ativa para a 5ª ordem harmônica se apresentou a todo o momento no sentido fonte-carga.

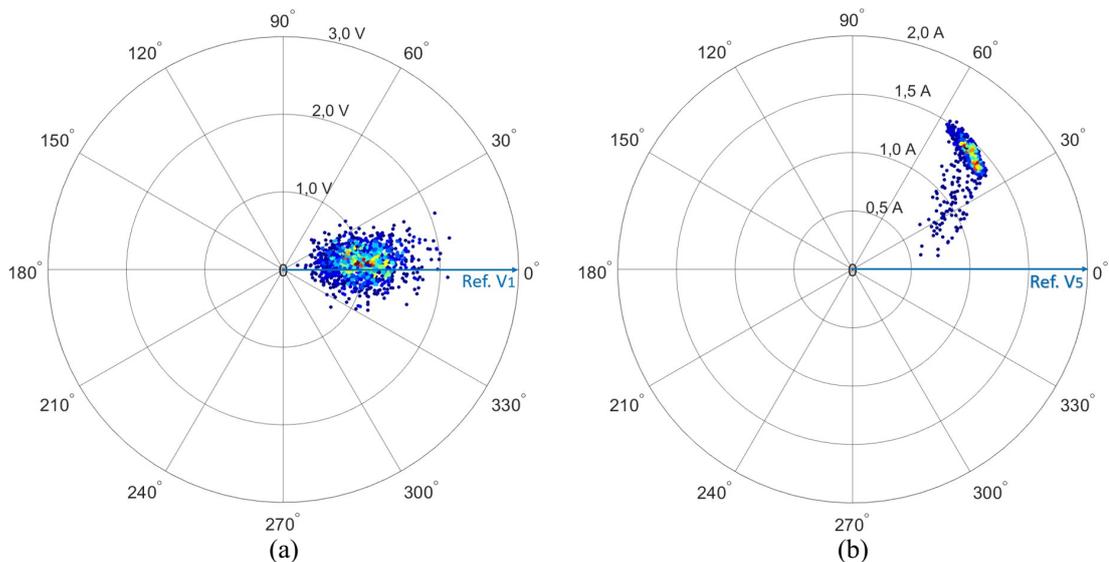


Figura 3.14 – Medição de 24 horas da TV. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.

No caso da 9ª ordem harmônica, o sentido do fluxo de potência ativa não apresentou um sentido definido ao longo do dia, conforme apresentado na Figura 3.16(b). Nesta situação, ele alternou entre fonte-carga e carga-fonte, e em determinados instantes se comportou como um circuito puramente capacitivo.

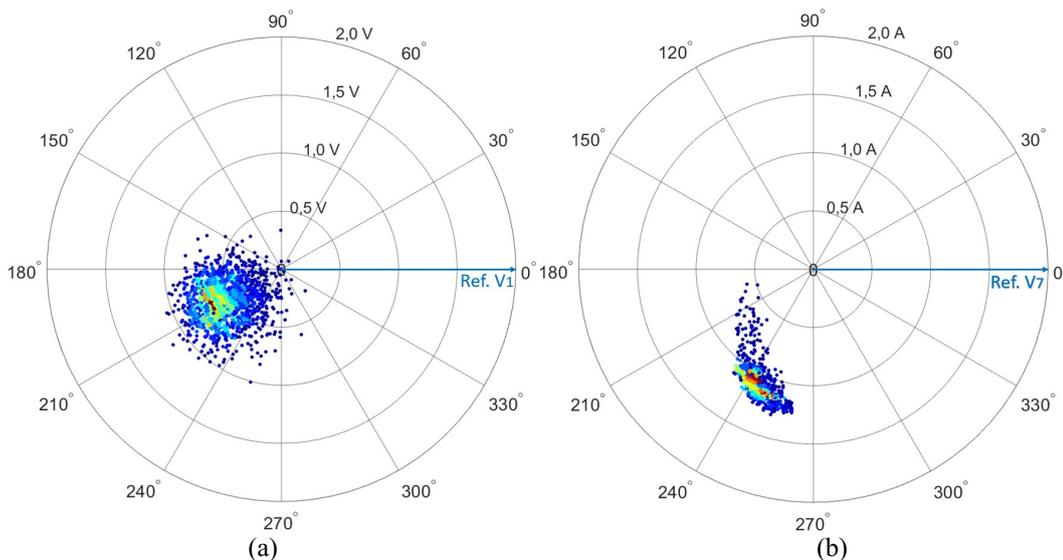


Figura 3.15 – Medição de 24 horas da TV. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.

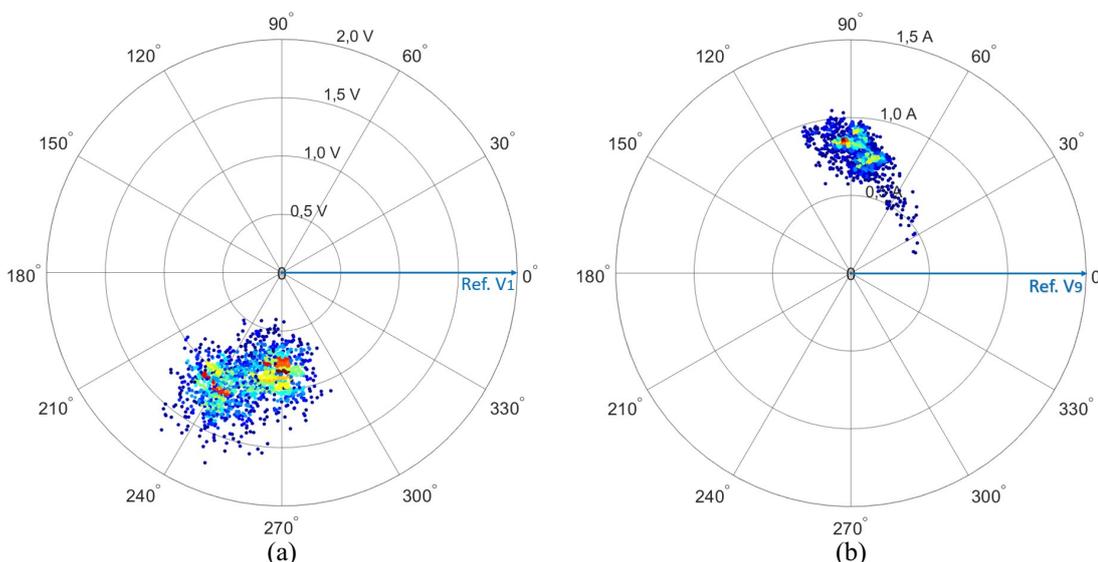


Figura 3.16 – Medição de 24 horas da TV. (a) tensão e (b) corrente de 9ª ordem harmônica.

Na 11ª e 13ª ordens harmônicas, o fluxo de potência ativa comportou-se com uma significativa prevalência, salvo alguns pontos que se dispersaram e localizaram em outro quadrante. Porém, nestas duas situações, em cada ordem, o fluxo de potência harmônica ativa se manteve em direção distintas, enquanto que para a 11ª harmônica o fluxo de potência foi no sentido fonte-carga, para a 13ª harmônica o fluxo foi no sentido inverso, ou seja, carga-fonte.

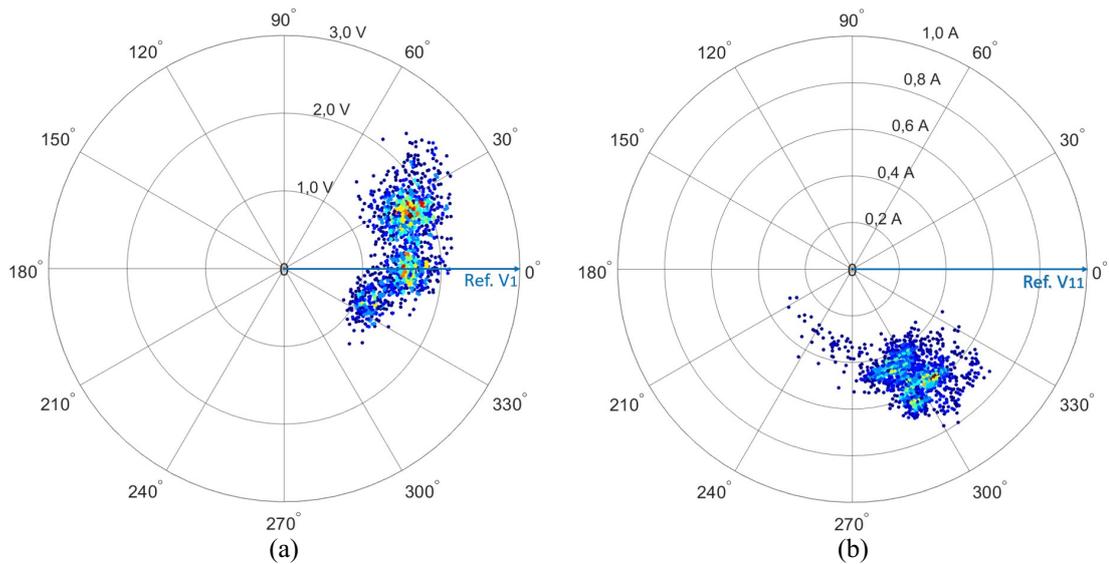


Figura 3.17 – Medição de 24 horas da TV. (a) tensão e (b) corrente de 11ª ordem harmônica.

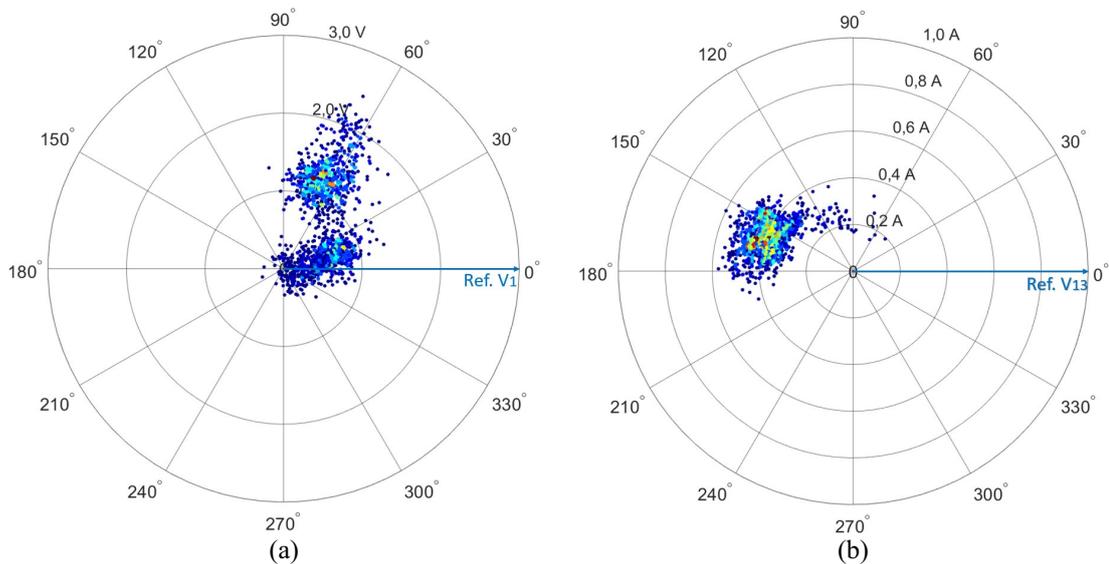


Figura 3.18 – Medição de 24 horas da TV. (a) tensão e (b) corrente de 13ª ordem harmônica.

3.2.4 Micro-ondas

A carga não-linear adotada neste teste, trata-se de um forno de micro-ondas. Para realização deste, alimentou-se o micro-ondas com tensão da rede elétrica e com o equipamento em modo de funcionamento, registrou-se as formas de onda de tensão e de corrente durante 2 minutos. O comportamento das tensões e das correntes, para as ordens harmônicas alvejadas neste trabalho, estão apresentados da Figura 3.19 até a Figura 3.24. Os resultados obtidos para as tensões harmônicas neste caso em que a medição perdurou por 2 minutos, apresentaram “nuvens de dados” com comportamento mais concentrada quando comparado com as tensões harmônicas resultantes das medições de 24 horas.

O fluxo de potência ativa para a 3ª ordem harmônica, durante os dois minutos de funcionamento do micro-ondas, apresentou-se de forma bem definida no sentido carga-fonte, conforme pode ver visto na Figura 3.19(b).

Para a 5ª, 7ª e 11ª ordens harmônicas, Figuras 3.20(b), 3.21(b) e 3.23(b) respectivamente, os fluxos de potências ativa apresentaram-se bem definidos no sentido fonte-carga, conforme pode ser constatado pelas “nuvens de dados” representativas das respectivas correntes harmônicas. O mesmo sentido de fluxo de potência pode ser observado para o caso da 9ª harmônica, Figura 3.22(b), salvo 3 situações em que a corrente inverteu seu sentido. Neste teste em específico, a tensão harmônica de 9ª ordem apresentou a menor amplitude entre as tensões harmônicas analisadas, Figura 3.22(a), onde se observa uma maior dispersão da “nuvem de dados” representativas das tensões harmônicas.

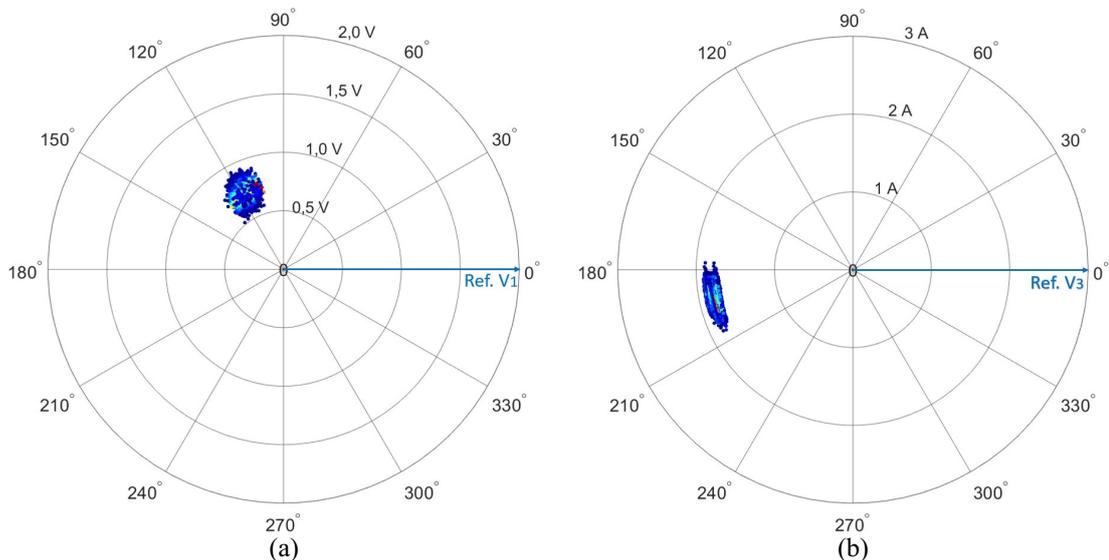


Figura 3.19 – Medição de 2 minutos do micro-ondas. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica.

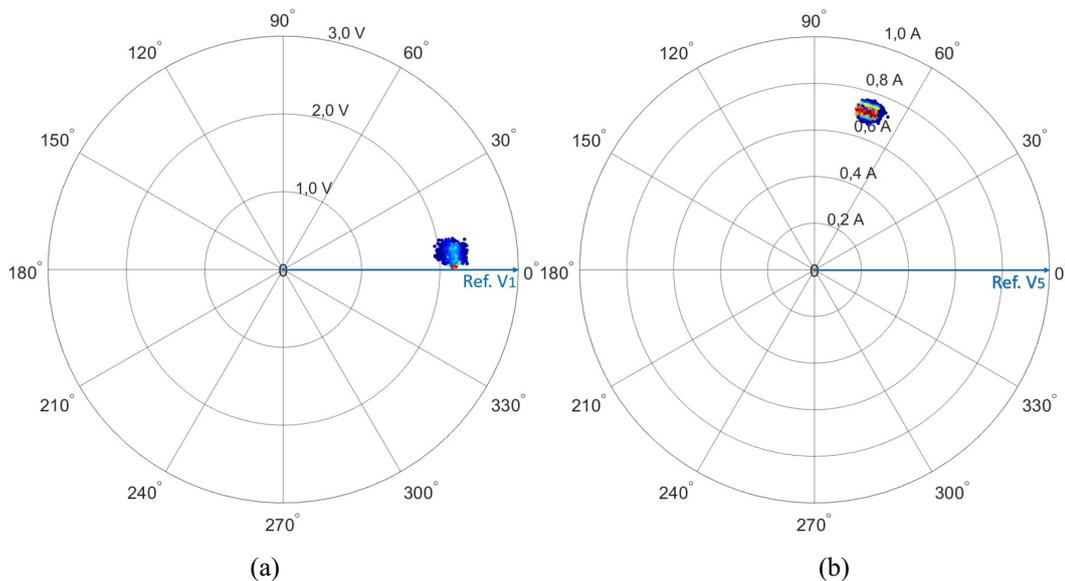


Figura 3.20 – Medição de 2 minutos do micro-ondas. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.

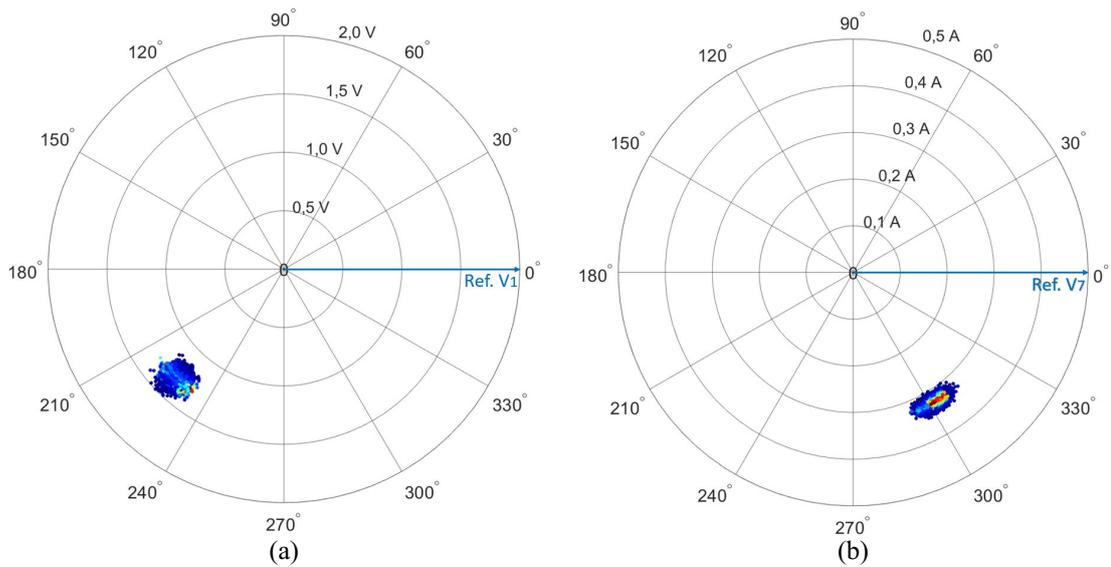


Figura 3.21 – Medição de 2 minutos do micro-ondas. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.

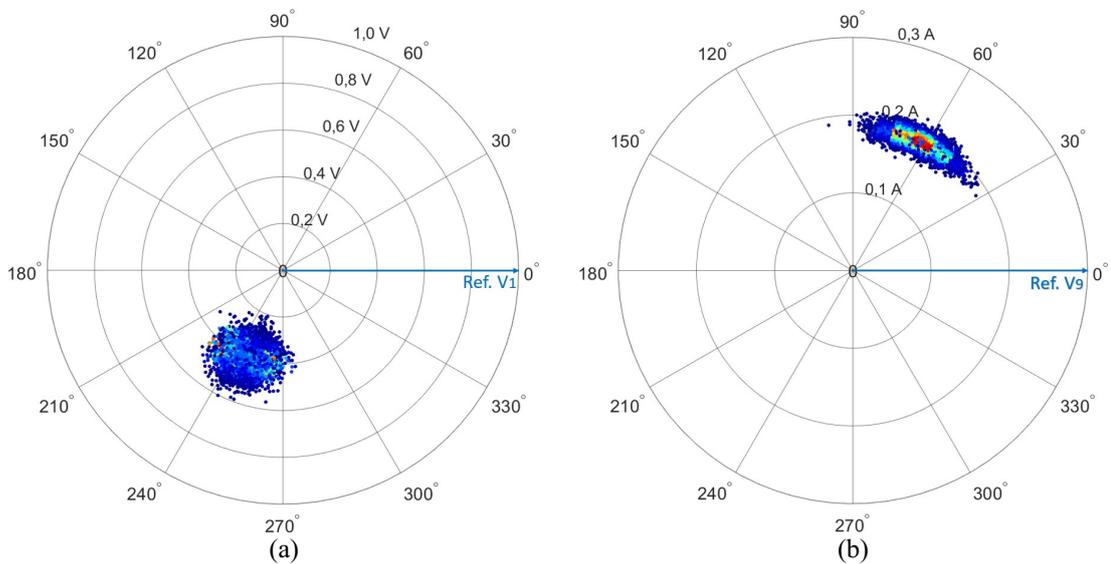


Figura 3.22 – Medição de 2 minutos do micro-ondas. (a) tensão e (b) corrente de 9ª ordem harmônica.

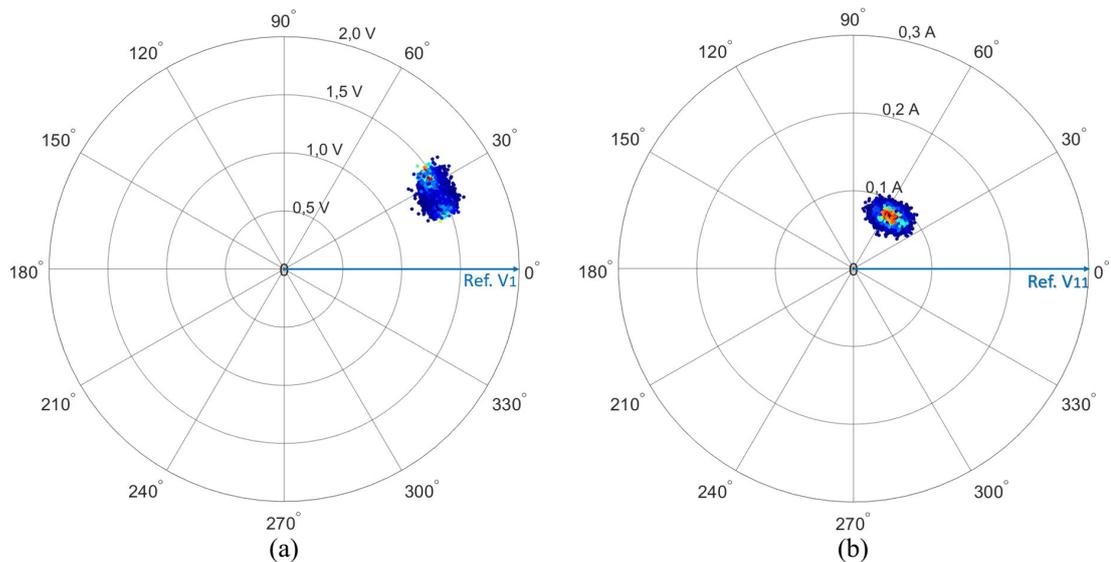


Figura 3.23 – Medição de 2 minutos do micro-ondas. (a) tensão e (b) corrente de 11ª ordem harmônica.

Por fim, assim como apresentado para 3ª ordem harmônica, o fluxo de potência ativa da 13ª ordem harmônica se apresentou de forma bem representativa no sentido carga-fonte, conforme pode ser observado na Figura 3.24 (b).

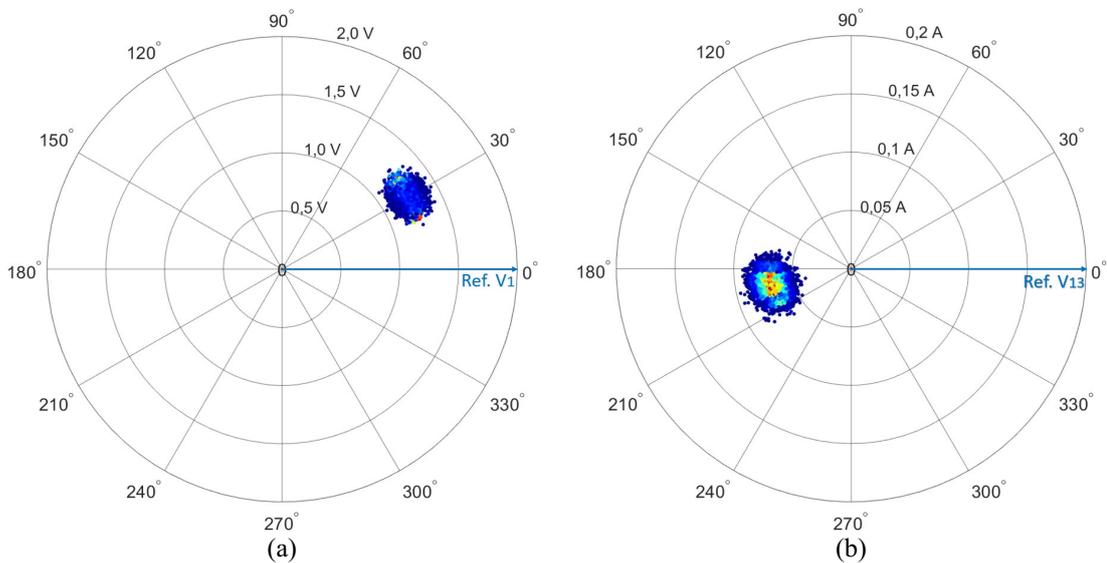


Figura 3.24 – Medição de 2 minutos do micro-ondas. (a) tensão e (b) corrente de 13ª ordem harmônica.

3.2.5 Computador desktop com monitor

O último teste em equipamento operando de forma isolada é um computador do tipo desktop com monitor, comumente encontrado em ambientes comerciais. Assim como nos outros casos apresentados, ligou-se o computador à rede elétrica, onde os resultados representativos das tensões e das correntes harmônicas estão apresentados na Figura 3.25, para a 3ª harmônica, até a Figura 3.30, para a 13ª harmônica. Este equipamento permaneceu ligado durante 24 horas para registro das formas de onda das tensões e das correntes.

Nesta situação, a corrente de 3ª ordem harmônica apresentou-se de forma mais dispersa quanto aos ângulos de fase, mantendo assim a amplitude com valores mais fixos, conforme pode ser observado na Figura 3.25(b). No entanto, a partir de uma verificação visual pode-se dizer que o fluxo de potência ativa prevalece no sentido carga-fonte, baseando no fato de que a maior extensão da “nuvem de dados” está localizada no 2º quadrante, e ainda, na escala de cores, onde as cores com tons mais avermelhados apresentam maior densidade de pontos em uma determinada região do plano.

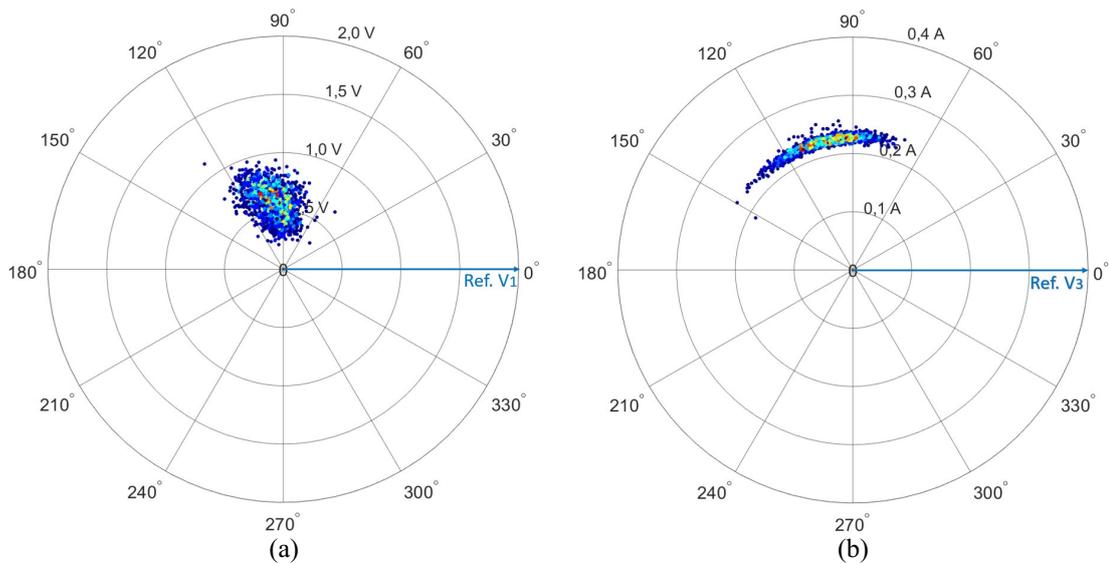


Figura 3.25 – Medição de 24 horas do computador. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica.

O fluxo de potência harmônica ativa para a 5ª e 7ª ordens, apresentaram sentido bem definido, nestes casos com a direção sendo fonte-carga, conforme apresentado na Figura 3.26(b) e na Figura 3.27(b) respectivamente. No caso da 9ª ordem harmônica, o fluxo de potência ativa prevaleceu no sentido inverso, ou seja, carga-fonte, Figura 3.28(b).

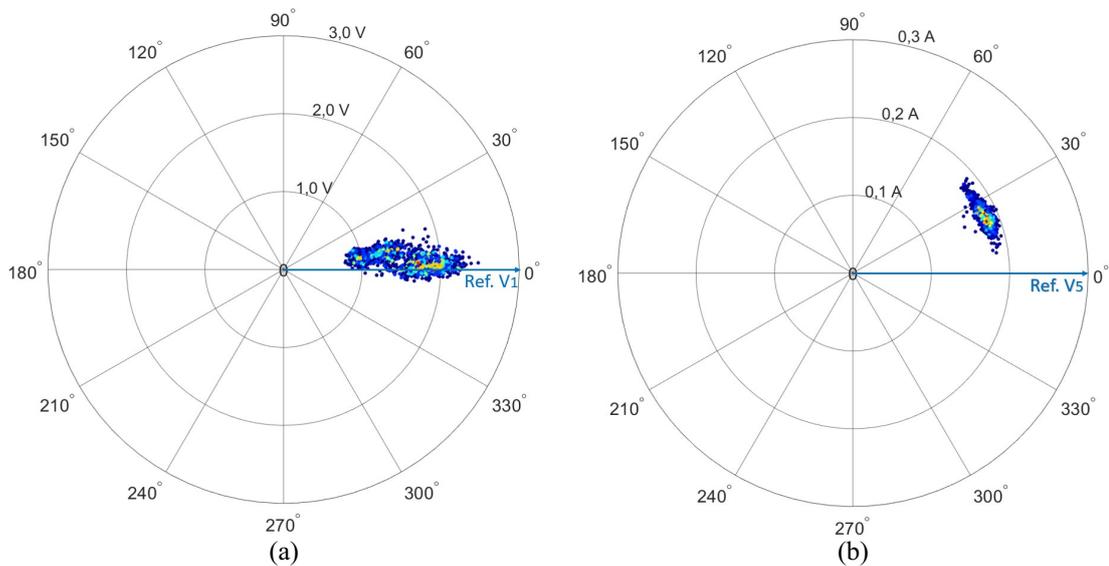


Figura 3.26 – Medição de 24 horas do computador. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.

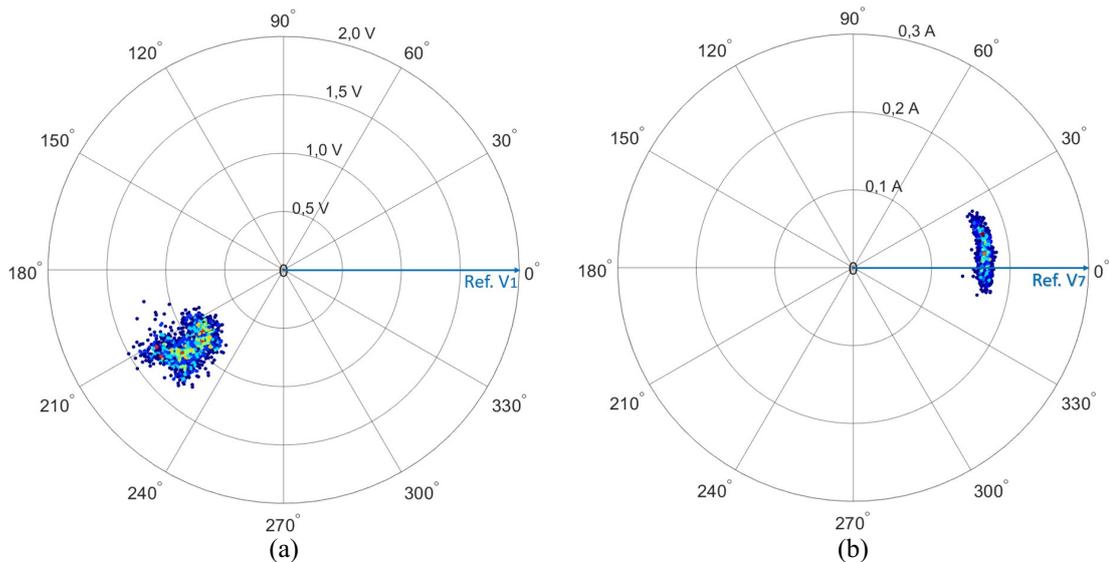


Figura 3.27 – Medição de 24 horas do computador. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.

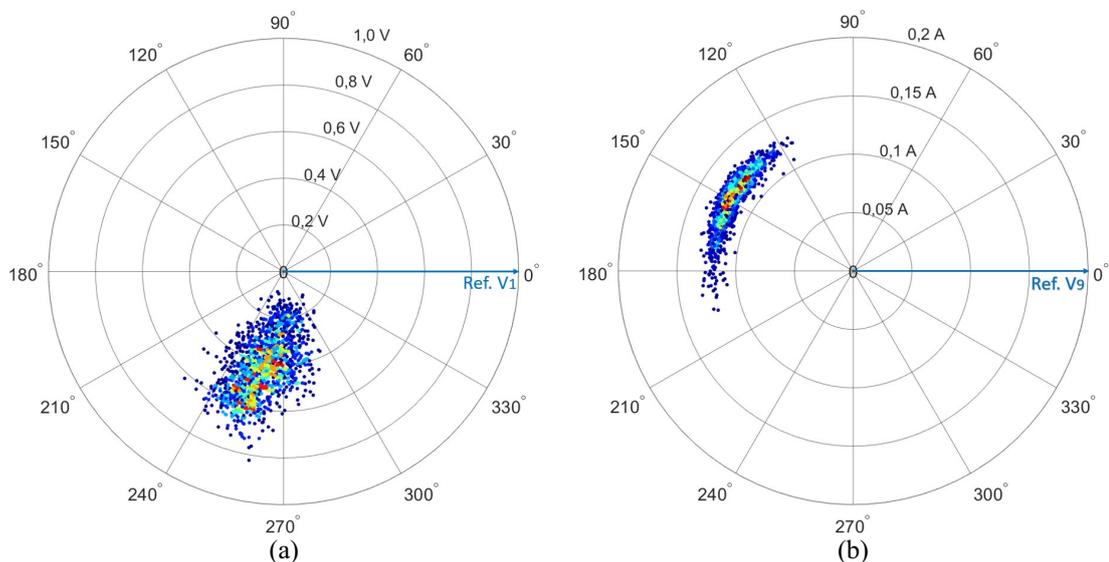


Figura 3.28 – Medição de 24 horas do computador. (a) tensão e (b) corrente de 9ª ordem harmônica.

Assim como nas outras medições de 24 horas apresentadas anteriormente, as tensões de 11ª e de 13ª ordens harmônicas apresentaram comportamentos distintos em relação a “nuvem de dados”, conforme apresentado nas Figuras 3.29(a) e 3.30(a) respectivamente. Assim sendo, as correntes destas duas ordens harmônicas também tiveram “nuvens de dados” em regiões diferentes, representando em termos de prevalência do fluxo de potência ativa, mudança no sentido de carga-fonte para fonte-carga, conforme mostrado nas Figuras 3.29(b) e 3.30(b).

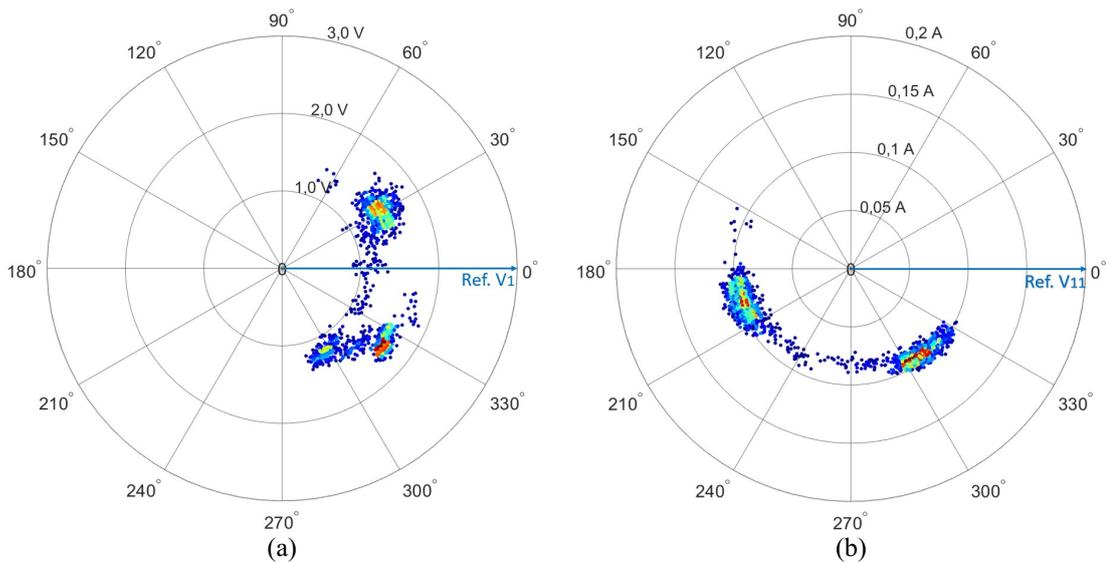


Figura 3.29 – Medição de 24 horas do computador. (a) tensão e (b) corrente de 11ª ordem harmônica.

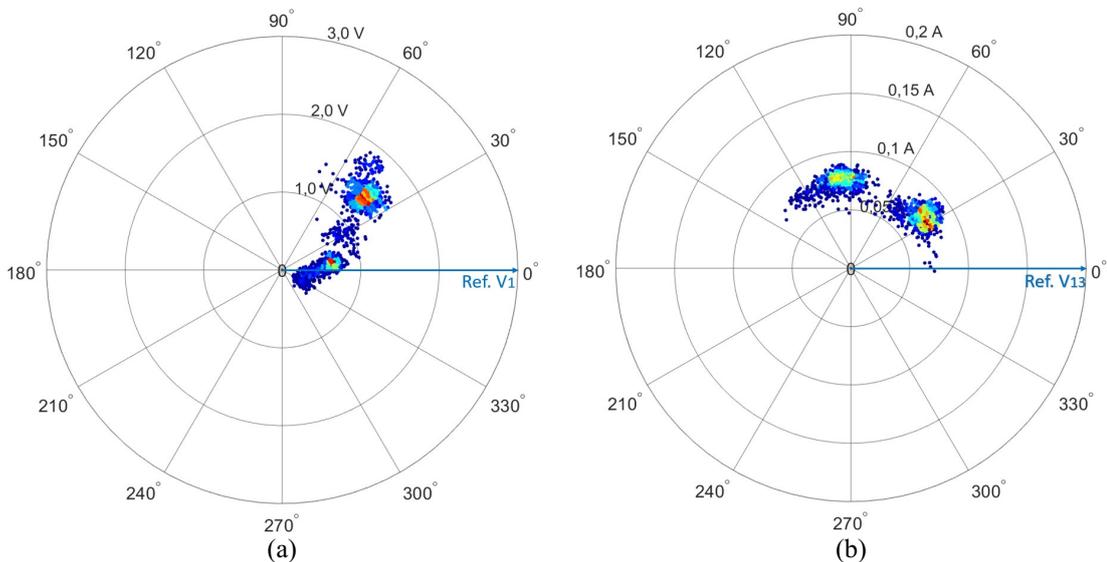


Figura 3.30 – Medição de 24 horas do computador. (a) tensão e (b) corrente de 13ª ordem harmônica.

3.3 INSTALAÇÕES ELÉTRICAS EM BAIXA TENSÃO

Uma vez analisado o comportamento de cargas elétricas funcionando de forma individual, esta seção norteia-se para a análise de instalações elétricas conectada à rede elétrica em baixa tensão da distribuidora de energia elétrica local. Para tal, instalou-se o equipamento de medição no quadro de distribuição geral da instalação, possibilitando assim registrar as correntes de entrada em cada uma das fases da instalação.

O método de registro adotado para estas medições, baseia-se nos registros das formas de onda de um ciclo das tensões e das correntes a cada janela de um minuto, durante o intervalo de tempo igual a 24 horas.

As medições foram realizadas em uma instalação tipicamente residencial e em uma outra do tipo comercial. Desta forma, espera-se uma variação maior do fluxo de potência ativa harmônica, visto que nestas instalações a presença e funcionamento de cargas do tipo não-linear são comuns, assim como a aleatoriedade de entrada e saída de funcionamento das mesmas.

3.3.1 Instalação residencial

Uma vez realizada a medição durante 24 horas em uma instalação residencial e com os dados registrados devidamente processados, os resultados estão apresentados nas Figuras 3.31 até a Figura 3.36.

No caso das tensões harmônicas, assim como já apresentado anteriormente nas medições de 24 horas, pode-se notar uma dispersão maior dos pontos, principalmente para as amplitudes menores, resultante das variações das tensões ao longo do dia. Em alguns casos, pode-se observar duas regiões mais definidas de concentração de pontos, conforme pode ser visto nas Figuras 3.31(a), 3.33(a) e 3.35(a). Vale ainda salientar que, esta instalação localiza-se em outra cidade, porém da mesma área de concessão da distribuidora de energia elétrica em que as cargas individuais foram testadas. Este motivo pode ser a explicação das variações encontradas nos resultados para as tensões harmônicas quando comparadas àquelas apresentadas anteriormente.

Analisando os resultados para a corrente de 3ª ordem harmônica, conforme Figura 3.31(b), nota-se uma maior variação dos pontos, que pode ser justificada pelas mudanças de cargas na instalação ao longo do dia. Todavia, para esta ordem harmônica o fluxo de potência ativa prevaleceu no sentido carga-fonte, alterando apenas o fluxo de potência reativa. Mesmo com a “nuvem de dados” representativa da tensão harmônica modificando sua localização ao longo do dia, Figura 3.31(a), a corrente de 3ª ordem harmônica seguiu a tendência de direção no sentido carga-fonte. Analisando a ampliação de uma região específica do gráfico, nota-se algumas concentrações de pontos localizadas em regiões distintas no plano, justificadas pelas entradas e saídas das cargas em funcionamento.

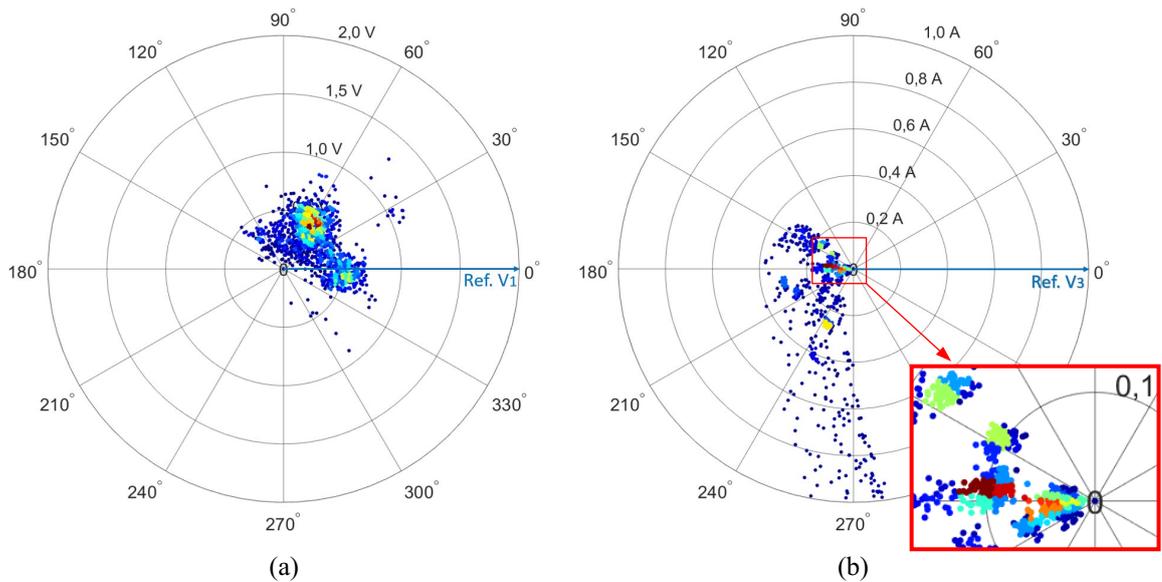


Figura 3.31 – Medição de 24 horas em uma instalação residencial. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica com ampliação de uma determinada região do gráfico.

No caso das correntes de 5ª ordem harmônica, os resultados estão apresentados na Figura 3.32(b). Para as amplitudes menores, aproximadamente até 0,25 A, o fluxo de potência ativa predominou no sentido carga-fonte, conforme pode ser evidenciado pela ampliação da região próxima ao centro do gráfico. Porém, para as amplitudes maiores, acima de 0,25 A, o fluxo de potência inverteu de sentido, passando a ser fonte-carga. Desta forma, percebe-se que o fluxo de potência pode alterar sua direção conforme a entrada e saída das cargas em operação.

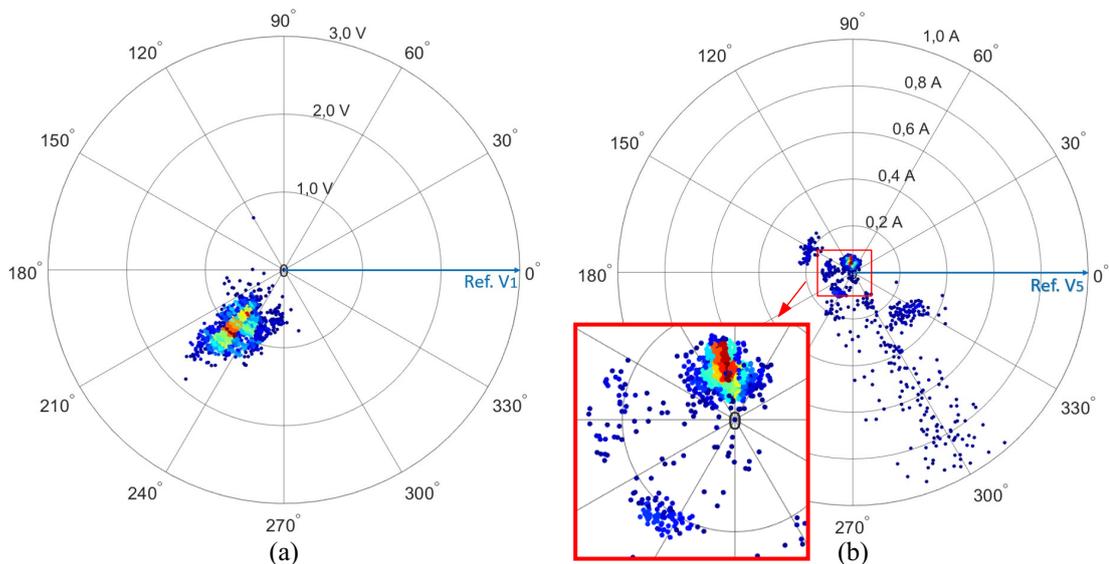


Figura 3.32 – Medição de 24 horas em uma instalação residencial. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica com ampliação de uma determinada região do gráfico.

O mesmo caso de inversão do fluxo de potência harmônica, porém de forma mais acentuada principalmente para amplitudes menores, pode ser observado para a 7ª e para a 9ª

ordens harmônicas, conforme Figuras 3.33(b) e 3.34(b) respectivamente. Entretanto, baseando-se na escala de cores que representa a densidade de pontos em uma região, para a 7ª harmônica o fluxo de potência ativa se apresentou com uma tendência de prevalência a ser nulo, correspondendo apenas a um fluxo de potência reativa do tipo capacitivo. Para a 9ª ordem harmônica, a tendência de predomínio, principalmente para as menores amplitudes, apresentou-se no sentido carga-fonte, levando em consideração mais uma vez a escala de cores.

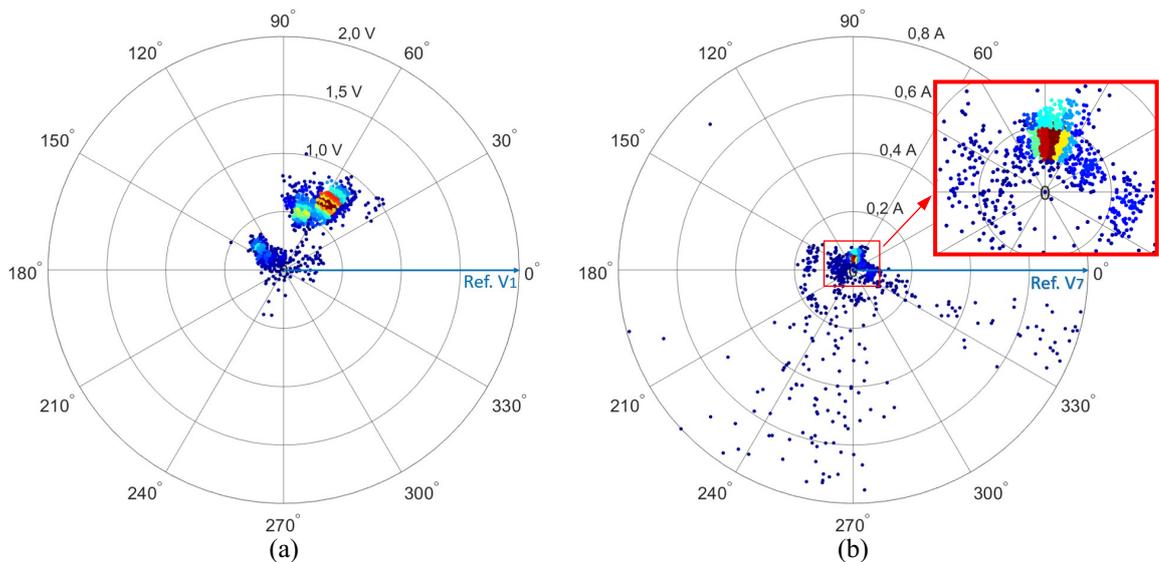


Figura 3.33 – Medição de 24 horas em uma instalação residencial. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica com ampliação de uma determinada região do gráfico.

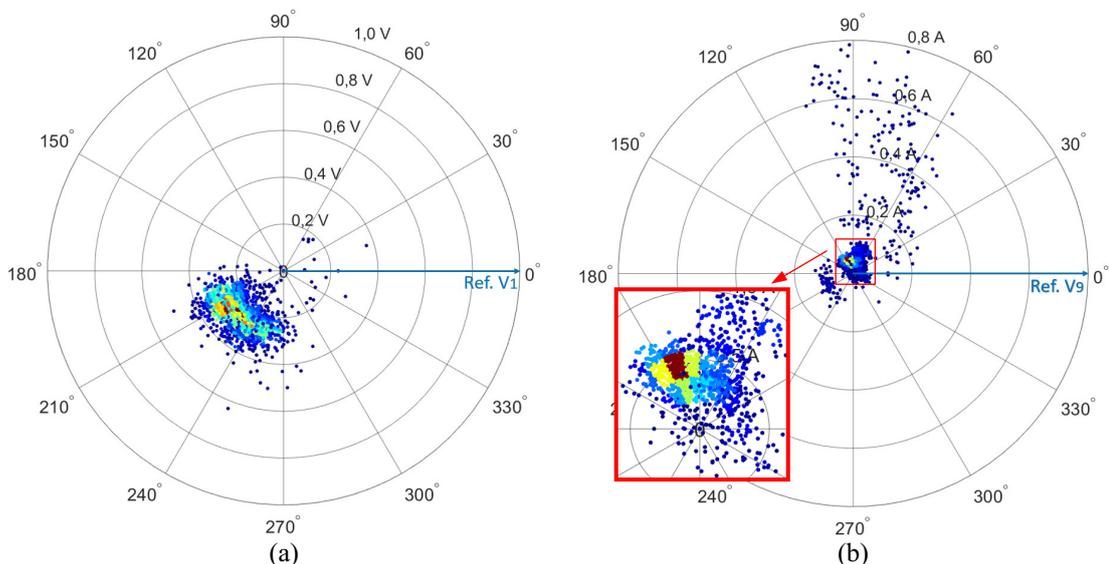


Figura 3.34 – Medição de 24 horas em uma instalação residencial. (a) tensão e (b) corrente de 9ª ordem harmônica com ampliação de uma determinada região do gráfico.

Para a 11ª e 13ª ordens harmônicas, o fluxo de potência ativa seguiu uma tendência maior para o sentido carga-fonte, mesmo com alguns pontos localizados na região de fluxo com sentido inverso, ou seja, fonte-carga, conforme apresentado nas Figuras 3.35(b) e 3.34(b).

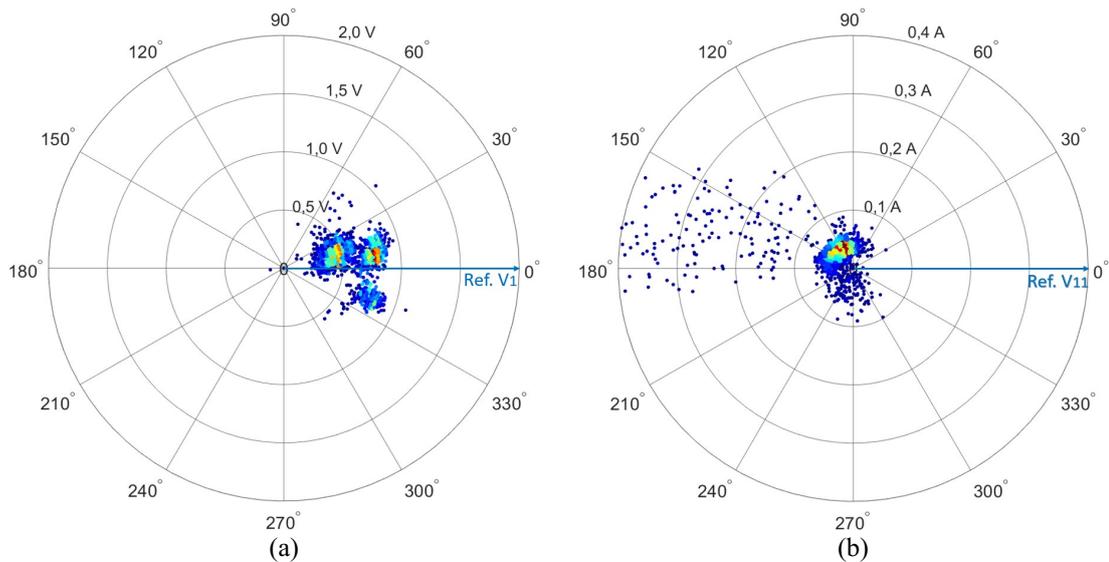


Figura 3.35 – Medição de 24 horas em uma instalação residencial. (a) tensão e (b) corrente de 11ª ordem harmônica.

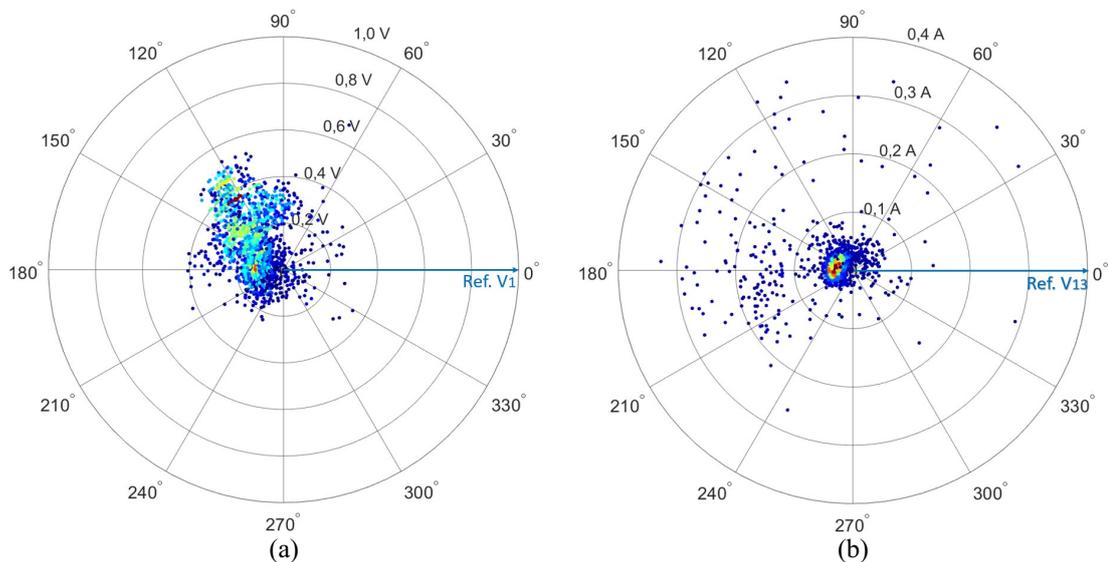


Figura 3.36 – Medição de 24 horas em uma instalação residencial. (a) tensão e (b) corrente de 13ª ordem harmônica.

Levando em conta as análises até aqui apresentadas, entende-se que uma afirmação a respeito do sentido real do fluxo de potência harmônica ativa, considerando apenas a inspeção visual dos gráficos apresentados, pode levar a indicativos imprecisos, visto que, a escala de cores representa a densidade de pontos em uma região específica do gráfico. Como em alguns casos, os pontos representativos das correntes harmônicas resultantes de uma medição de 24 horas, possuem uma grande dispersão ao longo dos quatro quadrantes de localização, uma alegação neste instante pode ser infundada. Uma possibilidade de resultados mais concretos passa pela implementação de uma metodologia de agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas em medidores de parâmetros de qualidade da energia elétrica.

3.3.2 Instalação comercial

Considerando neste instante uma instalação do tipo comercial, onde a medição instalada permaneceu durante 24 horas, temos os resultados para as tensões e para as correntes harmônicas apresentadas nas Figuras 3.37 até 3.42. Esta instalação, em específico, tem como principais cargas elétricas dois computadores, uma impressora, um ar condicionado e a iluminação em geral, sendo que esta última, permanece, em parte, as 24 horas do dia em funcionamento.

Analisando apenas o resultado para a corrente de 3ª harmônica, apresentado na Figura 3.37(b), a prevalência do fluxo de potência harmônica ativa permaneceu no sentido carga-fonte, salvo em alguns poucos instantes em que o fluxo foi invertido, representado pelos poucos pontos localizados no 1ª quadrante. Neste caso, é possível visualizar quatro “nuvens de dados” representando o fluxo de potência ativa no sentido carga-fonte.

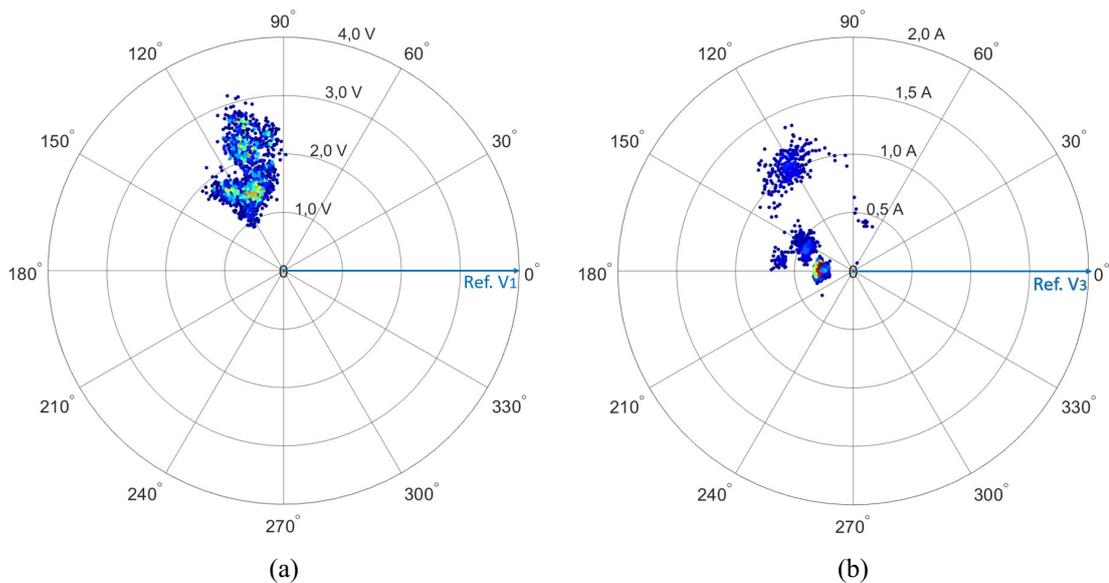


Figura 3.37 – Medição de 24 horas em uma instalação comercial. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica.

Baseando nos pontos representativos das correntes de 5ª ordem harmônica, a sua grande maioria estão localizados no 1ª quadrante, representando assim um fluxo de potência harmônica ativa com prevalência no sentido fonte-carga, conforme pode ser observado na Figura 3.38(b). Assim como no caso anterior, alguns pontos representam algumas situações onde o fluxo de potência ocorreu no sentido inverso.

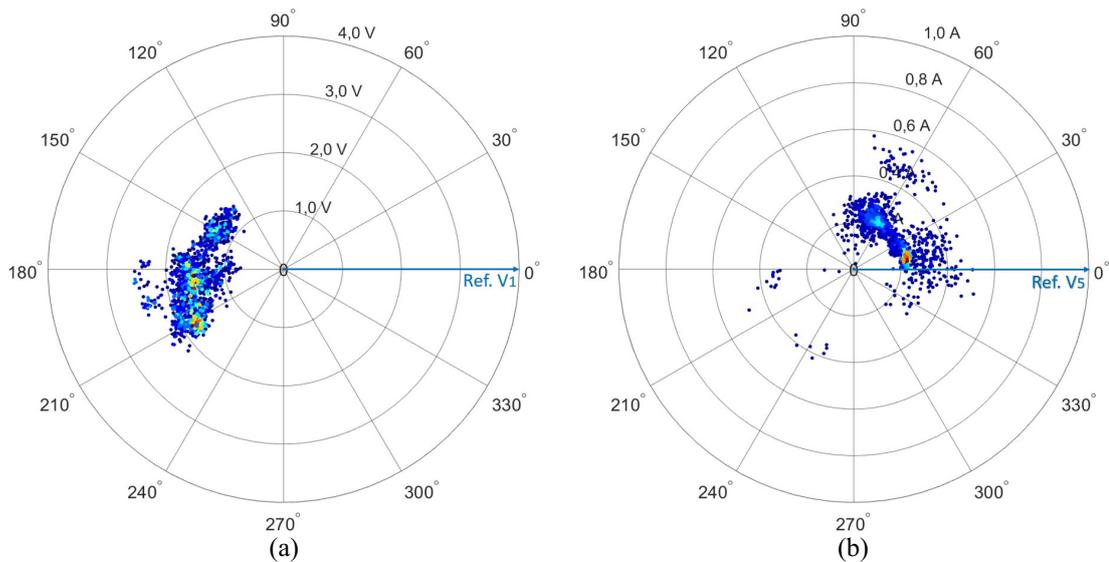


Figura 3.38 – Medição de 24 horas em uma instalação comercial. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.

A mesma análise realizada para a 3ª ordem harmônica pode ser utilizada para a 7ª ordem. Pela Figura 3.39(b), percebe-se que pela maioria dos pontos localizados no 2ª e 3ª quadrantes, o fluxo de potência ativa, para esta ordem, está no sentido carga-fonte, entretanto, com uma maior dispersão dos pontos dentro da “nuvens de dados”.

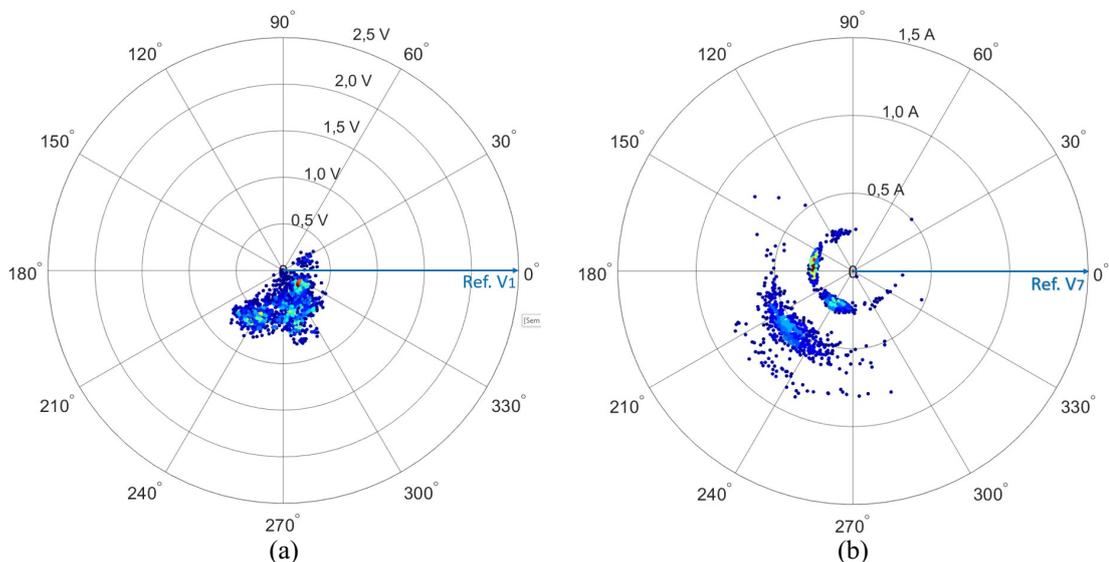


Figura 3.39 – Medição de 24 horas em uma instalação comercial. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.

Na Figura 3.40(b) são apresentados os resultados para a corrente de 9ª ordem harmônica. Neste caso, tem-se uma “nuvem de dados” mais concentrada próximo da amplitude de 0,2 A, e com sentido do fluxo de potência harmônico, predominantemente, no sentido carga-fonte. No entanto, para as amplitudes um pouco maiores, os pontos apresentaram uma maior dispersão, com localização nos quatro quadrantes do plano.

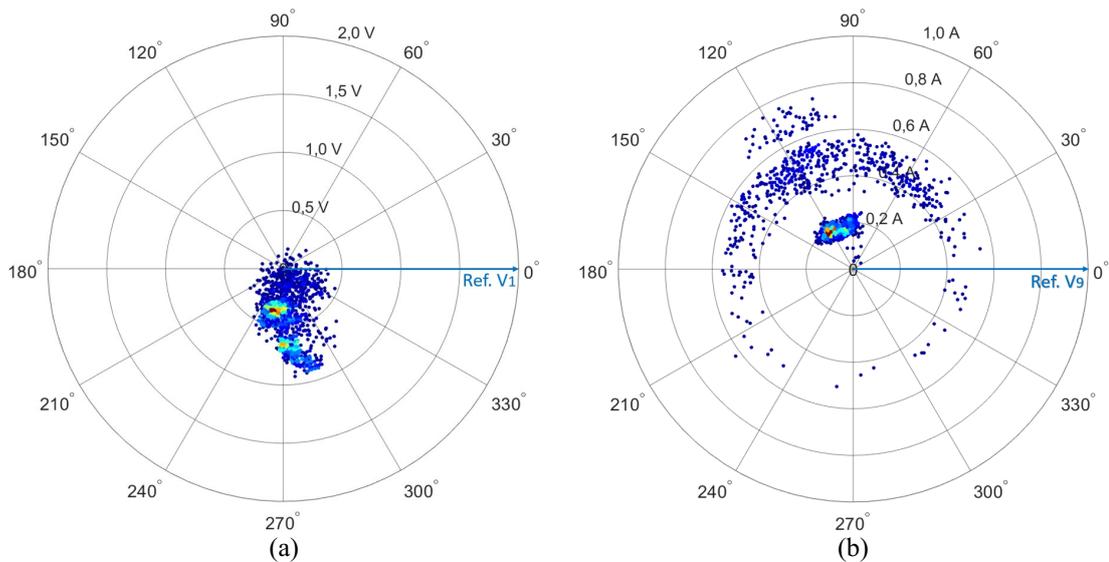


Figura 3.40 – Medição de 24 horas em uma instalação comercial. (a) tensão e (b) corrente de 9ª ordem harmônica.

Para a 11ª ordem harmônica, os resultados apresentaram, apesar da dispersão dos pontos, a formação de três “nuvens de dados”, conforme Figura 3.41(b). Com base na escala de cores adotada, pode-se dizer que a maior prevalência para o fluxo de potência harmônica ativa aconteceu no sentido carga-fonte.

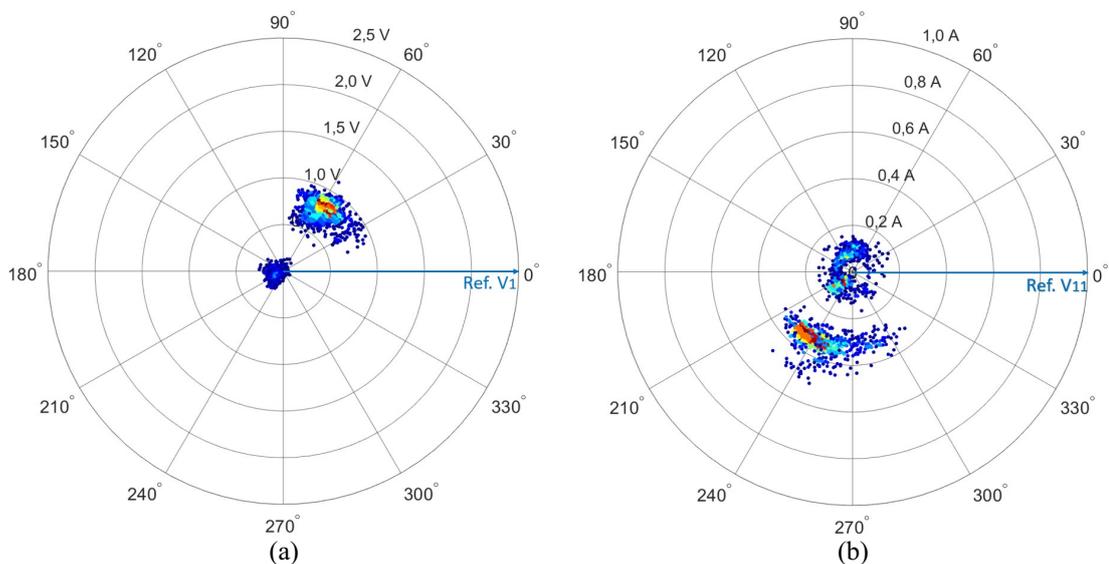


Figura 3.41 – Medição de 24 horas em uma instalação comercial. (a) tensão e (b) corrente de 11ª ordem harmônica.

Por fim, verificou-se uma maior dispersão dos pontos representativos para a corrente de 13ª ordem harmônica. Todavia, seguindo o mesmo procedimento dos casos anteriores, ou seja, a escala de cores, a tendência do fluxo de potência harmônica ativa se deu no sentido fonte-carga.

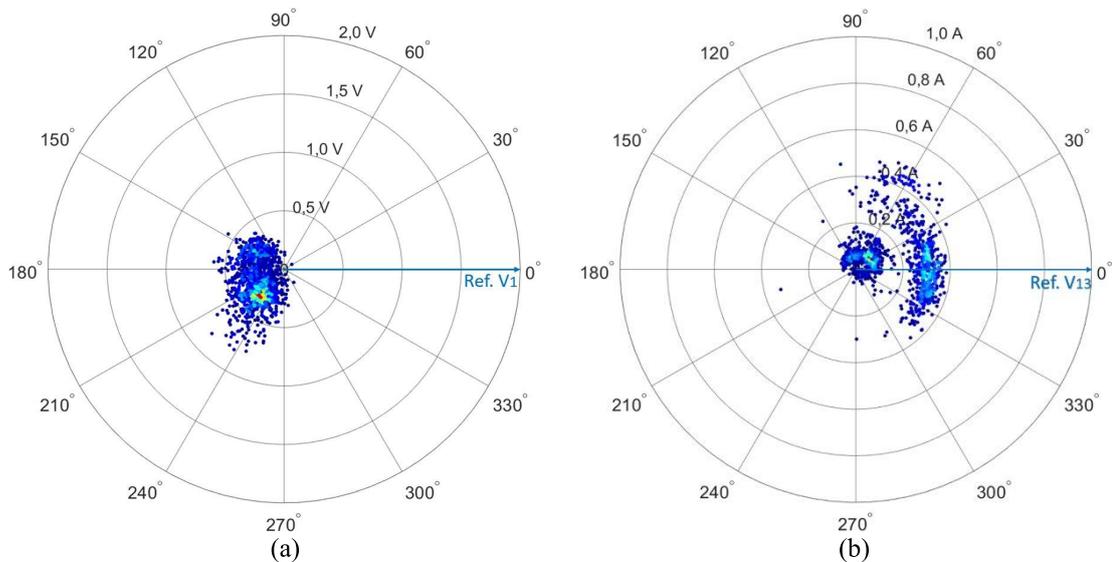


Figura 3.42 – Medição de 24 horas em uma instalação comercial. (a) tensão e (b) corrente de 13ª ordem harmônica.

3.4 ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO EM MÉDIA TENSÃO

Finalmente, após as análises realizadas, tanto em cargas quanto instalações alimentadas por rede elétrica em baixa tensão, este tópico visa analisar o comportamento do fluxo de potência harmônica ativa em um alimentador de média tensão. Deste modo, com o auxílio de transformadores de potencial (TP) e de corrente (TC), instalados dentro de uma subestação de concessão da distribuidora de energia elétrica local, registrou-se as formas de onda das tensões e das correntes deste alimentador durante 24 horas de medição. Este alimentador possui tensão nominal igual a 13,8 kV e possui vários transformadores abaixadores para alimentar, na sua grande maioria, instalações do tipo residencial e comercial, além da iluminação pública. Mais uma vez, o método de registro adotado para este teste, refere-se à aquisição das formas de onda de um ciclo da tensão e da corrente a cada intervalo de um minuto.

Por se tratar de um alimentador em média tensão, onde existem vários transformadores abaixadores de tensão com ligação do tipo Delta-Estrela, as amplitudes das correntes harmônicas de sequência zero possuem baixas magnitudes. Esta situação ocorre devido ao fato de que, a ligação dos enrolamentos no primário do transformador serem no formato delta, onde as correntes das componentes harmônicas múltiplas de 3 e de sequência zero, ficam confinadas neste enrolamento. Neste contexto, as correntes de 3ª e 9ª ordens harmônicas presentes no alimentador, são apenas aquelas de sequência positiva e/ou negativa cuja a origem é atribuído ao desequilíbrio das cargas. Assim sendo, por possuírem amplitudes irrisórias, os resultados para a 3ª e 9ª ordens harmônicas serão desconsideradas deste tópico.

Da Figura 3.43 até a Figura 3.44, têm-se o comportamento das tensões e das correntes harmônicas para o alimentador em média tensão. Para a 5ª e 7ª ordens harmônicas, as tensões harmônicas se apresentaram com diferentes “nuvens de dados”, conforme mostrado nas Figuras 3.43(a) e 3.44(a), respectivamente. Para as demais ordens, nota-se a presença de apenas uma concentração de dados, porém de forma mais dispersa.

Analisando o fluxo de potência ativa para a 5ª ordem harmônica, este ficou bem definido ao longo do dia no sentido carga-fonte, conforme pode ser evidenciado na Figura 3.43(b). No entanto, é possível notar três “nuvens de dados” com localizações distintas no plano polar.

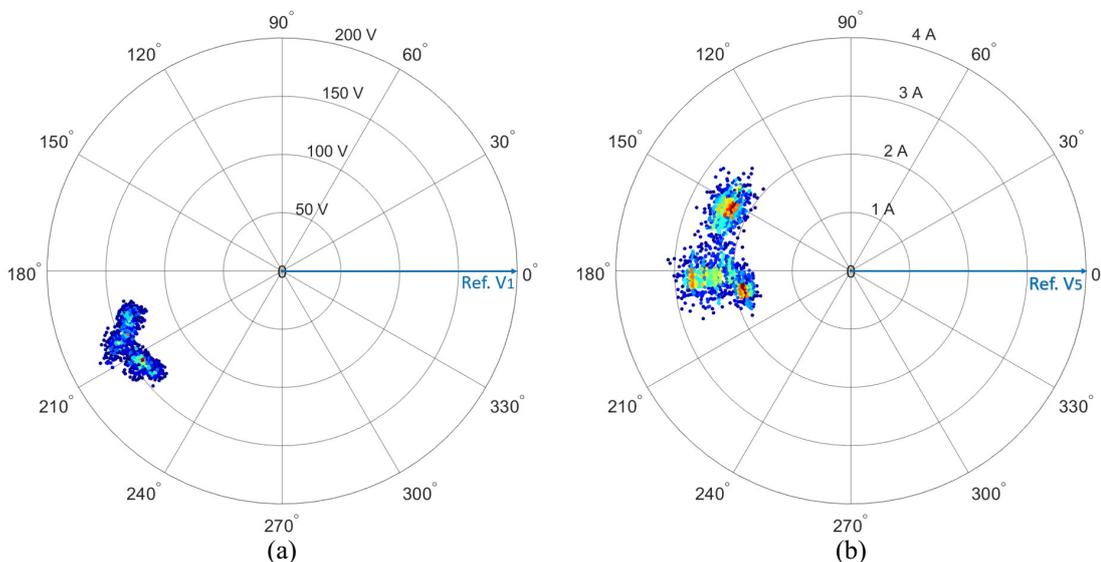


Figura 3.43 – Medição de 24 horas de um alimentador de distribuição em média tensão. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.

No caso da 7ª e da 11ª ordens harmônicas, percebe-se pelos gráficos das correntes, Figura 3.44(b) e Figura 3.45(b), que o fluxo de potência harmônica ativa, em ambas as situações, predominam no sentido carga-fonte, salvo alguns poucos pontos que se localizaram no 4ª quadrante.

Por fim, o fluxo de potência ativa para a 13ª ordem harmônica se mostrou alternando de direção, apresentando em alguns instantes no sentido carga-fonte e em outros fonte-carga, onde a maior prevalência se situa próximo do valor nulo, ou seja, resultando em apenas um fluxo de potência harmônica reativa do tipo indutivo.

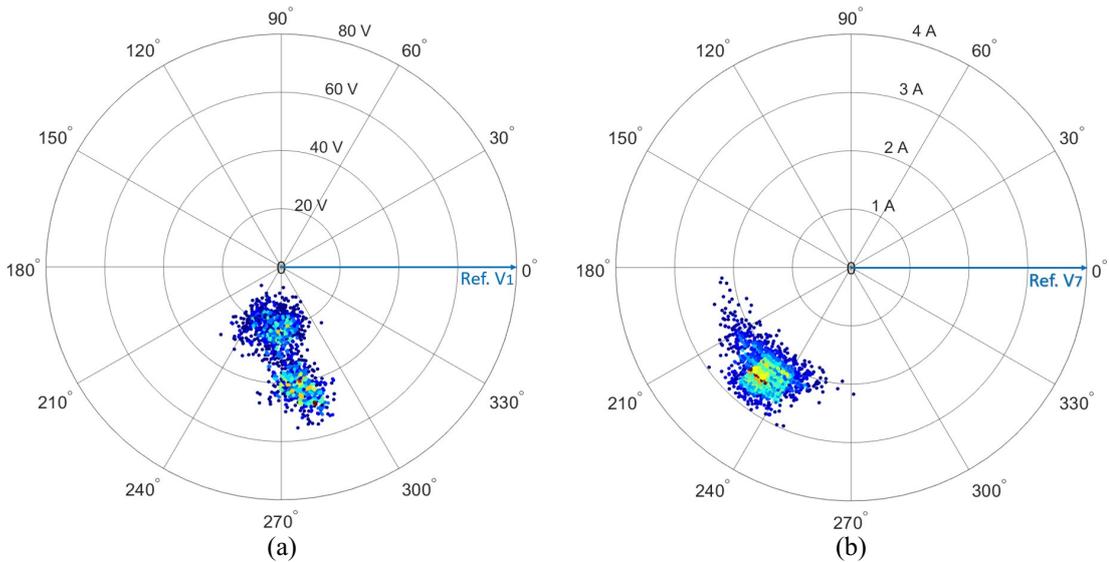


Figura 3.44 – Medição de 24 horas de um alimentador de distribuição em média tensão. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.

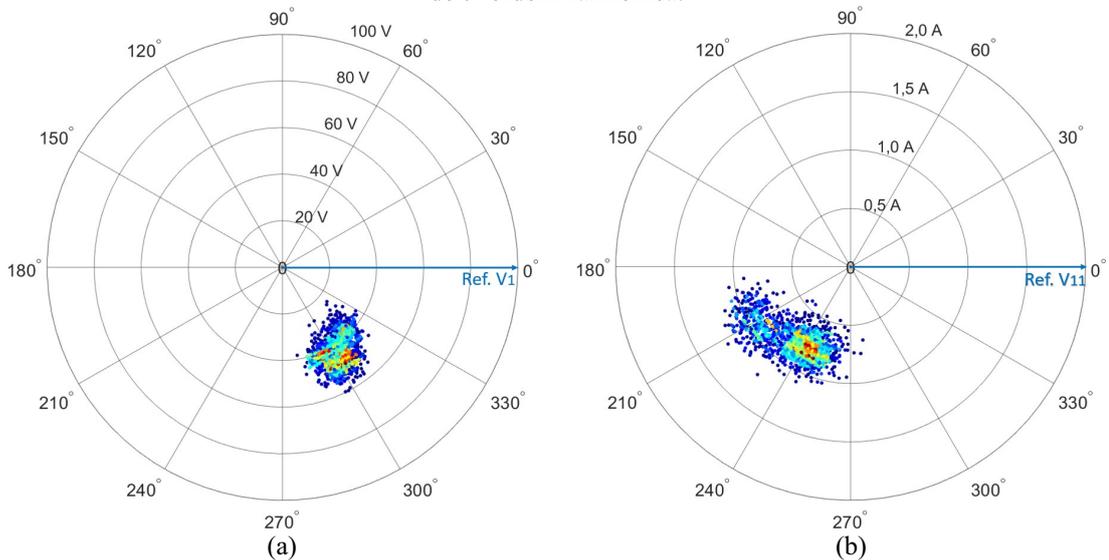


Figura 3.45 – Medição de 24 horas de um alimentador de distribuição em média tensão. (a) tensão e (b) corrente de 11ª ordem harmônica.

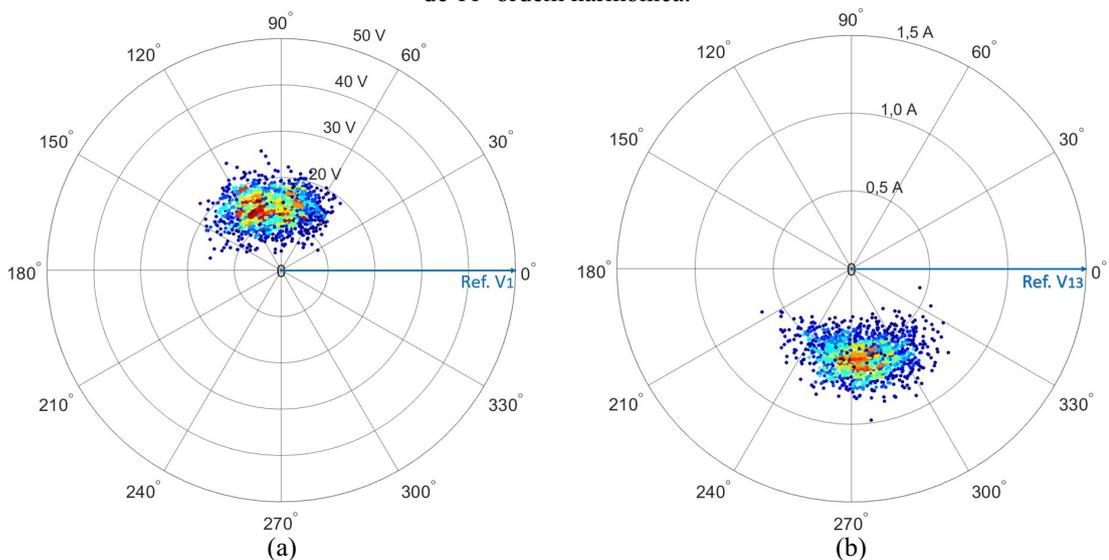


Figura 3.46 – Medição de 24 horas de um alimentador de distribuição em média tensão. (a) tensão e (b) corrente de 13ª ordem harmônica.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo apresentou-se direcionado na análise do fluxo de potência harmônica ativa considerando as seguintes situações: cargas operando de forma isolada, instalações conectadas à rede elétrica e alimentador em média tensão. As componentes em análise foram as ordens ímpares até a 13ª harmônica. A análise apresentou-se embasada no defasamento angular entre as tensões e as correntes harmônicas, determinante para definir a direção do fluxo de potência harmônica.

De uma forma geral, as cargas analisadas, quando alimentadas individualmente, se apresentaram com uma prevalência de direção para o fluxo de potência harmônica bem definida. Porém, para cada equipamento e ainda, para cada ordem harmônica, o fluxo de potência harmônico se apresentou de forma distinta. Para um mesmo equipamento, enquanto que para algumas ordens harmônicas o fluxo de potência se mostrou no sentido carga-fonte, para outras a direção inverteu para fonte-carga. Em consequência disto, não pode-se determinar que as correntes harmônicas de um determinado aparelho elétrico sempre estarão em um sentido específico, como por exemplo: carga-fonte.

Quanto às instalações conectadas à rede elétrica em baixa tensão, o comportamento do fluxo de potência harmônico se mostrou bem aleatório, motivado pelas constantes mudanças de cargas ao longo do dia. Os resultados evidenciaram que as correntes harmônicas podem estar em um determinado instante no sentido carga-fonte e, de acordo com que as cargas são ligadas ou desligadas alterar sua direção para fonte-carga.

Por fim, para o alimentador em média tensão, os resultados demonstraram um comportamento no qual seguiram uma tendência mais definida. Para este caso, as componentes harmônicas de sequência zero não fizeram parte da análise uma vez que suas amplitudes se apresentaram quase que insignificantes, motivada pelo cancelamento que ocorre nos enrolamentos primários, com conexão em delta, dos transformadores abaixadores de tensão.

4. AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS EXISTENTES NA LITERATURA PARA AGREGAÇÃO TEMPORAL DOS ÂNGULOS DE FASE

Este capítulo tem por objetivo avaliar a coerência dos métodos encontrados atualmente na literatura para agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas. Neste sentido, para um intervalo de tempo definido, será analisado a correlação entre o fluxo de energia harmônica real em comparação ao fluxo de energia harmônica calculado com base nas grandezas agregadas de acordo com as duas metodologias existentes. Dessa forma, é possível avaliar a veracidade dos dados agregados quando utilizados em análises específicas, como por exemplo, em estudos de fluxo de potência harmônica.

Em consonância com o objetivo posto, este capítulo encontra-se direcionado na aplicação das metodologias encontradas para agregação dos ângulos de fase para as componentes harmônicas. Assim, para avaliar tais propostas, utilizou-se de uma medição realizada em uma instalação do tipo residencial, com intervalo de tempo de 10 minutos para registro das formas de onda de tensão e de corrente. Dessa forma, objetiva-se determinar um valor agregado para a amplitude, seguindo os procedimentos da norma IEC, e um valor de ângulo de fase, tanto de tensão quanto de corrente, para cada ordem harmônica. Na sequência será analisado se o fluxo de energia harmônica calculado com os valores agregados está em conformidade com o fluxo de energia harmônico real observado no ponto de medição.

4.1 MEDIÇÃO EM UMA INSTALAÇÃO RESIDENCIAL COM INTERVALO DE TEMPO IGUAL A 10 MINUTOS

Com a incumbência de analisar as metodologias encontradas na literatura atual e apresentar uma contribuição para o tema, faz-se necessário a adoção de uma forma de onda de tensão e de corrente para processamento dos cálculos, para obter assim, os valores dos ângulos de fase para as componentes harmônicas agregadas. Para alcançar tal objetivo, foi realizado uma medição em uma instalação do tipo residencial e adotado um intervalo de tempo de 10 minutos para realização da agregação temporal. Neste caso, o medidor utilizado foi um analisador de qualidade da energia elétrica fabricado pela ELSPEC, modelo G4500 *BlackBox*. Desta forma, a meta é obter um valor agregado para o ângulo de fase de cada componente

harmônica, tanto de tensão como de corrente, resultante dos 10 minutos. As formas de onda da tensão e da corrente estão apresentadas na Figura 4.1.

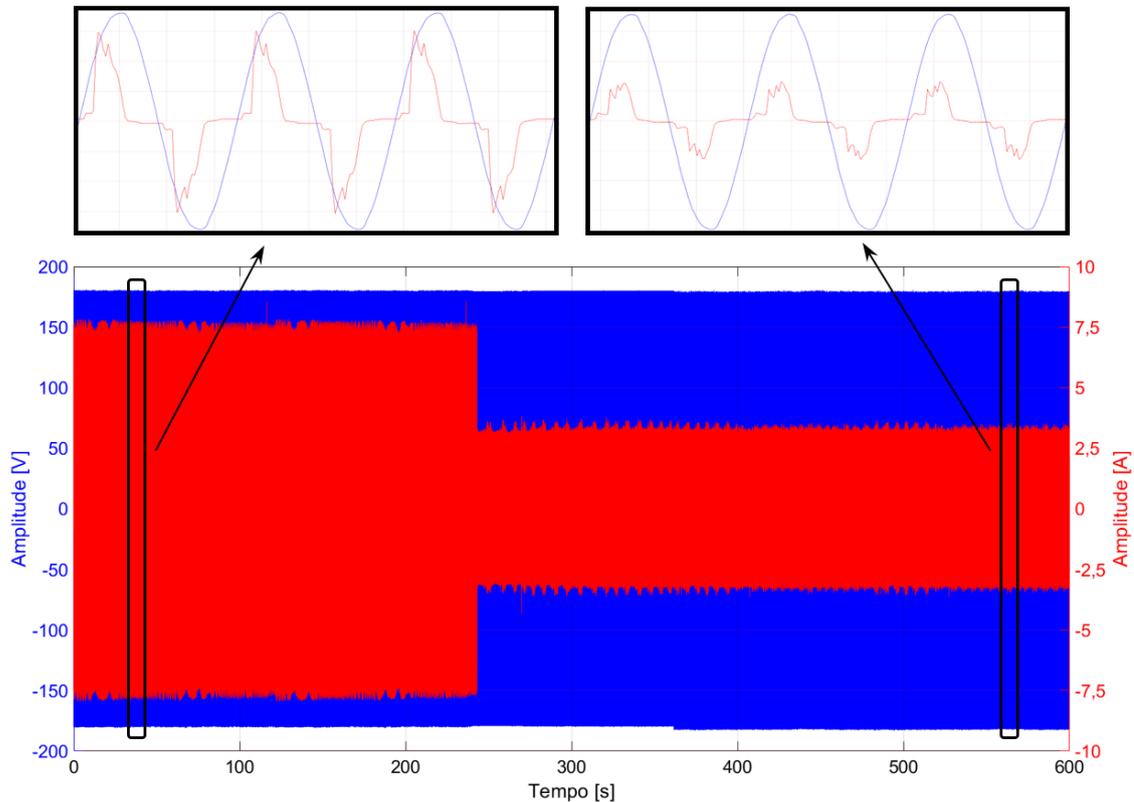


Figura 4.1 - Forma de onda da tensão e corrente registrada durante um intervalo de 10 minutos.

A curva de carga de uma instalação residencial tende a ser bem variável ao longo do dia, devido a aleatoriedade com que as cargas são ligadas e desligadas. Durante o intervalo de tempo da medição é perceptível, pela forma de onda da corrente, que ocorreu apenas uma variação de carga. Pela ampliação dos dois instantes distintos, apresentados na figura, é possível notar que além da mudança na amplitude ocorreu também uma alteração na forma de onda da corrente.

A partir da aquisição das formas de onda da tensão e da corrente, o primeiro passo é realizar o processamento da TDF, conforme apresentado no Capítulo II. Para o cálculo da TDF, adotou-se a janela padronizada de 12 ciclos, o que resulta em uma resolução espectral de 5 Hz. Com isso os resultados oriundos da TDF são as amplitudes e os ângulos de fase a cada 5 Hz, saída 1 da Figura 2.8. A taxa de amostragem das formas de onda apresentadas anteriormente é de 64 amostras por ciclo, resultando assim, em uma resolução espectral até a 32ª ordem harmônica. A título de ilustração dos resultados, serão demonstradas apenas as ordens harmônicas inteiras que possuem amplitudes mais consideráveis, sendo assim descartadas as ordens harmônicas pares e as ordens ímpares acima da 13ª.

Na Figura 4.2, apresentam-se os resultados provenientes do cálculo da TDF, na forma de pontos no plano polar, referente as correntes harmônicas de ordens ímpares (da 3ª até a 13ª ordem). Cada ponto representado no plano é determinado pela amplitude em módulo (em ampère) e pelo ângulo de fase (em graus), onde adotou-se como referência a tensão harmônica com ordem respectiva a da corrente. Como a medição aqui utilizada representa 10 minutos (36.000 ciclos) de registros, temos ao todo 3.000 janelas de 12 ciclos, o que representa que cada plano possui esta quantidade de pontos. Novamente, adotou-se a representação em “mapa de calor” para melhor visualizar a densidade dos pontos em uma região de maior concentração de dados. Percebe-se que para todas as correntes harmônicas, duas “nuvens de dados” se formaram, representando que a mudança de carga ocorrida impactou tanto nas amplitudes quanto nos ângulos de fase. Vale destacar que, para algumas ordens, o sentido do fluxo de potência harmônica ativa resultou em uma direção contrário após a mudança ocorrida na carga.

Analisando ainda a Figura 4.2, nota-se que, para corrente de 3ª harmônica, é perceptível que o fluxo de potência harmônica ativa, durante o intervalo de tempo igual a 10 minutos, consolidou-se com todos os pontos localizados no 3º quadrante, conforme Figura 4.2(a). Desta forma, o fluxo de potência harmônica ativa, para esta ordem em questão, se manteve ao longo do período de análise no sentido da carga para a fonte, do mesmo modo que o fluxo de potência harmônica reativa conservou-se do tipo indutivo.

Para o caso da 5ª ordem harmônica, o fluxo de potência harmônica ativa inverteu de sentido nos diferentes patamares de cargas, podendo ser notado pelas diferentes localizações das “nuvens de dados” no plano da Figura 4.2(b). O fluxo de potência harmônica ativa para a 7ª ordem harmônica, também teve seu sentido invertido, conforme pode ser evidenciado na Figura 4.2(c). Durante um instante o fluxo ocorreu no sentido carga-fonte com fator de potência indutivo, enquanto que no outro instante o sentido do fluxo inverteu para fonte-carga com fator de potência capacitivo.

Assim como no caso da 3ª ordem harmônica, a corrente de 9ª harmônica se manteve localizada em apenas um quadrante ao longo de toda a janela de medição, porém, neste caso restrita ao 2º quadrante, representado na Figura 4.2(d). Desta forma, o fluxo de potência harmônica ativa perdurou no sentido carga-fonte, representando que a instalação injeta no sistema uma corrente com frequência igual a 540 Hz adiantada em relação a tensão harmônica de mesma frequência.

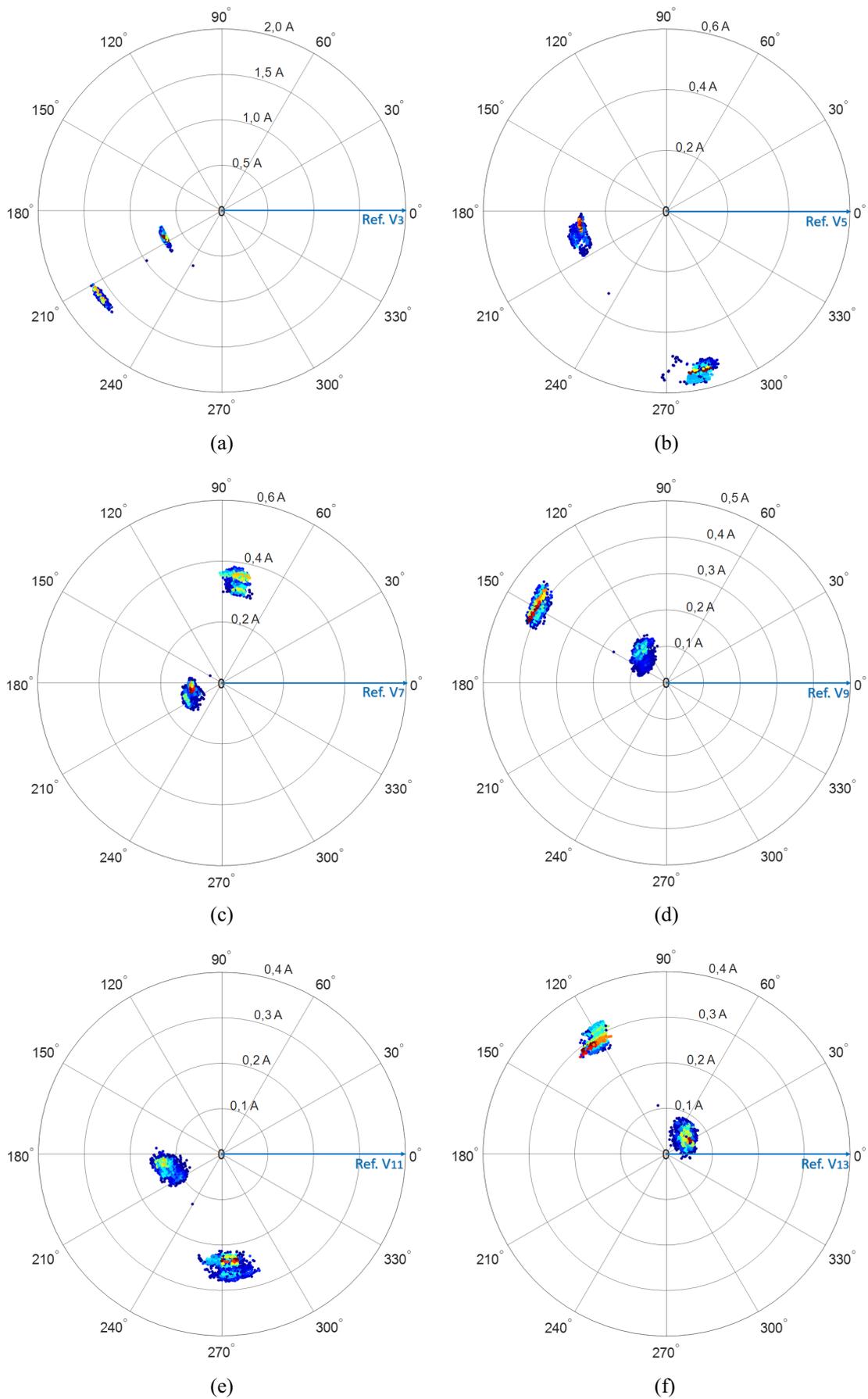


Figura 4.2 – Corrente harmônica em plano polar: (a) 3^a harmônica. (b) 5^a harmônica. (c) 7^a harmônica. (d) 9^a harmônica. (e) 11^a harmônica. (f) 13^a harmônica.

Analisando agora o comportamento da corrente de 11ª ordem harmônica, Figura 4.2(e), percebe-se que o fluxo de potência harmônica ativa permaneceu durante um instante no sentido carga-fonte enquanto que no outro instante alternou-se entre um fluxo de potência ativa no sentido fonte-carga, carga-fonte e nula. Entretanto, observando a escala de cores, pode-se dizer que a prevalência do fluxo da corrente harmônica ocorre no sentido fonte-carga, porém, é uma corrente praticamente indutiva.

Por fim, para a 13ª ordem harmônica, identifica-se pela Figura 4.2(e) que o fluxo de potência harmônica ativa, para cada situação de carga, esteve em diferentes direções. Sendo que, para um determinado instante, o fluxo permaneceu no sentido carga-fonte, enquanto que no outro a direção alternou para fonte-carga.

Em uma análise geral, devido a mudança de carga ocorrida durante o período de medição, os defasamentos angulares entre as correntes e as tensões harmônicas apresentaram um comportamento distinto em cada patamar de carga. Em consequência deste fato, para algumas ordens, o sentido do fluxo de energia harmônica ativa teve um impacto considerável no tocante ao seu sentido de fluxo.

4.2 FLUXO DE ENERGIA HARMÔNICA

A técnica escolhida para ser pautada como referência nas análises das metodologias de agregação dos ângulos de fase para as componentes harmônicas será o fluxo de energia ativa resultante durante o intervalo de tempo da medição. Dessa forma, torna-se possível analisar se os resultados destas metodologias de agregação representam, de forma fidedigna, o comportamento físico ocorrido durante a janela de agregação.

Para alcançar os resultados almejados, inicialmente calcula-se a potência harmônica ativa, para cada uma das ordens harmônicas, dentro de cada janela de 12 ciclos, conforme a equação (4.1). Os dados utilizados para este cálculo são obtidos a partir saída do bloco da TDF.

$$P_{12h} = V_{12h} I_{12h} \cos(\phi_{V12h} - \phi_{I12h}) \quad (4.1)$$

Sendo,

P_{12h} a potência harmônica ativa de ordem h da janela de 12 ciclos;

V_{12h} a amplitude da tensão harmônica de ordem h da janela de 12 ciclos;

I_{12h} a amplitude da corrente harmônica de ordem h da janela de 12 ciclos;

$\phi_{V_{12h}}$ o ângulo de fase da tensão harmônica de ordem h da janela de 12 ciclos;

$\phi_{I_{12h}}$ o ângulo de fase da corrente harmônica de ordem h da janela de 12 ciclos.

A energia harmônica ativa resultante da janela de 12 ciclos é simplesmente o produto da potência harmônica ativa da janela de 12 ciclos, pelo intervalo de tempo, que no caso desta janela é de 0,2 segundos, conforme (4.2).

$$EA_{12h} = P_{12h} \Delta t \quad (4.2)$$

Sendo,

EA_{12h} a energia harmônica ativa, de ordem h , da janela de 12 ciclos;

Δt o intervalo de tempo da janela de 12 ciclos (0,2 segundos).

A energia ativa agregada dentro de um intervalo de tempo, pode ser considerada como sendo o somatório de todos os dados de energia ativa de 12 ciclos, conforme equação (4.3) para o caso do intervalo de agregação de 10 minutos. Para a frequência de 60 Hz, a energia ativa agregada representa o somatório de 3.000 registros de energia harmônica ativa referente ao intervalo de 12 ciclos.

$$EA_{10h} = \sum_{i=1}^{N_{10}} E_{12h(i)} \quad (4.3)$$

Sendo,

EA_{10h} a energia harmônica ativa resultante da agregação de 10 minutos de ordem h ;

N_{10} o número de valores de entrada para a agregação dos 10 minutos;

i o valor incremental.

Assim sendo, o fluxo de energia resultante da equação (4.3), representa de forma física e elétrica o comportamento da carga/instalação frente a fonte de suprimento durante o intervalo de agregação de 10 minutos. Neste intervalo, para cada ordem harmônica, a carga/instalação pode estar atuando como geração ($EA_{10h} < 0$) ou consumidora ($EA_{10h} > 0$) de uma certa quantidade de energia harmônica ativa.

Aplicando este procedimento para o caso em análise, forma de onda da Figura 4.1, no qual se objetiva obter subsídios para avaliar os métodos de agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas, tem-se na Tabela 4.1, os valores de fluxo de energia harmônica ativa, durante a medição de 10 minutos.

Tabela 4.1 – Fluxo de energia harmônica ativa total do intervalo de medição de 10 minutos.

Ordem harmônica	Energia ativa [mWh]
3 ^a	-95,78
5 ^a	-19,55
7 ^a	-2,40
9 ^a	-9,39
11 ^a	-3,58
13 ^a	-3,97

Para todas as ordens harmônicas analisadas, o resultado do fluxo de energia harmônica ativa líquida apresentou valores negativos. Isto representa que no geral, a instalação forneceu energia harmônica ativa para o sistema, ou seja, a prevalência do fluxo de corrente harmônica se manteve de forma mais intensa no sentido carga-fonte, mesmo para aquelas ordens em que, para determinados instantes, o fluxo de corrente harmônica encontrava-se no sentido fonte-carga, como por exemplo na 3^a e 13^a ordens harmônicas.

A partir deste instante, para analisar se as metodologias para agregação das grandezas referentes a esta medição estão representando de forma fidedigna o comportamento do fluxo de energia ativa, serão adotado os valores da Tabela 4.1 como referência.

4.3 METODOLOGIAS PARA AGREGAÇÃO DOS ÂNGULOS DE FASE DAS COMPONENTES HARMÔNICAS

Conforme mencionado anteriormente, encontrou-se na literatura apenas duas técnicas relacionadas ao tema, as quais foram apresentadas na seção 2.5 e 2.6. A primeira adota como o ângulo de fase agregado, o argumento da soma fasorial dos dados de saída da TDF de cada janela de 12 ciclos. Já na segunda técnica, é adotado o ângulo da última janela de 12 ciclos da TDF. Essas duas metodologias serão intituladas neste trabalho a partir daqui como Método 1 e Método 2, respectivamente. Isto posto, o objetivo deste tópico é aplicar essas duas ferramentas para avaliar se seus resultados representam o comportamento físico do fluxo de energia harmônica ativa, associado ao intervalo de tempo agregado.

4.3.1 Resultados para o Método 1 e Método 2

O Método 1 resulta em uma agregação com base no ângulo resultante da soma fasorial dos dados de saída da TDF, conforme apresentado na seção 2.5. Desta forma, utilizando esta metodologia para a medição de 10 minutos de tensão e corrente, os ângulos de fase agregados para as componentes harmônicas estão apresentados na Tabela 4.2. Nestes resultados apresentados, adotou-se como referência o ângulo de fase da componente fundamental de tensão, ou seja, todos os ângulos estão referenciados ao ângulo de fase da tensão fundamental igual a 0°.

Tabela 4.2 – Ângulo de fase agregado de 10 minutos para as componentes harmônicas de tensão e corrente – Método 1.

Ordem harmônica	Ângulo de fase da tensão harmônica agregado de 10 min.	Ângulo de fase da corrente harmônica agregado de 10 min.
3 ^a	41,44°	-103,82°
5 ^a	-114,59°	128,17°
7 ^a	62,92°	163,80°
9 ^a	-114,36°	31,87°
11 ^a	44,26°	-74,42°
13 ^a	133,11°	-115,89°

Aplicando agora o Método 2, resultam-se nos ângulos de fase apresentados na Tabela 4.3. Todos estes ângulos, também estão referenciados ao ângulo de fase da tensão fundamental em 0°. A aplicação deste método não tem um embasamento físico, uma vez que seus resultados são oriundos de uma amostra de dados, última janela da TDF de 12 ciclos, dentro de um universo com 3.000 registros.

Tabela 4.3 – Ângulo de fase agregado de 10 minutos para as componentes harmônicas de tensão e corrente – Método 2.

Ordem harmônica	Ângulo de fase da tensão harmônica agregado de 10 min.	Ângulo de fase da corrente harmônica agregado de 10 min.
3 ^a	35,27°	-120,79°
5 ^a	-111,41°	80,52°
7 ^a	70,72°	-97,29°
9 ^a	-114,06°	6,55°
11 ^a	43,06°	-130,42°
13 ^a	129,92°	141,02°

Para agregação das amplitudes, adotou-se a metodologia padronizada pela norma IEC 61.000-4-30, apresentado na seção 2.4.2, resultando nas amplitudes de tensões e de correntes apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Amplitude da tensão e corrente harmônica utilizando a agregação de 10 minutos utilizando a metodologia da IEC.

Ordem harmônica	Tensão harmônica (agregação IEC) [V]	Corrente harmônica (agregação IEC) [A]
3 ^a	0,6338	1,1631
5 ^a	0,9321	0,4111
7 ^a	0,3884	0,2343
9 ^a	0,2823	0,2730
11 ^a	0,3032	0,1822
13 ^a	0,4703	0,1924

Na Figura 4.3 são apresentadas as grandezas agregadas, representadas na forma de fasor, para as correntes harmônicas ao longo dos 10 minutos de medição. O comprimento de cada fasor representa a amplitude da corrente agregada, enquanto que a fase é representada pelo ângulo agregado pelo Método 1. Estes gráficos possibilitam uma melhor visualização quanto aos resultados das agregações em relação aos pontos representativos das correntes harmônicas. Para todas as ordens harmônicas, nota-se que a extremidade do fasor situa-se fora das “nuvens de dados”, demonstrando que o valor agregado representa uma situação de amplitude de corrente que pode não ter ocorrido durante a medição.

Já a Figura 4.4 ilustra os resultados das agregações pelo Método 2. Como este método utiliza o ângulo da última janela da TDF, logo os fasores das correntes agregadas, para cada ordem harmônica, estarão na mesma direção de um dos pontos das “nuvens de dados”, no caso o ponto referente a última janela. A amplitude não é coincidente uma vez que os módulos representativos dos fasores são referentes as amplitudes agregadas conforme metodologia da IEC (Tabela 4.4).

A partir de uma análise das Figuras 4.3 e 4.4, para nenhum dos dois métodos apresentados, a extremidade do fasor agregado se apresentou de forma coincidente com um dos pontos representativos das correntes harmônicas resultantes da medição. Desta forma, para avaliar o uso destas grandezas agregadas, em um estudo de fluxo de potência por exemplo, será analisado o fluxo de energia harmônica ativa calculado a partir das grandezas agregadas e comparado com o fluxo de energia efetivo na medição.

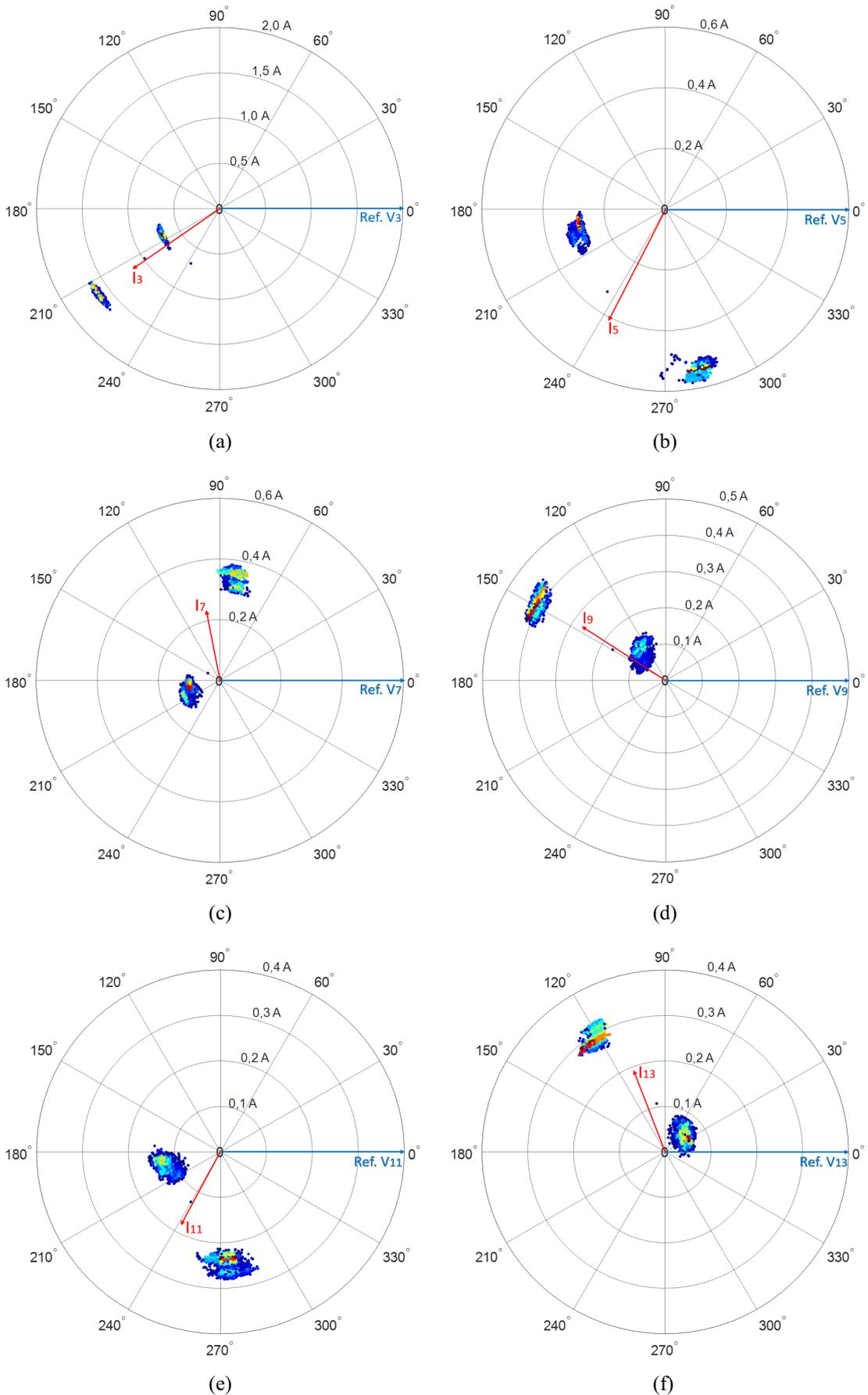


Figura 4.3 – Corrente harmônica em plano polar com fasor agregado pelo método 1: (a) 3ª harmônica. (b) 5ª harmônica. (c) 7ª harmônica. (d) 9ª harmônica. (e) 11ª harmônica. (f) 13ª harmônica.

Na Tabela 4.5, tem-se os resultados de energia ativa calculados utilizando as amplitudes agregadas pela metodologia da IEC e os ângulos de fase agregados pelo Método 1. O fluxo de energia ativa, em todas as ordens harmônicas, apresentou-se no sentido carga-fonte, assim como no fluxo de energia ativa adotado como referência, apresentado na Tabela 4.1. Todavia, as magnitudes resultantes em ambos os cálculos foram divergentes.

Tabela 4.5 – Energia harmônica ativa calculada utilizando as amplitudes agregadas pelo método da IEC e os ângulos de fase das componentes harmônicas agregado pelo Método 1.

Ordem harmônica	Energia ativa [mWh]
3 ^a	-100,95
5 ^a	-29,23
7 ^a	-2,86
9 ^a	-10,68
11 ^a	-4,42
13 ^a	-5,40

Adotando agora os ângulos de fase agregados conforme Método 2, tem-se a energia harmônica ativa, para cada ordem harmônica, apresentadas na Tabela 4.6. Para chegar a estes resultados, mais uma vez utilizou-se das amplitudes agregadas pelo método da IEC. Para o cenário em questão, no caso específico da 13^a ordem harmônica, o fluxo de energia harmônica ativa resultou em um valor positivo, o que representa um fluxo de energia no sentido fonte-carga, diferentemente da situação ocorrida na realidade.

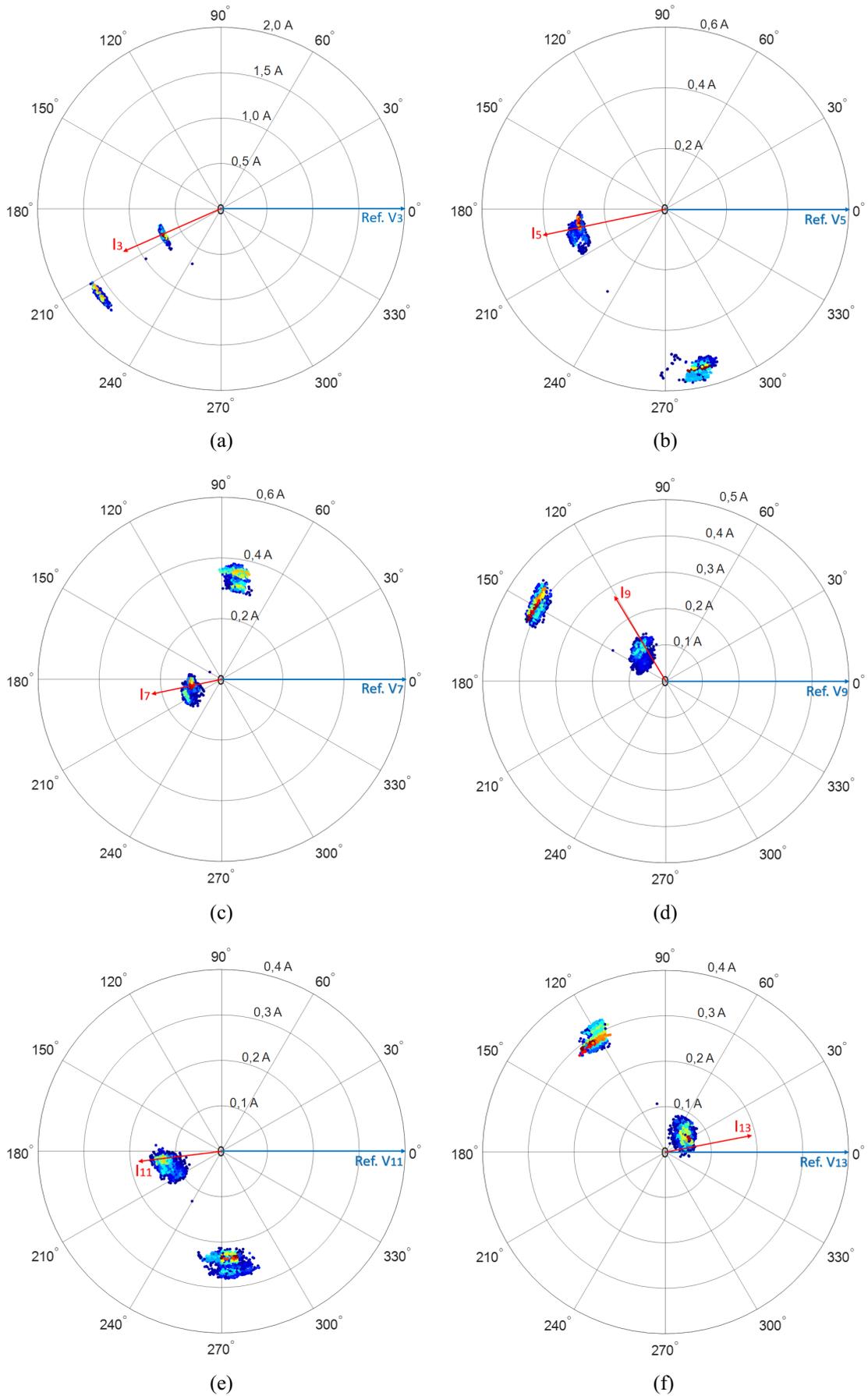


Figura 4.4 – Corrente harmônica em plano polar com fasor agregado pelo método 2: (a) 3ª harmônica. (b) 5ª harmônica. (c) 7ª harmônica. (d) 9ª harmônica. (e) 11ª harmônica. (f) 13ª harmônica.

Tabela 4.6 – Energia harmônica ativa calculada utilizando as amplitudes agregadas pelo método da IEC e os ângulos de fase das componentes harmônicas agregado pelo Método 2.

Ordem harmônica	Energia ativa [mWh]
3 ^a	-112,29
5 ^a	-62,48
7 ^a	-14,84
9 ^a	-6,54
11 ^a	-9,15
13 ^a	14,80

Por fim, na Tabela 4.7 são apresentados as diferenças entre as energias harmônicas ativa calculadas com os ângulos agregados pelos dois métodos (Tabela 4.5 e Tabela 4.6), em relação as energias harmônicas ativa associadas ao período de 10 minutos de medição (Tabela 4.1). Pode-se verificar que as discrepâncias nas grandezas agregadas resultaram em consideráveis divergências nos resultados dos fluxos de energias calculados. Utilizado os ângulos agregados pelo Método 1, em todas as ordens harmônicas a energia harmônica ativa apresentou-se com magnitudes maiores. A 5^a ordem harmônica apresentou a maior variação entre as ordens analisadas, com um acréscimo na energia harmônica ativa calculada de aproximadamente 50% em relação a energia harmônica ativa resultante do intervalo de medição.

Tabela 4.7 – Diferença entre o fluxo de energia harmônica ativa durante os 10 minutos de medição e o calculado pelos valores agregados.

Ordem harmônica	Método 1	Método 2
3 ^a	5,40%	17,24%
5 ^a	49,51%	219,59%
7 ^a	19,17%	518,33%
9 ^a	13,74%	-30,35%
11 ^a	23,46%	155,59%
13 ^a	36,02%	-472,80%

Analisando agora, os resultados nos quais se utilizam dos ângulos de fase agregados pelo Método 2, percebe-se maiores divergências ainda. No caso da 7^a harmônica, a energia ativa calculada com as grandezas agregadas, apresentou um acréscimo superior a 5 vezes o fluxo de energia harmônica ativa real observado no ponto de medição. Já para a 9^a ordem harmônica, ocorreu uma redução no fluxo de energia ativa calculado na ordem de 30%. Os resultados para a 13^a harmônica também se mostraram bem divergentes, com uma redução de

aproximadamente 5 vezes em relação ao fluxo de energia harmônica ativa adotado como referência. Pelos resultados apresentados, é notório que o uso do Método 2 não é aconselhado, pois não tem fundamento físico para justificar o seu uso.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou os fluxos de energias harmônicas baseando-se nas grandezas agregadas tanto para as amplitudes quanto também para os ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente. Para servir de balizamento, utilizou-se de um intervalo de 10 minutos de medição de formas de onda de tensão e de corrente, onde inicialmente, calculou-se o fluxo de energia harmônica representativo da janela de agregação.

Com os dados reais de energia referentes ao intervalo de medição, procedeu-se então, para realização das agregações dos ângulos pelos dois métodos encontrados nas referências bibliográficas, além da agregação das amplitudes conforme procedimentos da norma IEC. No caso dos ângulos de fase agregados, observou-se relevantes divergências entre os resultados obtidos pelos dois métodos, as quais impactaram diretamente nos fluxos de energia harmônica ativa calculados a partir destes.

O Método 1 baseia-se no cálculo dos ângulos de fase das componentes harmônicas a partir do argumento dos somatórios das grandezas de cada janela de cálculo da TDF. Para avaliação crítica dos resultados alcançados, calculou-se as energias harmônicas ativa a partir destas grandezas agregadas. Os resultados para o fluxo de energia harmônica, quando comparadas com a referência adotada, se mostraram com certas divergências, onde para uma ordem em específico o erro apresentado foi de aproximadamente 50%.

Já o Método 2 não possui nenhum embasamento físico para obtenção dos resultados, uma vez que são definidos como sendo os ângulos de fase agregados, os valores referentes a última janela de cálculo da TDF de 12 ciclos. Os resultados para os fluxos de energia harmônica utilizando os ângulos de fase agregados por este método apresentaram ainda mais divergentes quanto se comparado ao método anterior. Com desvios de aproximadamente 500% em determinadas ordens harmônicas, este método se mostrou com resultados bem aleatórios para agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas.

Os resultados apresentados neste capítulo reforçam ainda mais a tese de que é necessária uma metodologia mais eficiente para a realização da agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente. Este será o objetivo do próximo capítulo, o qual tem como propósito apresentar uma nova metodologia capaz de realizar a agregação temporal dos ângulos de fase e assim, com os resultados obtidos por este método, calcular os fluxos de energia harmônica com características e amplitudes semelhantes àqueles verificados no ponto de medição.

5. PROPOSTA PARA AGREGAÇÃO TEMPORAL DOS ÂNGULOS DE FASE DAS COMPONENTES HARMÔNICAS

Uma vez averiguado o comportamento dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente para algumas situações específicas, e analisado o desempenho das técnicas encontradas atualmente na literatura, o presente capítulo tem como objetivo apresentar a metodologia proposta para realizar as agregações temporais dos ângulos de fase das componentes harmônicas. O objetivo desta proposta é obter dados de medição que representem de forma fidedigna o comportamento físico real no ponto de medição. O desenvolvimento da proposta aqui apresentada toma como base o fluxo de energia harmônica real, dentro do período de agregação, observado no ponto de medição. Desta forma, o capítulo inicia com a fundamentação da metodologia proposta, apresentando de forma detalhada os passos a serem implementados pelos fabricantes de medidores. Ao final, é realizada uma avaliação de desempenho da nova metodologia, assim como realizado no capítulo anterior para aquelas técnicas encontradas atualmente na literatura.

5.1 BASE DA METODOLOGIA PROPOSTA

A base adotada para o desenvolvimento da metodologia proposta neste trabalho, parte do conceito utilizado na tarifação de excedentes de energia reativa. O ângulo de defasamento entre uma tensão e a corrente alternada é definido a partir dos montantes das energias ativa e reativa, dentro do período de tempo desejado, conforme equação (5.1).

$$FP = \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} = \cos(\theta) \quad (5.1)$$

Sendo,

FP o fator de potência, na frequência fundamental;

EA a energia ativa, na frequência fundamental;

ER a energia reativa, na frequência fundamental;

θ o ângulo de defasamento entre a tensão e a corrente, na frequência fundamental.

Atualmente, este princípio se encontra bem difundido para o cálculo do fator de potência na frequência fundamental. Todavia, pretende-se aqui aplicar o mesmo conceito para as frequências harmônicas, com intuito de agregar os ângulos de fase baseando-se nos fluxos das energias harmônicas ativa e reativa. Desta forma, como resultado, espera-se a partir do

ângulo de defasamento entre as tensões e as correntes, definir os ângulos de fase agregados, tanto para as tensões quanto para as correntes, isto para cada uma das ordens harmônicas.

Neste contexto, a defasagem angular, representativa do intervalo de tempo desejado para a agregação, pode ser obtida a partir do cálculo do fator de potência harmônico, que por sua vez, deve ser calculado com base nas potências, ou energias, harmônicas ativa e reativa. Considerando um exemplo hipotético, para o qual deseja-se agregar o ângulo de fase de uma tensão e de uma corrente qualquer, ambas de 3ª ordem harmônica, primeiramente, deve-se obter as potências, ou energias, harmônicas ativa e reativa relativas à cada janela de aplicação da TDF (12 ciclos). Na Figura 5.1, tem-se a representação gráfica deste exemplo, onde cada triângulo representa as potências harmônicas ativa e reativa, de 3ª ordem, calculadas para uma janela de 12 ciclos. Assim, a partir do somatório das parcelas referentes as potências harmônicas ativa e reativa, calculadas de forma individual, consegue-se obter o ângulo agregado, θ_{ag} , referente ao defasamento angular para o intervalo de agregação de 1 segundo (intervalo de tempo representativo deste exemplo em específico), considerando os fluxos de potências harmônicas. Vale salientar que, neste exemplo em específico, o fluxo de potência harmônica ativa mantém-se em um determinado sentido durante os 4 primeiros intervalos, e no último, ocorreu uma inversão do fluxo, sendo o mesmo considerado no processo de agregação. A mesma situação pode ser observada para o caso das potências harmônicas reativa, sendo que, em alguns determinados instantes, a potência reativa é do tipo indutiva e em um outro é capacitiva.

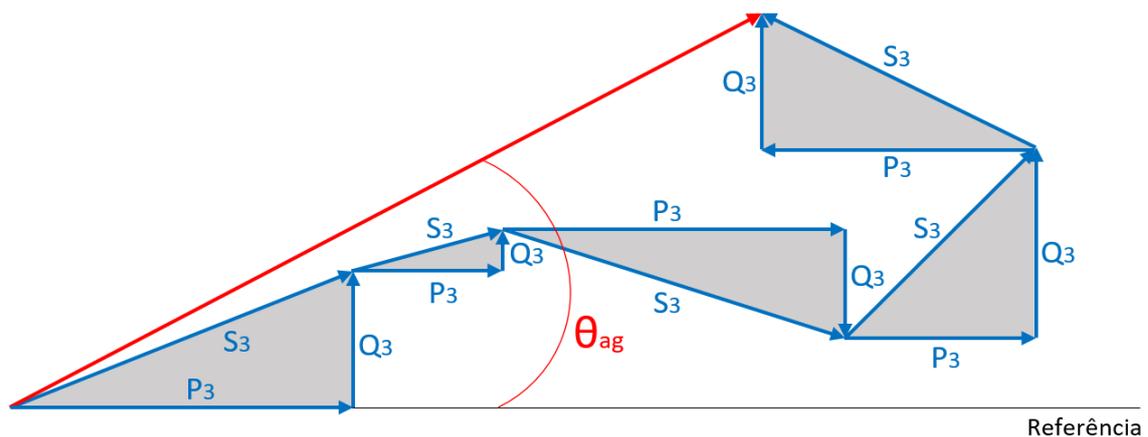


Figura 5.1 – Representação gráfica de uma agregação do ângulo de fase para a 3ª ordem harmônica, a partir das potências harmônicas, para um intervalo com 5 janelas de dados.

Neste contexto, para efeito do cálculo do fator de potência harmônico será levado em consideração as energias harmônicas ativa e reativa, uma vez que esta grandeza possui uma representação física para cada intervalo de agregação.

5.2 ESTRUTURA GERAL PARA OS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO COM A IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Na estrutura geral para instrumentos de medição recomendada pela IEC 61.000-4-7, Figura 2.8, foram adicionados 3 novos blocos, os quais são referentes as seguintes etapas: (1) definição da referência, (2) agrupamento e (3) agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas. Na Figura 5.2 é apresentado a nova estrutura para instrumentos de medição com as adaptações necessárias para realizar as agregações dos ângulos de fase das componentes harmônicas (etapas destacadas em azul).

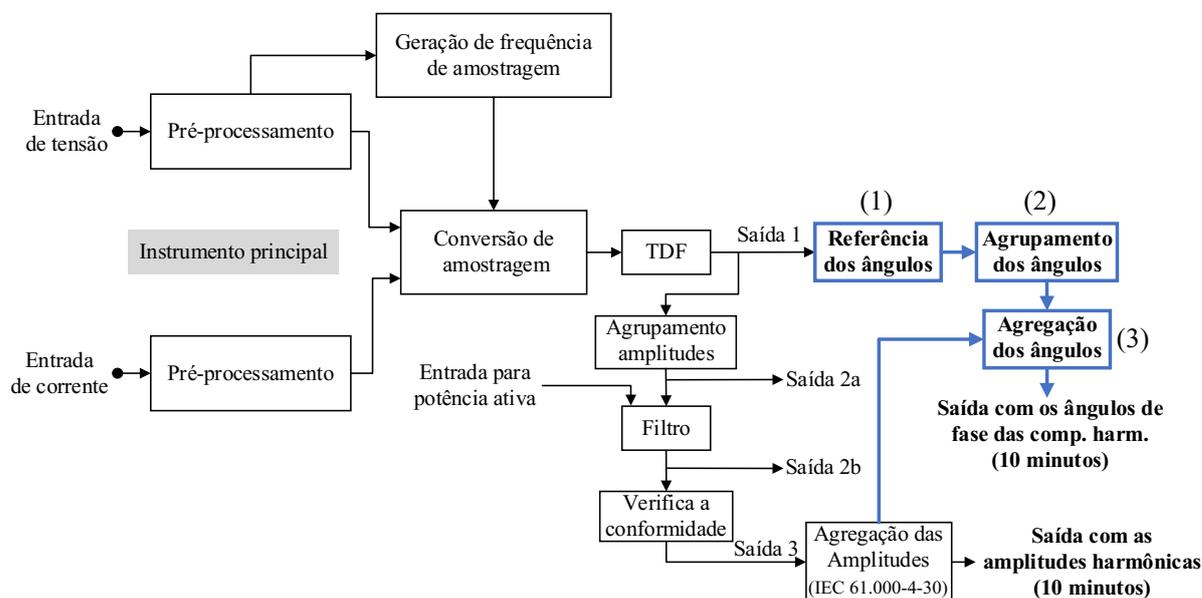


Figura 5.2 – Estrutura geral para instrumentos de medição, adaptado da IEC 61000-4-7, considerando a proposta para a agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas.

Na sequência são apresentados de forma detalhada cada um dos 3 novos blocos adicionados na estrutura geral para instrumentos de medição.

5.2.1 Definição da referência dos ângulos de fase

O primeiro bloco adicionado na estrutura geral para instrumentos de medição, referência dos ângulos, tem como entrada os dados de saída da TDF, sendo que, para cada intervalo de 12 ciclos, tem-se os valores referentes as amplitudes e aos ângulos de fase para cada componente espectral de ordem h . Estes valores estão disponibilizados na Saída 1, apresentado na Figura 5.2, e podem ser representados na forma fasorial de acordo com (5.2) e (5.3), respectivamente para as tensões e para as correntes harmônicas.

$$\dot{V}_h = V_h \angle \phi_{Vh} \quad (5.2)$$

$$\dot{I}_h = I_h \angle \phi_{Ih} \quad (5.3)$$

Sendo,

V_h = amplitude da tensão harmônica de ordem h resultante da janela de 12 ciclos;

ϕ_{Vh} = ângulo de fase da tensão harmônica de ordem h resultante da janela de 12 ciclos;

I_h = amplitude da corrente harmônica de ordem h resultante da janela de 12 ciclos;

ϕ_{Ih} = ângulo de fase da corrente harmônica de ordem h resultante da janela de 12 ciclos.

Para determinação dos ângulos de fase das componentes harmônicas é necessário a adoção de uma referência para os ângulos. O objetivo desta referência é obter uma melhor interpretação dos resultados e assim, evitar imprecisões devido às variações da frequência do sistema. A recomendação para referência é manter o ângulo de fase da tensão fundamental da fase A (considerando um sistema trifásico convencional com as fases nomeadas como ABC) igual a zero em cada janela da TDF de 12 ciclos. Fazendo isto, a referência estará sendo ressincronizada a cada intervalo de 12 ciclos. Deste modo, para cada intervalo de tempo de 12 ciclos, os ângulos provenientes da Saída 1 (Figura 5.2), tanto das tensões quanto das correntes harmônicas, devem ser ajustados de forma que o ângulo de fase da tensão fundamental da fase A seja igual a zero. Assim, todos os medidores que implementarem esta metodologia apresentará como resultados, ângulos de fase referenciados ao ângulo de fase da tensão fundamental da fase A. A título de ilustração, na Figura 5.3, tem-se uma representação hipotética dos fasores de tensão e de corrente, ambos de 3ª harmônica, onde os seus ângulos de fase estão referenciados a tensão fundamental (0°).

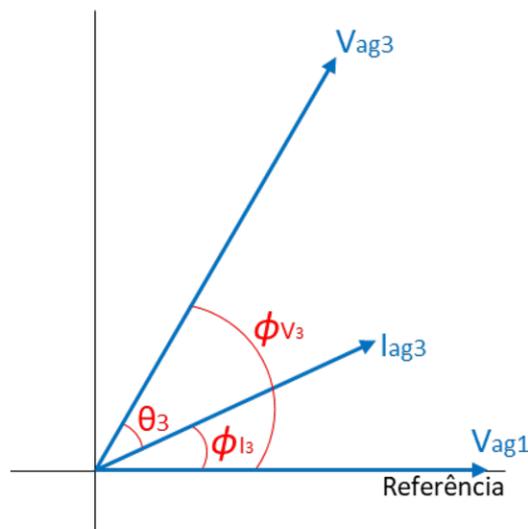


Figura 5.3 – Representação dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente com a tensão fundamental na referência.

Cada componente harmônica possui diferentes escalas de tempo para os ângulos de fase, ou seja, cada fasor está a uma velocidade angular proporcional a h vezes a frequência fundamental. Desta forma, ao considerar uma mudança na referência dos ângulos de fase da frequência fundamental (0°), todos os ângulos de fase, tanto para as tensões quanto para as correntes harmônicas, devem ser ajustados de acordo com sua respectiva frequência, conforme apresentado em (5.4) e (5.5).

$$\phi'_{vh} = \phi_{vh} - (h \times \phi_{v1}) \quad (5.4)$$

$$\phi'_{ih} = \phi_{ih} - (h \times \phi_{i1}) \quad (5.5)$$

Sendo,

ϕ'_{vh} = ângulo de fase das componentes harmônicas de tensão corrigido de acordo com a referência (tensão fundamental da fase A);

ϕ'_{ih} = ângulo de fase das componentes harmônicas de corrente corrigido de acordo com a referência adotada (tensão fundamental da fase A);

ϕ_{v1} = ângulo de fase da tensão fundamental da fase A de cada janela de 12 ciclos (referência).

5.2.2 Agrupamento dos ângulos de fase

Os cálculos realizados no segundo bloco da estrutura geral para instrumentos de medição, agrupamento dos ângulos de fase, seguem em duas vias distintas, sendo uma para determinação dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e uma outra para a corrente. O agrupamento realizado para os ângulos deve ser realizado adotando a criação dos grupos ou subgrupos harmônicos e inter-harmônicos, assim como já é recomendado para as amplitudes. O agrupamento para as amplitudes permanece conforme recomendações da IEC 61.000-4-30. Para os ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão, o agrupamento deve ser realizado através da soma fasorial, conforme apresentado em (5.6) e (5.7), respectivamente para o grupo e subgrupo. Os ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão, para os grupos ou subgrupos, são os argumentos dos resultados das somas fasoriais.

$$\dot{V}_{g,n} = \frac{\dot{V}_{h_{k-6}}}{2} + \sum_{i=-5}^5 \dot{V}_{h_{k+i}} + \frac{\dot{V}_{h_{k+6}}}{2} \quad (5.6)$$

$$\dot{V}_{sg,n} = \sum_{i=-1}^1 \dot{V}_{h_{k+i}} \quad (5.7)$$

Sendo,

$\dot{V}_{g,n}$ = grupo das componentes harmônicas associado a ordem harmônica igual a n ;

$\dot{V}_{sg,n}$ = subgrupo das componentes harmônicas associado a ordem harmônica igual a n ;

n = ordem harmônica referente ao agrupamento das componentes harmônicas (resolução espectral igual a 60 Hz).

Por outro lado, os agrupamentos dos ângulos de fase das componentes harmônicas de corrente são realizados utilizando as energias harmônicas resultantes de cada janela de 12 ciclos, as quais são determinadas através das potências harmônicas ativa e reativa definidas conforme (5.8) e (5.9), respectivamente.

$$P_h = V_h I_h \cos(\phi'_{vh} - \phi'_{ih}) \quad (5.8)$$

$$Q_h = V_h I_h \text{sen}(\phi'_{vh} - \phi'_{ih}) \quad (5.9)$$

Sendo,

P_h = potência harmônica ativa de ordem h da janela de 12 ciclos;

Q_h = potência harmônica reativa de ordem h da janela de 12 ciclos.

As energias harmônicas resultantes de cada janela de 12 ciclos, ou seja, considerando o intervalo de tempo corresponde a 0,2 segundos, são definidas de acordo com (5.10) e (5.11).

$$E_{A,h} = \sum_{i=1}^N (P_{h(i)} \Delta t_1) \quad (5.10)$$

$$E_{R,h} = \sum_{i=1}^N (Q_{h(i)} \Delta t_1) \quad (5.11)$$

Sendo,

$E_{A,h}$ = energia harmônica ativa de ordem h referente a janela de 12 ciclos;

$E_{R,h}$ = energia harmônica reativa de ordem h referente a janela de 12 ciclos;

Δt_1 = intervalo de tempo referente a janela de 12 ciclos (0,2 segundos);

Na sequência, o agrupamento prossegue a partir do somatório das energias harmônicas, conforme (5.12) e (5.13) para formação dos grupos e (5.14) e (5.15) para os subgrupos.

$$E_{A_g,n} = \frac{E_{A,h_{k-6}}}{2} + \sum_{i=-5}^5 E_{A,h_{k+i}} + \frac{E_{A,h_{k+6}}}{2} \quad (5.12)$$

$$E_{R_{g,n}} = \frac{E_{R,h_{k-6}}}{2} + \sum_{i=-5}^5 E_{R,h_{k+i}} + \frac{E_{R,h_{k+6}}}{2} \quad (5.13)$$

$$E_{A_{sg,n}} = \sum_{i=-1}^1 E_{A,h_{k+i}} \quad (5.14)$$

$$E_{R_{sg,n}} = \sum_{i=-1}^1 E_{R,h_{k+i}} \quad (5.15)$$

Sendo,

$E_{A_{g,n}}$ = grupo da energia harmônica ativa de ordem n referente a janela de 12 ciclos;

$E_{R_{g,n}}$ = grupo da energia harmônica reativa de ordem n referente a janela de 12 ciclos;

$E_{A_{sg,n}}$ = subgrupo da energia harmônica ativa de ordem n referente a janela de 12 ciclos;

$E_{R_{sg,n}}$ = subgrupo da energia harmônica reativa de ordem n referente a janela de 12 ciclos;

5.2.3 Agregação dos ângulos de fase

Uma vez realizado o agrupamento, passa-se então para o terceiro bloco referente as agregações dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente. Assim como no caso do agrupamento, os cálculos necessários para realizar as agregações também continuam de forma distinta para as tensões e para as correntes.

Os ângulos de fase agregados para as tensões harmônicas são determinados pelos ângulos resultantes das somas fasoriais das tensões harmônicas, após a realização dos agrupamentos, conforme apresentado em (5.16).

$$\phi_{V_{ag,n}} = \arg \left(\sum_{i=1}^N \dot{V}_{g,n(i)} \right) \quad (5.16)$$

Sendo,

$\phi_{V_{ag,n}}$ = ângulo de fase das componentes harmônicas de tensão agregado;

$\dot{V}_{g,n}$ = fasor de tensão harmônica após a realização do agrupamento.

Por outro lado, em se tratando das correntes harmônicas, a agregação dos ângulos de fase tem como fundamento o fluxo de energia harmônica resultante durante o intervalo de tempo definido para agregação (180 ciclos, 10 minutos ou 2 horas). Assim, os fluxos das

energias resultantes são definidos pelo somatório das energias harmônicas ativa e reativa referentes às janelas de 12 ciclos agrupadas, durante o intervalo de tempo estabelecido para a agregação, conforme (5.17) e (5.18), respectivamente.

$$E_{ag A,n} = \sum_{i=1}^N \left(E_{A_{g,n(i)}} \right) \quad (5.17)$$

$$E_{ag R,n} = \sum_{i=1}^N \left(E_{R_{g,n(i)}} \right) \quad (5.18)$$

Sendo,

$E_{ag A,n}$ = energia harmônica ativa agregada de ordem n ;

$E_{ag R,n}$ = energia harmônica reativa agregada de ordem n .

Os ângulos de fase agregados para cada componente harmônica de corrente são definidos conforme (5.19), onde o sinal referente ao ângulo de defasamento entre a tensão e a corrente harmônicas ($\theta_{ag,n}$) é definido de acordo com a energia harmônica reativa (5.20).

$$\phi_{I_{ag,n}} = \phi_{V_{ag,n}} - \theta_{ag,n} \quad (5.19)$$

Com:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_{ag,n} = \cos^{-1} \left(\frac{\left(\frac{E_{ag A,n}}{\Delta t_2} \right)}{V_{ag,n} I_{ag,n}} \right), \text{ se } E_{ag R,n} \geq 0 \\ \theta_{ag,n} = -\cos^{-1} \left(\frac{\left(\frac{E_{ag A,n}}{\Delta t_2} \right)}{V_{ag,n} I_{ag,n}} \right), \text{ se } E_{ag R,n} < 0 \end{array} \right. \quad (5.20)$$

Sendo:

$\phi_{I_{ag,n}}$ = ângulo de fase das componentes harmônicas de corrente agregado;

$\phi_{V_{ag,n}}$ = ângulo de fase das componentes harmônicas de tensão agregado;

$\theta_{ag,n}$ = defasamento angular entre a tensão e a corrente harmônica agregado;

$V_{ag,n}$ = amplitude eficaz da tensão harmônica agregada conforme norma IEC;

$I_{ag,n}$ = amplitude eficaz da corrente harmônica agregada conforme norma IEC;

Δt_2 = intervalo de tempo referente a agregação temporal, onde os valores padronizados são: 180 ciclos, 10 minutos e 2 horas.

5.2.4 Visão geral da metodologia proposta

Para melhor interpretação da metodologia proposta é apresentado na Figura 5.4 um fluxograma com a sequência das etapas apresentadas para realização das agregações temporais dos ângulos de fase das componentes harmônicas das tensões e das correntes.

O bloco referente a TDF é parte da estrutura geral para instrumentos de medição recomendado pela IEC 61.000-4-30, assim como o bloco Agregação das Amplitudes. Os demais blocos são referentes a expansão dos 3 blocos inseridos na Figura 5.2, sendo que aqui eles estão representando todo o desenvolvimento proposto para agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente.

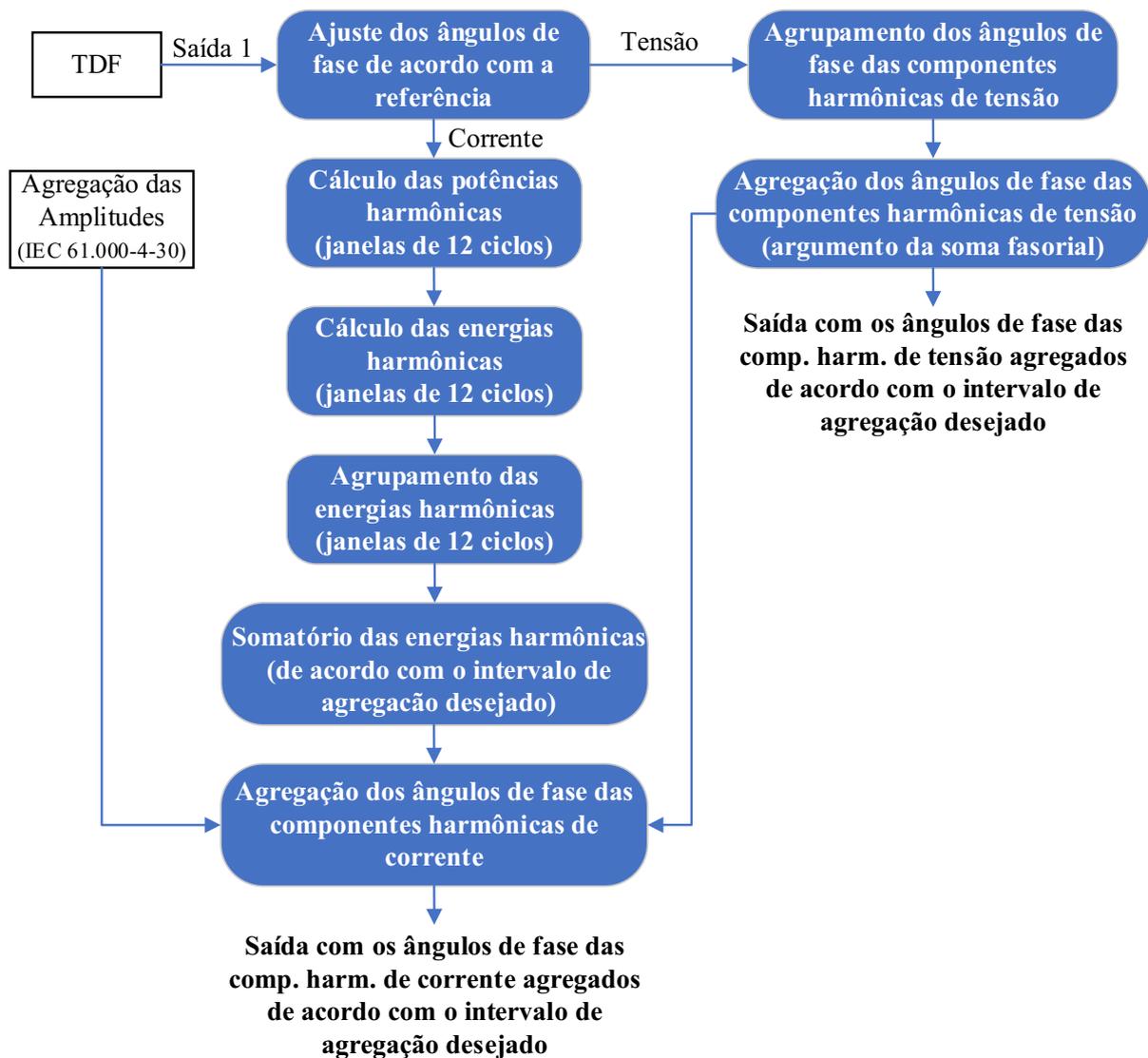


Figura 5.4 – Fluxograma para determinação dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente.

5.3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Esta seção tem como finalidade avaliar o desempenho da proposta apresentada anteriormente. Para isso, mais uma vez será utilizado a medição com intervalo de 10 minutos apresentada no Capítulo 4. Assim, o objetivo aqui é determinar os ângulos de fase das componentes harmônicas das tensões e das correntes agregados e avaliar o fluxo de energia elétrica calculado com as grandezas agregadas em comparação ao fluxo de energia elétrica real no ponto da medição.

Conforme apresentado anteriormente, a metodologia proposta utiliza em sua base de cálculos as amplitudes agregadas conforme definido na norma IEC 61.000-4-30. Para a medição de 10 minutos, essas amplitudes já foram definidas e apresentadas na Tabela 4.4. Mais uma vez, o gabarito utilizado para avaliação do desempenho da metodologia será a comparação entre o fluxo de energia harmônica calculado com as grandezas agregadas em comparação ao fluxo de energia harmônica genuíno verificado no ponto de medição, neste caso apresentado na Tabela 4.1.

Aplicando a metodologia proposta na medição apresentada na Figura 4.1, tem-se como resultado os ângulos de fase para as componentes harmônicas de tensão e de corrente apresentados na Tabela 5.1. Conforme recomendado no desenvolvimento da metodologia, para todas as ordens harmônicas, tanto para a tensão quanto para a corrente, adotou-se a tensão fundamental como referência (0°).

Tabela 5.1 – Resultados obtidos para os ângulos de fase agregados de 10 minutos para as componentes harmônicas de tensão e corrente adotando a metodologia proposta.

Ordem harmônica	Ângulo de fase para a tensão harmônica agregado, em 10 min.	Ângulo de fase para a corrente harmônica, agregado de 10 min.
3 ^a	41,44°	260,21°
5 ^a	245,41°	137,59°
7 ^a	62,92°	162,01°
9 ^a	245,64°	22,61°
11 ^a	44,26°	291,37°
13 ^a	133,11°	238,37°

Para averiguar a veracidade das grandezas obtidas para os ângulos de fase agregados, procedeu-se com o cálculo dos fluxos de energia harmônica ativa utilizando as amplitudes agregadas (Tabela 4.4) juntamente com os ângulos de fase agregados (Tabela 5.1) para cada ordem harmônica. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Energia harmônica ativa calculada utilizando as amplitudes agregadas pelo método da IEC e os ângulos de fase agregados conforme metodologia proposta.

Ordem harmônica	Energia ativa [mWh]
3 ^a	-95,79
5 ^a	-19,54
7 ^a	-2,40
9 ^a	-9,39
11 ^a	-3,58
13 ^a	-3,97

Comparando o fluxo de energia harmônica ativa calculado com as grandezas agregadas (Tabela 5.2) em relação ao fluxo de energia ativa real (Tabela 4.1) nota-se a conformidade entre os resultados, salvo algumas ordens onde a diferença pode ser atribuída as aproximações inerentes aos cálculos. Estes resultados atestam a eficácia dos cálculos pertinentes a metodologia proposta, fazendo com que as grandezas obtidas em medições cujo equipamento tenha implementado esta metodologia, se apresentarão de forma fidedigna ao o fluxo de energia harmônica real no ponto de monitoração.

Por fim, e a título de ilustração, tem-se na Figura 5.5 a representação fasorial das corrente harmônicas agregadas. O módulo do fasor representa a amplitude da corrente agregada conforme a norma IEC 61.000-4-30, enquanto que o ângulo de defasamento entre as tensões e as correntes harmônicas agregadas foram obtidas a partir da metodologia aqui proposta. Nesta figura os ângulos de fase agregados foram ajustados para manter como referência no plano polar as tensões harmônicas, facilitando assim, a determinação dos fluxos de energias harmônicas conforme convenção dos quatro quadrantes apresentado na Figura 1.1.

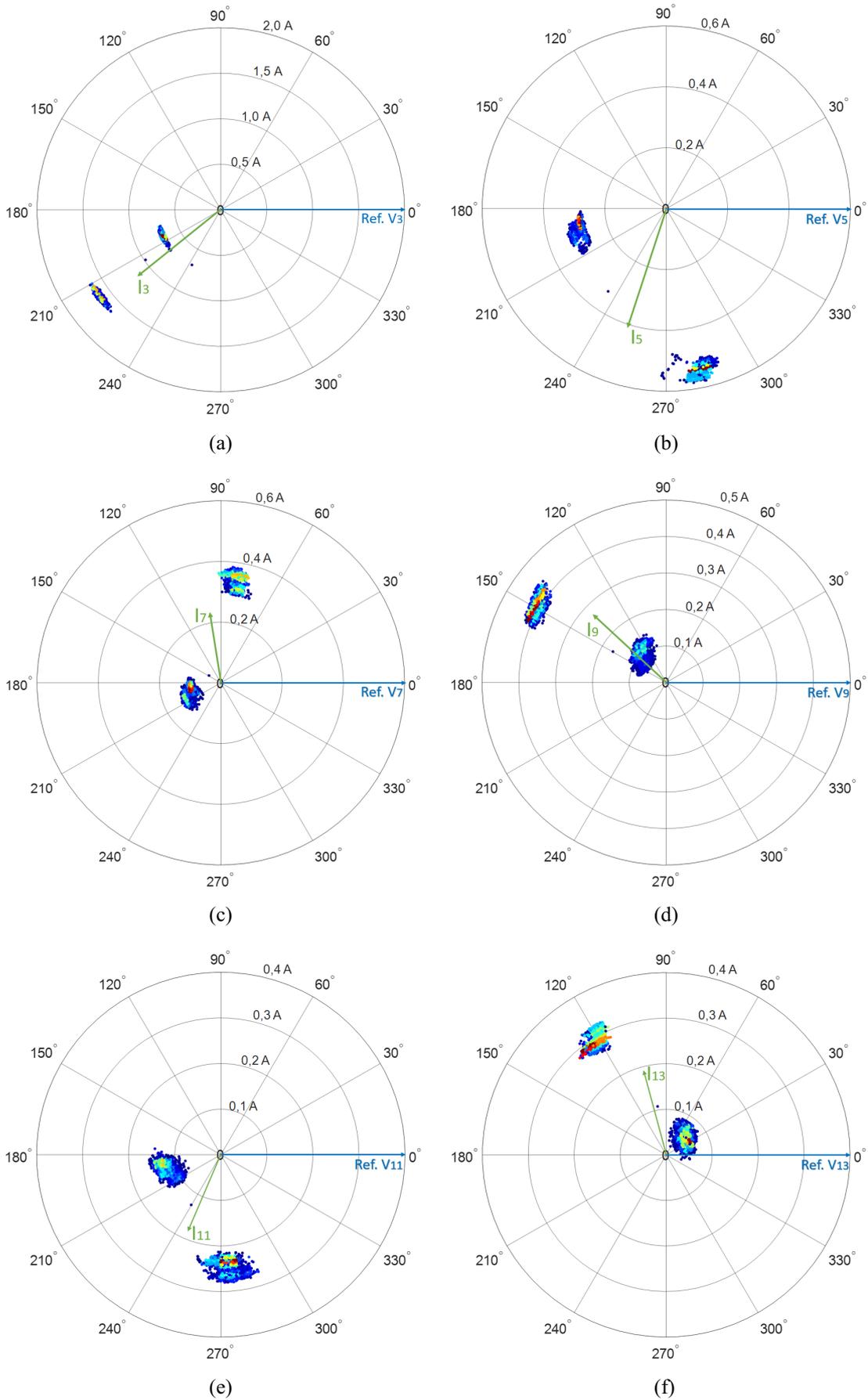


Figura 5.5 – Fasor da corrente harmônica adotando as amplitudes e os ângulos de fase agregados:
 (a) 3^a harmônica. (b) 5^a harmônica. (c) 7^a harmônica. (d) 9^a harmônica. (e) 11^a harmônica. (f) 13^a harmônica.

5.4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A METODOLOGIA PROPOSTA E OS MÉTODOS ENCONTRADOS NA LITERATURA

Finalmente, esta seção tem como objetivo apresentar um compilado dos resultados obtidos para os ângulos de fase agregados, adotando a medição de 10 minutos apresentada na Figura 4.1. Assim, apresenta-se aqui, uma análise comparativa entre os ângulos de fase agregados conforme os métodos 1 e 2, apresentados no Capítulo 4, em relação a metodologia proposta, apresentado na seção 5.3.

Na Tabela 5.3 tem-se os ângulos de fase das tensões e das correntes harmônicas agregados conforme a metodologia proposta, o Método 1 e o Método 2.

Tabela 5.3 – Ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente agregados para o intervalo de tempo igual a 10 minutos utilizando a metodologia proposta, o Método 1 e o Método 2.

Ordem harm.	Tensão harmônica (Metodologia proposta)	Tensão harmônica (Método 1)	Tensão harmônica (Método 2)	Corrente harmônica (Metodologia proposta)	Corrente harmônica (Método 1)	Corrente harmônica (Método 2)
3 ^a	41,44°	41,44°	35,27°	260,21°	256,18°	239,21°
5 ^a	245,41°	245,41°	248,59°	137,59°	128,17°	80,52°
7 ^a	62,92°	62,92°	70,72°	162,01°	163,80°	262,71°
9 ^a	245,64°	245,64°	245,94°	22,61°	31,87°	6,55°
11 ^a	44,26°	44,26°	43,06°	291,37°	285,58°	229,58°
13 ^a	133,11°	133,11°	129,92°	238,37°	244,11°	141,02°

Levando-se em conta apenas os resultados obtidos para as tensões harmônicas, os ângulos de fase obtidos pela metodologia proposta e pelo Método 1 foram semelhantes. Isto ocorre em razão das duas metodologias considerar como resultado, o argumento da soma fasorial de todos os fasores de tensão dentro do intervalo de 10 minutos. Por outro lado, o Método 2 considera os ângulos de fase procedentes da última janela de 12 ciclos, resultantes do cálculo da TDF dentro do intervalo de 10 minutos. Como as tensões harmônicas apresentam, na maioria das vezes, um comportamento mais estável, os ângulos de fase obtidos pelo Método 2 tendem a ser mais próximos daqueles obtidos pela metodologia proposta ou pelo Método 1. Nesta medição em específico, o maior desvio registrado foi verificado para a 7^a ordem harmônica, com uma diferença angular de 7,8°, enquanto que o menor foi para a 9^a ordem harmônica, com diferença angular de 0,3°.

As maiores divergências esperadas para os resultados obtidos através das 3 metodologias, podem ser verificadas para as correntes harmônicas, uma vez que, cada

metodologia possui um método característico de cálculo. Para o intervalo de tempo de 10 minutos da medição em questão, comparando a metodologia proposta com o Método 1, as maiores divergências encontradas foram para a 5ª e 7ª ordens harmônicas, com uma diferença angular de, respectivamente, 9,42° e 9,26°. Essas diferenças angulares podem a princípio parecer pequenas quando se analisa apenas os ângulos de fase, porém, podem ser mais significativas quanto se utilizam, por exemplo, no cálculo de potência, ou energia, harmônica ativa, visto que neste caso, utiliza-se a função cosseno.

Comparando agora, os resultados obtidos pela metodologia proposta e pelo Método 2, verifica-se maiores discrepâncias. As maiores divergências encontradas para esta medição foram para a 7ª e 13ª ordens harmônicas, com uma diferença angular de, respectivamente, 100,70° e 97,35°.

A forma mais apropriada para realizar uma análise crítica dos resultados obtidos através das 3 metodologias é através dos fluxos das energias harmônicas ativas durante a janela de agregação. Assim, são apresentados na Tabela 5.4 os resultados obtidos para as energias harmônicas ativas de referência, ou fluxo real no ponto de medição, juntamente com os calculados utilizando as amplitudes agregadas, segundo a norma IEC, e os ângulos de fase agregados conforme as 3 metodologias.

Tabela 5.4 – Energias harmônicas ativas de referência e calculadas utilizando os ângulos de fase agregados segundo a metodologia proposta, o Método 1 e o Método 2.

Ordem harmônica	Energia ativa (Referência) [mWh]	Energia ativa (Metodologia proposta) [mWh]	Energia ativa (Método 1) [mWh]	Energia ativa (Método 2) [mWh]
3ª	-95,78	-95,79	-100,95	-112,29
5ª	-19,55	-19,54	-29,23	-62,48
7ª	-2,40	-2,40	-2,86	-14,84
9ª	-9,39	-9,39	-10,68	-6,54
11ª	-3,58	-3,58	-4,42	-9,15
13ª	-3,97	-3,97	-5,40	14,80

Analisando os fluxos de energia harmônica ativa, nota-se a consequência das diferenças angulares obtidas para os ângulos de fase das componentes harmônicas de corrente através das 3 técnicas de agregação. Comparando os resultados obtidos utilizando os dados provenientes da metodologia proposta com os de referência, nota-se que os mesmos se apresentaram com grande semelhança. Por outro lado, tanto os resultados obtidos através do

Método 1 quanto pelo o Método 2, apresentaram discrepâncias quando comparados com o fluxo de energia harmônica ativa de referência.

Tomando como base o fluxo de energia harmônica ativa de referência, ou seja, o fluxo de energia real resultante no ponto de medição durante os 10 minutos de medição, tem-se na Tabela 5.5 as diferenças percentuais adotando as 3 técnicas de agregação. Enquanto que a metodologia proposta resultou em um fluxo de energia harmônica ativa praticamente idêntico ao real, adotando o Método 1 a maior diferença foi verificado para 5ª ordem harmônica, com 49,51%. Por sua vez, a maior divergência quando se considera o Método 2 foi verificado para 7ª ordem harmônica, com 518,33% de diferença.

Tabela 5.5 – Diferença percentual entre as energias harmônicas ativas de referência e calculadas utilizando os ângulos de fase agregados segundo a metodologia proposta, o Método 1 e o Método 2.

Ordem harmônica	Metodologia proposta	Método 1	Método 2
3ª	0,01%	5,40%	17,24%
5ª	-0,05%	49,51%	219,59%
7ª	0,00%	19,17%	518,33%
9ª	0,00%	13,74%	-30,35%
11ª	0,00%	23,46%	155,59%
13ª	0,00%	36,02%	-472,80%

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou o desenvolvimento da metodologia proposta para realizar as agregações dos ângulos de fase das componentes harmônicas para as tensões e para as correntes. Tal metodologia é uma ferramenta a ser implementada em medidores de parâmetros de Qualidade da Energia Elétrica, os quais atualmente apresentam resultados para medição apenas das grandezas referentes as amplitudes.

A metodologia apresentada consiste em duas diferentes formas de cálculos, sendo uma para as tensões e outra para as correntes. No caso dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão, a agregação é realizada utilizando o ângulo do fasor resultante da soma fasorial de todos os dados dentro do intervalo de tempo definido para agregação. Já a agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas de corrente, leva em consideração o fluxo de energia harmônica real no ponto de monitoração.

Para testar e avaliar a metodologia proposta, utilizou-se de uma medição de formas de onda instantâneas em uma instalação do tipo residencial. Utilizando o protocolo definido nas normas da IEC para agregação das amplitudes e a metodologia aqui proposta, calculou-se as amplitudes e os ângulos de fase das componentes harmônicas agregados para as tensões e para as correntes. Os resultados apresentados foram satisfatórios, visto que os fluxos de energia harmônica, calculados utilizando as grandezas agregadas, apresentaram resultados condizentes com os fluxos de energia harmônica real no ponto de monitoração.

Por fim, apresentou-se uma análise comparativa entre os resultados obtidos utilizando a metodologia aqui proposta, em relação aos provenientes do Método 1 e 2. Os resultados obtidos para os fluxos de energias harmônicas ativas, utilizando os dados procedentes da metodologia proposta, apresentaram-se em conformidade com os fluxos de energias harmônicas ativas reais. Por outro lado, verificou-se expressiva divergência quando se utiliza os métodos encontrados atualmente na literatura.

No capítulo seguinte, a metodologia aqui proposta será implementada em um medidor comercial, propiciando assim, realizar medições em campo para levantamento da caracterização harmônica de diversos tipos de instalações elétricas, tanto das amplitudes quanto dos ângulos de fase.

6. IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Após apresentar o desenvolvimento da metodologia para realização das agregações temporais dos ângulos de fase das componentes harmônicas, neste capítulo é apresentado um analisador de Qualidade da Energia Elétrica, no qual foi implementada a metodologia aqui proposta. Via parceria firmada com a empresa Sigmasys Engenharia, fabricante do Analisador de Qualidade da Energia Elétrica PQSYSWEB, modelo AIW, foi fornecida para o mesmo o desenvolvimento analítico referente à metodologia proposta, assim como o código desenvolvido em Matlab, visando sua implementação em um medidor comercial.

Inicialmente serão apresentadas as características técnicas e as principais grandezas registradas pelo medidor. Com intuito de avaliar a implementação da metodologia embarcada no equipamento, comprovando que o mesmo está apto a realizar medições em campo, submeteu-se o medidor a uma bateria de testes em laboratório, proporcionando assim, um ambiente controlado com o uso de uma fonte programável. Por fim, após a validação do equipamento, serão apresentados os resultados de uma minicampanha de medição realizada em algumas instalações elétricas reais. Estas medições tiveram como objetivo avaliar o comportamento dos ângulos de fase das componentes harmônicas e levantar as tipologias harmônicas de acordo com a classificação das instalações elétricas.

6.1 ANALISADOR DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA COM A METODOLOGIA IMPLEMENTADA

O analisador de Qualidade da Energia Elétrica PQSYSWEB modelo AIW, fabricado pela Sigmasys Engenharia, foi desenvolvido para atender os requisitos das normas nacionais e internacionais no quesito da Qualidade do Produto dentro do âmbito da Qualidade da Energia Elétrica. Na Figura 6.1 é apresentado o medidor juntamente com seus acessórios.

Seguindo as orientações da norma IEC 61.000-4-30, este medidor é classificado como Classe A. Com 5 canais de tensão (3 fases + neutro + terra) e 4 canais de corrente (3 fases + neutro), este medidor tem capacidade de medição, em tempo real, de aquisição de 1.024 amostras por ciclo em cada canal. Na Tabela 6.1 são apresentadas as principais características técnicas do medidor.



Figura 6.1 - Analisador de Qualidade da Energia Elétrica PQSYSWEB modelo AIW.

Tabela 6.1 – Características técnicas do medidor.

Elemento	Especificação
Alimentação AC	80 - 600 Vac
Medição de Tensão	20 - 400 Vac
Medição de Corrente	0,1 - 100 A 50 - 5000 A
Memória interna	8 GB
Frequência	50 Hz ou 60 Hz
Entradas	5 entradas de tensão 4 entradas de corrente
Amostragem	1024 amostras por ciclo
Conversor A/D	16 bits
Ligações	Monofásico (fase + neutro) Bifásico (fase + fase) Bifásico com neutro (fase + fase + neutro) Trifásico: Estrela com neutro - 3 elementos - 4 fios Trifásico: Estrela sem neutro - 3 elementos - 3 fios Trifásico: Triângulo - 3 elementos - 3 fios

A partir da medição dos sinais de tensão e de corrente são fornecidas ao usuário as grandezas referentes aos fenômenos da qualidade do produto em regime permanente e transitório. Os fenômenos em regime permanente, com tempo de agregação igual a 10 minutos, são: amplitudes de tensão e de corrente, frequência, fator de potência, distorção harmônica, desequilíbrio e flutuação de tensão. Enquanto que os fenômenos em regime não permanente dizem respeito aos eventos de tensão de curta duração, como, por exemplo, as variações de

tensão de curta duração. A medição dos indicadores de Qualidade da Energia Elétrica atende as recomendações das normas IEC 61.000-4-7, IEC 61.000-4-15 [23] e IEC 61.000-4-30, assim como do módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) [24]. Os erros máximos garantidos pelo fabricante, para cada parâmetro mensurável, estão apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Precisão das grandezas mensuráveis.

Grandeza	Precisão
Tensão	$\pm 0,1 \%$
Corrente	$\pm 0,1 \%$ do fundo de escala
Frequência	$\pm 0,01 \text{ Hz}$
Potências	$\pm 0,2 \%$
Fator de Potência	$\pm 0,2 \%$
Distorções Harmônicas	$\pm 5,0 \%$
Flutuação de tensão	$\pm 5,0 \%$
Desequilíbrio de tensão	$\pm 0,15\%$

Para os propósitos deste trabalho, o foco de utilização deste equipamento se resume exclusivamente às distorções harmônicas. Seguindo as normas anteriormente citadas, o medidor fornece as magnitudes das componentes harmônicas individuais até a 50ª ordem. Desde a concepção do equipamento, a mensuração das amplitudes harmônicas atende plenamente as orientações da IEC 61.000-4-30. Por intermédio da parceria firmada com o fabricante, e fornecendo a metodologia aqui apresentada, implementou-se no equipamento a técnica desenvolvida para agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente. Assim, como resultado da medição, além das amplitudes harmônicas, este equipamento fornece também os ângulos de fase agregados de 10 minutos para as componentes harmônicas de tensão e de corrente.

6.2 TESTES DE DESEMPENHO DO MEDIDOR EM LABORATÓRIO

Para avaliar a performance do medidor, principalmente do ponto de vista da metodologia implementada, procedeu-se, inicialmente, com uma série de testes em ambiente controlado. Para realização dos testes utilizou-se uma fonte programável (tensão e corrente) modelo CMC 256 *plus* fabricada pela *Omicron Electronics Corp*, que possui 4 canais de tensão (4 x 0 ... 300 V) e 6 canais de corrente (6 x 0 ... 12,5 A), ambos com precisão garantida de erro menor que 0,04%. A forma de conexão do canal de tensão e de corrente é que define o fundo de escala dessas grandezas, de acordo com a conexão dos 6 canais de corrente é possível o

fornecimento através da fonte de uma corrente de até 75 A na ligação monofásica. Em todos os testes realizados adotou-se a conexão trifásica da fonte programável, conforme apresentado na Figura 6.2.

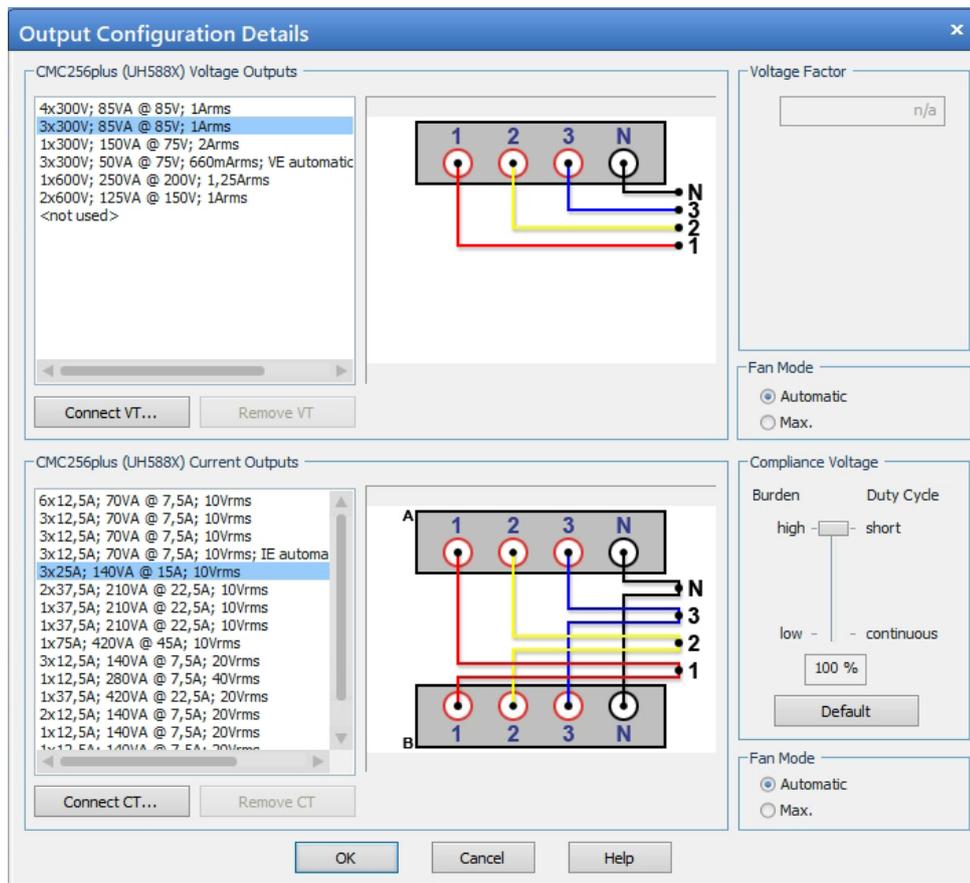


Figura 6.2 - Conexão dos canais de tensão e de corrente da fonte CMC 256 plus.

Utilizando esta fonte controlada, o usuário tem a liberdade de programar a forma de onda desejável para a tensão e para a corrente, ambas de forma independentes, possibilitando assim, simular diferentes fontes de tensões e diferentes tipologias de cargas não-lineares. As grandezas programáveis são as amplitudes e os ângulos de fase para cada ordem harmônica, podendo ainda, variar essas grandezas ao longo do período selecionado para o teste.

Na Figura 6.3 é apresentada a estrutura laboratorial utilizada para a realização dos testes, na qual o medidor sob avaliação é conectado à fonte programável através das ponteiras de tensão (medição direta) e dos transformadores de corrente (TC) do tipo *split* com corrente primária de até 100 A.



Figura 6.3 - Estrutura laboratorial de testes do medidor.

Para avaliar o desempenho do medidor no que diz respeito as agregações de 10 minutos dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente, procedeu-se com dois conjuntos de testes. No primeiro conjunto de testes, manteve-se as grandezas referentes as amplitudes e aos ângulos de fase constantes durante todo o intervalo de agregação. Para o segundo conjunto de testes considerou-se variações nas amplitudes e nos ângulos de fase dentro da janela de agregação. Ao todo, considerando-se os dois conjuntos de testes, foram realizados quatro testes específicos, a saber:

- Teste 1 – Amplitudes e ângulos de fase das componentes harmônicas constantes durante o intervalo de agregação de 10 minutos, sendo a tensão fundamental da fase A na referência (0°).
- Teste 2 – Amplitudes e ângulos de fase das componentes harmônicas constantes durante o intervalo de agregação de 10 minutos, sendo a tensão fundamental da fase A defasada de 30° em relação a referência.
- Teste 3 – Amplitudes e ângulos de fase das componentes harmônicas variando a cada minuto durante o intervalo de agregação de 10 minutos
- Teste 4 – Amplitudes e ângulos de fase das componentes harmônicas variando em dois estágios distintos durante o intervalo de agregação de 10 minutos, sendo um intervalo com duração igual a 7 minutos e um outro

com 3 minutos. No intervalo de 3 minutos a amplitude da corrente foi zerada.

6.2.1 Teste I: Grandezas fixas e V_A na referência

Neste primeiro teste considerou-se as tensões e as correntes harmônicas inteiras até a 15ª ordem. Durante os 10 minutos de medição, as amplitudes e os ângulos de fase foram mantidos constantes em um determinado valor. O objetivo deste teste é avaliar a exatidão do medidor, verificando se as agregações dos ângulos de fase estão sendo realizadas em conformidade com a metodologia apresentada.

Nas Tabela 6.3 e 6.4 são apresentados os desvios de medição para as tensões e para as correntes referentes ao Teste I, respectivamente. A coluna denominada como Padrão é referente às grandezas programadas na fonte de potência, enquanto que à coluna denominada Medidor estão apresentados os valores fornecidos pelo medidor em teste. Para avaliar o desempenho do medidor em cada ordem harmônica tem-se a coluna Desvio, a qual apresenta os desvios em porcentagem para as amplitudes medidas em relação ao valor Padrão (referência) e a diferença angular entre os ângulos de fase. Tanto para as tensões quanto para as correntes são apresentados os valores para as 3 fases, aqui nomeadas como A, B e C.

Levando-se em conta os resultados obtidos para as amplitudes das tensões harmônicas, os resultados se apresentaram com precisão dentro dos limites admissíveis para estas grandezas. Isto se deve ao fato de que as normas nacionais tratam apenas de testes de desempenho em analisadores de Qualidade da Energia Elétrica no tocante as tensões harmônicas. Considerando os ângulos de fase agregados das componentes harmônicas de tensão, verificou-se o maior desvio para a tensão harmônica de 14ª ordem, com uma diferença angular de $0,30^\circ$.

Analisando-se agora os resultados obtidos para as correntes harmônicas, as medições das amplitudes também apresentaram uma boa precisão, visto que o maior desvio verificado foi de 0,67% para a corrente harmônica de 10ª ordem. Assim como para o caso das tensões harmônicas, a maior diferença angular registrada para os ângulos de fase das componentes harmônicas de corrente foi para a 14ª ordem, com um desvio de $1,65^\circ$ na fase A. Um maior desvio para o caso das correntes em comparação com as tensões é esperado, uma vez que as medições das tensões são realizadas de forma direta, enquanto que as medições das correntes são de forma indireta, com uso de transformadores de corrente, os quais apresentam erros intrínsecos na transdução de ângulos de fase.

Tabela 6.3 – Teste I – Tensão: Amplitudes e ângulos de fase fixos ao longo de 10 minutos.

<i>h</i>	Grand.	FASE A			FASE B			FASE C		
		Padrão	Medidor	Desvio	Padrão	Medidor	Desvio	Padrão	Medidor	Desvio
1 ^a	<i>V</i> ₁	127,00 V	127,02 V	0,02%	127,00 V	127,01 V	0,01%	127,00 V	127,01 V	0,01%
	<i>φ</i> ₁	0,00°	0,00°	0,00°	-120,00°	-120,00°	0,00°	120,00°	120,00°	0,00°
2 ^a	<i>V</i> ₂	1,00%	1,00%	0,00%	1,00%	1,00%	0,00%	1,00%	1,00%	0,00%
	<i>φ</i> ₂	180,00°	180,03°	0,03°	300,00°	299,94°	-0,06°	60,00°	59,96°	-0,04°
3 ^a	<i>V</i> ₃	10,00%	10,00%	0,00%	10,00%	10,00%	0,00%	10,00%	10,00%	0,00%
	<i>φ</i> ₃	330,00°	330,00°	0,00°	330,00°	330,00°	0,00°	330,00°	329,99°	-0,01°
4 ^a	<i>V</i> ₄	0,80%	0,80%	0,00%	0,80%	0,80%	0,00%	0,80%	0,80%	0,00%
	<i>φ</i> ₄	250,00°	250,06°	0,06°	130,00°	130,11°	0,11°	10,00°	10,03°	0,03°
5 ^a	<i>V</i> ₅	8,00%	8,00%	0,00%	8,00%	8,00%	0,00%	8,00%	8,00%	0,00%
	<i>φ</i> ₅	270,00°	269,99°	-0,01°	30,00°	29,97°	-0,03°	150,00°	149,98°	-0,02°
6 ^a	<i>V</i> ₆	0,70%	0,70%	0,00%	0,70%	0,70%	0,00%	0,70%	0,70%	0,00%
	<i>φ</i> ₆	30,00°	30,01°	0,01°	30,00°	30,05°	0,05°	30,00°	30,10°	0,10°
7 ^a	<i>V</i> ₇	7,00%	7,00%	0,00%	7,00%	7,00%	0,00%	7,00%	7,00%	0,00%
	<i>φ</i> ₇	180,00°	179,99°	-0,01°	60,00°	59,98°	-0,02°	300,00°	299,99°	-0,01°
8 ^a	<i>V</i> ₈	0,60%	0,60%	0,00%	0,60%	0,60%	0,00%	0,60%	0,60%	0,00%
	<i>φ</i> ₈	90,00°	89,90°	-0,10°	210,00°	209,79°	-0,21°	330,00°	329,89°	-0,11°
9 ^a	<i>V</i> ₉	6,00%	6,00%	0,00%	6,00%	6,00%	0,00%	6,00%	6,00%	0,00%
	<i>φ</i> ₉	130,00°	130,01°	0,01°	130,00°	130,01°	0,01°	130,00°	130,00°	0,00°
10 ^a	<i>V</i> ₁₀	0,50%	0,50%	0,00%	0,50%	0,50%	0,00%	0,50%	0,50%	0,00%
	<i>φ</i> ₁₀	0,00°	0,15°	0,15°	240,00°	240,12°	0,12°	120,00°	120,04°	0,04°
11 ^a	<i>V</i> ₁₁	5,00%	5,00%	0,00%	5,00%	5,00%	0,00%	5,00%	5,00%	0,00%
	<i>φ</i> ₁₁	50,00°	50,01°	0,01°	170,00°	169,98°	-0,02°	290,00°	289,99°	-0,01°
12 ^a	<i>V</i> ₁₂	0,40%	0,40%	0,00%	0,40%	0,40%	0,00%	0,40%	0,40%	0,00%
	<i>φ</i> ₁₂	120,00°	119,88°	-0,12°	120,00°	119,91°	-0,09°	120,00°	120,00°	0,00°
13 ^a	<i>V</i> ₁₃	4,00%	4,00%	0,00%	4,00%	4,00%	0,00%	4,00%	4,00%	0,00%
	<i>φ</i> ₁₃	0,00°	0,00°	0,00°	240,00°	239,97°	-0,03°	120,00°	119,97°	-0,03°
14 ^a	<i>V</i> ₁₄	0,30%	0,30%	0,00%	0,30%	0,30%	0,00%	0,30%	0,30%	0,00%
	<i>φ</i> ₁₄	240,00°	239,80°	-0,20°	0,00°	-0,23°	-0,23°	120,00°	119,70°	-0,30°
15 ^a	<i>V</i> ₁₅	3,00%	3,00%	0,00%	3,00%	3,00%	0,00%	3,00%	3,00%	0,00%
	<i>φ</i> ₁₅	300,00°	300,01°	0,01°	300,00°	300,01°	0,01°	300,00°	300,00°	0,00°

Tabela 6.4 – Teste I – Corrente: Amplitudes e ângulos de fase fixos ao longo de 10 minutos.

<i>h</i>	Grand.	FASE A			FASE B			FASE C		
		Padrão	Medidor	Desvio	Padrão	Medidor	Desvio	Padrão	Medidor	Desvio
1 ^a	<i>I</i> ₁	5,00 A	5,00 A	0,00%	5,00 A	5,00 A	0,00%	5,00 A	5,00 A	0,00%
	<i>φ</i> ₁	330,00°	330,07°	0,07°	-150,00°	-149,93°	0,07°	90,00°	90,04°	0,04°
2 ^a	<i>I</i> ₂	2,00%	2,00%	0,00%	2,00%	1,99%	-0,50%	2,00%	1,99%	-0,50%
	<i>φ</i> ₂	30,00°	30,28°	0,28°	150,00°	150,30°	0,30°	270,00°	270,06°	0,06°
3 ^a	<i>I</i> ₃	20,00%	19,98%	-0,10%	20,00%	20,02%	0,10%	20,00%	20,01%	0,05%
	<i>φ</i> ₃	160,00°	160,32°	0,32°	160,00°	160,47°	0,47°	160,00°	159,96°	-0,04°
4 ^a	<i>I</i> ₄	3,00%	3,00%	0,00%	3,00%	3,00%	0,00%	3,00%	3,00%	0,00%
	<i>φ</i> ₄	250,00°	250,43°	0,43°	130,00°	131,14°	1,14°	10,00°	9,42°	-0,58°
5 ^a	<i>I</i> ₅	15,00%	15,01%	0,07%	15,00%	15,01%	0,07%	15,00%	15,02%	0,13%
	<i>φ</i> ₅	300,00°	300,39°	0,39°	60,00°	60,58°	0,58°	180,00°	179,86°	-0,14°
6 ^a	<i>I</i> ₆	1,50%	1,50%	0,00%	1,50%	1,50%	0,00%	1,50%	1,50%	0,00%
	<i>φ</i> ₆	230,00°	230,53°	0,53°	230,00°	230,96°	0,96°	230,00°	229,89°	-0,11°
7 ^a	<i>I</i> ₇	12,00%	12,00%	0,00%	12,00%	12,01%	0,08%	12,00%	12,03%	0,25%
	<i>φ</i> ₇	0,00°	0,56°	0,56°	240,00°	240,79°	0,79°	120,00°	119,87°	-0,13°
8 ^a	<i>I</i> ₈	1,00%	1,00%	0,00%	1,00%	1,00%	0,00%	1,00%	1,00%	0,00%
	<i>φ</i> ₈	330,00°	330,33°	0,33°	90,00°	90,86°	0,86°	210,00°	209,80°	-0,20°
9 ^a	<i>I</i> ₉	10,00%	10,05%	0,50%	10,00%	10,05%	0,50%	10,00%	10,05%	0,50%
	<i>φ</i> ₉	45,00°	45,67°	0,67°	45,00°	46,17°	1,17°	45,00°	44,61°	-0,39°
10 ^a	<i>I</i> ₁₀	1,50%	1,49%	-0,67%	1,50%	1,50%	0,00%	1,50%	1,50%	0,00%
	<i>φ</i> ₁₀	100,00°	100,76°	0,76°	-20,00°	-18,81°	1,19°	-140,00°	-139,99°	0,01°
11 ^a	<i>I</i> ₁₁	8,00%	8,00%	0,00%	8,00%	8,00%	0,00%	8,00%	8,00%	0,00%
	<i>φ</i> ₁₁	150,00°	150,82°	0,82°	270,00°	271,22°	1,22°	30,00°	29,65°	-0,35°
12 ^a	<i>I</i> ₁₂	1,00%	1,00%	0,00%	1,00%	1,00%	0,00%	1,00%	1,00%	0,00%
	<i>φ</i> ₁₂	110,00°	110,51°	0,51°	110,00°	111,27°	1,27°	110,00°	109,15°	-0,85°
13 ^a	<i>I</i> ₁₃	6,00%	6,01%	0,17%	6,00%	6,00%	0,00%	6,00%	6,00%	0,00%
	<i>φ</i> ₁₃	335,00°	335,83°	0,83°	215,00°	216,42°	1,42°	95,00°	94,67°	-0,33°
14 ^a	<i>I</i> ₁₄	1,50%	1,50%	0,00%	1,50%	1,50%	0,00%	1,50%	1,50%	0,00%
	<i>φ</i> ₁₄	240,00°	241,65°	1,65°	0,00°	1,49°	1,49°	120,00°	118,47°	-1,53°
15 ^a	<i>I</i> ₁₅	5,00%	4,97%	-0,60%	5,00%	4,98%	-0,40%	5,00%	4,99%	-0,20%
	<i>φ</i> ₁₅	330,00°	330,76°	0,76°	330,00°	330,29°	0,29°	330,00°	329,08°	-0,92°

6.2.2 Teste II: Grandezas fixas e V_A deslocada em 30°

Este segundo teste difere do anterior apenas em relação aos ângulos de fase das tensões e das correntes na frequência fundamental. Neste caso, considerou-se um deslocamento angular de 30° nos ângulos de fase das tensões e das correntes na frequência fundamental. O objetivo deste teste é verificar se a definição da referência dos ângulos de fase está sendo realizada em conformidade com a metodologia proposta na seção 5.2.1. Conforme definido no Capítulo 5,

todos os ângulos de fase fornecidos pelo medidor devem ter como referência (0°) a tensão fundamental da fase A.

Os dados referentes às tensões e as correntes implementadas na fonte programável para realização do Teste II estão apresentados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Dados referentes as tensões e as correntes implementadas na fonte programável para o Teste II, considerando o ângulo de fase da tensão fundamental da fase A deslocado em 30° da referência.

		FASE A	FASE B	FASE C			FASE A	FASE B	FASE C
<i>h</i>	Grandeza	Padrão	Padrão	Padrão	<i>h</i>	Grandeza	Padrão	Padrão	Padrão
1 ^a	V_1	127,00 V	127,00 V	127,00 V	1 ^a	I_1	5,00 A	5,00 A	5,00 A
	ϕ_1	30,00°	-90,00°	150,00°		ϕ_1	0,00°	-120,00°	120,00°
2 ^a	V_2	1,00%	1,00%	1,00%	2 ^a	I_2	2,00%	2,00%	2,00%
	ϕ_2	180,00°	300,00°	60,00°		ϕ_2	30,00°	150,00°	270,00°
3 ^a	V_3	10,00%	10,00%	10,00%	3 ^a	I_3	20,00%	20,00%	20,00%
	ϕ_3	330,00°	330,00°	330,00°		ϕ_3	160,00°	160,00°	160,00°
4 ^a	V_4	0,80%	0,80%	0,80%	4 ^a	I_4	3,00%	3,00%	3,00%
	ϕ_4	250,00°	130,00°	10,00°		ϕ_4	250,00°	130,00°	10,00°
5 ^a	V_5	8,00%	8,00%	8,00%	5 ^a	I_5	15,00%	15,00%	15,00%
	ϕ_5	270,00°	30,00°	150,00°		ϕ_5	300,00°	60,00°	180,00°
6 ^a	V_6	0,70%	0,70%	0,70%	6 ^a	I_6	1,50%	1,50%	1,50%
	ϕ_6	30,00°	30,00°	30,00°		ϕ_6	230,00°	230,00°	230,00°
7 ^a	V_7	7,00%	7,00%	7,00%	7 ^a	I_7	12,00%	12,00%	12,00%
	ϕ_7	180,00°	60,00°	300,00°		ϕ_7	0,00°	240,00°	120,00°
8 ^a	V_8	0,60%	0,60%	0,60%	8 ^a	I_8	1,00%	1,00%	1,00%
	ϕ_8	90,00°	210,00°	330,00°		ϕ_8	330,00°	90,00°	210,00°
9 ^a	V_9	6,00%	6,00%	6,00%	9 ^a	I_9	10,00%	10,00%	10,00%
	ϕ_9	130,00°	130,00°	130,00°		ϕ_9	45,00°	45,00°	45,00°
10 ^a	V_{10}	0,50%	0,50%	0,50%	10 ^a	I_{10}	1,50%	1,50%	1,50%
	ϕ_{10}	0,00°	240,00°	120,00°		ϕ_{10}	100,00°	-20,00°	-140,00°
11 ^a	V_{11}	5,00%	5,00%	5,00%	11 ^a	I_{11}	8,00%	8,00%	8,00%
	ϕ_{11}	50,00°	170,00°	290,00°		ϕ_{11}	150,00°	270,00°	30,00°
12 ^a	V_{12}	0,40%	0,40%	0,40%	12 ^a	I_{12}	1,00%	1,00%	1,00%
	ϕ_{12}	120,00°	120,00°	120,00°		ϕ_{12}	110,00°	110,00°	110,00°
13 ^a	V_{13}	4,00%	4,00%	4,00%	13 ^a	I_{13}	6,00%	6,00%	6,00%
	ϕ_{13}	0,00°	240,00°	120,00°		ϕ_{13}	335,00°	215,00°	95,00°
14 ^a	V_{14}	0,30%	0,30%	0,30%	14 ^a	I_{14}	1,50%	1,50%	1,50%
	ϕ_{14}	240,00°	0,00°	120,00°		ϕ_{14}	240,00°	0,00°	120,00°
15 ^a	V_{15}	3,00%	3,00%	3,00%	15 ^a	I_{15}	5,00%	5,00%	5,00%
	ϕ_{15}	300,00°	300,00°	300,00°		ϕ_{15}	330,00°	330,00°	330,00°

Os resultados obtidos no Teste II estão apresentados nas Tabelas 6.6 e 6.7, respectivamente para as tensões e para as correntes. Para o caso das amplitudes das tensões

harmônicas, os maiores desvios verificados foram de 2,5% para a 12ª ordem nas fases A e B. Considerando as amplitudes das correntes harmônicas, os maiores desvios foram verificados para as correntes das fases B e C da 8ª ordem harmônica, com desvios registrados igual a 1,00%.

Tabela 6.6 – Teste II – Tensão: Amplitudes e ângulos de fase fixos ao longo de 10 minutos.

<i>h</i>	Grandeza	FASE A			FASE B			FASE C		
		Padrão	Medidor	Desvio	Padrão	Medidor	Desvio	Padrão	Medidor	Desvio
1ª	V_1	127,00 V	127,01 V	0,01%	127,00 V	127,00 V	0,00%	127,00 V	127,00 V	0,00%
	ϕ_1	0,00°	0,00°	0,00°	-120,00°	-120,00°	0,00°	120,00°	120,00°	0,00°
2ª	V_2	1,00%	0,99%	-1,00%	1,00%	0,99%	-1,00%	1,00%	1,00%	0,00%
	ϕ_2	120,00°	120,01°	0,01°	-120,00°	-119,89°	0,11°	0,00°	-0,06°	-0,06°
3ª	V_3	10,00%	10,00%	0,00%	10,00%	10,00%	0,00%	10,00%	10,00%	0,00%
	ϕ_3	-120,00°	-120,03°	-0,03°	-120,00°	-120,03°	-0,03°	-120,00°	-120,03°	-0,03°
4ª	V_4	0,80%	0,79%	-1,25%	0,80%	0,79%	-1,25%	0,80%	0,79%	-1,25%
	ϕ_4	130,00°	130,15°	0,15°	10,00°	10,16°	0,16°	-110,00°	-109,95°	0,05°
5ª	V_5	8,00%	8,00%	0,00%	8,00%	8,00%	0,00%	8,00%	8,00%	0,00%
	ϕ_5	120,00°	120,00°	0,00°	-120,00°	-120,00°	0,00°	0,00°	0,02°	0,02°
6ª	V_6	0,70%	0,70%	0,00%	0,70%	0,70%	0,00%	0,70%	0,70%	0,00%
	ϕ_6	-150,00°	-150,18°	-0,18°	-150,00°	-150,17°	-0,17°	-150,00°	-150,16°	-0,16°
7ª	V_7	7,00%	7,00%	0,00%	7,00%	7,00%	0,00%	7,00%	7,00%	0,00%
	ϕ_7	-30,00°	-30,00°	0,00°	-150,00°	-150,00°	0,00°	90,00°	90,00°	0,00°
8ª	V_8	0,60%	0,60%	0,00%	0,60%	0,59%	-1,67%	0,60%	0,60%	0,00%
	ϕ_8	-150,00°	-150,09°	-0,09°	-30,00°	-30,27°	-0,27°	90,00°	89,98°	-0,02°
9ª	V_9	6,00%	6,00%	0,00%	6,00%	6,00%	0,00%	6,00%	6,00%	0,00%
	ϕ_9	-140,00°	-140,03°	-0,03°	-140,00°	-140,00°	0,00°	-140,00°	-140,00°	0,00°
10ª	V_{10}	0,50%	0,50%	0,00%	0,50%	0,50%	0,00%	0,50%	0,50%	0,00%
	ϕ_{10}	60,00°	60,03°	0,03°	-60,00°	-60,03°	-0,03°	180,00°	179,98°	-0,02°
11ª	V_{11}	5,00%	5,00%	0,00%	5,00%	5,00%	0,00%	5,00%	5,00%	0,00%
	ϕ_{11}	80,00°	80,02°	0,02°	-160,00°	-159,99°	0,01°	-40,00°	-39,99°	0,01°
12ª	V_{12}	0,40%	0,39%	-2,50%	0,40%	0,39%	-2,50%	0,40%	0,40%	0,00%
	ϕ_{12}	120,00°	120,34°	0,34°	120,00°	120,32°	0,32°	120,00°	120,13°	0,13°
13ª	V_{13}	4,00%	4,00%	0,00%	4,00%	4,00%	0,00%	4,00%	3,99%	-0,25%
	ϕ_{13}	-30,00°	-30,01°	-0,01°	-150,00°	-150,01°	-0,01°	90,00°	89,95°	-0,05°
14ª	V_{14}	0,30%	0,30%	0,00%	0,30%	0,30%	0,00%	0,30%	0,30%	0,00%
	ϕ_{14}	-180,00°	-179,60°	0,40°	-60,00°	-59,96°	0,04°	60,00°	60,12°	0,12°
15ª	V_{15}	3,00%	3,00%	0,00%	3,00%	3,00%	0,00%	3,00%	3,00%	0,00%
	ϕ_{15}	-150,00°	-149,95°	0,05°	-150,00°	-150,00°	0,00°	-150,00°	-149,98°	0,02°

Tabela 6.7 – Teste II – Corrente: Amplitudes e ângulos de fase fixos ao longo de 10 minutos.

<i>h</i>	Grandeza	FASE A			FASE B			FASE C		
		Padrão	Medidor	Desvio	Padrão	Medidor	Desvio	Padrão	Medidor	Desvio
1 ^a	<i>I</i> ₁	5,00 A	5,00 A	0,00%	5,00 A	5,00 A	0,00%	5,00 A	5,00 A	0,00%
	<i>φ</i> ₁	-30,00°	-29,87°	0,13°	-150,00°	-149,90°	0,10°	90,00°	90,09°	0,09°
2 ^a	<i>I</i> ₂	2,00%	2,00%	0,00%	2,00%	1,99%	-0,50%	2,00%	1,99%	-0,50%
	<i>φ</i> ₂	-30,00°	-29,78°	0,22°	90,00°	90,39°	0,39°	-150,00°	-149,95°	0,05°
3 ^a	<i>I</i> ₃	20,00%	19,99%	-0,05%	20,00%	20,03%	0,15%	20,00%	20,01%	0,05%
	<i>φ</i> ₃	70,00°	70,52°	0,52°	70,00°	70,59°	0,59°	70,00°	70,13°	0,13°
4 ^a	<i>I</i> ₄	3,00%	2,99%	-0,33%	3,00%	3,00%	0,00%	3,00%	3,00%	0,00%
	<i>φ</i> ₄	130,00°	130,91°	0,91°	10,00°	10,74°	0,74°	-110,00°	-109,59°	0,41°
5 ^a	<i>I</i> ₅	15,00%	15,00%	0,00%	15,00%	15,01%	0,07%	15,00%	15,02%	0,13%
	<i>φ</i> ₅	150,00°	150,67°	0,67°	-90,00°	-89,27°	0,73°	30,00°	30,11°	0,11°
6 ^a	<i>I</i> ₆	1,50%	1,50%	0,00%	1,50%	1,50%	0,00%	1,50%	1,50%	0,00%
	<i>φ</i> ₆	50,00°	50,94°	0,94°	50,00°	51,14°	1,14°	50,00°	50,14°	0,14°
7 ^a	<i>I</i> ₇	12,00%	11,99%	-0,08%	12,00%	12,01%	0,08%	12,00%	12,02%	0,17%
	<i>φ</i> ₇	150,00°	151,01°	1,01°	30,00°	31,06°	1,06°	-90,00°	-89,72°	0,28°
8 ^a	<i>I</i> ₈	1,00%	1,00%	0,00%	1,00%	0,99%	-1,00%	1,00%	0,99%	-1,00%
	<i>φ</i> ₈	90,00°	91,05°	1,05°	-150,00°	-149,14°	0,86°	-30,00°	-29,67°	0,33°
9 ^a	<i>I</i> ₉	10,00%	10,04%	0,40%	10,00%	10,04%	0,40%	10,00%	10,05%	0,50%
	<i>φ</i> ₉	135,00°	136,24°	1,24°	135,00°	136,51°	1,51°	135,00°	135,08°	0,08°
10 ^a	<i>I</i> ₁₀	1,50%	1,49%	-0,67%	1,50%	1,50%	0,00%	1,50%	1,50%	0,00%
	<i>φ</i> ₁₀	160,00°	161,35°	1,35°	40,00°	41,34°	1,34°	-80,00°	-79,60°	0,40°
11 ^a	<i>I</i> ₁₁	8,00%	8,00%	0,00%	8,00%	8,00%	0,00%	8,00%	8,00%	0,00%
	<i>φ</i> ₁₁	-180,00°	-178,45°	1,55°	-60,00°	-58,37°	1,63°	60,00°	60,26°	0,26°
12 ^a	<i>I</i> ₁₂	1,00%	1,00%	0,00%	1,00%	1,00%	0,00%	1,00%	1,00%	0,00%
	<i>φ</i> ₁₂	110,00°	111,07°	1,07°	110,00°	111,62°	1,62°	110,00°	109,43°	-0,57°
13 ^a	<i>I</i> ₁₃	6,00%	6,01%	0,17%	6,00%	6,00%	0,00%	6,00%	5,99%	-0,17%
	<i>φ</i> ₁₃	-55,00°	-53,36°	1,64°	-175,00°	-173,06°	1,94°	65,00°	65,34°	0,34°
14 ^a	<i>I</i> ₁₄	1,50%	1,50%	0,00%	1,50%	1,50%	0,00%	1,50%	1,50%	0,00%
	<i>φ</i> ₁₄	-180,00°	-177,63°	2,37°	-60,00°	-57,64°	2,36°	60,00°	61,75°	1,75°
15 ^a	<i>I</i> ₁₅	5,00%	4,97%	-0,60%	5,00%	4,98%	-0,40%	5,00%	4,98%	-0,40%
	<i>φ</i> ₁₅	-120,00°	-118,25°	1,75°	-120,00°	-119,20°	0,80°	-120,00°	-120,12°	-0,12°

Considerando-se a análise dos ângulos de fase, pode-se verificar que a definição da referência está sendo realizada em conformidade com a metodologia proposta. Apesar do sinal de tensão fornecido pela fonte programável apresentar-se com um ângulo de fase, na frequência fundamental da fase A, deslocado em 30°, o medidor forneceu como resultado um ângulo de fase na referência, ou seja, o ângulo de fase da tensão fundamental igual a 0°. Desta forma, todos os ângulos de fase, tanto para as tensões quanto para as correntes harmônicas, estão

referenciados a tensão fundamental da fase A em 0° . Neste caso, para analisar os desvios de medição dos ângulos de fase, é necessário corrigir os valores de referência (Padrão) apresentados na Tabela 6.5, considerando o deslocamento de 30° na frequência fundamental. Para fazer esta correção deve-se atentar as diferentes escalas de tempo para os ângulos de fase em cada ordem harmônica. Os ajustes nos ângulos de fase das componentes harmônicas foram realizados conforme as equações (5.4) e (5.5).

O maior desvio registrado para os ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão foi de $0,40^\circ$ na fase A para a 14ª ordem harmônica. Analisando-se os ângulos de fase das correntes harmônicas, mais uma vez, foram verificados os maiores desvios quando comparados com os ângulos de fase das tensões harmônicas para o mesmo teste. Os maiores desvios verificados para os ângulos de fase das correntes harmônicas, também foram verificados para a 14ª ordem harmônica, sendo $2,37^\circ$ e $2,36^\circ$ para as fases A e B, respectivamente.

6.2.3 Teste III: Grandezas alternando a cada intervalo de 1 minuto

Uma vez verificado o desempenho do medidor para sinais constantes, o terceiro teste tem como objetivo avaliar a agregação dos ângulos de fase para sinais variáveis dentro da janela de agregação de 10 minutos. Para isso, o Teste III foi desenvolvido com variações nas amplitudes e nos ângulos de fase das tensões e das correntes harmônicas a cada minuto. Para esse propósito, foram utilizados dois estágios com amplitudes e ângulos de fase distintos, aqui denominados Ciclo A e Ciclo B, sendo que a cada minuto a fonte fornece os sinais referentes a cada Ciclo. Na Figura 6.4 é apresentada a variação dos dois ciclos durante a realização do Teste III, sendo que ao final, a fonte disponibilizará 5 vezes os sinais referentes ao Ciclo A e 5 vezes os sinais referentes ao Ciclo B, totalizando 10 minutos de medição.

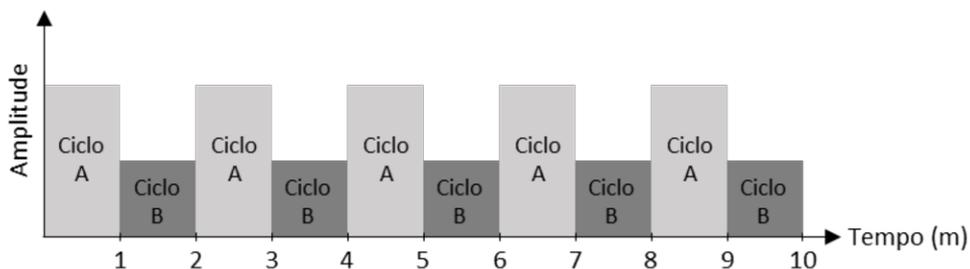


Figura 6.4 – Demonstração da variação temporal dos dois ciclos do Teste III.

As amplitudes e os ângulos de fase considerados na fonte programável, tanto para o Ciclo A quanto para o Ciclo B, estão apresentados nas Tabelas 6.8 e 6.9, respectivamente para

as tensões e para as correntes. Neste teste, considerou-se as grandezas na frequência fundamental iguais nos dois ciclos, alterando-se apenas as grandezas das ordens harmônicas. Utilizou-se, ainda, de um número reduzido de ordens harmônicas. Neste caso, apenas a 3^a, 5^a e 7^a ordens harmônicas, representando componentes de sequências zero, negativa e positiva.

Tabela 6.8 – Teste III – Tensão: Amplitudes e ângulos de fase dos dois ciclos variáveis ao longo de 10 minutos.

<i>h</i>	Grandeza	FASE A		FASE B		FASE C	
		Ciclo A	Ciclo B	Ciclo A	Ciclo B	Ciclo A	Ciclo B
1 ^a	V_1	127,00 V					
	ϕ_1	0,00°	0,00°	-120,00°	-120,00°	120,00°	120,00°
3 ^a	V_3	15,00%	5,00%	15,00%	5,00%	15,00%	5,00%
	ϕ_3	90,00°	110,00°	90,00°	110,00°	90,00°	110,00°
5 ^a	V_5	10,00%	2,00%	10,00%	2,00%	10,00%	2,00%
	ϕ_5	180,00°	150,00°	300,00°	270,00°	60,00°	30,00°
7 ^a	V_7	8,00%	0,50%	8,00%	0,50%	8,00%	0,50%
	ϕ_7	30,00°	330,00°	270,00°	210,00°	150,00°	90,00°

Tabela 6.9 – Teste III – Corrente: Amplitudes e ângulos de fase dos dois ciclos variáveis ao longo de 10 minutos.

<i>h</i>	Grandeza	FASE A		FASE B		FASE C	
		Ciclo A	Ciclo B	Ciclo A	Ciclo B	Ciclo A	Ciclo B
1 ^a	I_1	5,00 A					
	ϕ_1	-30,00°	-30,00°	210,00°	210,00°	90,00°	90,00°
3 ^a	I_3	40,00%	30,00%	40,00%	30,00%	40,00%	30,00%
	ϕ_3	240,00°	190,00°	240,00°	190,00°	240,00°	190,00°
5 ^a	I_5	25,00%	19,00%	25,00%	19,00%	25,00%	19,00%
	ϕ_5	20,00°	140,00°	140,00°	260,00°	260,00°	20,00°
7 ^a	I_7	20,00%	15,00%	20,00%	15,00%	20,00%	15,00%
	ϕ_7	300,00°	150,00°	180,00°	30,00°	60,00°	270,00°

Por se tratar de um teste com grandezas variáveis, os valores ditos como Padrão para este tipo de teste foram obtidos de forma teórica, ou seja, os mesmos foram calculados conforme a metodologia da IEC para o caso das amplitudes e de acordo com a metodologia aqui proposta para os ângulos de fase, utilizando os dois ciclos de grandezas apresentados anteriormente. Os resultados obtidos neste teste estão apresentados nas Tabelas 6.10 e 6.11, respectivamente para as tensões e para as correntes harmônicas. Analisando-se as amplitudes das tensões harmônicas, nota-se que os desvios registrados estão dentro da faixa de 0,53% a 0,71%, enquanto que para os ângulos de fase as maiores diferenças angulares verificadas foram de 0,07° nas fases A e B para a 3^a ordem harmônica.

Tabela 6.10 – Teste III – Tensão: Amplitudes e ângulos de fase resultantes do período de 10 minutos.

<i>h</i>	Grandeza	FASE A			FASE B			FASE C		
		Padrão	Medidor	Desvio	Padrão	Medidor	Desvio	Padrão	Medidor	Desvio
1 ^a	V_1	127,00 V	127,02 V	0,02%	127,00 V	127,01 V	0,01%	127,00 V	127,02 V	0,02%
	ϕ_1	0,00°	0,00°	0,00°	-120,00°	-120,00°	0,00°	120,00°	120,00°	0,00°
3 ^a	V_3	11,18%	11,12%	-0,54%	11,18%	11,12%	-0,54%	11,18%	11,12%	-0,54%
	ϕ_3	94,96°	95,03°	0,07°	94,96°	95,03°	0,07°	94,96°	95,02°	0,06°
5 ^a	V_5	7,21%	7,17%	-0,55%	7,21%	7,17%	-0,55%	7,21%	7,17%	-0,55%
	ϕ_5	175,13°	175,10°	-0,03°	295,13°	295,08°	-0,05°	55,13°	55,09°	-0,04°
7 ^a	V_7	5,67%	5,64%	-0,53%	5,67%	5,63%	-0,71%	5,67%	5,63%	-0,71%
	ϕ_7	27,00°	26,96°	-0,04°	-93,00°	-93,05°	-0,05°	147,00°	146,95°	-0,05°

Os maiores desvios registrados para as amplitudes das correntes harmônicas também foram verificados para a 3^a ordem harmônica, sendo 0,57% para a fase A, 0,40% para fase B e 0,42% para a fase C. No caso dos desvios verificados para os ângulos de fase das componentes harmônicas de corrente, a maior diferença angular registrada foi de 0,53°, verificada na fase B da 7^a ordem harmônica.

Tabela 6.11 – Teste III – Corrente: Amplitudes e ângulos de fase resultantes do período de 10 minutos.

<i>h</i>	Grandeza	FASE A			FASE B			FASE C		
		Padrão	Medidor	Desvio	Padrão	Medidor	Desvio	Padrão	Medidor	Desvio
1 ^a	I_1	5,00 A	5,00 A	0,00%	5,00 A	5,00 A	0,00%	5,00 A	5,00 A	0,00%
	ϕ_1	-30,00°	-29,93°	0,07°	210,00°	210,06°	0,06°	90,00°	90,03°	0,03°
3 ^a	I_3	35,36%	35,16%	-0,57%	35,36%	35,22%	-0,40%	35,36%	35,21%	-0,42%
	ϕ_3	223,59°	223,67°	0,08°	223,59°	223,78°	0,19°	223,59°	223,42°	-0,17°
5 ^a	I_5	22,20%	22,14%	-0,27%	22,20%	22,13%	-0,32%	22,20%	22,13%	-0,32%
	ϕ_5	47,05°	47,35°	0,30°	167,05°	167,41°	0,36°	-72,95°	-72,83°	0,12°
7 ^a	I_7	17,68%	17,62%	-0,34%	17,68%	17,63%	-0,28%	17,68%	17,64%	-0,23%
	ϕ_7	-65,15°	-64,85°	0,30°	174,85°	175,38°	0,53°	54,85°	54,61°	-0,24°

6.2.4 Teste IV: Dois intervalos de grandezas, sendo 1 mantido sem corrente

O último teste em ambiente controlado tem como objetivo representar uma mudança de carga dentro do intervalo de 10 minutos de medição. Para isso, considerou-se os mesmos ciclos das tensões do teste anterior, Tabela 6.9, enquanto que para o caso das correntes, repetiu-se o mesmo Ciclo A da Tabela 6.10 e para o Ciclo B, adotou-se um valor nulo de corrente. Na Figura 6.5 é apresentado a variação temporal dos dois ciclos utilizados no Teste IV. Durante os 7 primeiros minutos, a fonte programável fornece os sinais referentes ao Ciclo A, tanto para as

tensões quanto para as correntes, enquanto que nos 3 minutos finais, a fonte fornece apenas os sinais das tensões do Ciclo B, mantendo desligado o canal de corrente.

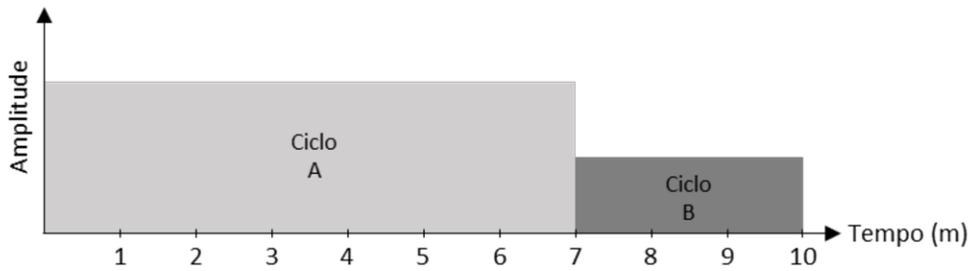


Figura 6.5 – Demonstração da variação temporal dos dois ciclos do Teste IV.

Assim como no teste anterior, os valores de referência foram calculados considerando as amplitudes e os ângulos de fase dos ciclos A e B e levando em consideração também, o intervalo referente a cada ciclo durante os 10 minutos da janela de medição. Os valores de referência, assim como os valores fornecidos pelo medidor, juntamente dos desvios verificados para o Teste IV, estão apresentados nas Tabelas 6.12 e 6.13, respectivamente para as tensões e para as correntes harmônicas.

Tabela 6.12 – Teste IV – Tensão: Amplitudes e ângulos de fase resultantes do período de 10 minutos.

<i>h</i>	Grandeza	FASE A			FASE B			FASE C		
		Padrão	Medidor	Desvio	Padrão	Medidor	Desvio	Padrão	Medidor	Desvio
1 ^a	V_1	127,00 V	127,02 V	0,02%	127,00 V	127,01 V	0,01%	127,00 V	127,01 V	0,01%
	ϕ_1	0,00°	0,00°	0,00°	240,00°	240,00°	0,00°	120,00°	120,00°	0,00°
3 ^a	V_3	12,85%	12,84%	-0,07%	12,85%	12,84%	-0,08%	12,85%	12,84%	-0,08%
	ϕ_3	92,47°	92,49°	0,02°	92,47°	92,49°	0,02°	92,47°	92,49°	0,02°
5 ^a	V_5	8,44%	8,43%	-0,06%	8,44%	8,44%	-0,05%	8,44%	8,44%	-0,05%
	ϕ_5	177,72°	177,73°	0,01°	-62,28°	-62,28°	0,00°	57,72°	57,72°	0,00°
7 ^a	V_7	6,70%	6,70%	-0,05%	6,70%	6,69%	-0,09%	6,70%	6,69%	-0,08%
	ϕ_7	28,69°	28,69°	0,00°	-91,31°	-91,32°	-0,01°	148,69°	148,68°	-0,01°

Tabela 6.13 – Teste IV – Corrente: Amplitudes e ângulos de fase resultantes do período de 10 minutos.

<i>h</i>	Grandeza	FASE A			FASE B			FASE C		
		Padrão	Medidor	Desvio	Padrão	Medidor	Desvio	Padrão	Medidor	Desvio
1 ^a	I_1	4,18 A	4,18 A	0,00%	4,18 A	4,18 A	0,00%	4,18 A	4,18 A	0,00%
	ϕ_1	-43,57°	-43,55°	0,02°	-163,57°	-163,55°	0,02°	76,43°	76,43°	0,00°
3 ^a	I_3	40,03%	39,93%	-0,25%	40,03%	39,99%	-0,10%	40,03%	39,98%	-0,12%
	ϕ_3	-119,74°	-119,47°	0,27°	-119,74°	-119,33°	0,41°	-119,74°	-119,79°	-0,05°
5 ^a	I_5	25,02%	25,02%	0,00%	25,02%	25,00%	-0,08%	25,02%	25,00%	-0,08%
	ϕ_5	19,01°	19,37°	0,36°	139,01°	139,51°	0,50°	-100,99°	-101,12°	-0,13°
7 ^a	I_7	20,02%	20,01%	-0,05%	20,02%	20,02%	-0,02%	20,02%	20,03%	0,05%
	ϕ_7	-61,31°	-60,85°	0,46°	178,69°	179,44°	0,75°	58,69°	58,47°	-0,22°

Os desvios para as amplitudes das tensões harmônicas ficaram na faixa de 0,05% a 0,09%, inferiores aos resultados obtidos no teste anterior. A maior diferença angular verificada para as tensões harmônicas neste teste foi de 0,02° para a 3ª ordem harmônica.

Através dos resultados obtidos para as correntes, Tabela 6.13, pode-se notar que as amplitudes na frequência fundamental são iguais a 4,18 A, valor que representa a agregação da corrente dentro da janela de 10 minutos de medição. Este valor é resultante da agregação dos 5 A que permaneceram durante os 7 minutos iniciais de medição, juntamente dos 3 minutos com ausência de corrente.

Os maiores desvios verificados para as amplitudes das correntes harmônicas foram para a 3ª ordem, com desvios de -0,25% para a fase A, -0,10% para a fase B e -0,12% para a fase C. No caso das correntes harmônicas, a maior diferença angular registrada foi para a corrente de 7ª ordem, com 0,75° na fase C.

6.3 MINICAMPANHA DE MEDIÇÃO

Após validação laboratorial do medidor com a metodologia proposta devidamente embarcada no mesmo, esta seção está direcionada para o uso do medidor em campo. Assim, serão apresentados os resultados obtidos para os ângulos de fase das componentes harmônicas a partir da medição instalada em diferentes classes de consumidores conectados à rede elétrica. Ao todo serão apresentados os resultados das medições obtidas em 7 diferentes unidades consumidoras, sendo 3 para instalações classificadas como residencial, 2 como comercial e 2 como industrial em média tensão. Vale aqui salientar que, uma das instalações elétricas do tipo residencial possui o sistema de geração de energia elétrica fotovoltaico.

Em todas as medições realizadas, o equipamento permaneceu instalado durante o período de 7 dias consecutivos, resultando um total de 1.008 registros das grandezas agregadas em intervalos de tempo igual a 10 minutos. Assim como no Capítulo 3, os resultados aqui apresentados estão na forma de planos em coordenadas polares, sendo que no caso dos resultados apresentados para as tensões harmônicas a referência adotada é a tensão na frequência fundamental e para as correntes harmônicas a referência é a tensão harmônica de mesma ordem.

6.3.1 Instalação residencial

As medições utilizando o medidor anteriormente apresentado iniciou-se nas instalações classificadas como residencial. Desta forma, instalou-se o equipamento em 3 diferentes instalações residenciais. Este tipo de unidade consumidora possui uma certa aleatoriedade de entrada e saída das cargas elétricas em funcionamento, impactando diretamente nas correntes medidas. Devido a aleatoriedade dos dados registrados nas medições, excepcionalmente para as instalações do tipo residencial, optou-se, para uma melhor compreensão, apresentar apenas os registros de 1 dos 7 dias de medição, representado assim 144 registros de medição.

6.3.1.1 Residência 1

A primeira instalação elétrica residencial é alimentada através de 4 fios, sendo 3 fases e 1 neutro, com tensão de fase nominal igual a 127 V. Na Figura 6.6 é apresentada a conexão do medidor junto ao quadro de distribuição geral da Residência 1.



Figura 6.6 – Medidor conectado na instalação residencial 1.

Os resultados obtidos para as tensões e para as correntes harmônicas estão apresentados nas Figuras 6.7, 6.8 e 6.9, respectivamente para a 3^a, 5^a e 7^a ordens harmônicas. Através dos resultados obtidos nesta medição, pode-se verificar baixas amplitudes para as tensões harmônicas ao longo do dia. No caso em específico da 7^a ordem harmônica, registrou-se uma dispersão maior dos dados, motivo este que pode ser atribuído às baixas amplitudes.

Analisando as correntes, nas 3 ordens harmônicas analisadas, pode-se observar um comportamento típico de fluxo de potência harmônica ativa tanto no sentido da fonte para a carga quanto da carga para a fonte, visto a ocorrência de registro de dados nos 4 quadrantes. Para as correntes harmônicas de 3ª e 5ª ordens harmônicas, Figuras 6.7(b) e 6.8(b) respectivamente, observa-se pelo mapa de calor uma predominância maior da corrente no 2º e 3º quadrante, resultando em um fluxo de potência ativa no sentido da carga para a fonte. Por outro lado, para a 7ª ordem harmônica, a prevalência do fluxo de potência harmônica ativa ocorreu no sentido da fonte para a carga, conforme pode ser analisado pela Figura 6.9(b).

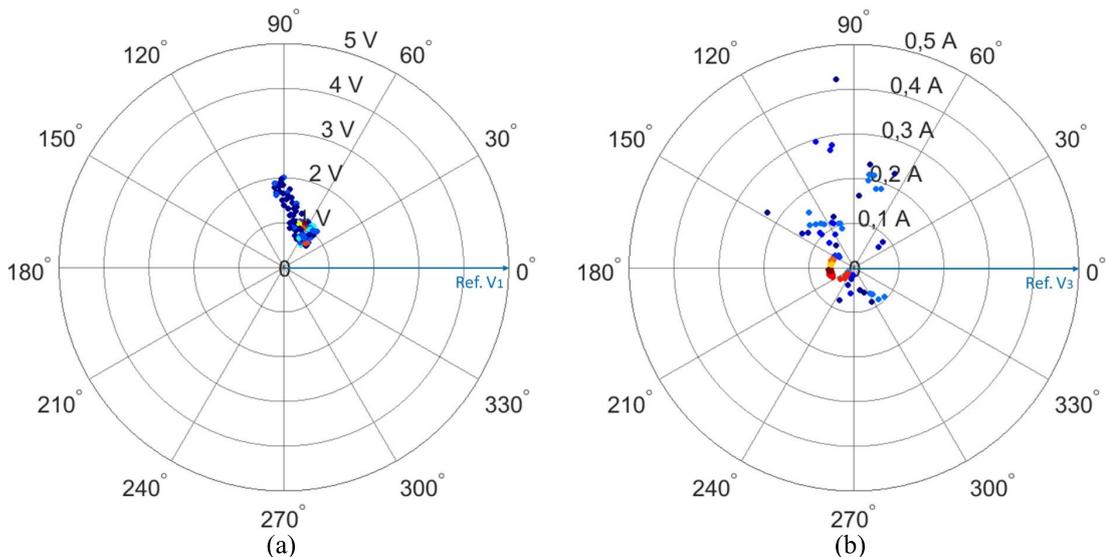


Figura 6.7 – Medição de 24 horas na instalação residencial 1. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica.

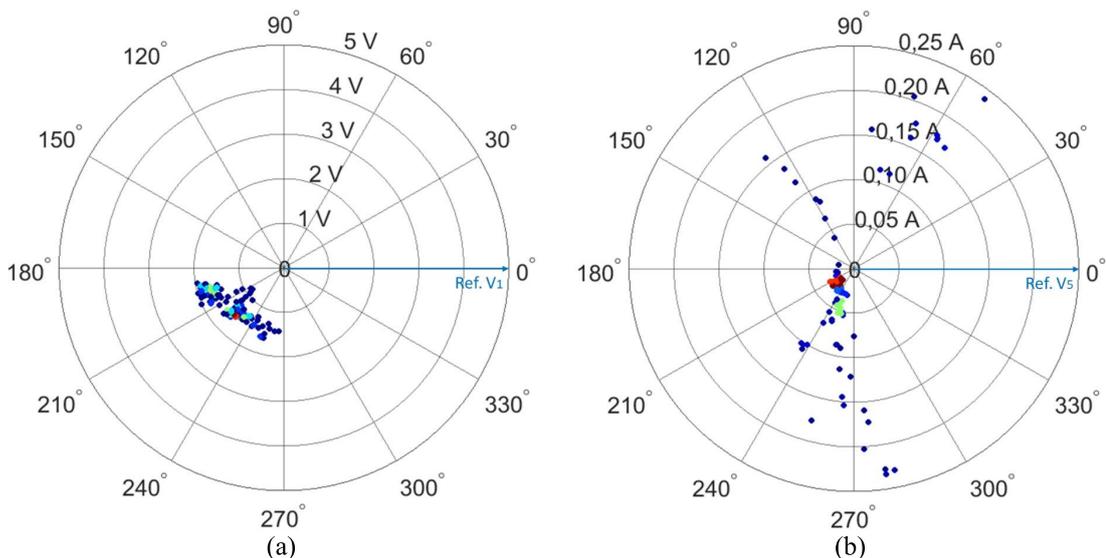


Figura 6.8 – Medição de 24 horas na instalação residencial 1. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.

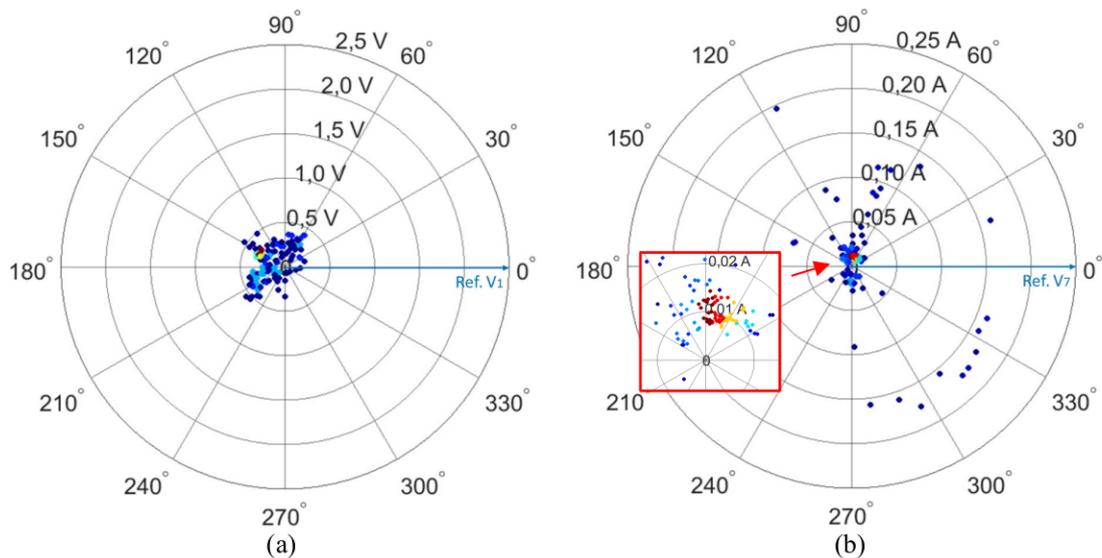


Figura 6.9 – Medição de 24 horas na instalação residencial 1. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.

Para uma melhor interpretação dos resultados obtidos, é apresentado na Figura 6.10 o comportamento das correntes harmônicas ao longo das 24 horas de medição. Assim, é possível observar as variações das correntes ao longo do dia tanto no aspecto das amplitudes quanto dos ângulos de fase. As maiores variações podem ser notadas por volta das 7 horas da manhã, as quais são atribuídas as constantes variações de cargas ocorridas nas instalações residenciais.

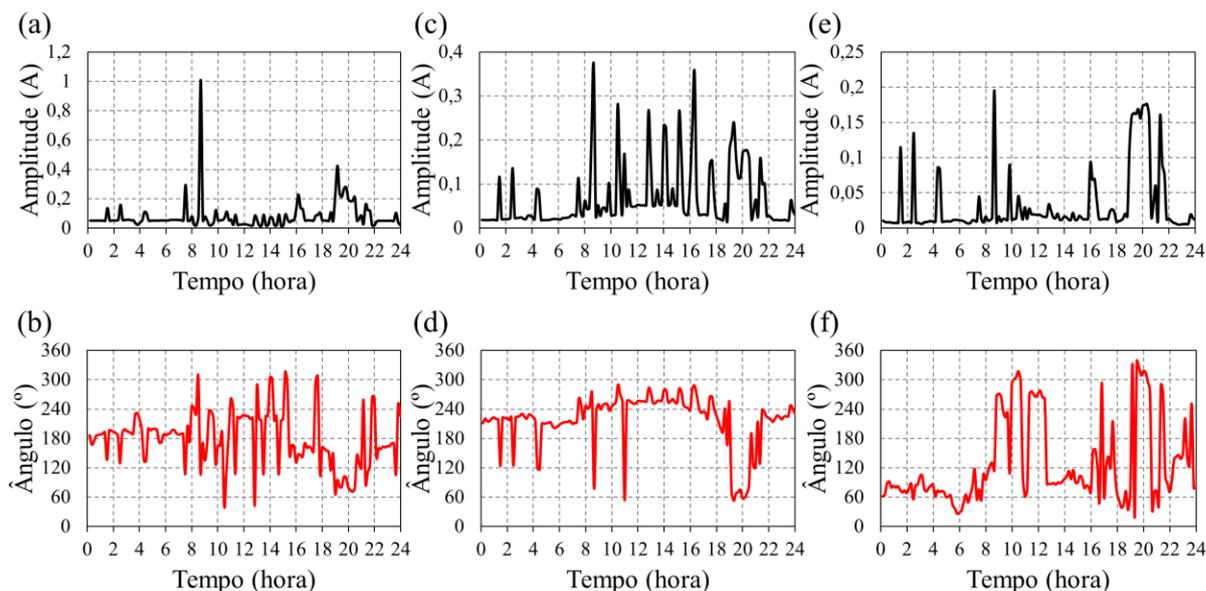


Figura 6.10 – Comportamento das correntes harmônicas registradas para a instalação residencial 1 durante 24 horas de medição. (a) amplitude de 3ª harmônica, (b) ângulo de fase para 3ª harmônica, (c) amplitude de 5ª harmônica, (d) ângulo de fase para 5ª harmônica, (e) amplitude de 7ª harmônica e (f) ângulo de fase para 7ª harmônica.

6.3.1.2 Residência 2

A segunda instalação residencial é alimentada através de 3 fios, sendo 2 fases e 1 neutro, com a tensão de fase nominal igual a 127 V. Os resultados para as tensões e para as correntes harmônicas de 3^a, 5^a e 7^a ordens harmônicas estão apresentadas, respectivamente, nas Figuras 6.11, 6.12 e 6.13.

Assim como no caso da instalação residencial 1, apresentada anteriormente, os fluxos de potência harmônica ativa para esta instalação se apresentaram com alternância do sentido ao longo do dia, sendo em determinados instantes no sentido da carga para a fonte e em outros da fonte para a carga. Na Figura 6.11(b) pode-se verificar melhor esta constatação, devido a ocorrência de registros nos 4 quadrantes. A predominância maior do fluxo de potência harmônica reativa foi do tipo indutiva, visto que a maior concentração de dados está nos 3^o e 4^o quadrantes.

No caso em específico da 7^a ordem harmônica, o fluxo de potência ativa alternou-se nos dois sentidos, porém para o fluxo de potência harmônica reativa foi exclusivamente do tipo indutivo, conforme pode ser verificado na Figura 6.13(b).

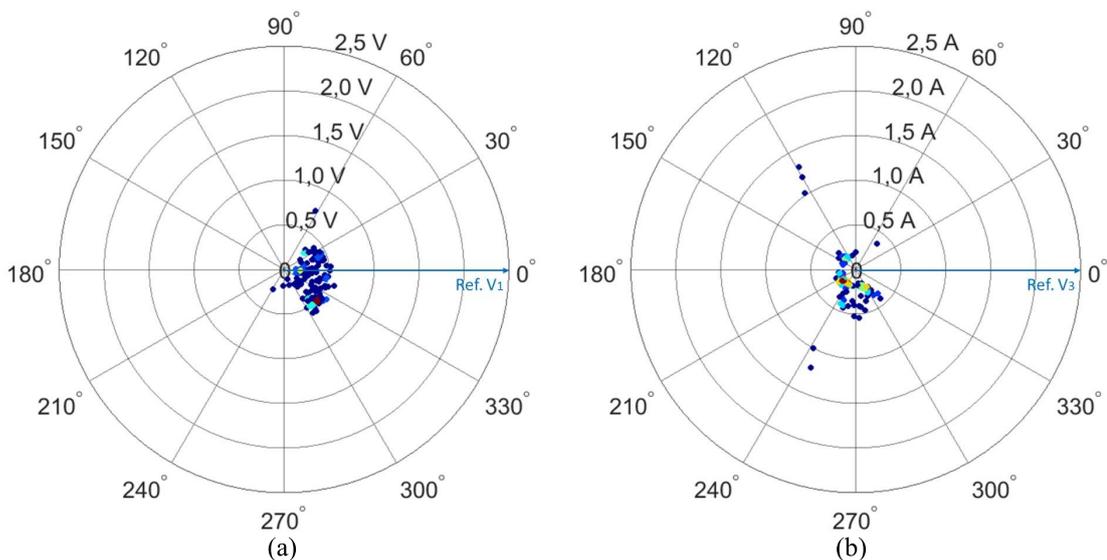


Figura 6.11 – Medição de 24 horas na instalação residencial 2. (a) tensão e (b) corrente de 3^a ordem harmônica.

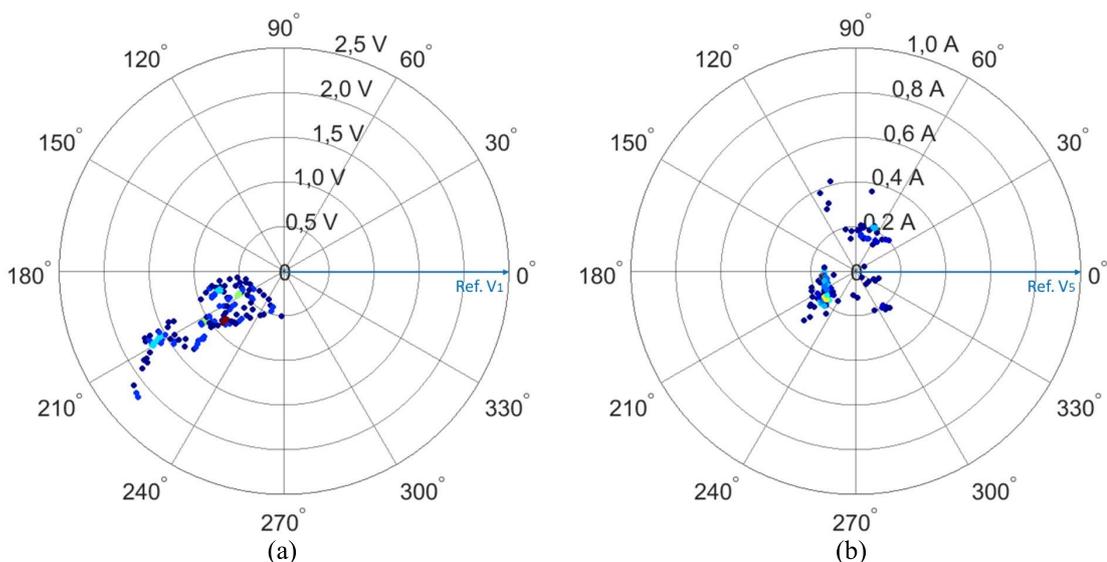


Figura 6.12 – Medição de 24 horas na instalação residencial 2. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.

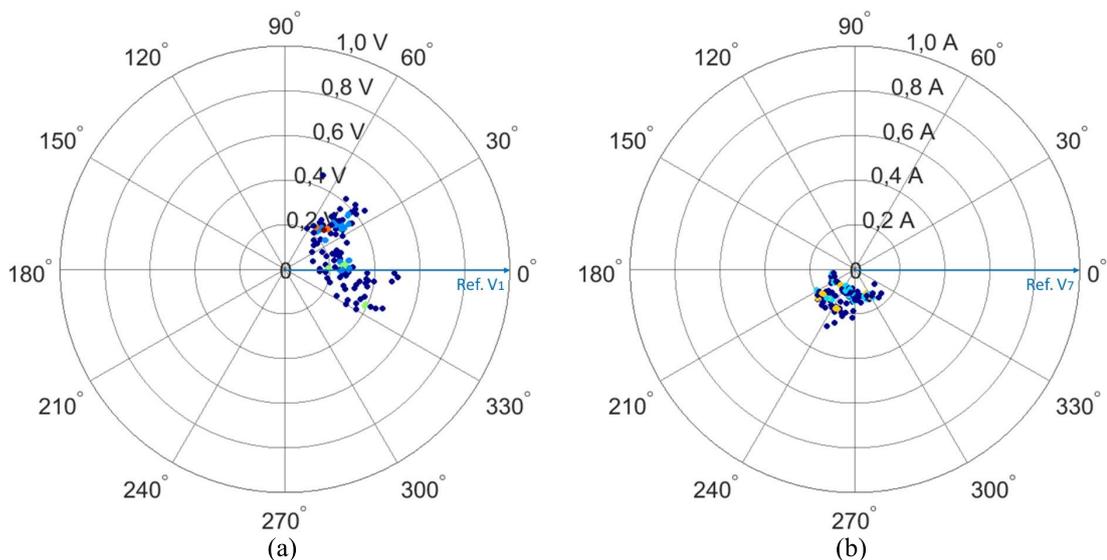


Figura 6.13 – Medição de 24 horas na instalação residencial 2. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.

Na Figura 6.14 tem-se o comportamento das amplitudes e dos ângulos de fase para as componentes harmônicas de corrente ao longo de um dia de medição. Assim como na instalação residencial apresentada anteriormente, é constatado variações tanto nas amplitudes quanto nos ângulos de fase das correntes harmônicas, porém aqui, as variações ocorreram em menores proporções quando comparadas com a instalação residencial 1. Este fato pode ser atribuído a uma menor variação de cargas ocorridas nesta instalação ao longo do dia da medição.

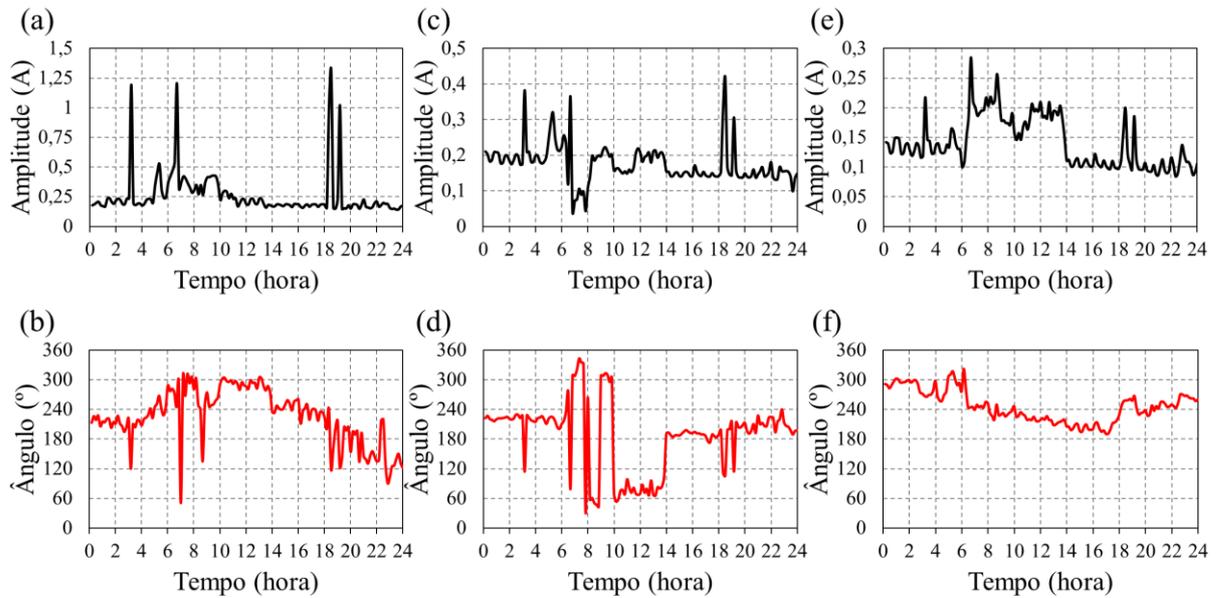


Figura 6.14 – Comportamento das correntes harmônicas registradas para a instalação residencial 2 durante 24 horas de medição. (a) amplitude de 3ª harmônica, (b) ângulo de fase para 3ª harmônica, (c) amplitude de 5ª harmônica, (d) ângulo de fase para 5ª harmônica, (e) amplitude de 7ª harmônica e (f) ângulo de fase para 7ª harmônica.

6.3.1.3 Residência 3 - com sistema de geração fotovoltaica

A última unidade consumidora residencial é representada por uma instalação trifásica também com tensão de fase nominal igual a 127 V. A diferença desta para as demais instalações apresentadas anteriormente é que esta unidade consumidora possui um sistema de geração de energia elétrica fotovoltaica em funcionamento. Esta edificação ainda se encontra em fase de construção, portanto, as únicas cargas elétricas presentes são referentes a iluminação e aos equipamentos utilizados para a construção.

Nas Figuras 6.15, 6.16 e 6.17 são apresentados os resultados obtidos através da medição. As tensões harmônicas para esta instalação, Figuras 6.15(a), 6.16(a) e 6.17(a), apresentaram com uma menor dispersão quando comparada com as duas instalações anteriores. A corrente harmônica de 3ª ordem concentrou em duas regiões distintas, porém em ambas o fluxo de potência harmônica ativa se deu no sentido da carga (instalação elétrica) para fonte (concessionária), conforme pode ser verificado na Figura 6.15(b). Por sua vez, o fluxo das potências harmônicas ativas de 5ª e 7ª ordens tiveram momentos ao longo do dia no sentido da carga para a fonte e em outros instantes da fonte para a carga, conforme apresentado nas Figuras 6.16(b) e 6.17(b).

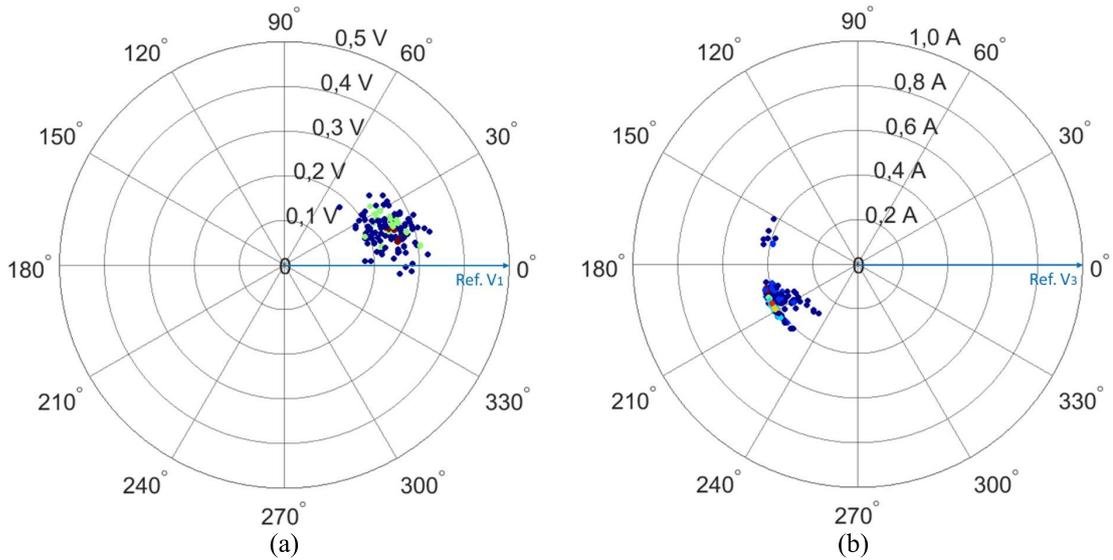


Figura 6.15 – Medição de 24 horas na instalação residencial 3. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica.

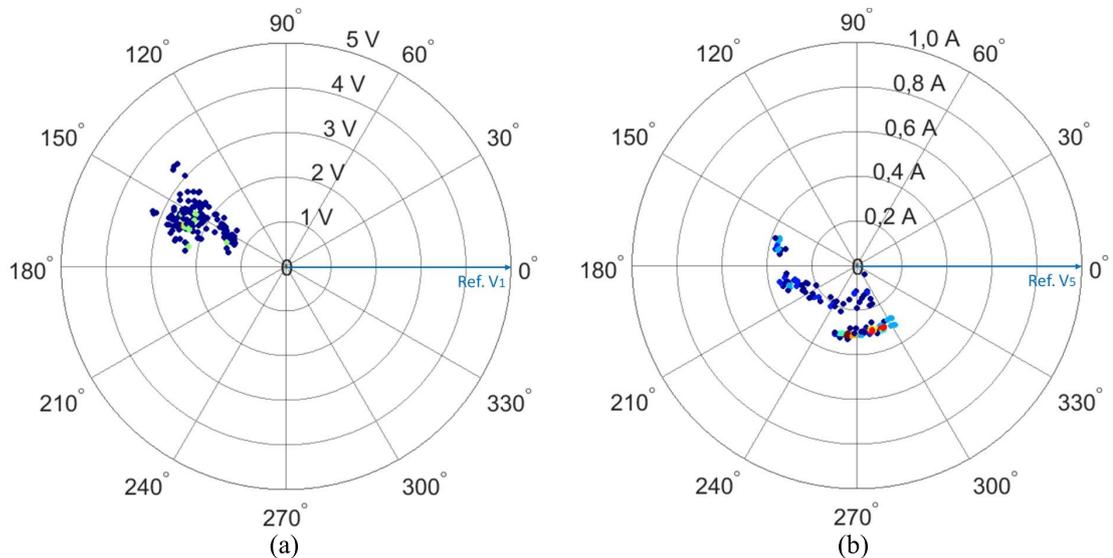


Figura 6.16 – Medição de 24 horas na instalação residencial 3. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.

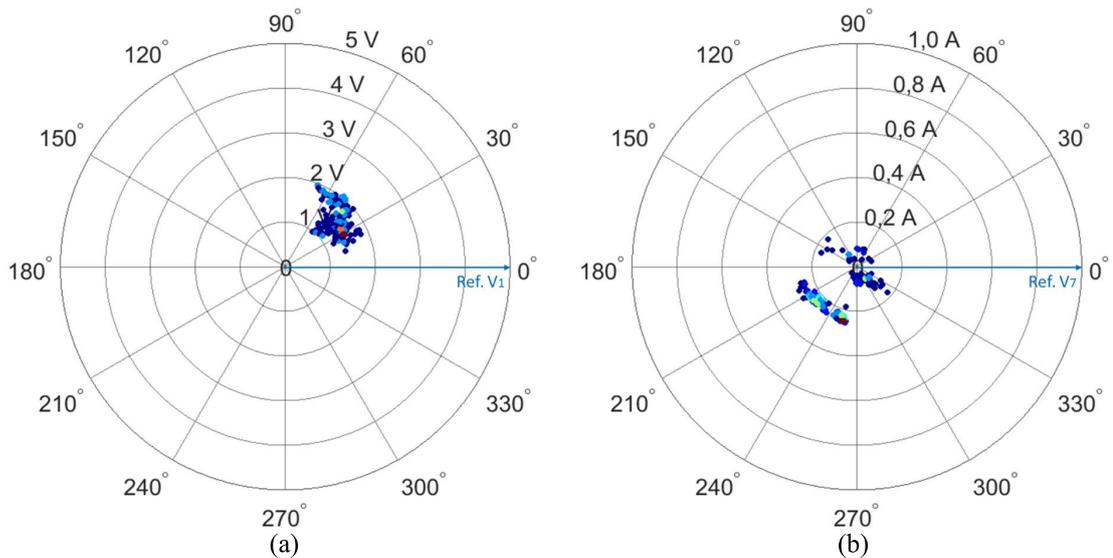


Figura 6.17 – Medição de 24 horas na instalação residencial 3. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.

Na Figura 6.18 têm-se os comportamentos das correntes harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordens harmônicas para a instalação residencial em questão. Através dos comportamentos das amplitudes, Figuras 6.18(a), (c) e (e), pode-se verificar a influência da presença da geração fotovoltaica. As variações mais significativas nas amplitudes ocorreram por volta das 7h às 18h, período de incidência solar.

Conforme Figura 6.18(b), os ângulos de fase da corrente harmônica de 3ª ordem se apresentaram com tendência mais estável durante as 24 horas de medição, permanecendo dentro da faixa de 90° a 270°, o que representa um fluxo de potência harmônica ativa no sentido da carga para a fonte. Verificando a Figura 6.18(d) é possível verificar que por volta das 8h ocorre uma inversão do sentido do fluxo de potência harmônica ativa de 5ª ordem harmônica, alterando de fonte-carga (ângulo em aproximadamente 300°) para carga-fonte (ângulo em aproximadamente 190°). Os registros de mudanças no sentido do fluxo de potência harmônica ativa de 7ª ordem, também podem ser verificados durante o período de geração fotovoltaica, conforme apresentado na Figura 6.18(f).

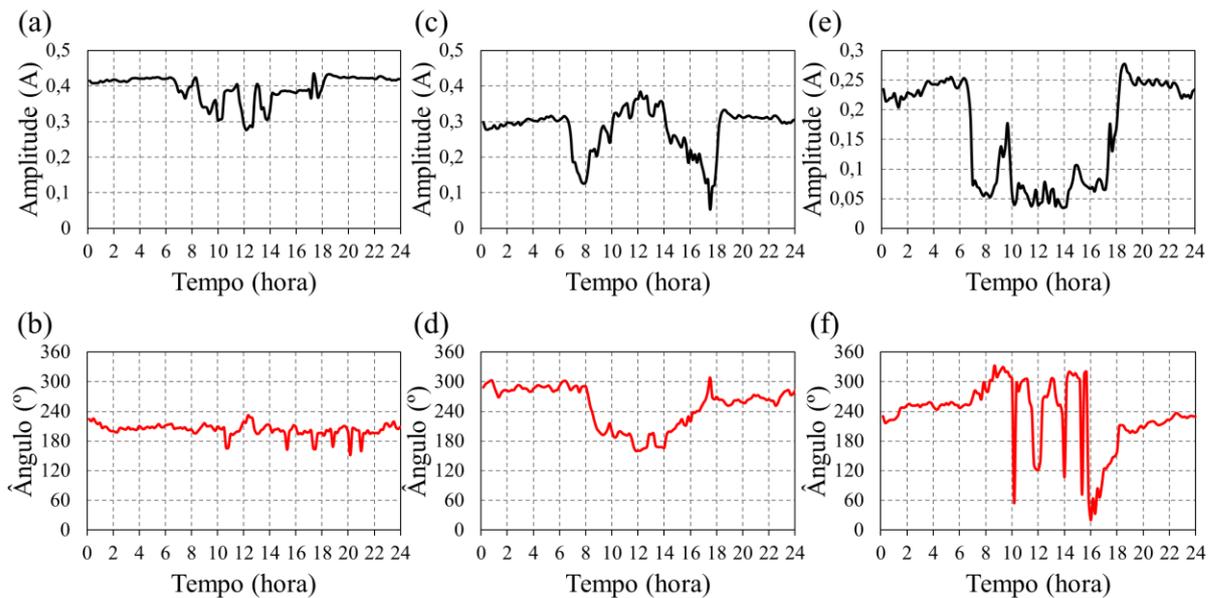


Figura 6.18 – Comportamento das correntes harmônicas registradas para a instalação residencial 3 durante 24 horas de medição. (a) amplitude de 3ª harmônica, (b) ângulo de fase para 3ª harmônica, (c) amplitude de 5ª harmônica, (d) ângulo de fase para 5ª harmônica, (e) amplitude de 7ª harmônica e (f) ângulo de fase para 7ª harmônica.

6.3.2 Instalação comercial

Passando agora para a segunda classe de unidades consumidoras, nesta seção são apresentados os resultados obtidos nas medições realizadas em instalações comerciais conectadas na rede elétrica em baixa tensão. A primeira instalação comercial é a mesma

instalação apresentada na seção 3.3.2, porém, considerando-se dias diferentes de medição. A segunda instalação comercial é representada por um escritório de engenharia, o qual possui como cargas elétricas computadores, aparelhos de ar condicionado, *data center*, fonte programável e iluminação. Os resultados são apresentados considerando-se um período de medição de 7 dias consecutivos.

6.3.2.1 Comercial 1

A primeira instalação comercial é alimentada através de 2 fases + 1 neutro. Na Figura 6.19 tem-se a conexão do medidor junto ao quadro de distribuição geral desta instalação.



Figura 6.19 – Medidor conectado na instalação comercial 1.

Os resultados obtidos para as tensões e para as correntes harmônicas, durante os 7 dias de medição, estão apresentados nas Figuras 6.20, 6.21 e 6.22, respectivamente para a 3^a, 5^a e 7^a ordens harmônicas. Apesar de ter sido medições realizadas em períodos e em equipamentos distintos, os resultados para as tensões harmônicas aqui obtidos se assemelham com aqueles apresentados na seção 3.3.2.

Analisando-se as correntes harmônicas, pode-se verificar que o fluxo de potência harmônica ativa de 3^a ordem prevaleceu no sentido da carga para a fonte, conforme Figura 6.20(b). Já o fluxo de potência harmônica reativa alternou em determinados instantes de indutivo para capacitivo (registros no 2^o e 3^o quadrantes). No caso da 5^a ordem harmônica, Figura 6.21(b), o fluxo de potência harmônica ativa se deu praticamente os 7 dias no sentido da fonte para a carga. Por fim, para a 7^a ordem harmônica o fluxo de potência harmônica ativa

predominou no sentido da carga para fonte, porém com certos períodos com fluxo no sentido inverso, conforme pode ser verificado na Figura 6.21(b).

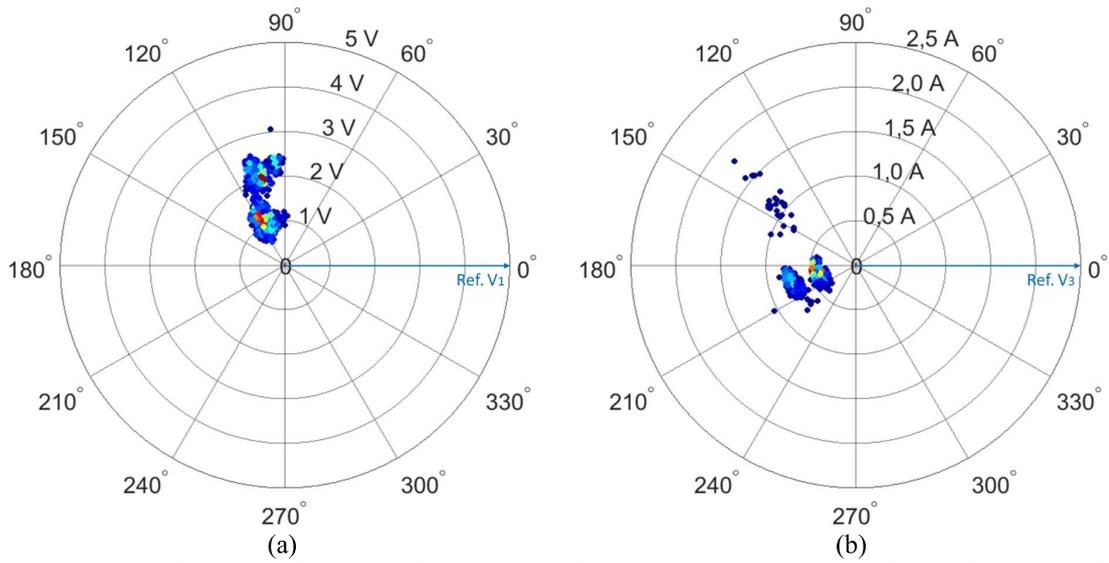


Figura 6.20 – Medição de 7 dias da instalação comercial 1. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica.

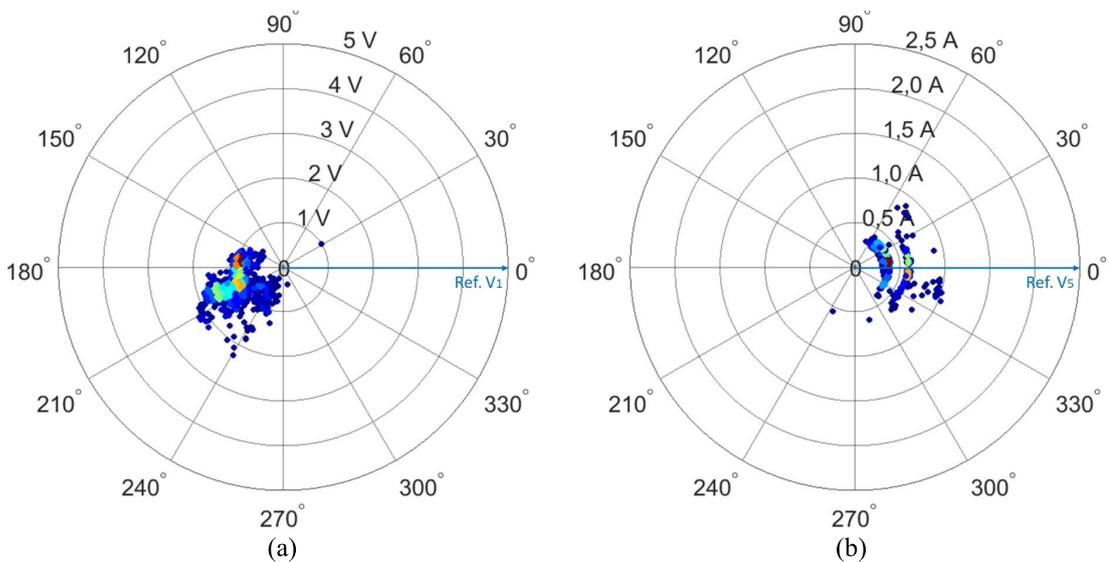


Figura 6.21 – Medição de 7 dias da instalação comercial 1. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.

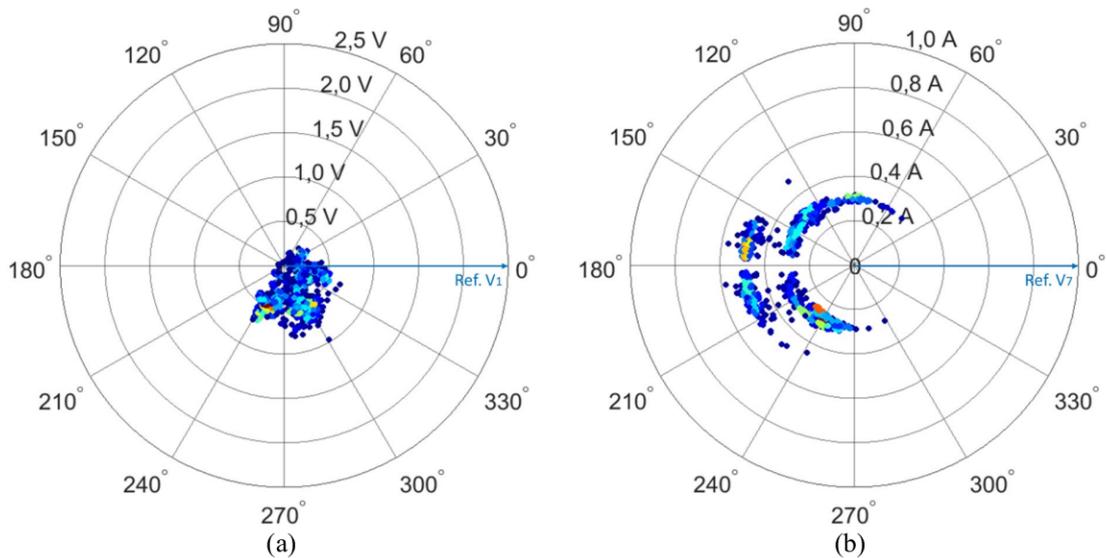


Figura 6.22 – Medição de 7 dias da instalação comercial 1. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.

Na Figura 6.23 é apresentado o comportamento das amplitudes e dos ângulos de fase das correntes harmônicas para apenas 1 dos 7 dias de medição. Pela figura, fica evidente que por volta das 9h até aproximadamente às 18h, é o período em que ocorre as mudanças de cargas mais significativas. Como, geralmente, em instalações comerciais a aleatoriedade de entrada e saída de cargas é menor, as correntes harmônicas permanecem com variações mais moderadas. Fora do horário comercial, as correntes harmônicas tendem a manter-se mais fixas, visto que neste período apenas parte da carga de iluminação e a geladeira encontram-se em funcionamento.

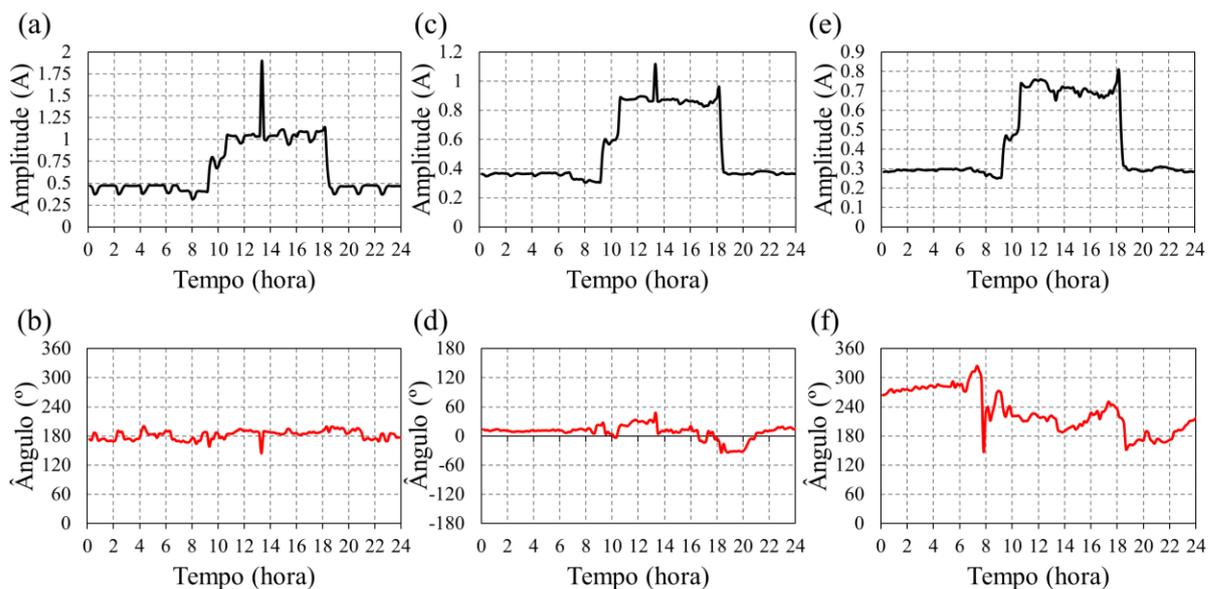


Figura 6.23 – Comportamento das correntes harmônicas registradas para a instalação comercial 1 durante 24 horas de medição. (a) amplitude de 3ª harmônica, (b) ângulo de fase para 3ª harmônica, (c) amplitude de 5ª harmônica, (d) ângulo de fase para 5ª harmônica, (e) amplitude de 7ª harmônica e (f) ângulo de fase para 7ª harmônica.

6.3.2.2 Comercial 2

A segunda unidade consumidora classificada como comercial é uma instalação elétrica alimentada através de 4 fios, sendo 3 fases e 1 neutro, com tensão nominal de fase igual a 127 V. Os resultados obtidos durante os 7 dias consecutivos de medição estão apresentados nas Figuras 6.24, 6.25 e 6.26. Neste caso, as tensões harmônicas para a 3ª ordem apresentaram amplitudes menores quando comparadas as de 5ª e 7ª ordem, além de um espalhamento maior.

Analisando as correntes harmônicas, Figuras 6.24(b), 6.25(b) e 6.26(b), pode-se dizer que para as 3 ordens em análise, o fluxo de potência harmônica ativa para esta instalação se deu predominantemente no sentido da carga para a fonte, salvo alguns períodos em que ocorreu a inversão. Para o caso da 3ª ordem harmônica ficou evidenciado duas regiões mais concentradas de dados de corrente harmônicas, resultado típico de instalações comerciais, porém para a 5ª e 7ª ordens harmônicas os dados ficaram concentrados em apenas uma “nuvem de dados”.

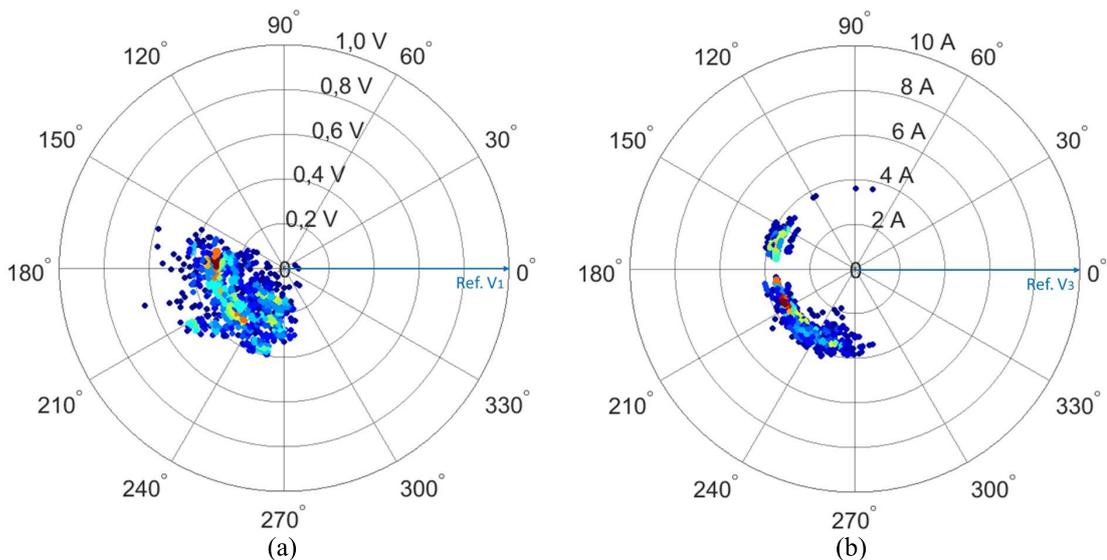


Figura 6.24 – Medição de 7 dias da instalação comercial 2. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica.

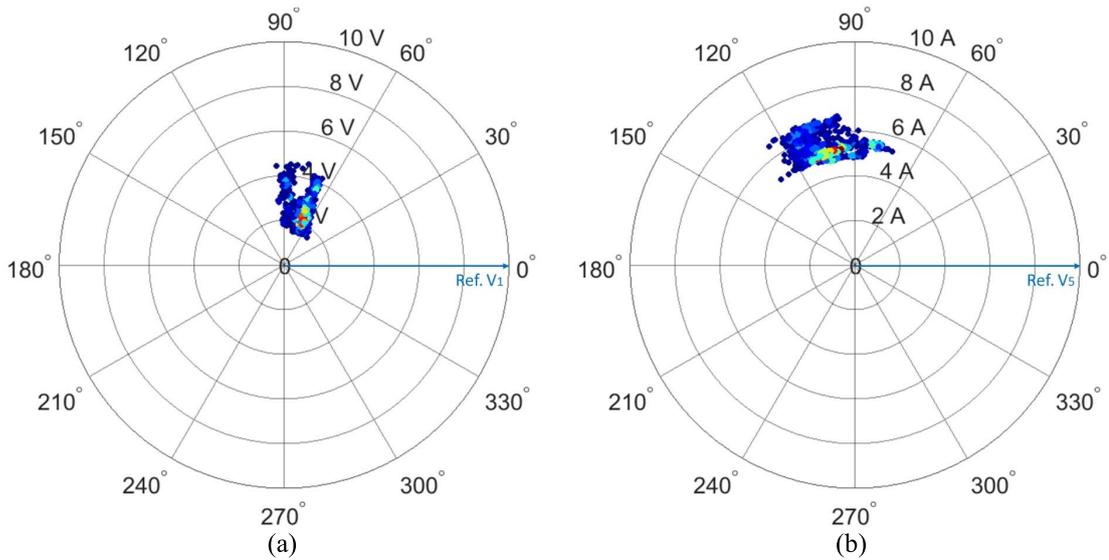


Figura 6.25 – Medição de 7 dias da instalação comercial 2. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.

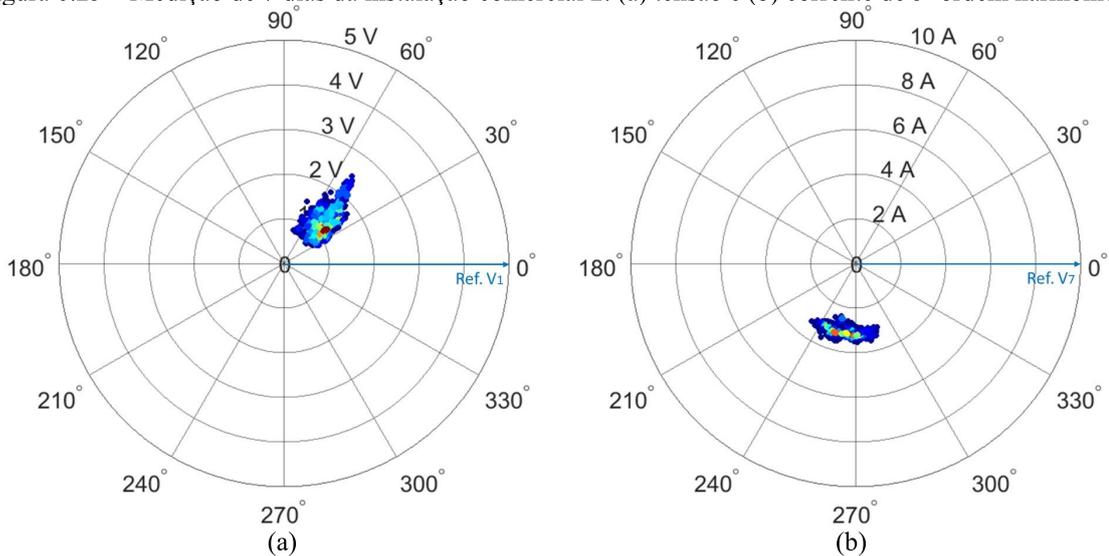


Figura 6.26 – Medição de 7 dias da instalação comercial 2. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.

Assim como apresentado para a instalação comercial anterior, na Figura 6.27 tem-se o comportamento das correntes harmônicas, tanto em amplitudes quanto em ângulos de fase, para 1 dos 7 dias de medição. Nota-se pelos resultados das amplitudes harmônicas que no horário comercial ocorre as variações nas amplitudes das correntes harmônicas, porém essas variações são mais brandas quando se analisam os ângulos de fase, principalmente para as componentes de 5ª e 7ª ordens harmônicas, as quais apresentaram os dados mais concentrados nas Figuras 6.25(b) e 6.26(b).

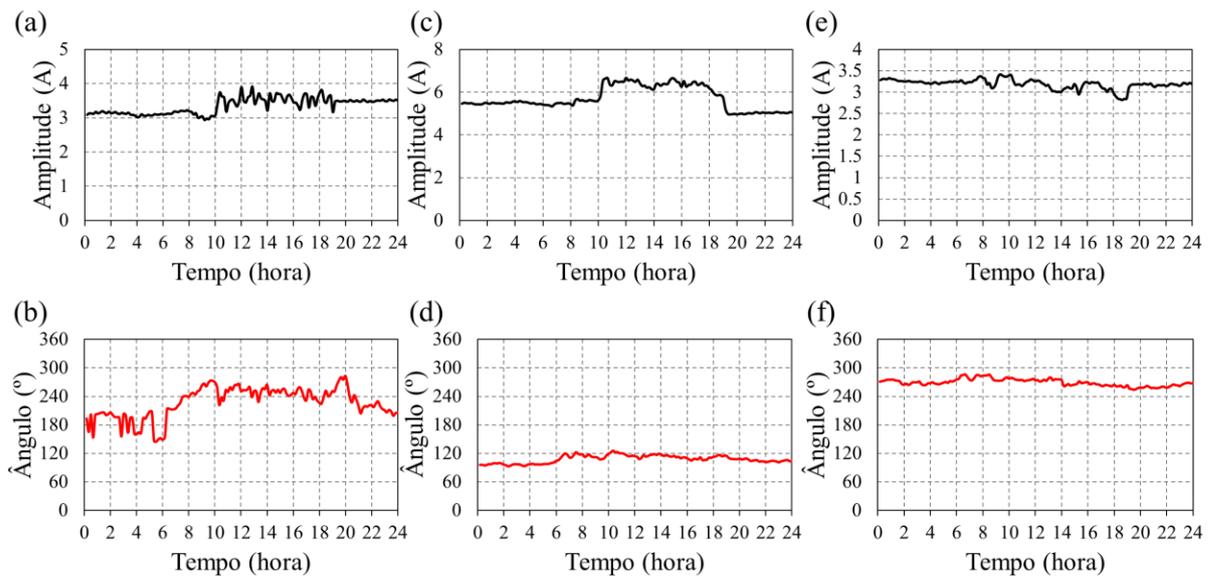


Figura 6.27 – Comportamento das correntes harmônicas registradas para a instalação comercial 2 durante 24 horas de medição. (a) amplitude de 3^a harmônica, (b) ângulo de fase para 3^a harmônica, (c) amplitude de 5^a harmônica, (d) ângulo de fase para 5^a harmônica, (e) amplitude de 7^a harmônica e (f) ângulo de fase para 7^a harmônica.

6.3.3 Instalação industrial

A última classe de unidades consumidoras consideradas na campanha de medição contemplam instalações industriais conectadas à rede elétrica de média tensão. Neste caso, as duas instalações consideradas possuem 3 TPs e 3 TCs de medição (medição a três elementos) para uso exclusivo do consumidor, os quais foram instalados pelo cliente especificamente para conexão de medidores de parâmetros de Qualidade da Energia Elétrica. Assim, a primeira instalação considerada é representada por uma indústria que atua no ramo de produção de embalagens farmacêuticas a base de tubos de vidro, enquanto que a outra instalação é uma indústria de peças automotiva. Mais uma vez, em ambas as instalações, as medições foram realizadas durante 7 dias consecutivos.

6.3.3.1 Industrial 1

A primeira instalação comercial é atendida através de uma rede de distribuição trifásica com tensão de linha nominal igual a 13.800 V. Na Figura 6.28 é apresentado a conexão do medidor junto ao quadro que recebe os sinais dos TPs e TCs conectados em média tensão. O processo industrial é realizado 24 horas por dia durante os 7 dias da semana.



Figura 6.28 – Medidor conectado na instalação industrial 1.

Os resultados obtidos para as tensões e para as correntes harmônicas da primeira instalação industrial são apresentados nas Figuras 6.29, 6.30 e 6.31, respectivamente para a 3^a, 5^a e 7^a ordens harmônicas. As tensões harmônicas em média tensão apresentaram comportamento com menos dispersão quando comparadas as tensões harmônicas das medições em baixa tensão. As amplitudes das tensões de 3^a ordem harmônica apresentaram magnitudes inferiores às de 5^a e 7^a ordens harmônicas, fato que pode ser atribuído ao tipo de conexão do transformador, conforme explicado na seção 3.4.

Analisando-se as correntes harmônicas, pode-se verificar que para a corrente de 3^a ordem harmônica os registros predominaram em duas regiões distintas da Figura 6.29(b), representando um fluxo de potência harmônica ativa no sentido da carga para a fonte. Por outro lado, o fluxo de potência harmônica reativa apresentou-se com características ora indutiva, ora capacitiva. Para a 5^a ordem, o fluxo de potência harmônica ativa apresentou-se predominantemente no sentido da fonte para a carga, enquanto que para a 7^a ordem, o fluxo foi no sentido inverso, ou seja, da carga para a fonte.

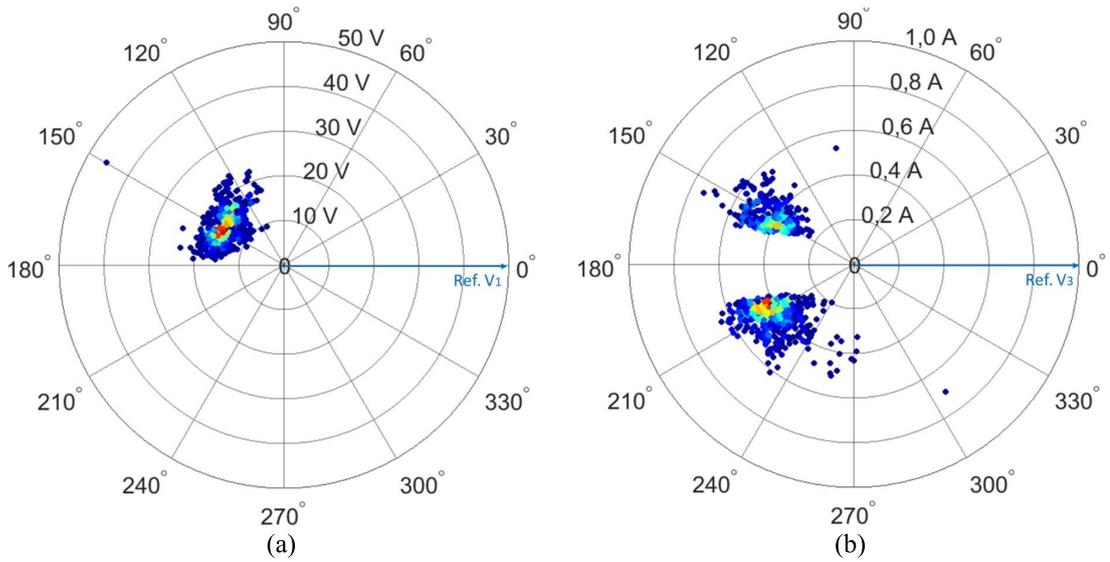


Figura 6.29 – Medição de 7 dias da instalação industrial 1. (a) tensão e (b) corrente de 3ª ordem harmônica.

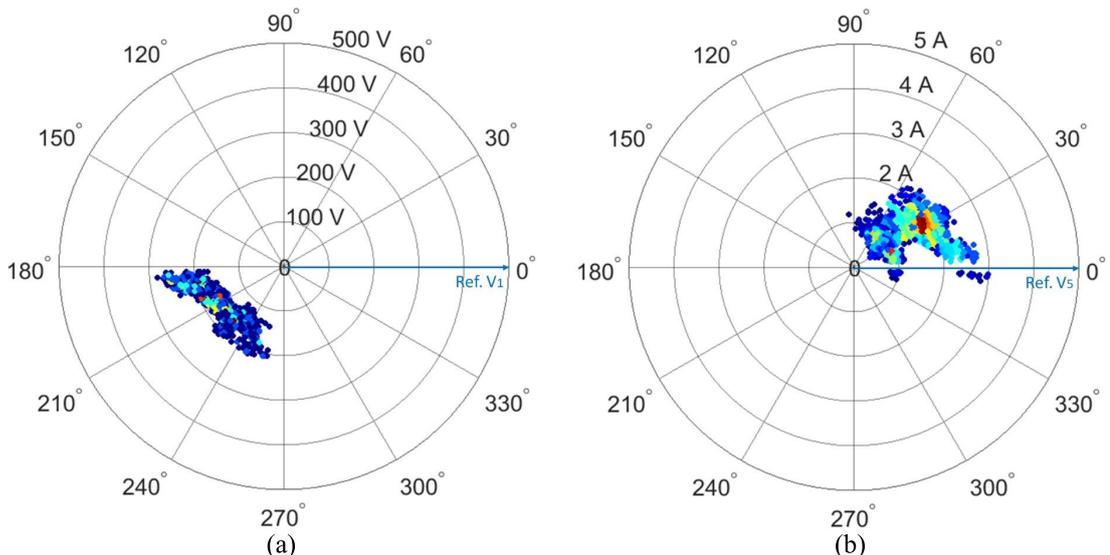


Figura 6.30 – Medição de 7 dias da instalação industrial 1. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.

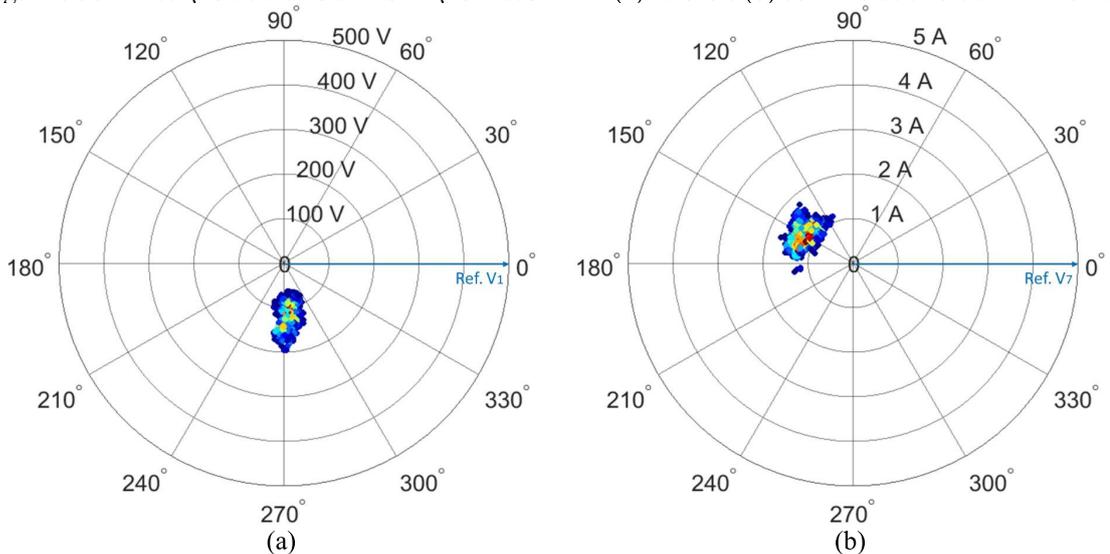


Figura 6.31 – Medição de 7 dias da instalação industrial 1. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.

Para analisar as variações das correntes harmônicas ao longo do dia, na Figura 6.32 são apresentadas as amplitudes e os ângulos de fase para a 3ª, 5ª e 7ª ordens harmônicas, os quais são referentes apenas a 1 dos 7 dias de medição. De acordo com a Figura 6.32(b), as maiores variações verificadas ocorreram para os ângulos de fase da componente de 3ª ordem harmônica, assim como verificado anteriormente na Figura 6.29(b).

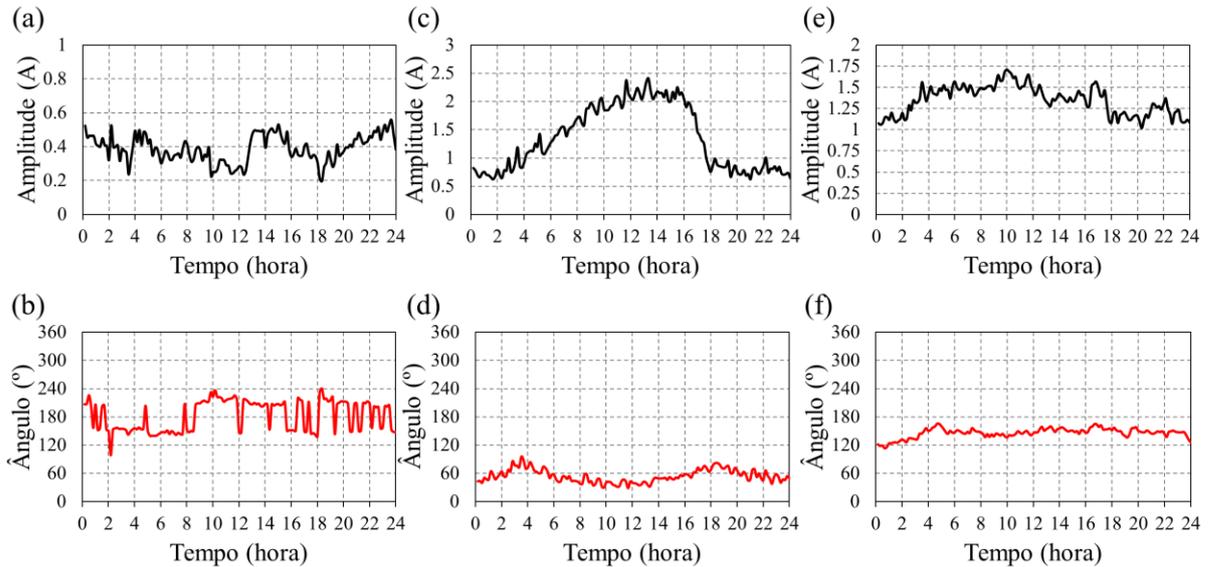


Figura 6.32 – Comportamento das correntes harmônicas registradas para a instalação industrial 1 durante 24 horas de medição. (a) amplitude de 3ª harmônica, (b) ângulo de fase para 3ª harmônica, (c) amplitude de 5ª harmônica, (d) ângulo de fase para 5ª harmônica, (e) amplitude de 7ª harmônica e (f) ângulo de fase para 7ª harmônica.

6.3.3.2 Industrial 2

A última medição foi realizada em uma indústria alimentada por uma rede trifásica com tensão de linha nominal igual a 23 kV. Na Figura 6.33 é apresentado a conexão do medidor junto aos sinais provenientes dos secundários dos TPs e TCs de medição de uso do cliente. Nesta instalação foi utilizado um medidor desenvolvido especialmente para instalação em painel, contudo, com a mesma tecnologia embarcada do medidor apresentado anteriormente.

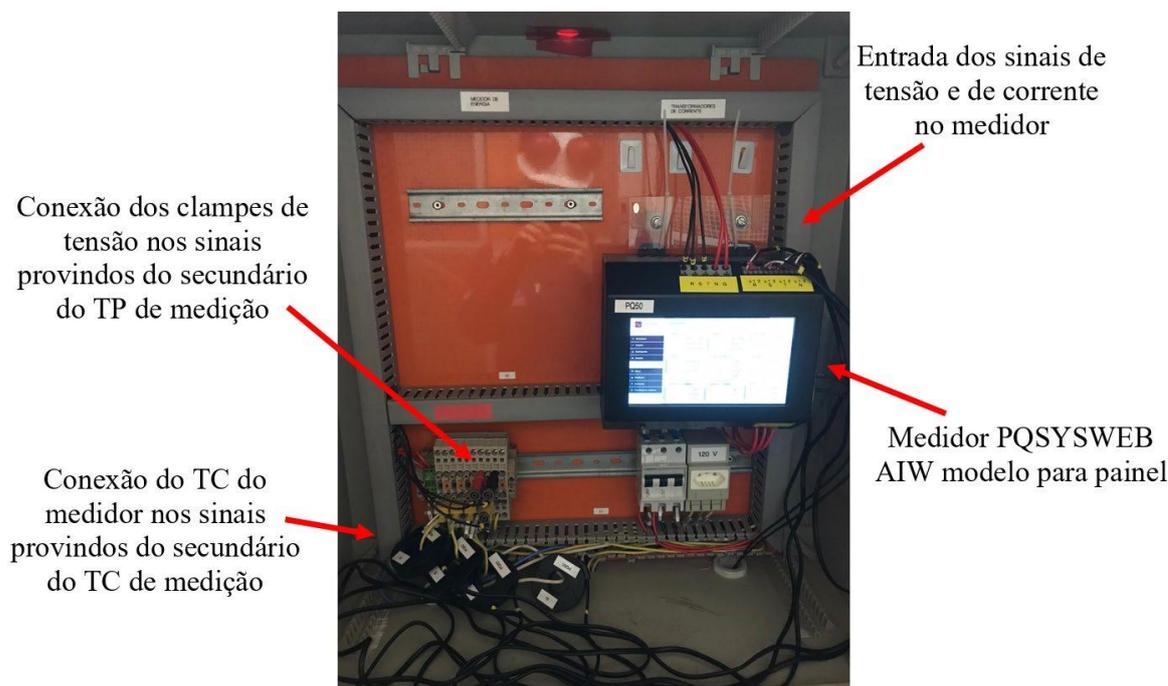


Figura 6.33 – Medidor conectado na instalação industrial 2.

Os resultados obtidos na medição de 7 dias consecutivos para a instalação industrial 2 estão apresentados nas Figuras 6.34, 6.35 e 6.36, respectivamente para as tensões e correntes harmônicas de 3^a, 5^a e 7^a ordens.

Analisando os registros referentes as correntes harmônicas, observa-se que para esta instalação o fluxo de potência harmônica ativa, para as 3 ordens apresentadas, foi predominantemente no sentido da carga para a fonte.

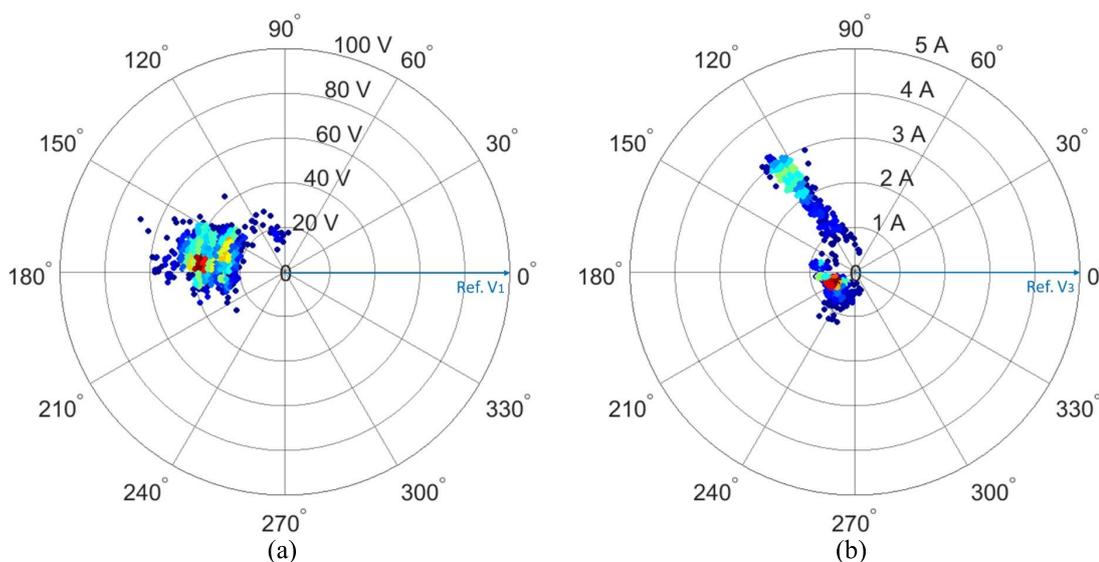


Figura 6.34 – Medição de 7 dias da instalação industrial 2. (a) tensão e (b) corrente de 3^a ordem harmônica.

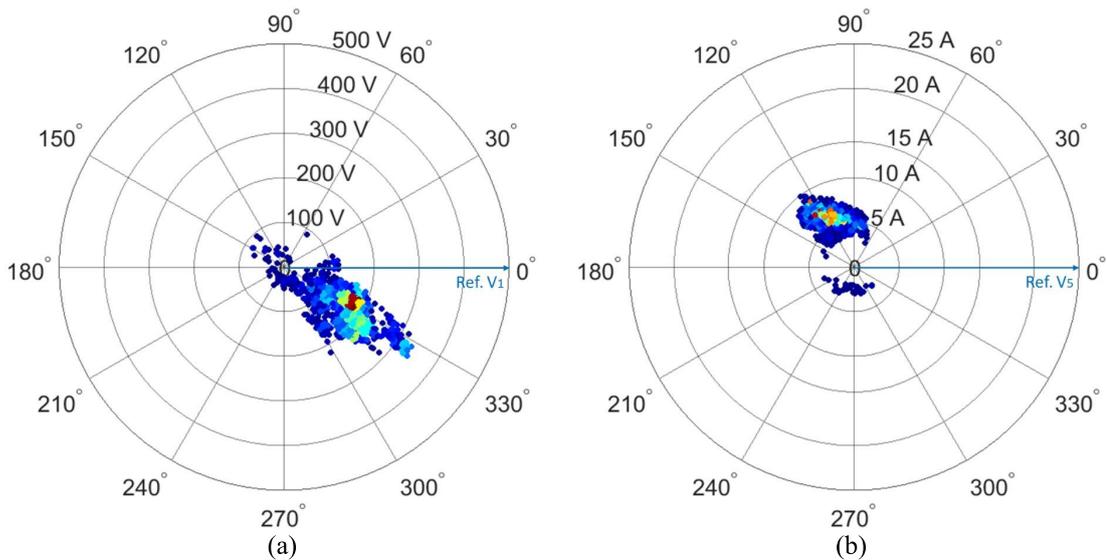


Figura 6.35 – Medição de 7 dias da instalação industrial 2. (a) tensão e (b) corrente de 5ª ordem harmônica.

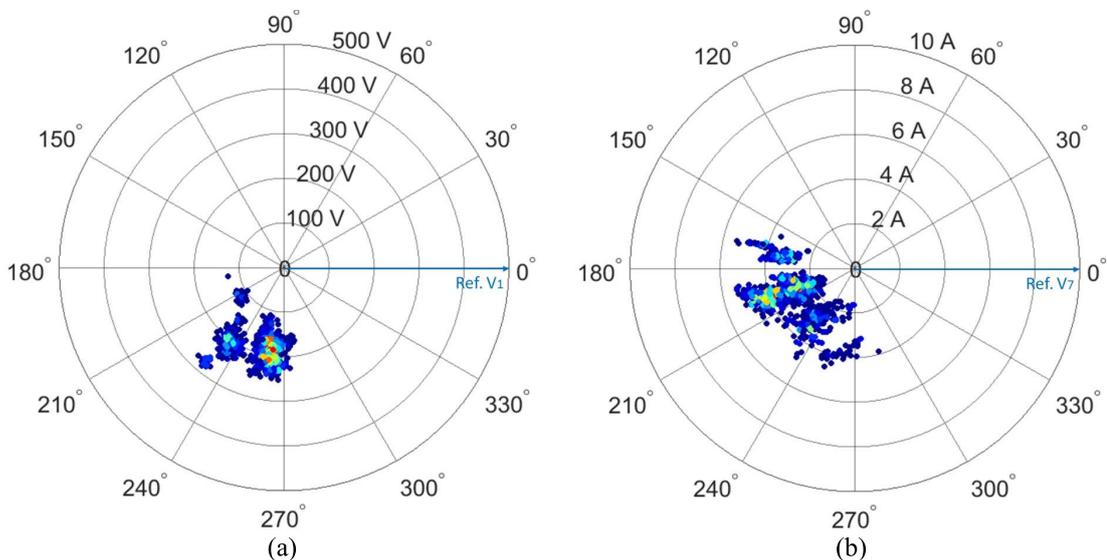


Figura 6.36 – Medição de 7 dias da instalação industrial 2. (a) tensão e (b) corrente de 7ª ordem harmônica.

Analisando-se agora apenas 1 dos 7 dias de medição, na Figura 6.37 é apresentado o comportamento ao longo do dia das amplitudes e dos ângulos de fase para as correntes harmônicas. As maiores variações são observadas para a corrente de 3ª ordem harmônica, as quais ocorrem a partir as 7h, tanto nas amplitudes quanto para os ângulos de fase. Para a 5ª e 7ª ordens harmônicas, os ângulos de fase apresentaram comportamento sem grandes variações dentro de uma determinada faixa, o que pode ser identificado também através dos graficos em coordenadas polares, Figura 6.35(b) e 6.36(b), através das maiores concentrações de dados.

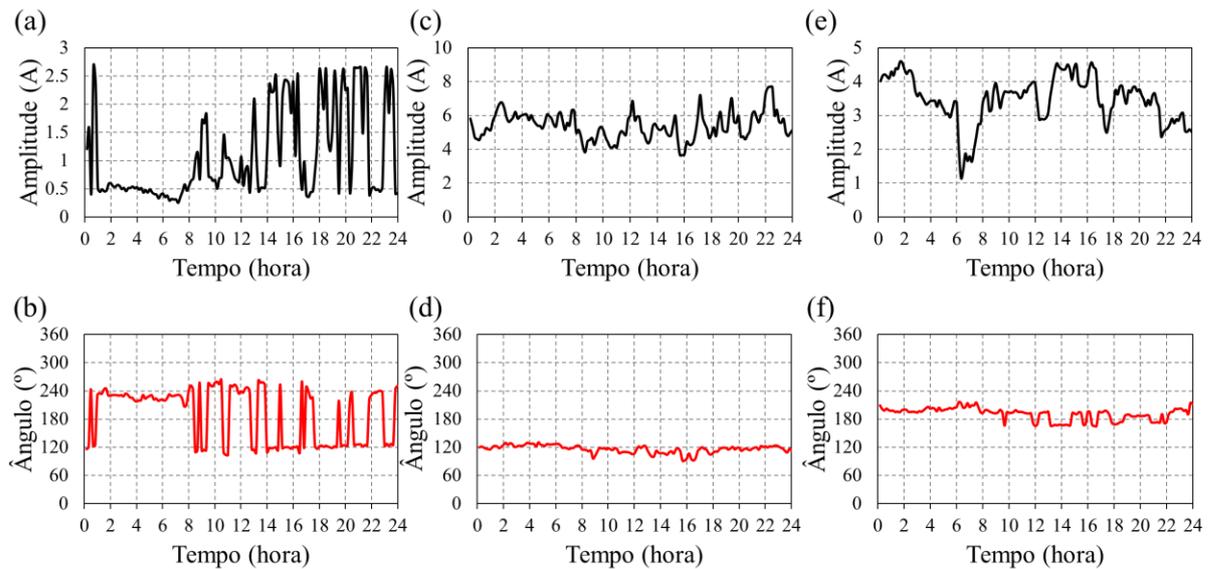


Figura 6.37 – Comportamento das correntes harmônicas registradas para a instalação industrial 2 durante 24 horas de medição. (a) amplitude de 3^a harmônica, (b) ângulo de fase para 3^a harmônica, (c) amplitude de 5^a harmônica, (d) ângulo de fase para 5^a harmônica, (e) amplitude de 7^a harmônica e (f) ângulo de fase para 7^a harmônica.

6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo apresentou um analisador de Qualidade da Energia Elétrica onde o fabricante implementou a metodologia aqui proposta. Após apresentar as características técnicas do medidor, o mesmo foi submetido a uma bateria de testes laboratoriais com objetivo de avaliar a metodologia implementada antes de utilizá-lo em medições em campo.

Ao todo foram realizados 4 diferentes testes em ambiente controlado. Utilizando sinais fixos e variáveis para as tensões e para as correntes harmônicas, o medidor apresentou desvios, tanto para as amplitudes quanto para os ângulos de fase, aceitáveis para a aplicação, o qual considerou-se apto para medições em campo.

A etapa subsequente a validação laboratorial foi a realização de uma minicampanha de medição realizada em algumas instalações reais. O objetivo destas medições foi levantar o comportamento dos ângulos de fase das componentes harmônicas e avaliar o fluxo de potência harmônica ativa de diferentes instalações. Ao todo foram realizadas 7 medições em 3 diferentes classes de unidades consumidoras, sendo 3 medições em instalações residenciais, 2 comerciais e 2 industriais alimentadas em média tensão.

As instalações residenciais apresentaram um comportamento com uma certa aleatoriedade para as correntes harmônicas, onde para uma mesma frequência, o fluxo de

potência harmônica ativa ora se apresentava no sentido da fonte para carga, ora no sentido da carga para a fonte. Este fato está atribuído as constantes variações de cargas elétricas neste tipo de consumidor, uma vez que a entrada e saída de cargas elétricas é frequente nestas instalações.

Para as instalações comerciais e industriais, os ângulos de fase apresentaram um comportamento mais estável quando comparado com as instalações residenciais. Estas unidades consumidoras não apresentam constantes mudanças de cargas ao longo do dia, salvo nos instantes de início e fim de operação.

Através dos resultados obtidos nas diversas medições, pode-se constatar que os ângulos de fase das componentes harmônicas apresentam comportamentos intrínsecos as cargas que estão em operação. Para as diferentes frequências, o fluxo de potência harmônica ativa e reativa em um mesmo ponto de medição pode estar em um sentido diferente, assim como pode ser invertido de acordo com a entrada ou saída de cargas elétricas na instalação.

7. CONCLUSÕES

Muito embora as considerações, análises e comentários explorados ao longo de cada capítulo a respeito das contribuições alcançadas, considera-se essencial, neste momento, sintetizar os principais aspectos, contribuições e avanços obtidos ao longo da pesquisa. O trabalho aqui desenvolvido apresentou-se imbuído do propósito de desenvolvimento de uma nova metodologia para agregação dos ângulos de fase referentes às componentes harmônicas para um intervalo de tempo específico de medição. Para alcançar este propósito várias medições foram realizadas, em laboratório e em campo, com intuito de obter subsídios para desenvolvimento desta nova técnica.

Inicialmente, o capítulo 1 direcionou-se à contextualização do tema central deste trabalho, apresentando, em termos gerais, a aplicação dos ângulos de fase das componentes harmônicas, os quais, ainda não são contemplados nas metodologias estabelecidas por normas de abrangência mundial, a exemplo das normas IEC 61.000-4-7 e IEC 61.000-4-30. Estas normas apresentam apenas a metodologia de agregação das amplitudes das tensões e das correntes harmônicas, para intervalos específicos, desprezando-se assim, os ângulos de fase das componentes harmônicas. Ao final deste capítulo, foram definidas as diretrizes, assim como uma síntese da estrutura geral desta Tese.

O capítulo 2 apresentou os fundamentos teóricos referente as ferramentas matemáticas utilizadas para o cálculo das amplitudes e ângulos de fase das componentes harmônicas, a partir de formas de onda de tensão e de corrente. Assim, utilizando a Transformada Discreta de Fourier para uma forma de onda qualquer, a resolução do espectro de frequências dependerá do tamanho da janela de aplicação, ou seja, quantos ciclos são considerados no cálculo da TDF. Adicionalmente, mostrou-se também os efeitos dos ângulos de fase das componentes harmônicas na aparência da forma de onda. Neste contexto, foi apresentado que duas formas de ondas distintas podem apresentar espectros de frequências para as amplitudes iguais, porém, analisando o espectro de frequências para os ângulos de fase, constata-se as diferenças entre as formas de onda. Outro aspecto mostrado diz respeito às normatizações para medição das amplitudes das componentes harmônicas de tensão e de corrente. Destacando as normas IEC 61.000-4-7 e a IEC 61.000-4-30, a primeira destina-se aos procedimentos que os instrumentos de medição devem seguir para obter tais grandezas, apresentando desde os cálculos da TDF, passando pelos agrupamentos harmônicos, filtros até a verificação de conformidade. Já a segunda norma traz as orientações a respeito das agregações temporais, mencionando apenas

as amplitudes das tensões e das correntes, conforme o intervalo de agregação desejado. Por fim, duas metodologias encontradas nas referências bibliográficas foram abortadas, nomeadas aqui como Método 1 e Método 2. A primeira, considera que os ângulos de fase das componentes harmônicas são obtidos a partir do argumento da soma fasorial de todos os elementos, dentro de uma janela de agregação, oriundos da TDF. É apresentado ainda, uma técnica para avaliação da conformidade dos ângulos de fase agregados, definida como nível de prevalência. Para realizar esta avaliação, foram criadas quatro faixas de classificações, indo desde o nível de alta prevalência até o nível considerado sem prevalência. Já o segundo método, trata-se de apenas uma forma de apresentar um ângulo de fase para as componentes harmônicas, uma vez que se usa os ângulos da última janela de aplicação da TDF para o período de agregação.

No capítulo 3, focou-se nas análises dos comportamentos dos ângulos de fase das componentes harmônicas, de tensão e de corrente, para equipamentos operando de forma isolada, para instalações em baixa tensão e ainda, para um alimentador em média tensão. Considerando-se os equipamentos alimentados isoladamente, notou-se que as correntes harmônicas tendem a permanecer em uma direção específica. Porém, como constatado, o sentido dos fluxos das energias harmônicas, para cada equipamento, e ainda, para cada ordem harmônica, apresentam-se de forma bem distintas. Assim, não é possível determinar que os fluxos das energias harmônicas para equipamentos, seguem o sentido carga-fonte ou fonte-carga. Para as instalações conectadas à rede em baixa tensão, os fluxos se apresentaram com uma certa aleatoriedade ao longo do dia. Foi visto que em um determinado instante, e para uma ordem harmônica específica, o fluxo de energia harmônica permaneceu no sentido carga-fonte e em um outro instante, alternou-se para fonte-carga. Desta forma, conforme os equipamentos entram e saem de operação em uma instalação, os fluxos de energia harmônica podem inverter de sentido. Para o alimentador em média tensão, os resultados se apresentaram com um comportamento, no tocante ao fluxo de energia harmônica, seguindo uma certa tendência de direção durante as 24 horas de observação.

O tema referente a agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas é um tema com poucos trabalhos publicados até o momento. Dessa forma, o capítulo 4 foi desenvolvido com o objetivo de realizar uma análise crítica dos dois métodos de agregações, para os ângulos de fase das componentes harmônicas, encontrados nas referências bibliográficas. Para tal, apresentou-se as formas de onda de tensão e de correntes, obtidas a partir de uma medição realizada em uma instalação do tipo residencial, das quais calculou-se as energias harmônicas representativas do período de agregação. Estes dados serviram como

referência para as análises das energias harmônicas calculadas com as grandezas agregadas. Para o caso em que se utilizou dos dados provenientes do Método 1, juntamente com as amplitudes agregadas conforme norma IEC, as energias harmônicas ativas se apresentaram com consideráveis discrepâncias quando comparadas com as energias harmônicas de referência. Para o caso da 5ª harmônica em específico, o erro foi de aproximadamente 50%. Para o Método 2, as diferenças foram ainda mais acentuadas, sugerindo que o uso dos dados obtidos a partir deste método não é aconselhável. A causa maior dessas divergências está relacionada com a forma de obtenção dos dados, uma vez que não existe um embasamento físico para tal.

Para atender o objetivo principal deste trabalho, no capítulo 5 foi proposta uma nova metodologia para realizar as agregações temporais dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente. Esta metodologia é baseada no fluxo de energia harmônica real no ponto de medição, com isso, utilizando os dados obtidos através de medições é possível representar de forma fidedigna o comportamento físico real no ponto de medição. Todo o desenvolvimento matemático foi apresentado, o qual consiste em duas vias de cálculo, sendo uma para as agregações dos ângulos de fase das tensões harmônicas e uma outra para as correntes harmônicas. Ao final do capítulo foi realizado uma avaliação da metodologia utilizando o mesmo princípio do capítulo anterior, incluindo uma análise comparativa com as outras metodologias disponíveis na literatura. Os resultados obtidos utilizando a metodologia proposta se mostraram satisfatórios, uma vez que os fluxos de energia harmônica, calculados utilizando as grandezas agregadas, apresentaram resultados condizentes com os fluxos de energia harmônica real no ponto de monitoração.

No capítulo 6 foi apresentado um analisador de parâmetros de Qualidade da Energia Elétrica com a metodologia aqui proposta implementada. A partir de uma parceria com um fabricante, foi fornecido a metodologia para implementação no medidor. Para avaliação do desempenho do equipamento em relação a metodologia proposta, o mesmo foi submetido a uma bateria de teste em laboratório utilizando uma fonte controlada. Em todos os testes realizados, os resultados obtidos se mostraram em conformidade com o sinal programado na fonte, tornando o medidor apto para aplicação em campo. A última etapa do trabalho foi realizar uma minicampanha de medição com objetivo de verificar o comportamento dos ângulos de fase das componentes harmônicas e verificar os fluxos de potência harmônica em diferentes instalações elétricas conectadas a rede elétrica. Foram realizadas 7 medições em diferentes instalações, sendo 3 do tipo residencial, 2 comercial e 2 industrial com alimentação em média tensão. Os resultados obtidos demonstraram que os ângulos de fase para as componentes harmônicas de

corrente apresentam comportamentos intrínsecos as cargas em operação. Em um mesmo instante, de acordo com as cargas em funcionamento, os fluxos de potência harmônica ativa e reativa podem estar em sentidos diferentes conforme a ordem harmônica analisada, podendo inclusive, inverter de sentido em caso de mudança de carga.

Finalmente, o trabalho desenvolvido mostrou que os ângulos de fase das componentes harmônicas, necessários para os estudos de fluxo de potência harmônica, podem ser obtidos através de medições. Neste sentido, utilizando medidores com a metodologia proposta, é possível agora realizar campanhas de medição visando a caracterização das correntes harmônicas para as diversas classes de unidades consumidoras, tanto em termos de amplitudes quanto também de ângulos de fase.

7.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante de todas as constatações apresentadas e reconhecendo a relevância do tema abordado, ficam as seguintes sugestões para trabalhos futuros.

- Realização de uma campanha de medição considerando diferentes classes de unidades consumidoras do sistema de distribuição em baixa e média tensão. O objetivo desta campanha seria levantar a tipologia harmônica, considerando tanto as amplitudes quanto os ângulos de fase das componentes harmônicas, estratificada por classe e faixa de consumo. Além de medição em instalações residenciais, realizar medição no lado de baixa tensão de transformadores de distribuição instalados em alimentadores que atendem na maioria instalações residenciais, contribuindo assim, para a caracterização deste tipo de instalação.
- Realização de estudos de fluxo de potência harmônico considerando os resultados obtidos através da campanha de medição. Quantificar o impacto nas perdas técnicas de um sistemas de distribuição com a utilização de espectros harmônicos resultantes da campanha de medição.
- Realizar um estudo para levantamento dos desvios admissíveis por parte dos medidores para as grandezas referentes aos ângulos de fase das componentes harmônicas.

- Realizar uma avaliação quanto aos erros intrínsecos dos transdutores de corrente em relação aos ângulos de fase.

7.2 TRABALHOS PUBLICADOS AO LONGO DO DOUTORADO

Ao longo do doutorado foram produzidos os seguintes trabalhos:

- **G. L. Xavier** e J. R. Macedo Jr, “Assessment on the Behavior of Harmonic Phase Angles”, aceito para publicação em *IEEE Latin America Transactions*, 2020. (Qualis CAPES B2)
- **G. L. Xavier** e J. R. Macedo Jr, “Caracterização dos ângulos de fase das componentes harmônicas”, *O Setor Elétrico*, 2020.
- **G. L. Xavier** e J. R. Macedo Jr, “Proposition of a Methodology for Temporal Aggregation of Harmonic Phase Angles in Power Quality Measurements”, *XIII CLAGTEE - Congresso Latin-Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica*, 2019, Santiago - Chile.
- **G. L. Xavier** e J. R. Macedo Jr, “Análise do Comportamento dos Ângulos de Fase das Componentes Harmônicas”, *XIII CBQEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*, 2019, São Caetano do Sul - SP.
- J. R. Macedo Jr, **G. L. Xavier**, I. N. Gondin, L. T. S. Oliveira e R. B. de Oliveira, “An update on the performance of active energy meters under non-sinusoidal conditions”, *Electrical Engineering*, 2020. (Qualis CAPES B1)
- **G. L. Xavier**, G. Miyasaka, E. T. Silverio, H. R. J. Silva, L. L. Braz, R. F. B. Oliveira, R. N. C. Lima e J. R. Macedo Jr, “An update on the performance of reactive energy meters under non-sinusoidal conditions”, *Electrical Engineering*, 2020. (Qualis CAPES B1)
- G. Miyasaka, E. T. Silverio, **G. L. Xavier**, H. R. J. Silva, L. L. Braz, R. F. B. Oliveira, R. N. C. Lima e J. R. Macedo Jr, “Analysis of Reactive Energy Measurement Methods Under Non-Sinusoidal Conditions”, *IEEE Latin America Transactions*, 2018. (Qualis CAPES B2)

- **G. L. Xavier**, J. R. Macedo Jr, R. F. B. Oliveira, L. T. S. Oliveira e I. N. Gondim, “Performance Analysis of Active Energy Meters Under Non-Sinusoidal Conditions”, *Latin America Transactions*, 2020. (*Qualis CAPES B2*)
- **G. L. Xavier**, G. Miyasaka, e J. R. Macedo Jr, “Análise do Desempenho de Medidores de Energia Elétrica Ativa em Condições Não-Senoidais”, *XIII CBQEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*, 2019, São Caetano do Sul - SP.
- K. N. C. SILVA, **G. L. Xavier** e J. R. Macedo Jr, “Caracterização das Lâmpadas de Iluminação Pública no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica”, *XIII CBQEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*, 2019, São Caetano do Sul - SP.
- L. M. R. Rodrigues, **G. L. Xavier** e J. R. Macedo Jr, “Analysis of the sensitivity of energy metering devices in face of Voltage Sags”, *XIII CBQEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*, 2019, São Caetano do Sul - SP.
- L. T. S. Oliveira, R. F. B. Oliveira, J. R. Macedo Jr e **G. L. Xavier**, “Performance Analysis of Active Energy Meters in Non-Sinusoidal Conditions”, *VII SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2018, Niterói-RJ.
- K. N. C. SILVA, **G. L. Xavier** e J. R. Macedo Jr, “Household Loads Behavior and Characterization in the Context of Power Quality”, *VII SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2018, Niterói-RJ.
- **G. L. Xavier** e J. R. Macedo Jr, “Caracterização de eventos de VTCD em sistemas de distribuição de energia elétrica”, *XV CEEL - Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica*, 2017, Uberlândia - MG.
- **G. L. Xavier** e J. R. Macedo Jr, “Sistema Hexafásico para Distribuição de Energia Elétrica”, 2017, tutorial disponível em: <http://www.jrubens.eng.br/download/tutorialhexa.pdf>

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. C. Dugan, M. F. McGranagh, S. Santoso e H. W. Beaty, *Electrical power systems quality - Second Edition*, New York: McGraw-Hill, 2003.
- [2] M. H. J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems: voltage sags and interruptions*, New York: IEEE, 2000. <https://doi.org/10.1109/9780470546840>
- [3] A. E. Emanuel, *Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow*, 2010: John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470667149>
- [4] F. C. d. I. Rosa, *Harmonics and power systems*, Taylor & Francis, 2006. <https://doi.org/10.1201/9781420004519>
- [5] IEC 61000-4-7:2002, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto*, Geneva, Switzerland: IEC, 2002.
- [6] IEC 61000-4-30:2008, *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods*, Geneva, Switzerland: IEC, 2008.
- [7] J. Arrillaga e N. R. Watson, *Power System Harmonics*, John Wiley & Sons, 2004. <https://doi.org/10.1002/0470871229>
- [8] F. Guihong e Z. Jing, *Harmonic power detection and measurement device based on harmonic power flow analysis*, International Conference on Electrical Machines and Systems, 2005. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2005.202971>
- [9] A. M. Variz, *Cálculo do fluxo de harmônicas em sistemas trifásicos utilizando o método de injeção de correntes*, Rio de Janeiro: Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- [10] J. Meyer, A. M. Blanco, M. Domagk e P. Schgner, “Assessment of Prevailing Harmonic Current Emission in Public Low-Voltage Networks,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. Vol. 32, 2017. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2558187>
- [11] M. H. Bollen, *The Smart Grid: Adapting the power system to new challenges*, Synthesis Lectures on Power Electronics, 2011. <https://doi.org/10.2200/S00385ED1V01Y201109PEL003>
- [12] A. M. Blanco, R. Stiegler e J. Meyer, “Implementation of harmonic phase angle measurement for power quality instruments,” em *IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, Aachen, Germany, 2016. <https://doi.org/10.1109/AMPS.2016.7602811>
- [13] W. Xu, “Status and Future Directions of Power System Harmonic Analysis,” em *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Denver, CO, USA, 2004. <https://doi.org/10.1109/PES.2004.1372917>
- [14] W. Xu, X. Liu e Y. Liu, “An Investigation on the Validity of Power-Direction Method for Harmonic Source Determination,” *IEEE Transactions On Power Delivery*, vol. Vol. 18, 2003. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2002.803842>
- [15] M. M. Silva, *Estudo de Propagação Harmônica em Redes de Distribuição Considerando A Característica Estocástica das Cargas*, Belo Horizonte: Tese de Doutorado - Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.
- [16] V. E. Wagner, J. C. Balda, T. M. Barnes, A. E. Emmanuel e R. J. Ferraro, “Effects of Harmonics on Equipment - Report of the IEEE Task Force on the Effects of Harmonics

- on Equipment,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1993.
<https://doi.org/10.1109/61.216874>
- [17] A. M. Blanco, J. Meyer e P. Schegner, “Calculation of phase angle diversity for time-varying harmonic currents from grid measurement,” em *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14)*, Cordoba, Spain, 2014.
<https://doi.org/10.24084/repqj12.490>
- [18] A. M. Blanco, J. Meyer e P. Schegner, “Aggregation characteristic of low-order harmonic currents in residential low-voltage networks,” em *IEEE Manchester PowerTech*, Manchester, UK, 2017. <https://doi.org/10.1109/PTC.2017.7981194>
- [19] B. Peterson, J. Rens, G. Botha, A. M. Blanco, J. Meyer e J. Desmet, “Impact of Aggregation Interval on Harmonic Phase Angle Measurements,” em *IEEE 9th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, Bologna, Italy, 2018. <https://doi.org/10.1109/AMPS.2018.8494857>
- [20] B. Peterson, J. Rens e J. Desmet, “Harmonic emission assessment on a distribution network: the opportunity for the prevailing angle in harmonic phasors,” em *24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED)*, Glasgow, UK, 2017. <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.0891>
- [21] M. Schwenke, “Measurement of phase angles of voltage and current harmonics,” Siemens, Berlin, Germany, 2016.
- [22] IMS Soluções em Energia Ltda, “Analisador PowerNET PQA-700,” Porto Alegre, 2018.
- [23] IEC 61000-4-15:2010, *Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-15: Testing and Measurement techniques – Flickermeter - Functional and design specifications*, Geneva, Switzerland: IEC, 2010.
- [24] PRODIST- Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, *Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica*, ANEEL, 2018.