

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FABIANA ALVES PEREIRA

**SEPARAÇÃO CEGA DE FONTES APLICADA AO
COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES SOBRE AS
DISTORÇÕES HARMÔNICAS**

Uberlândia

2022

FABIANA ALVES PEREIRA

**SEPARAÇÃO CEGA DE FONTES APLICADA AO
COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES SOBRE AS
DISTORÇÕES HARMÔNICAS**

Tese de doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em ciências: área de concentração: Engenharia Elétrica.

Orientador: Ivan Nunes Santos

Uberlândia

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

P436s
2022 Pereira, Fabiana Alves, 1991-
 Separação cega de fontes aplicada ao compartilhamento de
 responsabilidades sobre as distorções harmônicas [recurso eletrônico] /
 Fabiana Alves Pereira. - 2022.

 Orientador: Ivan Nunes Santos.
 Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa
 de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
 Modo de acesso: Internet.
 Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2022.5047>
 Inclui bibliografia.

 1. Engenharia Elétrica. I. Santos, Ivan Nunes (Orient.). II.
 Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
 Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

André Carlos Francisco
Bibliotecário – CRB-6/3408

FABIANA ALVES PEREIRA

**SEPARAÇÃO CEGA DE FONTES APLICADA AO COMPARTILHAMENTO DE
RESPONSABILIDADES SOBRE AS DISTORÇÕES HARMÔNICAS**

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutora em Ciências.

Comissão examinadora:

Prof. Dr. Ivan Nunes Santos

(Orientador – UFU)

Prof. Dr. Sérgio Ferreira de Paula Silva

(Examinador – UFU)

Prof. Dr. Lorenço Santos Vasconcelos

(Examinador – UFU)

Prof. Dra. Madeleine Rocio Medrano Castillo Albertini

(Examinador – UFTM)

Prof. Dra. Raquel Cristina Filiagi Gregory

(Examinador – Grupo Equatorial Energia)

Uberlândia, 16 de Dezembro de 2022


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Faculdade de Engenharia Elétrica

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4701/4702 - www.feelt.ufu.br - feelt@ufu.br


ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, 314, PPGEELT				
Data:	Dezesseis de dezembro de dois mil e vinte e dois	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	13:00
Matrícula do Discente:	11823EEL002				
Nome do Discente:	Fabiana Alves Pereira				
Título do Trabalho:	Separação cega de fontes aplicada ao compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas				
Área de concentração:	Sistemas de energia elétrica				
Linha de pesquisa:	Sistemas Elétricos de Potência				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Prof. Ivan Nunes Santos; Título do projeto: Grupo de Pesquisa em Qualidade da Energia Elétrica; Vigência do projeto: 2005 - atual				

Reuniu-se por meio de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Sérgio Ferreira de Paula Silva - FEELT/UFU; Lorenço Santos Vasconcelos - FEELT/UFU; Madeleine Rocio Medrano Castillo Albertini - UFTM; Raquel Cristina Filiagi Gregory - Grupo Equatorial Energia; Ivan Nunes Santos - FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Ivan Nunes Santos, 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 **Madeleine Rocio Medrano Castillo Albertini, Usuário Externo**, em 16/12/2022, às 12:47, 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 **Lorenzo Santos Vasconcelos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 16/12/2022, às 12:47, 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 **Sergio Ferreira de Paula Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 16/12/2022, às 12:47, 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 **Ivan Nunes Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 16/12/2022, às 12:48, 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 **Raquel Cristina Filiagi Gregory, Usuário Externo**, em 16/12/2022, às 12:48, 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 **4143394** e o código CRC **71B21984**.

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho ao meu pai, Fortunato
Pereira dos Santos (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

À Deus.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ivan Nunes Santos, pela orientação, pelo apoio e pela confiança a mim dispensada durante a realização deste trabalho.

Em especial, ao amigo Prof. Dr. Sérgio Ferreira de Paula Silva pelo seu constante incentivo e por sua inestimável e importante contribuição, não apenas para o desenvolvimento dessa pesquisa, mas para toda minha formação acadêmica e profissional.

Aos amigos que compartilharam essa jornada ao meu lado, Arthur Costa, Bruna Beatriz Sousa Silva, Daniel Tobias, Geisa Arruda Zuffi, Karina Mayumi Tsuruta, Livia Joana Coelho de Moura, Lucas Altamirando de Andrade da Rocha, Lúcia Helena Mendonça Costa, Marcus Antonio Viana Duarte, Sérgio Santiago (*in memoriam*), Wagner Vanço e a todos os outros cujos nomes não estão aqui, mas que também são muito importantes para mim.

Aos meus amores, minha mãe Doralice Dias de Moraes Pereira, minha irmã Deize Aparecida Pereira e minha sobrinha Ana Clara Pereira, pois sem elas nada disso seria possível.

Por fim, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido para a realização dessa pesquisa.

RESUMO

Um dos desafios dos sistemas elétricos de potência consiste em estabelecer um método confiável que permita atribuir e quantificar a responsabilidade sobre as distorções harmônicas presentes no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) entre a concessionária de energia elétrica e o consumidor. Essa dificuldade advém do fato que as distorções harmônicas medidas no PAC consistem em uma mistura não identificável de ambas as partes. Assim sendo, torna-se evidente a correlação existente entre o compartilhamento de responsabilidades harmônicas e o clássico problema da Separação Cega de Fontes (BSS, *Blind Source Separation*), que busca separar os sinais que compõem uma mistura observada, sem, no entanto, possuir quaisquer informações prévias sobre os mesmos e a forma como foram misturados. Neste contexto, esta tese almeja o desenvolvimento e a avaliação de uma metodologia não-invasiva, baseada em métodos para BSS, para promoção efetiva do compartilhamento das responsabilidades harmônicas entre fornecedores e consumidores usando apenas os dados de corrente e tensão obtidos no PAC. Mais especificamente, devido à natureza das cargas elétricas, a metodologia aqui apresentada será fundamentada nos métodos para BSS baseados na Análise de Componentes Independentes (ICA, *Independent Component Analysis*) e serão avaliados tanto computacionalmente, quanto experimentalmente para diferentes condições de operação e comparados com outros métodos propostos na literatura.

Palavras-chave: Análise de componentes Independentes, contribuições harmônicas, método não-invasivo, qualidade de energia, separação cega de fontes.

ABSTRACT

One of the greatest challenges in power quality has been, and still is, the establishing of a reliable non-invasive method for qualifying and quantifying the harmonic contributions of an electric utility and consumer at the Point of Common Coupling (PCC). This difficulty arises from the fact that the harmonic distortions measured at the PCC are unidentifiable mixtures from both parties. In this way, it becomes evident the correlation between sharing harmonic responsibility and the classical Blind Source Separation problem (BSS), which seeks to separate the signals that composed an observed mixture, without, however, having previous information about the original ones and the way they were mixed. In this context, this work aims to develop and evaluate a non-invasive methodology, based on BSS methods, capable to effectively promote the sharing of harmonic responsibilities between electric utility and consumer at the PCC. More specifically, due to the nature of electrical loads, the methodology presented here will be based on BSS methods based on Independent Component Analysis (ICA) and will be evaluated both computationally and experimentally for different operating conditions and then, the results will be compared with other methods proposed in the literature.

Keywords: Blind source separation, independent component analysis, harmonic contributions, non-invasive methods, power quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Circuito equivalente de Norton para a h-ésima ordem harmônica na PAC.....	27
Figura 2.2 - Circuito equivalente utilizado no método linear regressivo.	31
Figura 2.3 - Fonte de correntes harmônicas do sistema supridor (I_{uh}) e do consumidor (I_{ch}) utilizadas para comparação dos métodos não invasivos apresentados.	34
Figura 2.4 - Tensão e corrente simuladas no PAC para a 5ª ordem harmônica do caso 01. (a) Parte real da tensão harmônica observada no PAC. (b) Parte imaginária da tensão harmônica observada no PAC. (c) Parte real da corrente harmônica observada no PAC. (d) Parte imaginária da corrente harmônica observada no PAC.	35
Figura 2.5 – Projeção fasorial da tensão harmônica do consumidor e do supridor sobre a tensão total no PAC.	36
Figura 2.6 – Compartilhamento de responsabilidades sobre a 5ª ordem harmônica do Caso 01 usando métodos não-invasivos. (a) Parte real da tensão harmônica do consumidor. (b) Parte imaginária da tensão harmônica do consumidor. (c) Parte real da tensão harmônica do sistema supridor. (d) Parte imaginária da tensão harmônica do sistema supridor.....	36
Figura 2.7 – Contribuição harmônica do sistema supridor e do consumidor estimadas para a 5ª ordem do Caso 01.	37
Figura 2.8 - Tensão e corrente simuladas no PAC para a 5ª ordem harmônica do Caso 02. ...	37
Figura 2.9 – Compartilhamento de responsabilidades sobre a 5ª ordem harmônica do Caso ..	38
Figura 2.10 – Contribuição harmônica do sistema supridor e do consumidor estimadas para a 5ª ordem.....	38
Figura 2.11 - Tensão e corrente simuladas no PAC para a 5ª ordem harmônica do Caso 03. .	39
Figura 2.12 – Compartilhamento de responsabilidades sobre a 5ª ordem harmônica usando métodos não-invasivos.	40
Figura 2.13 – Contribuição harmônica do sistema supridor e do consumidor estimadas para a 5ª ordem.....	40
Figura 3.1 - Ilustração do <i>cocktail party problem</i>	41
Figura 3.2 - Fontes de sinais originais.....	43
Figura 3.3 - Misturas observadas.....	43

Figura 3.4 – Ilustração de um processo de branqueamento dos dados. Nos gráficos, as estrelas vermelhas representam as misturas observadas, as estrelas azuis são os dados projetados no espaço PCA e as verdes as projeções normalizadas.	45
Figura 3.5 – Diagrama de dispersão das fontes de sinais apresentadas na Figura 3.2 e Figura 3.3. (a) Diagrama de dispersão das fontes originais. (b) Diagrama de dispersão das misturas observadas.	46
Figura 3.6 – Distribuição multivariada de duas variáveis independentes gaussianas.	46
Figura 3.7 – Fontes estimadas através das misturas observadas apresentadas na Figura 3.3 usando o método ICA.	47
Figura 3.8 – Histograma das fontes de sinais originais e das misturas anteriormente apresentadas nas Figura 3.2 e Figura 3.3, respectivamente.	48
Figura 3.9 - Funções densidade de probabilidade das distribuições super gaussiana, sub gaussiana e gaussiana.	49
Figura 4.1 – Circuitos equivalentes de Norton utilizados na aplicação do teorema da superposição. (a) Apenas a contribuição do sistema supridor é considerada. (b) Apenas a contribuição do consumidor é considerada.	55
Figura 4.2 - Diagrama unifilar do sistema teste.....	60
Figura 4.3 - Fonte de correntes harmônicas do sistema supridor (I_{uh}) e do consumidor (I_{ch}) utilizadas na primeira etapa da avaliação computacional.....	62
Figura 4.4 - Tensão e corrente simuladas no PAC para a 3ª ordem harmônica do Caso 1.1. ...	63
Figura 4.5 – Tensão e corrente simuladas no PAC para a 5ª ordem harmônica do Caso 1.1...64	64
Figura 4.6 – Tensão e corrente simuladas no PAC para a 7ª ordem harmônica do Caso 1.1...64	64
Figura 4.7 – Tensões harmônicas estimadas no Caso 1.1 para a 3ª ordem harmônica.....	66
Figura 4.8 – Tensões harmônicas estimadas no Caso 1.1 para a 5ª ordem harmônica.....	66
Figura 4.9 – Tensões harmônicas estimadas no Caso 1.1 para a 7ª ordem harmônica.....	67
Figura 4.10 – Contribuição harmônica do sistema supridor e do consumidor estimadas para a 3ª, 5ª e 7ª ordem harmônica do Caso 1.1.	68
Figura 4.11 - Fontes de correntes harmônicas com diferentes amplitudes usadas para avaliar o erro de estimativa nos algoritmos ICA.	70
Figura 4.12 – Impedância harmônica do consumidor utilizada no Caso 1.2.....	72
Figura 4.13 - Tensão e corrente simuladas no PAC para a 3ª ordem harmônica no Caso 1.2. 73	73
Figura 4.14 - Tensão e corrente simuladas no PAC para a 5ª ordem harmônica no Caso 1.2. 73	73
Figura 4.15 - Tensão e corrente simuladas no PAC para a 7ª ordem harmônica no Caso 1.2. 74	74

Figura 4.16 – Tensões harmônicas estimadas no Caso 1.2 para a 3ª ordem harmônica.....	74
Figura 4.17 – Tensões harmônicas estimadas no Caso 1.2 para a 5ª ordem harmônica.....	75
Figura 4.18 – Tensões harmônicas estimadas no Caso 1.2 para a 7ª ordem harmônica.....	75
Figura 4.19 – Contribuição harmônica do sistema supridor e do consumidor estimadas para a 3ª, 5ª e 7ª ordem harmônica do Caso 1.2.	76
Figura 4.20 – Contribuição harmônica do sistema supridor e do consumidor estimadas para a 3ª, 5ª e 7ª ordem harmônica do Caso 1.2, para as primeiras 50 amostras.	77
Figura 4.21 - Fontes de correntes harmônicas com variâncias de 0,01 e impedâncias constantes.	79
Figura 4.22 - Fontes de correntes harmônicas com variância de 0,1 e impedâncias constantes.	80
Figura 4.23 - MAPE do algoritmo FastICA na atribuição das responsabilidades harmônicas do Caso 2.1.	82
Figura 4.24 - MAPE do algoritmo RobustICA na atribuição das responsabilidades harmônicas do Caso 2.1.	83
Figura 4.25 - MAPE do algoritmo JADE na atribuição das responsabilidades harmônicas do Caso 2.1.	84
Figura 4.26 - MAPE do algoritmo MCCVA na atribuição das responsabilidades harmônicas do Caso 2.1.	85
Figura 4.27 - MAPE do algoritmo FastICA na atribuição das responsabilidades harmônicas do Caso 2.2.	87
Figura 4.28 - MAPE do algoritmo RobustICA na atribuição das responsabilidades harmônicas do Caso 2.2.	88
Figura 4.29 - MAPE do algoritmo JADE na atribuição das responsabilidades harmônicas do Caso 2.2.	89
Figura 4.30 - MAPE do algoritmo MCCVA na atribuição das responsabilidades harmônicas do Caso 2.2.	90
Figura 5.1 – Circuito equivalente de Norton para a h-ésima ordem harmônica com a inserção de uma impedância dominante no PAC.	92
Figura 5.2 – Circuitos equivalentes de Norton utilizados na aplicação do teorema da superposição com a impedância dominante. (a) Apenas a contribuição do sistema supridor é considerada. (b) Apenas a contribuição do consumidor é considerada.	93
Figura 5.3 – Arranjo completo do FMBT implementado em campo, dimensões em mm (vista superior).....	94
Figura 5.4 – Diagrama trifilar do FMBT.....	96

Figura 5.5 – Diagrama unifilar da subestação 6 da UFU.	97
Figura 5.6 – FMBT montado para os ensaios na subestação 6 da UFU no campus Umuarama.	98
Figura 5.7 – Diagrama de conexão dos medidores realizado na subestação 6 da UFU.	99
Figura 5.8 – Potência ativa (a) e reativa (b) durante a realização do ensaio na subestação 6 da UFU.	100
Figura 5.9 - Perfil das distorções harmônicas totais de tensão.	101
Figura 5.10 - Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão no medidor 2 para a 5ª ordem harmônica.	102
Figura 5.11 –Percentual de responsabilidade do sistema supridor pela distorção da 5ª ordem harmônica observada na fase A do PAC.	103
Figura 5.12 –Percentual de responsabilidade do consumidor pela distorção da 5ª ordem harmônica observada na fase A do PAC.	104
Figura 5.13 –Percentual de responsabilidade do sistema supridor pela distorção da 5ª ordem harmônica observada na fase B do PAC.	105
Figura 5.14 –Percentual de responsabilidade do consumidor pela distorção da 5ª ordem harmônica observada na fase B do PAC.	106
Figura 5.15 –Percentual de responsabilidade do consumidor pela distorção da 5ª ordem harmônica observada na fase B do PAC.	106
Figura 5.16 –Percentual de responsabilidade do sistema supridor pela distorção da 5ª ordem harmônica observada na fase C do PAC.	107
Figura 5.17 –Percentual de responsabilidade do consumidor pela distorção da 5ª ordem harmônica observada na fase C do PAC.	108
Figura A.1 – Painel de comando: desenho tridimensional	122
Figura A.2 – Relé de proteção: (a) Funcionalidade. (b) disposição física do equipamento...	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros empregados na simulação das componentes de variação rápida das fontes de correntes.....	34
Tabela 4.1 – Relação entre a impedância harmônica do consumidor e do sistema supridor. ..	60
Tabela 4.2 – Parâmetros empregados na simulação das componentes de variação rápida das fontes de correntes.....	62
Tabela 4.3 – Erro médio absoluto na atribuição das responsabilidades harmônicas do Caso 1.1.	69
Tabela 4.4 – Erro médio absoluto para fontes de correntes harmônicas de amplitude diferente.	71
Tabela 4.5 – Variância adicionada a impedância harmônica do consumidor.	71
Tabela 4.6 – Erro médio absoluto na atribuição das responsabilidades harmônicas do Caso 1.2.	78
Tabela 5.1 – Dados Gerais do Filtro Harmônico Multissintonizado de Baixa Tensão.	95
Tabela 5.2 – Valores estatísticos das distorções totais das tensões em % da fundamental sem e com o filtro harmônico.	101
Tabela 5.3 – Valores estatísticos das distorções individuais de tensões para a 5ª ordem no medidor 1, sem e com o filtro harmônico.....	102
Tabela 5.4 – Valores médios do compartilhamento de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor para a 5ª ordem, fase A, sem e com o filtro harmônico.....	104
Tabela 5.5 – Valores médios do compartilhamento de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor para a 5ª ordem, fase B, sem e com o filtro harmônico.....	105
Tabela 5.6 – Valores médios do compartilhamento de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor para a 5ª ordem, fase C, sem e com o filtro harmônico.	108
Tabela A.1 – Dados das unidades capacitivas	120
Tabela A.2 – Dados das unidades capacitivas	121
Tabela A.3 – Dados dos reatores	121

Tabela A.4 – Indutâncias nominais para cada ordem de sintonia de projeto do FMBT	122
Tabela A.5 – Dados disjuntor tripolar	124
Tabela A.6 – Dados chave seccionadora tripolar	124

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- Matriz de mistura
$E\{\cdot\}$	- Função esperança
$G(\cdot)$	- Função não quadrática
h	- Ordem harmônica
\hat{I}	- Fontes harmônicas de correntes estimadas
i_c^h	- Corrente harmônica resultante das cargas não-lineares do consumidor
i_f^h	- Corrente harmônica que flui pela impedância dominante
i_{PAC}^h	- Corrente harmônica medida no PAC
i_{PAC-in}^h	- Corrente harmônica à montante da impedância dominante
$i_{PAC-out}^h$	- Corrente harmônica à jusante da impedância dominante
i_u^h	- Corrente harmônica proveniente do sistema supridor
k_1, k_2	- Fatores de correções complexos
M	- Número de fontes observadas
N	- Número de fontes independentes
S	- Fontes de Sinais originais
\hat{S}	- Sinais estimados
t	- Tempo
T	- Número de amostras
V_p	- Tensão de pico
\hat{V}_{PAC}^h	- Tensão harmônica medida no PAC
W	- Matriz de separação estimada

- X - Sinais observados
- Y - Sinais de tensão e corrente observados no PAC
- Z_{est} - Valor estimado da impedância
- Z_{real} - Valor real da impedância
- \dot{Z}_f^h - Impedância dominante para ordem harmônica h
- \dot{Z}_c^h - Impedância harmônica equivalente do consumidor
- \dot{Z}_u^h - Impedância harmônica equivalente da concessionária
- y_i - Variáveis aleatórias
- μ - Média
- σ^2 - Variância

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- BSS - Separação cega de fontes (em inglês, *Blind Source Separation*)
- FMBT - Filtro multissintonizado de baixa tensão
- ICA - Análise de Componentes Independentes (em inglês, *Independent Component Analysis*)
- JADE - Diagonalização conjunta aproximada das matrizes próprias (em inglês, *Joint Approximate Diagonalization of Eigenmatrices*)
- Lap - Distribuição de Laplace
- MAPE - Erro Percentual Médio Absoluto
- NMF - Fatoração Matricial Não-negativa (em inglês, *Non-Negative Matrix Factorization*)
- PAC - Ponto de Acoplamento Comum
- PCA - Análise de Componentes Principais (em inglês, *Principal Component Analysis*)
- QEE - Qualidade da Energia Elétrica
- SCA - Análise de Componentes Esparsos (em inglês, *Sparse Component Analysis*)
- SEP - Sistema Elétrico de Potência
- UFU - Universidade Federal de Uberlândia

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	20
1.1.	Objetivos do Trabalho e Contribuições Oferecidas	23
1.2.	Estrutura da Tese	23
2.	MÉTODOS NÃO INVASIVOS PARA O COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES HARMÔNICAS.....	26
2.1.	Método da Flutuação.....	28
2.2.	Método Baseado na Covariância Característica de Vetores Aleatórios (MCCVA)	30
2.3.	Método Linear Regressivo	31
2.4.	Avaliação Computacional dos Métodos Não Invasivos.....	33
2.4.1.	Caso 01 - $Z_{ch} \gg Z_{uh}$	34
2.4.2.	Caso 02 - $Z_{ch} = Z_{uh}$	37
2.4.3.	Caso 03 - $Z_{ch} \ll Z_{uh}$	39
3.	O MÉTODO DE ANÁLISE DE COMPONENTES INDEPENDENTES E O PROBLEMA DA SEPARAÇÃO CEGA DE FONTES	41
3.1.	Separação Cega de Fontes	41
3.2.	Análise de Componentes Independentes	42
3.2.1.	Independência estatística	44
3.2.2.	Variáveis gaussianas.....	45

3.2.3.	Métodos de estimativa ICA	47
3.3.	Algoritmos ICA.....	53
3.3.1.	FastICA.....	53
3.3.2.	RobustICA	53
3.3.3.	JADE	54
3.4.	Restrições e Ambiguidades do Modelo ICA.....	54
4.	ASSOCIAÇÃO DOS MÉTODOS ICA E DA SUPERPOSIÇÃO PARA O COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES HARMÔNICAS	55
4.1.	AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DA METODOLOGIA.....	59
4.2.	1ª ETAPA – AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DA MATRIZ DE IMPEDÂNCIA DO SISTEMA	61
4.2.1.	Caso 1.1 - Impedâncias do sistema supridor e do consumidor constantes	63
4.2.2.	Caso 1.2 – Variação da impedância do consumidor.....	71
4.3.	2ª ETAPA – AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA VARIÂNCIA DAS FONTES	78
4.3.1.	Caso 2.1 – Impedância do sistema supridor e do consumidor constantes	81
4.3.2.	Caso 2.2 - Variação da impedância do consumidor	86
5.	Avaliação Prática de Desempenho dos Algoritmos ICA para o Compartilhamento de Responsabilidades Harmônicas	91
5.1.	Método da Impedância Dominante.....	91
5.2.	Filtro Multissintonizado de Baixa Tensão.....	94
5.3.	Ensaio na Subestação da UFU	96
5.3.1.	Compartilhamento da distorção harmônica individual de tensão (5ª Ordem)	103

6.	CONCLUSÃO.....	109
6.1.	Trabalhos Futuros	111

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

No cenário atual, em que a energia elétrica é parte indispensável do dia a dia de qualquer pessoa, ganham destaque discussões de tópicos relacionados à qualidade da energia elétrica (QEE). Em linhas gerais, no âmbito de sistemas elétricos de potência (SEP), o termo qualidade é uma medida de quão bem a energia fornecida pode ser utilizada pelos consumidores, levando em consideração tanto aspectos relacionados com a continuidade do fornecimento, ou seja, ausência de interrupções, quanto nível de conformidade de parâmetros, tais como distorções harmônicas, flutuações de tensão, variação de tensão de curta duração, desequilíbrios de sistemas trifásicos, transitórios eletromagnéticos, dentre outros [1].

Particularmente, nesse trabalho, dentre os diferentes aspectos que englobam a QEE, destacam-se as distorções harmônicas, amplamente presentes nas redes elétricas devido à mudança da natureza das cargas que formam o complexo elétrico do consumidor [2], [3], no qual é cada vez maior o número de equipamentos com características “não-lineares”, ou seja, dispositivos cuja tensão e corrente não possuem formas de onda similares, tais como eletrônicos, acionamentos de velocidade variável, retificadores, lâmpadas eletrônicas, dentre outros [4]. As correntes distorcidas provenientes destas cargas, ao circularem pelo SEP, além de perturbarem a tensão de alimentação, aumentam as perdas elétricas e podem provocar funcionamento inadequado de equipamentos, interferências e problemas de ressonâncias harmônicas, efeito assaz danoso a todo o sistema.

Assim, considerando o impacto negativo provocado pela existência deste fenômeno, diversas normas buscam, por meio da regulamentação dos níveis de distorções harmônicas totais e individuais, garantir o adequado funcionamento do sistema [5]–[7], sem, no entanto, entrar no mérito da origem das mesmas. Conseqüentemente, via de regra, as distorções harmônicas são objeto de discussão entre diferentes agentes do setor elétrico, a exemplo de consumidores e concessionárias. A falta de consenso entre as partes ocorre porque a medição das tensões e correntes junto ao Ponto de Acoplamento Comum (PAC) contemplam as harmônicas misturadas produzidas por ambos. Desta forma, quando há a necessidade de

redução dos níveis de distorções para adequação às normas vigentes, não é possível quantificar ou separar as contribuições individuais e, conseqüentemente, os investimentos financeiros que cada uma das partes deve dispor.

Para atribuição de responsabilidades quanto à presença de distorções harmônicas, a instalação de componentes como filtros, reatores ou outros, apresentam bons resultados [3], [8]–[11]. Contudo, estes métodos invasivos são de difícil implementação, possuem elevados custos e inserem novos atores no sistema, inviabilizando sua ampla utilização.

Por outro lado, diversos esforços têm sido realizados para promover o compartilhamento das responsabilidades harmônicas de forma não invasiva, utilizando apenas dados de medição provenientes de medidores de qualidade de energia. No entanto, a maioria desses métodos adotam premissas simplificadoras, como a de que a impedância da concessionária é muito menor que a do consumidor, sendo sensíveis a distorções harmônicas de *background* e à variação de frequência [12], [13]. Neste cenário, a utilização de técnicas de Separação Cega de Fontes (BSS, *Blind Source Separation*) para identificação das contribuições harmônicas no PAC se mostra uma alternativa não invasiva bastante promissora e que não requer a instalação de quaisquer componentes físicos.

Basicamente, a BSS é constituída por um conjunto de métodos de aprendizado não supervisionado que têm por objetivo recuperar as fontes originais, que compõem uma mistura observada. O adjetivo “cega” enfatiza que essas fontes são variáveis latentes, o que significa que não são diretamente observáveis, e que não existe, a priori, qualquer informação sobre como foram misturadas [14].

No âmbito dos SEP, mais especificamente da QEE, já existem alguns trabalhos que propõem a utilização de métodos para BSS, tais como: extração das componentes harmônicas e inter-harmônicas [15], [16], levantamento do perfil de cargas harmônicas [17]–[20] e avaliação das impedâncias harmônicas da concessionária [12], [21]–[23] e do consumidor [24], [25] no PAC. Cabe ressaltar, no entanto, que em todos os trabalhos mencionados, a BSS é baseada exclusivamente na Análise de Componentes Independentes (ICA, *Independent Component Analysis*) por meio do clássico algoritmo FastICA e adotam hipóteses simplificadoras, com evidentes fragilidades quanto a aplicação prática.

À título de conhecimento, [20] e [34] foram os primeiros trabalhos publicados a apresentarem metodologias baseadas na ICA para o cálculo da impedância harmônica equivalente do sistema supridor. No entanto, apesar de tais metodologias apresentarem resultados interessantes, se mostrando robustas perante a ocorrência de flutuações harmônicas

na fonte do supridor, elas ainda possuem aplicações bastante limitadas para avaliação da contribuição harmônica, uma vez que se baseiam no pressuposto de que $\dot{Z}_c^h \gg \dot{Z}_u^h$.

Posteriormente, [25] e [24], ambas publicadas no ano de 2016, propuseram uma nova metodologia baseada na ICA para calcular, por meio das tensões e correntes observadas no PAC, tanto a impedância harmônica equivalente do sistema supridor, quanto a do consumidor. Apesar de extremamente semelhantes, essas metodologias diferem na abordagem da identificação das impedâncias do sistema supridor e do consumidor após a separação das fontes, devido as ambiguidades que são intrínsecas do método ICA na recuperação das fontes de sinais.

Além desses trabalhos apresentados, ainda existem outras referências mais atuais que buscam aplicar funções de restrição no método ICA para melhorar o desempenho dessa metodologia no cálculo da impedância do sistema supridor [22] e na avaliação da contribuição harmônica no PAC [13], [23]. No entanto, embora os artigos citados já tenham apresentado uma metodologia interessante para promoção do compartilhamento de responsabilidades através da ICA usando apenas dados de tensão e correntes medidos no PAC, a aplicação dessa técnica ainda não se encontra consolidada devido à complexidade dos métodos para BSS e à ausência de análises mais abrangentes considerando a natureza dos SEP. Por exemplo, nos artigos [21], [24], [25] as avaliações computacionais são realizadas usando fontes de corrente hipotéticas para o sistema supridor e o consumidor com a mesma média e variância, porém, de acordo com [27] e [8] na prática a emissão harmônica do consumidor é mais flutuante que a do sistema supridor. Já os artigos [12], [13], [22], [23] procuram avaliar casos nos quais a fonte do sistema supridor é k vezes maior que a do consumidor, no entanto, a simples multiplicação da fonte de corrente do consumidor por um fator escalar não irá alterar a relação sinal ruído das fontes, ou seja, o nível de variação das fontes permanece proporcional a magnitude das mesmas.

Além disso, através de uma leitura atenta, é possível constatar na literatura que os artigos [25] e [13] até mesmo se contradizem porque, de acordo com [25], os erros de estimativa aumentam quando $|\dot{Z}_u^h| \ll |\dot{Z}_c^h|$ ou quando $|\dot{Z}_u^h| \gg |\dot{Z}_c^h|$, enquanto de acordo com [13], os erros estimados são menores quando $|\dot{Z}_u^h| \ll |\dot{Z}_c^h|$, sendo que, de acordo com os estudos conduzidos durante o desenvolvimento dessa pesquisa, essas conclusões não encontram nenhum respaldo na teoria associada à técnica ICA [28], [29]. Por fim, verifica-se também que, apesar dos artigos levantados apresentarem estudos de campo, os resultados obtidos por meio da metodologia ICA são comparados somente com os de outras metodologias não invasivas. Assim, a promoção do compartilhamento de responsabilidades harmônicas usando os métodos

baseados na ICA carecem ainda de análises mais detalhadas para que sua aplicação seja efetivamente viável.

Portanto, tendo em vista o exposto, este trabalho tem por objetivo contribuir no desenvolvimento de uma metodologia para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas entre o consumidor e a concessionária usando métodos para BSS, considerando, para isso, a teoria que fundamenta os diferentes métodos para BSS, a característica fasorial das tensões e correntes e as reais condições de operações dos SEP.

1.1.Objetivos do Trabalho e Contribuições Oferecidas

O desenvolvimento da presente pesquisa oferece as seguintes contribuições ao estudo dos métodos de atribuição de responsabilidade na questão das distorções harmônicas:

1. Estabelecimento de um procedimento não-invasivo, baseado na BSS, para atribuição da responsabilidade sobre as distorções harmônicas, usando exclusivamente dados de tensão e corrente obtidos no PAC;
2. Ampla investigação dos métodos para BSS adequados para sinais complexos, de forma a encontrar o mais adequado para o problema em questão, levando em consideração as características pertinentes a um SEP;
3. Implementação e adaptação dos algoritmos ICA para avaliação da contribuição harmônica do sistema supridor e do consumidor no PAC;
4. Avaliação computacional em um sistema hipotético em que o sistema supridor com tensões distorcidas alimenta cargas lineares e não-lineares de um dado consumidor;
5. Avaliação da metodologia em um sistema real de médio porte;
6. Comparação dos resultados obtidos através do método ICA com outros métodos propostos e consolidados na literatura, tanto invasivos quanto não invasivos;
7. Análise crítica da acurácia e da aplicabilidade dos diferentes algoritmos ICA no problema do compartilhamento das responsabilidades.

1.2.Estrutura da Tese

Desta forma, considerando os objetivos propostos, o presente trabalho foi dividido em sete capítulos, visando a explanação do desenvolvimento do projeto de forma lógica e

sequencial. Assim, além deste capítulo introdutório, essa proposta de tese apresenta a seguinte estrutura:

Capítulo II – Estado da Arte

É apresentado um compêndio de trabalhos publicados na área do compartilhamento de responsabilidades harmônicas, usando métodos não invasivos. Assim, o principal objetivo deste capítulo é contextualizar o leitor do atual cenário na temática abordada e justificar o desenvolvimento desse trabalho, pontuando os avanços oferecidos no contexto descrito.

Capítulo III – Separação cega de fontes

Nesse capítulo, inicialmente são explicados os fundamentos da BSS, com o enfoque especial nas técnicas baseadas na ICA para sistemas lineares. A abordagem utilizada é bastante didática e busca esclarecer o leitor por meio de um exemplo simplificado e revisões dos principais conceitos estatísticos que norteiam o método. Por fim, é feita uma apresentação dos algoritmos: FastICA, RobustICA e JADE, uma vez que, dentre os disponíveis na literatura, foram os que se mostraram mais adequados para o problema em questão.

Capítulo IV – Associação dos métodos ICA e da superposição para o compartilhamento de responsabilidades

Considerando os objetivos desse trabalho, nesse capítulo é apresentada a associação do clássico método da superposição com o método ICA, para promoção do compartilhamento de responsabilidades usando, exclusivamente, os dados de tensão e corrente medidos no PAC. Todo o detalhamento matemático é apresentado e todas as condições impostas pelo método ICA são verificadas.

Capítulo V – Avaliação computacional

No capítulo IV apresenta-se uma avaliação computacional da metodologia apresentada em um sistema hipotético, no qual ocorrem contribuições harmônicas de ambas as partes envolvidas. Vários casos são analisados visando englobar os diversos aspectos dos SEP; os resultados obtidos são discutidos, bem como a aplicabilidade dos algoritmos analisados.

Capítulo VI – Aplicação da metodologia em um sistema real

Neste capítulo a eficácia do método para BSS é avaliada de forma experimental, com dados provenientes de uma instalação real de médio porte e os resultados obtidos são comparados com os do método invasivo da impedância dominante (MID- Método da Impedância Dominante).

Capítulo VII– Conclusão

Finalmente, no capítulo sete, estão sintetizadas as conclusões obtidas mediante o desenvolvimento desta tese e são apresentadas sugestões para o desenvolvimento de trabalho futuros que carecem ainda de investigação mais detalhada.

REFERÊNCIAS

Nesta seção do documento estão listados os principais documentos utilizados como referência para a realização deste trabalho.

ANEXO

No Anexo A desta tese estão descritas as características dos diversos equipamentos do filtro multissintonizado de baixa tensão, utilizado no ensaio realizado em campo para aplicação da metodologia MID.

CAPÍTULO II

2. MÉTODOS NÃO INVASIVOS PARA O COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES HARMÔNICAS

Neste capítulo apresenta-se o estado da arte da pesquisa sobre a atribuição de responsabilidades harmônicas, visando delinear as contribuições oferecidas por essa tese. Dada a relevância desse tema no âmbito da qualidade da energia elétrica, inúmeros esforços têm sido empregados no desenvolvimento de uma técnica que seja de viável implementação e apresente resultados confiáveis para promoção do compartilhamento. Conseqüentemente, até o momento já foram propostos diferentes métodos que buscam promover o compartilhamento de responsabilidades harmônicas entre o consumidor e o supridor no PAC.

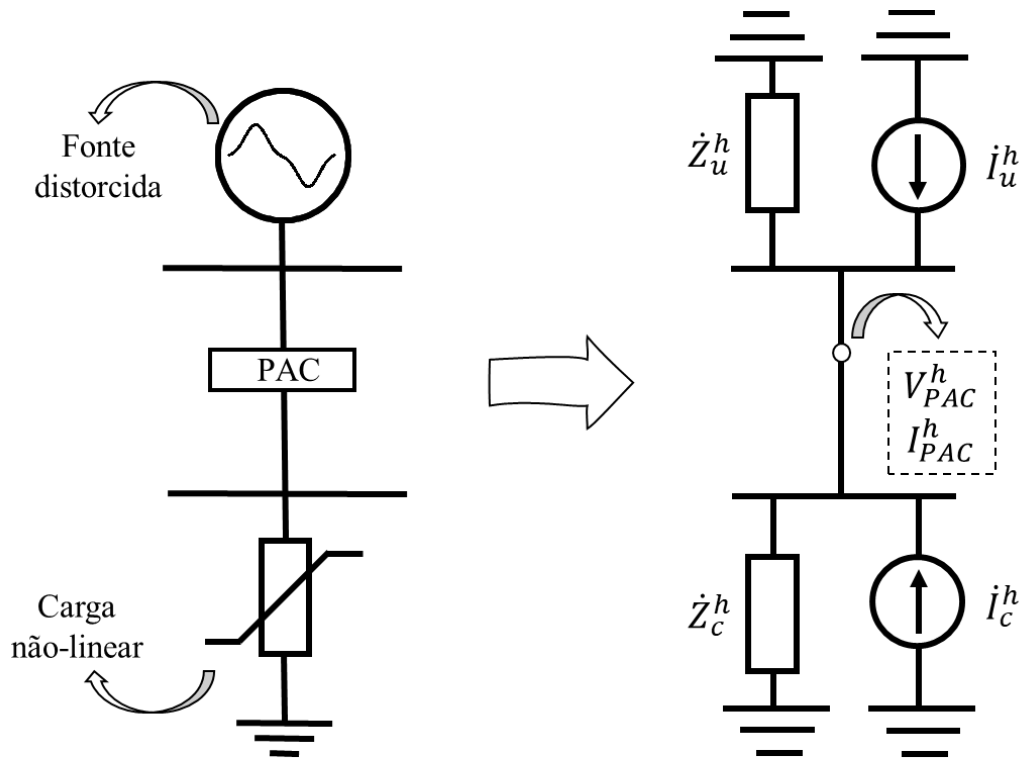
A maioria dos métodos que se encontram disponíveis na literatura baseiam-se na aplicação do princípio da superposição em um circuito equivalente de Norton, conforme ilustra a Figura 2.1, e buscam determinar a contribuição harmônica das partes envolvidas através da estimativa das impedâncias harmônicas equivalentes do sistema supridor e/ou do consumidor. Assim, a depender da abordagem utilizada na obtenção dos parâmetros do circuito equivalente, esses métodos podem ser subclassificados em métodos invasivos e métodos não invasivos [12], [13], [21], [25].

Nos métodos invasivos as impedâncias são determinadas através de perturbações inseridas na rede, tais como injeções de correntes harmônicas ou inter-harmônicas [10], [11], [30], [31]. Geralmente esses métodos oferecem resultados com boa acurácia, no entanto, são de difícil execução porque envolvem a instalação de equipamentos que são de alto custo, principalmente para redes de média e alta tensão. Além disso, esses distúrbios podem provocar um grande impacto na rede e, conseqüentemente, não podem ser realizados de forma imoderada.

Já em contrapartida, os métodos não invasivos utilizam as oscilações naturais da tensão e da corrente provocadas pelas variações das cargas conectadas ao sistema. Assim, essa forma de abordagem é mais simples e requer apenas a utilização de um medidor de qualidade de energia. Vários métodos não invasivos já foram propostos até o momento [21], [27], [32]–[36],

dentre os quais destacam-se nessa tese o método da flutuação, o método Linear Regressivo, o método baseado na covariância característica de vetores aleatórios. Posto isso, a seguir será feita uma breve abordagem crítica sobre cada um desses métodos, buscando enfatizar o princípio, as aplicações e as limitações de cada um deles.

Figura 2.1 - Circuito equivalente de Norton para a h-ésima ordem harmônica na PAC



Onde, na Figura 2.1 tem-se:

- i_c^h - Corrente harmônica resultante das cargas não-lineares do consumidor
- i_u^h - Corrente harmônica proveniente do sistema supridor
- I_{PAC}^h - Corrente harmônica medida no PAC
- V_{PAC}^h - Tensão harmônica medida no PAC
- \dot{Z}_c^h - Impedância harmônica equivalente do consumidor
- \dot{Z}_u^h - Impedância harmônica equivalente do sistema supridor

2.1. Método da Flutuação

O método da flutuação foi proposto pela primeira vez em [27], no ano de 1996, e é fundamentalmente baseado no processamento das variações naturais da tensão e da corrente do sistema. Este método parte do pressuposto de que, como a impedância harmônica do consumidor (\dot{Z}_c^h) para a maioria das frequências sob análise é consideravelmente maior que a impedância harmônica do sistema supridor (\dot{Z}_u^h), ou seja, $\dot{Z}_c^h \gg \dot{Z}_u^h$, a corrente e a tensão no PAC do circuito equivalente de Norton, apresentado na Figura 2.1, podem ser expressas como:

$$i_{PAC}^h \approx i_c^h \quad (2.1)$$

$$\dot{V}_{PAC}^h \approx (i_c^h + i_u^h)\dot{Z}_u^h \quad (2.2)$$

Conseqüentemente, as contribuições harmônicas do consumidor e do supridor podem ser determinadas, respectivamente, através das equações (2.3) e (2.4).

$$\dot{V}_c^h \approx i_{PAC}^h \dot{Z}_u^h \quad (2.3)$$

$$\dot{V}_u^h = \dot{V}_{PAC}^h - \dot{V}_c^h \quad (2.4)$$

Ou seja, nesse cenário a estimativa da contribuição harmônica pode ser simplificada através do cálculo exclusivo da impedância do supridor através da equação (2.5), usando um intervalo de medida muito curto para limitar as flutuações da fonte de corrente do sistema supridor. De acordo com [27], na prática a impedância do supridor deve ser calculada usando a média de apenas 20 amostras com um intervalo de três segundos entre as medições sucessivas.

$$Z_u = \frac{\Delta V_{PAC}}{\Delta I_{PAC}} \left(1 + \frac{\Delta I_u}{\Delta I_{PAC}} \right), \Delta I_u = 0 \quad (2.5)$$

Assim sendo, o procedimento completo, para avaliação da contribuição harmônica de acordo com o método da flutuação pode ser sumarizado nas seguintes etapas [34]:

1. Cálculo da diferença harmônica de amostras adjacentes de U_{PAC}^h, I_{PAC}^h , medidos no PAC para obter as amostras $\Delta U_{PAC}^h, \Delta I_{PAC}^h$;
2. Cálculo do valor médio e da variância de ΔI_{PAC}^h ;
3. Estimativa de \dot{Z}_u^h , através da Eq. (2.5);
4. Avaliação de \dot{V}_c^h e de \dot{V}_u^h , usando as Eq. (2.3) e (2.4), respectivamente.

Pela análise do princípio descrito, conforme evidencia [12] em um estudo computacional, é possível constatar que o método da flutuação irá apresentar erros elevados perante a ocorrência de variações nos parâmetros harmônicos do sistema supridor, isto é, impedância e fonte de corrente harmônica do sistema supridor. Além disso esse método não é aplicável em casos nos quais a fonte harmônica do consumidor não é a fonte dominante no PAC.

Visando superar as limitações do método da flutuação, em [34] uma técnica de filtragem é proposta para melhorar o desempenho do método na atribuição da responsabilidade harmônica do consumidor. Resumidamente, os autores sugeriram a utilização de um parâmetro estatístico denominado fator Nair para selecionar os intervalos de dados nos quais a flutuação harmônica do consumidor é a dominante.

A seleção das amostras de flutuação dominante, deve ser realizada através da Eq. (2.6).

$$\frac{\Delta I_{PAC}(k) - \mu_{\Delta I_{PAC}}}{\sigma_{\Delta I_{PAC}}} > \alpha \quad (2.6)$$

Onde:

$$\mu_{\Delta I_{PAC}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Delta I_{PAC}(k) \quad (2.7)$$

$$\sigma_{\Delta I_{PAC}}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N |\Delta I_{PAC}(k) - \mu_{\Delta I_{PAC}}|^2 \quad (2.8)$$

O coeficiente α , na Eq. (2.6), é proporcional ao nível de dominância do consumidor. Portanto, quanto maior o valor de α mais precisa é a estimativa da impedância harmônica do consumidor. De acordo com [37], um intervalo satisfatório para α é de: $1 < \alpha < 1,5$., obtido através da de diversas simulações e testes em campo.

De acordo com esse princípio de seleção, somente se a variação da corrente harmônica atender ao critério apresentado na Eq.(2.6), essa variação pode ser considerada dominante do lado do consumidor. No entanto, quando o sistema supridor apresenta uma grande perturbação harmônica não existe dados adequados para serem selecionados e, portanto, a inserção desse fator não torna a aplicação deste método efetiva na prática.

2.2.Método Baseado na Covariância Característica de Vetores Aleatórios (MCCVA)

Seguindo o mesmo princípio do método da flutuação, [35] propõem a utilização de um parâmetro estatístico para mensurar a impedância harmônica da concessionária. Assim, partindo também do pressuposto de que $\dot{Z}_c^h \gg \dot{Z}_u^h$, tem-se que a tensão e a corrente no PAC podem ser relacionadas da seguinte forma:

$$\dot{V}_u^h = \dot{V}_{PAC}^h - \dot{I}_{PAC}^h \dot{Z}_u^h = \dot{I}_u^h \dot{Z}_u^h \quad (2.9)$$

Ou seja, tal como expresso na equação (2.1), a corrente harmônica medida no PAC não é correlacionada com a fonte de corrente harmônica do sistema supridor. Portanto, considerando que a covariância entre dois vetores aleatórios independentes é igual a zero, a equação (2.9), pode ser expressa da seguinte maneira:

$$C_{\dot{V}_u^h, \dot{I}_{PAC}^h} = E \left[\left(\dot{I}_{PAC}^h - E(\dot{I}_{PAC}^h) \right)^* \cdot \left(\dot{V}_u^h - E(\dot{V}_u^h) \right) \right] \approx 0 \quad (2.10)$$

Onde:

* - Conjugado do número complexo.

E - Esperança matemática

Com base na equação (2.10), durante um intervalo com n amostras, a parte real e imaginária da impedância harmônica do sistema supridor podem ser obtidas da seguinte forma:

$$\frac{1}{n} \sum_n Z_{u,real} \approx \frac{\sum_n (\delta I_{PAC,real} \delta V_{PAC,real} + \delta I_{PAC,imag} \delta V_{PAC,imag})}{\sum_n (\delta I_{PAC,real}^2 + \delta I_{PAC,imag}^2)} \quad (2.11)$$

$$\frac{1}{n} \sum_n Z_{u,imag} \approx \frac{\sum_n (\delta I_{PAC,real} \delta V_{PAC,imag} + \delta I_{PAC,imag} \delta V_{PAC,real})}{\sum_n (\delta I_{PAC,real}^2 + \delta I_{PAC,imag}^2)} \quad (2.12)$$

Onde:

$$\delta I_{PAC,real} = I_{PAC,real} - \frac{1}{n} \sum_n I_{PAC,real} \quad (2.13)$$

$$\delta I_{PAC,imag} = I_{PAC,imag} - \frac{1}{n} \sum_n I_{PAC,imag} \quad (2.14)$$

$$\delta V_{PAC,real} = V_{PAC,real} - \frac{1}{n} \sum_n V_{PAC,real} \quad (2.15)$$

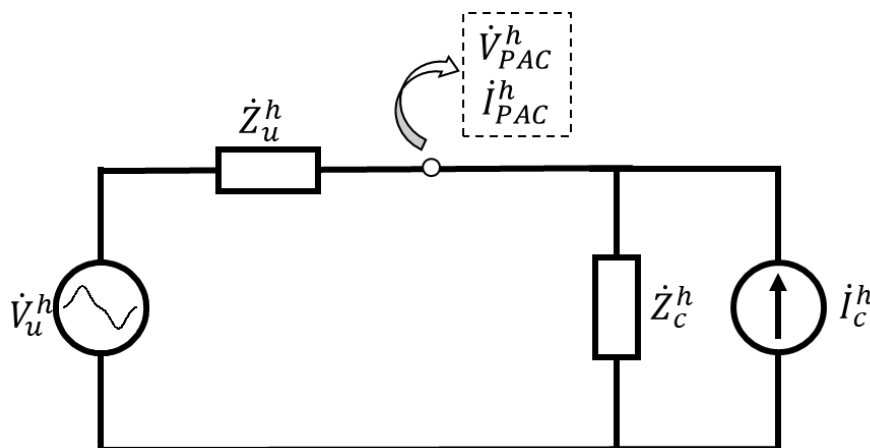
$$\delta V_{PAC,imag} = V_{PAC,imag} - \frac{1}{n} \sum_n V_{PAC,imag} \quad (2.16)$$

Observa-se dessa maneira que, tal como no método da flutuação, a principal limitação desse método consiste na imprescindibilidade de $\dot{Z}_c^h \gg \dot{Z}_u^h$ e no fato dos resultados serem afetados pelas flutuações harmônicas do sistema supridor, conforme evidencia um estudo comparativo de técnicas não invasivas realizados por [12]. Nesse estudo, os autores fazem a comparação de diversas técnicas não invasivas para estimar a impedância harmônica do sistema supridor. Para tal, eles variam os principais parâmetros que influenciam nas respostas dos métodos, isto é: fonte de corrente harmônica e impedância do sistema supridor. Os resultados apresentados pelos autores, comprovam que o MCCVA é bastante sensível a variação de tais parâmetros.

2.3.Método Linear Regressivo

Diferente das outras metodologias abordadas até o momento, para a promoção do compartilhamento de responsabilidades harmônicas usando técnicas de regressão linear, considera-se o circuito equivalente apresentado na Figura 2.2 [32]. Nesse circuito, o sistema supridor é representado através de um circuito equivalente de Thevenin e o consumidor por um circuito equivalente de Norton.

Figura 2.2 - Circuito equivalente utilizado no método linear regressivo.



Partindo do pressuposto de que o sistema supridor geralmente possui comportamento estável, o valor aproximado da contribuição harmônica do consumidor pode ser estimado exclusivamente através do cálculo da impedância do sistema supridor. Assim, do circuito da Figura 2.2, tem-se:

$$\dot{V}_u^h = \dot{V}_{PAC}^h + \dot{I}_{PAC}^h \dot{Z}_u^h \quad (2.17)$$

Separando a parte real e imaginária da equação (2.9), obtém-se então as seguintes equações:

$$V_{u,real}^h = V_{PAC,real}^h + I_{PAC,real}^h Z_{u,real}^h - I_{PAC,imag}^h Z_{u,imag}^h \quad (2.18)$$

$$V_{u,imag}^h = V_{PAC,imag}^h + I_{PAC,imag}^h Z_{u,real}^h - I_{PAC,real}^h Z_{u,imag}^h \quad (2.19)$$

Onde $V_{u,real}^h$, $V_{u,imag}^h$, $Z_{u,real}^h$, $Z_{u,imag}^h$ são os coeficientes obtidos através de métodos de regressão linear [32], [38], [39].

Verifica-se, assim, que a aplicação dessa metodologia também requer, para a obtenção de resultados satisfatórios, que as distorções harmônicas de *background* e a impedância do sistema supridor permaneçam constantes durante o intervalo avaliado, o que nem sempre é factível. Além disso, de acordo com [12] e [38], essa metodologia não pode lidar com as singularidades dos SEP.

Buscando superar as limitações desse método, em [8] uma técnica é proposta para selecionar os dados a serem utilizados para regressão linear. De acordo com observações realizadas pelos autores em dados de campo, quando as distorções harmônicas de *background* são mais estáveis, a tensão e a corrente no PAC podem apresentar uma forte correlação linear. Assim, considerando que durante pequenos intervalos de tempo as fontes de correntes do sistema supridor e do consumidor são independentes, para garantir que as variações observadas sejam provocadas apenas por uma das fontes do circuito equivalente, na prática, basta verificar se a tensão e a corrente no PAC apresentam uma forte relação linear através da equação (2.20).

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{err}}{SS_{tot}} \quad R^2 \in [-1, 1] \quad (2.20)$$

Onde:

$$SS_{err} = \sum_{i=1}^N \left| \dot{V}_{PAC}^h(t_i) - I_{PAC}^h(t_i) Z_u^h - \dot{V}_u^h \right|^2 \quad (2.21)$$

$$SS_{tot} = \sum_{i=1}^N \left| \dot{V}_{PAC}^h(t_i) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \dot{V}_{PAC}^h(t_i) \right|^2 \quad (2.22)$$

Novamente aqui, tal como na proposta da utilização do fator Nair no método da flutuação, o problema reside na necessidade imperativa da disponibilidade de dados que atendam o critério proposto, o que não acontece em casos nos quais a rede está sob ocorrência de uma grande perturbação harmônica ou durante variações simultâneas dos parâmetros do consumidor e da concessionária. Além disso, pode-se verificar em (2.21) e (2.22) que o número de pontos utilizado para verificar a relação entre a tensão e a corrente no PAC apresenta um forte impacto no desempenho do método e é difícil determinação, uma vez que se encontra intrinsecamente relacionado com a característica dos dados.

Por fim, destaca-se que nesse método em questão quanto maior o número de pontos considerado, maior a probabilidade de que tenha ocorrido variações simultâneas das duas fontes e, portanto, a corrente e a tensão não mais estarão linearmente correlacionadas e, conseqüentemente, o resultado obtido por meio da regressão não é fiável. No entanto, de acordo com [8][8], na prática, a corrente harmônica produzida pelo sistema supridor e pelo consumidor comumente durante um curto subperíodo são independentes e essas amostras podem ser selecionadas como amostras utilizáveis, considerando um fator $R^2 = 0,9$. Além disso, os autores, com base em investigações práticas, propõem como quantidade mínima 10 amostra obtidas em um subperíodo de no mínimo 30s para garantir que o algoritmo de regressão linear funcione corretamente.

2.4.Avaliação Computacional dos Métodos Não Invasivos

Uma vez feita a apresentação crítica sobre os principais métodos não invasivos disponíveis na literatura, faz-se interessante uma avaliação computacional comparativa entre eles. Cabe destacar que todas as avaliações numérica realizadas nesse trabalho utilizaram como referência o sistema teste proposto anteriormente por [4], e melhor detalhado no Capítulo 4 deste trabalho, no item 4.1. No entanto, nesse tópico para demonstrar as fragilidades dos métodos em questão, as relações das impedâncias entre o sistema supridor e a unidade consumidora foram amplificadas, tal como mostra a Tabela 2.1.

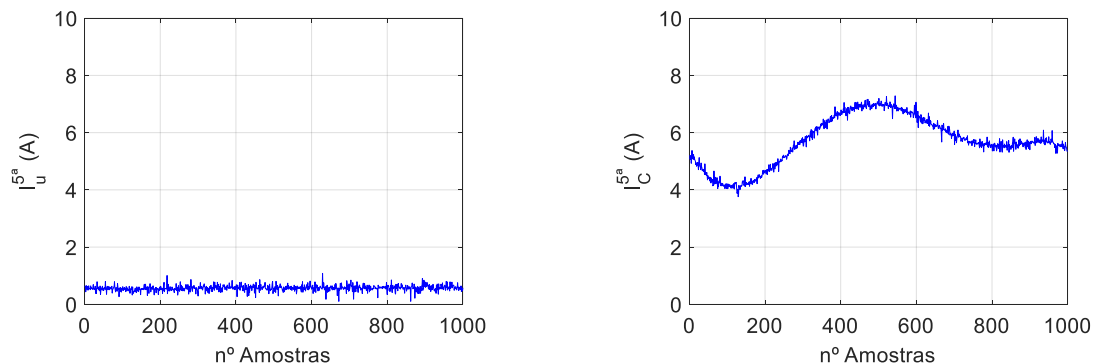
Posto isso, para avaliação computacional foi realizada a análise da 5ª ordem harmônica de um sistema hipotético para três casos específicos. Ou seja, no primeiro caso avaliou-se um sistema no qual a impedância do consumidor era dez vezes maior que a impedância do sistema supridor, no segundo caso, avaliou-se um sistema com a impedância do consumidor igual à do sistema supridor e, por fim, no terceiro caso um sistema com a impedância do sistema supridor dez vezes maior que a do consumidor.

Tabela 2.1 – Parâmetros empregados na simulação das componentes de variação rápida das fontes de correntes.

Caso	Relação $ \dot{Z}_c^{5a} / \dot{Z}_u^{5a} $
Caso 01	10
Caso 02	1
Caso 03	0.1

Apesar das limitações existentes em alguns dos métodos apresentados, para as análises em questão, optou-se por considerar um sistema complexo, capaz de avaliar efetivamente o desempenho e acurácia dos mesmos. Assim, foi considerado um sistema com contribuições harmônicas tanto do consumidor, quanto do sistema supridor. A Figura 2.3 mostra as fontes de correntes harmônicas utilizadas para gerar os dados de tensão e corrente no PAC nos três casos avaliados para o sistema suprido (I_U^{5a}) e para o consumidor (I_C^{5a}).

Figura 2.3 - Fonte de correntes harmônicas do sistema supridor (I_u^h) e do consumidor (I_c^h) utilizadas para comparação dos métodos não invasivos apresentados.

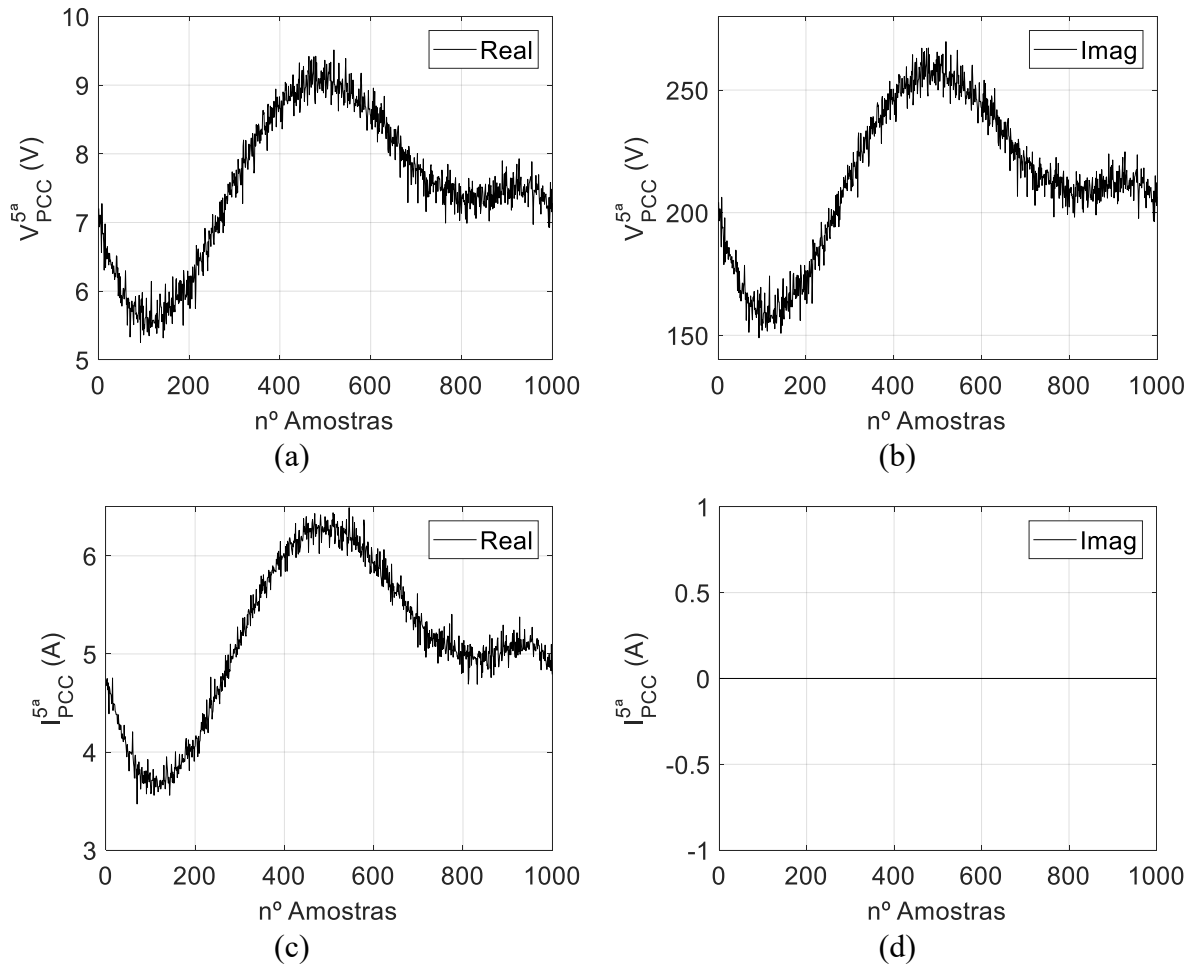


2.4.1. Caso 01 - $|\dot{Z}_c^h| \gg |\dot{Z}_u^h|$

Conforme esclarecido anteriormente, nesse primeiro caso é considerado um sistema cuja impedância do consumidor é dez vezes maior que a impedância do sistema supridor, ou seja,

um sistema no qual $|\dot{Z}_c^h| \gg |\dot{Z}_u^h|$. Assim, partindo de tal pressuposto, e considerando as fontes de correntes apresentadas na Figura 2.3, gerou-se os dados de tensão e corrente no PAC mostrados na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Tensão e corrente simuladas no PAC para a 5ª ordem harmônica do caso 01. (a) Parte real da tensão harmônica observada no PAC. (b) Parte imaginária da tensão harmônica observada no PAC. (c) Parte real da corrente harmônica observada no PAC. (d) Parte imaginária da corrente harmônica observada no PAC.



Os resultados do compartilhamento, aplicando as metodologias apresentadas, são mostrados na Figura 2.6. Conforme pode-se observar, de uma forma geral, para esse caso em específico, no qual a impedância do sistema consumidor é muito maior que a impedância do sistema supridor, todos os métodos não invasivos avaliados foram capazes de atribuir corretamente o principal responsável pela distorção harmônica observada no PAC com valores muito próximos do esperado, ou seja, do valor denominado “Real”.

Para facilitar a análise dos resultados, os percentuais da parcela de responsabilidade de cada uma das partes também são apresentados na Figura 2.7 de forma escalar, através de uma simples projeção dos fasores, conforme ilustrado na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Projeção fasorial da tensão harmônica do consumidor e do supridor sobre a tensão total no PAC.

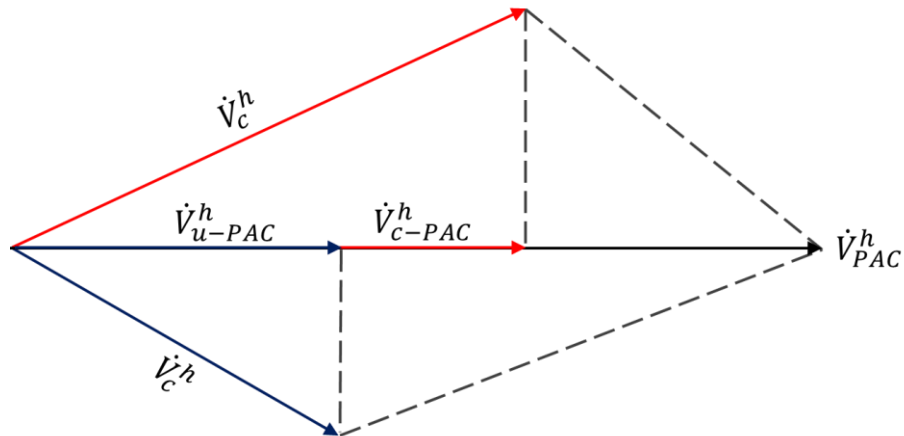


Figura 2.6 – Compartilhamento de responsabilidades sobre a 5ª ordem harmônica do Caso 01 usando métodos não-invasivos. (a) Parte real da tensão harmônica do consumidor. (b) Parte imaginária da tensão harmônica do consumidor. (c) Parte real da tensão harmônica do sistema supridor. (d) Parte imaginária da tensão harmônica do sistema supridor.

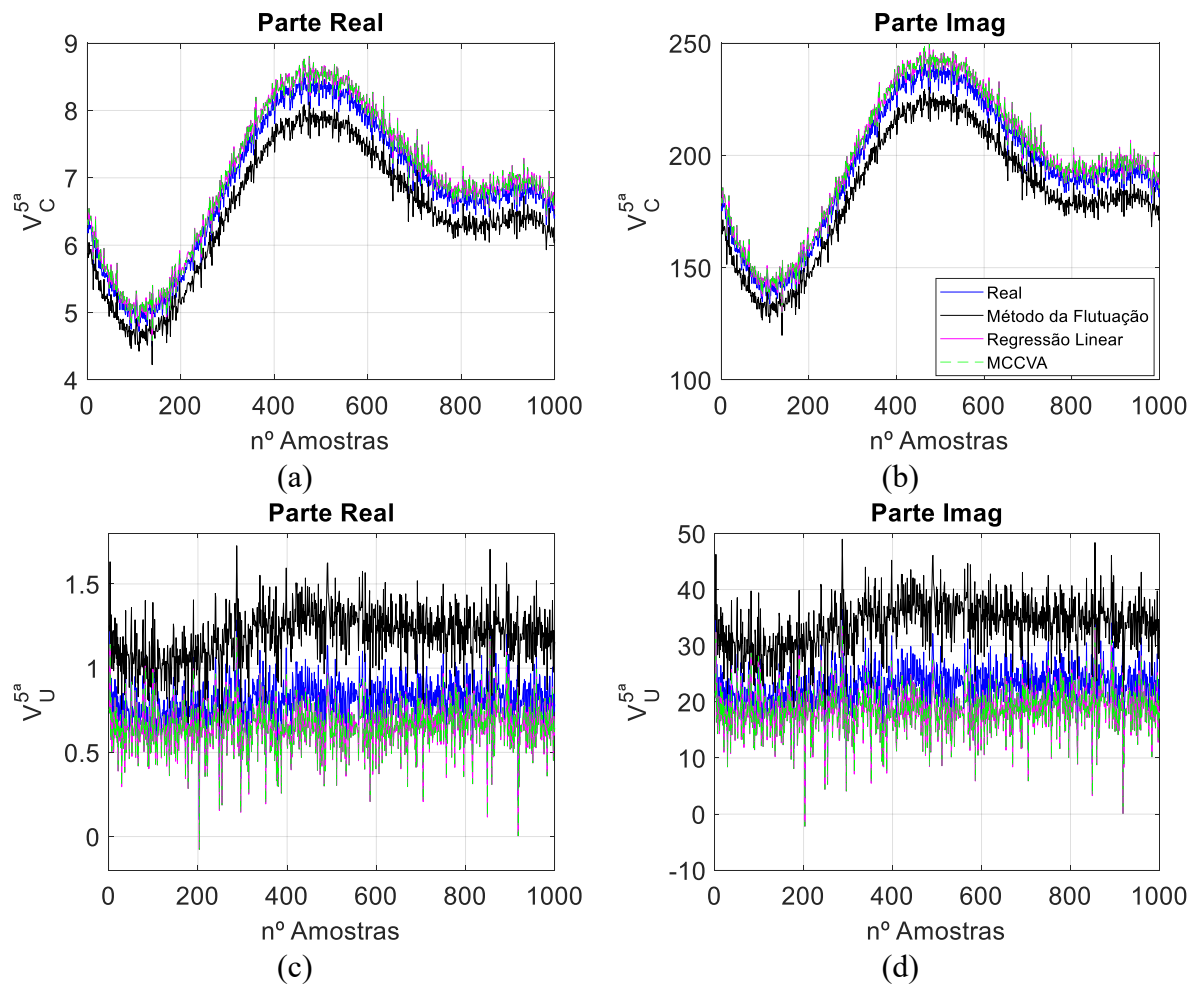
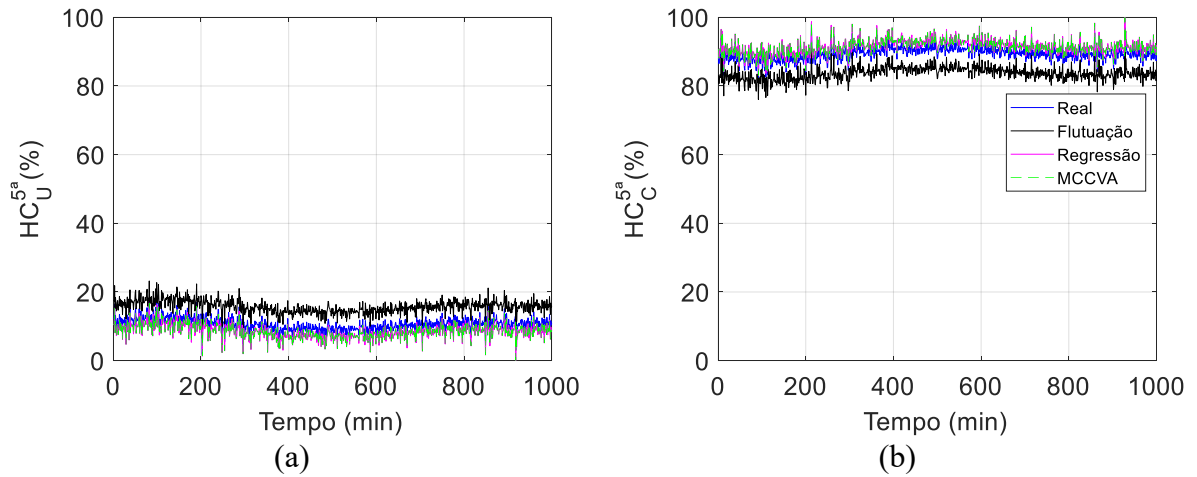


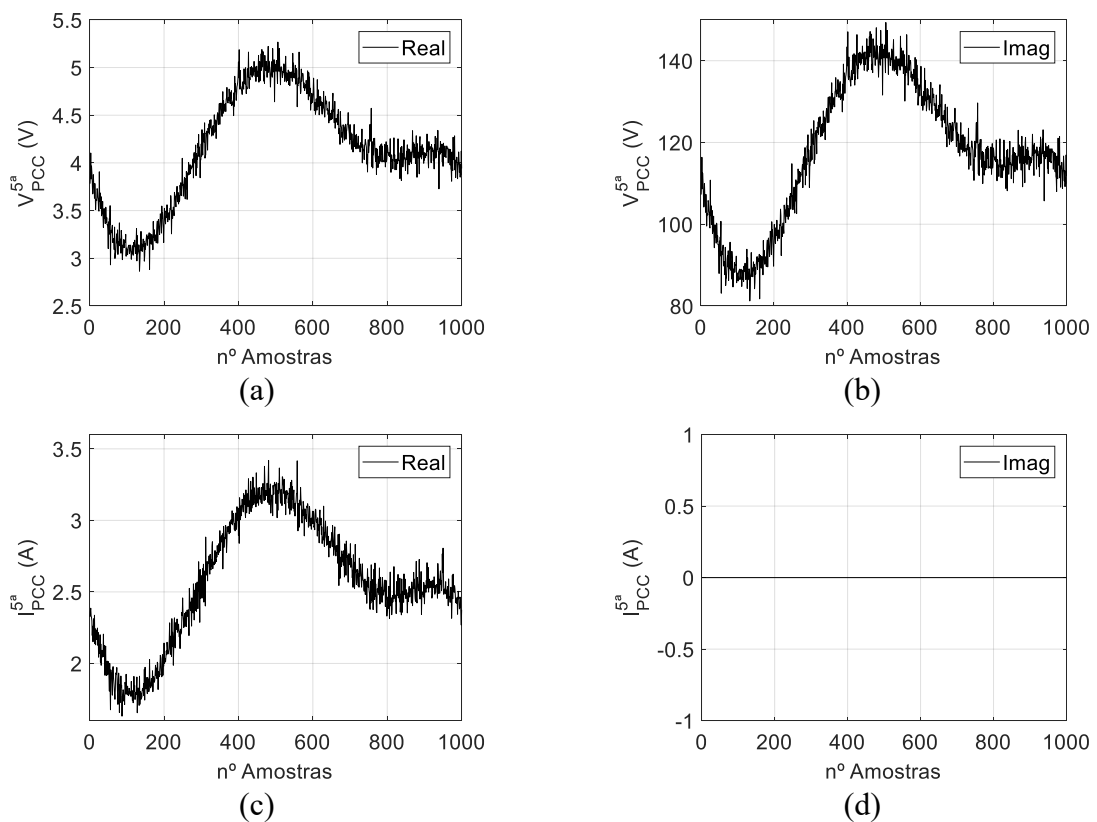
Figura 2.7 – Contribuição harmônica do sistema supridor e do consumidor estimadas para a 5ª ordem do Caso 01.



2.4.2. Caso 02 - $|\dot{Z}_c^h| = |\dot{Z}_u^h|$.

Nesse segundo caso avaliado, considerou-se um caso bastante particular no qual a impedância do sistema supridor e do sistema consumidor são iguais, ou seja, matematicamente $|\dot{Z}_c^h| = |\dot{Z}_u^h|$. A Figura 2.8 mostra os dados de tensão e correntes gerados no PAC para esse caso em questão.

Figura 2.8 - Tensão e corrente simuladas no PAC para a 5ª ordem harmônica do Caso 02.



As Figura 2.9 e Figura 2.10, mostram os resultados obtidos para esse segundo caso analisado. Verifica-se por meio de uma análise dos gráficos apresentados que para esse caso em específico houve uma inversão na atribuição da responsabilidade pelo método da Flutuação. Além disso, nota-se também que os métodos Linear Regressivo e MCCVA apresentaram valores com maior discrepância do valor real para esse caso.

Figura 2.9 – Compartilhamento de responsabilidades sobre a 5ª ordem harmônica do Caso

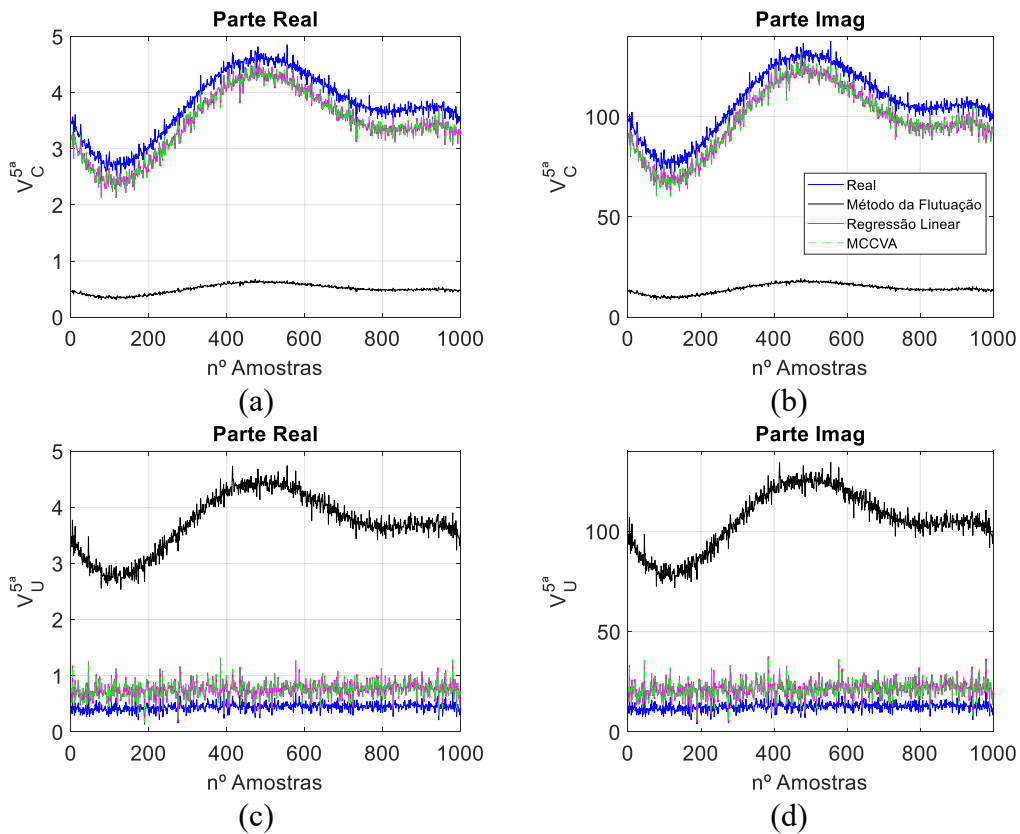
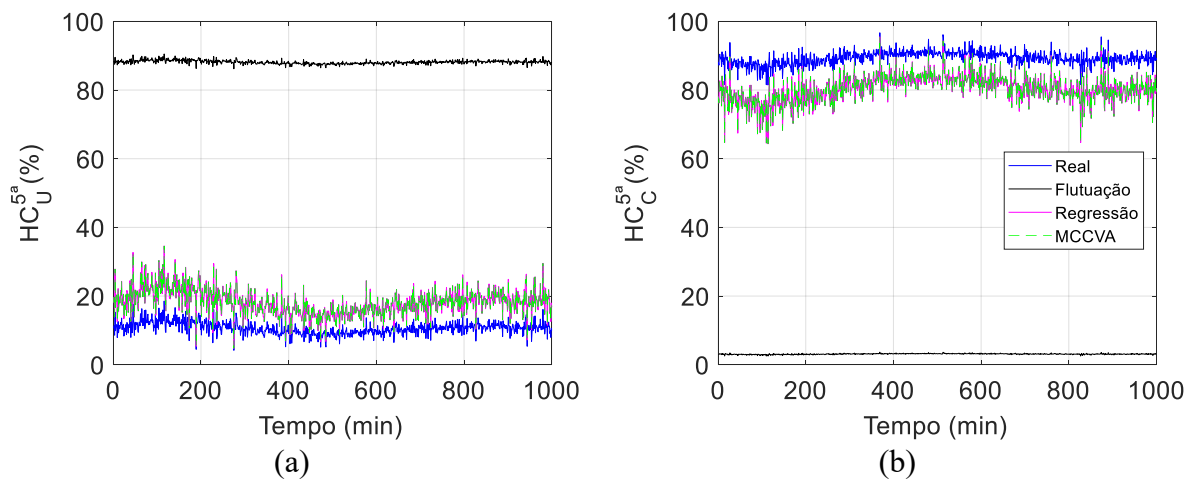


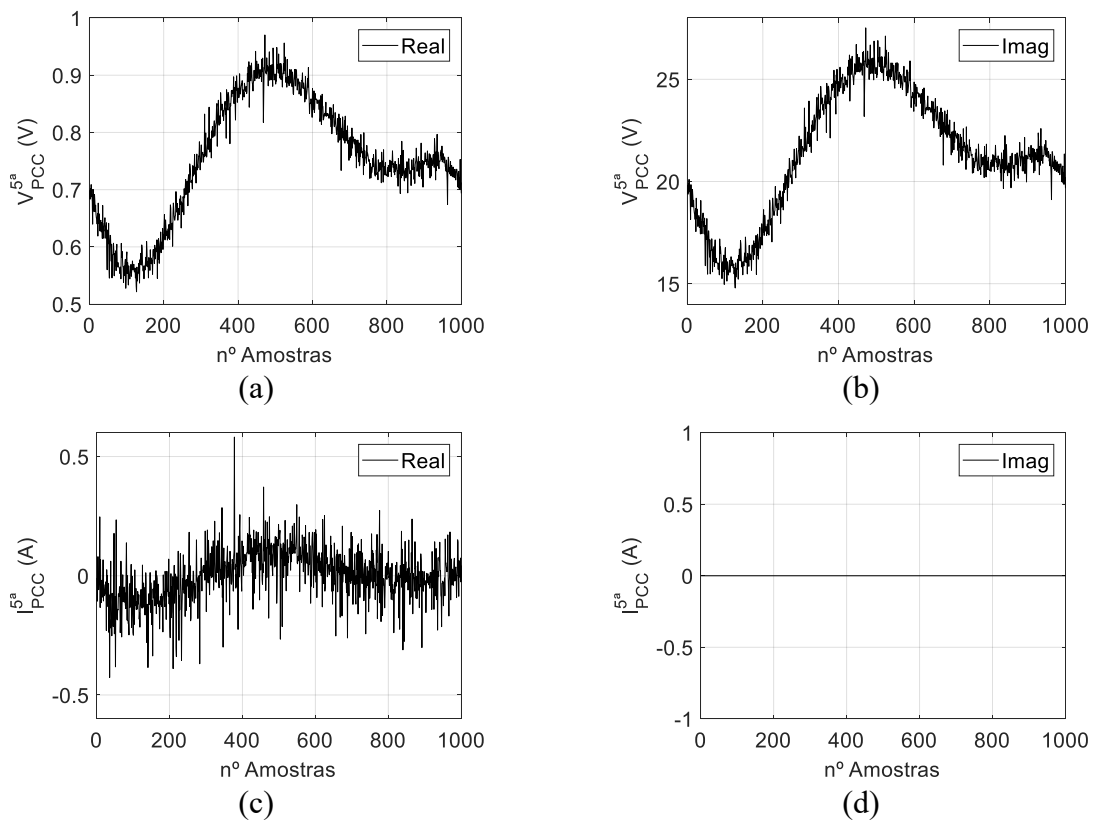
Figura 2.10 – Contribuição harmônica do sistema supridor e do consumidor estimadas para a 5ª ordem.



2.4.3. Caso 03 - $|\dot{Z}_c^h| \ll |\dot{Z}_c^h|$

Por fim, no último caso considerou-se um sistema com a impedância do sistema supridor muito maior que a impedância do sistema consumidor, ou seja, $|\dot{Z}_u^h| \gg |\dot{Z}_c^h|$. A Figura 2.11 mostra os dados de tensão e correntes gerados no PAC para esse caso.

Figura 2.11 - Tensão e corrente simuladas no PAC para a 5ª ordem harmônica do Caso 03.



Conforme explicado previamente este caso contraria a hipótese sobre a qual se encontram fundamentados todos os métodos não invasivos apresentados e, portanto, eram esperados os resultados divergentes dos valores reais apresentados nas Figura 2.12 e Figura 2.13.

Figura 2.12 – Compartilhamento de responsabilidades sobre a 5ª ordem harmônica usando métodos não-invasivos.

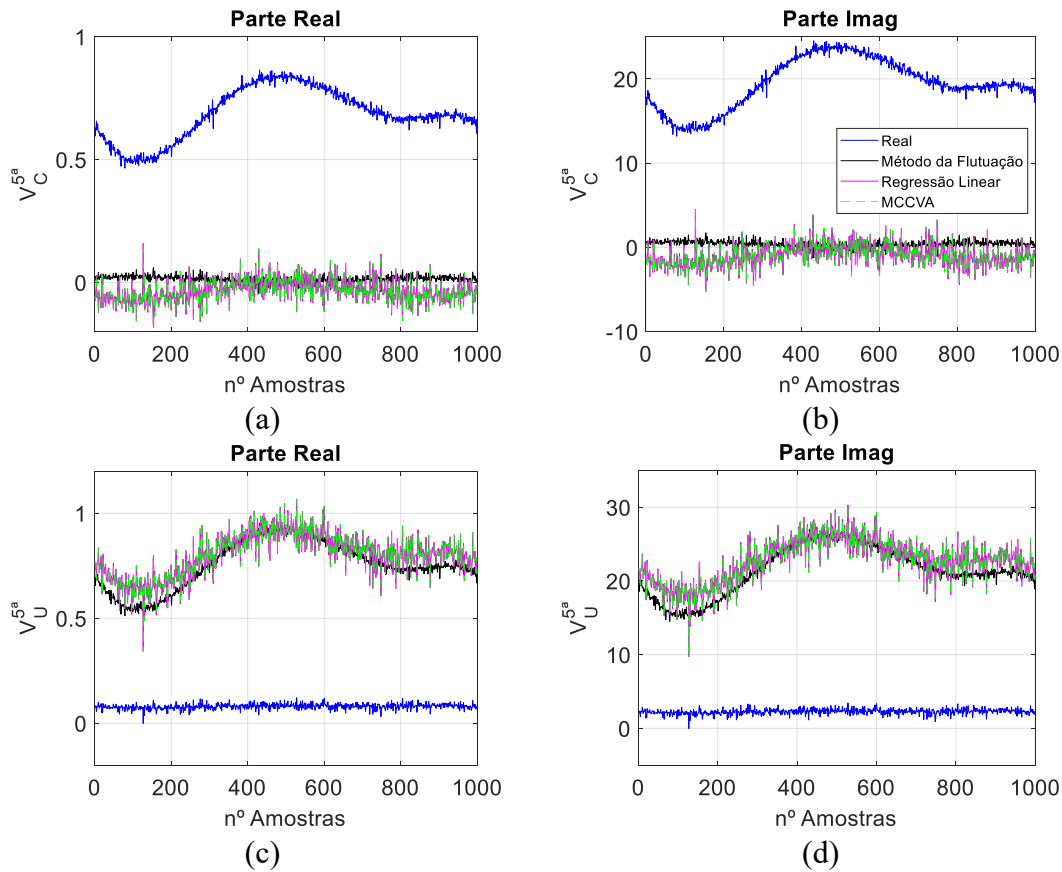
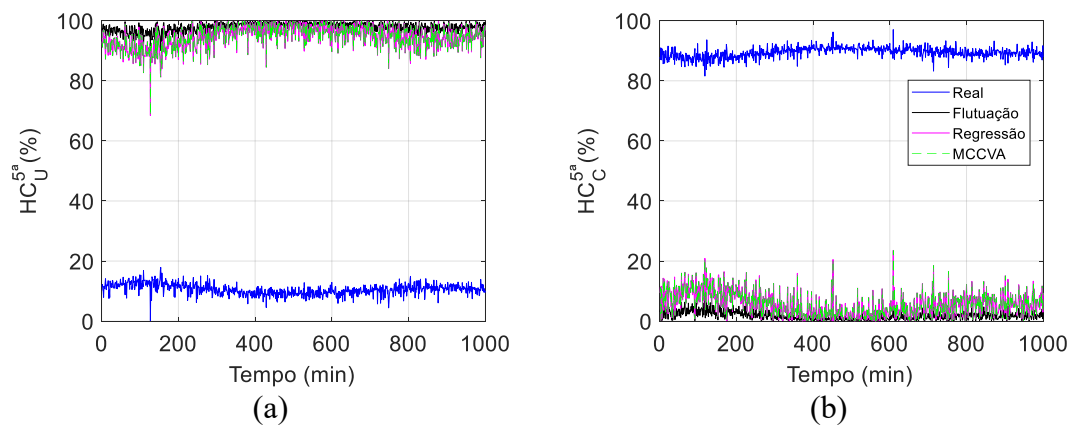


Figura 2.13 – Contribuição harmônica do sistema supridor e do consumidor estimadas para a 5ª ordem.



Assim, tendo em vista o exposto nesta seção, é evidente a necessidade do desenvolvimento de uma metodologia não invasiva que não adote premissas simplificadoras, tais como $|\dot{Z}_c^h| \gg |\dot{Z}_u^h|$ e que possa ser aplicada sem restrição nos mais diferentes cenários dos SEP.

CAPÍTULO III

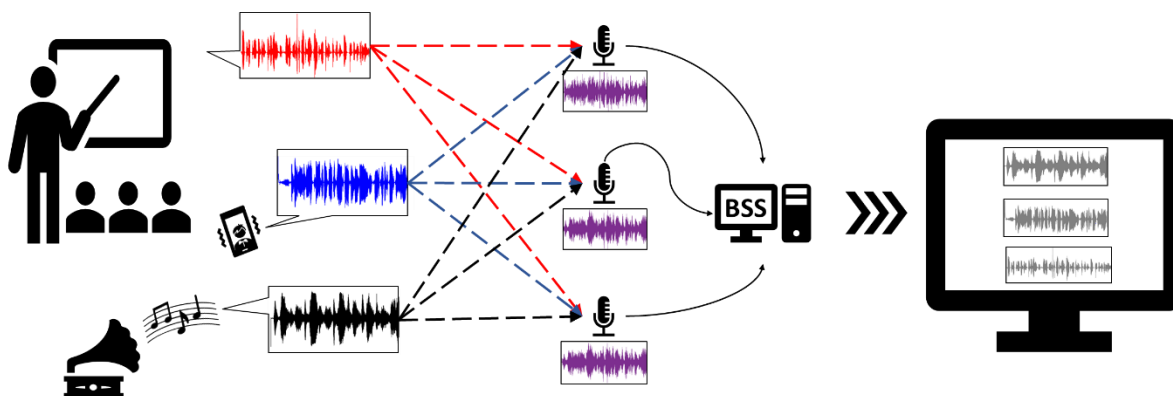
3. O MÉTODO DE ANÁLISE DE COMPONENTES INDEPENDENTES E O PROBLEMA DA SEPARAÇÃO CEGA DE FONTES

3.1. Separação Cega de Fontes

A Separação Cega de Fontes (BSS, *Blind Source Separation*) é um problema clássico em análise de sinais, cujo objetivo principal consiste em recuperar as fontes de sinais que compõem uma mistura observada. O adjetivo “cega” enfatiza que essas fontes de sinais são variáveis latentes, ou seja, não são diretamente observáveis, e não existe, a priori, qualquer informação sobre como foram misturadas [14].

Um exemplo muito utilizado para ilustrar o problema BSS é o *cocktail party problem*, ilustrado na Figura 3.1, [40]. Basicamente, nesse problema, tem-se microfones, posicionados em locais diferentes, captando versões misturadas dos sons ambiente (voz do professor, celular e uma música), e almeja-se separar cada um deles. No entanto, conforme explicado anteriormente, a única informação disponível são os sinais misturados adquiridos pelos microfones. Ou seja, nem os sons individuais nem as distâncias das fontes aos microfones são conhecidas.

Figura 3.1 - Ilustração do *cocktail party problem*



Devido ao seu vasto campo de aplicação, desde o surgimento dos primeiros estudos no final da década de 80, a BSS vem atraindo a atenção de vários pesquisadores de diversas áreas [40].

Conseqüentemente, diferentes métodos para solucionar o problema BSS, oriundos da associação de técnicas baseadas nas redes neurais artificiais, no processamento estatístico de sinais e na teoria da informação, já foram propostos e possuem aplicações bem consolidadas em áreas, tais como: telecomunicações, separação de áudio, processamento de imagens e de sinais biomédicos, reconhecimento de padrões e análise de séries temporais financeiras [14], [29], [40].

Até o momento, a grande maioria dos métodos desenvolvidos para o problema BSS são de aprendizado não supervisionado, que tem por base uma função objetivo teoricamente construída e/ou informações prévias das variáveis latentes que compõe a mistura observada [40]. Portanto, pode-se considerar que, basicamente, tais métodos buscam explorar algumas informações a priori sobre a real natureza das fontes originais por meio de um procedimento de otimização adequado [41].

Assim, os métodos para BSS podem ser classificados de acordo com o critério adotado para a separação das fontes em três grupos principais: Análise de Componentes Independentes (ICA), Fatoração matricial não negativa (NMF, *Non-negative Matrix Factorization*) e Análise de Componentes Esparsas (SCA, *Sparse Component Analysis*). Dentre esses métodos citados, a ICA é a técnica mais difundida atualmente e, também, é a que se mostra mais adequada para atingir os objetivos propostos nesse trabalho, devido à natureza dos SEP cujas fontes não são esparsas, ou seja, as fontes não necessariamente irão assumir valores próximos de zero na maior parte do tempo, e podem apresentar valores negativos de impedâncias. Dessa forma, tendo em vista o exposto, nas próximas seções desse capítulo será apresentado um estudo detalhado dos fundamentos da ICA.

3.2. Análise de Componentes Independentes

Para definir os conceitos básicos associados a ICA, analisa-se um caso simplificado, no qual dois sensores, posicionados em locais diferentes, captam a mistura dos sinais provenientes de duas fontes, que operam simultaneamente. A título de ilustração, considere as formas de onda apresentadas nas Figura 3.2 e Figura 3.3.

Matematicamente, conforme expressam as equações (3.1) e (3.2), pode-se considerar um modelo generativo linear, em que cada uma dessas misturas observadas ($x(t)$) é uma soma ponderada das outras duas fontes de sinais em questão ($s(t)$).

$$x_1(t) = a_{11}s_1(t) + a_{12}s_2(t) \quad (3.1)$$

$$x_2(t) = a_{21}s_1(t) + a_{22}s_2(t) \quad (3.2)$$

Assim, considerando o modelo generativo apresentado, se os parâmetros (a_{ij}) fossem conhecidos, as fontes originais poderiam ser facilmente recuperadas através das misturas observadas pela solução do problema linear. No entanto, como na BS, não se conhece nem os parâmetros nem as fontes de sinais, para resolver o problema descrito, o método ICA adota o pressuposto de que as fontes de sinais são estatisticamente independentes e possuem uma distribuição não-gaussianas.

Figura 3.2 - Fontes de sinais originais.

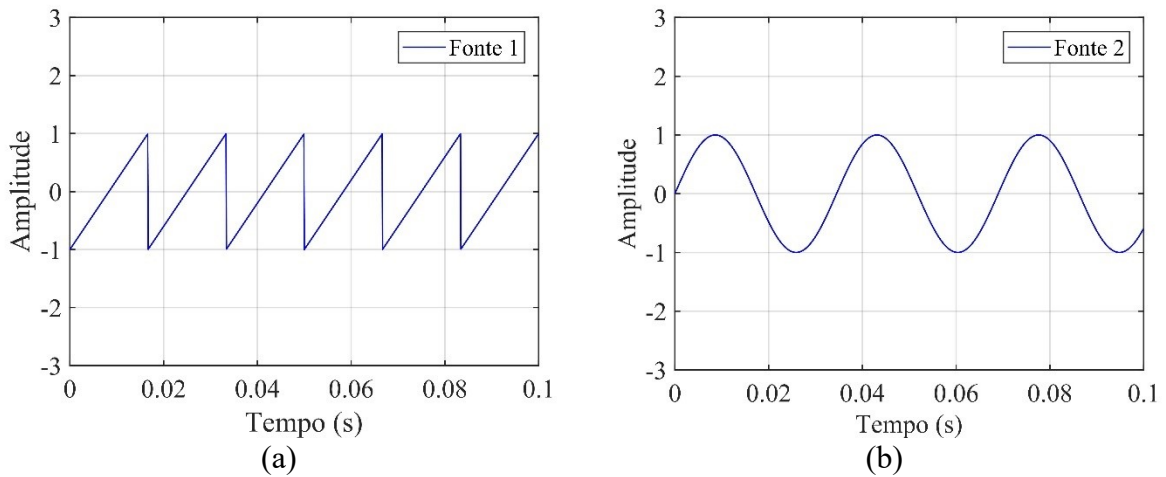
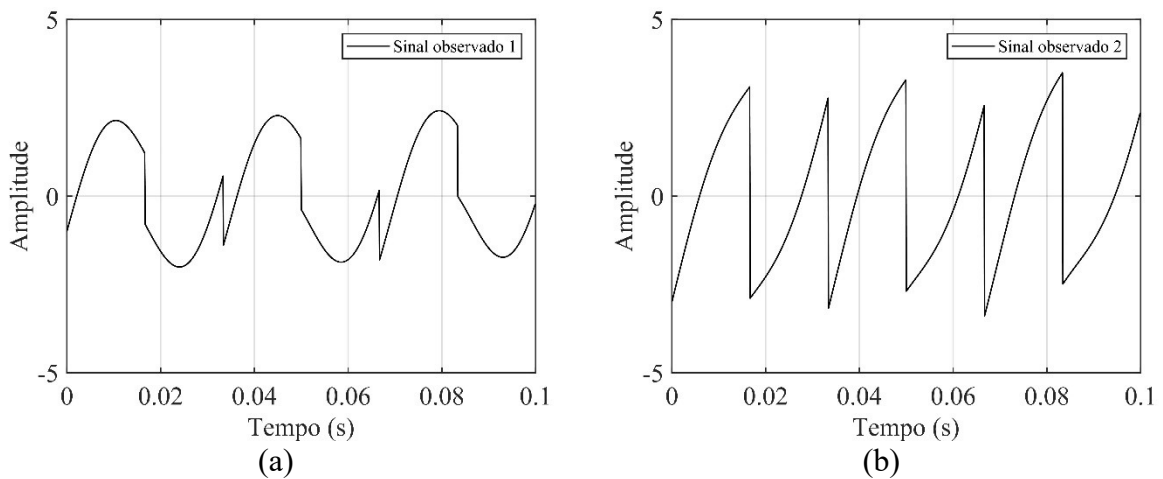


Figura 3.3 - Misturas observadas.



A equação (3.3) representa matricialmente a generalização das equações (3.1) e (3.2) do modelo ICA para M fontes observadas de N fontes independentes.

$$\mathbf{x}_{M \times T} = \mathbf{A}\mathbf{s}_{N \times T} \quad (3.3)$$

Onde \mathbf{x} é a matriz de misturas observadas de dimensão $M \times T$, \mathbf{s} é a matriz de variáveis latentes, também denominadas de componentes independentes ou fontes originais, com dimensão $N \times T$, \mathbf{A} é a matriz de mistura constante desconhecida e T é o número de amostras. Ademais, destaca-se que no modelo ICA cada mistura observada (x_i), bem como cada fonte (S_j), é considerada como uma variável aleatória, ao invés de um sinal, ou série temporal, conseqüentemente o índice referente ao tempo (t) pode ser omitido na equação (3.3) sem qualquer prejuízo.

3.2.1. Independência estatística

Duas variáveis aleatórias quaisquer, y_1 e y_2 , são ditas independentes se o valor de y_1 não fornece nenhuma informação sobre y_2 e vice-versa. Matematicamente, a independência estatística, de n variáveis é definida em termos das densidades de probabilidade se, e somente se, a relação expressa na equação (3.4) for verdadeira.

$$p(y_1, y_2, \dots, y_n) = p_1(y_1)p_2(y_2) \cdots p_n(y_n) \quad (3.4)$$

Ou seja, se a função densidade de probabilidade conjunta das variáveis aleatórias puder ser fatorada no produto das funções densidade de probabilidade marginais [42].

Outra forma, menos restritiva e, conseqüentemente, mais “fraca”, de se definir a independência é através da decorrelação [28]. Assim, variáveis aleatórias são decorrelacionadas se as suas covariâncias, par a par, são nulas, conforme definido na equação (3.5).

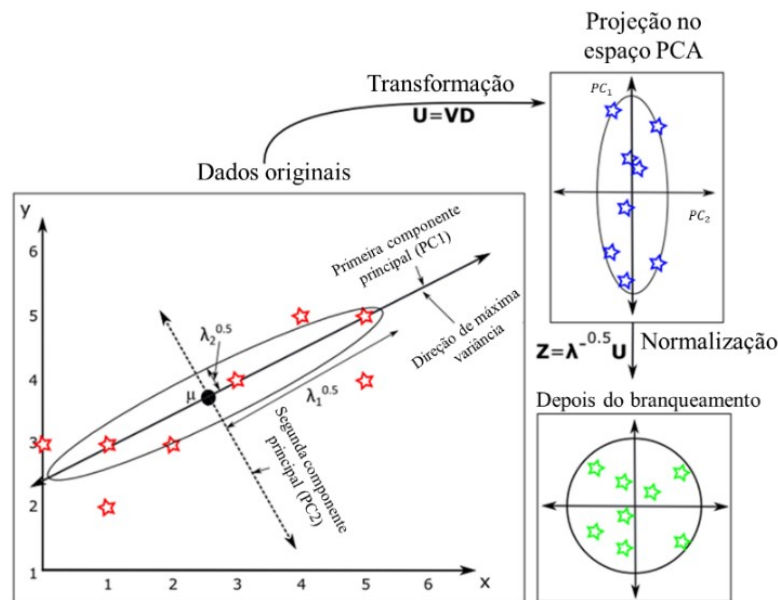
$$E\{y_i, y_j\} - E\{y_i\}E\{y_j\} = 0 \quad \forall i, j \quad (3.5)$$

Portanto, se as variáveis aleatórias possuírem média nula, a condição expressa na equação (3.5) se torna uma condição de ortogonalidade [43]. Além disso, conforme demonstra [29], com base nas equações (3.4) e (3.5), se as variáveis aleatórias são estatisticamente independentes, elas são decorrelacionadas, mas, por outro lado, se as variáveis são decorrelacionadas, não necessariamente elas são independentes. No entanto, como a independência implica em decorrelação, várias técnicas baseadas na ICA restringem o espaço

de busca dos procedimentos de otimização para estimar sempre componentes independentes decorrelacionadas, reduzindo, assim, o número de parâmetros e simplificando o problema [28].

Posto isso, uma estratégia de pré-processamento bastante empregada na ICA consiste no “branqueamento” dos sinais, ou seja, na decorrelação dos dados, através da Análise de Componentes Principais (PCA), seguida da normalização [28], conforme ilustra a Figura 3.4. A título de curiosidade, de acordo com [43], a relação entre os termos “branco” e “decorrelacionado” é proveniente da teoria clássica de processos estocásticos, uma vez que se encontra vinculada à “resposta plana”, no sentido de densidade espectral de potência, com às análises em frequência de processos temporalmente “brancos” como a luz branca ou o ruído branco

Figura 3.4 – Ilustração de um processo de branqueamento dos dados. Nos gráficos, as estrelas vermelhas representam as misturas observadas, as estrelas azuis são os dados projetados no espaço PCA e as verdes as projeções normalizadas.



Fonte: Adaptada de [44].

3.2.2. Variáveis gaussianas

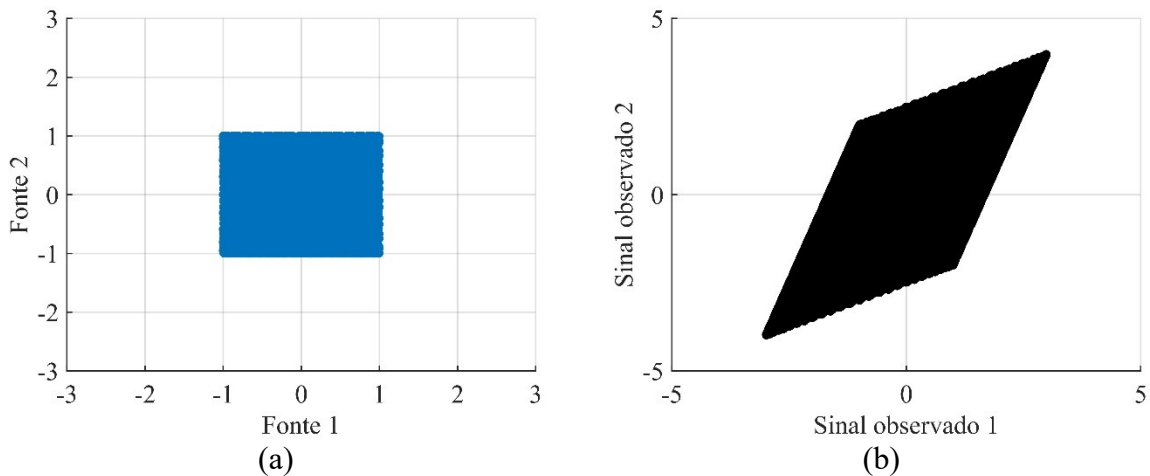
Para uma melhor compreensão, a restrição fundamental do modelo ICA é que as componentes independentes sejam não gaussianas, considere os diagramas de dispersão da Figura 3.5, das fontes de sinais originais e das misturas anteriormente apresentadas nas Figura 3.2 e Figura 3.3, respectivamente.

É possível verificar visualmente na Figura 3.5 (a), que as fontes originais são variáveis independentes, uma vez que o conhecimento do valor de uma das fontes não permite o

conhecimento do valor da outra. No entanto, os sinais observados na Figura 3.5 (b), que foram misturados pela matriz da equação (3.6), não o são. Para isso, basta verificar que é possível determinar o valor do *Sinal observado 2* (x_2) na Figura 3.5 (b), quando o *Sinal observado 1* (x_1) atinge um dos seus valores máximos ou mínimos.

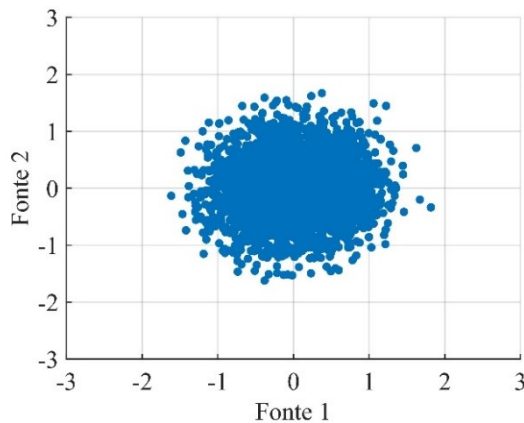
$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Figura 3.5 – Diagrama de dispersão das fontes de sinais apresentadas na Figura 3.2 e Figura 3.3. (a) Diagrama de dispersão das fontes originais. (b) Diagrama de dispersão das misturas observadas.



Agora, considere duas fontes de sinais gaussianas com uma matriz de misturas ortogonal. Consequentemente, as misturas observadas, serão descorrelacionadas e com variância unitária [28]. Conforme, observa-se na Figura 3.6 a densidade dessas fontes é completamente simétrica e, portanto, não contém nenhuma informação espacial que permita estimar a matriz de misturas das fontes.

Figura 3.6 – Distribuição multivariada de duas variáveis independentes gaussianas.



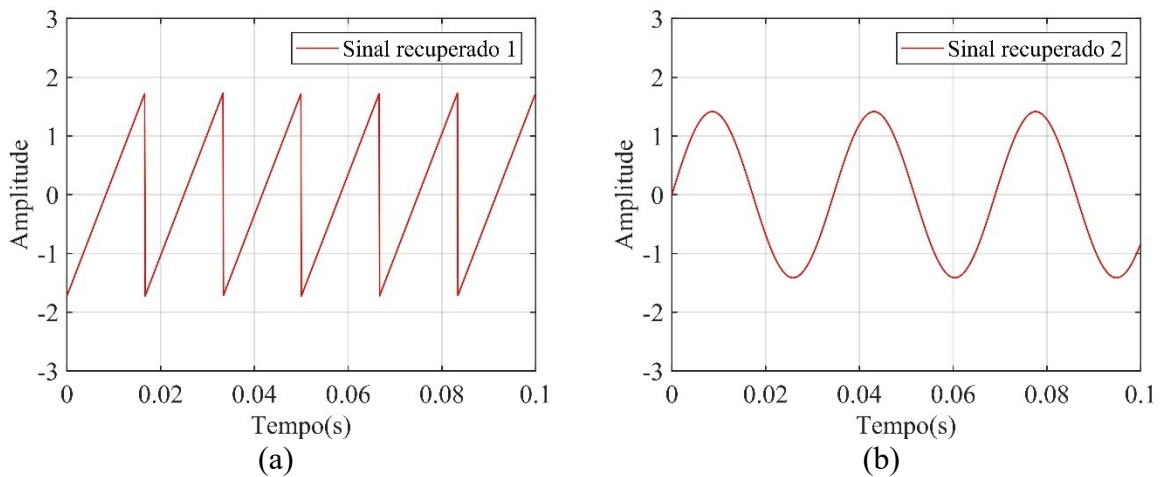
3.2.3. Métodos de estimativa ICA

Tendo em vista o exposto até o momento, torna-se evidente que a ICA nada mais é que um problema de identificação não supervisionado, cujo principal objetivo é encontrar uma matriz de transformação \mathbf{W} , que torne as componentes observadas tão independentes entre si, quanto possível. Assim, uma vez determinada a matriz de separação \mathbf{W} , as fontes independentes podem facilmente ser recuperadas através da equação (3.7).

$$\hat{\mathbf{S}} = \mathbf{W}\mathbf{X} \quad (3.7)$$

Onde $\hat{\mathbf{S}}$ é a matriz estimada de fontes independentes. A Figura 3.7 mostra como exemplo as fontes que foram estimadas usando apenas os sinais observados apresentados na Figura 3.3.

Figura 3.7 – Fontes estimadas através das misturas observadas apresentadas na Figura 3.3 usando o método ICA.



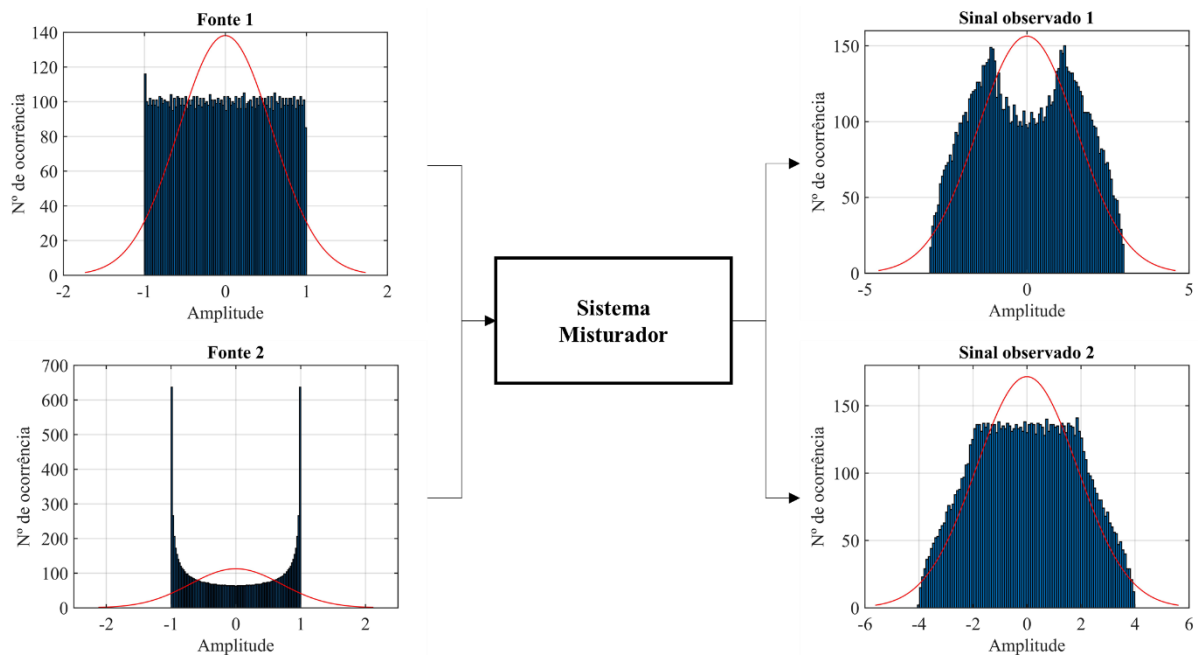
Atualmente, já existem várias estratégias (métodos de otimização) que utilizam diferentes critérios (função objetivo) para obter a matriz de separação \mathbf{W} [40], [45]. Assim sendo, nos tópicos a seguir, será feita uma explanação objetiva das principais abordagens utilizadas nos algoritmos que foram empregados nesse trabalho para a ICA.

Maximização da não-gaussianidade

Um resultado clássico em teoria da probabilidade é o teorema do limite central, segundo o qual a função densidade de probabilidade da soma de variáveis aleatórias independentes, sob certas condições, tende a uma variável gaussiana [28], [42]. Como exemplo, a Figura 3.8 mostra os histogramas das fontes originais e das misturas observadas apresentadas anteriormente nas

Figura 3.2 e Figura 3.3, respectivamente. É possível observar na Figura 3.8, conforme enuncia o teorema do limite central, que os sinais observados de fato possuem uma distribuição mais próxima da gaussiana do que as fontes originais.

Figura 3.8 – Histograma das fontes de sinais originais e das misturas anteriormente apresentadas nas Figura 3.2 e Figura 3.3, respectivamente.



Sendo assim, conseqüentemente, a não-gaussianidade pode ser utilizada como um critério para estimativa das componentes independentes. As medidas mais comuns de não gaussianidade são a curtose e a negentropia.

1º. Curtose

A curtose, ou o cumulante de quarta ordem, é uma medida clássica de não-gaussianidade, amplamente utilizada na ICA, que caracteriza o achatamento da função densidade de probabilidade. Matematicamente, a curtose pode ser definida pela equação (3.8).

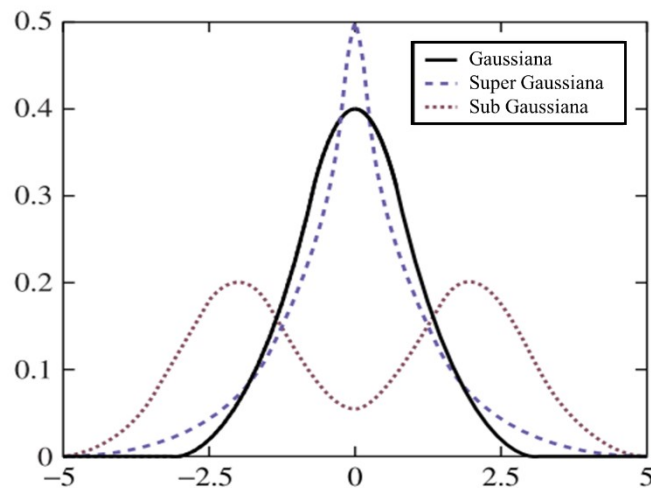
$$\text{kurt}(y) = E\{y^4\} - 3(E\{y^2\})^2 \quad (3.8)$$

Onde $E\{\cdot\}$ é a função esperança. Para variância unitária, a equação (3.8) pode ser simplificada na equação (3.9), tornando-se evidente que a curtose é simplesmente uma versão normalizada do quarto momento.

$$\text{kurt}(y) = E\{y^4\} - 3 \quad (3.9)$$

Assim, se o valor da curtose for igual a zero, a função de distribuição é denominada mesocúrtica e tem o mesmo achatamento da distribuição gaussiana. No entanto, se o valor da curtose, for positivo, a função é conhecida como leptocúrtica, ou super gaussiana, e possui uma distribuição mais pontuda, um exemplo típico desse tipo de distribuição é a distribuição de laplace. Por fim, se o valor da curtose é negativo a função é platicúrtica, ou sub gaussiana, e a sua distribuição é mais achatada, tal como a distribuição uniforme. A Figura 3.9 ilustra as funções densidade de probabilidade das distribuições super gaussiana, sub gaussiana e gaussiana descritas acima.

Figura 3.9 - Funções densidade de probabilidade das distribuições super gaussiana, sub gaussiana e gaussiana.



Fonte: Adaptada de [40].

No entanto, deve-se ressaltar que, apesar da simplicidade teórica e computacional da curtose, ela não é uma medida de não gaussianidade robusta e é extremamente sensível a presença de valores atípicos na amostra [28].

2°. Negentropia

A negentropia, de acordo com [28], [40], é baseada na quantidade teórica da informação de entropia (diferencial) e é a segunda medida mais importante de não gaussianidade. Observe-se que a entropia é o conceito básico da teoria da informação e pode ser interpretada como uma medida quantitativa da aleatoriedade de uma variável, ou seja, quanto mais imprevisível e não estruturada a variável, maior a sua entropia.

Matematicamente, a entropia (H) é definida para uma variável aleatória discreta, Y , conforme a equação (3.10) e generalizada para uma variável contínua (y) na equação (3.11).

$$H(Y) = - \sum_i P(Y = a_i) \log P(Y = a_i) \quad (3.10)$$

$$H(y) = - \int f(y) \log f(y) dy \quad (3.11)$$

Onde os coeficientes a_i da equação (3.10) são os possíveis valores de Y e $f(y)$, na equação (3.11), a densidade.

Um resultado fundamental da teoria da informação diz que, entre todas as variáveis aleatórias de variância igual, a variável gaussiana é a que possui a maior entropia. Isso significa que a distribuição gaussiana é a mais aleatória, ou a menos estruturada, das distribuições [29]. Observa-se ainda que distribuições cuja função densidade de probabilidade são mais pontiagudas, como a de distribuição de Laplace, possuem pequenos valores de entropia.

Assim, para fins de otimização, na ICA, utiliza-se uma versão modificada da entropia diferencial, denominada de negentropia, definida matematicamente na equação (3.12).

$$J(y) = H(y_{gauss}) - H(y) \quad (3.12)$$

Onde y_{gauss} é uma variável aleatória gaussiana com a mesma variância de y . Desse modo, devido às suas propriedades, a negentropia é sempre não negativa, e é zero se e somente se y tiver uma distribuição gaussiana. Além disso, a negentropia é invariante para transformações lineares invertíveis.

Uma das vantagens da utilização da negentropia como medida de não gaussianidade é sua robustez aos valores discrepantes. No entanto, sua principal desvantagem consiste na dificuldade da implementação computacional, mas felizmente é possível obter uma boa estimativa da negentropia a partir de uma aproximação baseada nos chamados momentos polinomiais [29], utilizando a equação (3.13).

$$J(y) = \alpha (E\{G(y)\} - E\{G(v)\})^2 \quad (3.13)$$

Onde $G(\cdot)$ é uma função não-linear e não-quadrática, α é uma constante e v é uma variável aleatória gaussiana de mesma média e variância que y .

É interessante observar, tal como evidencia [28], que a escolha de uma função $G(\cdot)$ que não cresça muito rapidamente, representa um ponto chave do problema, que garante a construção de estimadores mais robustos e computacionalmente simples.

3°. Minimização da informação mútua

Uma outra abordagem empregada na ICA, inspirada na teoria da informação, é a minimização da informação mútua. Basicamente, a informação mútua quantifica o grau de dependência estatística entre variáveis aleatórias. Essa grandeza é sempre não-negativa e assume valor zero se, e somente se, as variáveis foram estatisticamente independentes. Assim sendo, esse critério pode ser utilizado como função custo para ajustar a matriz de separação \mathbf{W} .

De acordo com [28], a informação mutua é equivalente à divergência de Kullback-Leibler e representa uma medida muito natural de independência, que leva em consideração toda a estrutura de dependência das variáveis, e não apenas a covariância. Matematicamente a informação mútua entre m variáveis aleatórias, y_i $i = 1 \dots m$, é dada pela equação (3.14).

$$I(y_1, y_2, \dots, y_m) = \sum_{i=1}^m H(y_i) - H(y) = \sum_i H(y_i) - H(x) - \log|\det W| \quad (3.14)$$

Observa-se, assim, através da equação (3.14), que a informação mútua pode ser utilizada como uma função objetivo para ajuste da matriz \mathbf{W} . Ou seja, pode-se, por meio de um procedimento de otimização adequado, buscar a matriz que minimiza a equação (3.14). No entanto, esse problema de otimização não é trivial e há a possibilidade de existência de mínimos locais, além de uma significativa dificuldade da manipulação da função objetiva, conforme evidencia [43].

4°. Tensores cumulantes de ordem superior

Uma outra técnica utilizada na ICA são os tensores cumulantes de ordem superior. No entanto, antes de abordá-los serão revisados alguns conceitos fundamentais sobre momentos e cumulantes.

Matematicamente, a primeira função característica de uma variável aleatória escalar contínua (x), com função densidade de probabilidade $p(x)$, é definida como a transformada de Fourier de $p(x)$, conforme a equação (3.15).

$$\varphi(\omega) = E\{e^{j\omega x}\} = \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega x} p(x) dx \quad (3.15)$$

Onde $j = \sqrt{-1}$ e ω é a variável transformada. É interessante observar que cada distribuição de probabilidade é especificada exclusivamente por sua função característica e vice-versa. Expandindo a equação (3.15) em série de Taylor, tem-se:

$$\varphi(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k (j\omega)^k}{k!} \right) p(x) dx = \sum_{k=0}^{\infty} E\{x^k\} \frac{(j\omega)^k}{k!} \quad (3.16)$$

Sendo que os coeficientes da expansão da equação (3.16) são os denominados momentos $E\{x^k\}$ de x . Já a função geradora de cumulantes ($\phi(\omega)$), ou segunda função característica, de x é dada pela equação (3.17).

$$\phi(\omega) = \ln(E\{e^{j\omega x}\}) \quad (3.17)$$

E, conseqüentemente, os cumulantes (k_k) de x são os coeficientes da expansão da série de Taylor da segunda função característica.

$$\phi(\omega) = \sum_{k=0}^{\infty} k_k \frac{(j\omega)^k}{k!} \quad (3.18)$$

Onde o k -ésimo cumulante pode ser obtido da seguinte forma:

$$k_k = (-j)^k \left. \frac{d^k \phi(\omega)}{d\omega^k} \right|_{\omega=0} \quad (3.19)$$

É interessante observar que, apesar de tanto os momentos quanto os cumulantes possuírem a mesma informação estatística, normalmente opta-se por utilizar os cumulantes porque eles apresentam de forma mais clara as informações adicionais fornecidas por estatísticas de ordem superior. Na prática, os algoritmos ICA fundamentados em cumulantes usam tensores de ordem superior. Os tensores podem ser considerados, basicamente, como generalizações de matrizes ou operadores lineares [29]. Assim, o tensor cumulante de segunda ordem nada mais é que a matriz de covariância dos dados.

Sabe-se que uma das formas de realizar o branqueamento dos dados, é através da decomposição dos valores da matriz de covariância, o que significa que os dados são transformados de forma que as correlações de segunda ordem sejam iguais a zero. Assim, generalizando esse princípio, pode-se usar o tensor cumulante de quarta ordem para torná-los zero, ou pelo menos o menor possível e, assim, encontrar a matriz de separação que torne as componentes o mais independentes possível.

3.3. Algoritmos ICA

Assim, levando em consideração as diferentes estratégias e critérios citados no item 3.2.3, diversos algoritmos baseados na ICA já foram propostos e integralmente disponibilizados [40]. Particularmente, nesse trabalho, devido à natureza dos SEP, serão destacados três algoritmos adequados para análise de sinais complexos, que são: FastICA, RobustICA e JADE.

3.3.1. FastICA

O algoritmo FastICA adaptado para operações complexas foi apresentado por [46], como um desdobramento natural do algoritmo para sinais reais [28]. A proposta do algoritmo consiste basicamente em maximizar a não gaussianidade dos sinais observados por meio da aplicação da teoria de iteração do ponto-fixado, usando como função objetivo uma aproximação da negentropia. Nesse trabalho, especificamente, para o cálculo da negentropia, utilizou-se a função $G(\cdot)$ expressa na equação (3.20).

$$G(y) = \log(0,1 + y) \quad (3.20)$$

Por fim, destaca-se que o algoritmo FastICA encontra-se integralmente disponibilizado pelos autores em [47], para diferentes linguagens de programação. Antes de aplicar o algoritmo, no entanto, os dados deverão passar por uma etapa de pré-processamento para remover a média e descorrelacioná-los, reduzindo, assim, a complexidade do problema.

3.3.2. RobustICA

Já o algoritmo RobustICA [48], disponível em [49], utiliza como função de contraste a curtose normalizada, otimizada por uma técnica iterativa, que busca melhorar a eficiência computacional. Essa técnica calcula algebricamente o tamanho da etapa, otimizando globalmente o contraste na direção da pesquisa a cada iteração [50]. Qualquer componente

independente com curtose diferente de zero pode ser extraída dessa maneira. A principal vantagem deste algoritmo é de que tanto os sinais reais, quanto os complexos são tratados exatamente pelo mesmo algoritmo, portanto a matriz de misturas pode ser real ou complexa, independentemente do tipo de fonte. Além disso, destaca-se que nenhuma etapa de pré-processamento, como o branqueamento para descorrelacionar os dados, é necessária [51].

3.3.3. JADE

Por fim, para estimar as componentes independentes, o algoritmo JADE (em inglês, *Joint Approximate Diagonalization of Eigenmatrices*) utiliza o método de diagonalização conjunta aproximada do tensor cumulante de quarta ordem pelo método de Jacobi, em oposição à otimização por algoritmos do tipo gradiente [52], [53]. A principal vantagem do algoritmo é a possibilidade de trabalhar tanto com número reais, quanto com números complexos. No entanto, o volume de cálculos exigidos pelos cumulantes de altas ordens, limita a aplicação deste algoritmo a problemas de baixas dimensões [29], [54].

Assim, diante do exposto, nota-se que cada um desses algoritmos ICA possui um critério diferente de otimização. Algumas comparações entre diferentes algoritmos ICA já foram anteriormente publicadas, no entanto, conforme evidencia [55], não existe uma conclusão unânime, visto que os resultados diferem conforme os dados analisados e o critério utilizado na avaliação. Portanto, pode-se concluir que não existe um algoritmo que seja invariavelmente o melhor para toda e qualquer aplicação.

3.4. Restrições e Ambiguidades do Modelo ICA

Por fim, tendo em vista o exposto e o exemplo apresentado ao longo desse capítulo, pode-se verificar que para a aplicação do modelo ICA três condições devem ser satisfeitas:

- 1) As fontes de sinais devem ser estatisticamente independentes;
- 2) No máximo uma das fontes que compõe a mistura pode ser gaussiana;
- 3) O número de sinais observados deve ser maior ou igual ao número de fontes que deverão ser recuperadas.

Além disso, pode-se observar também que, como tanto a matriz de misturas quanto as fontes originais são desconhecidas, existem duas ambiguidades intrínsecas nesse modelo, relacionadas à ordem e à escala das componentes recuperadas. Ou seja, não necessariamente os sinais serão recuperados na mesma ordem e com a mesma amplitude das fontes originais [28].

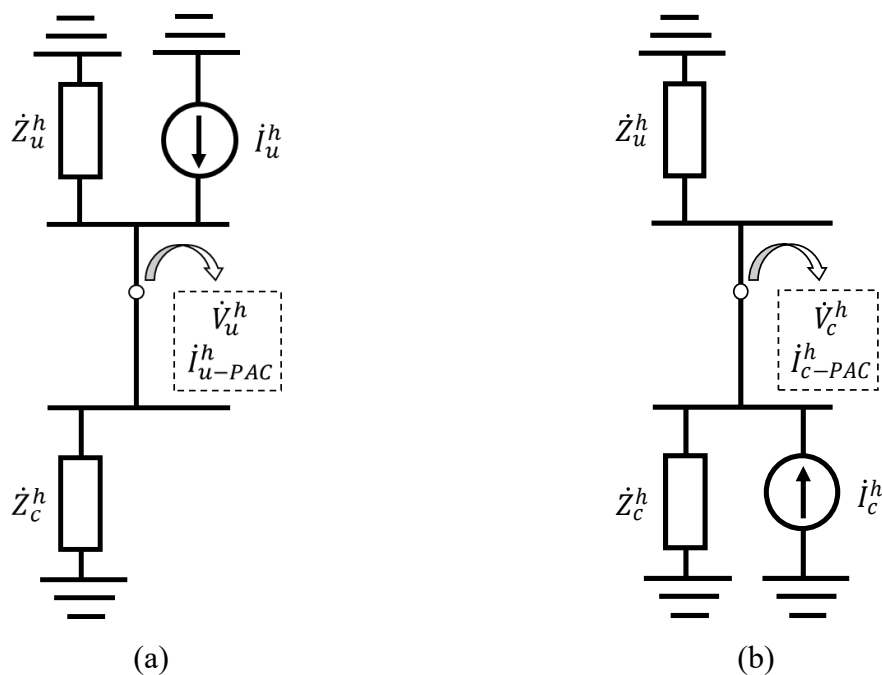
CAPÍTULO IV

4. ASSOCIAÇÃO DOS MÉTODOS ICA E DA SUPERPOSIÇÃO PARA O COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES HARMÔNICAS

Atualmente, o método da superposição, apesar de subdeterminado, ou seja, com mais incógnitas do que equações, é bastante reconhecido na identificação de responsabilidades quanto à presença de distorções harmônicas no PAC [3], [25]. Nesse método, o sistema supridor e a unidade consumidora são representados individualmente para cada ordem harmônica através de um circuito equivalente de Norton [56], ilustrado anteriormente na Figura 2.1.

Aplicando o clássico teorema da superposição à h -ésima ordem harmônica, o circuito da Figura 2.1 pode ser decomposto em dois circuitos distintos, conforme apresentado na Figura 4.1. A Figura 4.1 (a) caracteriza o efeito das distorções harmônicas do sistema supridor no PAC e a Figura 4.1 (b) o efeito do consumidor.

Figura 4.1 – Circuitos equivalentes de Norton utilizados na aplicação do teorema da superposição. (a) Apenas a contribuição do sistema supridor é considerada. (b) Apenas a contribuição do consumidor é considerada.



Onde:

\dot{I}_{u-PAC}^h - Contribuição do sistema supridor para a corrente harmônica medida no PAC

\dot{I}_{c-PAC}^h - Contribuição do consumidor para a corrente harmônica medida no PAC

\dot{V}_{u-PAC}^h - Tensão harmônica de ordem h devida ao sistema supridor

\dot{V}_{c-PAC}^h - Tensão harmônica de ordem h devida ao consumidor

Assim, de acordo com o princípio da superposição, matematicamente as contribuições das fontes de correntes harmônicas de h-ésima ordem do sistema supridor e do consumidor são dadas, respectivamente, pelas equações (4.1) e (4.2).

$$\dot{I}_{u-PAC}^h = \frac{\dot{Z}_u^h}{\dot{Z}_u^h + \dot{Z}_c^h} \dot{I}_u^h \quad (4.1)$$

$$\dot{I}_{c-PAC}^h = \frac{\dot{Z}_c^h}{\dot{Z}_u^h + \dot{Z}_c^h} \dot{I}_c^h \quad (4.2)$$

E, portanto, a corrente harmônica total no PAC é dada pela equação (4.3).

$$\dot{I}_{PAC}^h = \dot{I}_{u-PAC}^h + (-\dot{I}_{c-PAC}^h) \quad (4.3)$$

De forma análoga, a distorção de tensão total para a h-ésima ordem harmônica no PAC pode ser calculada por meio da equação (4.4) e as contribuições de cada uma das partes envolvidas pelas equações (4.5) e (4.6).

$$\dot{V}_{PAC}^h = \dot{V}_u^h + \dot{V}_c^h \quad (4.4)$$

$$\dot{V}_u^h = \frac{\dot{Z}_c^h \dot{Z}_u^h}{\dot{Z}_c^h + \dot{Z}_u^h} \dot{I}_u^h \quad (4.5)$$

$$\dot{V}_c^h = \frac{\dot{Z}_c^h \dot{Z}_u^h}{\dot{Z}_c^h + \dot{Z}_u^h} \dot{I}_c^h \quad (4.6)$$

Reescrevendo (4.3) e (4.4) de forma matricial, com as devidas substituições tem-se, então a equação (4.7).

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{PAC}^h \\ \dot{I}_{PAC}^h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\dot{Z}_c^h \dot{Z}_u^h}{\dot{Z}_c^h + \dot{Z}_u^h} & \frac{\dot{Z}_c^h \dot{Z}_u^h}{\dot{Z}_c^h + \dot{Z}_u^h} \\ \frac{\dot{Z}_u^h}{\dot{Z}_c^h + \dot{Z}_u^h} & -\frac{\dot{Z}_c^h}{\dot{Z}_c^h + \dot{Z}_u^h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_u^h \\ \dot{I}_c^h \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Ou ainda, de forma simplificada, a equação (4.8).

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Z}\mathbf{I} \quad (4.8)$$

Onde:

- \mathbf{Y} - Dados de tensão e corrente medidos no PAC
- \mathbf{Z} - Matriz de impedância
- \mathbf{I} - Fontes de correntes harmônicas

Assim, percebe-se por meio de uma comparação entre as equações (3.3) e (4.8) que ambas são semelhantes, sendo \mathbf{Y} o vetor de medidas conhecidas, \mathbf{Z} a matriz de misturas e \mathbf{I} as fontes independentes [24].

No entanto, antes da associação da técnica ICA com o método da superposição, é preciso verificar se as condições apresentadas no capítulo 3 são satisfeitas. Ou seja, é necessário que:

1. As fontes de correntes sejam estatisticamente independentes e possuam uma distribuição não-gaussiana.
2. O número de sinais observados seja maior ou igual a quantidade de fontes a serem recuperadas;

De acordo com [17], as cargas elétricas são compostas por uma componente determinística, de variação lenta, associada a fatores tais como a hora do dia, dia da semana, estação do ano, condições climáticas etc., e uma componente estocástica, de variação rápida, que representa as flutuações aleatórias das cargas. As componentes de variação rápida, segundo dados experimentais apresentados pelos autores, são estaticamente independentes e possuem uma distribuição supergaussiana. Portanto, o método ICA, pode ser aplicado às componentes de variação rápida, separadas através de um filtro de média móvel. Ademais, é evidente que nesta abordagem dada ao problema, o número de sinais observados, \dot{V}_m^h e \dot{I}_m^h , é igual ao número de fontes independentes a serem recuperadas, \dot{V}_c^h e \dot{V}_u^h e, portanto, todas as condições impostas pelo método ICA se encontram satisfeitas.

No entanto, embora à primeira vista as ambiguidades do método ICA pareçam invalidar o seu uso para o compartilhamento das responsabilidades harmônicas, visto que não necessariamente os sinais serão recuperados na mesma ordem e com a mesma amplitude das

fontes originais, uma análise mais minuciosa do problema revela que isso não acontece de fato. No tocante a escala dos sinais recuperados possuírem magnitude diferente dos sinais originais, isso pode ser contornado por meio da utilização da matriz de mistura, uma vez que essa diferença não irá impactar a proporção dos coeficientes da matriz. Assim, comparando os coeficientes da matriz de mistura com a matriz de impedância expressa na equação (4.7), tem-se:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\dot{Z}_c^h \dot{Z}_u^h}{\dot{Z}_c^h + \dot{Z}_u^h} & \frac{\dot{Z}_c^h \dot{Z}_u^h}{\dot{Z}_c^h + \dot{Z}_u^h} \\ \frac{\dot{Z}_u^h}{\dot{Z}_c^h + \dot{Z}_u^h} & -\frac{\dot{Z}_c^h}{\dot{Z}_c^h + \dot{Z}_u^h} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Então, dividindo-se a primeira linha da matriz pela segunda na equação (4.9), obtém-se:

$$\dot{Z}_c^h = \frac{a_{11}}{a_{21}} \quad (4.10)$$

$$\dot{Z}_u^h = -\frac{a_{12}}{a_{22}} \quad (4.11)$$

Logo, considerando as equações (4.12) e (4.13) e fazendo as devidas manipulações matemáticas as contribuições harmônicas do consumidor e do supridor são dadas por:

$$\dot{V}_c^h = \frac{\dot{V}_{PAC}^h - \dot{I}_{PAC}^h \cdot \left(\frac{a_{11}}{a_{21}}\right)}{\left(\frac{a_{11}}{a_{12}}\right) + \left(\frac{a_{12}}{a_{22}}\right)} \cdot -\left(\frac{a_{12}}{a_{22}}\right) \quad (4.12)$$

$$\dot{V}_u^h = \frac{\dot{V}_{PAC}^h - \dot{I}_{PAC}^h \cdot \left(-\frac{a_{12}}{a_{22}}\right)}{\left(\frac{a_{11}}{a_{12}}\right) + \left(\frac{a_{12}}{a_{22}}\right)} \cdot \left(\frac{a_{11}}{a_{21}}\right) \quad (4.13)$$

Finalmente, no que diz respeito à indeterminação na ordem de recuperação das fontes, segundo [8], [21], [37], é sabido que a parte resistiva da impedância em sistemas de potência é sempre positiva. Assim define-se, arbitrariamente, que as fontes foram recuperadas na ordem apresentada na equação (4.7), se a parte real da impedância do sistema supridor é positiva, então a ordem se encontra correta. Caso contrário, a ordem está invertida. Assim, por meio da metodologia apresentada é possível resolver o problema das incertezas associadas ao método ICA para promoção do compartilhamento das responsabilidades harmônicas.

Na próxima sessão apresenta-se uma avaliação computacional do método ICA aplicado no problema do compartilhamento de responsabilidade harmônica.

4.1. AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DA METODOLOGIA

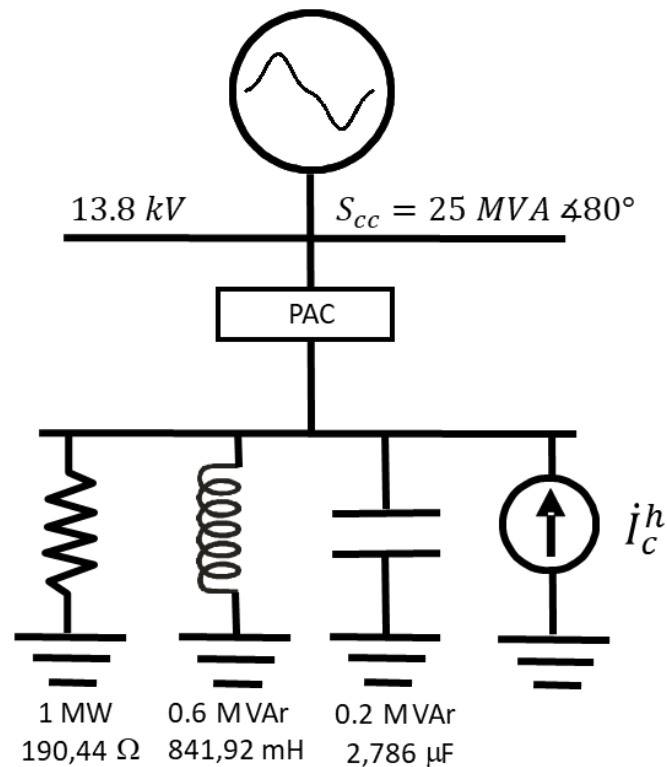
Este capítulo apresenta uma avaliação computacional da metodologia baseada na BSS para a promoção do compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas entre o sistema supridor e o consumidor. Assim, visando a realização de uma análise fidedigna, diversas simulações foram conduzidas no *software* Matlab considerando as diferentes variáveis dos SEP que influenciam diretamente no desempenho da metodologia em questão, tais como: variação da matriz de impedância e variância das fontes de corrente do sistema supridor e do consumidor.

O sistema teste utilizado nas análises computacionais foi proposto anteriormente por [4] e se encontra ilustrado na Figura 4.2. Conforme pode-se observar, esse sistema teste é composto basicamente por uma fonte de alimentação distorcida, definida por sua impedância de curto-circuito, e cargas típicas de uma unidade consumidora: resistivas, indutivas, capacitivas e não lineares. Todas as potências indicadas no diagrama unifilar são trifásicas, todavia por se considerar o sistema equilibrado, nesse trabalho são apresentados apenas os resultados referentes a uma das fases do sistema.

É relevante enfatizar que esse sistema teste em questão não é trivial do ponto de vista do compartilhamento de responsabilidades harmônicas usando técnicas não invasivas, uma vez que $\left| Z_c / Z_u \right| < 10$ para todas as ordens harmônicas avaliadas, conforme evidenciam os dados disponibilizados na Tabela 4.1.

Além dos parâmetros indicados no sistema teste da Figura 4.2, para gerar os dados de tensão e corrente no PAC também foram criadas fontes de correntes hipotéticas para as três primeiras ordens harmônicas dominantes, isto é, 3ª, 5ª e 7ª. Essas fontes foram criadas considerando a real natureza das cargas elétricas usualmente encontradas em sistemas elétricos de potência e suas características estatísticas [17], [27]. Assim, tal como preconizado na literatura, matematicamente, variáveis aleatórias distribuídas de Laplace de média zero (componentes de variação rápida) foram adicionadas a perfis hipotéticos de cargas harmônicas (componentes de variação lenta). É interessante evidenciar que fisicamente isso significa que em todas as análises realizadas, as correntes harmônicas injetadas pelo consumidor e pela concessionária estão variando no tempo e, portanto, possuem diferentes contribuições à distorção observada no PAC para cada amostra gerada.

Figura 4.2 - Diagrama unifilar do sistema teste.



Fonte: [4]

Tabela 4.1 – Relação entre a impedância harmônica do consumidor e do sistema supridor.

h	$ Z_c/Z_u $
3 ^a	7,84
5 ^a	3,81
7 ^a	2,19

Posto isso e considerando uma condição operacional na qual ocorrem contribuições das duas partes envolvidas, ou seja, um sistema supridor com distorções harmônicas que alimenta cargas lineares e não lineares de uma unidade consumidora, o processo de avaliação de desempenho da metodologia será composto pelas seguintes etapas, a saber:

- **1ª Etapa** –Será avaliado o impacto da variação da matriz de mistura do sistema, uma vez que no método ICA ela é sempre constante, no entanto, na prática, nos SEPs as impedâncias harmônicas variam de acordo com as cargas conectadas. Assim,

dois casos particulares serão considerados usando fontes de correntes hipotéticas geradas com variâncias constantes:

- **Caso 1.1:** As impedâncias do sistema supridor e do consumidor permaneceram constantes durante todo o intervalo de tempo analisado.
 - **Caso 1.2:** A impedância do sistema supridor permanecerá constante e variações aleatórias normalmente distribuídas serão adicionadas a impedância do consumidor.
- **2ª Etapa** – Será avaliada a influência das variâncias das fontes de correntes do sistema supridor e do consumidor, visto que na prática não necessariamente elas serão da mesma magnitude. Para tanto a variância das componentes de variação rápida das fontes de correntes do sistema supridor e do consumidor serão alteradas e, novamente, os dois casos apresentados na 1ª etapa serão reavaliados, ou seja:
- **Caso 2.1:** As impedâncias do sistema supridor e do consumidor serão mantidas constantes durante todo o intervalo de tempo avaliado e as variâncias das componentes de variação rápida das fontes de correntes do sistema supridor e do consumidor serão variadas de 0,01 a 0,1.
 - **Caso 2.2:** A impedância do sistema supridor será mantida constante, variações aleatórias normalmente distribuídas serão adicionadas a impedância do consumidor e a variância das componentes de variação rápida das fontes de correntes do sistema supridor e do consumidor serão variadas de 0,01 a 0,1.

4.2. 1ª ETAPA – AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DA MATRIZ DE IMPEDÂNCIA DO SISTEMA

Conforme esclarecido anteriormente, o principal objetivo dessa primeira etapa de avaliação computacional consiste em verificar a influência da variação da impedância harmônica do consumidor no desempenho dos algoritmos ICA. Assim, 1000 amostras de tensão e corrente no PAC foram geradas utilizando as fontes de correntes harmônicas mostradas na Figura 4.3. Essas fontes de corrente, por sua vez, foram criadas adicionando variáveis aleatoriamente geradas com uma distribuição de Laplace $Lap(\mu; \sigma^2)$, com média (μ) e variâncias (σ^2) apresentadas na Tabela 4.2, a componentes hipotéticas de variações lentas.

Figura 4.3 - Fonte de correntes harmônicas do sistema supridor (I_u^h) e do consumidor (I_c^h) utilizadas na primeira etapa da avaliação computacional.

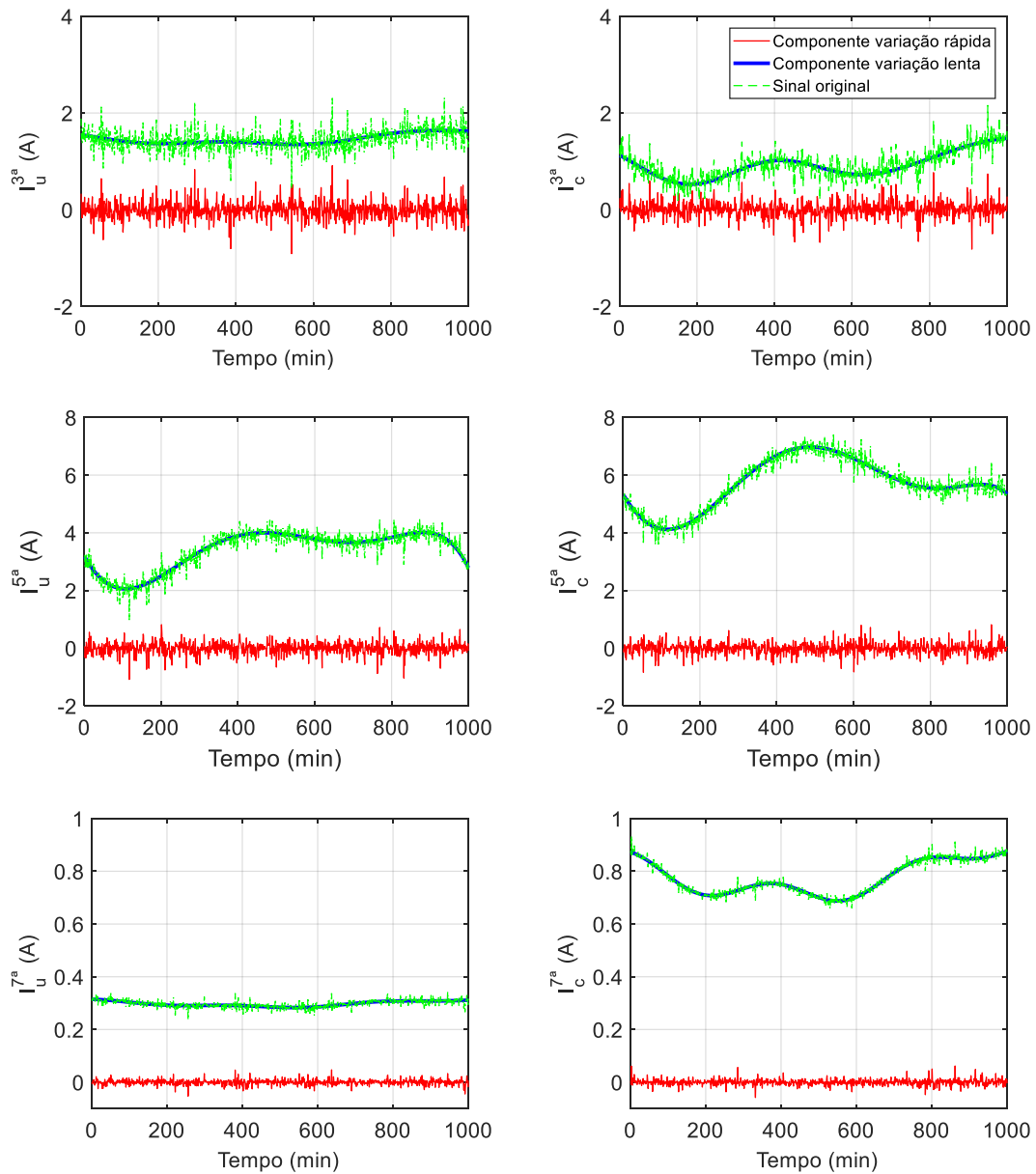


Tabela 4.2 – Parâmetros empregados na simulação das componentes de variação rápida das fontes de correntes.

<i>Variância das componentes de variação rápida</i>		
h	I_u^h	I_c^h
3^a	$Lap(0; 0,030000)$	$Lap(0; 0,025000)$
5^a	$Lap(0; 0,040000)$	$Lap(0; 0,040000)$
7^a	$Lap(0; 0,000100)$	$Lap(0; 0,000125)$

Todas as simulações computacionais desse trabalho foram conduzidas considerando um sistema com taxa de amostragem de uma amostra por minuto. Contudo, cabe ressaltar que da perspectiva da ICA os sinais são tratados simplesmente como variáveis aleatórias e não como sinais temporais e, portanto, essa taxa de amostragem pode ser ajustada de acordo com a característica do sistema elétrico em análise, de forma a garantir a captação da variabilidade necessária dos dados para a aplicação da metodologia baseada na BSS.

4.2.1. Caso 1.1 - Impedâncias do sistema supridor e do consumidor constantes

As Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.6 mostram as formas de onda para as tensões ($V_{PAC}^{3,5 e 7^a}$) e correntes ($I_{PAC}^{3,5 e 7^a}$) harmônicas obtidas computacionalmente junto ao PAC através da equação (4.7), usando os parâmetros elétricos e as fontes de corrente apresentadas, respectivamente, nas Figura 4.2 e Figura 4.3. As componentes de variações rápidas e de variação lenta foram separadas dos sinais simulados, de tensão e corrente, por meio da aplicação de filtros de médias móveis com 8 pontos.

Figura 4.4 - Tensão e corrente simuladas no PAC para a 3ª ordem harmônica do Caso 1.1.

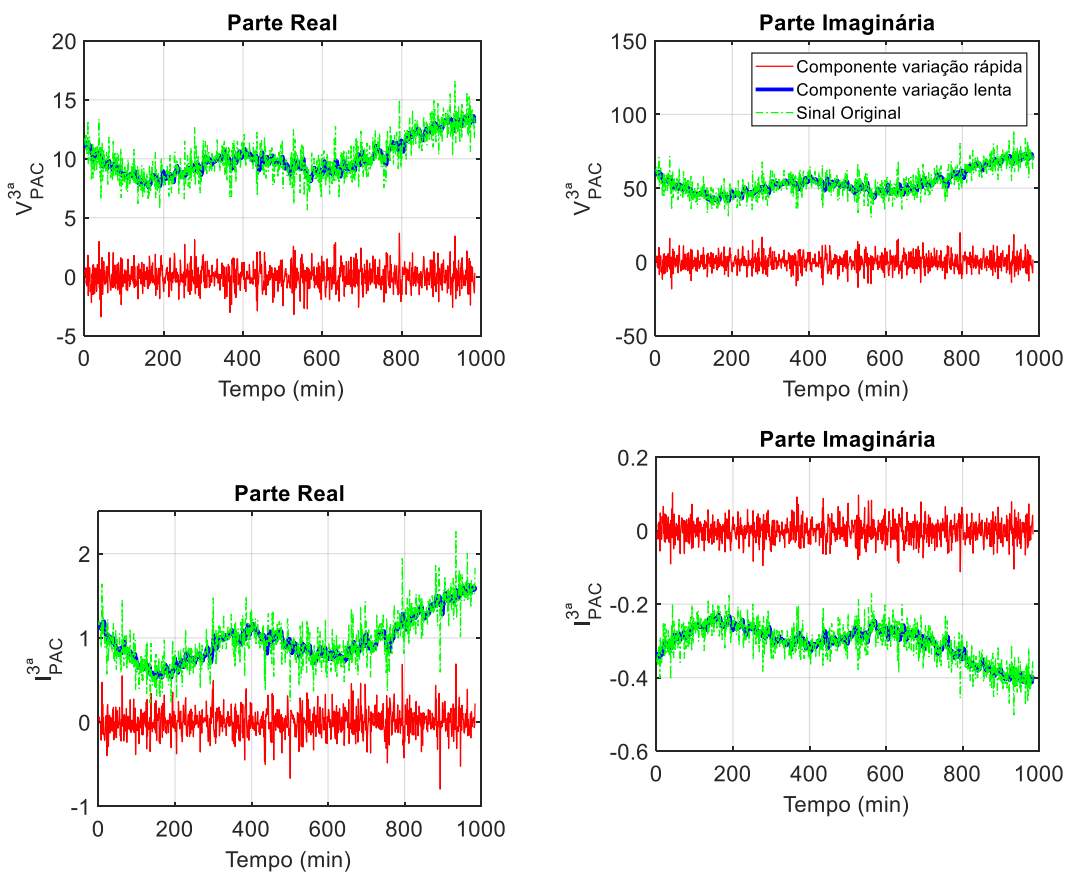


Figura 4.5 – Tensão e corrente simuladas no PAC para a 5ª ordem harmônica do Caso 1.1.

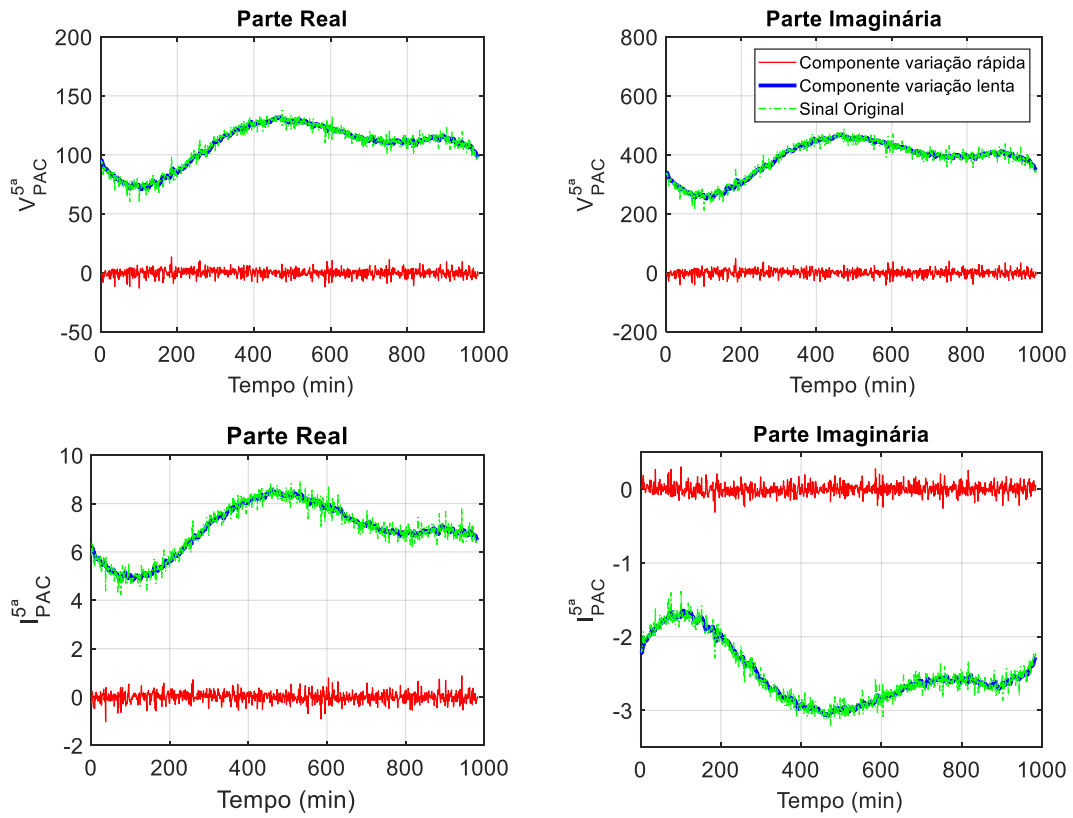
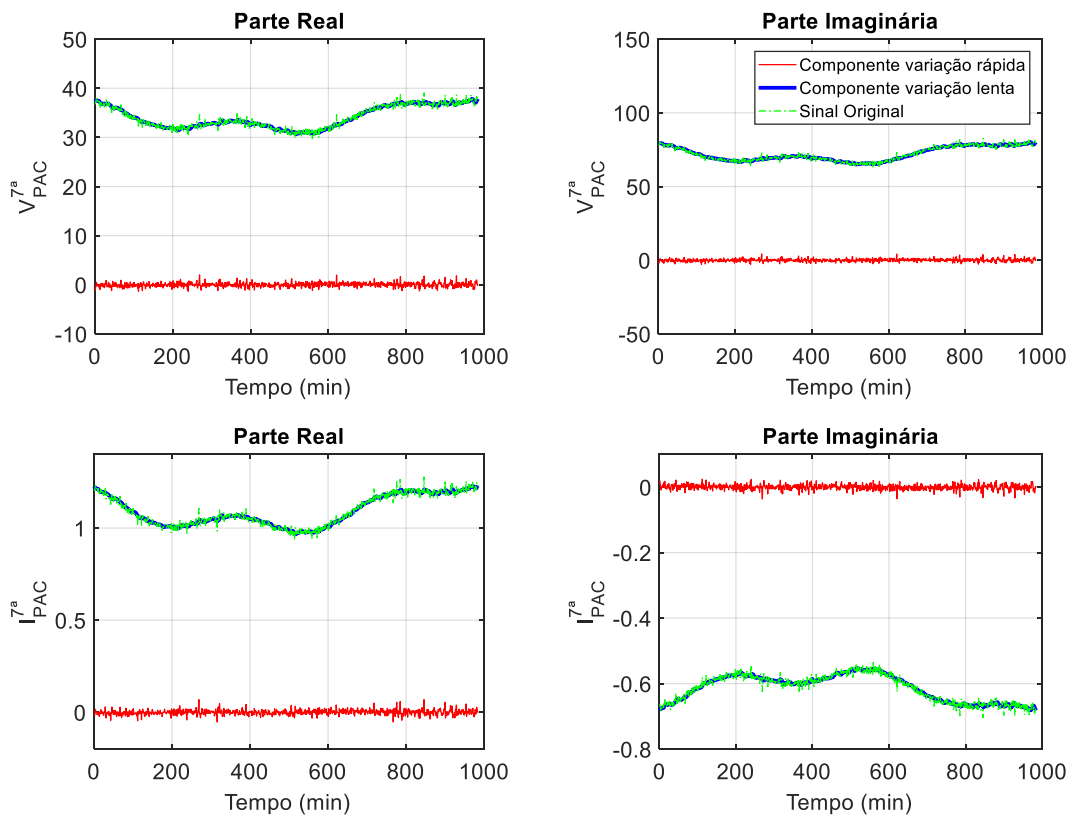


Figura 4.6 – Tensão e corrente simuladas no PAC para a 7ª ordem harmônica do Caso 1.1.



Conforme citado anteriormente, nesse primeiro caso avaliado se admite uma situação ideal na qual os valores das impedâncias harmônicas tanto do sistema supridor, quanto do consumidor permanecem constantes durante todo o intervalo de tempo analisado.

Após a extração das componentes de variações rápidas dos sinais simulados, para se obter a contribuição harmônica de cada uma das partes envolvidas, foram aplicados os procedimentos descritos no Capítulo 3 para os três algoritmos avaliados. A fim de se obter um parâmetro de comparação do desempenho do método ICA com outro método não invasivo, os resultados obtidos foram comparados com os do MCCVA.

Apesar de já demonstrada a fragilidade do método MCCVA no Capítulo 2 deste trabalho, para se ter uma referência do desempenho dos algoritmos ICA com outra metodologia não invasiva consolidada na literatura, optou-se por fazer uma comparação dos resultados obtidos via ICA com os fornecidos pelo MCCVA. Dentre os diversos métodos citados no Capítulo 2, optou-se pela comparação com o MCCVA, porque tal como no método ICA, esse método é fundamentado na análise das características estatísticas de vetores aleatórios independentes.

As Figura 4.7, Figura 4.8 e Figura 4.9 mostram os resultados dos métodos avaliados para a 3^a, 5^a e 7^a ordem harmônica, respectivamente. É possível constatar através de uma inspeção visual dos gráficos apresentados que em comparação ao MCCVA todos os algoritmos ICA avaliados obtiveram um bom desempenho. Ademais, verifica-se também através das tensões harmônicas estimadas que, dentre os três algoritmos ICA avaliados, os algoritmos FastICA e JADE são os que apresentaram a melhor performance, atingindo resultados muito próximos do valor esperado tanto para parte real, quanto para parte imaginária.

No entanto, é interessante observar que apesar dos algoritmos FastICA e JADE apresentarem resultados mais precisos para esse caso específico em análise, em nenhum dos algoritmos ICA avaliados ocorreu inversão na atribuição das responsabilidades pelas distorções harmônicas observadas no PAC, conforme pode-se verificar mais facilmente na Figura 4.10, onde os resultados são apresentados em termos percentuais.

Figura 4.7 – Tensões harmônicas estimadas no Caso 1.1 para a 3ª ordem harmônica.

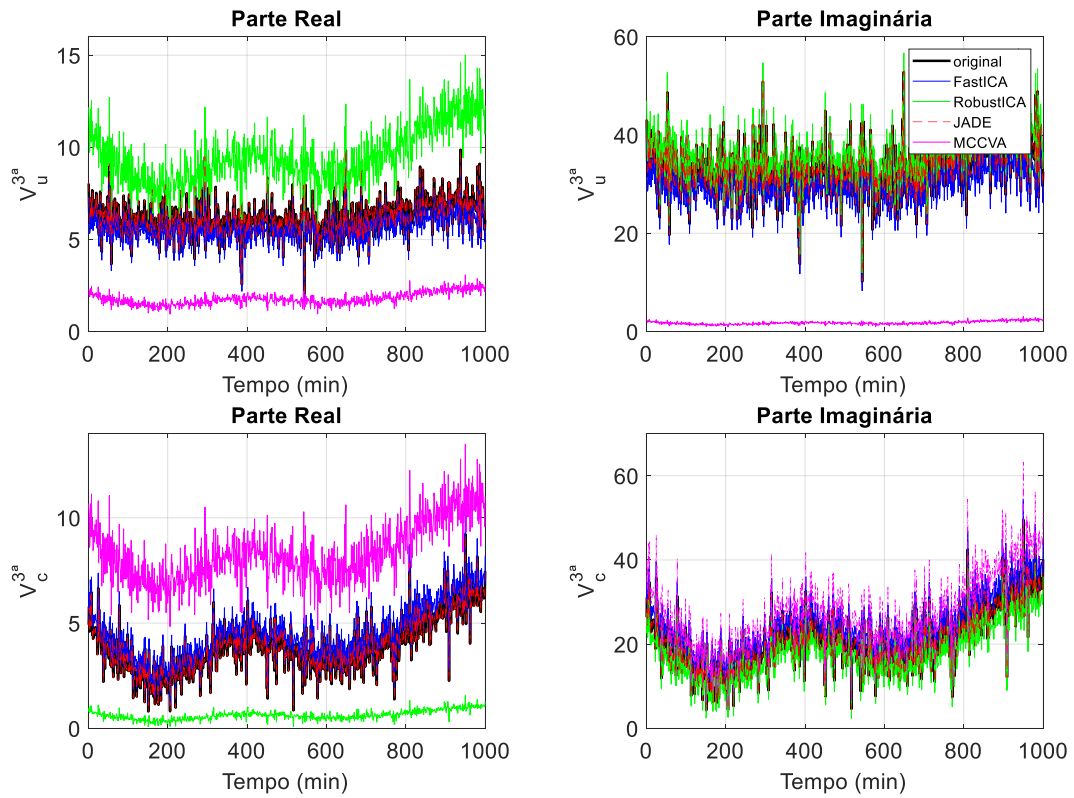


Figura 4.8 – Tensões harmônicas estimadas no Caso 1.1 para a 5ª ordem harmônica.

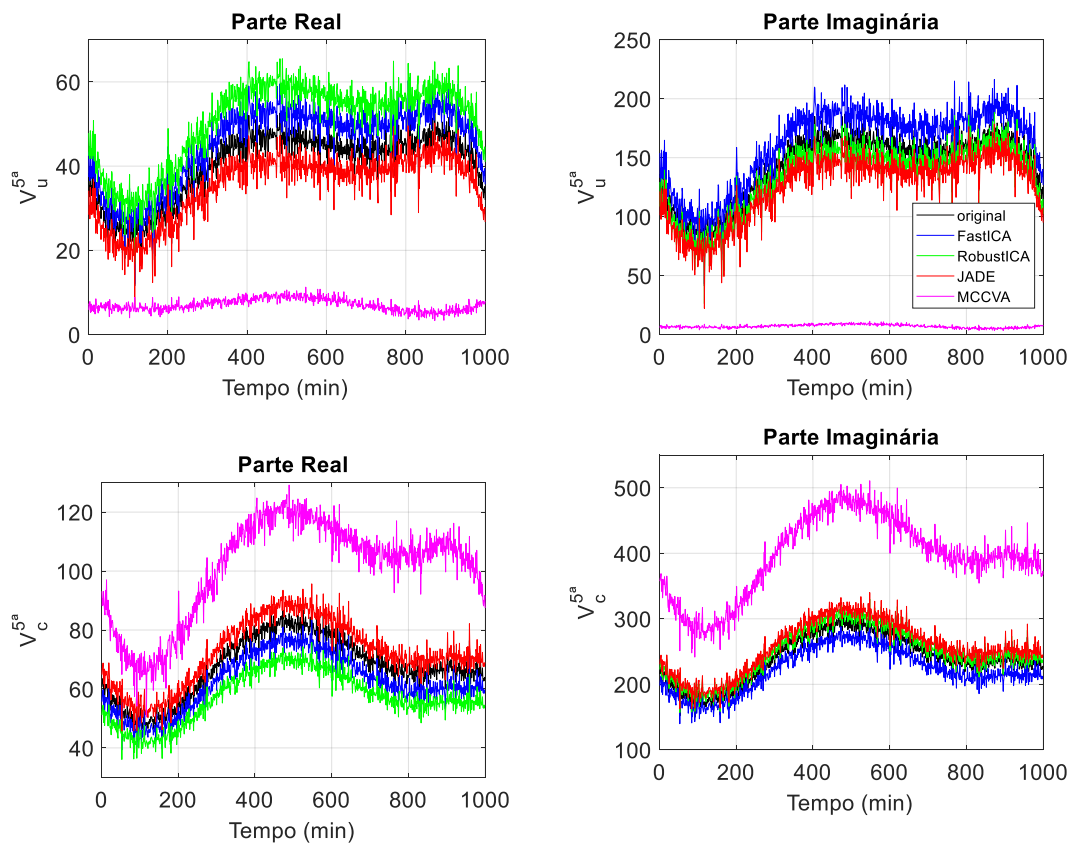
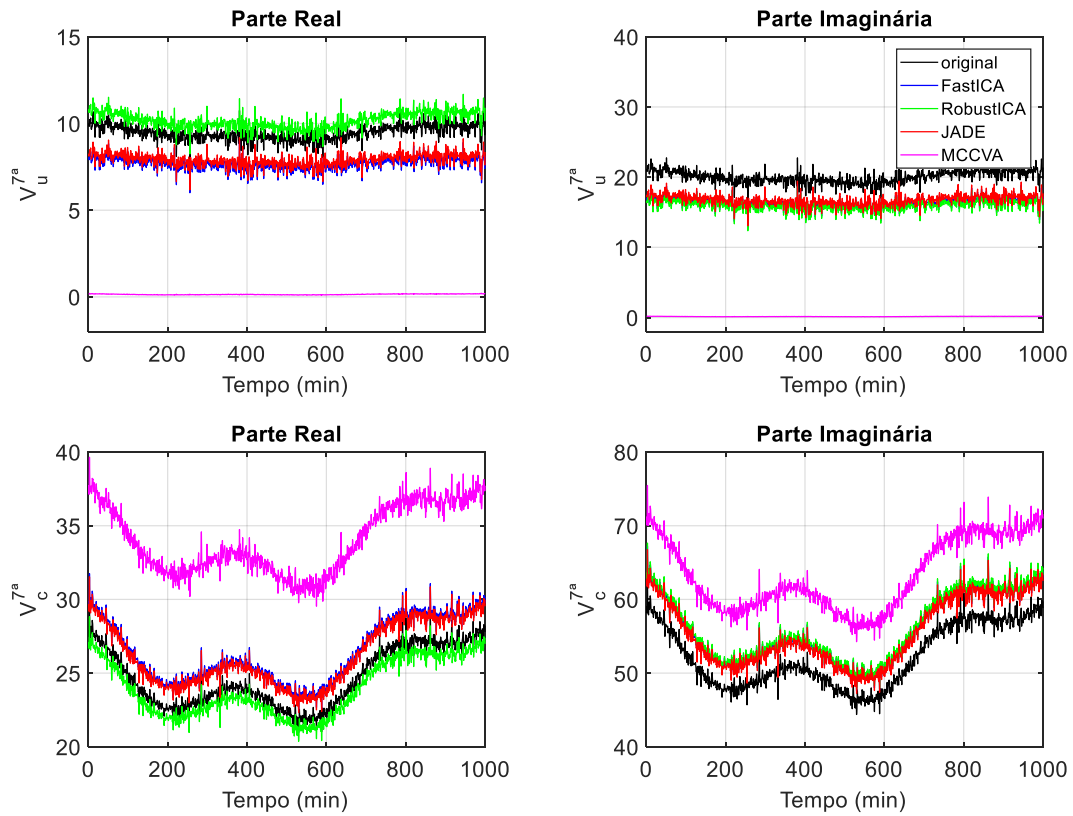


Figura 4.9 – Tensões harmônicas estimadas no Caso 1.1 para a 7ª ordem harmônica.



Por fim, na Tabela 4.3 apresenta-se para esse primeiro caso avaliado os resultados do compartilhamento de responsabilidades harmônicas em termos do erro médio absoluto, ou seja, calculado a partir da média dos erros absolutos, conforme Eq. (4.14).

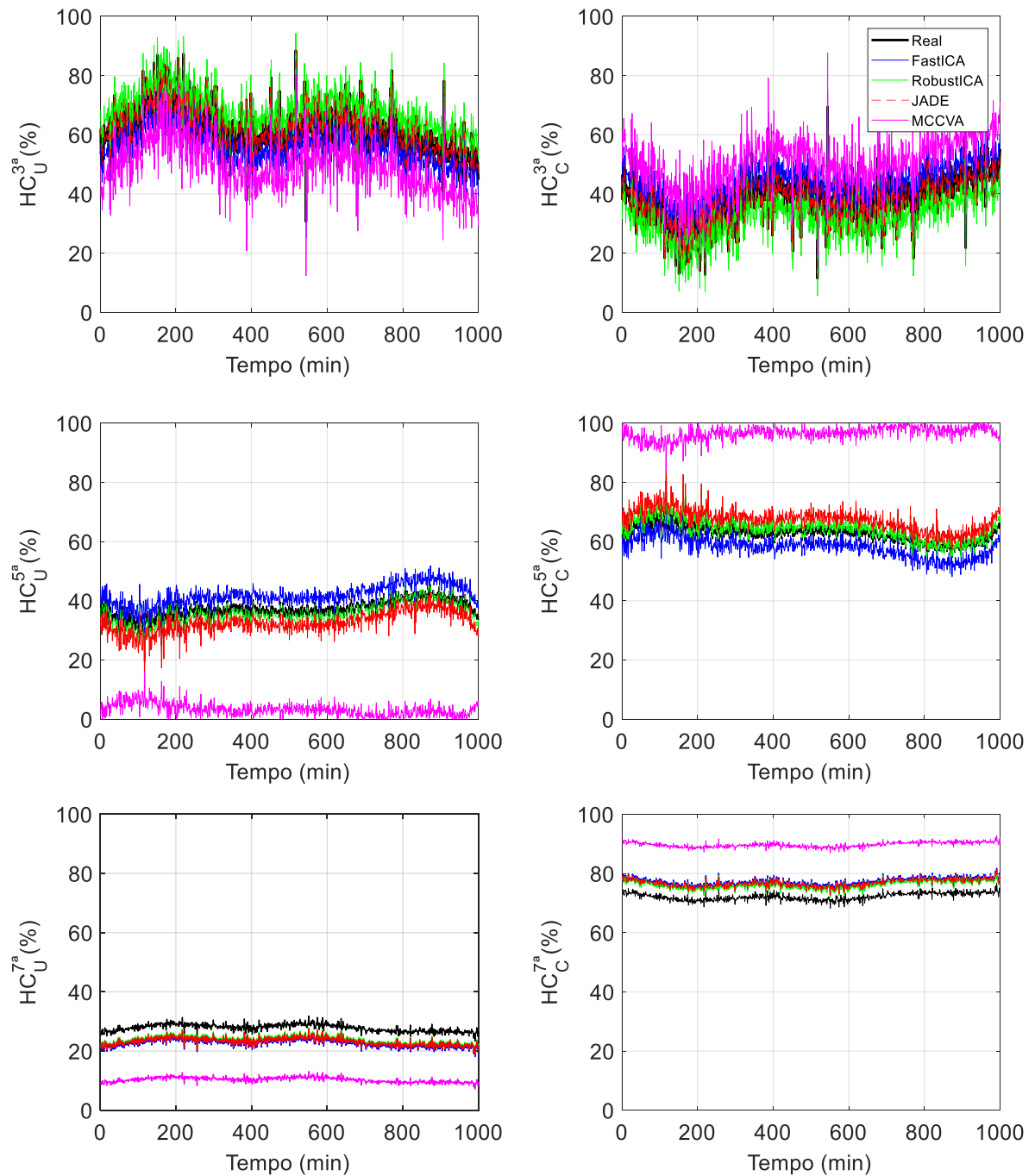
$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (4.14)$$

Onde:

y_i - Valor real ou verdadeiro

\hat{y}_i - Valor estimado

Figura 4.10 – Contribuição harmônica do sistema supridor e do consumidor estimadas para a 3ª, 5ª e 7ª ordem harmônica do Caso 1.1.



Observa-se por meio de uma análise desses resultados que os algoritmos ICA apresentaram erros menores na estimativa das fontes de correntes de maiores amplitudes; Por exemplo, os erros dos algoritmos ICA na atribuição da responsabilidade pela distorção da 7ª ordem harmônica observada no PAC são da ordem de aproximadamente 17% para o sistema supridor e de 6% para o consumidor, sendo que para essa ordem em questão, de acordo com os

gráficos apresentados nas Figura 4.3 e Figura 4.10, a maior contribuição é a proveniente do consumidor. Essa tendência será investigada melhor na subseção 4.1.1.1.

Tabela 4.3 – Erro médio absoluto na atribuição das responsabilidades harmônicas do Caso 1.1.

ALGORITMO	SUPRIDOR			CONSUMIDOR		
	3 ^a	5 ^a	7 ^a	3 ^a	5 ^a	7 ^a
FASTICA	9,40	5,38	18,49	15,70	3,20	7,11
ROBUSTICA	21,97	11,08	14,95	36,74	6,56	5,75
JADE	5,97	7,42	16,46	9,96	4,35	6,33
MCCVA	21,03	90,74	63,05	33,98	54,43	24,29

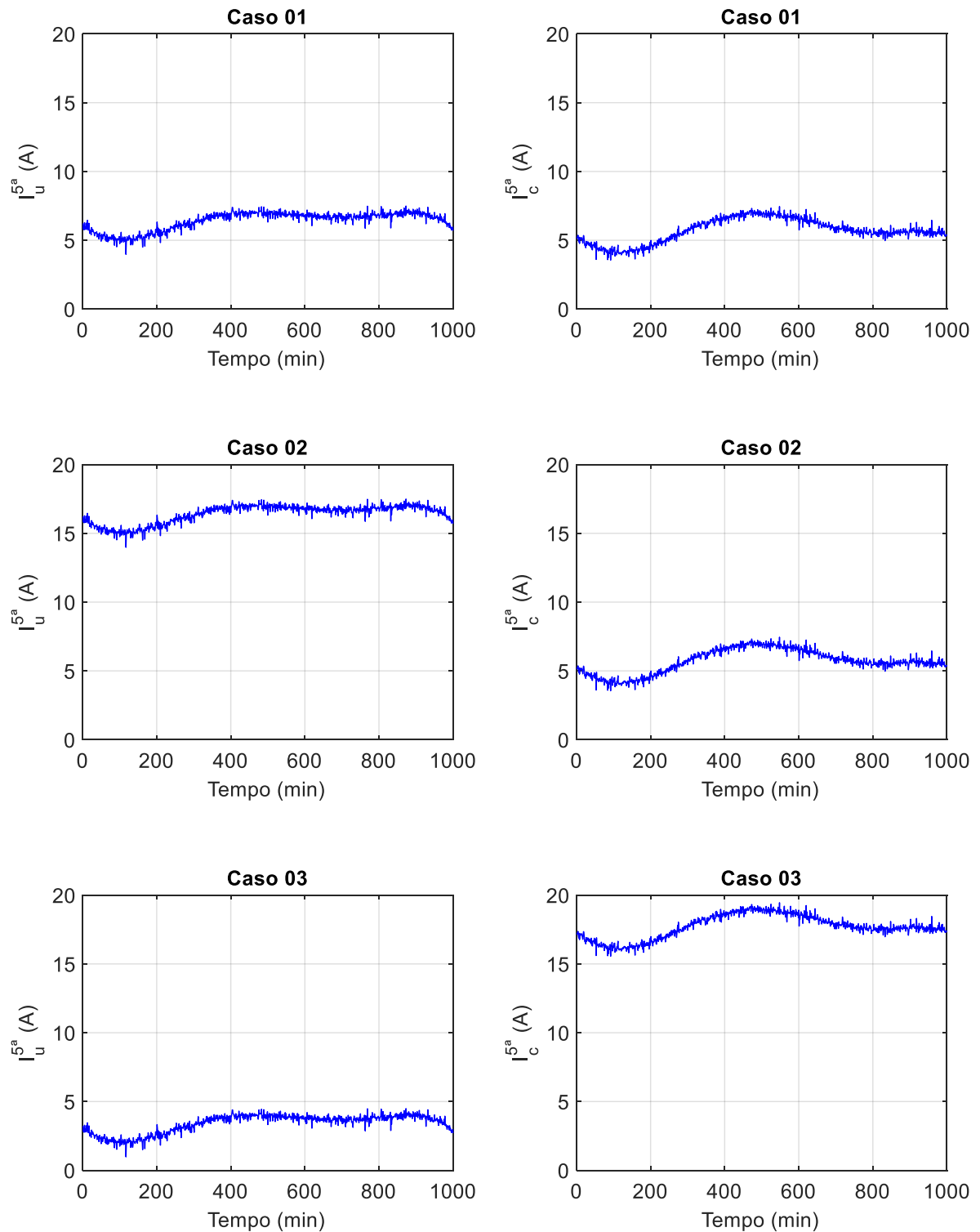
Dessa forma, tendo em vista essa primeira avaliação computacional, conclui-se que, de forma geral, os algoritmos ICA obtiveram um resultado muito melhor que o MCCVA. Além disso, verifica-se que, dentre os algoritmos ICA, o FastICA e o JADE foram os algoritmos que apresentaram os menores erros e, conseqüentemente, os melhores resultados para intervalos nos quais as impedâncias harmônicas permanecem constantes.

4.1.1.1 – Análise da influência das amplitudes das fontes de correntes harmônicas na atribuição de responsabilidades pelo método ICA

Nesta seção, uma análise mais detalhada será realizada para verificar a tendência dos algoritmos ICA de apresentarem erros menores na estimativa da contribuição harmônica das fontes de corrente com maiores amplitudes. Para isso, considerando exclusivamente a 5^a ordem harmônica, a amplitude das fontes de correntes do sistema supridor e do consumidor serão ajustadas para os três casos específicos descritos a seguir e ilustrados na Figura 4.11. As componentes de variações rápidas utilizadas são as mesmas para os três casos.

- **Caso 01:** As amplitudes de ambas as fontes, isto é, tanto do sistema supridor quanto do consumidor, serão ajustadas para que possuam aproximadamente a mesma magnitude;
- **Caso 02:** A amplitude de $I_u^{5^a}$ será muito maior do que a de $I_c^{5^a}$;
- **Caso 03:** A amplitude de $I_c^{5^a}$ será muito maior do que a de $I_u^{5^a}$.

Figura 4.11 - Fontes de correntes harmônicas com diferentes amplitudes usadas para avaliar o erro de estimativa nos algoritmos ICA.



A Tabela 4.4 apresenta o erro médio absoluto na atribuição das responsabilidades harmônicas entre a concessionária e o consumidor para os diferentes algoritmos. Como esperado, todos os algoritmos ICA avaliados apresentaram erros menores na estimativa da fonte

de maior amplitude, ficando assim comprovada a tendência observada nas simulações conduzidas no Caso 1.1.

Tabela 4.4 – Erro médio absoluto para fontes de correntes harmônicas de amplitude diferente.

ALGORITMO	SUPRIDOR			CONSUMIDOR		
	CASO 01	CASO 02	CASO 3	CASO 01	CASO 02	CASO 3
FASTICA	5,09	5,51	9,91	5,78	16,17	1,86
ROBUSTICA	9,39	8,28	18,73	10,65	24,29	3,50
JADE	3,69	1,22	24,35	4,15	3,51	4,49
MCCVA	69,94	44,63	20,33	79,09	130,39	3,12

4.2.2. Caso 1.2 – Variação da impedância do consumidor

Nesse segundo caso, buscou-se avaliar o impacto da variação da matriz de impedância, durante o intervalo de tempo analisado, no método apresentado. Logo, para tal, partiu-se do pressuposto de que sob um modo de operação estável, a impedância do sistema supridor sofre pequenas variações, enquanto a impedância do consumidor varia de acordo com a carga conectada.

Assim, tendo por base o Caso 1.1, a impedância do sistema supridor foi mantida constante e a impedância do consumidor (Z_c^h) foi aleatoriamente gerada, usando números normalmente distribuídos ($N(\mu; \sigma^2)$), com média (μ) e variância (σ^2) descrita na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Variância adicionada a impedância harmônica do consumidor.

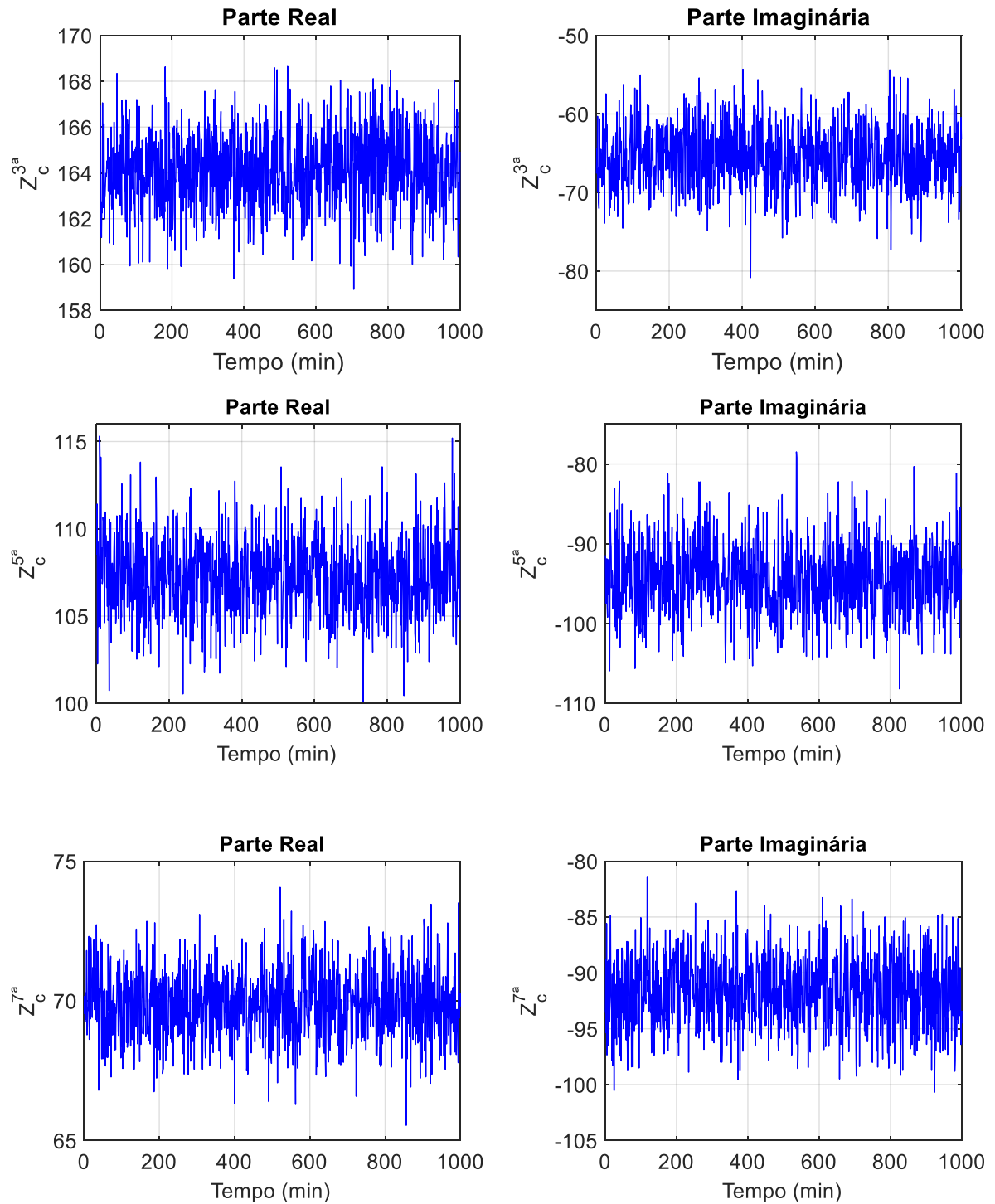
h	Parte real	Parte imaginária
3^a	(164,16; 3)	(-65,67; 15)
5^a	(107,32; 5)	(-94,45; 20)
7^a	(69,82; 1,5)	(-91,77; 10)

A título de ilustração, a Figura 4.12 apresenta graficamente a parte real e imaginária das impedâncias harmônicas do consumidor geradas para esse caso em análise.

As Figura 4.13, Figura 4.14 e Figura 4.15 mostram para a 3^a, 5^a e 7^a ordem, respectivamente, as tensões e corrente simuladas no PAC, usando esses novos valores de impedâncias do consumidor, apresentados na Figura 4.12. Nessas simulações, tal como no

primeiro caso avaliado, as componentes de variações rápidas dos sinais simulados também foram extraídas por filtro de média móvel de 8 pontos.

Figura 4.12 – Impedância harmônica do consumidor utilizada no Caso 1.2.



As Figura 4.16, Figura 4.17 e Figura 4.18 mostram, de forma gráfica, as tensões harmônicas estimadas para 3ª 5ª e 7ª ordem harmônica pelas metodologias avaliadas.

Figura 4.13 - Tensão e corrente simuladas no PAC para a 3ª ordem harmônica no Caso 1.2.

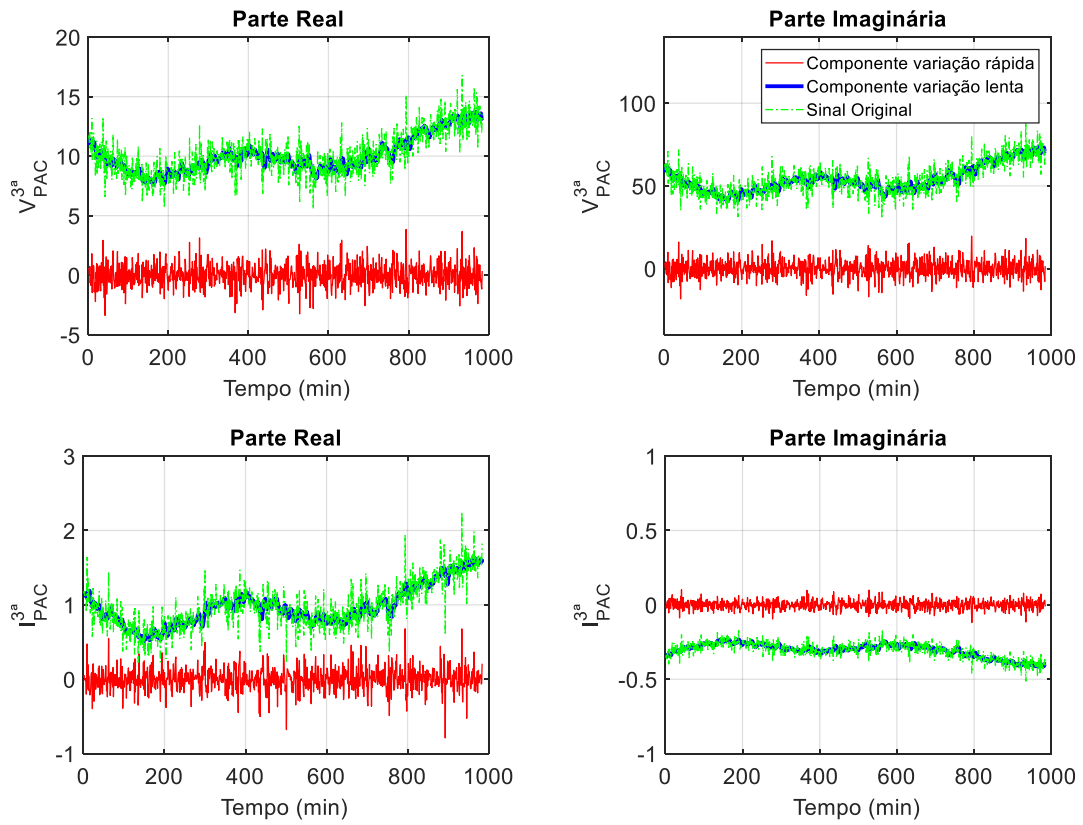


Figura 4.14 - Tensão e corrente simuladas no PAC para a 5ª ordem harmônica no Caso 1.2.

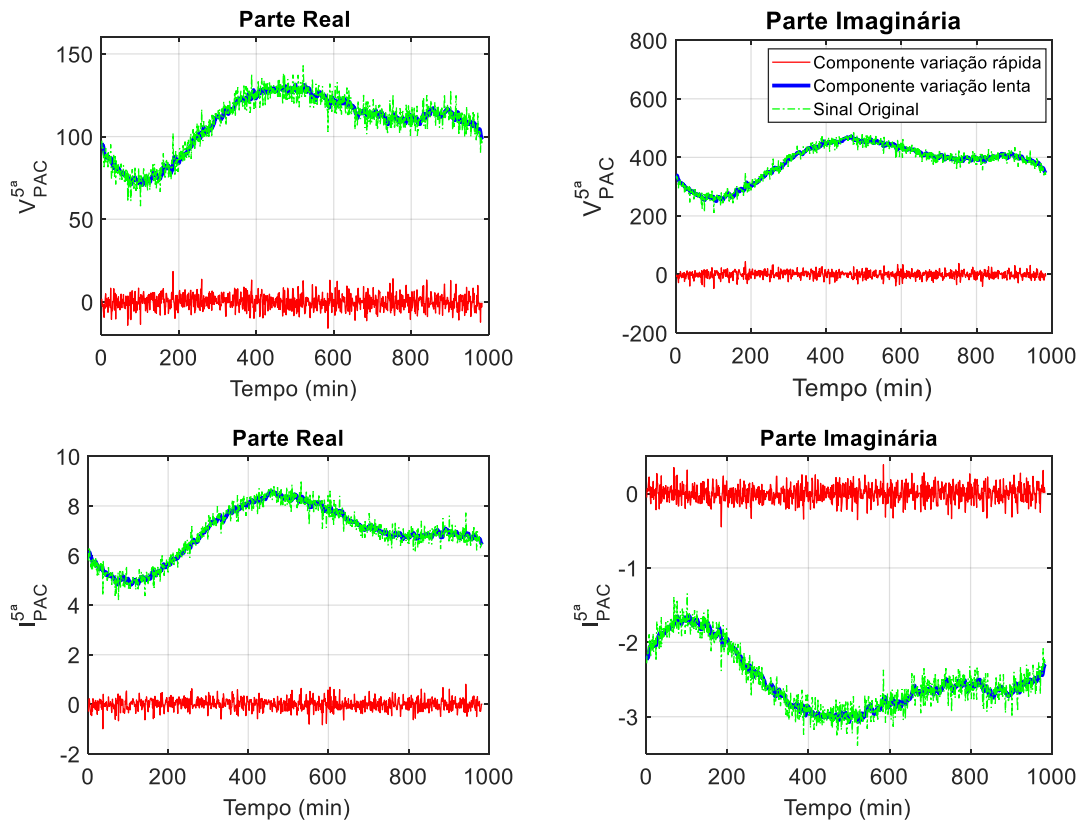


Figura 4.15 - Tensão e corrente simuladas no PAC para a 7ª ordem harmônica no Caso 1.2.

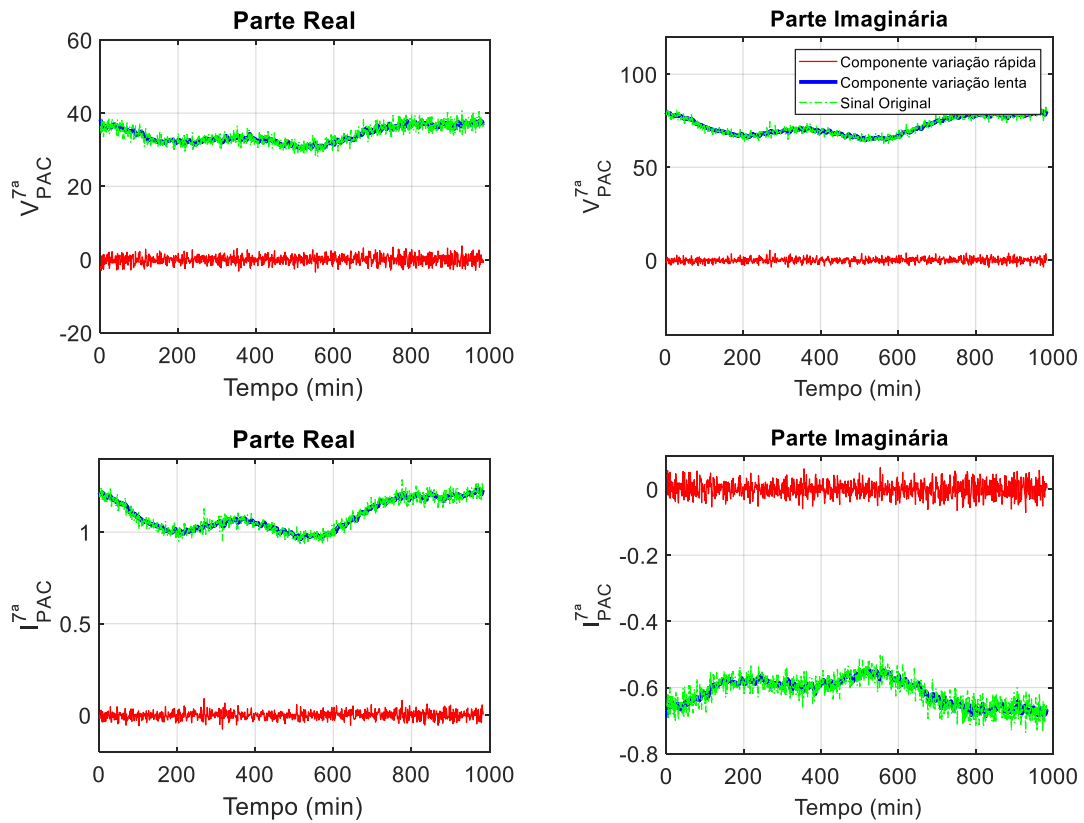


Figura 4.16 – Tensões harmônicas estimadas no Caso 1.2 para a 3ª ordem harmônica.

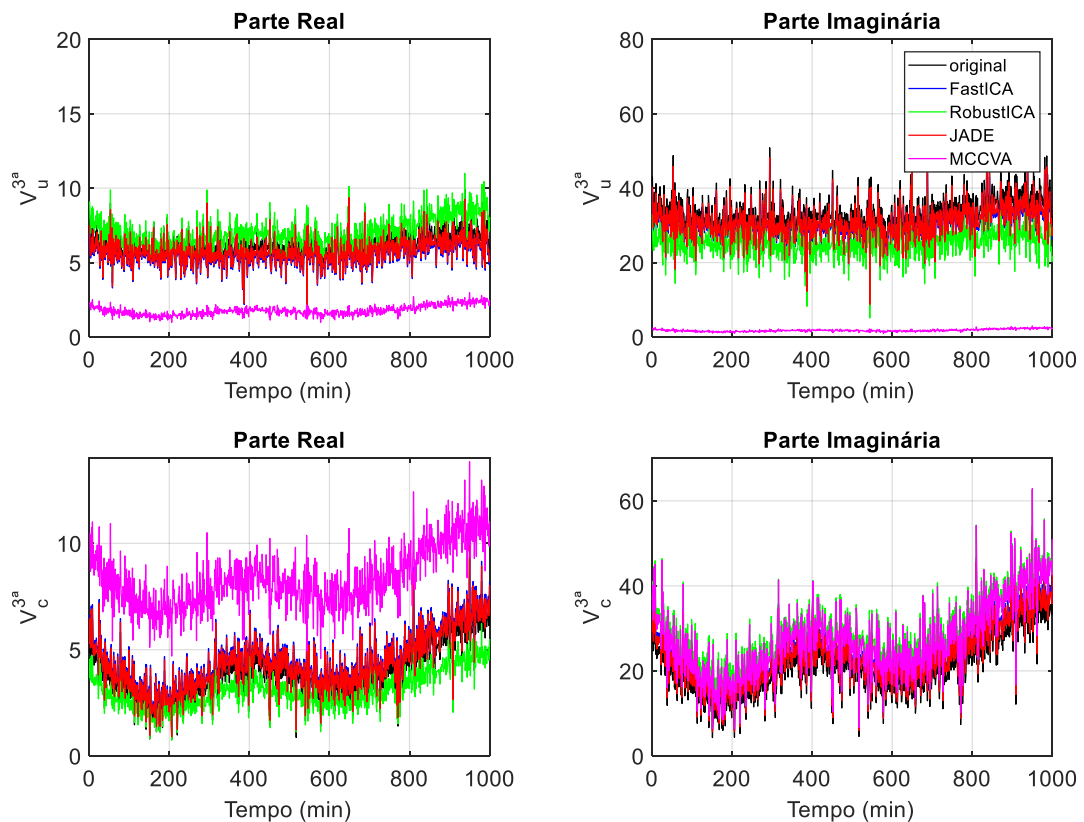


Figura 4.17 – Tensões harmônicas estimadas no Caso 1.2 para a 5ª ordem harmônica.

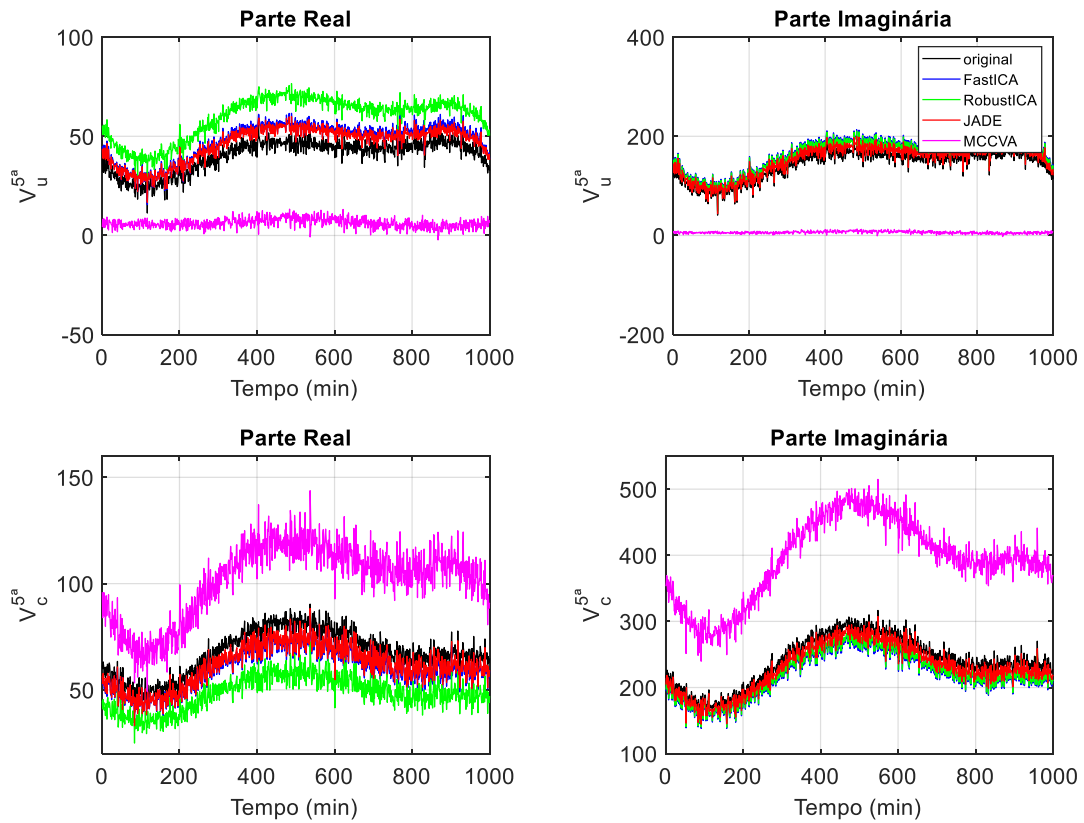
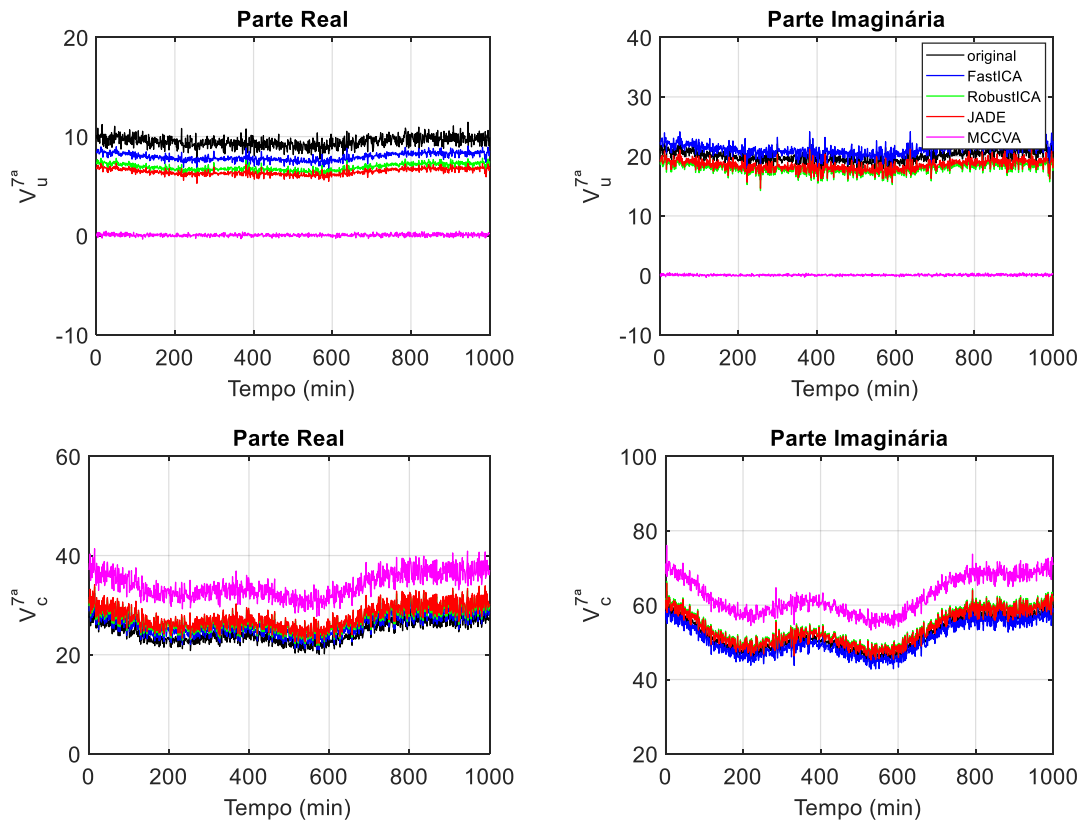
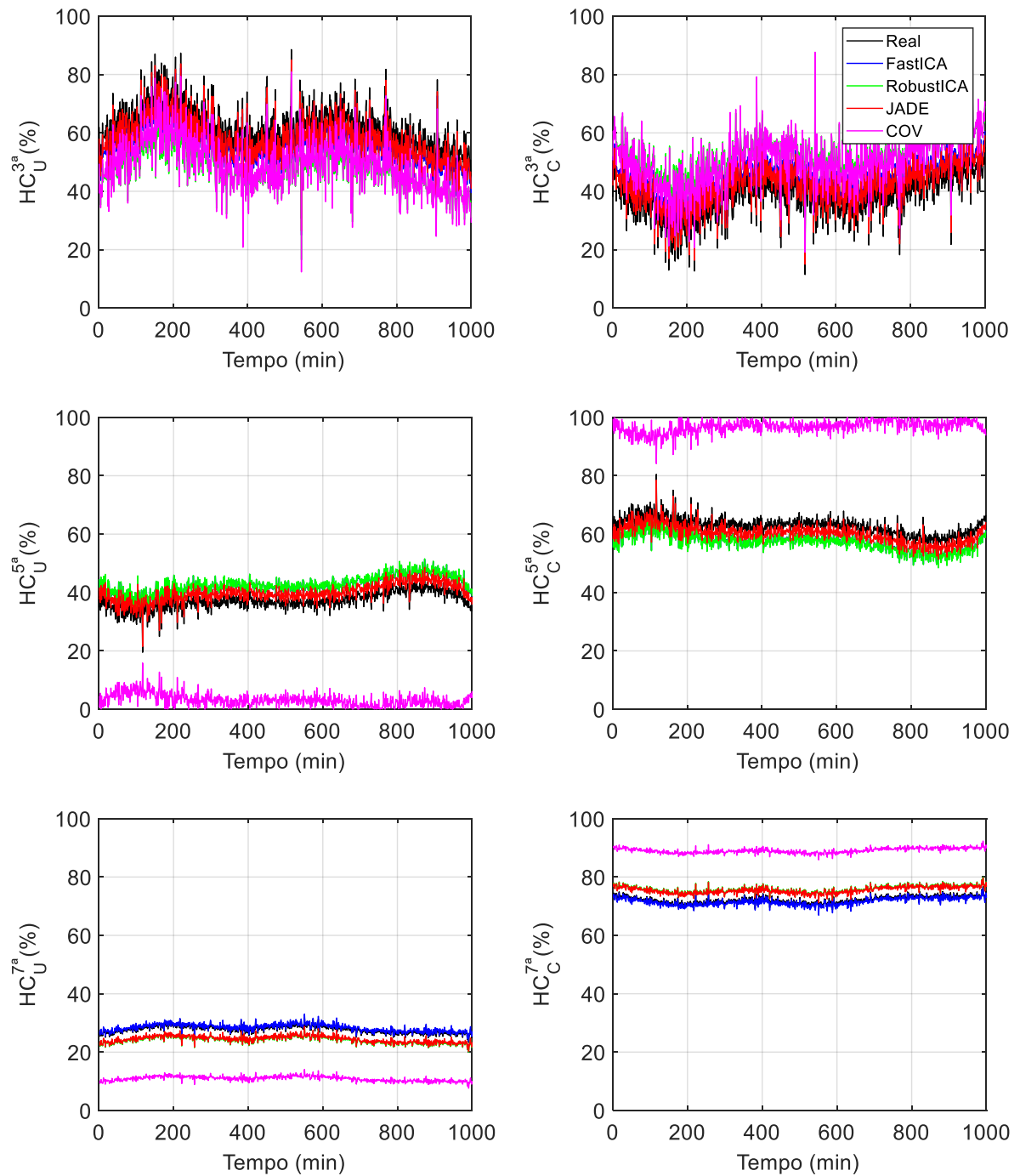


Figura 4.18 – Tensões harmônicas estimadas no Caso 1.2 para a 7ª ordem harmônica.



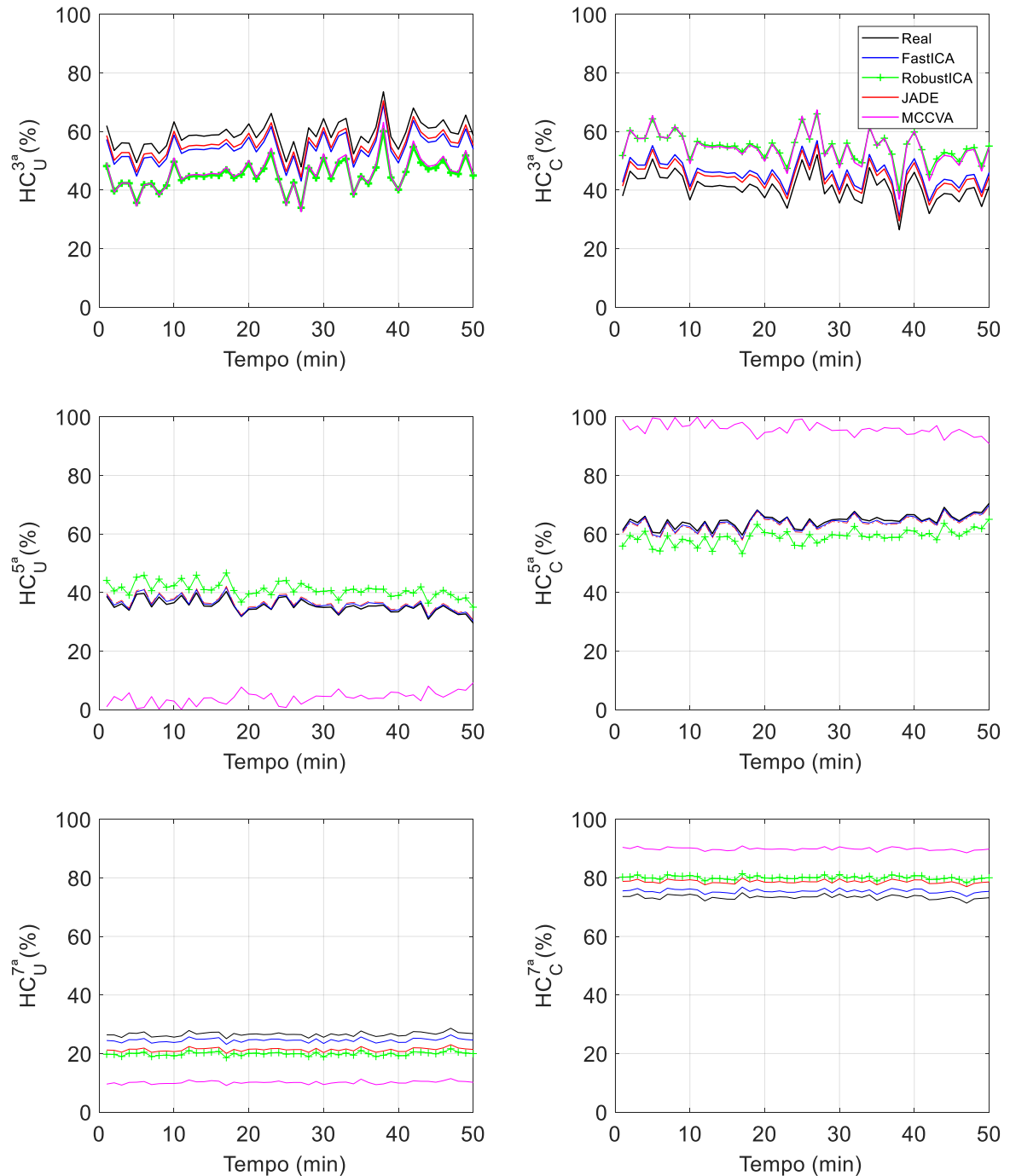
Para tornar mais claro o desempenho dos métodos em questão, a Figura 4.20 apresenta os resultados em termos dos percentuais da parcela de responsabilidade de cada uma das partes envolvidas de forma escalar, obtidos por meio da projeção fasorial.

Figura 4.19 – Contribuição harmônica do sistema supridor e do consumidor estimadas para a 3ª, 5ª e 7ª ordem harmônica do Caso 1.2.



Como os algoritmos ICA avaliados obtiveram resultados muito próximos, para facilitar a visualização dos resultados apresentados na Figura 4.19, a Figura 4.20 mostra uma ampliação dos instantes iniciais da amostra.

Figura 4.20 – Contribuição harmônica do sistema supridor e do consumidor estimadas para a 3ª, 5ª e 7ª ordem harmônica do Caso 1.2, para as primeiras 50 amostras.



A Tabela 4.6 mostra o erro médio absoluto obtidos para o caso em questão. É possível verificar por meio de uma análise dos resultados apresentados que, tal como no Caso 1.1, não

houve aqui qualquer inversão na atribuição das responsabilidades, sendo todos os algoritmos ICA avaliados capazes de identificar corretamente o principal responsável pela distorção harmônica observada no PAC. Além disso, nota-se outra vez que, considerando todas as ordens harmônicas avaliadas, os algoritmos FastICA e JADE foram os que apresentaram o menor erro.

Tabela 4.6 – Erro médio absoluto na atribuição das responsabilidades harmônicas do Caso 1.2.

ALGORITMO	SUPRIDOR			CONSUMIDOR		
	3 ^a	5 ^a	7 ^a	3 ^a	5 ^a	7 ^a
FASTICA	8,92	14,85	1,95	14,89	8,78	0,75
ROBUSTICA	22,79	15,22	12,83	38,10	9,01	4,94
JADE	6,49	7,39	12,03	10,83	4,38	4,64
MCCVA	21,01	91,11	60,79	33,92	54,62	23,43

Portanto, com base nos resultados obtidos nesta primeira etapa, pode-se concluir que a ocorrência de variações na impedância do consumidor, ou seja, na matriz de mistura, durante o intervalo analisado não provocou impacto significativo no comportamento de nenhum dos algoritmos avaliados.

4.3. 2^a ETAPA – AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA VARIÂNCIA DAS FONTES

Nessa segunda etapa, para avaliar o impacto da variância das fontes no compartilhamento de responsabilidades usando o método ICA, várias simulações foram realizadas considerando fontes de correntes com componentes de variações rápidas de diferentes variâncias, com valores entre 0,01 e 0,1. Com o intuito de clarificar o efeito da variância sobre a fonte, a Figura 4.21 ilustra para as três primeiras ordens harmônicas dominantes, ou seja, 3^a, 5^a e 7^a, as fontes de correntes do sistema supridor e do consumidor com variâncias de 0,01 (mínima variância) e a Figura 4.22 as fontes com variância de 0,1 (máxima variância) da análise conduzida.

Conforme mencionado anteriormente, nessa etapa o impacto da variação da matriz de mistura também será reavaliado. Portanto, no Caso 2.1 para criar os dados de tensão e corrente no PAC foi considerada uma condição ideal na qual ambas as impedâncias permaneceram constantes ao longo do período analisado. Em seguida, no Caso 2.2, considerando um sistema sob modo de operação estável, variações aleatórias normalmente distribuídas foram adicionadas

apenas à impedância harmônica do consumidor. Visando garantir a confiabilidade dos resultados, para cada caso analisado, a contribuição harmônica foi avaliada 100 vezes e todos os resultados obtidos foram novamente comparados com os fornecidos pelo MCCVA.

Figura 4.21 - Fontes de correntes harmônicas com variâncias de 0,01 e impedâncias constantes.

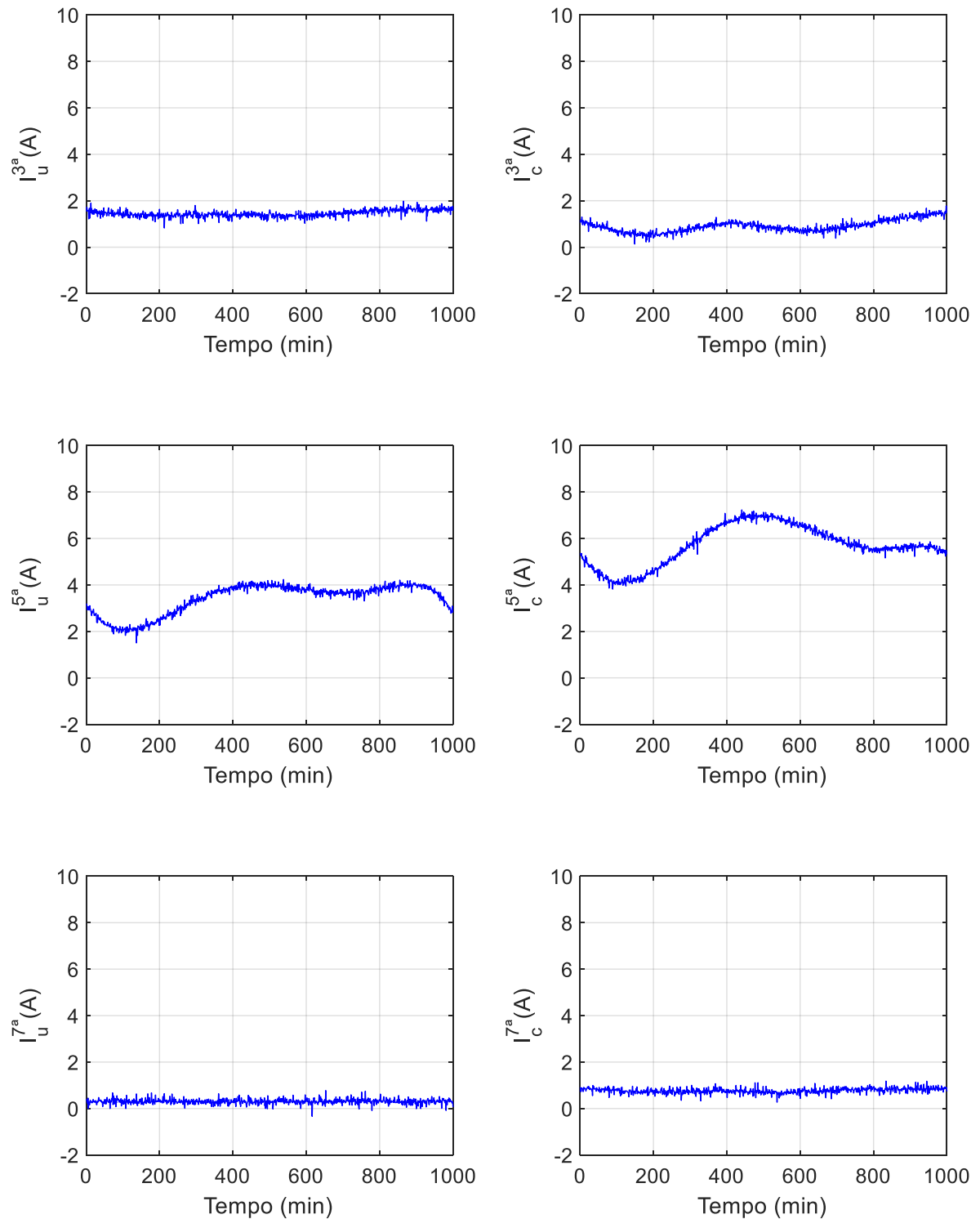
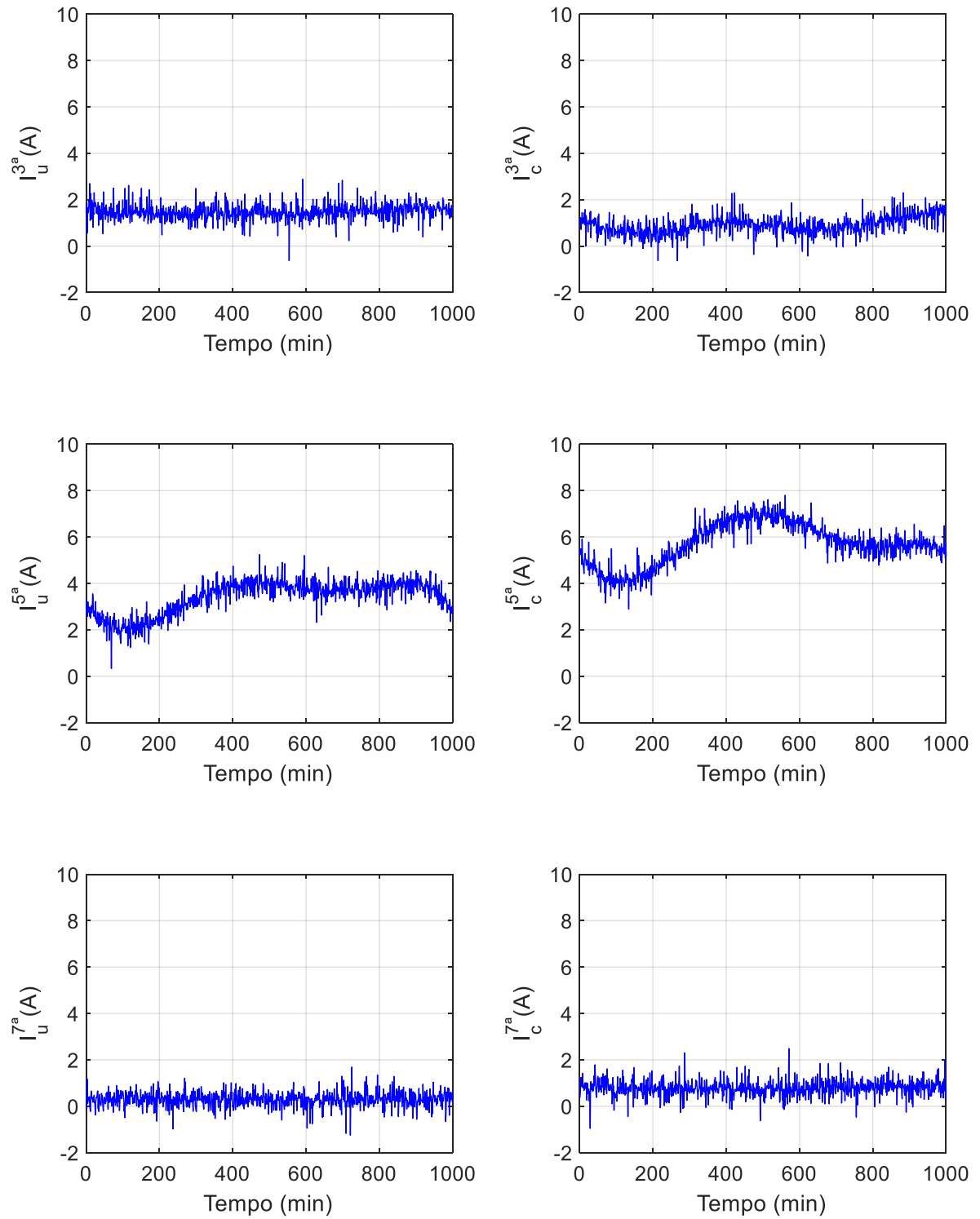


Figura 4.22 - Fontes de correntes harmônicas com variância de 0,1 e impedâncias constantes.



4.3.1. Caso 2.1 – Impedância do sistema supridor e do consumidor constantes

Neste primeiro caso analisado, o procedimento descrito no Capítulo 4 foi aplicado as componentes de variação rápida de tensão e correntes no PAC, extraídas dos sinais simulados por um filtro de média móvel de 8 pontos.

A Figura 4.23 mostra os resultados obtidos pelo algoritmo FastICA em termos do erro percentual médio absoluto (MAPE) para a 3ª, 5ª e 7ª ordem harmônica. Optou-se nessa etapa por utilizar o MAPE porque ele é um dos indicadores mais usados na literatura para verificar a acurácia de uma previsão, sendo matematicamente obtido para o problema em questão através da seguinte expressão:

$$MAPE (\%) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n=100} \left| \frac{HC_{real} - HC_{estimado}}{HC_{real}} \right| \cdot 100 \quad (4.15)$$

onde n , é o número de simulações realizadas, no caso 100 para cada fonte considerada, e HC_{real} e $HC_{estimado}$ são as contribuições harmônicas escalares reais e estimadas, respectivamente.

Por meio de uma análise dos resultados apresentados na Figura 4.23, novamente verifica-se a tendência do algoritmo FastICA a apresentar erros menores na atribuição da responsabilidade harmônica para a parte cuja fonte é dominante, ou seja, de maior amplitude, conforme análise realizada na seção 5.1.1.1. Além disso, observa-se também que as diferentes relações entre $|Z_c|/|Z_u|$ para as harmônicas avaliadas, vide Tabela 4.1, não provocou qualquer impacto na acurácia do algoritmo.

No entanto é possível perceber que existe uma sensibilidade do algoritmo FastICA a fontes de diferentes variâncias, sendo o aumento do erro na atribuição de responsabilidades para a parte secundária intensificado pela diferença de variância entre as fontes. Por exemplo, para a 5ª ordem harmônica, os erros do sistema supridor aumentam em torno de 15% quando a variância da sua fonte é 10 vezes superior à do consumidor.

As Figura 4.24, Figura 4.25 e Figura 4.26 mostram, respectivamente, os resultados obtidos pelos algoritmos RobustICA, JADE e pelo MCCVA.

Figura 4.23 - MAPE do algoritmo FastICA na atribuição das responsabilidades harmônicas do Caso 2.1.

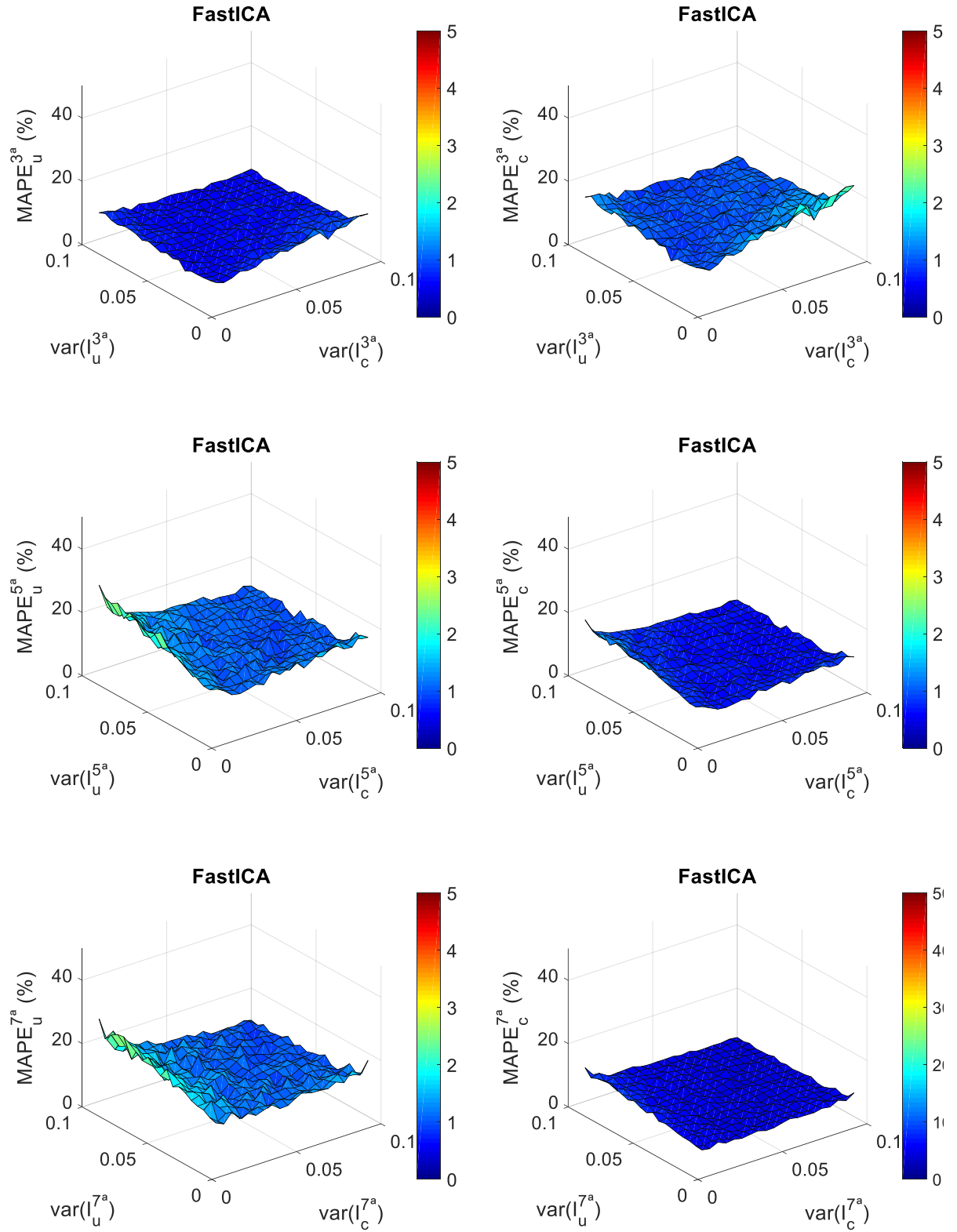


Figura 4.24 - MAPE do algoritmo RobustICA na atribuição das responsabilidades harmônicas do Caso 2.1.

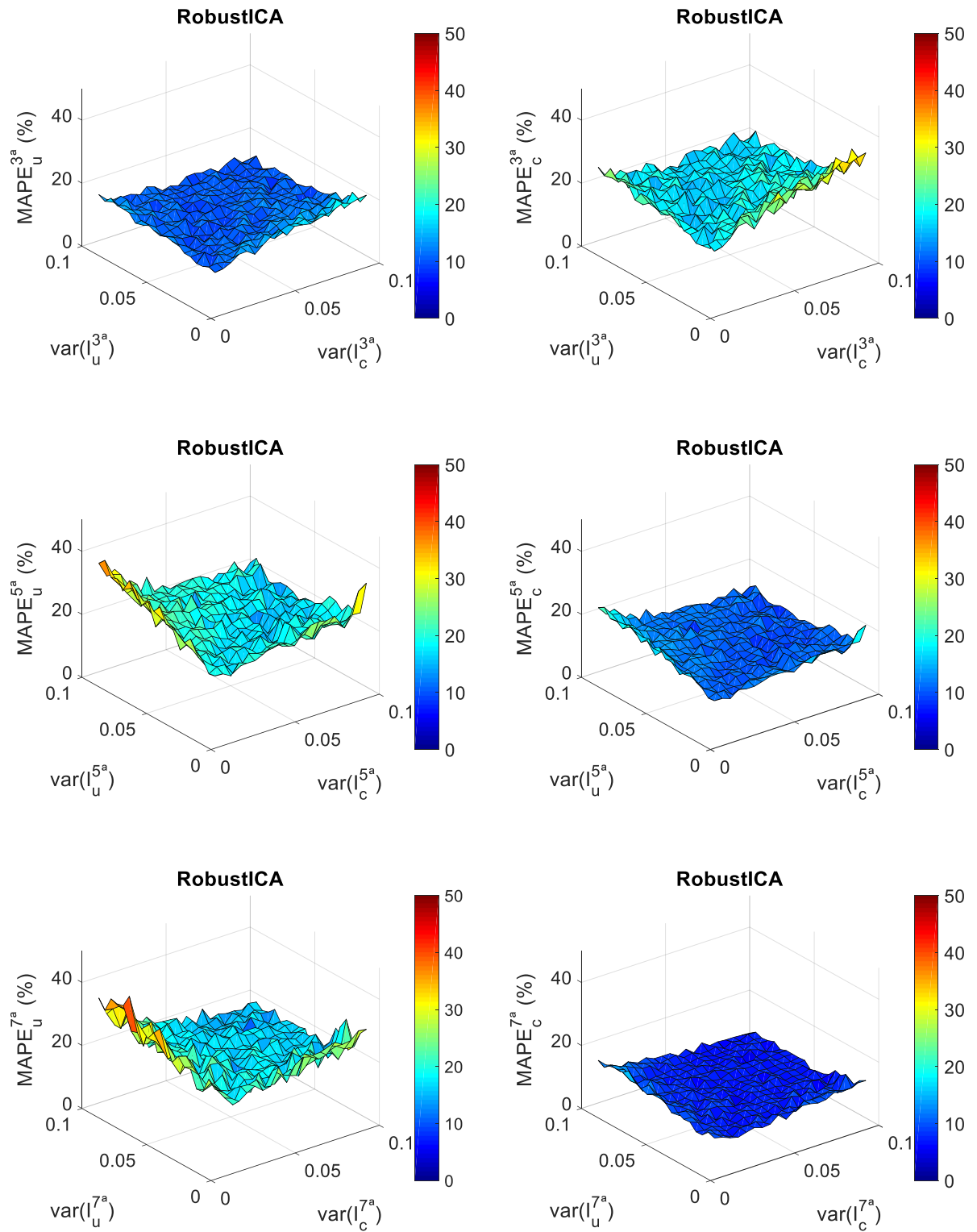


Figura 4.25 - MAPE do algoritmo JADE na atribuição das responsabilidades harmônicas do Caso 2.1.

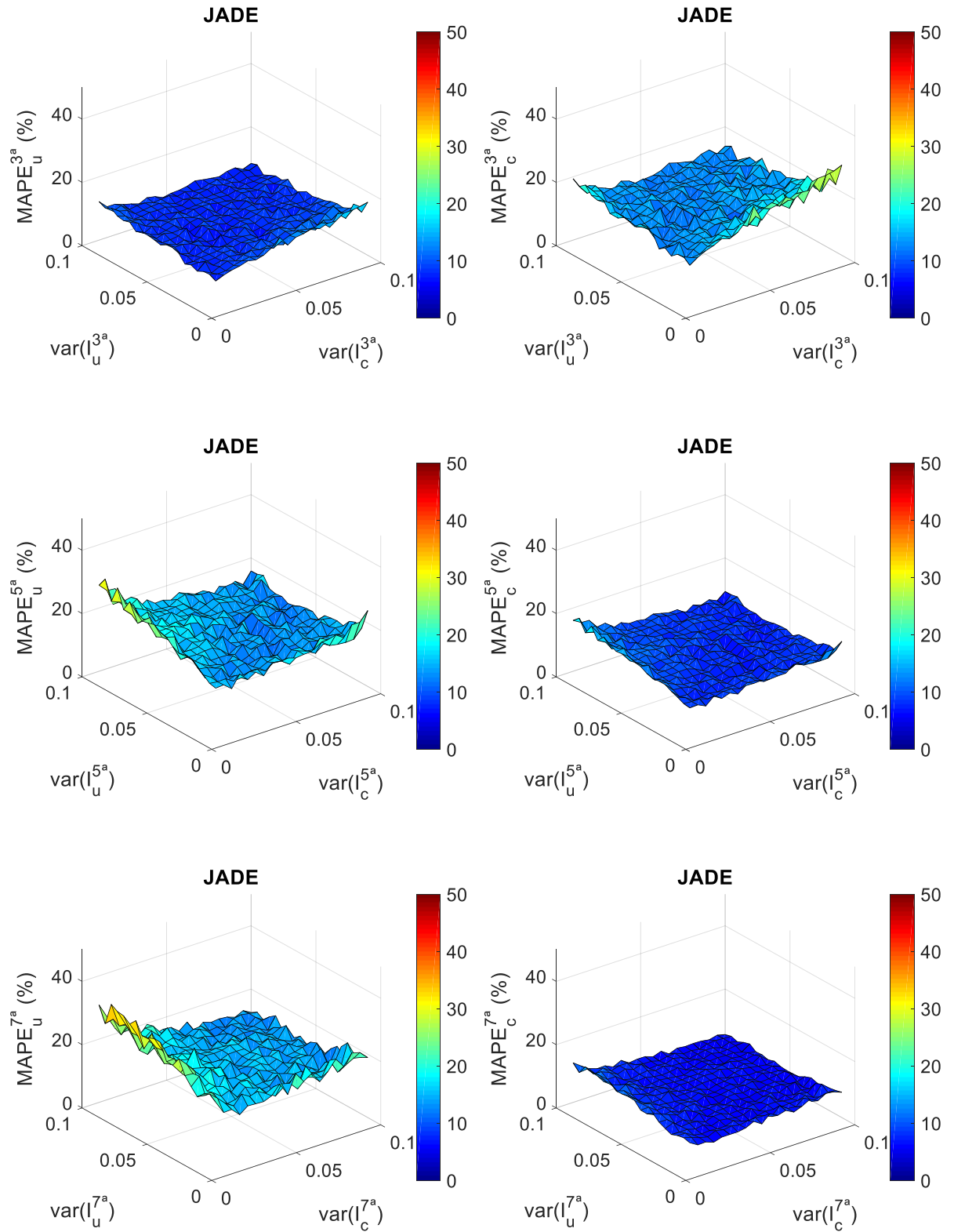
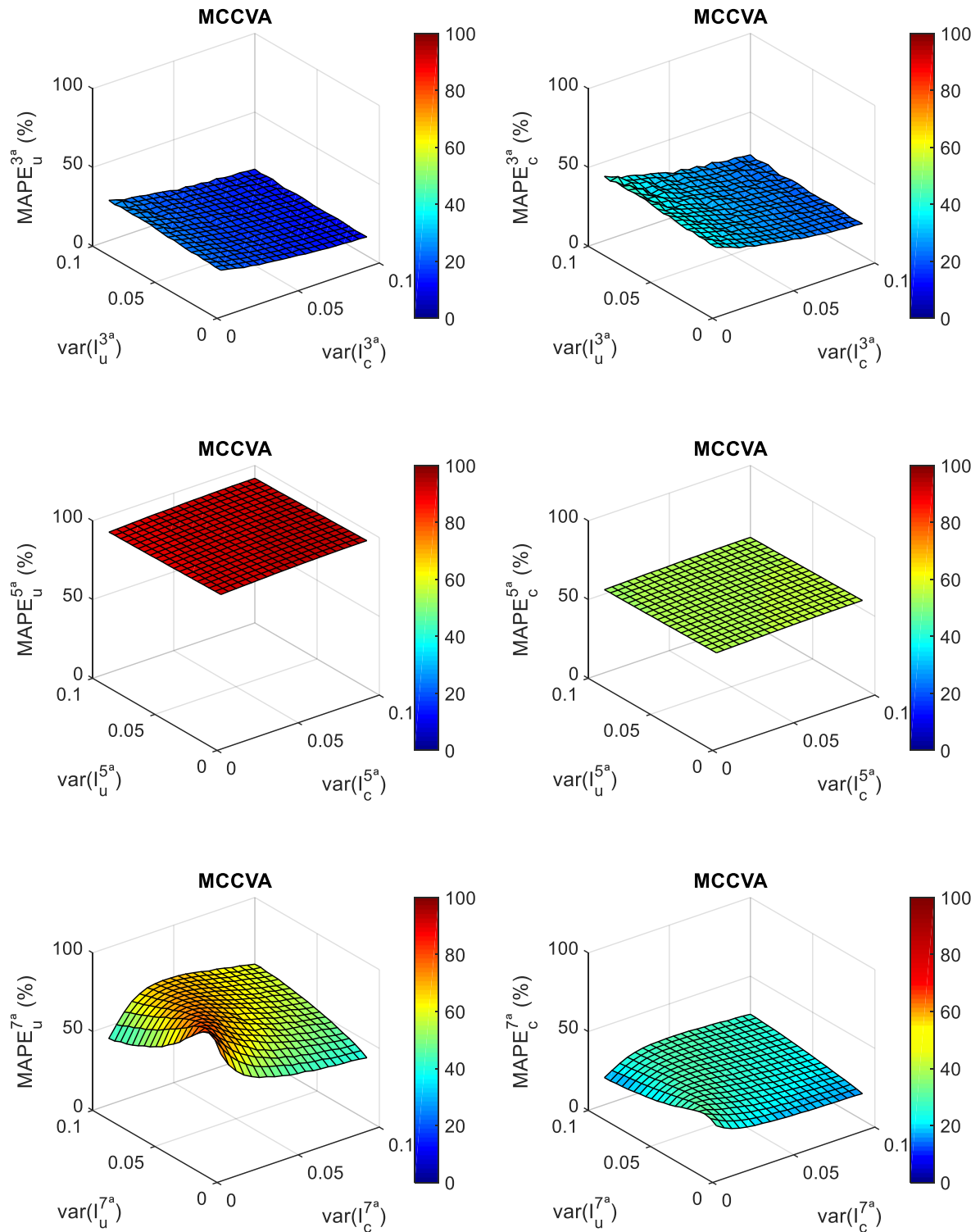


Figura 4.26 - MAPE do algoritmo MCCVA na atribuição das responsabilidades harmônicas do Caso 2.1.



Tal como ocorrido para os casos anteriores, os resultados obtidos no Caso 2.1 evidenciam que o algoritmo FastICA é o que apresenta, efetivamente, o melhor desempenho na atribuição das responsabilidades harmônicas. Todavia, embora o algoritmo FastICA forneça resultados mais precisos, é possível observar que todos os algoritmos ICA avaliados possuem

a mesma tendência, isto é, menores erros na estimativa da contribuição harmônica da fonte dominante, diminuição da acurácia com o aumento da diferença da variância entre as fontes e insensibilidade à relação entre as impedâncias do sistema supridor e do consumidor.

Por fim, é bastante evidente nos resultados apresentados que para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas de forma não invasiva, o método ICA apresentou resultados melhores do que os fornecidos pelo MCCVA, conforme o esperado.

4.3.2. Caso 2.2 - Variação da impedância do consumidor

Nesse último caso, todas as variáveis que possivelmente poderiam influenciar de forma negativa o desempenho do modelo foram alteradas. Assim, além dos aspectos considerados no Caso 2.1, também foram inseridas variações aleatórias normalmente distribuídas na impedância harmônica do consumidor, com variância de 10% do seu valor nominal, tanto para a parte real quanto para a parte imaginária.

As Figura 4.27, Figura 4.28, Figura 4.29 e Figura 4.30 mostram, nessa devida ordem, os MAPEs obtidos pelos algoritmos FastICA, RobustICA, JADE e MCCVA na atribuição de responsabilidades harmônicas para o Caso 2.2.

Os resultados logrados nessas simulações, corroboram, enfim, as hipóteses anteriormente levantadas sobre a aplicação do método ICA no problema do compartilhamento de responsabilidades harmônicas, isto é:

- A existência de algumas variações na impedância do consumidor, não irá impactar negativamente no desempenho do método;
- A relação entre a impedância do sistema supridor e do consumidor é de fato irrelevante;
- Os erros aumentam sensivelmente para fontes com variâncias muito diferentes;
- Dentre os algoritmos avaliados o FastICA é o que apresentou uma melhor performance.

Figura 4.27 - MAPE do algoritmo FastICA na atribuição das responsabilidades harmônicas do Caso 2.2.

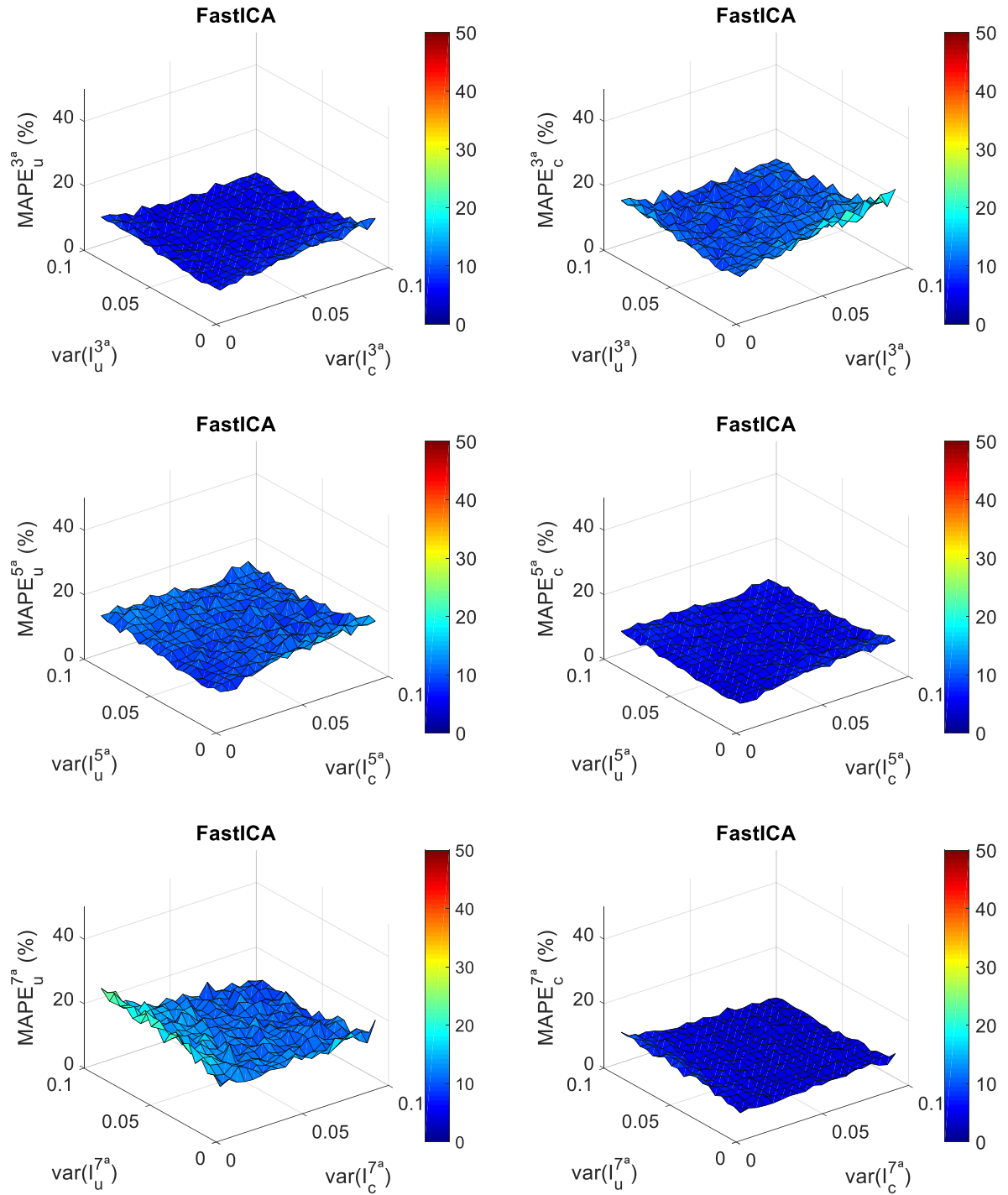


Figura 4.28 - MAPE do algoritmo RobustICA na atribuição das responsabilidades harmônicas do Caso 2.2.

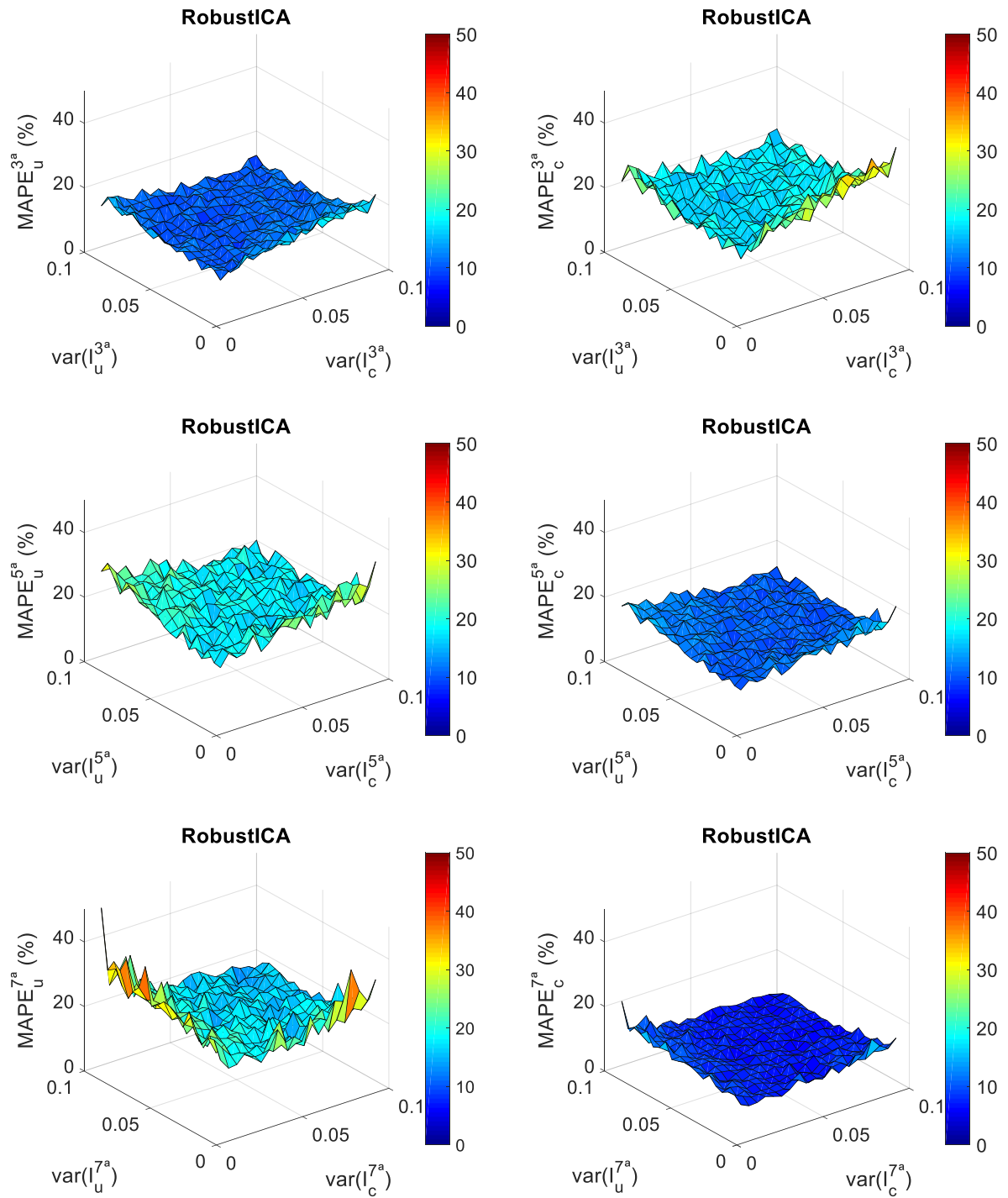


Figura 4.29 - MAPE do algoritmo JADE na atribuição das responsabilidades harmônicas do Caso 2.2.

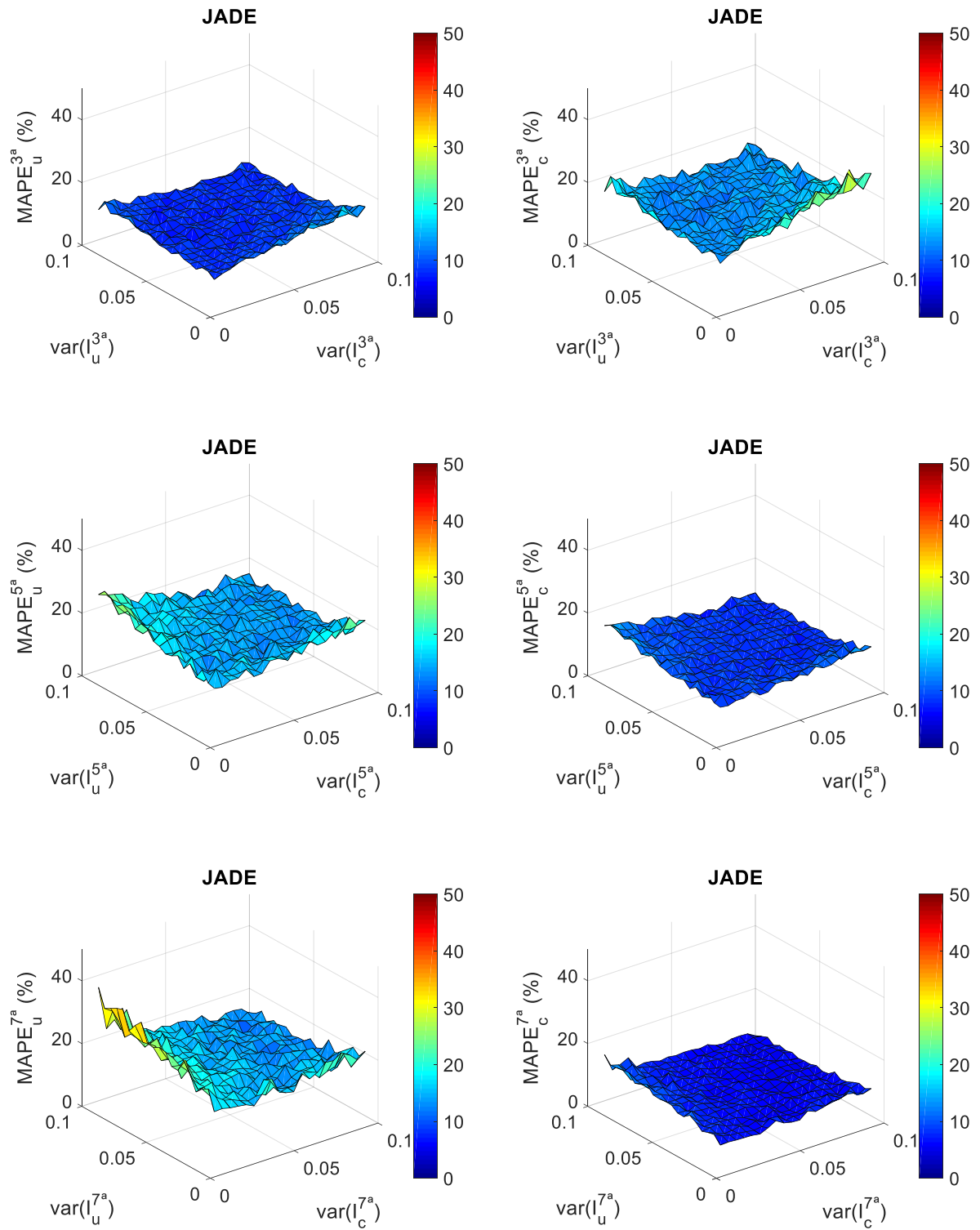
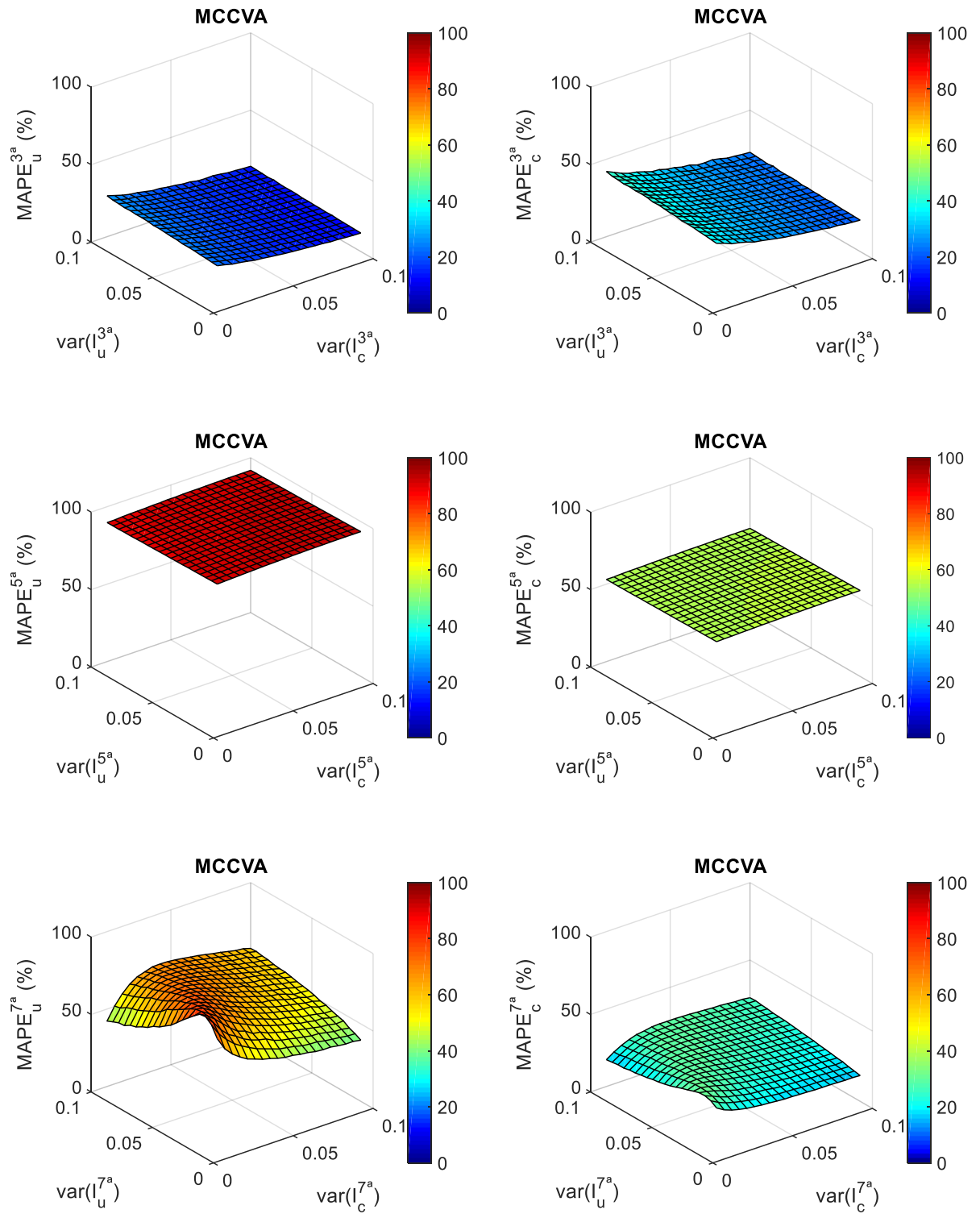


Figura 4.30 - MAPE do algoritmo MCCVA na atribuição das responsabilidades harmônicas do Caso 2.2.



CAPÍTULO VI

5. AVALIAÇÃO PRÁTICA DE DESEMPENHO DOS ALGORITMOS ICA PARA O COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES HARMÔNICAS

Esse capítulo apresenta uma análise da performance do método ICA na atribuição de responsabilidades harmônicas usando dados provenientes de uma subestação do campus Umarama da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Visto tratar-se de um sistema de médio porte para o qual se desconhece as reais contribuições das partes envolvidas, para fins de comparação, o compartilhamento de responsabilidades nessa etapa também foi avaliado pelo Método da Impedância Dominante (MID) usando um filtro multissintonizado de baixa tensão (FMBT) [3], [10].

Vale ressaltar que a validação do método ICA por meio de ensaios laboratoriais é inviável nesse caso, uma vez que tal metodologia utiliza essencialmente as variações aleatórias naturais das cargas conectadas ao sistema, as quais são complexas de serem executadas em ambientes controlados devido ao seu comportamento dinâmico. Assim sendo, entendeu-se que a melhor forma de verificar o desempenho do método seria utilizando dados provenientes de um sistema real e comparando-os com o de uma outra técnica já validada anteriormente, no caso pelo MID.

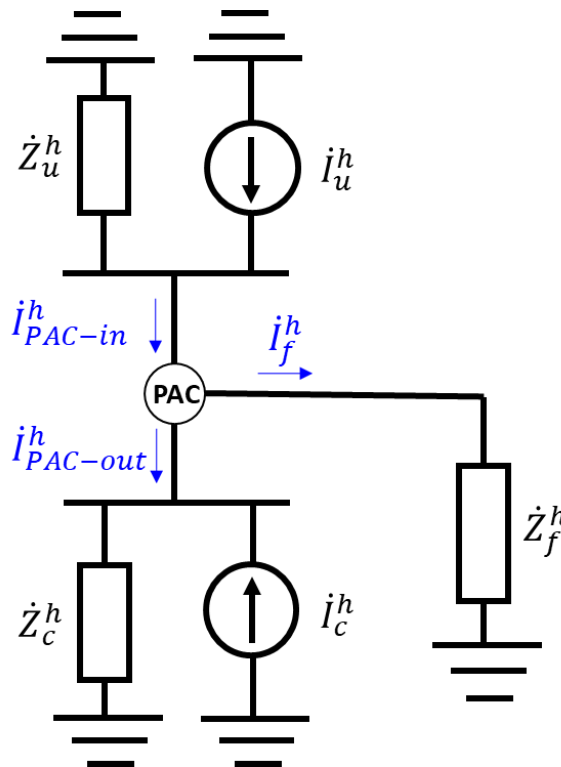
Posto isso, nesse capítulo, primeiro apresenta-se brevemente no item 5.1 a fundamentação teórica do MID, em seguida no item 0 as características físicas do FMBT utilizado para aplicação da metodologia MID. Por fim, no item 5.3, mostra-se os resultados do compartilhamento de responsabilidades harmônicas, aplicando os métodos em questão no ensaio feito na subestação 6 da UFU.

5.1. Método da Impedância Dominante

Conforme evidenciado no Capítulo 4, o compartilhamento de responsabilidades harmônicas usando o método da superposição é um problema subdeterminado, que apresenta quatro incógnitas (impedâncias e fontes de correntes do sistema supridor e do consumidor, $\dot{Z}_c^h, \dot{Z}_u^h, \dot{I}_c^h, \dot{I}_u^h$) e apenas duas equações, vide equação (4.7). Posto isto, uma das possíveis

abordagens para solucionar esse problema é por meio da inserção no PAC de uma impedância de baixo valor para a frequência em análise, ou seja, uma impedância cujo valor é dominante sobre as demais impedâncias do sistema, tal como ilustrado no circuito equivalente da Figura 5.1 [3], [10]. Conforme aponta [11], essa impedância de caráter dominante inserida no sistema pode ser simplesmente um filtro sintonizado para a ordem harmônica em questão.

Figura 5.1 – Circuito equivalente de Norton para a h-ésima ordem harmônica com a inserção de uma impedância dominante no PAC.

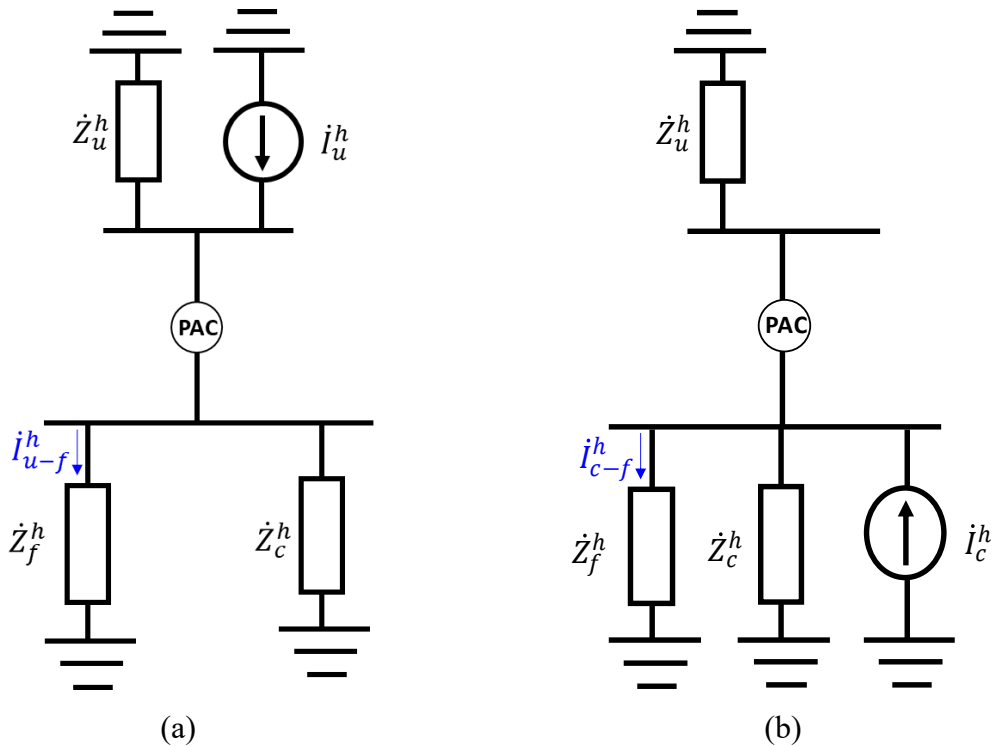


Onde, na Figura 5.1 tem-se:

- \dot{Z}_f^h - Impedância dominante para ordem harmônica h
- i_f^h - Corrente harmônica que flui pela impedância dominante
- i_{PAC-in}^h - Corrente harmônica à montante da impedância dominante
- $i_{PAC-out}^h$ - Corrente harmônica à jusante da impedância dominante

Aplicando o teorema da superposição à h-ésima ordem harmônica, o circuito da Figura 5.1 pode então ser decomposto nos dois circuitos apresentados na Figura 5.2. O circuito (a) da Figura 5.2 caracteriza o efeito do sistema supridor sobre as distorções harmônicas observadas no PAC e o circuito (b) o efeito associado a unidade consumidora.

Figura 5.2 – Circuitos equivalentes de Norton utilizados na aplicação do teorema da superposição com a impedância dominante. (a) Apenas a contribuição do sistema supridor é considerada. (b) Apenas a contribuição do consumidor é considerada.



Onde:

i_{u-f}^h - Contribuição do sistema supridor para a corrente harmônica medida no filtro

i_{c-f}^h - Contribuição do consumidor para a corrente harmônica medida no filtro

Assim, levando em consideração que a impedância dominante possui um valor muito inferior quando comparada com as demais impedâncias do sistema, pode-se considerar que a corrente harmônica do supridor (i_u^h) no circuito (a) da Figura 5.2 é igual a corrente medida no filtro (i_{u-f}^h). De forma análoga, a corrente harmônica do consumidor (i_c^h) no circuito (b) da Figura 5.2 é igual a corrente i_{c-f}^h . Logo, a corrente total medida no filtro pode ser escrita matematicamente pelas equações (6.1) e (6.2).

$$i_f^h = i_{\text{PAC-in}}^h + (-i_{\text{PAC-out}}^h) \quad (5.1)$$

$$i_f^h = i_{u-f}^h + i_{c-f}^h \cong i_u^h + i_c^h \quad (5.2)$$

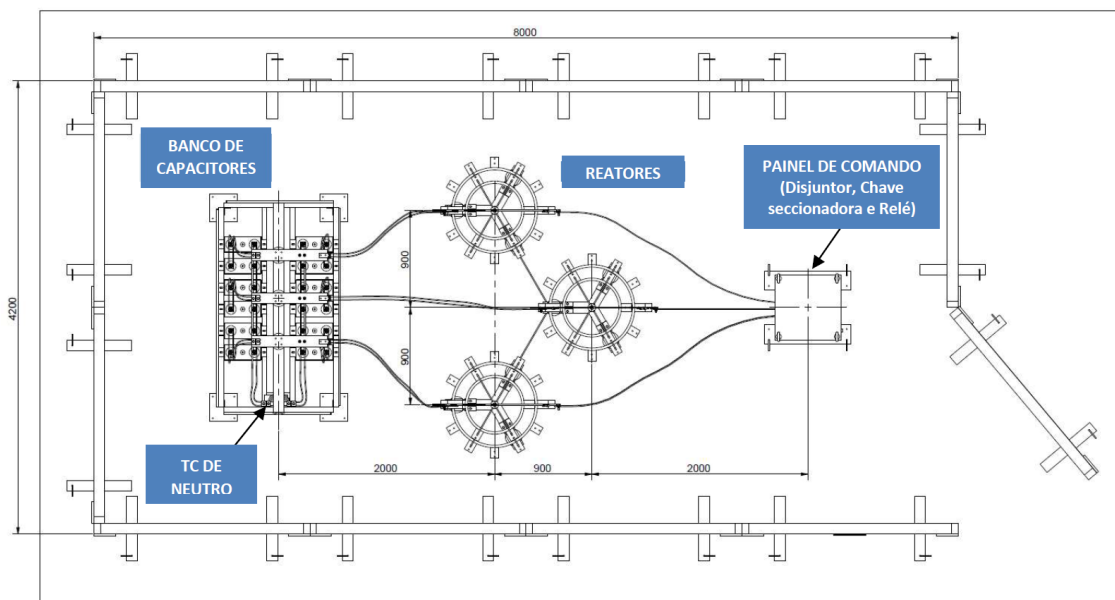
Por meio de uma análise das equações (6.1) e (6.2) verifica-se que é possível promover o compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas observadas no PAC unicamente através das medições das correntes harmônicas à montante e à jusante da

impedância dominante. Destaca-se que, conforme evidenciam as equações (4.5) e (4.6), o conhecimento dos valores das fontes de correntes harmônicas são suficientes nesse caso para promoção do compartilhamento de responsabilidades, sendo dispensável o conhecimento dos valores das impedâncias harmônicas equivalentes do sistema supridor e/ou do consumidor.

5.2. Filtro Multissintonizado de Baixa Tensão

Para aplicação da metodologia MID na realização do ensaio em campo, utilizou-se como impedância dominante um FMBT com o arranjo apresentado na Figura 5.3. Estes ensaios fizeram parte de um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) desenvolvido pelo laboratório de qualidade de Energia Elétrica da UFU, portanto o FMBT se encontra superdimensionado uma vez que foi projetado a priori para operar em um aerogerador de um complexo eólico com nível de tensão de 690 V.

Figura 5.3 – Arranjo completo do FMBT implementado em campo, dimensões em mm (vista superior).



O diagrama trifilar do FMBT, com os principais elementos constituintes é apresentado na Figura 5.4. Destaca-se que, embora o FMBT tenha sido projetado para operar em um sistema de 690 V, este sistema pode ser perfeitamente utilizado em sistemas com níveis de tensão inferiores ao especificado por meio da parametrização do relé de proteção com os valores correspondentes ao nível de tensão utilizado.

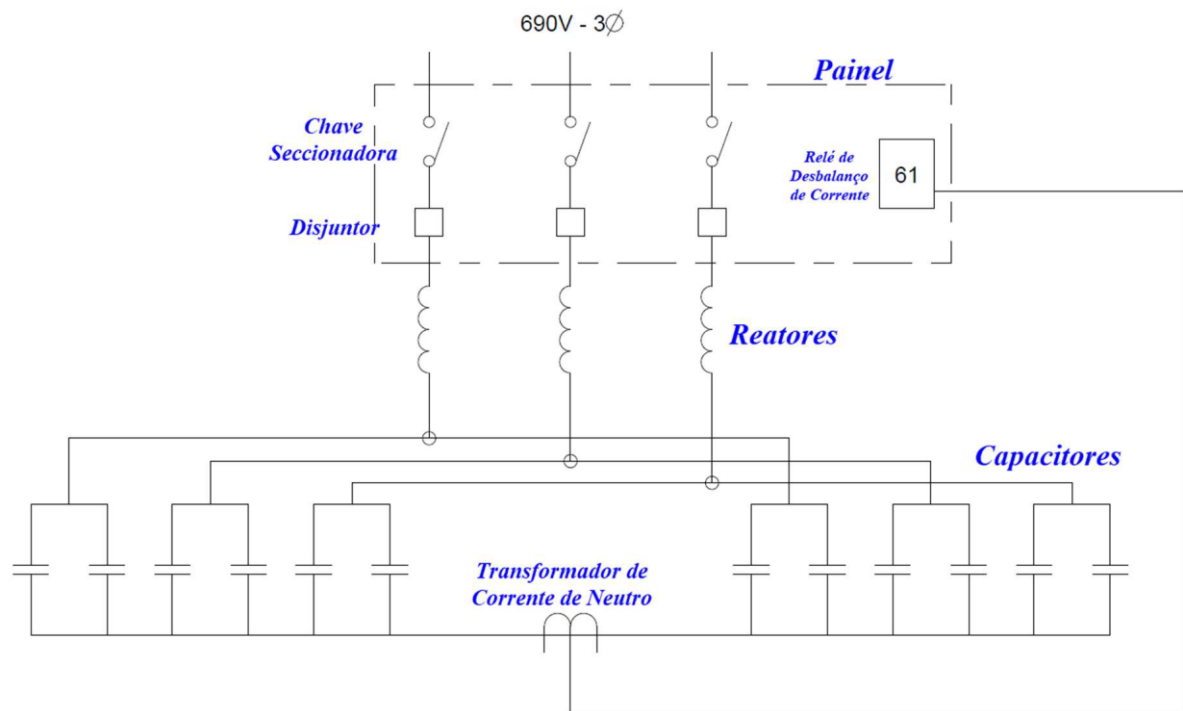
O FMBT é composto pelos seguintes elementos a saber: capacitores, transformador de corrente de neutro, reatores, painel de comando (Relé de desbalanço de corrente, disjuntor, chave seccionadora) e cabos de interligação. Informações adicionais acerca das características de cada um desses elementos utilizados no FMBT podem ser encontradas no Anexo A desse documento.

As características gerais do FMBT se encontram resumidas na Tabela 5.1. Como o filtro foi projetado para operar em um nível de 690V, mas os ensaios aqui apresentados foram feitos em 220V, a tabela apresenta os dados do equipamento para ambos os níveis de tensão.

Tabela 5.1 – Dados Gerais do Filtro Harmônico Multissintonizado de Baixa Tensão.

Parâmetros	Valores e Características	
	690 V	220V
Frequência de sintonia – FH3(Hz)	180	180
Potência efetiva (kVAr)/Tensão efetiva (V)/Corrente efetiva (A) – FH3	400/690/334,7	40,7/220/106,8
Reator série – FH3 (mH)	0,40	0,40
Frequência de sintonia – FH5(Hz)	300	300
Potência efetiva (kVAr)/Tensão efetiva (V)/Corrente efetiva (A) – FH5	370/690/309,6	37,6/220/98,7
Reator série – FH5 (mH)	0,14	0,14
Frequência de sintonia – FH7(Hz)	420	420
Potência efetiva (kVAr)/Tensão efetiva (V)/Corrente efetiva (A) – FH7	360/690/301,3	36,6/220/96,1
Reator série – FH7 (mH)	0,07	0,07
Capacitância nominal (µF)	1973,64 (±3%)	1973,64 (±3%)
Configuração de capacitores por fase	Paralelo = 2+2	Paralelo = 2+2
Quantidade de unidade capacitivas	12 unidades/banco	12 unidades/banco
Tipo de ligação do banco de capacitores	Dupla estrela isolada	Dupla estrela isolada
Fabricante	GE	GE
Frequência (Hz)	60	60
NI (kV)	20/60	20/60
Fases	3	3
Tempo mínimo entre desligamento e religamento	10 min	10 min
Tempo para Tensão residual atingir 50 V	5 min	5 min

Figura 5.4 – Diagrama trifilar do FMBT.



5.3. Ensaio na Subestação da UFU

O ensaio em campo dos métodos ICA e MID para atribuição de responsabilidades harmônicas foi realizado na Subestação 6 do Campus Umuarama da UFU, localizada na Rua Piauí, nº 1393 em Uberlândia/MG. A Figura 5.5 apresenta o diagrama unifilar da instalação que é composta, resumidamente, por dois grupos de cargas alimentadas por um transformador abaixador de 13,8 kV/220 V, com potência nominal de 750 kVA. Nessa instalação o primeiro grupo de cargas é constituído por cargas denominadas prioritárias (Cargas Gerador), que são alimentadas também por um gerador a diesel em caso de falhas na rede, e o segundo por cargas remanescentes (Demais Cargas), que são supridas somente pela rede da concessionária de energia elétrica local.

Para realização do compartilhamento de responsabilidades harmônicas pela metodologia MID, a interligação do FMBT foi realizada pelo barramento de 220 V do painel que alimenta as cargas Demais Cargas, conforme indicado no diagrama unifilar da Figura 5.5. A Figura 5.6 mostra uma foto do FMBT em campo já devidamente montado para a realização do ensaio na subestação 6.

Figura 5.5 – Diagrama unifilar da subestação 6 da UFU.

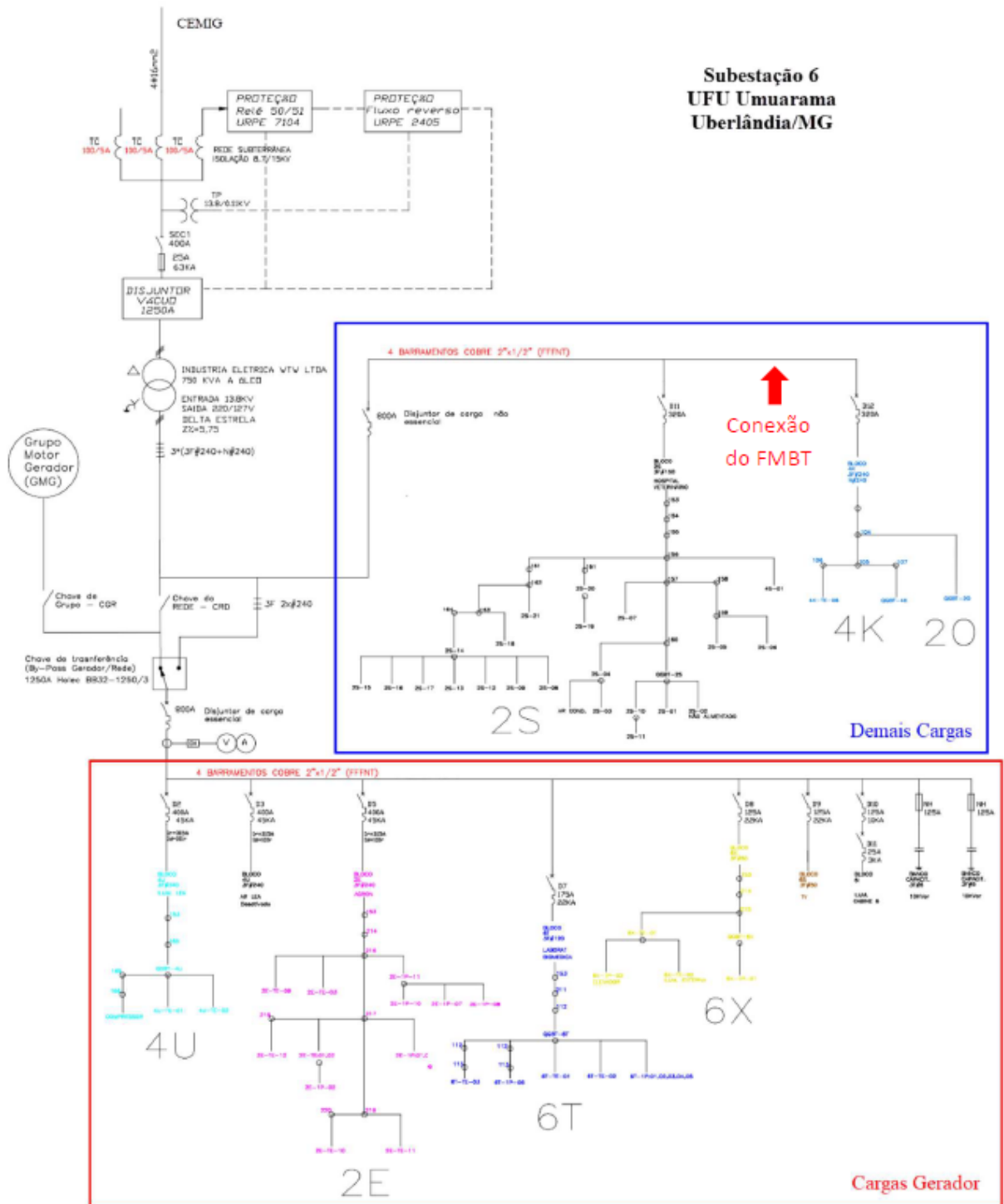


Figura 5.6 – FMBT montado para os ensaios na subestação 6 da UFU no campus Umuarama.

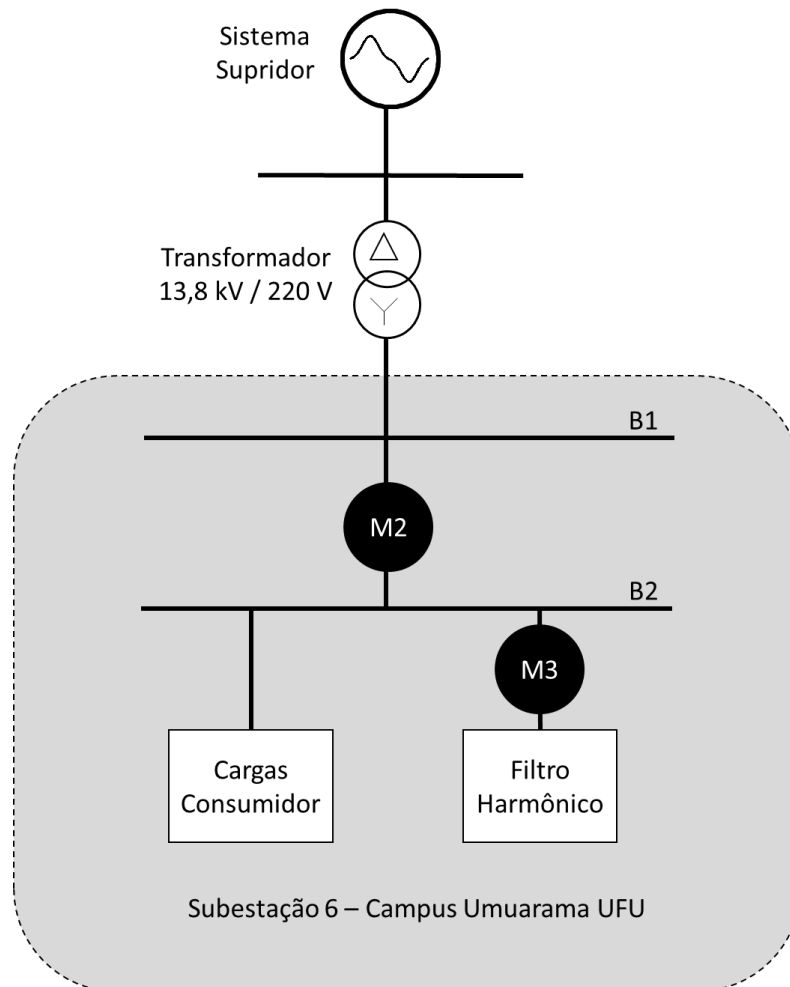


A título de conhecimento, para efetuar as medições necessárias foram utilizados dois analisadores de qualidade da energia elétrica Classe A da Fluke, modelo 435 série II, mais módulos de sincronização GPS 430-II, todos devidamente calibrados e com um período de agregação de um segundo, ou seja, o medidor armazena na memória as grandezas ajustadas, agregadas a cada segundo. A Figura 5.7 mostra o diagrama de conexão dos medidores utilizados. Detalhes específicos das características operacionais desse equipamento são fornecidos pelo fabricante em [57], [58].

Assim, o monitoramento das variáveis foi realizado da seguinte forma:

- Medidor 2: Medição da corrente total das cargas do consumidor, em 220V, no sentido Rede → Cargas. Portanto, essa medição inclui também a corrente do FMBT. Foram utilizadas três voltas nos clamps de corrente flexível, com a devida configuração do medidor para tal.
- Medidor 3: Medição da corrente do FMBT, em 220V, no sentido Rede → FMBT. Foram utilizadas quatro voltas nos clamps de corrente flexível, com a devida configuração do medidor para tal.

Figura 5.7 – Diagrama de conexão dos medidores realizado na subestação 6 da UFU.

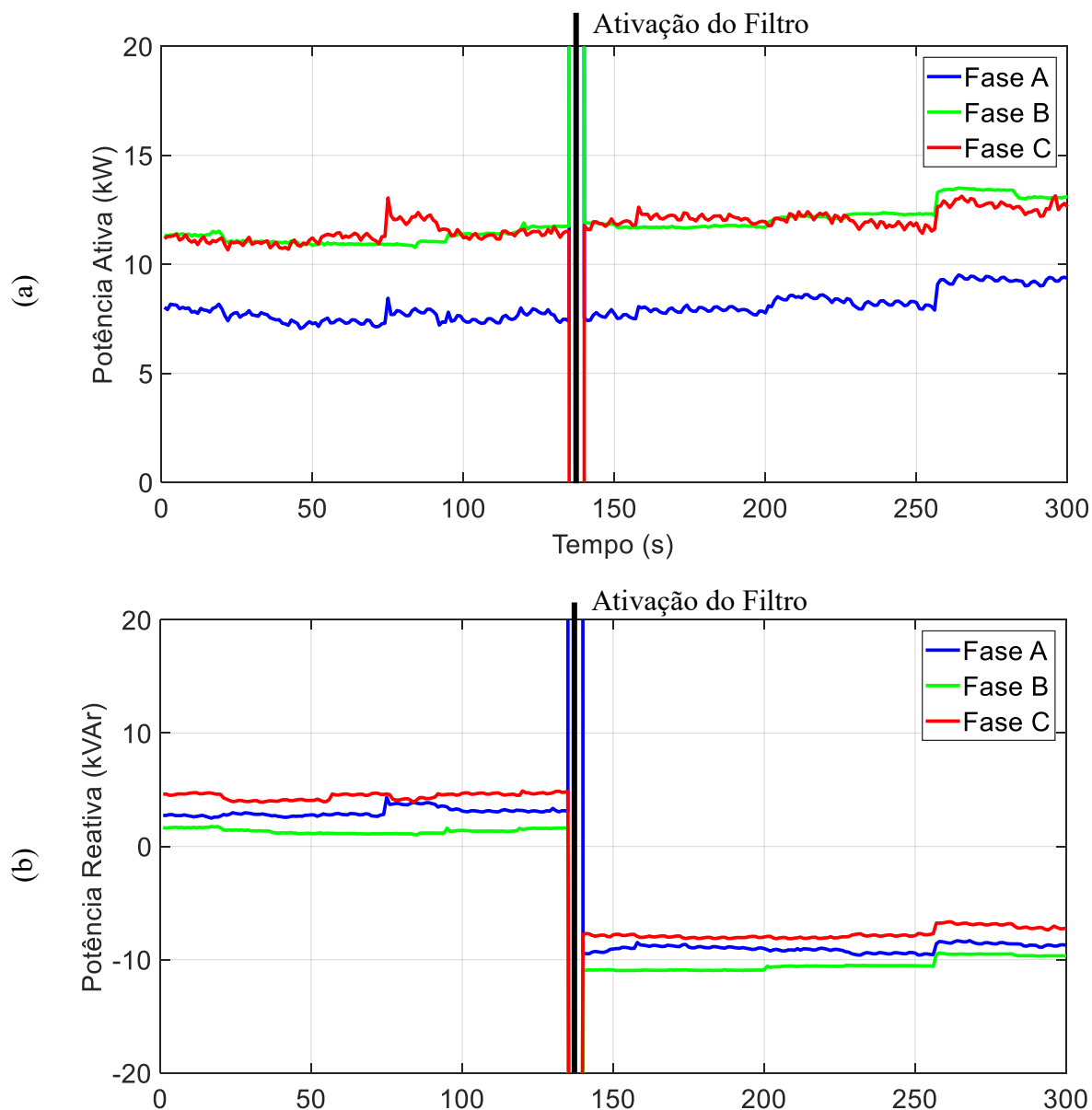


Vale ressaltar que, infelizmente, devido às condições emergenciais de ensino à distância impostas pela pandemia do coronavírus no Brasil, esses experimentos foram realizados em um período com poucas cargas conectadas ao sistema, vide os valores de potência apresentados graficamente na Figura 5.8. Conforme pode-se observar a potência ativa medida no barramento 2 encontra-se com valores inferiores a 15 kW, um valor consideravelmente baixo para um transformador com potência nominal de 750 KVA.

Consequentemente, os níveis de distorções harmônicas de tensão já eram baixos, mesmo sem a conexão do FMBT. Por exemplo, a distorção mais significativa observada durante a realização dos ensaios ocorreu na 5ª ordem harmônica, porém, seu valor máximo foi inferior a 1,5%. Assim sendo, o FMBT foi sintonizado para a 5ª ordem harmônica e as análises realizadas nesse trabalho serão restritas a essa ordem.

A seguir, antes da apresentação dos resultados do compartilhamento de responsabilidades harmônicas, apresenta-se de forma gráfica informações de algumas grandezas elétricas obtidas durante a realização dos ensaios.

Figura 5.8 – Potência ativa (a) e reativa (b) durante a realização do ensaio na subestação 6 da UFU.



a) Distorção harmônica total de tensão

A Figura 5.9 mostra o perfil das distorções harmônicas totais das tensões fase-neutro em porcentagem da fundamental medidos durante o ensaio. Destaca-se que essas grandezas são referentes ao lado de baixa tensão do transformador, ou seja, referem-se ao PAC em 220V.

Para uma maior assimilação dos valores medidos a Tabela 5.2 sumariza os resultados das distorções harmônicas totais de tensão, sem e com o filtro harmônico ativado, tratados segundo procedimentos clássicos da estatística.

Figura 5.9 - Perfil das distorções harmônicas totais de tensão.

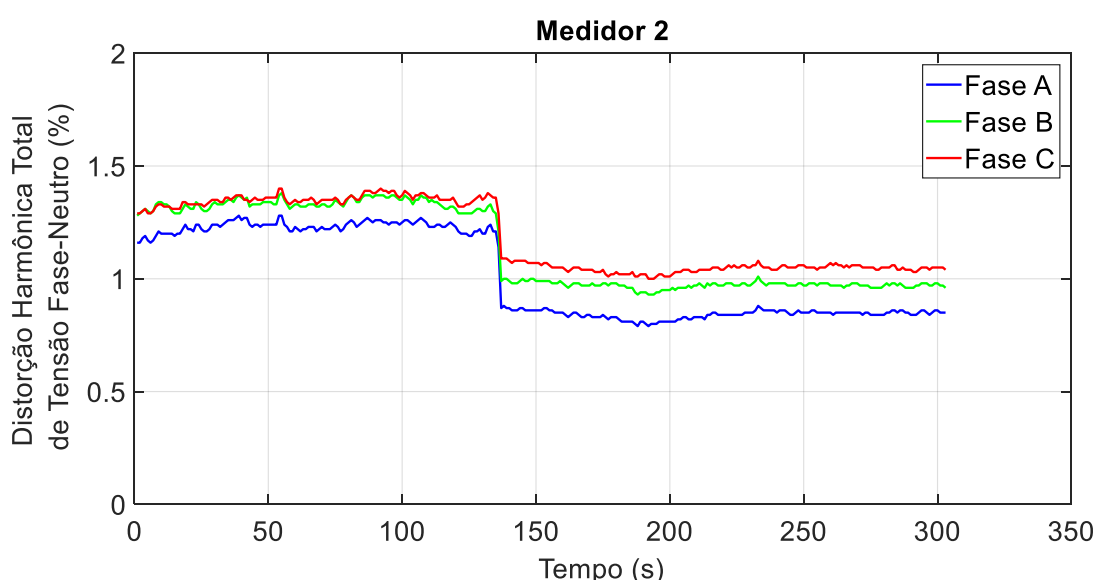


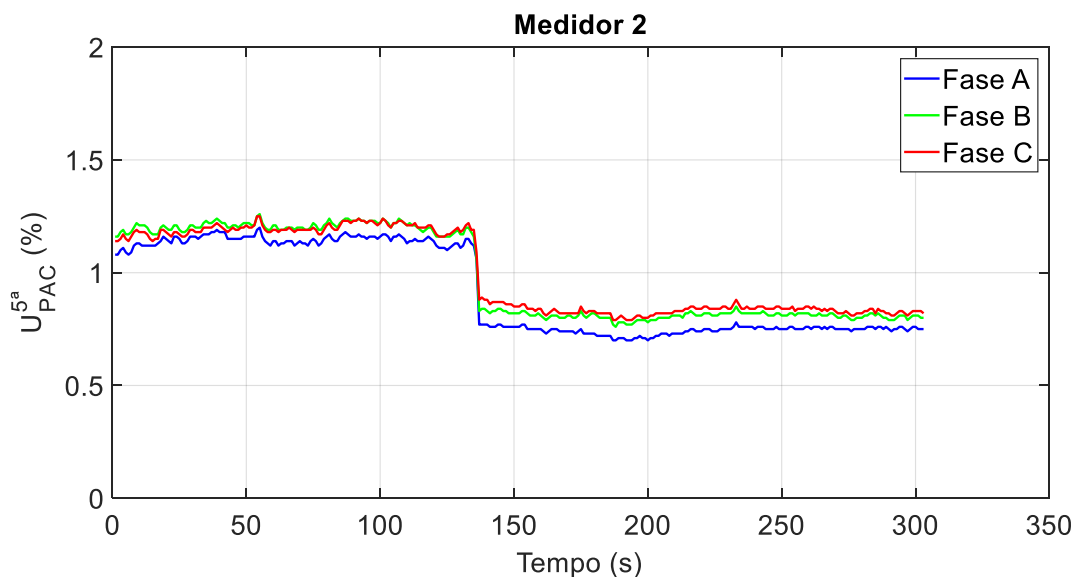
Tabela 5.2 – Valores estatísticos das distorções totais das tensões em % da fundamental sem e com o filtro harmônico.

FASE	FILTRO OFF				FILTRO ON			
	Mín.	Méd.	Máx.	P95	Mín.	Méd.	Máx.	P95
A	1,16	1,23	1,28	1,27	0,79	0,84	0,88	0,87
B	1,28	1,33	1,38	1,37	0,93	0,97	1,01	0,99
C	1,29	1,35	1,40	1,39	1,00	1,05	1,09	1,08

b) Distorção harmônica individual de tensão

De forma complementar, a Figura 5.10 mostra o perfil da distorção harmônica individual de tensão para a 5ª ordem, obtida no medidor 2. Novamente destaca-se que esses valores estão expressos em percentuais das correspondentes grandezas fundamentais.

Figura 5.10 - Perfil das distorções harmônicas individuais de tensão no medidor 2 para a 5ª ordem harmônica.



A Tabela 5.3 apresenta, então, os cálculos estatísticos relativos as distorções harmônicas individuais de tensão para a 5ª ordem, sem e com o filtro harmônico ativado.

Tabela 5.3 – Valores estatísticos das distorções individuais de tensões para a 5ª ordem no medidor 1, sem e com o filtro harmônico.

FASE	FILTRO OFF				FILTRO ON			
	Mín.	Méd.	Máx.	P95	Mín.	Méd.	Máx.	P95
A	1,08	1,14	1,20	1,18	0,70	0,74	0,78	0,77
B	1,15	1,20	1,26	1,24	0,77	0,81	0,85	0,84
C	1,14	1,20	1,26	1,23	0,79	0,83	0,88	0,87

A seguir o resultado do compartilhamento sobre as responsabilidades harmônicas é apresentado em detalhe. Destaca-se que, a despeito das conclusões logradas no Capítulo 6, todos os algoritmos ICA avaliados no capítulo anterior, isto é, FastICA, RobustICA e JADE, serão agora aplicados aos dados provenientes de um sistema real e os resultados obtidos serão comparados com os da técnica invasiva MID.

5.3.1. Compartilhamento da distorção harmônica individual de tensão (5ª Ordem)

As Figura 5.11 e Figura 5.12 apresentam o resultado do compartilhamento de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor para a 5ª ordem harmônica da fase A, no intervalo de tempo avaliado.

Com o intuito de clarificar os resultados apresentados nas Figura 5.11 e Figura 5.12, a Tabela 5.4 apresenta os valores médios obtidos antes e depois da ativação do filtro harmônico. Conforme esperado, e em consonância com os resultados apresentados pelo MID, o sistema supridor foi apontado por todos os algoritmos ICA avaliados como o principal responsável pelas distorções harmônicas observadas.

Figura 5.11 – Percentual de responsabilidade do sistema supridor pela distorção da 5ª ordem harmônica observada na fase A do PAC.

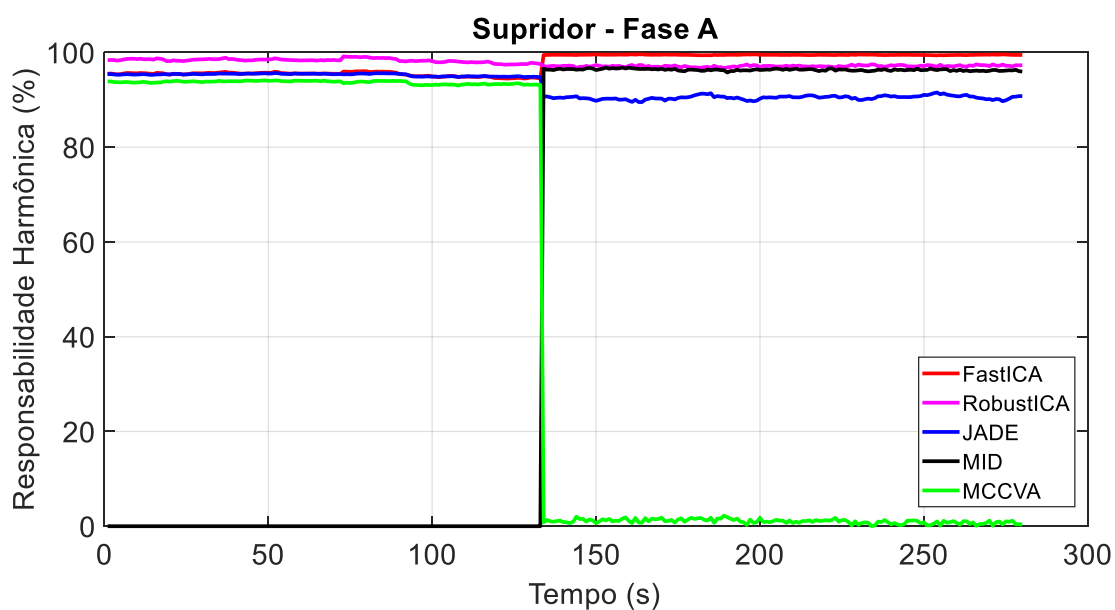
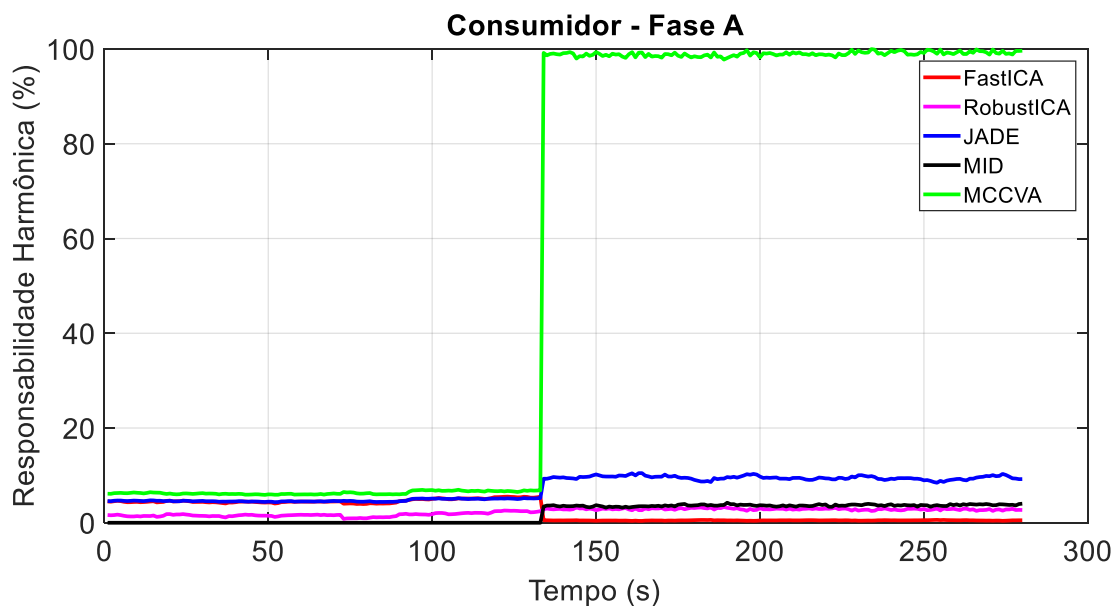


Figura 5.12 – Percentual de responsabilidade do consumidor pela distorção da 5ª ordem harmônica observada na fase A do PAC.



Ademais, verifica-se na Tabela 5.4 que os algoritmos RobustICA e JADE não atribuíram uma maior responsabilidade ao sistema supridor após a ativação do filtro harmônico como era esperado. Provavelmente esse erro se encontra associado ao baixo carregamento do sistema e ao baixo nível de distorção harmônica observada no PAC. Por fim, e em concordância com os resultados computacionais apresentados no Capítulo 4.1, nota-se também que, de fato, diferente do MCCVA, a ativação do filtro harmônico não produziu nenhum impacto significativo no desempenho dos algoritmos ICA. Reforçando, assim, a independência da performance desses algoritmos em relação as impedâncias do sistema supridor e do consumidor.

Tabela 5.4 – Valores médios do compartilhamento de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor para a 5ª ordem, fase A, sem e com o filtro harmônico.

Método	Supridor(%)		Consumidor (%)	
	Filtro off	Filtro on	Filtro off	Filtro on
MID	-	96,35	-	3,65
FastICA	95,39	99,50	4,61	0,50
RobustICA	98,34	97,12	1,66	2,88
JADE	95,30	90,49	4,70	9,51
MCCVA	93,68	1,03	6,31	98,97

As contribuições do sistema supridor e do consumidor para a 5ª ordem harmônica da fase B são apresentadas nas Figura 5.13 e Figura 5.14, respectivamente, e os valores médios antes e depois da ativação do filtro harmônico, por sua vez, na Tabela 5.5. Pode-se observar nos resultados apresentados que, para a fase B que possuía um carregamento maior que o da fase A, os algoritmos ICA já foram capazes de atribuir uma maior responsabilidade harmônica para o sistema supridor após a ativação do filtro harmônico, tal como o esperado. Além disso, de forma geral, os resultados obtidos por todos os métodos avaliados praticamente convergiram para um valor comum.

Figura 5.13 – Percentual de responsabilidade do sistema supridor pela distorção da 5ª ordem harmônica observada na fase B do PAC.

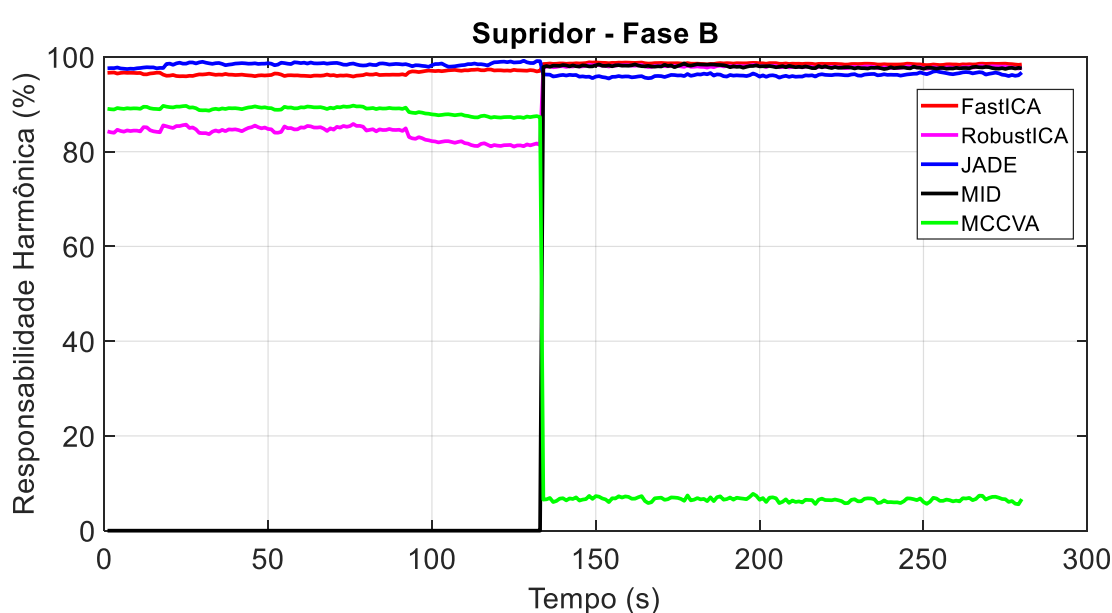
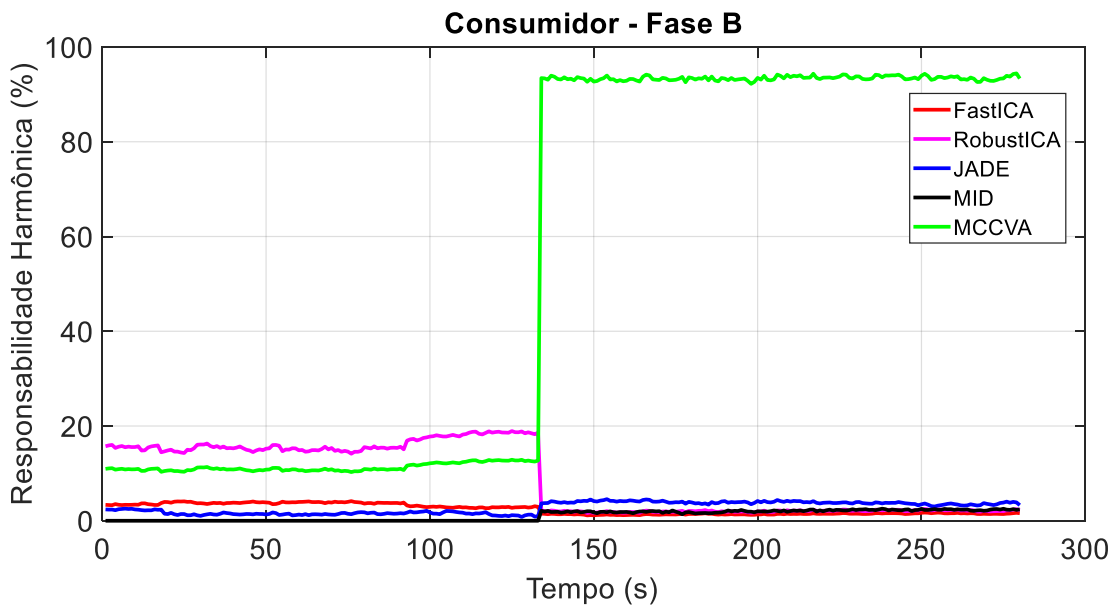


Tabela 5.5 – Valores médios do compartilhamento de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor para a 5ª ordem, fase B, sem e com o filtro harmônico.

Método	Supridor (%)		Consumidor (%)	
	Filtro off	Filtro on	Filtro off	Filtro on
MID	-	97,92	-	2,08
FastICA	96,51	98,57	3,49	1,43
RobustICA	83,86	97,94	16,14	2,06
JADE	98,43	96,16	1,57	3,84
MCCVA	88,72	6,58	11,28	93,42

Figura 5.14 – Percentual de responsabilidade do consumidor pela distorção da 5ª ordem harmônica observada na fase B do PAC.



Finalmente, as Figura 5.16, Figura 5.17 e a Tabela 5.6 apresenta os resultados do compartilhamento para a fase C do sistema.

Figura 5.15 – Percentual de responsabilidade do consumidor pela distorção da 5ª ordem harmônica observada na fase B do PAC.

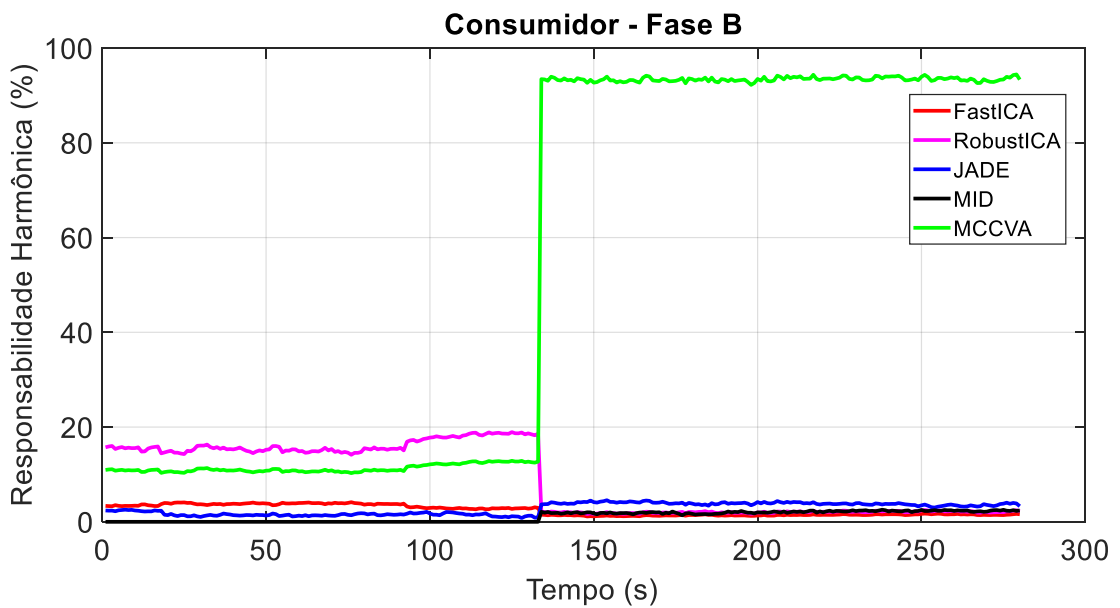
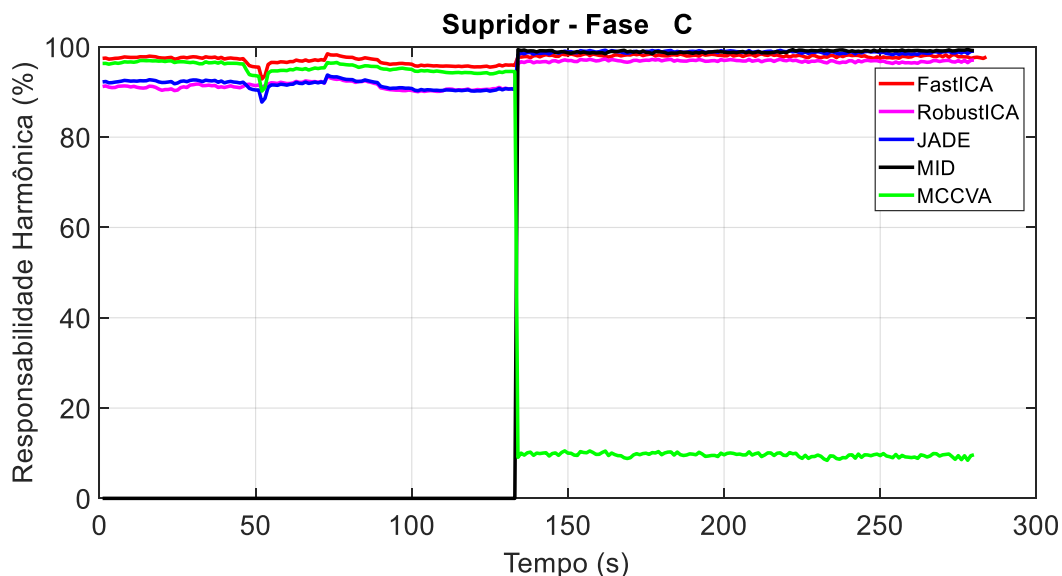


Figura 5.16 – Percentual de responsabilidade do sistema supridor pela distorção da 5ª ordem harmônica observada na fase C do PAC.



Mediante os resultados obtidos, conclui-se que a aplicação dos métodos ICA para a promoção do compartilhamento de responsabilidades harmônicas apresentou resultados fisicamente consistentes com o esperado, mesmo em um cenário no qual o carregamento e, conseqüentemente, as distorções harmônicas e a variância das cargas conectadas ao sistema eram muito baixas devido as condições impostas pela pandemia durante o desenvolvimento desta tese. Assim, após os estudos conduzidos nesse trabalho é evidente que a técnica ICA representa uma ferramenta de grande relevância para o problema do compartilhamento de responsabilidades harmônicas, sendo uma técnica não invasiva que não exige a instalação de nenhum componente físico e cuja lógica pode ser facilmente inserida em um medidor de qualidade de energia. Além disso, é interessante destacar que o método invasivo utilizado não consegue avaliar o impacto das componentes de sequência zero devido à sua conexão em estrela isolada, enquanto os métodos não invasivos, tais como o ICA não possuem esta dependência".

Figura 5.17 – Percentual de responsabilidade do consumidor pela distorção da 5ª ordem harmônica observada na fase C do PAC.

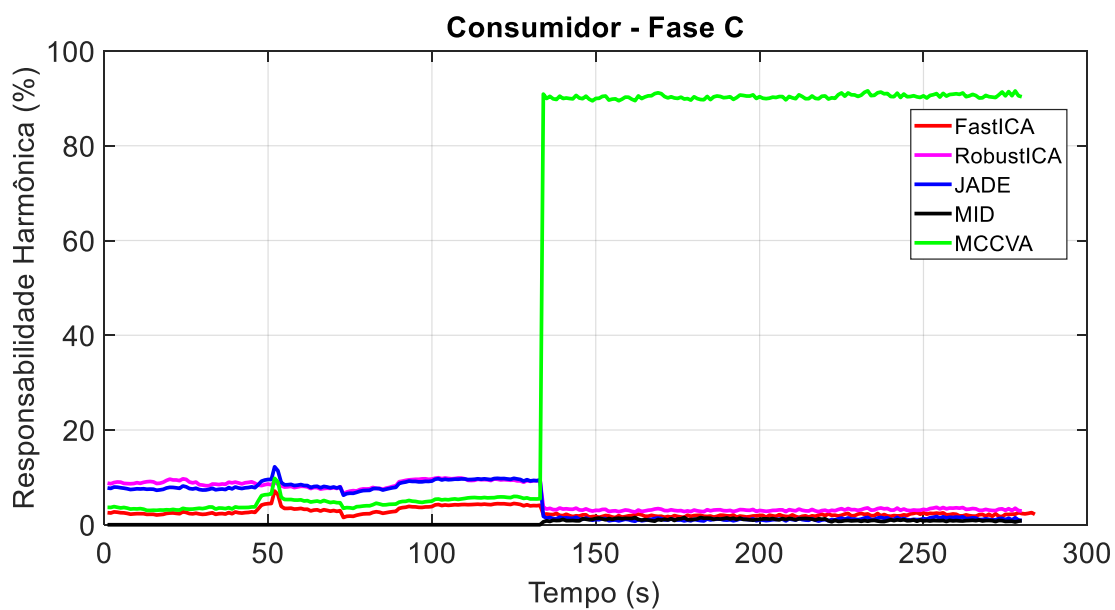


Tabela 5.6 – Valores médios do compartilhamento de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor para a 5ª ordem, fase C, sem e com o filtro harmônico.

Método	Supridor (%)		Consumidor (%)	
	Filtro off	Filtro on	Filtro off	Filtro on
MID	-	98,97	-	1,03
FastICA	96,80	98,01	3,20	1,98
RobustICA	91,24	96,86	8,75	3,14
JADE	91,61	98,82	8,39	1,18
MCCVA	95,41	9,62	4,59	90,38

CAPÍTULO VII

6. CONCLUSÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar as conclusões da pesquisa desenvolvida e resumir as perspectivas futuras de pesquisas relacionadas ao tema aqui abordado. Assim sendo, apresenta-se a seguir comentários gerais, sintetizando as principais contribuições de cada capítulo deste documento.

No Capítulo I, realizou-se uma introdução ao tema da presente pesquisa no âmbito do compartilhamento de responsabilidades harmônicas. Buscou-se, nesse capítulo, contextualizar o leitor da importância do tema abordado dentro do cenário de assuntos relacionados a qualidade da energia elétrica. Assim, foram destacadas as duas principais abordagens disponíveis na literatura para a promoção do compartilhamento sobre as responsabilidades harmônicas, invasivas e não-invasivas, bem como os aspectos e as limitações associadas a cada uma delas.

Ainda, no Capítulo I, foi apresentado de forma sucinta o conceito de separação cega de fontes, bem como a sua correlação com o problema de identificação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas verificadas no PAC. Por fim, foram estabelecidos o objetivo geral e a estrutura desta tese de doutorado.

O Capítulo 2, apresentou uma revisão do estado da arte da pesquisa sobre o compartilhamento de responsabilidades harmônicas usando métodos não invasivos, dentre os quais foram destacados, os seguintes: o método da flutuação, o método Linear Regressivo, o método baseado na covariância característica de vetores aleatórios e o método baseado na análise de componentes independentes. Ainda nesse capítulo, para uma melhor compreensão das características de cada um desses métodos, foi feita uma avaliação numérica em um ambiente computacional usando um sistema hipotético para avaliação das limitações associadas a cada um desses métodos. Assim, foi possível verificar de forma efetiva a implicação das premissas simplificadoras adotadas, tais como a suposição de que a impedância da concessionária é sempre muito menor que a do consumidor e o efeito das distorções harmônicas de *background*. Assim sendo, esse capítulo é essencial para que se possa compreender o atual

estado da pesquisa e indicar as lacunas existentes que impossibilitam a consolidação prática das técnicas até então propostas.

O Capítulo 3, teve como objetivo apresentar formalmente o conceito associado a separação cega de fontes, que apesar de ser uma problemática conhecida no âmbito da análise de sinais, é uma técnica relativamente inexplorada e que carece de maiores investigações para aplicações no âmbito da qualidade de energia elétrica; e, até então, nova para os pesquisadores do tema na Universidade Federal de Uberlândia. Assim esse capítulo, busca formular o problema da separação cega de fontes, apresentado os principais algoritmos para a sua promoção e suas principais limitações.

No Capítulo 4, o problema do compartilhamento de responsabilidades harmônicas é matematicamente associado com a separação cega de fontes, através da aplicação do princípio da superposição em um circuito equivalente de Norton. Além disso, nesse capítulo também são avaliadas as três condições necessárias para obtenção de resultados satisfatórios através da aplicação da técnica da separação cega de fontes.

No capítulo 5, quatro casos gerais foram computacionalmente avaliados com o intuito de verificar a influência de diversos aspectos inerentes aos SEP no desempenho da metodologia proposta e nos algoritmos avaliados, tais como:

- Ocorrência de variação da matriz de impedância, ou seja, da matriz de misturas;
- Relação da impedância harmônica do consumidor e do sistema supridor;
- Variância e amplitudes das fontes de correntes harmônicas do sistema.

Os resultados das simulações computacionais mostraram que os métodos baseados na ICA obtiveram melhores resultados, tais como o esperado, quando comparados com o MCCVA. Uma vez que não adota a premissa simplificadora de que a impedância harmônica do consumidor deve ser muito maior que a impedância do sistema supridor.

No entanto, pode-se observar, que apesar da independência do método, diferente do até então preconizado na literatura, a eficiência do método ICA se encontra relacionada com a amplitude e a variância das fontes de correntes harmônicas. Ou seja, por meio das diversas simulações conduzidas verificou-se que os métodos ICA apresentam erros menores na estimativa da contribuição harmônica das fontes de corrente com maiores amplitudes e maiores variâncias.

Além disso, dentre os algoritmos ICA avaliados, o FastICA e o JADE foram os que apresentaram resultados mais satisfatórios na avaliação das contribuições harmônicas no PAC,

em todos os casos analisados. No entanto, frente aos resultados obtidos, observa-se que, mesmo o algoritmo FastICA sendo o mais robusto, o fato de o algoritmo JADE não precisar de qualquer ajuste de parâmetros o torna um algoritmo bastante interessante para promover as atribuições de responsabilidades harmônicas considerando as características dos SEP.

Além dos estudos computacionais, um estudo de caso com sinais reais, medidos no PAC da subestação 6 da universidade de Uberlândia no Campus Umuarama foi realizado, e os algoritmos ICA foram comparados com os da técnica invasiva DIM. Os resultados experimentais obtidos, mostra que a ICA é uma metodologia extremamente promissora, com bons resultados mesmo em situações com baixo carregamento e desequilíbrio.

Assim, de forma geral, à luz dos estudos realizados até agora, nota-se que o método ICA para BSS é uma ferramenta relevante para promover o compartilhamento de responsabilidade harmônica, que não requer conhecimento da topologia da rede, não necessita de instalação de nenhum componente adicional, podendo ser facilmente implementado em um medidor de qualidade de energia; No entanto, através de várias simulações computacionais conduzidas e da análise de campo, constatou-se que os resultados da ICA são sensíveis ao nível de variação das componentes de variação rápida e à amplitude das fontes harmônicas. Por fim cabe destacar, que mesmo em situações bastante críticas, como o estudo de caso realizado em campus, que se encontrava com baixo carregamento e, conseqüentemente, um baixo nível de distorção apresentou resultados coerentes com o esperado.

6.1. Trabalhos Futuros

Apesar dos resultados positivos obtidos nas simulações computacionais e em campus, por se tratar de um tema complexo, que envolve conhecimento multidisciplinar, tais como processamento de sinais, análise estatísticas de dados e qualidade da energia elétrica, os seguintes pontos ainda podem ser elencados como merecedores de pesquisas futuras:

- Análise pormenorizada dos níveis mínimos de harmônicos necessários para se ter um resultado minimamente satisfatório.
- Propor adaptações no sistema teste padrão proposto pela IEEE-PES Task Force on Harmonics Modeling and Simulation para avaliação de procedimentos de compartilhamento de responsabilidades (Benchmark IEEE-HCD) que permita a comparação do método com outras técnicas. Além disso, tais alterações, tem por intuito criar um sistema mais fidedigno e, assim, possibilitar a análise de métodos baseados em parâmetros estatísticos que utilizem variações rápidas dos

sinais observados, tais como os algoritmos ICA em questão abordados nessa tese.

- Criação de um parâmetro que permita, baseado nos sinais observados no PAC, caracterizar o nível de variância de cada uma das fontes independentes que compõe a mistura observada, e permita se não quantificar o erro, obter uma estimativa de qual é o nível de incerteza nas fontes recuperadas, analisando tão somente os dados de entrada, ou seja, tensão e corrente no PAC.

REFERÊNCIAS

- [1] M. H. J. Bollen, “What is power quality?,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 66, no. 1, pp. 5–14, Jul. 2003, doi: 10.1016/S0378-7796(03)00067-1.
- [2] E. L. Mehl, “Qualidade da energia elétrica,” *Univ. Fed. do Paraná*, 2012, [Online]. Available: https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/36984290/qualidade-energia_1_.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1544527019&Signature=IVJF7AHFJqyo2a6MnLDEAE95eTw%3D&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DQuality.pdf.
- [3] A. Santos, “Compartilhamento de responsabilidades harmônicas: análises, contribuições e proposições,” Universidade Federal de Uberlândia, 2015.
- [4] S. F. de Paula Silva, “Uma proposta para o compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas,” Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- [5] “IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems,” *IEEE Std 519-2014 (Revision IEEE Std 519-1992)*, pp. 1–29, 2014, doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459.
- [6] . EN 50160, “Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks.” European Committee for Electrotechnical Standardization, 2010, Accessed: Jun. 01, 2020. [Online]. Available: <https://orgalim.eu/position-papers/en-50160-voltage-characteristics-electricity-supplied-public-distribution-system>.
- [7] . IEC 61000-3-6, “Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 3-6: Limits-Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems.” 2008, Accessed: Jun. 01, 2020. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/4155>.
- [8] J. Hui, W. Freitas, J. C. M. Vieira, H. Yang, and Y. Liu, “Utility Harmonic Impedance Measurement Based on Data Selection,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 27, no. 4, pp.

- 2193–2202, Oct. 2012, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2207969.
- [9] Wilsun Xu, E. E. Ahmed, Xiqin Zhang, and Xian Liu, “Measurement of network harmonic impedances: practical implementation issues and their solutions,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 17, no. 1, pp. 210–216, 2002, doi: 10.1109/61.974209.
- [10] I. N. Santos, J. C. Oliveira, and A. C. Santos, “Dominant impedance method to assign harmonic voltage contributions at a point of common coupling,” *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 31, no. 6, pp. 1–16, Jun. 2021, doi: 10.1002/2050-7038.12895.
- [11] A. Santos, “Compartilhamento de responsabilidades harmônicas: análises, contribuições e proposições,” Universidade Federal de Uberlândia, 2019.
- [12] X. Zheng, Y.-M. Liu, F.-Y. Chen, S.-T. Xu, and X.-Y. Xiao, “A comparison of typical non-invasive method for utility harmonic impedance estimation,” in *2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, May 2018, vol. 2018-May, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICHQP.2018.8378914.
- [13] X. Zheng, X. Xiao, and Y. Wang, “An impedance matrix constrained-based method for harmonic emission level estimation,” *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 30, no. 9, pp. 1–18, 2020, doi: 10.1002/2050-7038.12479.
- [14] J.-F. Cardoso, “Blind signal separation: statistical principles,” *Proc. IEEE*, vol. 86, no. 10, pp. 2009–2025, 1998, doi: 10.1109/5.720250.
- [15] Y. Ai and H. Zhang, “Harmonic Separation Based on Independent Component Analysis Method,” *J. Comput.*, vol. 8, no. 2, pp. 433–440, Feb. 2013, doi: 10.4304/jcp.8.2.433-440.
- [16] D. D. Ferreira *et al.*, “Method based on independent component analysis for harmonic extraction from power system signals,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 119, pp. 19–24, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.epsr.2014.09.001.
- [17] H. Liao and D. Niebur, “Load profile estimation in electric transmission networks using independent component analysis,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 2, pp. 707–715, May 2003, doi: 10.1109/TPWRS.2003.811199.
- [18] E. Gursoy and D. Niebur, “Blind Source Separation Techniques for Harmonic Current

- Source Estimation,” in *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, 2006, pp. 252–255, doi: 10.1109/PSCE.2006.296307.
- [19] E. Gursoy, “Independent Component Analysis for Harmonic Source Identification in Electric Power Systems,” Drexel University, 2007.
- [20] E. Gursoy and D. Niebur, “Harmonic Load Identification Using Complex Independent Component Analysis,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 1, pp. 285–292, Jan. 2009, doi: 10.1109/TPWRD.2008.2002968.
- [21] F. Karimzadeh, S. Esmaili, and S. H. Hosseinian, “A Novel Method for Noninvasive Estimation of Utility Harmonic Impedance Based on Complex Independent Component Analysis,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 30, no. 4, pp. 1843–1852, Aug. 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2398820.
- [22] X. Xiao, X. Zheng, Y. Wang, S. Xu, and Z. Zheng, “A Method for Utility Harmonic Impedance Estimation Based on Constrained Complex Independent Component Analysis,” *Energies*, vol. 11, no. 9, p. 2247, Aug. 2018, doi: 10.3390/en11092247.
- [23] J. Zhao, H. Yang, A. Pan, and F. Xu, “An improved complex ICA based method for wind farm harmonic emission levels evaluation,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 179, no. September 2019, p. 106105, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2019.106105.
- [24] Y.-M. Liu, Li-Hong Wang, Xian-Yong Xiao, Ying Wang, and Fei-Yu Chen, “Complex blind source separation based harmonic contribution assessment,” in *2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Oct. 2016, pp. 176–180, doi: 10.1109/ICHQP.2016.7783452.
- [25] F. Karimzadeh, S. Hossein Hosseinian, and S. Esmaili, “Method for determining utility and consumer harmonic contributions based on complex independent component analysis,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 2, pp. 526–534, Feb. 2016, doi: 10.1049/iet-gtd.2015.0997.
- [26] X. Zhao and H. Yang, “A New Method to Calculate the Utility Harmonic Impedance Based on FastICA,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2016, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2491644.

- [27] H. Yang, P. Pirotte, E. De Jaeger, and A. Robert, "HARMONIC EMISSION LEVELS OF INDUSTRIAL LOADS-STATISTICAL ASSESSMENT," *CIGRÉ*, vol. 96, pp. 1936–1996, 1996.
- [28] A. Hyvärinen and E. Oja, "Independent component analysis: algorithms and applications," *Neural Networks*, vol. 13, no. 4–5, pp. 411–430, Jun. 2000, doi: 10.1016/S0893-6080(00)00026-5.
- [29] A. Hyvärinen, J. Karhunen, and E. Oja, *Independent Component Analysis*. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [30] A. C. dos Santos and I. N. Santos, "Assignment of harmonic voltage contributions using the harmonic current injection method," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, Sep. 2020, doi: 10.1002/2050-7038.12608.
- [31] B. Ganesini, "Compartilhamento de responsabilidades harmônicas: implementação de Benchmark do IEEE e aplicação de metodologias," p. 172, 2020, [Online]. Available: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.619%0Ahttps://repositorio.ufu.br/handle/123456789/29873>.
- [32] X. Y. Xiao and H. G. Yang, "The method of estimating customers harmonic emission level based on bilinear regression," in *2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. Proceedings*, 2004, vol. 2, no. April, pp. 662–665, doi: 10.1109/DRPT.2004.1338066.
- [33] S. F. de Paula Silva and J. C. de Oliveira, "The sharing of responsibility between the supplier and the consumer for harmonic voltage distortion: A case study," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 78, no. 11, pp. 1959–1964, Nov. 2008, doi: 10.1016/j.epsr.2008.04.003.
- [34] X. Huang, P. Nie, and H. Gong, "A new assessment method of customer harmonic emission level," *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, pp. 1–5, 2010, doi: 10.1109/APPEEC.2010.5449329.
- [35] J. Hui, H. Yang, S. Lin, and M. Ye, "Assessing utility harmonic impedance based on the covariance characteristic of random vectors," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no. 3, pp. 1778–1786, 2010, doi: 10.1109/TPWRD.2010.2046340.

- [36] Z. Tang, H. Li, F. Xu, Q. Shu, and Y. Jiang, “A Harmonic Impedance Estimation Method Based on the Cauchy Mixed Model,” *Math. Probl. Eng.*, vol. 2020, pp. 1–13, Mar. 2020, doi: 10.1155/2020/1580475.
- [37] X. Huang, P. Nie, and H. Gong, “A New Assessment Method of Customer Harmonic Emission Level,” 2010.
- [38] X. Yonghai, H. Shun, and L. Yingying, “Partial least-squares regression based harmonic emission level assessing at the point of common coupling,” *2006 Int. Conf. Power Syst. Technol. POWERCON2006*, pp. 1–5, 2006, doi: 10.1109/ICPST.2006.321428.
- [39] R. Langella and A. Testa, “A new method for statistical assessment of the system harmonic impedance and of the background voltage distortion,” *2006 9th Int. Conf. Probabilistic Methods Appl. to Power Syst. PMAPS*, no. 1, 2006, doi: 10.1109/PMAPS.2006.360349.
- [40] J. Yu, Xianchuan and Hu, Dan and Xu, *Blind source separation: theory and applications*. Wiley, 2014.
- [41] S. Choi, A. Cichocki, H.-M. Park, and S.-Y. Lee, “Blind source separation and independent component analysis: A review,” *Neural Inf. Process. Rev.*, vol. 6, pp. 1–57, Aug. 2005.
- [42] F. de O. Pereira, “Separação cega de misturas com não-linearidade posterior utilizando estruturas monotônicas e algoritmos bio-inspirados de otimização,” Universidade Estadual de Campinas, 2010.
- [43] F. J. Von Zuben and R. R. D. F. Attux, “Análise de Componentes Independentes (ICA),” *Universidade Estadual de Campinas*, 2016. http://www.dca.fee.unicamp.br/~attux/topico_10_2016.pdf (accessed Sep. 24, 2020).
- [44] A. Tharwat, “Independent component analysis: An introduction,” *Appl. Comput. Informatics*, vol. ahead-of-p, no. ahead-of-print, pp. 1–15, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.aci.2018.08.006.
- [45] N. C. Damasceno, “Separação cega de fontes lineares e não lineares usando Algoritmo Genético , Redes Neurais Artificiais RBF e Negentropia de Rényi como medida de

- independência,” Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.
- [46] E. Bingham and A. Hyvärinen, “A Fast fixed-point algorithm for independent component analysis of complex valued signals,” *Int. J. Neural Syst.*, vol. 10, no. 01, pp. 1–8, 2000, doi: 10.1142/S0129065700000028.
- [47] A. Hyvärinen, “Fast Independent Component Analysis (Algorithm).” <https://www.cs.helsinki.fi/u/ahyvarin/software.shtml> (accessed Jun. 16, 2020).
- [48] V. Zarzoso, P. Comon, and M. Kallel, “How fast is FastICA?,” *14th Eur. Signal Process. Conf.*, pp. 1–5, 2006.
- [49] “Vicente Zarzoso: RobustICA algorithm.” <http://www.i3s.unice.fr/~zarzoso/robustica.html> (accessed Jun. 16, 2020).
- [50] V. Zarzoso and P. Comon, “Robust Independent Component Analysis by Iterative Maximization of the Kurtosis Contrast with Algebraic Optimal Step Size,” *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 21, no. 2, pp. 248–261, Feb. 2010, doi: 10.1109/TNN.2009.2035920.
- [51] V. Zarzoso and P. Comon, “Comparative speed analysis of FastICA,” in *International Conference on Independent Component Analysis and Signal Separation*, 2007, pp. 293–300.
- [52] J. F. Cardoso and A. Souloumiac, “Blind beamforming for non-gaussian signals,” *IEE Proc. F Radar Signal Process.*, vol. 140, no. 6, p. 362, 1993, doi: 10.1049/ip-f-2.1993.0054.
- [53] J.-F. Cardoso, “High-Order Contrasts for Independent Component Analysis,” *Neural Comput.*, vol. 11, no. 1, pp. 157–192, Jan. 1999, doi: 10.1162/089976699300016863.
- [54] M. G. Fagundes Neto, “Análise de componentes independentes aplicada em compressores herméticos alternativos para mitigação das fontes de ruído,” Universidade Federal de Uberlândia, 2017.
- [55] D. N. Rutledge and D. Jouan-Rimbaud Bouveresse, “Independent Components Analysis with the JADE algorithm,” *TrAC - Trends Anal. Chem.*, vol. 50, pp. 22–32, 2013, doi: 10.1016/j.trac.2013.03.013.

- [56] W. Xu, X. Liu, and Y. Liu, “An Investigation on the Validity of Power Direction Method for Harmonic Source Determination,” *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 22, no. 7, pp. 62–62, Jul. 2002, doi: 10.1109/MPER.2002.4312428.
- [57] FLUKE, “Fluke 430 Series II Three-Phase Power Quality and Energy Analyzers.” <https://www.fluke-direct.com/pdfs/cache/www.fluke-direct.com/435-ii/datasheet/435-ii-datasheet.pdf> (accessed Apr. 27, 2021).
- [58] FLUKE, “GPS Synchronization Module Instruction - GPS 430-II,” 2015. <https://www.instrumart.com/assets/GPS430-II-manual.pdf>.

ANEXO A

Anexo A.1

Nesta seção apresenta-se as especificações elétricas de cada um dos componentes empregados no FMBT, utilizados para aplicação da metodologia MID nos ensaios realizados no campus Umuarama da Universidade Federal de Uberlândia.

- **Capacitores**

Os capacitores utilizados na concepção do filtro multissinizado para aplicação em baixa tensão são unidades capacitivas monofásicas, fabricadas pela GE Grid Solutions, e os parâmetros fundamentais são disponibilizados na Tabela A.1. No total foram utilizados um banco de 12 unidades, sendo 4 unidades capacitivas por fase. Estas unidades foram conectadas em paralelo, formando um arranjo trifásico na configuração estrela-isolada.

Tabela A.1 – Dados das unidades capacitivas

Parâmetros	Valores e Características
Tipo	AILP
Potência Nominal	84 kvar
Tensão Nominal	672 V
Corrente Nominal	125 A
Frequência Nominal	60 Hz
Capacitância Nominal	493,41 μF
Tolerância da Capacitância	-2 / +2 %

- **Transformador de Corrente de Neutro**

Para apontar eventuais desequilíbrios devido à queima de unidades capacitivas, que podem ocasionar a assimetria nas capacitâncias entre as fases, o filtro conta com transformadores de correntes de Neutro, popularmente conhecidos também como “TC de

desbalanço”. Os transformadores de corrente de neutro utilizados no projeto foram fabricados pela Isolet e os parâmetros do equipamento estão disponibilizados na Tabela A.2.

Tabela A.2 – Dados das unidades capacitivas

Parâmetros	Valores e Características
Classe de Isolação (kV)	7,2
Frequência (Hz)	60
Nível de Isolamento (kV)	20/60
Tipo de Instalação	Externa
Norma	ABNT NBR 6856/2015
Material Isolante	EPOXI CIC
Fator Térmico	1,2
Corrente primária Nominal (A)	10
Corrente secundária nominal (A)	5
Classe de exatidão para a proteção	10 VA CL1,2
Corrente térmica	0,8kA – 1 s
Corrente dinâmica	2kA-cr

- **Reatores**

Três reatores monofásicos com múltiplos TAPs, sendo cada unidade composta por dois reatores do tipo OSD (Open Style Design), foram conectados em série afim de proporcionar as diferentes frequências de sintonias do filtro. Em termos gerais, o arranjo projetado permite um total de 1005 combinações distintas de TAPs e pedestais, das quais são obtidos valores singulares de indutância que possibilitam a sintonia do filtro na frequência desejada de forma precisa.

A Tabela A.3 fornece os principais parâmetros do componente fabricado pela GE Grid Solutions. Como o FMBT foi projetado para sintonia nas seguintes ordens: 3^a, 5^a e 7^a, a Tabela A.4 apresenta os valores das indutâncias nominais para cada uma das sintonias de interesse.

Tabela A.3 – Dados dos reatores

Parâmetros	Valores e Características
Tipo	XSFO2AF
Tensão Nominal	690 V
Corrente Nominal	700 A
Frequência Nominal	60 Hz
Indutância Nominal	0,395 mH ($\pm 3\%$)
Impedância Nominal	0,149 Ω
I_{cc} Términa/duração	3,6 kA / 1s
I_{cc} Dinâmica	9,7 kAp

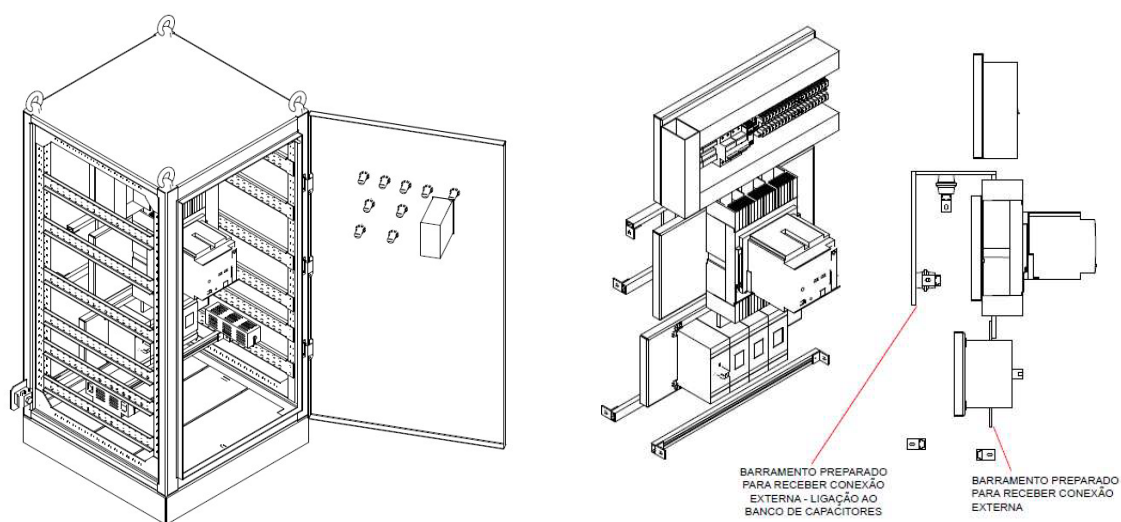
Tabela A.4 – Indutâncias nominais para cada ordem de sintonia de projeto do FMBT

Ordem Harmônica de Sintonia	Indutância (mH)
3ª Ordem	0,40
5ª Ordem	0,14
7ª Ordem	0,07

- **Painel de Comando**

O desenho tridimensional do painel de comando e proteção do banco de capacitores está ilustrado na Figura A.1. A principal função deste elemento consiste em garantir a operação segura do conjunto. Assim, este painel conta com uma série de componentes internos que se comunicam com elementos internos e externos para garantir a operação confiável do FMBT. Seus principais componentes são: relé de proteção, disjuntor, chave seccionadora, contatores e circuitos de comando e sinalização, sendo alimentado em 220 V (tensão alternada). Os itens que compõem o painel de comando serão detalhados nas seções subsequentes.

Figura A.1 – Painel de comando: desenho tridimensional

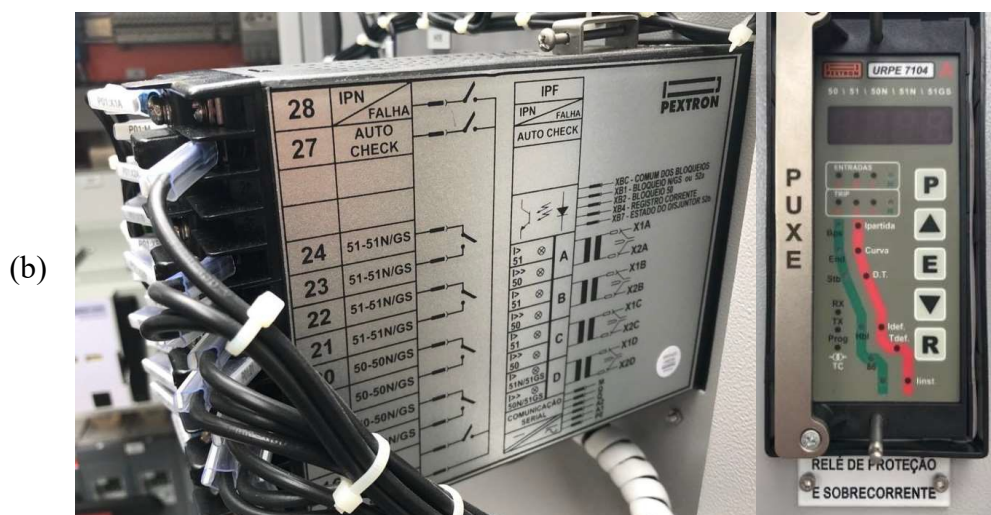
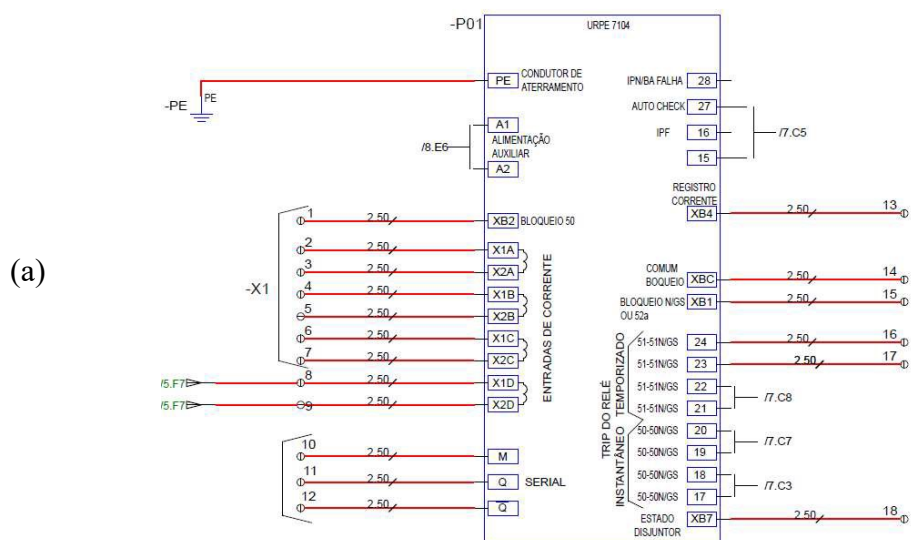


- **Relé de desbalanço de Corrente**

O relé utilizado no projeto para supervisão da corrente de neutro do banco de capacitores é da PEXTRON, modelo URPE 7104, ilustrados na . A leitura e

parametrização deste relé são realizadas por intermédio de software embarcado no equipamento.

Figura A.2 – Relé de proteção: (a) Funcionalidade. (b) disposição física do equipamento.



○ Disjuntor

O disjuntor possui a função de proteção do FMBT e permite a sua manobra (ON/OFF). O disjuntor utilizado no equipamento se trata do modelo DWB800 do fabricante WEG, o qual possui proteção térmica e magnética ajustável. Além do disjuntor, o sistema também é composto por um módulo de acionamento motorizado (modelo AM DWB800-1000). A manobra do elemento é realizada por meio dos botões de pulso localizados na parte frontal do

painel de proteção, os quais controlam o módulo de acionamento motorizado. Os dados técnicos desse equipamento estão disponibilizados na Tabela A.5.

Tabela A.5 – Dados disjuntor tripolar

Parâmetros	Valores e Características
Tensão de Operação Nominal (V)	690
Tensão de Isolação Nominal (V)	800
Tensão de Impulso Nominal Suportável (V)	8
Tipo de Instalação	Interna
Norma	IEC 60947-2
Corrente Nominal (A)	800
Capacidade de Interrupção máxima de Curto-circuito (kA)	8

○ **Chave Seccionadora**

A Chave Seccionadora tripolar tem como função isolar o circuito quando manobrada, propiciando efetividade na proteção, confiabilidade e segurança na operação de circuitos e equipamentos. Nos ensaios realizados foi utilizada uma chave seccionadora modelo OS800D03P fabricada pela ABB. As principais informações técnicas de projeto da chave estão descritas na Tabela A.6.

Tabela A.6 – Dados chave seccionadora tripolar

Parâmetros	Valores e Características
Classe de Isolação (kV)	1
Nível de Isolamento (kV)	12
Padrão	IEC 60947-3
Corrente Nominal (A)	800
Operação	Sem carga

● **Cabos de Interligação**

Os cabos de interligação das unidades capacitivas consistiram em duas vias por fase de cabos “nus” de cobre com seção transversal de 50 mm². Já os cabos utilizados para interligação do banco de capacitores, reatores e painel de comando corresponderam a duas vias de cabos de cobre isolados com bitola de 70 mm² por fase.

Com relação aos cabos de interligação do FMBT à subestação, os condutores utilizados consistiram em duas vias de cabos de cobre isolados de seção transversal igual a 240 mm² por

fase, cada qual com comprimento aproximado de 120 m. Esses cabos, por sua vez, foram organizados em dois trifólios com distribuição trifásica, os quais foram paralelamente espaçados com distância superior a 20 cm, com o intuito de evitar interações entre as indutâncias mútuas de cada arranjo de trifólio.