



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

VINÍCIUS HENRIQUE FARIAS BRITO

**Uma proposta metodológica não invasiva para o compartilhamento da
responsabilidade sobre desequilíbrios de tensão baseada na minimização da
correlação das fontes**

Uberlândia

2026

VINÍCIUS HENRIQUE FARIAS BRITO

**Uma proposta metodológica não invasiva para o compartilhamento da
responsabilidade sobre desequilíbrios de tensão baseada na minimização da
correlação das fontes**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: Dr. José Carlos de Oliveira

Uberlândia

2026

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

B862 Brito, Vinícius Henrique Farias, 1994-
2026 Uma proposta metodológica não invasiva para o
compartilhamento da responsabilidade sobre desequilíbrios de
tensão baseada na minimização da correlação das fontes [recurso
eletrônico] / Vinícius Henrique Farias Brito. - 2026.

Orientador: José Carlos de Oliveira.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-
graduação em Engenharia Elétrica.

Modo de acesso: Internet.

DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2026.380>

Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica. I. Oliveira, José Carlos de, 1947-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação
em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

VINÍCIUS HENRIQUE FARIAS BRITO

Uma proposta metodológica não invasiva para o compartilhamento da responsabilidade sobre desequilíbrios de tensão baseada na minimização da correlação das fontes

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Uberlândia, 06 de maio de 2026

Banca Examinadora:

José Carlos de Oliveira – Prof. Dr. (UFU)

Sidelmo Magalhães Silva – Prof. Dr. (UFMG)

Carlos Eduardo Tavares – Prof. Dr. (UFU)

Isaque Nogueira Gondim – Prof. Dr. (UFU)

Fabício Parra Santilio – Prof. Dr. (UFMT)



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, 360, PPGEELT				
Data:	Seis de maio de dois mil e vinte e seis	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	17:35
Matrícula do Discente:	12023EEL012				
Nome do Discente:	Vinícius Henrique Farias Brito				
Título do Trabalho:	Uma proposta metodológica não invasiva para o compartilhamento da responsabilidade sobre desequilíbrios de tensão baseada na minimização da correlação das fontes				
Área de concentração:	Sistemas de Energia Elétrica				
Linha de pesquisa:	Sistemas Elétricos de Potência				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Paulo Henrique Oliveira Rezende. Título do Projeto: Alocação Otimizada de Reatores Saturados Cabeça de Série em Redes de Distribuição Multirramais para Regulação da Tensão. Agência financiadora: Neoenergia, por meio do Programa de P&D da Agência Nacional de Energia Elétrica. Número do processo na agência financiadora: 23117.006858/2023-71. Vigência do projeto: 05/06/2023 a 05/06/2026.				

Reuniu-se através de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta:

Doutores: Carlos Eduardo Tavares (UFU), Isaque Nogueira Gondim (UFU), Sidelmo Magalhães Silva (UFMG), Fabrício Parra Santilio (UFMT) e José Carlos de Oliveira, orientador do discente.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. José Carlos de Oliveira, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, 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 presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

APROVADO.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

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



Documento assinado eletronicamente por **Isaque Nogueira Gondim, Professor(a) do Magistério Superior**, em 06/05/2026, às 17:36, 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 **Fabricio Parra Santilio, Usuário Externo**, em 06/05/2026, às 17:36, 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 **Carlos Eduardo Tavares, Professor(a) do Magistério Superior**, em 06/05/2026, às 17:36, 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 **Sidelmo Magalhães Silva, Usuário Externo**, em 06/05/2026, às 17:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Carlos de Oliveira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 07/05/2026, às 10:24, 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 **7264344** e o código CRC **EA5A9841**.

“Dedico este trabalho à minha esposa Bárbara, à minha filha Teresa e a Jesus Cristo, Deus de toda a vida e minha razão de viver.”

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Jesus Cristo, cuja presença e amor pude sentir em cada etapa deste trabalho, embora muitas vezes não tenha entendido os caminhos que estava passando. A cada dia percebo com mais clareza que nasci para amá-Lo. À Virgem Maria, minha mãe e intercessora, agradeço pela proteção e pelo amparo ao longo de toda esta caminhada.

À minha esposa, Bárbara Morais Giancesini, agradeço por ser meu sustento, por ter suportado minhas ausências e por caminhar ao meu lado. À minha filha, Teresa Giancesini Brito, que, com pouco mais de três meses de vida, já transformou o meu mundo e fez uma diferença imensurável em quem eu sou.

À minha mãe, Marly Souza Brito Farias, ao meu pai, José de Farias Lima (*in memoriam*), à minha irmã, Gabriella Farias Brito, e ao meu cunhado, Matheus Santana, agradeço por todo o amor e apoio que recebi nessa caminhada e pela presença constante, mesmo distantes fisicamente.

Agradeço à Igreja Católica, Corpo Místico de Cristo, por meio da qual recebi os sacramentos e o alimento espiritual que me sustentaram ao longo desta jornada. De modo especial, agradeço à minha paróquia São Mateus, na qual encontrei uma nova família em Uberlândia. Obrigado, Laylla, Jefferson, Léo, Pamela, Roberta, Alex, Izabella e Hugo, pelo convívio e apoio espiritual.

Ao meu orientador, Prof. José Carlos de Oliveira, pela confiança depositada, pelos ensinamentos valiosos e pelo incentivo fundamental para a concretização desta tese.

Aos meus amigos Ivan N. Santos, Ana Cristina, Ana Tannus, Paulo Henrique e Laíse Resende, pelos momentos de alegria e companheirismo.

À minha comadre, Andressa de Moura Periolo, por toda a ajuda prestada durante a pós-graduação e pela amizade que transcende o ambiente acadêmico.

Aos membros do Laboratório de Qualidade da Energia da UFU (LabQEE), ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEELT) e à Universidade Federal de Uberlândia por proverem meios para a realização deste trabalho. Agradeço também aos colegas professores e técnicos administrativos da UFU.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio à realização desta pesquisa.

"Eis que estavas dentro e eu fora, e fora Te buscava. Estavas comigo e eu não estava Contigo. Seguravam-me longe de Ti as inquietações do meu espírito e a falta de fé que me fazia tremer diante do incerto. Tu me chamaste, clamaste por mim e Teu grito rompeu a minha surdez. Fizeste-me entrar em mim mesmo para que eu enxergasse o quão deformado eu estava, manchado pela ansiedade e pela dúvida que me faziam perguntar: 'Quando deixarei de temer? Por que digo sempre: Amanhã, amanhã?'

Foi então que escutei uma voz que dizia: 'Pega e lê, pega e lê'. Corri à Bíblia, abri-a e li as palavras que acalmaram a tempestade em meu peito: 'Não vos inquieteis com a vossa vida, pelo que haveis de comer ou beber.

Olhai as aves do céu: não semeiam nem ceifam, nem recolhem nos celeiros e vosso Pai Celeste as alimenta. Não valeis vós muito mais que elas? Não vos inquieteis, pois, com o dia de amanhã; buscai, em primeiro lugar, o Reino de Deus e a sua justiça, e todas essas coisas vos serão dadas por acréscimo'.

Brilhaste resplandecente sobre mim e afugentaste a minha cegueira. Tarde Te amei, ó Beleza tão antiga e tão nova, tarde demais eu Te amei! Provei-Te e agora tenho fome e sede de Ti. Tocaste-me, e agora ardo por Tua paz."

(Inspirado em Santo Agostinho e no Evangelho de Mateus)

RESUMO

Os sistemas elétricos têm passado por transformações substanciais devido à incorporação de novas tecnologias, trazendo expressivos impactos na Qualidade da Energia Elétrica, destacando-se os desequilíbrios de tensão advindos das condições operacionais impostas pelas redes elétricas modernas. De fato, este indicador e outros associados, à perda da qualidade da energia têm crescido e, para muitas instalações, atingem proporções superiores aos limites preconizados pelos órgãos reguladores. Tais violações representam fontes de impactos nocivos para os agentes envolvidos, os quais podem sofrer prejuízos diversos, na forma de perda de eficiência do funcionamento das redes, redução da vida útil de componentes que perfazem as instalações, interrupções intempestivas do fornecimento, dentre outros. Nestas circunstâncias, quando da ocorrência de tais violações, surgem alternativas mitigadoras que representam custos financeiros elevados, o que, reconhecendo que os barramentos de conexão unem dois ou mais agentes, pode conduzir a conflitos entre as partes. Focando na temática da busca de meios para o compartilhamento de responsabilidade sobre os efeitos finais, a literatura apresenta uma vasta bibliografia que, contudo, ainda carece de métodos de análise não invasivos com propriedades físicas e aplicativas consolidadas para uso prático em campo. À luz deste fato, esta tese propõe o desenvolvimento do Método da Minimização da Correlação, uma nova estratégia não invasiva para o compartilhamento da responsabilidade sobre os desequilíbrios de tensão totais medidos no ponto de acoplamento comum que ofereça confiabilidade, robustez e aplicabilidade prática. A metodologia fundamenta-se na independência estatística das componentes de variação rápida das fontes de corrente dos agentes e destaca-se por não requerer intervenções físicas na rede para o processo de análise. Além de estabelecer os fundamentos teóricos dessa nova estratégia, o trabalho avalia seu desempenho de forma comparativa com as principais metodologias da literatura, como o Método dos Mínimos Quadrados e o Método de Análise de Componentes Independentes Complexas, demonstrando, por meio de análises computacionais e validações experimentais em uma instalação real, sua superioridade em termos de confiabilidade, robustez e praticidade operativa.

Palavras-chave: Qualidade da energia. Desequilíbrios de tensão. Compartilhamento de responsabilidades. Métodos não invasivos. Parâmetros de sequência negativa.

ABSTRACT

Electrical power systems have undergone substantial transformations due to the incorporation of new technologies, bringing significant impacts on power quality, notably the voltage imbalance arising from operational conditions imposed by modern power grids. In fact, this indicator and others associated with the loss of power quality have grown and, for many installations, reach proportions exceeding the limits established by regulatory bodies. Such violations represent sources of harmful impact for the agents involved, who may suffer various losses, such as a decrease in network operational efficiency, reduction in the useful life of installation components, and untimely supply interruptions, among others. In these circumstances, when such regulatory standard violations occur, mitigation alternatives emerge that represent high financial costs; recognizing that connection buses — the Points of Common Coupling — unite two or more agents, this can lead to conflicts between the parties. Focusing on the search for means of responsibility sharing regarding the final effects, the literature presents a vast bibliography that, however, still lacks non-invasive analysis methods with consolidated physical and application properties for practical field use. Considering this fact, this thesis proposes the development of the Correlation Minimization Method, a new non-invasive strategy for the sharing of responsibility over total voltage unbalances measured at the PCC that offers reliability, robustness, and practical applicability. The methodology is based on the statistical independence of the fast-varying components of the agents' current sources and stands out for not requiring physical interventions in the network for the analysis process. Besides establishing the theoretical foundations of this new strategy, the work evaluates its performance comparatively with the main methodologies in literature, such as Least Squares and Complex Independent Component Analysis Method, demonstrating, through computational analysis and experimental validations in a real facility, its superiority in terms of reliability, robustness, and operational practicality.

Keywords: Power quality. Voltage imbalances. Responsibility share. Non-invasive methods. Negative sequence parameters.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Uma visão física da temática “compartilhamento de responsabilidades”.....	29
Figura 2 – Métodos para o compartilhamento de responsabilidades sobre os desequilíbrios de tensão existentes na literatura.....	29
Figura 3 – Circuito equivalente de Norton representativo dos agentes 1 e 2 (supridor e consumidor) conectados ao PAC.....	49
Figura 4 – Circuito equivalente de Norton representando as contribuições individuais do supridor e do consumidor.....	49
Figura 5 – Diagrama fasorial das tensões de sequência negativa e respectivas projeções.....	50
Figura 6 – Processo de filtragem para separação das componentes de variação lenta e rápida.....	55
Figura 7 – Fluxograma do algoritmo de estimativa de impedâncias via MCICA.....	58
Figura 8 – Circuito equivalente de Norton simplificado representativo dos agentes supridor e consumidor conectados ao PAC.....	59
Figura 9 – Fluxograma do algoritmo para estimativa de impedâncias via Método dos Mínimos Quadrados.....	63
Figura 10 – Circuito equivalente de Norton considerando apenas o consumidor variável.....	64
Figura 11 – Fluxograma do algoritmo para estimativa de impedâncias via Método da Flutuação.....	65
Figura 12 – Fluxograma do algoritmo de estimativa de impedâncias via MCCVA.....	68
Figura 13 – Resultado das medições das correntes de sequência negativa dos dois alimentadores em análise.....	74
Figura 14 – Fluxograma detalhado: estimativa de Z_{ref} (MCCVA Adaptado).....	77
Figura 15 – Circuito equivalente de Norton de sequência positiva representativo dos agentes supridor e consumidor conectados ao PAC.....	78
Figura 16 – Sistema elétrico utilizado para ilustrar o processo da determinação da impedância de referência do supridor.....	79
Figura 17 – Erro do MCCVA ao estimar a impedância de sequência positiva do supridor em função do fator de carga.....	80
Figura 18 – Coeficiente de Correlação entre a Tensão e a Corrente no PAC.....	81
Figura 19 – Fluxogramas para aplicação do MMC: (a) fluxo principal; (b) algoritmo PSO.....	87
Figura 20 – Diagrama unifilar do sistema elétrico teste para estudos sobre a determinação das contribuições de desequilíbrios.....	91
Figura 21 – Perfis de carga impostos aos consumidores.....	93
Figura 22 – Tensão e corrente de sequência positiva medidas no PAC 01 - Condição I.....	100
Figura 23 – Componentes de variação rápida da tensão e corrente de sequência positiva medidas no PAC 01 - Condição I.....	100

Figura 24 – Impedâncias de sequência positiva calculadas no PAC 01 - Condição I.....	101
Figura 25 – Módulo do fator de correlação entre $V1 - fastPAC$ e $I1 - fastPAC$ no PAC 1 - Condição I.	101
Figura 26 – Processo de seleção das impedâncias através do processo de filtragem no PAC 1 - Condição I.	102
Figura 27 – Impedância de sequência positiva calculada no PAC 01 - Condição I.....	103
Figura 28 – Tensão e corrente de sequência negativa no PAC 1 – Condição I.....	104
Figura 29 – Magnitude das projeções das tensões de responsabilidade no PAC 1 - Condição I – (a): Gabarito, (b): MMC, (c): MCICA, (d): MCCVA, (e): MMQ, (f): M. Flutuação.	106
Figura 30 – Parcelas de responsabilidade no PAC 1 – Condição I.	107
Figura 31 – Tensão e corrente de sequência negativa para Condição I – a: PAC 2, b: PAC 3.	108
Figura 32 – Parcelas de responsabilidade para Condição I – (a): PAC 2, (b): PAC 3.	109
Figura 33 – Parcelas de responsabilidade para Condição II – (a): PAC 1, (b): PAC 2,.....	110
Figura 34 – Parcelas de responsabilidade para Condição III – (a): PAC 1, (b): PAC 2, (c): PAC 3.	112
Figura 35 – Parcelas de responsabilidade para Condição IV – (a): PAC 1, (b): PAC 2, (c): PAC 3.....	114
Figura 36 – Parcelas de responsabilidade para Condição V – (a): PAC 1, (b): PAC 2, (c): PAC 3.....	115
Figura 37 – Parcelas de responsabilidade para Condição VI – (a): PAC 1, (b): PAC 2, (c): PAC 3.....	117
Figura 38 – Diagrama unifilar do sistema elétrico teste.....	124
Figura 39 – Sistema de Medição Implementado – Instalação no Campus Umuarama (UFU).	125
Figura 40 – Tensões e correntes de sequência positiva medidas no PAC.....	126
Figura 41 – Tensões e correntes de sequência negativa medidas no PAC.....	126
Figura 42 – Fator de Desequilíbrio no PAC.....	127
Figura 43 – Definição das janelas para aplicação dos métodos.	128
Figura 44 – Definição da impedância representativa.	129
Figura 45 – Determinação da projeção da tensão do consumidor.....	129
Figura 46 – Impedâncias calculadas pelo MCCVA adaptado – (a): valores brutos, (b): valores filtrados.....	131
Figura 47 – Fator de correlação calculado ao longo do período de amostragem.	132
Figura 48 – Impedâncias de sequência negativa do supridor estimadas pelo MMC.....	133
Figura 49 – Magnitude das projeções das tensões de responsabilidade – Avaliação em Campo – (a): MMC, (b): MCICA, (c): MCCVA, (d): MMQ, (e): M. Flutuação.	134
Figura 50 – Resultados totais de contribuição da semana.	135

Figura 51 – Tensão e corrente de sequência positiva para Condição I – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.	157
Figura 52 – Tensão e corrente de sequência negativa para Condição I – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.	158
Figura 53 – Impedâncias de sequência positiva calculadas pelo MCCVA Adaptado para Condição I – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.....	158
Figura 54 – Tensão e corrente de sequência positiva para Condição II – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.	160
Figura 55 – Tensão e corrente de sequência negativa para Condição II – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.	161
Figura 56 – Impedâncias de sequência positiva calculadas pelo MCCVA Adaptado para Condição II – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.	161
Figura 57 – Tensão e corrente de sequência positiva para Condição III – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.	163
Figura 58 – Tensão e corrente de sequência negativa para Condição III – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.	164
Figura 59 – Impedâncias de sequência positiva calculadas pelo MCCVA Adaptado para Condição III – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.....	164
Figura 60 – Tensão e corrente de sequência positiva para Condição IV – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.	166
Figura 61 – Tensão e corrente de sequência negativa para Condição IV – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.	167
Figura 62 – Impedâncias de sequência positiva calculadas pelo MCCVA Adaptado para Condição IV – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.....	167
Figura 63 – Tensão e corrente de sequência positiva para Condição V – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.	169
Figura 64 – Tensão e corrente de sequência negativa para Condição V – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.	170
Figura 65 – Impedâncias de sequência positiva calculadas pelo MCCVA Adaptado para Condição V – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.....	170
Figura 66 – Tensão e corrente de sequência positiva para Condição VI – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.	172
Figura 67 – Tensão e corrente de sequência negativa para Condição VI – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.	173
Figura 68 – Impedâncias de sequência positiva calculadas pelo MCCVA Adaptado para Condição VI – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.....	173
Figura 69 – Impedâncias de sequência negativa do supridor estimadas pelo MMC.....	176
Figura 70 – Impedâncias de sequência negativa do consumidor estimadas pelo MMC.	176
Figura 71 – Impedâncias de sequência negativa do supridor estimadas pelo MCICA.	176
Figura 72 – Impedâncias de sequência negativa do consumidor estimadas pelo MCICA.	177
Figura 73 – Impedâncias de sequência negativa do supridor estimadas pelo MMQ.	177

Figura 74 – Impedâncias de sequência negativa do supridor estimadas pelo M. Flutuação ..177

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Síntese dos métodos invasivos para determinação das contribuições de desequilíbrio.	38
Tabela 2. Síntese dos métodos não invasivos do Grupo I para determinação das contribuições de desequilíbrio.	40
Tabela 3. Síntese dos métodos não invasivos do Grupo II para determinação das contribuições de desequilíbrio.	43
Tabela 4. Síntese dos métodos não invasivos do Grupo III para determinação das contribuições de desequilíbrio.	46
Tabela 5 – Símbolos de impedância empregados no capítulo.	71
Tabela 6 – Assimetria das componentes de variação rápida das correntes de sequência negativa dos alimentadores.	74
Tabela 7 – Curtose das componentes de variação rápida das correntes de sequência negativa dos alimentadores.	75
Tabela 8 – Coeficiente de correlação entre as componentes de variação rápida para as correntes de sequência negativa.	75
Tabela 9 – Parâmetros do sistema elétrico em análise.	91
Tabela 10 – Grandezas elétricas e contribuições para as condições I, II e III – “gabaritos”....	98
Tabela 11 – Grandezas elétricas e contribuições para as condições IV, V e VI – “gabaritos”.	99
Tabela 12 – Impedâncias do supridor obtidas pelos métodos em relação ao gabarito no PAC 1.	104
Tabela 13 – Impedâncias do consumidor obtidas pelos métodos em relação ao gabarito no PAC 1.	105
Tabela 14 – Erro dos métodos em análise.	107
Tabela 15 – Impedâncias do supridor obtidas pelos métodos em relação ao gabarito.	108
Tabela 16 – Impedâncias do consumidor obtidas pelos métodos em relação ao gabarito.	108
Tabela 17 – Erro dos métodos em análise nos PACs 2 e 3 – Condição I.	109
Tabela 18 – Parcela de contribuição dos consumidores – Condição II.	110
Tabela 19 – Erro dos métodos em análise – Condição II.	111
Tabela 20 – Parcela de contribuição dos consumidores – Condição III.	111
Tabela 21 – Erro dos métodos em análise – Condição III.	113
Tabela 22 – Parcela de contribuição dos consumidores – Condição IV.	113
Tabela 23 – Erro dos métodos em análise – Condição IV.	114
Tabela 24 – Parcela de contribuição dos consumidores – Condição V.	115
Tabela 25 – Erro dos métodos em análise – Condição V.	116
Tabela 26 – Parcela de contribuição dos consumidores – Condição VI.	116

Tabela 27 – Erro dos métodos em análise – Condição VI.....	118
Tabela 28 – Síntese dos erros dos métodos para as avaliações – Caso 1, 2 e 3.	119
Tabela 29 – Síntese dos erros dos métodos para as avaliações – Caso 4, 5 e 6.	120
Tabela 30 – Métricas de desempenho dos métodos.	121
Tabela 31 – Grandezas elétricas representativas dos valores médios das tensões e correntes de sequência positiva, negativa e do fator de desequilíbrio em termos de P95%.	127
Tabela 32 – Valores médios das impedâncias calculados pelos métodos.	133
Tabela 33 – Parcelas de responsabilidade de desequilíbrio – Avaliação em Campo.....	135
Tabela 34 – Impedância de sequência positiva do supridor estimada pelo MCCVA adaptado para Condição I.....	159
Tabela 35 – Impedâncias de sequência negativa do supridor estimadas pelos métodos para Condição I.	159
Tabela 36 – Impedâncias de sequência negativa do consumidor estimadas pelos métodos para Condição I.	159
Tabela 37 – Contribuições do consumidor estimadas pelos métodos para Condição I.....	160
Tabela 38 – Impedância de sequência positiva do supridor estimada pelo MCCVA adaptado para Condição II.	162
Tabela 39 – Impedâncias de sequência negativa do supridor estimadas pelos métodos para Condição II.	162
Tabela 40 – Impedâncias de sequência negativa do consumidor estimadas pelos métodos para Condição II.	162
Tabela 41 – Contribuições do consumidor estimadas pelos métodos para Condição II.	163
Tabela 42 – Impedância de sequência positiva do supridor estimada pelo MCCVA adaptado para Condição III.	165
Tabela 43 – Impedâncias de sequência negativa do supridor estimadas pelos métodos para Condição III.....	165
Tabela 44 – Impedâncias de sequência negativa do consumidor estimadas pelos métodos para Condição III.....	165
Tabela 45 – Contribuições do consumidor estimadas pelos métodos para Condição III.....	166
Tabela 46 – Impedância de sequência positiva do supridor estimada pelo MCCVA adaptado para Condição IV.....	168
Tabela 47 – Impedâncias de sequência negativa do supridor estimadas pelos métodos para Condição IV.....	168
Tabela 48 – Impedâncias de sequência negativa do consumidor estimadas pelos métodos para Condição IV.....	168
Tabela 49 – Contribuições do consumidor estimadas pelos métodos para Condição IV.....	169
Tabela 50 – Impedância de sequência positiva do supridor estimada pelo MCCVA adaptado para Condição V.....	171
Tabela 51 – Impedâncias de sequência negativa do supridor estimadas pelos métodos para Condição V.....	171

Tabela 52 – Impedâncias de sequência negativa do consumidor estimadas pelos métodos para Condição V.....	171
Tabela 53 – Contribuições do consumidor estimadas pelos métodos para Condição V.....	172
Tabela 54 – Impedância de sequência positiva do supridor estimada pelo MCCVA adaptado para Condição VI.....	174
Tabela 55 – Impedâncias de sequência negativa do supridor estimadas pelos métodos para Condição VI.....	174
Tabela 56 – Impedâncias de sequência negativa do consumidor estimadas pelos métodos para Condição VI.....	174
Tabela 57 – Contribuições do consumidor estimadas pelos métodos para Condição VI.....	175

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A-CMN	<i>Adaptive Complex Maximization of non-Gaussianity</i>
AG	Algoritmos Genéticos
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
BSS	<i>Blind Source Separation</i>
BT	Baixa Tensão
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CICA	<i>Complex Independent Component Analysis</i>
D-STATCOM	<i>Distributed Static Synchronous Compensator</i>
ED	Evolução Diferencial
FD	Fator de Desequilíbrio
FDi	Fator de Desequilíbrio de Correntes
FDv	Fator de Desequilíbrio de Tensões
FP	Fator de Potência
gbest	<i>Global Best Position</i>
GD	Geração Distribuída
IEC/TR	<i>International Electrotechnical Commission / Technical Report</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IEEE-BTS-HCD	<i>IEEE Benchmark Test System for Harmonic Contribution Determination Studies</i>
JADE	<i>Joint Approximate Diagonalization of Eigen-matrices</i>
KDE	<i>Kernel Density Estimation</i>
LT	Linha de Transmissão
MCCNC	Método da Corrente Conforme e Não Conforme
MCCVA	Método da Covariância Característica de Vetores Aleatórios
MCICA	<i>Complex Independent Component Analysis Method</i>
MIT	Motor de Indução Trifásico
MMC	Método da Minimização da Correlação
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados

MSS	Método da Superposição Simplificada
MT	Média Tensão
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
P95%	Percentil 95%
ONS	Operador Nacional do Sistema
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
pbest	<i>Particular Best Position</i>
PMUs	<i>Phasor Measurement Units</i>
pp	Pontos Percentuais
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
pu	<i>Per unit</i> (por unidade)
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
rms	<i>root mean square</i> (Valor Eficaz)
SOBI	<i>Second-Order Blind Identification</i>
SVC	<i>Static Var Compensator</i>
TR	Transformador
VTCD	Variações de Tensão de Curta Duração

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	24
1.1 Aspectos gerais	24
1.2 Efeitos e normas	25
1.3 Soluções típicas aplicáveis para a regularização dos níveis dos desequilíbrios	26
1.4 Lacunas e motivações para a pesquisa	28
1.5 Objetivos e contribuições da tese	31
1.6 Estrutura do trabalho	32
2 ESTADO DA ARTE DOS MÉTODOS PARA O COMPARTILHAMENTO DA RESPONSABILIDADE SOBRE OS DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO	34
2.1 Considerações iniciais	34
2.2 Estratégias metodológicas existentes na literatura	34
2.2.1 Métodos invasivos	36
2.2.2 Métodos não invasivos	38
2.3 Fundamentos do Método da Superposição	48
2.4 Abordagem baseada no Método da Superposição Completo	51
2.4.1 Estimação via Método de Análise de Componentes Independentes Complexas (MCICA)	51
2.5 Abordagens baseadas no Método da Superposição Simplificado	58
2.5.1 Estimação via Método dos Mínimos Quadrados	60
2.5.2 Estimação via Método da Flutuação	63
2.5.3 Estimação via Método da Covariância Característica de Vetores Aleatórios (MCCVA)	66
2.6 Considerações finais	68
3 PROPOSIÇÃO DE NOVA ESTRATÉGIA DE PROCEDIMENTO NÃO INVASIVO	70
3.1 Considerações iniciais	70
3.2 Premissas adotadas pelo MMC	71
3.2.1 Impedância de sequência negativa do supridor	72

3.2.2 Independência das fontes de corrente	72
3.3 Determinação da impedância de referência do supridor	76
3.3.1 Fundamentos e modelo matemático	77
3.3.2 Filtragem, estimativa e validação de <i>Zref</i>	79
3.4 Estratégia aplicativa do MMC	82
3.5 Algoritmo PSO Clássico	84
3.5.1 Especificações do algoritmo PSO empregado	86
3.6 Considerações finais	88
4 AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DAS METODOLOGIAS NÃO INVASIVAS	89
4.1 Considerações iniciais	89
4.2 Caracterização do sistema teste para os estudos computacionais	89
4.2.1 Modelagem dinâmica do sistema elétrico	92
4.3 Condições operacionais consideradas na análise	95
4.4 Estratégia para avaliação dos métodos	96
4.4.1 Condições operacionais e tratamento de dados	96
4.4.2 Determinação dos índices de responsabilidade	97
4.5 Resultados computacionais	98
4.5.1 Aplicação do MCCVA Adaptado para a determinação de <i>Zref</i>	99
4.5.2 Determinação das contribuições para o desequilíbrio de tensão	103
4.5.3 Análise dos resultados obtidos	118
4.6 Considerações finais	121
5 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS METODOLOGIAS	123
5.1 Considerações iniciais	123
5.2 Caracterização do sistema e campanha de medição	124
5.3 Grandezas elétricas no PAC	126
5.4 Tratamento de dados e estratégia de processamento	127
5.5 Resultados	130
5.5.1 Estimação das impedâncias de sequência	131
5.5.2 Determinação do compartilhamento de responsabilidades	134
5.6 Análise dos resultados	136
5.7 Considerações finais	137

6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	139
6.1 Propostas de Continuidade	141
6.2 Produções Acadêmicas Resultantes	142
REFERÊNCIAS	144
APÊNDICE A. RESULTADOS OBTIDOS NA AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL	157
APÊNDICE B. RESULTADOS OBTIDOS NA AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL	176

1 INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos gerais

Os sistemas elétricos têm passado por constantes mudanças, as quais envolvem o aumento da demanda por fontes de energia renovável, o crescente emprego das tecnologias envolvendo eletrônica de potência, a redução do uso de combustíveis fósseis e o avanço na adoção de recursos energéticos distribuídos, a exemplo dos sistemas fotovoltaicos e de armazenamento de energia, entre outros [1], [2]. Neste contexto, não obstante os ganhos obtidos, numa outra via, surgem desafios importantes, a exemplo dos impactos sobre a operação dos sistemas elétricos e efeitos sobre a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) [2], [3].

De fato, distúrbios associados à perda da QEE possuem impactos diretos nos complexos elétricos envolvendo concessionárias, bem como unidades consumidoras industriais, comerciais e residenciais. Em atenção a esta temática, especificamente no âmbito dos sistemas de distribuição, os padrões do fornecimento de energia devem ser observados em consonância com as diretrizes expostas nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) [4], estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Esta determinação contempla fenômenos diversos quanto à sua natureza, estratégias de medição e quantificação, e limites admissíveis para os indicadores associados às variações de tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrios de tensão, flutuações de tensão, variações de frequência, bem como as variações de tensão de curta duração (VTCD).

De um modo geral, as violações dos limites preconizados para os indicadores do padrão da energia suprida podem afetar as condições operacionais das redes elétricas e equipamentos, produzindo má operação de componentes e equipamentos, solicitações térmicas e dielétricas incompatíveis com os dispositivos de rede (transformadores, motores, geradores, etc.), interrupção de processos, dentre outros. Assim, uma vez constatado que os limites postos tenham sido ultrapassados, ou ainda, diante de ocorrências danosas manifestadas nas instalações e seus equipamentos, soluções devem ser buscadas para se atingir o funcionamento confiável e seguro dos complexos elétricos.

Para a implementação de medidas mitigadoras, são empregadas técnicas voltadas para alterações da estrutura elétrica ou para a instalação de dispositivos visando o enquadramento das grandezas nos padrões recomendados. Estes recursos muitas vezes representam elevados custos financeiros e, em decorrência deste fato, podem surgir contendas entre os agentes

associados ao ponto de medição contemplado nas análises. Assim, a busca de meios que conduzam à identificação dos níveis de responsabilidades das partes, sobre o efeito final registrado, se apresenta como uma estratégia que, certamente, contribuirá para dirimir áreas de conflito e mesmo contendas judiciais. Neste contexto se insere a temática central abordada nesta pesquisa, a qual está relacionada ao compartilhamento e/ou identificação das responsabilidades referentes aos fenômenos de QEE, focando, pontualmente questões associadas com os desequilíbrios de tensão.

Como motivadores para esta escolha, cita-se o fato de que as assimetrias das tensões crescem em relevância diante da presença de constantes aumentos das cargas e unidades de geração distribuídas, hoje presentes em unidades de consumo residenciais, comerciais e industriais. Adicionalmente, o cenário de transição energética mencionado, impulsionado pela meta de redução de emissões de efeito estufa, agrava este quadro [5]. Disto depreende-se um aumento expressivo da geração distribuída (GD) fotovoltaica, que no Brasil já ultrapassa 43 GW de potência [6], e um crescimento exponencial do uso de veículos elétricos. A conexão majoritariamente monofásica ou bifásica destes novos elementos na rede de distribuição tende a intensificar as assimetrias de tensão, enfatizando a relevância do tema abordado.

1.2 Efeitos e normas

Inicialmente, cabe destacar que os conceitos fundamentais associados aos desequilíbrios manifestados nas tensões e correntes trifásicas são de amplo conhecimento na engenharia elétrica, e seus aspectos conceituais e matemáticos são tratados desde os primeiros ensinamentos para a formação do profissional na área. Por conseguinte, tais aspectos não serão aqui considerados em detalhes, mas apenas tratados de forma aplicativa, empregando as técnicas tradicionais embasadas nas componentes simétricas de sequência positiva, negativa e zero.

Partindo dessa premissa, ressalta-se que a condição ideal de operação de uma rede elétrica pressupõe que os sinais elétricos trifásicos contenham apenas as componentes de sequência positiva. Contudo, em situações reais, embora esta componente seja predominante, a presença da sequência negativa é praticamente inevitável, podendo-se verificar também a sequência zero em determinados cenários.

Diante da ocorrência dos desequilíbrios e seus efeitos negativos sobre a operação de um complexo elétrico, um conjunto de situações anômalas podem se manifestar, alterando de modo prejudicial os mais diversos componentes que perfazem a estrutura física do sistema. Um dos

fatores prejudiciais se apresenta na forma da redução da utilização eficiente da capacidade instalada, uma vez que o carregamento da sequência negativa de correntes irá limitar o aproveitamento do potencial de transferência de energia, antecipando a necessidade de reforços na rede e elevando os custos de investimento [7], [8], além de limitar a conexão de novas unidades de consumo e geração distribuída [9]. Além destes efeitos, destaca-se, ainda, que as tensões assimétricas contribuem para produzir aquecimentos excessivos e outros efeitos que, além de reduzir a eficiência dos processos, causam danos físicos aos componentes da instalação, como é o caso de máquinas rotativas.

A quantificação do fenômeno de desequilíbrio quanto aos seus níveis é abordada na literatura por meio de estratégias para o cálculo de indicadores numéricos, destinados a representar os níveis de assimetria em termos percentuais. Entre as propostas existentes, a mais utilizada se baseia no conhecido Fator de Desequilíbrio (FD), o qual consiste na relação entre as componentes simétricas de sequência negativa e positiva. Tal indicador é utilizado tanto para avaliar os níveis de desequilíbrio de tensões (FD_v) quanto de correntes (FD_i), em que pese o fato de que as grandezas contempladas nos documentos normativos se encontram diretamente referenciadas à grandeza representativa das anomalias presentes nas tensões.

Em atenção ao exposto, as agências reguladoras, tanto internacionais quanto nacionais, estabelecem valores de referência para o denominado FD_v. No âmbito internacional, as diretrizes europeias, à luz de protocolos de medição detalhadamente expostos nestes documentos, indicam, via de regra, um limite máximo de 2% para sistemas de média tensão (MT) e baixa tensão (BT) [10], [11]. Já o padrão norte-americano estipula que este indicador deve se apresentar abaixo de 2%, apontando para um valor ideal inferior a 1% [12]. No Brasil, a ANEEL, por meio do Módulo 8 do PRODIST [4], orienta que os percentuais de desequilíbrio de tensão (indicador FD_{95%}) sejam limitados a 3% em instalações com tensões iguais ou inferiores a 2,3 kV e 2% para sistemas com tensões entre 2,3 kV e 230 kV. No que tange à Rede Básica, o Operador Nacional do Sistema (ONS), por meio dos Procedimentos de Rede, determina que os limites individuais e globais para o FD_v não excedam 1,5% e 2%, respectivamente [13].

1.3 Soluções típicas aplicáveis para a regularização dos níveis dos desequilíbrios

Quando os limites estabelecidos pelas normativas são ultrapassados, naturalmente, a solução passa pela implementação de estratégias mitigadoras. Estas podem ser classificadas em

quatro grupos principais, ordenados a seguir conforme o nível de complexidade tecnológica empregada:

1. **Reconfiguração de Rede (rebalanceamento):** Uma abordagem clássica consiste no rebalanceamento de cargas monofásicas entre as fases, transferindo unidades consumidoras ou ramais da fase mais carregada para a menos carregada. Essa técnica pode ser aplicada manualmente durante desligamentos programados (*offline*) ou de forma automática com chaveamento sob carga (*online*) [14], [15], [16]. Nesse contexto, diversos trabalhos propõem modelos de otimização e métodos heurísticos visando a realocação otimizada das cargas para minimizar o desequilíbrio e as perdas no sistema [17], [18]. Esta categoria de solução apresenta-se como a mais simples e econômica, uma vez que otimiza a infraestrutura existente sem necessariamente exigir a instalação de equipamentos complexos adicionais. Contudo, essa abordagem enfrenta desafios operacionais significativos devido à falta de dados e medições detalhadas dos consumidores e ao desconhecimento da conectividade das fases nas redes de BT, dificultando ações efetivas de reconfiguração [9]. Além disso, por serem executadas de forma discreta, essas manobras não são capazes de realizar o balanceamento dinâmico de cargas que variam rapidamente no tempo.
2. **Compensadores passivos:** Esta estratégia baseia-se no emprego de elementos passivos, especificamente a combinação de indutores e capacitores, conectados em paralelo com a carga ou rede para formar um arranjo equilibrado sob a perspectiva do sistema de suprimento [19]. Estes dispositivos podem ser fixos ou controlados por chaves eletrônicas, como no caso do *Static Var Compensator* (SVC), que utiliza tiristores para o chaveamento [20]. As soluções estáticas (fixas) são tecnicamente atrativas pela robustez, simplicidade construtiva e baixo custo de implementação e manutenção. Entretanto, a principal limitação dos compensadores puramente passivos é a incapacidade de acompanhar a dinâmica de cargas variáveis, tornando-os ineficazes para consumidores com perfil oscilante. Embora o uso de chaveamento eletrônico (como no SVC) permita certa resposta dinâmica para contornar esse problema, esta técnica apresenta o aspecto negativo de gerar correntes harmônicas significativas devido aos disparos dos tiristores, podendo exigir a instalação de filtros adicionais.
3. **Compensação ativa:** Uma alternativa mais sofisticada envolve a instalação de equipamentos baseados em eletrônica de potência avançada, como o *Distributed Static Synchronous Compensator* (D-STATCOM) [21], [22]. Estes dispositivos crescem em importância aplicativa devido ao avanço dos semicondutores com capacidade de

chaveamento em altas frequências, compensando desequilíbrios ao gerar tensões ou correntes com polaridade oposta às originadas pela carga, cancelando as componentes de sequência negativa no ponto de conexão. Como principal vantagem, atuam de forma online e contínua, sendo altamente eficazes na correção dinâmica de desequilíbrios e podendo mitigar outros problemas de qualidade de energia simultaneamente. Por outro lado, seus aspectos negativos residem nos custos de aquisição elevados, na necessidade de infraestrutura complexa para instalação e nas exigências de manutenção especializada, o que pode limitar sua viabilidade econômica em comparação às soluções passivas [9].

4. **Controle de recursos distribuídos:** Uma solução emergente consiste na utilização e no controle coordenado de recursos energéticos distribuídos (baterias, veículos elétricos, geração distribuída, etc.) para mitigar o desequilíbrio [23], [24], [25]. Essa proposta, embora promissora, demanda infraestrutura avançada de comunicação e controle, além de modelos de negócio que incentivem a participação dos consumidores [9].

Do exposto fica evidenciado que as soluções cabíveis envolvem esforços e equipamentos para a implementação de qualquer medida mitigadora. Isto exige investimentos financeiros consideráveis e, por conseguinte, a possibilidade de contendas entre os agentes envolvidos. De fato, em um sistema complexo com múltiplas fontes de assimetria, a atribuição da responsabilidade pelos níveis de desequilíbrio que excedem os limites regulatórios torna-se uma questão técnica e comercial de alta complexidade. Nesse sentido, atribuir a responsabilidade integral a um único agente pode se apresentar como uma determinação injusta, visto que implica um rateio não equitativo.

Este cenário motiva a presente tese, a qual, como já referido, está centrada na busca de meios confiáveis e exequíveis em campo, visando a determinação das contribuições individuais dos agentes para o desequilíbrio de tensão em um ponto de acoplamento comum (PAC).

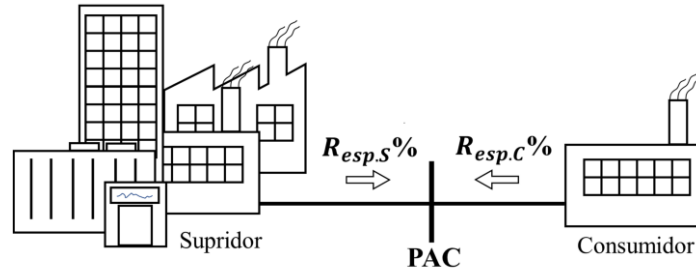
1.4 Lacunas e motivações para a pesquisa

Visando esclarecer os objetivos desta pesquisa, a Figura 1 ilustra, por meio de um esquema simplificado, a interação entre dois agentes conectados ao PAC. A montante encontra-se o Agente 1, o qual pode representar uma rede de suprimento constituída por centros de geração, sistemas de transmissão e distribuição, e diversas unidades de consumo, dentre outros. A partir do PAC deriva-se, a jusante, o Agente 2, que também pode se apresentar com uma estrutura física similar à anterior. Estes dois complexos, cada qual com suas particularidades,

definem o ponto comum de acoplamento, o qual se apresenta como barramento focado nas análises do compartilhamento do indicador de qualidade elétrica tratado nesta tese.

Não obstante o reconhecimento da composição geral dos agentes, para fins das análises desta tese adota-se a terminologia “supridor” para o agente à montante e “consumidor” para o agente à jusante.

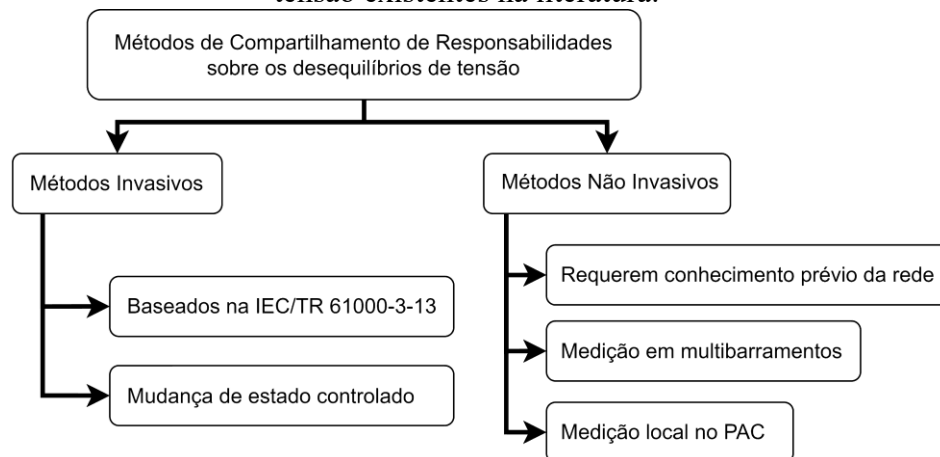
Figura 1 – Uma visão física da temática “compartilhamento de responsabilidades”.



Fonte: [26].

Postos os objetivos desta pesquisa, procede-se, a seguir, a uma síntese dos princípios metodológicos existentes na literatura para fins do compartilhamento de responsabilidades sobre os desequilíbrios de tensão. Neste sentido, a Figura 2 ilustra a classificação das principais estratégias abordadas, dividindo-as conceitualmente em procedimentos invasivos e não invasivos, conforme proposto em [27], [28]. Ressalta-se que, no Capítulo 2, será feita uma revisão bibliográfica detalhada, contendo a formulação matemática aplicável e a análise dos métodos.

Figura 2 – Métodos para o compartilhamento de responsabilidades sobre os desequilíbrios de tensão existentes na literatura.



Fonte: Autoria própria.

Com base na classificação apresentada, observa-se que os métodos invasivos correspondem àqueles que requerem a inserção de mecanismos que promovem perturbações na rede, seja por meio da desconexão e reconexão do agente consumidor (métodos baseados na *International Electrotechnical Commission/ Technical Report (IEC/TR) 61000-3-13* [29], [30]) ou por meio de manobras de capacitores monofásicos (método da mudança de estado controlado [31]). Tais procedimentos esbarram em limitações práticas severas, podendo implicar custos elevados de implementação em média/alta tensão e riscos de induzir fenômenos transitórios indesejáveis [28], [32], tornando-os, por consequência, pouco atrativos, sobretudo para o monitoramento contínuo. Adicionalmente, as interrupções necessárias para a instalação e retirada do elemento a ser chaveado, bem como a própria desconexão da instalação consumidora, podem implicar paradas indesejadas dos processos produtivos e prejuízos financeiros significativos.

Como alternativa, surgem os métodos não invasivos. Dentre estes, podem-se citar os métodos que requerem conhecimento prévio da rede [33], [34], [35], os quais são extremamente dependentes de dados detalhados da topologia e parâmetros dos sistemas, a exemplo da matriz de admitância nodal, arranjo físico, dados paramétricos da rede e das unidades de consumo. Ainda dentro do contexto dos métodos não invasivos, numa outra vertente, situam-se aqueles baseados em medições conduzidas em estruturas multibarramentos [36], [37], [38], as quais exigem uma infraestrutura complexa de medição distribuída e sincronizada por meio de *Phasor Measurement Units (PMUs)* para monitorar as grandezas elétricas em diversos ramos do sistema.

Diante desse cenário, as estratégias com maiores vantagens técnicas e práticas convergem para os métodos baseados exclusivamente em medições locais no PAC. Nessa categoria, a literatura mostra que os procedimentos considerados consistentes com a realidade física, de um modo geral, encontram-se fundamentados no Princípio da Superposição. Em consonância com este princípio, obtidas as informações necessárias, os processos de análise fornecem resultados mais precisos para a determinação da responsabilidade sobre o desequilíbrio de tensão [27], [31], [39], [40]. Todavia, como amplamente conhecido, o grande desafio reside na determinação das impedâncias de sequência negativa dos agentes supridor e consumidor, que ofereçam um grau aceitável de confiabilidade aos propósitos dos estudos. Para atender a este quesito, a literatura destaca duas abordagens relacionadas com o foco desta pesquisa, sendo o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) [41] e o Método de Análise de Componentes Independentes Complexas, do inglês *Complex Independent Component Analysis Method (MCICA)* [42], [43], [40].

Todavia, estudos que apontam fragilidades nestas técnicas destacam que o MMQ utiliza simplificações no princípio da Superposição que podem não corresponder à situação prática para a qual o método é utilizado, sobretudo na presença de cargas motrizes [44]. Já o MCICA, embora seja promissor [39], demonstra sensibilidade à quantidade de amostras de medição e instabilidade em cenários de elevada dominância de um dos agentes [45], [46], o que pode comprometer a determinação correta de responsabilidades.

É justamente nesta lacuna que este trabalho de doutorado se insere, buscando o desenvolvimento de uma metodologia que proporcione praticidade e robustez na identificação dos níveis de contribuição dos agentes.

1.5 Objetivos e contribuições da tese

Uma vez identificada a carência de um método não invasivo consolidado na literatura que demonstre robustez e eficiência em contextos práticos, este trabalho, com vistas a suprir essa lacuna, propõe uma abordagem inovadora para se obter as contribuições associadas a dois agentes (supridor e consumidor) para o nível de desequilíbrio de tensões num dado barramento de acoplamento entre as partes.

Dentro deste contexto, os trabalhos desenvolvidos nesta pesquisa contemplam os seguintes objetivos e contribuições:

- Apresentação de uma revisão crítica do estado da arte sobre a determinação de contribuições para o desequilíbrio de tensão;
- Adaptação, implementação e avaliação do desempenho de métodos não invasivos, originalmente aplicados a outros fenômenos de QEE, para o contexto de desequilíbrios;
- Proposição de um novo método não invasivo, denominado Método da Minimização da Correlação (MMC), fundamentado em premissas sólidas, para a determinação das contribuições para o desequilíbrio de tensão;
- Desenvolvimento de um método para estimação do nível de curto-circuito no PAC (parâmetro de entrada do MMC);
- Validação da metodologia proposta (MMC) por meio de avaliação computacional e experimental, comparando seu desempenho com outros métodos não invasivos existentes em termos de precisão e aplicabilidade.

1.6 Estrutura do trabalho

De acordo com o que foi apresentado, além deste capítulo introdutório, a estrutura deste trabalho é organizada da seguinte maneira:

2 – Estado da arte dos métodos para o compartilhamento da responsabilidade sobre os desequilíbrios de tensão

Neste capítulo, realiza-se uma revisão bibliográfica sobre os métodos de compartilhamento de desequilíbrio de tensão, destacando as vantagens e desvantagens das abordagens propostas na literatura. Os principais métodos não invasivos identificados são o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) e o Método de Análise de Componentes Independentes Complexas (MCICA). Enquanto o MCICA utiliza a fundamentação completa do Método da Superposição, o MMQ adota simplificações para o cálculo das parcelas de responsabilidade. Adicionalmente, são apresentadas as fundamentações teóricas do Método da Flutuação e do Método da Covariância Característica de Vetores Aleatórios (MCCVA), sendo que estes, embora concebidos originalmente para análise das distorções harmônicas, serão avaliados neste trabalho no contexto do desequilíbrio de tensão.

3 – Proposição de nova estratégia de procedimento não invasivo

O Capítulo 3 descreve a metodologia proposta nesta tese, denominada Método da Minimização da Correlação (MMC). O MMC utiliza um algoritmo de otimização, especificamente o *Particle Swarm Optimization* (PSO), para determinar as impedâncias de sequência negativa dos agentes, minimizando a correlação entre as componentes de variação rápida das fontes de corrente ($\dot{I}_{2S-fast}$ e $\dot{I}_{2C-fast}$). Essa abordagem fundamenta-se na premissa de que $\dot{I}_{2S-fast}$ e $\dot{I}_{2C-fast}$ são vetores aleatórios independentes e, portanto, não correlacionados. Para garantir a convergência e evitar valores sem coerência física, estabelece-se uma região de busca para o PSO baseada na impedância de referência (\dot{Z}_{ref}). Propõe-se, ainda, uma metodologia para determinar esse parâmetro de entrada a partir do método MCCVA, adaptado para componentes de sequência positiva.

4 - Avaliação computacional das metodologias não invasivas

Uma vez estabelecidas as metodologias, este capítulo apresenta um estudo computacional para avaliar o desempenho dos métodos frente a distintos cenários de contribuição e diferentes tipos de carga. O estudo utiliza um arranjo elétrico baseado no sistema IEEE-BTS-HCD, elaborado

pela força-tarefa do IEEE. São simuladas seis condições operacionais distintas, avaliando o desempenho dos métodos para os diferentes consumidores da rede. Os resultados são apresentados, comparados e discutidos detalhadamente.

5 – Avaliação experimental das metodologias

Nesta etapa realiza-se a aplicação das metodologias em campo por meio de uma campanha de medição de uma semana em um sistema de distribuição com o PAC alimentado em BT. Por se tratar de uma avaliação em ambiente real, fatores de influência como ruído e incertezas de medição são considerados. Os resultados dos métodos são comparados entre si e analisados em termos de precisão e convergência.

6 – Conclusões e propostas de continuidade

Esta unidade dedica-se à apresentação e discussão das principais constatações levantadas ao longo do trabalho, sintetizando as contribuições acadêmicas e sugerindo trabalhos futuros.

2 ESTADO DA ARTE DOS MÉTODOS PARA O COMPARTILHAMENTO DA RESPONSABILIDADE SOBRE OS DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO

2.1 Considerações iniciais

Alinhada com as diretrizes delineadas no Capítulo I, este capítulo dedica-se à apresentação de uma síntese dos métodos desenvolvidos e publicados na literatura, focando nas estratégias para o compartilhamento de responsabilidade sobre os desequilíbrios de tensão.

A relevância da busca de meios para a determinação das parcelas de contribuição para um dado fenômeno responsável pela perda da QEE, como já mencionado, reveste-se do sentido de proporcionar bases sólidas para diversas questões associadas a possíveis conflitos entre os agentes envolvidos, destacando-se até mesmo eventuais rateios dos valores financeiros entre as partes, quando da necessidade da implementação de medidas mitigadoras. Esta busca pela identificação das parcelas de responsabilidade justifica-se pelo fato de que o resultado final sobre um ou outro indicador de qualidade reside na interação entre diversas fontes de distúrbio advindas das áreas elétricas que concorrem para o barramento objeto das medições. Reconhecendo-se esse aspecto, e diante da necessidade da implementação de medidas mitigadoras, a quantificação das responsabilidades pelos eventos conduzirá, certamente, a um melhor entendimento entre as partes envolvidas no processo.

Neste cenário, como já mencionado, são vários os trabalhos encontrados na literatura que contemplam a matéria em pauta. Entre eles, os mais relevantes quanto aos seus princípios físicos, fundamentos matemáticos, premissas, aplicabilidade em campo e limitações próprias aos métodos, são selecionados para discussões neste capítulo.

2.2 Estratégias metodológicas existentes na literatura

Para a composição do estado da arte apresentado neste capítulo, realizou-se uma pesquisa bibliográfica na base de dados *Google Scholar*, utilizando as seguintes combinações de palavras-chave: ("*unbalance contribution*") OR ("*imbalance contribution*") OR ("*unbalance source identification*") OR ("*imbalance source identification*") OR ("*unbalance emission assessment*") OR ("*imbalance emission assessment*"). A busca foi delimitada ao período de

2014 a 2025, abrangendo publicações indexadas nos principais periódicos da área, com destaque para o *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Transactions on Power Delivery, IEEE Transactions on Power Systems, IET Generation, Transmission & Distribution, International Journal of Electrical Power & Energy Systems e Energies*. Ao todo, foram identificados 257 trabalhos e, após a leitura e análise dos mesmos, foram selecionados os 39 mais diretamente relacionados com o tema. Desses, 21 contemplam novos métodos, 5 avaliam metodologias existentes, e 13 apresentam normas e fundamentações sobre o assunto central desta tese. Destaca-se, também, que foram encontradas outras publicações no contexto da área, todavia, indiretamente relacionadas com a pesquisa. Estas estão voltadas para a estimação do nível de desequilíbrio [47], [48], [49], a avaliação dos procedimentos para a mitigação e compensação de desequilíbrio [50], [51], e ainda, a avaliação do impacto da modelagem no fator de desequilíbrio [52], [53]. Muito embora os levantamentos tenham tomado o ano de 2014 como base de referência, vale destacar que a literatura possui inúmeras outras publicações de relevância reconhecida, algumas das quais também foram incorporadas à revisão.

De um modo geral, as estratégias metodológicas encontradas para o compartilhamento de responsabilidade sobre os fenômenos de QEE são classificadas em duas grandes categorias, quais sejam os Métodos Invasivos e os Métodos não Invasivos [27], [28].

Os invasivos são aqueles que envolvem uma intervenção deliberada na operação da rede para provocar uma perturbação controlada das grandezas elétricas, podendo ocorrer de duas formas:

- Pela desconexão e reconexão de um dos agentes envolvidos na análise, cujas manobras são realizadas de forma programada para gerar condições de funcionamento do sistema em distintos instantes de medição;
- Pela inserção e retirada de um componente ou dispositivo elétrico externo à instalação, com características paramétricas desequilibradas e pré-conhecidas, programado para produzir variações dos níveis dos desequilíbrios das tensões no PAC para o sistema sob análise.

Independentemente da forma de intervenção, os processos de análise fundamentam-se na realização de medições nas condições pré e pós-perturbação programada, visando à obtenção das grandezas necessárias à determinação das parcelas de responsabilidade dos agentes [31], [32], [54].

Por outro lado, os métodos não invasivos não requerem intervenções que envolvam manobras para conexão e desconexão de componentes externos à instalação. Fundamentalmente, as estratégias inseridas neste contexto encontram-se embasadas em informações obtidas por meio de medições de tensão e corrente no PAC. Desta forma, os bancos

de dados obtidos se apresentam com características próprias à dinâmica operacional natural e intrínseca aos sistemas elétricos. Estes registros determinam um conjunto de grandezas utilizadas para subsidiar as formulações destinadas ao cálculo das parcelas de contribuição das partes [27].

Esses dois grandes grupos de procedimentos são considerados em maiores detalhes a seguir.

2.2.1 Métodos invasivos

No que tange a este processo, seguindo uma ordem cronológica, destaca-se o documento IEC/TR 61000-3-13 [30]. Este protocolo oferece uma abordagem para o compartilhamento de responsabilidade por meio da medição do fator de desequilíbrio de tensão sob duas condições de funcionamento da rede elétrica, uma relativa à condição pré-conexão de um dos agentes (via de regra a unidade consumidora) e outra correspondente ao estado após sua inserção no sistema. O fator de desequilíbrio pré-conexão ($\dot{U}_{2,pre-connection}$), medido com o denominado agente 2 desligado, é adotado como o *background unbalance*, significando a contribuição isolada do agente 1. Uma vez feita a conexão do agente 2, sua contribuição ($\dot{U}_{2,i}$) é, então, calculada pela diferença fasorial entre as grandezas que expressam os estados pós-conexão e pré-conexão ($|\dot{U}_{2,i}| = |\dot{U}_{2,post-connection} - \dot{U}_{2,pre-connection}|$). Os termos e simbologia em inglês adotados nesta descrição visam à correspondência com os fundamentos do método em pauta.

Este método, no entanto, apresenta limitações que causam expressivos impactos sobre a qualidade dos resultados obtidos. Primeiramente, são exigidas medições não simultâneas e assume-se que as condições operacionais do agente 1 permanecem inalteradas durante todo o processo de medição. Naturalmente, esta hipótese é frágil e prejudica a exatidão dos cálculos, visto que o comportamento do sistema elétrico acompanha uma dinâmica operacional que não corresponde a este pressuposto [55]. Além disso, a necessidade de realizar o desligamento completo do agente 2 torna o procedimento praticamente inviável para muitas aplicações. Trabalhos publicados e baseados no princípio ora posto ainda apontam expressivas inconsistências nos resultados obtidos, como destacado em [29], [56], [57],[44].

Avançando neste cenário, em [58] foram conduzidos trabalhos para aprimorar a abordagem da IEC introduzindo fatores de ponderação na formulação inicialmente proposta. Contudo, a dependência de medições pré e pós-conexão e a necessidade de conhecimento de parâmetros da rede continuaram a se apresentar como limitações para a prática do método.

Em [29], [56], aponta-se que definir a parcela de responsabilidade do supridor seguindo estritamente o protocolo do documento IEC/TR 61000-3-13 [30] não representa o comportamento físico esperado, uma vez que o método falha por não considerar a interação entre a corrente de carga de sequência positiva do consumidor e as assimetrias da própria rede, como as impedâncias de linha. Buscando corrigir essa falha, [29] propõe uma decomposição mais robusta do desequilíbrio no PAC em três componentes: a assimetria da carga, a assimetria da linha e o *background unbalance* da fonte. O método é aplicável exclusivamente a redes radiais e requer medições no PAC nas condições pré e pós-conexão do consumidor, além do conhecimento das impedâncias equivalentes de sequência da rede e dos parâmetros da carga. Embora represente um avanço em relação à IEC/TR 61000-3-13, o método mantém a principal desvantagem prática daquele protocolo: a necessidade de interrupção do consumidor. Adicionalmente, a exigência de conhecimento prévio e detalhado dos parâmetros da rede e da carga também limita sua aplicação.

Uma alternativa que supera a necessidade de desligamento do consumidor foi proposta em [31]. O método utiliza o chaveamento de um banco monofásico de capacitores no PAC como perturbação controlada para estimar as impedâncias de sequência negativa do supridor e do consumidor. Com as impedâncias estimadas, o Método da Superposição é aplicado para quantificar as contribuições de cada agente. Contudo, por ser um método invasivo, ele ainda apresenta desvantagens inerentes a essa categoria.

Por fim, ressalta-se que a literatura aponta que a aplicação de qualquer método invasivo é limitada devido aos efeitos adversos que pode causar na rede, como a ocorrência de transitórios de chaveamento. Esses fenômenos representam um risco aos equipamentos e tornam a aplicação do método complexa e indesejável, especialmente em redes de média e alta tensão [28], [32].

A Tabela 1 apresenta uma síntese dos métodos invasivos discutidos, incluindo apenas aqueles que propõem efetivamente uma metodologia para o compartilhamento de responsabilidade, em ordem cronológica.

Tabela 1. Síntese dos métodos invasivos para determinação das contribuições de desequilíbrio.

Referência	Ano de publicação	Necessita de medições distribuídas?	Necessita de informações prévias?	Premissa do Método
[30]	2008	Não. Apenas no PAC.	Não.	Contribuição do Consumidor é a diferença vetorial do FD (pós - pré-conexão). Apresenta inconsistências.
[29]	2013	Não. Apenas no PAC.	Sim. Parâmetros detalhados da rede e da carga.	Aplicável apenas a redes radiais. Evolução do método IEC/TR 61000-3-13. Decompõe o FD em três parcelas: carga, linha e <i>background</i> da fonte.
[58]	2015	Não. Apenas no PAC.	Sim. Parâmetros da rede.	Aprimora o IEC/TR 61000-3-13 com fatores de ponderação para redes radiais. Mantém dependência de medições pré e pós-conexão.
[31]	2020	Não. Apenas no PAC.	Não.	Baseia-se no Método da Superposição. Estima impedâncias do supridor e do consumidor via chaveamento de um capacitor monofásico no PAC.

Fonte: Autoria própria.

2.2.2 Métodos não invasivos

Os métodos não invasivos, ou seja, aqueles que não requerem intervenções na rede, podem ser subdivididos em três grupos:

- **Grupo I:** Métodos fundamentados em medições no PAC que requerem o conhecimento prévio dos parâmetros da rede;
- **Grupo II:** Métodos baseados em medições distribuídas (multibarramentos);
- **Grupo III:** Métodos que utilizam exclusivamente medições de tensão e corrente no PAC, sem requerer nenhuma informação prévia da rede.

Enquadrados no grupo I, como dito, encontram-se os procedimentos embasados em medições feitas no PAC, mas que requerem um conhecimento detalhado da rede elétrica para sua aplicação. Neste contexto, destaca-se a abordagem proposta em [33], a qual se fundamenta

nos equacionamentos desenvolvidos em [29], com a vantagem de não necessitar da desconexão do consumidor. Contudo, para sua aplicação é necessário o conhecimento da matriz de admitância nodal do sistema, o que configura uma limitação prática relevante. Em [34], os mesmos autores complementaram essa abordagem com a introdução dos conceitos de Coeficiente de Transferência e Coeficiente de Influência, permitindo uma avaliação mais precisa da propagação do desequilíbrio nos demais barramentos da rede.

Ainda neste contexto, o trabalho [59] apresenta formulações para decompor o FDv no ponto de carga de sistemas radiais nas contribuições individuais da fonte, da linha e da carga, contemplando cargas passivas, motrizes e mistas. Contudo, além de ser restrito a redes radiais, a aplicação requer o conhecimento prévio das impedâncias de sequência da linha e dos parâmetros das cargas, informações raramente disponíveis com a precisão necessária em sistemas reais, o que limita sua aplicabilidade prática.

Outra estratégia foi proposta em [35], a qual quantifica a contribuição de cada agente comparando o FD real medido no PAC com os FDs teóricos estimados que seriam causados individualmente pelo supridor e pelo consumidor. A aplicação deste método também é complexa, pois requer o conhecimento do nível de curto-circuito e o comportamento detalhado da carga do consumidor, incluindo a composição de motores, cargas passivas e demais elementos.

Nesta mesma categoria, insere-se a abordagem proposta em [60], destinada a redes trifásicas a três fios, na qual o modelo formulado no domínio de fase é decomposto em partes perturbadoras e não perturbadoras, sendo então transformado no domínio das componentes simétricas. A contribuição de cada agente é calculada como o produto de sua corrente nodal de sequência negativa por um parâmetro definido como coeficiente de proporcionalidade de sequência negativa do PAC. Versões preliminares e análises de acurácia desta metodologia foram apresentadas pelos mesmos autores em trabalhos anteriores [61], [62], [63], nos quais se demonstra que o método mantém erros aceitáveis mesmo sob incertezas nos parâmetros da rede. Contudo, em todas as suas versões, o método requer o conhecimento prévio da configuração física e das especificações técnicas dos componentes da instalação a montante, o que restringe sua aplicabilidade prática.

Ainda neste escopo, insere-se o procedimento mais promissor entre as abordagens não invasivas, o qual é conhecido como Método da Superposição [64]. Originalmente desenvolvido para a análise do compartilhamento de responsabilidade sobre as distorções harmônicas, este método utiliza conceitos clássicos da teoria de circuitos para calcular as contribuições dos agentes para o distúrbio total no PAC, tendo sido posteriormente adaptado e aplicado com

sucesso na avaliação de desequilíbrios de tensão, como indicado em [31], [57]. Para sua aplicação, são necessárias as tensões e correntes no PAC, além das impedâncias de sequência negativa do supridor e do consumidor. Diversos estudos atestam sua eficácia e a consistência física dos resultados [44], [57], [65], [66], [67].

Quanto à aplicação prática do Método da Superposição, esta possui uma dificuldade de grande relevância, haja vista que exige o conhecimento prévio das impedâncias de sequência negativa do supridor (\dot{Z}_{2S}) e do consumidor (\dot{Z}_{2C}), parâmetros esses essenciais para a exatidão dos resultados do compartilhamento. A obtenção desses parâmetros não é uma tarefa fácil, visto que tais grandezas podem apresentar um comportamento com expressiva dinâmica devido às mudanças ocorridas nos sistemas a montante e a jusante do PAC. Assim, não obstante o reconhecimento dos princípios sólidos das propostas aqui ressaltadas, suas aplicações ficam prejudicadas em termos práticos [68].

A Tabela 2 apresenta uma síntese dos métodos do Grupo I, em ordem cronológica, incluindo apenas aqueles que propõem efetivamente uma metodologia para o compartilhamento de responsabilidade sobre os desequilíbrios de tensão.

Tabela 2. Síntese dos métodos não invasivos do Grupo I para determinação das contribuições de desequilíbrio.

Referência	Ano de publicação	Necessita de medições distribuídas?	Necessita de informações prévias?	Premissa do Método
[33]	2013	Não. Apenas no PAC.	Sim. Matriz de admitância nodal do sistema e parâmetros da carga.	Utiliza os conceitos teóricos definidos em [29], sem necessitar da desconexão do consumidor. Aplicável a redes interconectadas.
[34]	2015	Não. Apenas no PAC.	Sim. Matriz de admitância nodal do sistema e parâmetros da carga.	Complementa [33] com os conceitos de Coeficiente de Transferência e Coeficiente de Influência para avaliar a propagação do desequilíbrio na rede.
[59]	2015	Não. Apenas no PAC.	Sim. Impedâncias de sequência da linha e parâmetros das cargas.	Aplicável exclusivamente a sistemas radiais trifásicos. Decompõe o FDv nas contribuições da fonte, da linha assimétrica e da carga (passiva, motriz ou composta).

[35]	2018	Não. Apenas no PAC.	Sim. Necessário conhecer o nível de curto-circuito, e os parâmetros detalhados do consumidor.	Compara FD medido (real) com 2 FDs teóricos (100% supridor, 100% consumidor).
[60]	2020	Não. Apenas no PAC.	Sim. Configuração física da rede e especificações técnicas dos componentes (linhas, cabos, transformadores).	Destinado a redes trifásicas a três fios. Formulado no domínio de fase, decomposto em partes perturbadoras e não perturbadoras e transformado para componentes simétricas. Trabalhos complementares: [61], [62], [63].
[64]	2000*	Não. Apenas no PAC.	Sim. Impedâncias de sequência negativa do supridor e do consumidor.	Método da Superposição, originalmente proposto para harmônicos e adaptado para desequilíbrios em [31], [57]. Considerado o mais promissor do Grupo I, mas dependente de parâmetros prévios da rede.

**Ano de publicação original do método, voltado à análise harmônica. Aplicações ao contexto de desequilíbrio de tensão foram desenvolvidas posteriormente [31], [57].*

Fonte: Autoria própria.

No grupo II dos métodos não invasivos, têm-se os procedimentos que utilizam medições sincronizadas em múltiplos pontos da rede para identificar as fontes de desequilíbrio.

Em [36] é feita uma proposição para a estimativa das contribuições da fonte, linhas e cargas em sistemas radiais. O procedimento utiliza a teoria de circuitos com componentes de sequência para separar as contribuições individuais dos elementos, exigindo, para tanto, os parâmetros de sequência de todos os componentes da rede (linhas, cabos e transformadores), bem como os dados de fluxo de potência e as correntes de todas as cargas do sistema.

Na continuidade dos desenvolvimentos, [69] contempla a proposição de um índice de medição distribuída para identificação das fontes de distorção harmônica e de desequilíbrio, fundamentado na decomposição da potência aparente segundo a IEEE Std. 1459, com validação experimental em plataforma de baixa tensão. O método, contudo, é voltado à identificação do agente predominantemente perturbador, sem quantificar as parcelas individuais de responsabilidade entre supridor e consumidor, o que o situa fora do escopo de compartilhamento de responsabilidade tratado nesta tese.

Já em [37] estabelece-se um processo que utiliza medições fasoriais (PMUs) do fluxo de potência aparente de sequência negativa nos diversos ramos do sistema. O objetivo é quantificar a influência de cada carga desequilibrada por meio de um algoritmo de decomposição vetorial, com vistas à definição dos melhores locais para implementação de medidas de mitigação. Entretanto, a metodologia apresenta uma forte dependência do conhecimento da topologia da rede para a definição dos caminhos de fluxo, o que dificulta sua aplicação em sistemas sujeitos a reconfigurações dinâmicas da rede.

Numa perspectiva econômica, o trabalho [70] propõe um mecanismo de alocação tarifária que converte as contribuições ao desequilíbrio em compensações financeiras entre os agentes de uma rede de baixa tensão, com base nos valores de *Shapley* como critério de alocação. O método requer o conhecimento das potências em todos os barramentos e dos parâmetros da rede, além de apresentar erro individual significativo nos casos de grandes desvios de carregamento.

Mais recentemente, em [38] é apresentada uma contribuição cuja principal vantagem é não exigir o conhecimento detalhado dos parâmetros de impedância da rede. Para tanto, o algoritmo utiliza apenas as medições de FDv dos medidores distribuídos e o conhecimento da topologia radial da rede (a matriz ramo-nó). Apesar de inovadora, esta abordagem possui limitações práticas consideráveis, pois é restrita a sistemas radiais (não sendo aplicável a redes em anel) e depende do conhecimento prévio da topologia, informação nem sempre disponível ou atualizada em sistemas de distribuição, sobretudo em BT.

Com base no exposto, muito embora os métodos fundamentados na análise multibarramento ofereçam resultados para as contribuições do desequilíbrio de tensão, estes apresentam grandes desafios para a implementação prática. A limitação comum a este grupo reside na exigência de uma extensa infraestrutura de medição distribuída e sincronizada, o que inviabiliza muitas aplicações reais.

A Tabela 3 apresenta uma síntese dos métodos do Grupo II, em ordem cronológica.

Tabela 3. Síntese dos métodos não invasivos do Grupo II para determinação das contribuições de desequilíbrio.

Referência	Ano de publicação	Necessita de medições distribuídas?	Necessita de informações prévias?	Premissa do Método
[36]	2018	Sim. Medições no PAC e nas correntes em todas as cargas do sistema.	Sim. Parâmetros de sequência de todos os componentes da rede.	Utiliza teoria de circuitos com componentes de sequência para separar as contribuições da fonte, das linhas e das cargas em sistemas radiais.
[69]	2019	Sim. Medições simultâneas em todos os consumidores conectados ao PAC.	Não.	Propõe índice baseado na decomposição da potência aparente segundo a IEEE Std. 1459. Voltado à identificação do agente predominante; não quantifica as parcelas individuais de responsabilidade.
[37]	2020	Sim. Medições fasoriais (V e I) síncronas em todos os ramos e cargas.	Não.	Utiliza decomposição vetorial da potência aparente de sequência negativa para quantificar a influência de cada carga. Voltado à identificação e à localização das fontes predominantes.
[70]	2020	Sim. Potências em todos os barramentos.	Sim. Parâmetros da rede para composição da matriz Jacobiana.	Utiliza valores de Shapley para alocação financeira do custo do desequilíbrio entre consumidores. Propõe método aproximado por sensibilidades do FDv para redução do custo computacional. Aplicável a redes de baixa tensão.
[38]	2023	Sim. Medição do FDv em múltiplas barras, mas não exige medição em todas as barras.	Sim. Topologia radial da rede (matriz ramo-nó). Não exige impedâncias.	Aplicável apenas a redes radiais. Calcula contribuições a montante e a jusante em cada barra utilizando a topologia (matriz ramo-nó) e os FDv medidos.

Fonte: Autoria própria.

Por fim, tem-se o grupo III, focado em procedimentos fundamentados em medições das tensões e correntes no PAC, buscando contornar a necessidade de conhecimento de parâmetros prévios ou de medições em vários pontos do sistema.

Uma das primeiras propostas neste cenário foi o Método da Corrente Conforme e Não Conforme (MCCNC) [71]. Este assume que a corrente drenada por um agente a jusante

(consumidor) do PAC pode ser decomposta em duas parcelas: uma delas sendo a Corrente Conforme, que reproduz o mesmo padrão de comportamento da tensão de alimentação e que representa as contribuições do agente a montante (supridor) e, uma segunda parcela, associada ao desequilíbrio causado pelo agente a jusante, denominada Corrente Não Conforme. Embora esse método tenha mostrado resultados adequados para consumidores com cargas passivas [72], na presença de cargas motrizes o método apresenta inconsistências [31], [65].

Em [73] é apresentado um procedimento que utiliza a teoria do fluxo de potência associada às tensões e correntes de sequência negativa para determinar o principal responsável pelo desequilíbrio de tensão no PAC. Os autores propõem que o sinal da potência ativa de sequência negativa está diretamente relacionado à origem do desequilíbrio. Uma grande limitação deste procedimento é que o mesmo não se presta ao compartilhamento das responsabilidades, mas apenas à determinação da fonte predominante do distúrbio em análise. Além disso, pesquisas subsequentes [74], [75] indicaram limitações e incongruências na capacidade deste método de identificar o principal agente causador do desequilíbrio.

Numa outra vertente, o trabalho apresentado em [76] propõe um método de divisão de responsabilidade fundamentado no Método da Superposição Completo, no qual a impedância do consumidor é aproximada pela sua impedância de sequência positiva e a impedância do supridor é obtida a partir de parâmetros prévios da rede, tais como a impedância do transformador e o nível de curto-circuito do sistema. O trabalho propõe ainda um sistema multi-índice para o cálculo das parcelas de responsabilidade, estendendo os resultados a um esquema de penalização e bonificação tarifária proporcional à responsabilidade apurada de cada agente. Contudo, a aproximação da impedância de sequência negativa do consumidor pela sua impedância de sequência positiva é reconhecidamente inadequada na presença de cargas motrizes e conversores eletrônicos, nos quais estas grandezas são intrinsecamente distintas. Somam-se a isso a necessidade de conhecimento de parâmetros prévios da rede e a premissa de que os parâmetros dos agentes permanecem constantes ao longo do período de análise, condição que, como amplamente discutido na literatura, dificilmente se verifica em situações reais de operação.

Em uma perspectiva mais recente, o trabalho [77] propõe um método baseado em aprendizado de máquina para localização da fonte dominante de desequilíbrio. Com base em dados amostrados no PAC, os graus de contribuição do supridor e consumidor são calculados via Método da Superposição, com os parâmetros equivalentes da linha estimados a partir de dois instantes consecutivos de amostragem. Uma rede neural profunda (DBN), otimizada pelo algoritmo CSO, é treinada para mapear esses dados à fonte predominante. Embora dispense

parâmetros prévios da rede, o método depende de base de dados histórica específica para cada sistema e é voltado à localização da fonte dominante, sem quantificar as parcelas de responsabilidade entre os agentes.

Diante das limitações expostas, surgiram, então, métodos para viabilizar a aplicação do Método da Superposição utilizando apenas dados medidos no PAC, ou seja, apoiando-se no desenvolvimento de algoritmos capazes de estimar as impedâncias de sequência negativa matematicamente, sem a necessidade de conhecimento prévio de informações topológicas e paramétricas da rede. Neste cenário, consolidaram-se duas metodologias principais: o MMQ e o MCICA.

O MMQ, proposto em [41], fundamenta-se na premissa do Método da Superposição Simplificado. Essa abordagem assume que a impedância de sequência negativa do consumidor pode ser desconsiderada. Este pressuposto se apoia no fato de que, na associação em paralelo das impedâncias do supridor e consumidor, a magnitude de \dot{Z}_{2S} é, geralmente, ao menos 10 vezes menor que a do consumidor (\dot{Z}_{2C}). Portanto, a impedância equivalente resultante se aproxima da própria impedância do supridor. Para isso, aplica-se o algoritmo de Mínimos Quadrados sobre um conjunto de amostras, considerando os parâmetros do supridor constantes. O trabalho [78] expande essa análise, apresentando um procedimento adicional para situações em que o consumidor é composto de múltiplas fontes concentradas, permitindo calcular as parcelas individuais de desequilíbrio de cada um dos diferentes alimentadores ou cargas a jusante do PAC.

Por outro lado, o MCICA aplica o Método da Superposição Completo. Diferentemente do MMQ, esta metodologia não requer simplificações nas equações fundamentais, exigindo a estimação de ambas as impedâncias (\dot{Z}_{2S} e \dot{Z}_{2C}). Para atender a este propósito, o método emprega técnicas estatísticas de Separação Cega de Fontes, do inglês *Blind Source Separation* (BSS), especificamente a Análise de Componentes Independentes Complexas, do inglês *Complex Independent Component Analysis* (CICA) [40], [42], [43]. De acordo com os fundamentos da técnica CICA, há, todavia, necessidade de que as fontes de corrente de sequência negativa do supridor e do consumidor sejam estatisticamente independentes e que possuam uma distribuição de probabilidade não gaussiana. Diferentes algoritmos CICA foram propostos na literatura para resolver esse problema, a exemplo da Análise de Componentes Independentes Robusta, do inglês *Robust Independent Component Analysis* (RICA) [42], da combinação da RICA com a Análise de Componentes Esparsas, do inglês *Sparse Component*

Analysis (SCA) [43] e da Maximização Complexa Adaptativa da Não-Gaussianidade, do inglês *Adaptive Complex Maximization of non-Gaussianity* (A-CMN) [40].

Embora trabalhos demonstrem que as abordagens baseadas em CICA apresentam resultados adequados [39], [79], sua aplicação pode acarretar imprecisões significativas em cenários de elevada dominância de um dos agentes ou quando a base de dados dispõe de um número reduzido de amostras de medição [27], [45]. Em [40], [42], [43] são empregados diferentes algoritmos (RICA, RICA-SCA e A-CMN) para determinação das impedâncias dos agentes. No entanto, estudos comparativos [79], [80] indicam que o algoritmo *FastICA* é o mais preciso e robusto. Por esta razão, o *FastICA* é o algoritmo adotado nesta tese para representar a abordagem MCICA.

A Tabela 4 apresenta uma síntese dos métodos do Grupo III discutidos, em ordem cronológica.

Tabela 4. Síntese dos métodos não invasivos do Grupo III para determinação das contribuições de desequilíbrio.

Referência	Ano de publicação	Necessita de medições distribuídas?	Necessita de informações prévias?	Premissa do Método
[71]	1998	Não. Apenas no PAC.	Não.	Decompõe corrente no PAC em Conforme (supridor) e Não Conforme (consumidor). Trabalhos apontam resultados incoerentes.
[73]	2010	Não. Apenas no PAC.	Não.	Utiliza o sinal da potência ativa de sequência negativa para identificar o agente dominante. Voltado à identificação do principal contribuinte, não ao compartilhamento quantitativo. Trabalhos apontam resultados incoerentes.
[41]	2015	Não. Apenas no PAC.	Não.	Utiliza as equações do Método da Superposição Simplificado (ignora \dot{Z}_{2C}). Estima \dot{Z}_{2S} via Mínimos Quadrados (MQ).
[78]	2017	Sim. Medições no PAC e nos alimentadores a jusante.	Não.	Expansão de [41]. Decompõe a contribuição do consumidor por alimentador, quando composto de múltiplas fontes concentradas.

[42]	2019	Não. Apenas no PAC.	Não.	Método da Superposição Completo com CICA. Estima \dot{Z}_{2S} e \dot{Z}_{2C} via algoritmo RICA.
[76]	2020	Não. Apenas no PAC.	Sim. Impedância do transformador e nível de curto-circuito do sistema (supridor).	Utiliza o Método da Superposição Completo. Estima \dot{Z}_{2S} a partir de parâmetros prévios da rede e aproxima \dot{Z}_{2C} pela impedância de sequência positiva do consumidor. Assume parâmetros constantes.
[43]	2020	Não. Apenas no PAC.	Não.	Utiliza as equações do Método da Superposição Completo com CICA. Estima \dot{Z}_{2S} e \dot{Z}_{2C} via algoritmo RICA combinado com SCA.
[77]	2021	Não. Apenas no PAC.	Não.	Utiliza o Método da Superposição para calcular os graus de contribuição. Uma rede neural profunda (DBN), otimizada pelo algoritmo CSO, mapeia os dados para localização da fonte dominante. Não determina o compartilhamento quantitativo.
[40]	2022	Não. Apenas no PAC.	Não.	Método da Superposição Completo com CICA. Estima \dot{Z}_{2S} e \dot{Z}_{2C} via <i>A-CMN</i> .

Fonte: Autoria própria.

Diante do panorama apresentado, é possível estabelecer um critério de seleção entre as abordagens revisadas. Os métodos invasivos, apesar de suas contribuições teóricas, são inviáveis para aplicação em campo em razão dos riscos operacionais associados aos transitórios de chaveamento e às exigências de interrupção do sistema. Entre os métodos não invasivos, os do Grupo I são desconsiderados pela dependência de parâmetros detalhados da rede, raramente disponíveis com a precisão necessária em sistemas reais, enquanto os do Grupo II são descartados pela exigência de uma infraestrutura de medição distribuída e sincronizada, igualmente restritiva na prática. No Grupo III, parte dos métodos apresenta resultados inadequados ou é fundamentada em premissas reconhecidamente incoerentes para determinadas condições operacionais, enquanto outros se limitam à identificação do agente dominante, sem quantificar as parcelas individuais de responsabilidade. Consta-se, portanto, que o MMQ e as abordagens baseadas na técnica CICA se destacam como as mais robustas e aplicáveis, dentre os algoritmos CICA investigados na literatura, o *FastICA* demonstra maior consistência e melhor convergência.

Com base nos fundamentos apresentados, os desenvolvimentos descritos na sequência estão centrados no Método da Superposição Completo (que utiliza as impedâncias do consumidor e do supridor), servindo de base para a aplicação do método MCICA. Na sequência, são discutidas as premissas e o equacionamentos do Método da Superposição Simplificado (que utiliza apenas a impedância do supridor). Sob esta segunda vertente, além do tradicional MMQ, são apresentados o Método da Flutuação e o MCCVA. Originalmente empregados para a determinação de impedâncias harmônicas, a adaptação destes dois últimos procedimentos para a análise de compartilhamento de desequilíbrios de tensão configura-se como uma contribuição original desta tese.

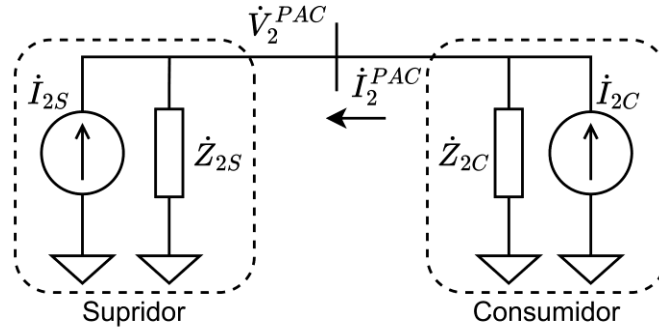
2.3 Fundamentos do Método da Superposição

Originalmente, o Método da Superposição [81], [82], dentro da área da QEE, foi aplicado para a determinação das parcelas de responsabilidade entre os agentes envolvidos na temática das distorções harmônicas. Contudo, pesquisas subsequentes revelaram a viabilidade de sua aplicação para os indicadores de desequilíbrios de tensão [31], [83].

Quanto aos princípios metodológicos e aplicativos que regem a estratégia da superposição, o método consiste em quantificar, em termos percentuais, a contribuição de cada agente (supridor e consumidor) para o desequilíbrio total observado no PAC [31], [42], [84]. Diversos estudos demonstraram que, não obstante os desafios associados à obtenção dos parâmetros requeridos quanto às impedâncias equivalentes, uma vez contornados estes aspectos, dentre os procedimentos existentes, o princípio da Superposição possui eficácia e propriedades que oferecem resultados consistentes com a realidade física esperada [44], [57], [65].

Em termos conceituais, quando dois agentes integram uma rede elétrica, de acordo com fundamentos clássicos da teoria de circuitos, é possível representar cada unidade por um equivalente de Norton, como ilustrado na Figura 3. É importante ressaltar que, considerando a análise voltada aos desequilíbrios, os circuitos equivalentes a serem tratados devem ser considerados à base de seus equivalentes de sequência negativa. Neste contexto, \dot{I}_{2S} e \dot{I}_{2C} simbolizam as fontes de corrente de sequência negativa associadas ao supridor e ao consumidor, respectivamente, enquanto \dot{Z}_{2S} e \dot{Z}_{2C} representam as respectivas impedâncias de sequência negativa. A interação dessas variáveis do supridor e do consumidor resulta em uma determinada tensão de sequência negativa (\dot{V}_2^{PAC}) e uma corrente de sequência negativa (\dot{I}_2^{PAC}) no PAC.

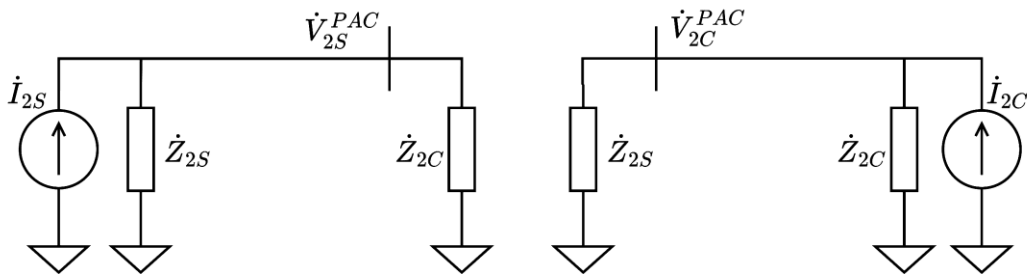
Figura 3 – Circuito equivalente de Norton representativo dos agentes 1 e 2 (supridor e consumidor) conectados ao PAC.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 4, por sua vez, sintetiza o processo de aplicação do Teorema da Superposição, conforme estabelece a concepção básica da metodologia. A partir deste arranjo pode-se determinar a tensão de responsabilidade atribuída ao agente supridor (\dot{V}_{2S}^{PAC}) e ao consumidor (\dot{V}_{2C}^{PAC}), conforme (1) e (2), respectivamente.

Figura 4 – Circuito equivalente de Norton representando as contribuições individuais do supridor e do consumidor.



Fonte: Autoria própria.

$$\dot{V}_{2S}^{PAC} = \frac{\dot{Z}_{2S} \cdot \dot{Z}_{2C}}{\dot{Z}_{2S} + \dot{Z}_{2C}} \cdot \dot{I}_{2S} \quad (1)$$

$$\dot{V}_{2C}^{PAC} = \frac{\dot{Z}_{2S} \cdot \dot{Z}_{2C}}{\dot{Z}_{2S} + \dot{Z}_{2C}} \cdot \dot{I}_{2C} \quad (2)$$

A composição fasorial da tensão de responsabilidade do supridor e do consumidor resulta na tensão total medida no PAC, conforme (3).

$$\dot{V}_2^{PAC} = \dot{V}_{2S}^{PAC} + \dot{V}_{2C}^{PAC} \quad (3)$$

Alternativamente, utilizando as equações advindas do circuito da Figura 4, é possível reescrever as tensões de responsabilidade conforme (4) e (5).

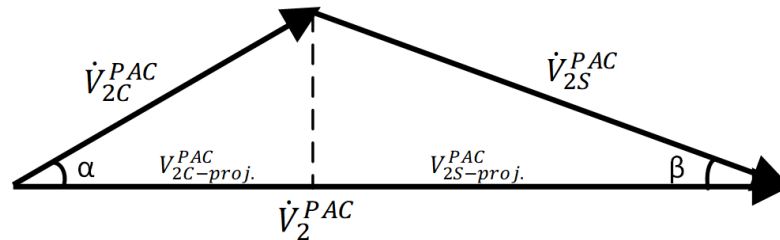
$$\dot{V}_{2S}^{PAC} = \frac{\dot{Z}_{2S} \cdot \dot{Z}_{2C}}{\dot{Z}_{2S} + \dot{Z}_{2C}} \cdot \left(\frac{\dot{V}_2^{PAC}}{\dot{Z}_{2S}} - \dot{i}_2^{PAC} \right) \quad (4)$$

$$\dot{V}_{2C}^{PAC} = \frac{\dot{Z}_{2S} \cdot \dot{Z}_{2C}}{\dot{Z}_{2S} + \dot{Z}_{2C}} \cdot \left(\frac{\dot{V}_2^{PAC}}{\dot{Z}_{2C}} + \dot{i}_2^{PAC} \right) \quad (5)$$

Nos termos acima expostos, nota-se que, para a aplicação do Método da Superposição são necessários registros de tensão e corrente de sequência negativa no PAC, bem como o conhecimento das impedâncias de sequência negativa de ambos os agentes envolvidos.

As parcelas de responsabilidade de cada agente ($PR\%_S$ e $PR\%_C$) podem ser, então, determinadas projetando \dot{V}_{2S}^{PAC} e \dot{V}_{2C}^{PAC} sobre \dot{V}_2^{PAC} , conforme indicado na Figura 5 e expresso em (6) e (7).

Figura 5 – Diagrama fasorial das tensões de sequência negativa e respectivas projeções.



Fonte: Autoria própria.

$$PR\%_S = \frac{V_{2S}^{PAC-proj.}}{|\dot{V}_2^{PAC}|} \cdot 100 = \frac{|\dot{V}_{2S}^{PAC}| \cdot \cos \beta}{|\dot{V}_2^{PAC}|} \cdot 100 \quad (6)$$

$$PR\%_C = \frac{V_{2C}^{PAC-proj.}}{|\dot{V}_2^{PAC}|} \cdot 100 = \frac{|\dot{V}_{2C}^{PAC}| \cdot \cos \alpha}{|\dot{V}_2^{PAC}|} \cdot 100 \quad (7)$$

Cabe, novamente, reconhecer que a dificuldade inerente ao uso prático desse método está no conhecimento das impedâncias de sequência negativa dos agentes. É precisamente este o desafio que os métodos não invasivos mais promissores buscam resolver utilizando as duas estratégias já mencionadas, a saber:

- Método da Superposição Completo (conforme equacionamento apresentado nesta seção, com estimação de ambas as impedâncias, \dot{Z}_{2S} e \dot{Z}_{2C});
- Método da Superposição Simplificado (com estimação apenas de \dot{Z}_{2S}).

2.4 Abordagem baseada no Método da Superposição Completo

Utilizando como referência o Método da Superposição, o Método de Análise de Componentes Independentes Complexas, do inglês, *Complex Independent Component Analysis* (MCICA) [84], [85] destaca-se por sua capacidade de determinar tanto a impedância de sequência negativa do supridor quanto a do consumidor. Com base em conceitos estatísticos e características inerentes dos sinais elétricos, o MCICA tem evidenciado eficácia na determinação dos parâmetros requeridos.

2.4.1 Estimação via Método de Análise de Componentes Independentes Complexas (MCICA)

Na sequência, são apresentados os fundamentos da técnica CICA, sua aplicação no compartilhamento dos desequilíbrios de tensão e o fluxograma para aplicação.

2.4.1.1 Fundamentos da técnica CICA

A CICA é uma técnica de Separação Cega de Fontes, do inglês, *Blind Source Separation* (BSS) amplamente utilizada em processamento de sinais e reconhecimento de padrões. Seu principal objetivo é recuperar sinais originais a partir de misturas, sem o conhecimento prévio sobre as fontes ou o processo de mistura [86].

O modelo matemático utilizado para solução de problemas relacionados à CICA está descrito em (8), no qual os sinais observados (X) são expressos por meio da combinação linear dos sinais das fontes (S).

$$X(t) = A.S(t) \quad (8)$$

Na expressão acima: t representa o tempo discreto ($t = 1, 2, \dots, N$), $S(t) = [S_1(t), S_2(t), \dots, S_n(t)]^T$ é a matriz de dimensão $n \times N$, que contém os sinais das fontes, também denominados de componentes independentes; $X(t) = [X_1(t), X_2(t), \dots, X_m(t)]^T$ é a matriz de dimensão $m \times N$ com os sinais observados e; A é uma matriz de mistura desconhecida de ordem $m \times n$.

O objetivo da técnica CICA é estimar a matriz de misturas (A) tendo como dado de entrada apenas os sinais observados (X), possibilitando, assim, recuperar os sinais das fontes estimados (S). Para a aplicação da técnica CICA, algumas premissas devem ser satisfeitas [86], [87]:

- I. No máximo, um dos sinais das fontes da matriz S pode ter distribuição gaussiana;
- II. Os sinais das fontes devem ser estatisticamente independentes;
- III. O número de sinais observados deve ser maior ou igual ao número de fontes que são recuperadas ($m \geq n$).

Utilizando a técnica CICA e conhecendo o vetor de sinais observados (X), determina-se a matriz de separação W^H (estimativa da inversa da matriz A), tornando possível recuperar os sinais das fontes, conforme (9). Para isso, a técnica baseia-se em propriedades estatísticas, buscando uma solução mediante a maximização da não-gaussianidade e da independência dos sinais das fontes.

$$\hat{S} = W^H \cdot X \quad (9)$$

Onde: \hat{S} é uma estimativa da matriz dos sinais das fontes; W^H é a matriz de separação estimada; e o superíndice H denota a transposta conjugada de W .

Contudo, é fundamental notar que, por ser uma abordagem estatística, o desempenho do MCICA é altamente dependente da qualidade e da quantidade dos dados de entrada. Conforme apontado na Seção 2.2, a técnica CICA pode resultar em valores inconsistentes para as impedâncias, sobretudo quando o número de amostras da medição é reduzido. Esta sensibilidade é uma desvantagem técnica que será considerada nas avaliações desta tese.

É importante ressaltar que a CICA é uma técnica que define o problema, mas a solução depende de um algoritmo numérico específico. A literatura [88] apresentou uma diversidade de algoritmos, incluindo os já mencionados (RICA, RICA-SCA, A-CMN) e outros bem estabelecidos, como o *Joint approximate diagonalization of eigenmatrices* (JADE), *Second-Order Blind Identification* (SOBI) e FastICA. Dentre as várias técnicas existentes, o FastICA foi o algoritmo selecionado para este trabalho. Esta escolha fundamentou-se em análises comparativas, como as realizadas em [89], [90]. Embora esses estudos tenham sido aplicados ao compartilhamento de harmônicos, eles utilizaram a mesma modelagem (Método da Superposição) e indicaram que o FastICA se destacou por apresentar um desempenho superior, evidenciando maior consistência e menores taxas de erro em relação aos demais algoritmos. Além disso, o FastICA é um dos algoritmos mais difundidos e utilizados em aplicações de engenharia [91].

Importa ressaltar que o FastICA foi originalmente desenvolvido para sinais contendo números reais [92]. Posteriormente, adaptou-se o algoritmo para o tratamento de sinais complexos [93], que é a versão necessária e utilizada para este problema de compartilhamento de responsabilidades, visto que as grandezas de interesse são fasoriais.

A proposta do FastICA consiste basicamente em maximizar a não-gaussianidade dos sinais observados através da aplicação da teoria de iteração do ponto-fixo, usando como função objetivo uma aproximação da negentropia. Destaca-se que o desenvolvimento e a aplicação do FastICA neste trabalho são baseados na referência [90].

Antes da aplicação do algoritmo FastICA, é necessário um pré-processamento de dados para simplificação e otimização do problema [92]. Na primeira etapa, denominada Centralização, os sinais observados devem apresentar média igual a zero, como indicado em (10).

$$X_i'(t) = X_i(t) - \frac{1}{k} \sum_{t=1}^N X_i(t) \quad (10)$$

A segunda fase é o branqueamento, o qual visa descorrelacionar e ajustar o valor da variância dos dados para que se torne unitária, como indicado por meio da transformação linear apresentada em (11).

$$\tilde{X}(t) = Q \cdot X'(t) \quad (11)$$

$$Q = \Lambda^{-\frac{1}{2}} \cdot \Gamma^T \quad (12)$$

Sendo: $\tilde{X}(t)$ a matriz com os sinais observados branqueados; Q a matriz de branqueamento; Λ a matriz diagonal de autovalores de $E\{\mathbf{X}\mathbf{X}^H\}$, e; Γ a matriz ortogonal de autovetores de $E\{\mathbf{X}\mathbf{X}^H\}$, onde o símbolo E representa a esperança matemática.

Com os sinais observados branqueados $\tilde{X}(t)$, aplica-se o algoritmo FastICA para estimar a matriz W^H . Na sequência, os sinais de fonte podem ser determinados a partir de (13) e (14).

$$\hat{S} = U \cdot X \quad (13)$$

$$U = W^H \cdot Q \quad (14)$$

Por fim, vale mencionar que o algoritmo FastICA está integralmente disponível em diferentes linguagens de programação na referência [94].

2.4.1.2 Aplicação da Técnica CICA no Compartilhamento dos Desequilíbrios de Tensão

Considerando o modelo equivalente de Norton, representando o barramento de conexão entre os agentes (supridor e consumidor), em um período de medição com N amostras, chega-se à seguinte equação matricial:

$$M_{PAC} = Z \cdot I \quad (15)$$

Na expressão acima a matriz M_{PAC} contém as medidas elétricas (tensões e correntes de sequência negativa no PAC) ao longo do período de medição, conforme estabelecido em (16); a matriz Z representa a combinação das impedâncias de sequência negativa das partes, como indicado em (17); e a matriz I contém as correntes de sequência negativa do supridor e do consumidor ao longo do mesmo intervalo, conforme (18).

$$M_{PAC(2 \times N)} = \begin{bmatrix} \dot{V}_2^{PAC}(t_1) & \dot{V}_2^{PAC}(t_2) & \dots & \dot{V}_2^{PAC}(t_N) \\ \dot{i}_2^{PAC}(t_1) & \dot{i}_2^{PAC}(t_2) & \dots & \dot{i}_2^{PAC}(t_N) \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$Z_{(2 \times 2)} = \begin{bmatrix} \frac{\dot{Z}_{2S} \cdot \dot{Z}_{2C}}{\dot{Z}_{2S} + \dot{Z}_{2C}} & \frac{\dot{Z}_{2S} \cdot \dot{Z}_{2C}}{\dot{Z}_{2S} + \dot{Z}_{2C}} \\ -\dot{Z}_{2S} & \dot{Z}_{2C} \\ \frac{-\dot{Z}_{2S}}{\dot{Z}_{2S} + \dot{Z}_{2C}} & \frac{\dot{Z}_{2C}}{\dot{Z}_{2S} + \dot{Z}_{2C}} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$I_{(2 \times N)} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{2S}(t_1) & \dot{I}_{2S}(t_2) & \dots & \dot{I}_{2S}(t_N) \\ \dot{I}_{2C}(t_1) & \dot{I}_{2C}(t_2) & \dots & \dot{I}_{2C}(t_N) \end{bmatrix} \quad (18)$$

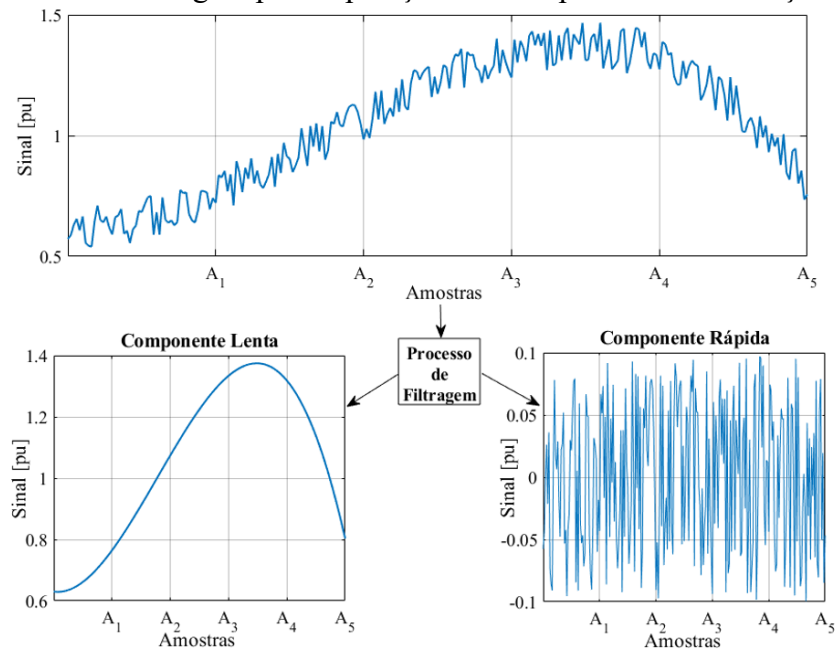
Observando o modelo representado em (15), constata-se sua similaridade com o modelo CICA apresentado em (8), onde: I é a matriz contendo os sinais das fontes; M_{PAC} é a matriz dos sinais observados (grandezas medidas); e Z é a matriz de mistura. Assim, utilizando a técnica CICA, é possível estimar uma matriz de separação e, conseqüentemente, calcular as impedâncias dos agentes envolvidos.

Antes da aplicação da técnica CICA, é crucial verificar se as três condições necessárias são satisfeitas. De fato, a condição (III) é satisfeita, pois o número de sinais observados (\dot{V}_2^{PAC} e \dot{i}_2^{PAC}) é igual ao número de sinais de fonte (\dot{I}_{2S} e \dot{I}_{2C}). Para atender às condições (I) e (II) é necessário que \dot{I}_{2S} e \dot{I}_{2C} sejam estatisticamente independentes e apresentem distribuições não gaussianas, todavia, esses requisitos não são atendidos de forma direta, conforme indicado em

[85]. Portanto, é necessário um procedimento complementar para viabilizar a aplicação da técnica CICA.

No contexto das amostragens advindas das medições, vale ressaltar que, conforme contemplado em [95], as grandezas elétricas registradas podem ser decompostas em duas componentes, uma representativa das variações rápidas e outra das lentas. Para a obtenção de ambas, recorre-se a um filtro de média móvel aplicado ao sinal original, no qual a média aritmética é calculada em janelas deslizantes de tamanho fixo (4 valores), percorrendo todas as amostras sequencialmente. O resultado dessas médias constitui a componente de variação lenta, e a componente de variação rápida é obtida pela diferença entre o sinal original e a componente lenta, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Processo de filtragem para separação das componentes de variação lenta e rápida.



Fonte: [26].

Assim, (15) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$(M_{PAC-fast} + M_{PAC-slow}) = Z \cdot (I_{fast} + I_{slow}) \quad (19)$$

Onde: $M_{PAC-fast}$ e I_{fast} são as componentes de variação rápida das matrizes M_{PAC} e I , respectivamente, e $M_{PAC-slow}$ e I_{slow} são as componentes de variação lenta.

Isolando as componentes de variação lenta e rápida, tem-se:

$$M_{PAC-slow} = Z \cdot I_{slow} \quad (20)$$

$$M_{PAC-fast} = Z \cdot I_{fast} \quad (21)$$

Em [96] foi demonstrado que as componentes de variação rápida das correntes das cargas que compõem o sistema elétrico são estatisticamente independentes e possuem distribuição não gaussiana. Considerando que \hat{I}_{2S} é o resultado conjunto de diversas cargas conectadas a montante do PAC e que \hat{I}_{2C} é uma composição das cargas do consumidor (a jusante do PAC), é razoável deduzir que as componentes de variação rápida de \hat{I}_{2S} e \hat{I}_{2C} também sejam estatisticamente independentes e possuem distribuição não gaussiana. Dessa forma, a estratégia utilizada para viabilizar a aplicação da técnica CICA consiste em utilizar como entrada do algoritmo as componentes rápidas de \hat{V}_2^{PAC} e \hat{I}_2^{PAC} , permitindo a estimação da matriz de impedâncias.

É importante destacar que, embora a técnica CICA tenha sido inicialmente proposta para análise harmônica [96], no capítulo 3 desta tese será demonstrado, por meio de dados de medição em campo, que as características de independência estatística e não gaussianidade também são válidas para as componentes de sequência negativa, o que possibilita a aplicação da CICA para análise de desequilíbrio.

Obtida a matriz de separação W^H , pode-se estimar \hat{I}_{2S} e \hat{I}_{2C} , como a seguir:

$$\hat{I} = U \cdot M_{PAC} \quad (22)$$

Onde:

$$\hat{I} = \begin{bmatrix} \hat{I}_{2S} \\ \hat{I}_{2C} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$U = W^H \cdot Q = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & u_{22} \end{bmatrix} = Z^{-1} \quad (24)$$

Nas equações acima, \hat{I}_{2S} e \hat{I}_{2C} são os valores estimados de I_{2S} e I_{2C} . Contudo, há indeterminações de escala e ordem nestas estimativas, sendo esta uma característica inerente à técnica CICA. Isto decorre do fato de que as amplitudes dos sinais estimados podem apresentar escalonamento indeterminado e, adicionalmente, a ordem de \hat{I}_{2S} e \hat{I}_{2C} na matriz \hat{I} pode estar permutada. Essas indeterminações, no entanto, podem ser resolvidas com métodos matemáticos apropriados, como destacado a seguir.

Para resolver a questão da indeterminação de escala, utiliza-se a inversa da matriz Z , conforme (25).

$$Z^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\dot{Z}_{2S}} & -1 \\ \frac{1}{\dot{Z}_{2C}} & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Ao igualar Z^{-1} com U , obtém-se (26). Lembrando que, conforme determinado em (24), a matriz U é o resultado da multiplicação da matriz de separação estimada (W^H) e da matriz de branqueamento (Q), definida na etapa de pré-processamento.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\dot{Z}_{2S}} & -1 \\ \frac{1}{\dot{Z}_{2C}} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & u_{22} \end{bmatrix} \quad (26)$$

Por fim, o cálculo das impedâncias dos agentes envolvidos pode ser feito conforme (27) e (28).

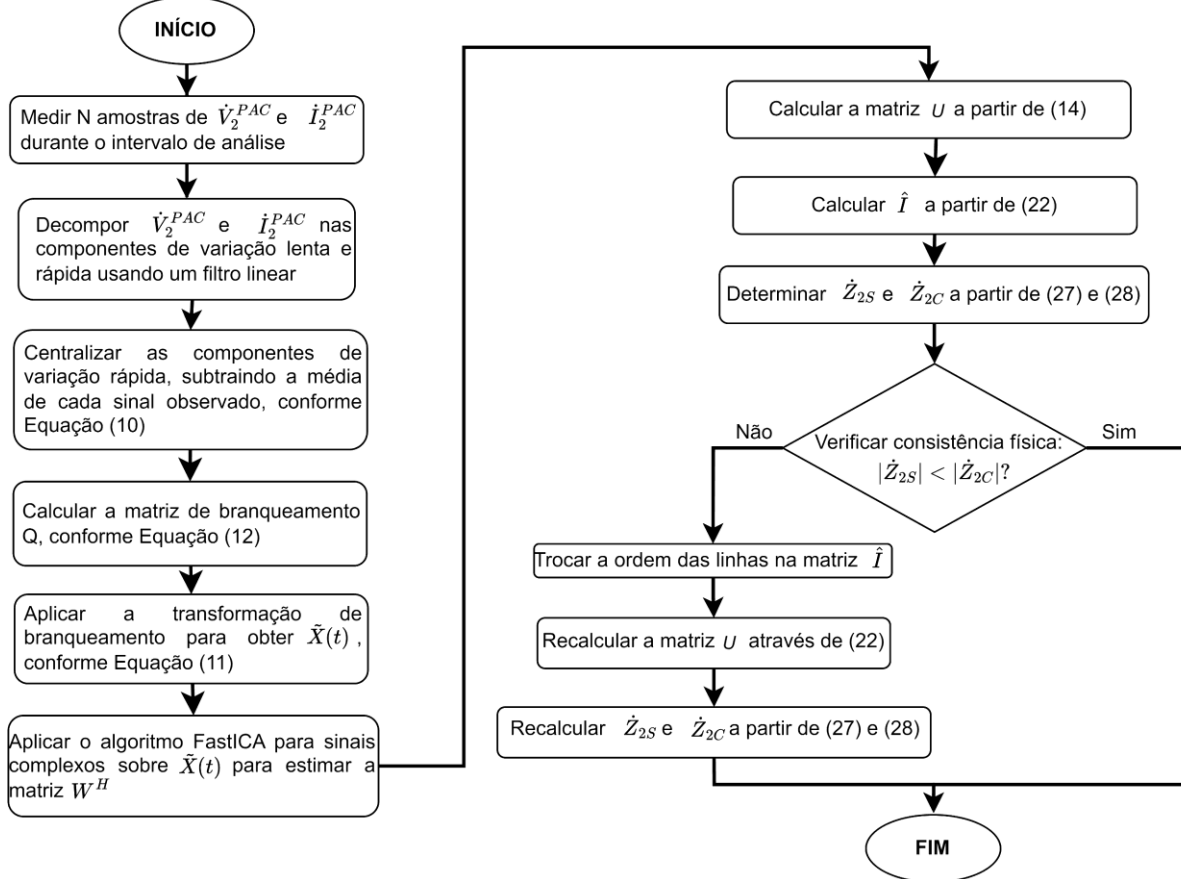
$$\dot{Z}_{2S} = -\frac{u_{12}}{u_{11}} \quad (27)$$

$$\dot{Z}_{2C} = \frac{u_{22}}{u_{21}} \quad (28)$$

Uma outra indeterminação encontra-se associada à ordem dos sinais \hat{I}_{2S} e \hat{I}_{2C} obtidos na matriz \hat{I} , visto que tal condição é crucial por influenciar diretamente na identificação das impedâncias dos agentes, conforme (27) e (28). Caso a ordem esteja incorreta, os valores estimados das impedâncias dos agentes também estarão trocados. Para verificar se esta condição está correta, é feita uma avaliação crítica para confirmar se os módulos das impedâncias se apresentam consistentes com a condição física determinada por $|\dot{Z}_{2S}| < |\dot{Z}_{2C}|$ [95], [97]. Caso isso não ocorra, há indícios de que a ordem dos sinais na matriz \hat{I} está incorreta e, conseqüentemente, deve-se trocar a ordem das linhas da matriz \hat{I} , recalculando a matriz U e determinar os novos valores das impedâncias usando (27) e (28).

Visando sintetizar o procedimento descrito, o algoritmo MCICA está apresentado no fluxograma da Figura 7.

Figura 7 – Fluxograma do algoritmo de estimativa de impedâncias via MCICA.



Fonte: Autoria própria.

Cumpridas as etapas supramencionadas, têm-se os valores das impedâncias dos agentes envolvidos. De posse destes parâmetros, procede-se ao cálculo das parcelas de responsabilidade sobre o efeito final a cada instante de medição, conforme estabelecido em (4), (5), (6) e (7).

Cabe ressaltar que os detalhes operacionais referentes à implementação computacional deste algoritmo e dos demais apresentados, como a definição do tamanho das janelas de amostras e critérios de convergência específicos, serão devidamente considerados nos capítulos subsequentes desta tese.

2.5 Abordagens baseadas no Método da Superposição Simplificado

Esta estratégia foi proposta em [41], [78], as quais indicaram meios para a determinação dos parâmetros fundamentados na premissa de que a magnitude da impedância do consumidor

é significativamente superior à do supridor ($\dot{Z}_{2C} \gg \dot{Z}_{2S}$). A fim de esclarecimento, considera-se, neste trabalho, que "significativamente superior" corresponde a uma magnitude ao menos dez vezes maior. O embasamento físico para esta premissa reside na própria natureza dos elementos que compõem cada uma dessas impedâncias no sistema de distribuição. Conforme apontado em [78], a impedância equivalente do lado do supridor, vista a partir do PAC, é essencialmente determinada pela impedância de curto-circuito do sistema e pela impedância do transformador de alimentação. Em contrapartida, a impedância do lado consumidor é determinada pelas cargas conectadas aos alimentadores. Nesse sentido, pode-se considerar, via de regra, que a magnitude da impedância do lado consumidor é muito superior à do supridor.

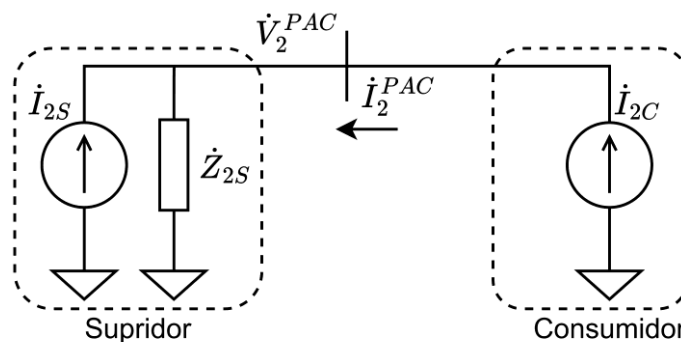
Tomando por base esta condição, a impedância equivalente paralela resultante apresenta um valor muito próximo ao da própria impedância do supridor. Deste modo, (1) e (2) podem ser aproximadas por (29) e (30).

$$\dot{E}_{2S}^{PAC} = \dot{V}_2^{PAC} - \dot{Z}_{2S} \cdot \dot{I}_2^{PAC} \quad (29)$$

$$\dot{E}_{2C}^{PAC} = \dot{Z}_{2S} \cdot \dot{I}_2^{PAC} \quad (30)$$

Em que \dot{E}_{2S}^{PAC} corresponde à parcela de responsabilidade do supridor e \dot{E}_{2C}^{PAC} à tensão de responsabilidade do consumidor. Esta consideração simplificadora leva ao circuito equivalente representativo do sistema, antes representado pela Figura 3, para aquele mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Circuito equivalente de Norton simplificado representativo dos agentes supridor e consumidor conectados ao PAC.



Fonte: Autoria própria.

Assim, no que se refere à aplicação do processo, contando com esta simplificação, basta o conhecimento de \dot{Z}_{2S} . Conforme discutido em [98], a adoção do critério acima contorna a busca da impedância do consumidor, visto que esta grandeza se apresenta com grandes

complexidades por estar sujeita a vários fatores de influência, enquanto a do supridor tende a apresentar menores variações.

No que tange à estimação do parâmetro \dot{Z}_{2S} para os estudos associados com os desequilíbrios de tensão, a literatura apresenta o uso do MMQ. Contudo, visto que a modelagem aqui adotada (equivalente de Norton) é análoga àquela empregada nos estudos de distorções harmônicas, esta tese propõe a adaptação de técnicas tradicionalmente vinculadas a esse outro fenômeno de QEE.

Nesse contexto, além do MMQ, são propostos e analisados o Método da Flutuação e o MCCVA. A escolha dessas duas abordagens específicas fundamenta-se em revisões do estado da arte [90], [99], [100], [101], [102], que as apontam como os procedimentos mais estudados e eficazes para a determinação da impedância harmônica do agente supridor.

Dessa forma, as seções seguintes apresentam e discutem os fundamentos teóricos e matemáticos de cada uma das três abordagens:

- MMQ;
- Método da Flutuação;
- MCCVA.

2.5.1 Estimação via Método dos Mínimos Quadrados

O Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), proposto em [41], [78] para análise do desequilíbrio de tensão, baseia-se na equação complexa apresentada em (29) para encontrar as variáveis desconhecidas \dot{Z}_{2S} e \dot{I}_{2S} . Para a aplicação deste procedimento, os autores utilizaram a premissa de que, durante um período curto de medição de k amostras, os parâmetros do supridor permanecem inalterados. Assim, os autores encontraram uma equação matricial complexa e aplicaram a técnica dos mínimos quadrados para determinar as variáveis desconhecidas.

Na presente pesquisa, além do procedimento apresentado em [41], [78], aplica-se ainda um tratamento matemático com vistas a melhorar os resultados do procedimento em questão. Usando o recurso de análise denominado Regressão Bilinear [103], é possível decompor (29) em suas respectivas partes real e imaginária, obtendo-se (31) e (32), em que o sub-índice “ r ” representa a parte real e “ i ” a parte imaginária. Esta abordagem é adotada por oferecer maior robustez, pois, ao separar a equação complexa (29) em seus componentes real e imaginário, realiza-se uma redução da correlação entre as variáveis estimadas, melhorando, assim, a confiabilidade dos valores obtidos [104]. Todavia, é importante notar que as premissas do método proposto em [41], [78] não foram alteradas.

$$E_{2S-r} = V_{2-r}^{PAC} - Z_{2S-r} \cdot I_{2-r}^{PAC} + Z_{2S-i} \cdot I_{2-i}^{PAC} \quad (31)$$

$$E_{2S-i} = V_{2-i}^{PAC} - Z_{2S-r} \cdot I_{2-i}^{PAC} - Z_{2S-i} \cdot I_{2-r}^{PAC} \quad (32)$$

Através do rearranjo matemático proposto em [103], [105], (31) e (32) são combinadas para formar duas novas equações lineares independentes, (33) e (34).

$$\begin{aligned} & I_{2-i}^{PAC} \cdot V_{2-r}^{PAC} - I_{2-r}^{PAC} \cdot V_{2-i}^{PAC} = \\ & = - \left(I_{2-r}^{PAC^2} + I_{2-i}^{PAC^2} \right) \cdot Z_{2S-i} + I_{2-i}^{PAC} \cdot E_{2S-r} - I_{2-r}^{PAC} \cdot E_{2S-i} \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} & I_{2-r}^{PAC} \cdot V_{2-r}^{PAC} + I_{2-i}^{PAC} \cdot V_{2-i}^{PAC} = \\ & = \left(I_{2-r}^{PAC^2} + I_{2-i}^{PAC^2} \right) \cdot Z_{2S-r} + I_{2-r}^{PAC} \cdot E_{2S-r} + I_{2-i}^{PAC} \cdot E_{2S-i} \end{aligned} \quad (34)$$

Considerando um período de medição composto por k amostras, a partir da equação descrita em (33), pode-se estabelecer a equação matricial apresentada em (35).

$$Y_1 = X_1 \cdot C_1 \quad (35)$$

Onde:

$$Y_1 = \begin{bmatrix} I_{2-i}^{PAC}(t_1) \cdot V_{2-r}^{PAC}(t_1) - I_{2-r}^{PAC}(t_1) \cdot V_{2-i}^{PAC}(t_1) \\ I_{2-i}^{PAC}(t_2) \cdot V_{2-r}^{PAC}(t_2) - I_{2-r}^{PAC}(t_2) \cdot V_{2-i}^{PAC}(t_2) \\ \dots \\ I_{2-i}^{PAC}(t_k) \cdot V_{2-r}^{PAC}(t_k) - I_{2-r}^{PAC}(t_k) \cdot V_{2-i}^{PAC}(t_k) \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$X_1 = \begin{bmatrix} - \left(I_{2-r}^{PAC^2}(t_1) + I_{2-i}^{PAC^2}(t_1) \right) & I_{2-i}^{PAC}(t_1) & I_{2-r}^{PAC}(t_1) \\ - \left(I_{2-r}^{PAC^2}(t_2) + I_{2-i}^{PAC^2}(t_2) \right) & I_{2-i}^{PAC}(t_2) & I_{2-r}^{PAC}(t_2) \\ \dots & \dots & \dots \\ - \left(I_{2-r}^{PAC^2}(t_k) + I_{2-i}^{PAC^2}(t_k) \right) & I_{2-i}^{PAC}(t_k) & I_{2-r}^{PAC}(t_k) \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} Z_{2S-i} \\ E_{2S-r} \\ E_{2S-i} \end{bmatrix} \quad (38)$$

Da mesma forma, a partir de (34), chega-se a (39).

$$Y_2 = X_2 \cdot C_2 \quad (39)$$

Onde:

$$Y_2 = \begin{bmatrix} I_{2-r}^{PAC}(t_1) \cdot V_{2-r}^{PAC}(t_1) + I_{2-i}^{PAC}(t_1) \cdot V_{2-i}^{PAC}(t_1) \\ I_{2-r}^{PAC}(t_2) \cdot V_{2-r}^{PAC}(t_2) + I_{2-i}^{PAC}(t_2) \cdot V_{2-i}^{PAC}(t_2) \\ \dots \\ I_{2-r}^{PAC}(t_k) \cdot V_{2-r}^{PAC}(t_k) + I_{2-i}^{PAC}(t_k) \cdot V_{2-i}^{PAC}(t_k) \end{bmatrix} \quad (40)$$

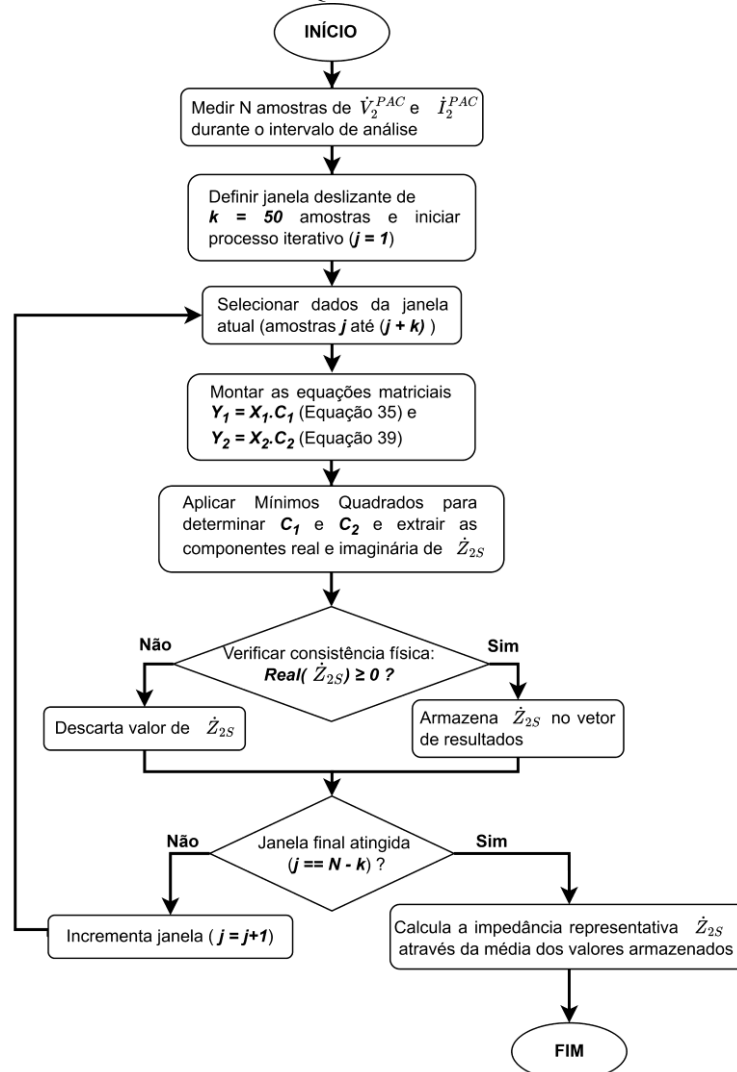
$$X_2 = \begin{bmatrix} I_{2-r}^{PAC^2}(t_1) + I_{2-i}^{PAC^2}(t_1) & I_{2-r}^{PAC}(t_1) & I_{2-i}^{PAC}(t_1) \\ I_{2-r}^{PAC^2}(t_2) + I_{2-i}^{PAC^2}(t_2) & I_{2-r}^{PAC}(t_2) & I_{2-i}^{PAC}(t_2) \\ \dots & \dots & \dots \\ I_{2-r}^{PAC^2}(t_k) + I_{2-i}^{PAC^2}(t_k) & I_{2-r}^{PAC}(t_k) & I_{2-i}^{PAC}(t_k) \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} Z_{2S-r} \\ E_{2S-r} \\ E_{2S-i} \end{bmatrix} \quad (42)$$

Nas equações acima, nota-se que Y_1 , Y_2 , X_1 e X_2 são matrizes formadas por valores conhecidos através de medição das grandezas elétricas no PAC, bastando, assim, determinar C_1 e C_2 . Estas são obtidas pela aplicação da clássica Regressão Linear de Mínimos Quadrados [106]. Adicionalmente, impõe-se uma restrição de consistência física ao resultado, descartando-se estimativas que resultem em uma parte real da impedância negativa (resistência negativa).

A aplicação prática do algoritmo consiste, portanto, em dividir o intervalo total de medição em janelas deslizantes e, para cada subperíodo, resolver os sistemas lineares (35) e (38). Após a filtragem de consistência física, o valor representativo da impedância de sequência negativa do supridor é obtido através da média aritmética das estimativas válidas. O algoritmo desenvolvido para a aplicação do MMQ, contemplando a decomposição bilinear e a filtragem de consistência física (resistência não-negativa), está detalhado no fluxograma da Figura 9.

Figura 9 – Fluxograma do algoritmo para estimativa de impedâncias via Método dos Mínimos Quadrados.



Fonte: Autoria própria.

Com o valor de \hat{Z}_{2S} determinado, as contribuições são calculadas pelo Método da Superposição Simplificado conforme definido em (29) e (30), (6) e (7).

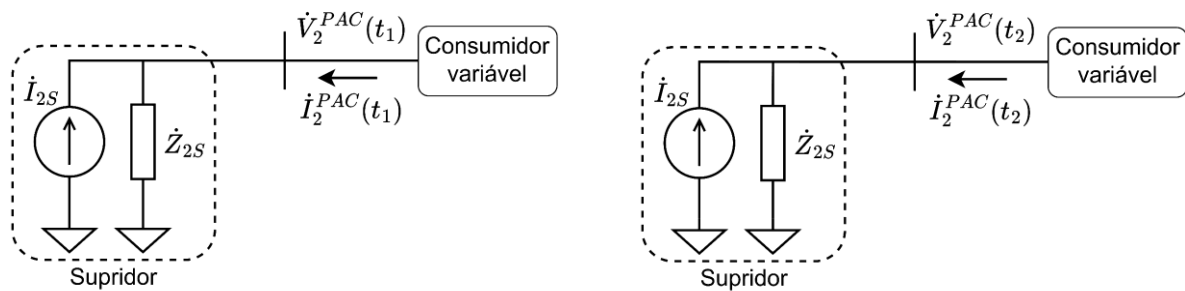
2.5.2 Estimação via Método da Flutuação

O Método da Flutuação, inicialmente apresentado em [98], foi um recurso originalmente desenvolvido para avaliar o nível de emissão harmônica de cargas industriais, no qual os autores propuseram a utilização das flutuações naturais das tensões e correntes no PAC para estimar a impedância do supridor. O método pressupõe que, em um curto intervalo de tempo, os parâmetros do agente supridor (\hat{I}_{2S} e \hat{Z}_{2S}) são mantidos constantes, enquanto as respectivas

grandezas associadas ao consumidor sofrem variações. Nestes termos, o procedimento em pauta resulta no circuito equivalente ilustrado na Figura 10, o qual destaca os parâmetros associados ao supridor durante uma variação entre os instantes t_1 e t_2 .

A partir deste circuito, subtraindo os dois instantes, a fonte de corrente interna do supridor (\dot{I}_{2S}) é eliminada, permitindo determinar a impedância (\dot{Z}_{2S}) através da relação entre a variação da tensão e a variação da corrente no PAC, conforme (43).

Figura 10 – Circuito equivalente de Norton considerando apenas o consumidor variável.



Fonte: Autoria própria.

$$\dot{Z}_{2S} = \frac{\dot{V}_2^{PAC}(t_2) - \dot{V}_2^{PAC}(t_1)}{\dot{I}_2^{PAC}(t_2) - \dot{I}_2^{PAC}(t_1)} = \frac{\Delta \dot{V}_2^{PAC}}{\Delta \dot{I}_2^{PAC}} \quad (43)$$

A principal limitação prática deste método está na própria premissa que assume que o supridor permanece sob condições operacionais inalteradas. Como se sabe, para as instalações reais, \dot{I}_{2S} também flutua e, conseqüentemente, (43) só será precisa se a variação da corrente no PAC ($\Delta \dot{I}_2^{PAC}$), causada pelo consumidor, for dominante em relação às flutuações do supridor.

Para atenuar o impacto das variações apontadas e também os ruídos de medição, propôs-se em [107] uma técnica de filtragem para selecionar apenas as amostras nas quais o consumidor é dominante. Este procedimento introduz um critério denominado fator Nair (estabelecido em (44)), que prioriza amostras com variações de corrente ($\Delta I_{PAC}(t)$) significativamente acima da média. As equações para o cálculo da média ($\mu_{\Delta I_{PAC}}$) e da variância ($\sigma_{\Delta I_{PAC}}^2$) são dadas em (45) e (46).

$$\frac{(\Delta I_{PAC}(t) - \mu_{\Delta I_{PAC}})}{\sigma_{\Delta I_{PAC}}} > \alpha \quad (44)$$

Sendo:

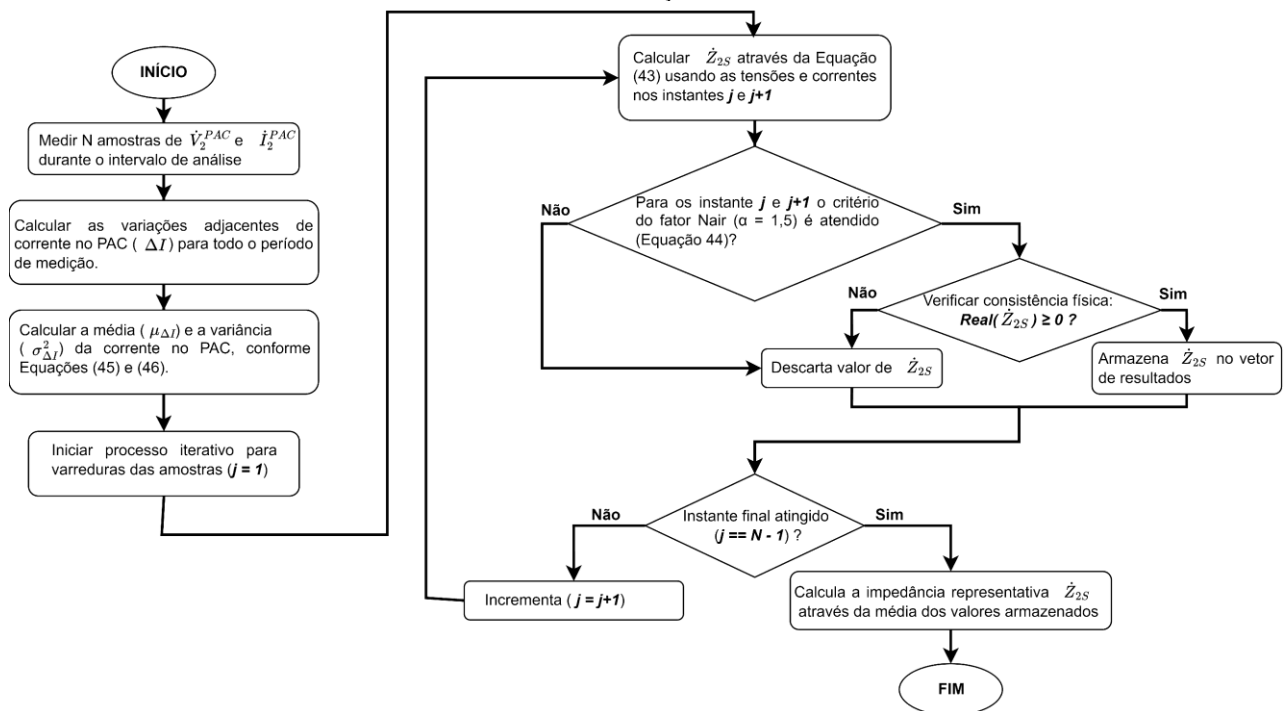
$$\mu_{\Delta I_{PAC}} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \Delta I_{PAC}(t) \quad (45)$$

$$\sigma_{\Delta I_{PAC}}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N |\Delta I_{PAC}(t) - \mu_{\Delta I_{PAC}}|^2 \quad (46)$$

As amostras consideradas válidas devem atender ao critério estabelecido em (44), ressaltando que os autores sugeriram utilizar um valor de α entre 1 e 1,5. Para a aplicação do método nesta tese, utilizou-se $\alpha = 1,5$.

Portanto, a aplicação do método, conforme detalhado no fluxograma da Figura 11, consiste em calcular as variações adjacentes ($\Delta \dot{V}_2^{PAC}$ e $\Delta \dot{I}_2^{PAC}$) das medições, aplicar o filtro “Nair” (de acordo com (44), (45) e (46)) para selecionar as amostras válidas e, então, calcular \dot{Z}_{2S} usando (43) para cada uma delas. Conforme recomendado em [98], valores de impedância com parte real negativa são descartados, e o valor final de \dot{Z}_{2S} é obtido pela média das amostras válidas restantes.

Figura 11 – Fluxograma do algoritmo para estimativa de impedâncias via Método da Flutuação.



Fonte: Autoria própria.

Conhecida a impedância de sequência negativa do supridor, as parcelas de responsabilidade são calculadas pelas expressões simplificadas do Método da Superposição, conforme (29) e (30), (6) e (7).

2.5.3 Estimação via Método da Covariância Característica de Vetores Aleatórios (MCCVA)

Conforme esclarecido, os Métodos da Flutuação e dos Mínimos Quadrados baseiam-se no fato de que tanto a impedância (\dot{Z}_{2S}) quanto a corrente de sequência negativa do supridor (\dot{I}_{2S}) se mantêm constantes durante o período de avaliação. No entanto, em termos práticos, é sabido que tal premissa dificilmente se verifica nas redes elétricas.

Para mitigar o impacto das variações de \dot{I}_{2S} na estimativa da impedância, foi proposto o Método da Covariância Característica de Vetores Aleatórios (MCCVA), conforme descrito em [108].

Tomando como referência o circuito equivalente de Norton da Figura 3, é possível derivar (47), a qual estabelece uma relação entre as medições no PAC e os parâmetros associados ao supridor.

$$\dot{V}_2^{PAC} - \dot{Z}_{2S} \cdot \dot{I}_2^{PAC} = \dot{Z}_{2S} \cdot \dot{I}_{2S} = \dot{E}_{2S} \quad (47)$$

O Método MCCVA assume que $|\dot{Z}_{2C}| \gg |\dot{Z}_{2S}|$. Com base nessa premissa, as flutuações naturais de \dot{I}_{2S} causam variações muito pequenas em \dot{I}_2^{PAC} , enquanto as flutuações de \dot{I}_{2C} se refletem predominantemente nessa corrente. Consequentemente, \dot{I}_2^{PAC} é dominado pelo lado consumidor, ao passo que \dot{E}_{2S} é determinado essencialmente pelo supridor. Por serem grandezas associadas a agentes distintos com dinâmicas predominantemente independentes, é razoável assumir que \dot{E}_{2S} e \dot{I}_2^{PAC} são aproximadamente independentes entre si. Como a independência entre dois vetores aleatórios implica covariância nula, a covariância de \dot{E}_{2S} e \dot{I}_2^{PAC} pode ser expressa conforme (48).

$$C_{\dot{E}_{2S}, \dot{I}_2^{PAC}} = E \left(\left(\dot{I}_2^{PAC} - E(\dot{I}_2^{PAC}) \right)^* \cdot \left(\dot{E}_{2S} - E(\dot{E}_{2S}) \right) \right) \cong 0 \quad (48)$$

Na expressão acima, “*” representa o conjugado dos dados complexos; e $E(\cdot)$ representa a esperança matemática.

Portanto, durante um subintervalo contendo k amostras, o valor médio da parte real e imaginária do supridor pode ser calculado de acordo com (49) e (50).

$$\frac{1}{k} \sum_k Z_{S-r} \cong \frac{\sum_k (\delta i_{2-r}^{PAC} \cdot \delta \dot{V}_{2-r}^{PAC} + \delta i_{2-i}^{PAC} \cdot \delta \dot{V}_{2-i}^{PAC})}{\sum_k ((\delta i_{2-r}^{PAC})^2 + (\delta i_{2-i}^{PAC})^2)} \quad (49)$$

$$\frac{1}{k} \sum_k Z_{S-i} \cong \frac{\sum_k (\delta i_{2-r}^{PAC} \cdot \delta \dot{V}_{2-i}^{PAC} - \delta i_{2-i}^{PAC} \cdot \delta \dot{V}_{2-r}^{PAC})}{\sum_k ((\delta i_{2-r}^{PAC})^2 + (\delta i_{2-i}^{PAC})^2)} \quad (50)$$

Onde:

$$\delta i_{2-r}^{PAC} = i_{2-r}^{PAC} - \frac{1}{k} \sum_k i_{2-r}^{PAC} \quad (51)$$

$$\delta i_{2-i}^{PAC} = i_{2-i}^{PAC} - \frac{1}{k} \sum_k i_{2-i}^{PAC} \quad (52)$$

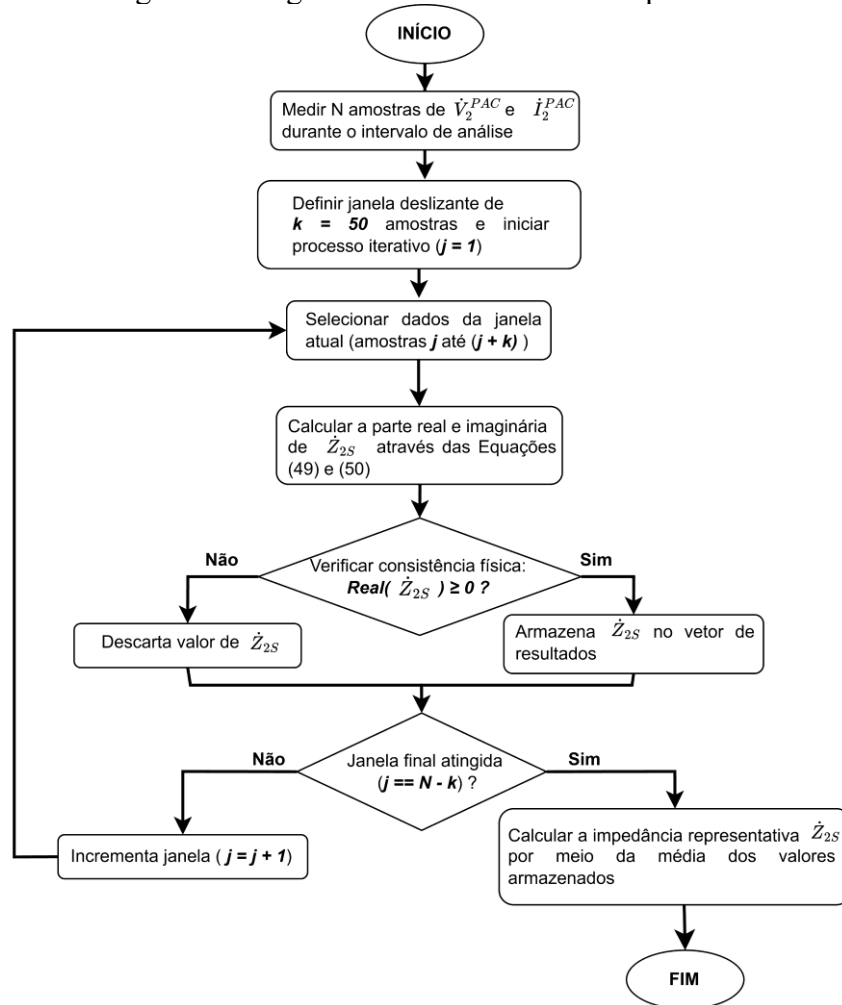
$$\delta \dot{V}_{2-r}^{PAC} = \dot{V}_{2-r}^{PAC} - \frac{1}{k} \sum_k \dot{V}_{2-r}^{PAC} \quad (53)$$

$$\delta \dot{V}_{2-i}^{PAC} = \dot{V}_{2-i}^{PAC} - \frac{1}{k} \sum_k \dot{V}_{2-i}^{PAC} \quad (54)$$

A aplicação do Método MCCVA está detalhada no fluxograma da Figura 12. O processo consiste em dividir os dados medidos de tensão e corrente no PAC em janelas deslizantes e, para cada subperíodo, calcular os termos de desvio médio conforme (51), (52), (53) e (54). Com esses valores, aplicam-se (49) e (50) para obter uma estimativa da impedância.

Um passo fundamental adicionado ao processo, conforme ilustrado no fluxograma, é a verificação da consistência física. Assim, caso a parte real da impedância estimada seja negativa, a amostra é descartada, pois tal resultado violaria a característica da rede de suprimento. O valor final representativo de \check{Z}_{2S} é, então, obtido pela média aritmética das estimativas válidas acumuladas.

Figura 12 – Fluxograma do algoritmo de estimativa de impedâncias via MCCVA.



Fonte: Autoria própria.

Uma vez obtido o valor da impedância do supridor, pode-se calcular a parcela de contribuição do consumidor pelo Método da Superposição Simplificado, conforme (29), (30), (6) e (7).

2.6 Considerações finais

Este capítulo centrou-se, conforme estabelecido em seu propósito, na realização de uma revisão detalhada e crítica dos principais métodos para a determinação das contribuições de desequilíbrios de tensão.

A análise demonstrou que o compartilhamento de responsabilidade é uma temática de suma importância e ativamente pesquisada. A revisão foi estruturada considerando duas

categorias. Primeiramente, os métodos invasivos foram analisados e, apesar de suas contribuições teóricas, foram considerados impraticáveis para a aplicação, em razão dos riscos operacionais associados aos transitórios de chaveamento, aos custos envolvidos e à necessidade de parada do agente consumidor. Em seguida, entre os métodos não invasivos, foram descartadas as abordagens que dependem de parâmetros de rede detalhados ou de medições distribuídas (multi-barramento), pois ambas exigem uma infraestrutura de dados ou de medição que não condiz com a realidade da maioria dos sistemas de distribuição.

Essa seleção levou à conclusão de que as abordagens mais promissoras, do ponto de vista prático, são aquelas não invasivas que utilizam apenas as medições de tensão e corrente no PAC. Dentro desta categoria, a revisão identificou duas famílias de métodos:

- O Método da Superposição Completo (via CICA), que busca estimar ambas as impedâncias (\dot{Z}_{2S} e \dot{Z}_{2C}) simultaneamente por meio de técnicas estatísticas.
- O Método da Superposição Simplificado (MSS), que reduz o problema à estimação da impedância do supridor \dot{Z}_{2S} .

Com base nesta constatação, conforme estabelecido, foram selecionados e detalhados quatro métodos representativos destas abordagens (MMQ, Método da Flutuação, MCCVA e o MCICA).

Realizado o levantamento da literatura e estabelecidos estes fundamentos teóricos, ficou evidenciado que os métodos mais adequados aos propósitos do trabalho ainda possuem desvantagens técnicas significativas, conforme será evidenciado posteriormente nesta tese. Tendo em vista esse fato, um novo procedimento será apresentado nesta tese, o qual será avaliado e correlacionado com desempenho das metodologias existentes na literatura.

3 PROPOSIÇÃO DE NOVA ESTRATÉGIA DE PROCEDIMENTO NÃO INVASIVO

3.1 Considerações iniciais

Não obstante o reconhecimento dos fundamentos sólidos que norteiam o processo da superposição, como apontado anteriormente, nos termos indicados permanece uma grande lacuna para seu uso efetivo. Tais dificuldades encontram-se associadas às complexidades inerentes na determinação das impedâncias requeridas pelo método. De fato, muito embora as propostas apresentadas nas discussões do estado da arte sobre o tema apontassem para os esforços para atender a este quesito, ficou evidenciado que a busca por meios que atendam, de forma prática, objetiva e precisa, aos desafios associados ao conhecimento destes parâmetros ainda se apresenta motivadora para pesquisas. Neste sentido, este capítulo contempla um processo alternativo e inovador, voltado para a obtenção das informações necessárias para as impedâncias equivalentes dos agentes, visando o aprimoramento do grau de exatidão do processo de análise baseado na superposição.

A nova estratégia proposta foi designada, nesta tese, por Método da Minimização da Correlação (MMC). Este tem por fundamento o fato de que as componentes de variação rápida das fontes de corrente do supridor e do consumidor ($\dot{I}_{2S-fast}$ e $\dot{I}_{2C-fast}$) são estatisticamente descorrelacionadas, apresentando, portanto, um coeficiente de correlação nulo ou próximo de zero. Nestas condições, empregando um algoritmo de otimização, o MMC apresenta-se como um procedimento para a determinação das impedâncias dos agentes (\dot{Z}_{2S} e \dot{Z}_{2C}), minimizando o coeficiente de correlação entre $\dot{I}_{2S-fast}$ e $\dot{I}_{2C-fast}$, buscando, assim, a máxima aproximação possível da condição de descorrelação.

Objetivando maior clareza para a interpretação das diversas grandezas que irão compor os desenvolvimentos subsequentes, a Tabela 5 sintetiza as principais variáveis que irão caracterizar as expressões das impedâncias a serem consideradas, conforme seus respectivos domínios de sequência e agentes a que se referem.

Tabela 5 – Símbolos de impedância empregados no capítulo.

Símbolo	Denominação	Observação
\dot{Z}_{1S}	Impedância equivalente do supridor de sequência positiva.	Parâmetro do modelo de circuito equivalente (<i>Thévenin</i>). Numericamente próxima a \dot{Z}_{CC} , porém conceitualmente distinta.
\dot{Z}_{1C}	Impedância equivalente do consumidor de sequência positiva.	Parâmetro do modelo de circuito equivalente (<i>Norton</i>).
\dot{Z}_{2S}	Impedância equivalente do supridor de sequência negativa.	Parâmetro do circuito equivalente de Norton do Método da Superposição. Atua como variável de otimização do MMC.
\dot{Z}_{2C}	Impedância equivalente do consumidor de sequência negativa.	Parâmetro do circuito equivalente de Norton do Método da Superposição. Atua como variável de otimização do MMC.
\dot{Z}_{CC}	Impedância de curto-circuito nominal no PAC (sequência positiva).	Dado nominal fornecido pela concessionária. Define o espaço de busca do MMC e atua como parâmetro de entrada alternativo quando \dot{Z}_{ref} não puder ser estimada com confiabilidade.
\dot{Z}_{ref}	Impedância de referência do supridor.	Estimativa obtida pelo MCCVA Adaptado (Seção 3.3). Constitui o parâmetro de entrada preferencial do MMC. Na ausência de estimativa confiável, é substituída por \dot{Z}_{CC} .

Fonte: Autoria própria.

3.2 Premissas adotadas pelo MMC

Inicialmente, é relevante reconhecer que a concepção do MMC se encontra alicerçada em duas premissas:

- A impedância de sequência negativa do agente supridor (\dot{Z}_{2S}) não é igual, mas se situa no entorno da sua respectiva impedância de sequência positiva (\dot{Z}_{1S}), a qual também é numericamente próxima à impedância de curto-circuito (\dot{Z}_{CC}) do PAC;
- As componentes de variação rápida das fontes de corrente dos agentes ($\dot{I}_{2S-fast}$ e $\dot{I}_{2C-fast}$) são vetores aleatórios independentes, portanto, não correlacionados.

3.2.1 Impedância de sequência negativa do supridor

A rede elétrica do agente supridor é constituída por um conjunto de elementos, os quais incluem transformadores, linhas de transmissão, cabos, fontes de geração, e diversas cargas (motrizes e estáticas) conectadas a montante do PAC.

No que tange aos componentes estáticos da rede (linhas, cabos e transformadores), conforme estabelecido em [55], as impedâncias de sequência positiva (\dot{Z}_1) e negativa (\dot{Z}_2) são idênticas. Por outro lado, em se tratando de unidades motrizes, a exemplo das máquinas síncronas (geradores ou motores) e de indução (motores), suas impedâncias de sequência possuem valores significativamente distintos [55]. No que concerne ao agente supridor, cabe observar que sua impedância equivalente é, via de regra, dominada pelos componentes estáticos, dada a estrutura topológica composta por transformadores de potência e linhas de transmissão e distribuição.

Do exposto, segue que o MMC estabelece a impedância de sequência positiva do supridor (\dot{Z}_{1S}) como um parâmetro de balizamento para o espaço de busca da impedância de sequência negativa (\dot{Z}_{2S}). Para tanto, estima-se uma impedância de referência (\dot{Z}_{ref}) por meio do MCCVA Adaptado, conforme detalhado na Seção 3.3. Na ausência de uma estimativa confiável, recorre-se à impedância de curto-circuito (\dot{Z}_{CC}) do PAC como parâmetro substituto. Cabe ressaltar que essa premissa está em consonância com [55], que também adota a aproximação $\dot{Z}_{2S} \cong \dot{Z}_{1S}$ para a rede de suprimento de forma geral, sendo igualmente adotada em [109] no contexto da identificação de fontes de desequilíbrio de tensão.

3.2.2 Independência das fontes de corrente

A segunda premissa atrelada ao MMC baseia-se na hipótese de que as fontes de corrente de sequência negativa dos agentes supridor e consumidor possuem uma componente de variação lenta e outra de variação rápida, sendo as componentes de variação rápida decorrelacionadas entre si. Esta característica é igualmente importante para os métodos MCCVA e MCICA. Cabe destacar que essa premissa se refere às fontes de corrente (parâmetros dos circuitos equivalentes de Norton dos agentes), sendo grandezas que representam as dinâmicas internas de cada agente.

Embora essa premissa seja amplamente aceita em estudos de distorções harmônicas [96], observa-se uma lacuna em referências bibliográficas que ratifiquem tal comportamento especificamente para desequilíbrios de tensão. Diante disso, a validação experimental foi

conduzida em uma subestação do Campus Umuarama da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), em um sistema de baixa tensão (220 V). A subestação em questão é composta por um transformador de 750 kVA (13,8 kV / 220 V), ao qual derivam dois alimentadores na BT que alimentam dois Quadros Gerais de Baixa Tensão (QGBTs), cada um responsável pelo fornecimento de energia a um bloco distinto da universidade.

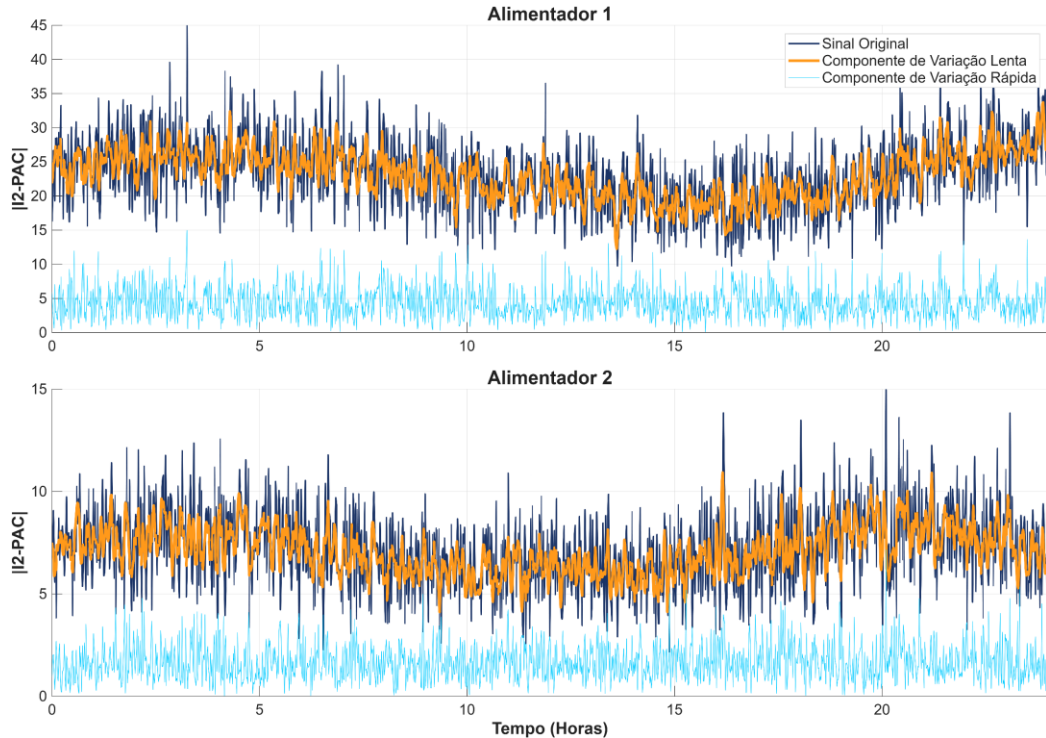
As medições foram realizadas nos dois alimentadores ao longo de sete dias consecutivos, com período de agregação de 10 segundos. Para tanto, foram empregados dois analisadores de qualidade de energia Fluke 435 Série II, equipamentos de Classe A conforme a norma IEC 61000-4-30. O cálculo das componentes simétricas de sequência negativa, tanto de tensão quanto de corrente, foi realizado internamente pelo próprio analisador, a partir das grandezas trifásicas medidas, com os resultados de módulo e ângulo registrados diretamente por meio do *logger* do equipamento.

Para a medição das tensões, foram utilizadas as quatro ponteiros de tensão do próprio instrumento (fases A, B, C e neutro). A medição das correntes foi realizada por meio de anéis flexíveis do tipo *Rogowski*, com capacidade de medição de até 6000 A RMS, os quais foram instalados nos condutores de cada fase dos respectivos alimentadores.

Um aspecto de significativa relevância para a validade da análise de correlação realizada foi a sincronização temporal entre os dois instrumentos. Assim, ambos os analisadores foram sincronizados por meio do Módulo de Sincronização de Tempo GPS430, que utiliza sinal GPS para fornecer referência temporal aos equipamentos. Essa sincronização é fundamental para assegurar que os vetores de corrente de sequência negativa dos dois alimentadores sejam comparados nos mesmos instantes de tempo, conferindo consistência à análise estatística subsequente.

Por meio de um filtro de média móvel, os sinais medidos foram decompostos nas suas componentes de variação lenta e rápida, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Resultado das medições das correntes de sequência negativa dos dois alimentadores em análise.



Fonte: Autoria Própria.

O processo de validação da premissa estabelecida foi dividido em duas etapas. A primeira investigou o comportamento estatístico das componentes de variação rápida, o que é fundamental para a aplicação de técnicas como o CICA, que exige distribuição não gaussiana [110]. Para isso, foram determinadas as métricas de Assimetria e Curtose das componentes reais (\Re) e imaginárias (\mathcal{I}) para cada dia de medição, apresentadas na Tabela 6 e Tabela 7, sendo que um valor de Curtose próximo a 3 indica uma distribuição gaussiana. Os resultados obtidos, contudo, mostraram valores de Curtose superiores a 3 e Assimetria próxima de zero. Isso sugere uma distribuição supergaussiana, indicando que, assim como as correntes harmônicas [87] [96], as correntes de sequência negativa também tendem a uma distribuição não gaussiana.

Tabela 6 – Assimetria das componentes de variação rápida das correntes de sequência negativa dos alimentadores.

Dias	$\Re(I_1)$	$\mathcal{I}(I_1)$	$\Re(I_2)$	$\mathcal{I}(I_2)$
1	-0,04	0,01	0,06	0,20
2	-0,17	0,11	0,20	-0,09
3	-0,12	-0,01	0,22	0,17
4	-0,16	-0,05	0,16	0,07

5	-0,29	0,04	0,09	0,45
6	-0,59	0,03	0,18	0,12
7	-0,38	0,11	0,05	0,23

- *Obs: os subíndices 1 e 2 indicam as corrente dos alimentadores 1 e 2, respectivamente.*

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 – Curtose das componentes de variação rápida das correntes de sequência negativa dos alimentadores.

Dias	$\Re(I_1)$	$\mathcal{J}(I_1)$	$\Re(I_2)$	$\mathcal{J}(I_2)$
1	5,28	3,92	9,04	7,02
2	5,01	4,74	7,08	11,15
3	4,09	3,97	7,56	8,53
4	4,76	4,31	5,85	9,41
5	6,73	4,08	6,91	8,42
6	8,62	3,91	5,79	8,46
7	6,03	4,07	7,09	9,97

- *Obs: os subíndices 1 e 2 indicam as correntes dos alimentadores 1 e 2, respectivamente.*

Fonte: Autoria própria.

A segunda etapa da análise, que correspondeu ao foco principal da validação do MMC, consistiu na avaliação do coeficiente de correlação das componentes de variação rápida entre os dois alimentadores. Dada a natureza não gaussiana dos dados, comprovada na etapa anterior, optou-se por utilizar o coeficiente de correlação de *Spearman*, que é eficaz na mensuração de correlações não lineares. Os resultados, dispostos na Tabela 8, demonstraram que os coeficientes de correlação entre todas as combinações das componentes reais e imaginárias são inferiores a 0,02. De acordo com [111], coeficientes abaixo de 0,3 são indicativos de uma correlação desprezível.

Tabela 8 – Coeficiente de correlação entre as componentes de variação rápida para as correntes de sequência negativa.

Dias	$\Re(I_1) \times \Re(I_2)$	$\mathcal{J}(I_1) \times \mathcal{J}(I_2)$	$\Re(I_1) \times \mathcal{J}(I_2)$	$\mathcal{J}(I_1) \times \Re(I_2)$
1	0,007	0,017	0,001	0,003
2	0,013	0,008	0,008	0,010
3	0,006	0,001	0,016	0,015
4	0,001	0,003	0,015	0,001
5	0,008	0,014	0,012	0,009

6	0,004	0,008	0,012	0,006
7	0,009	0,018	0,008	0,001

Fonte: Autoria própria.

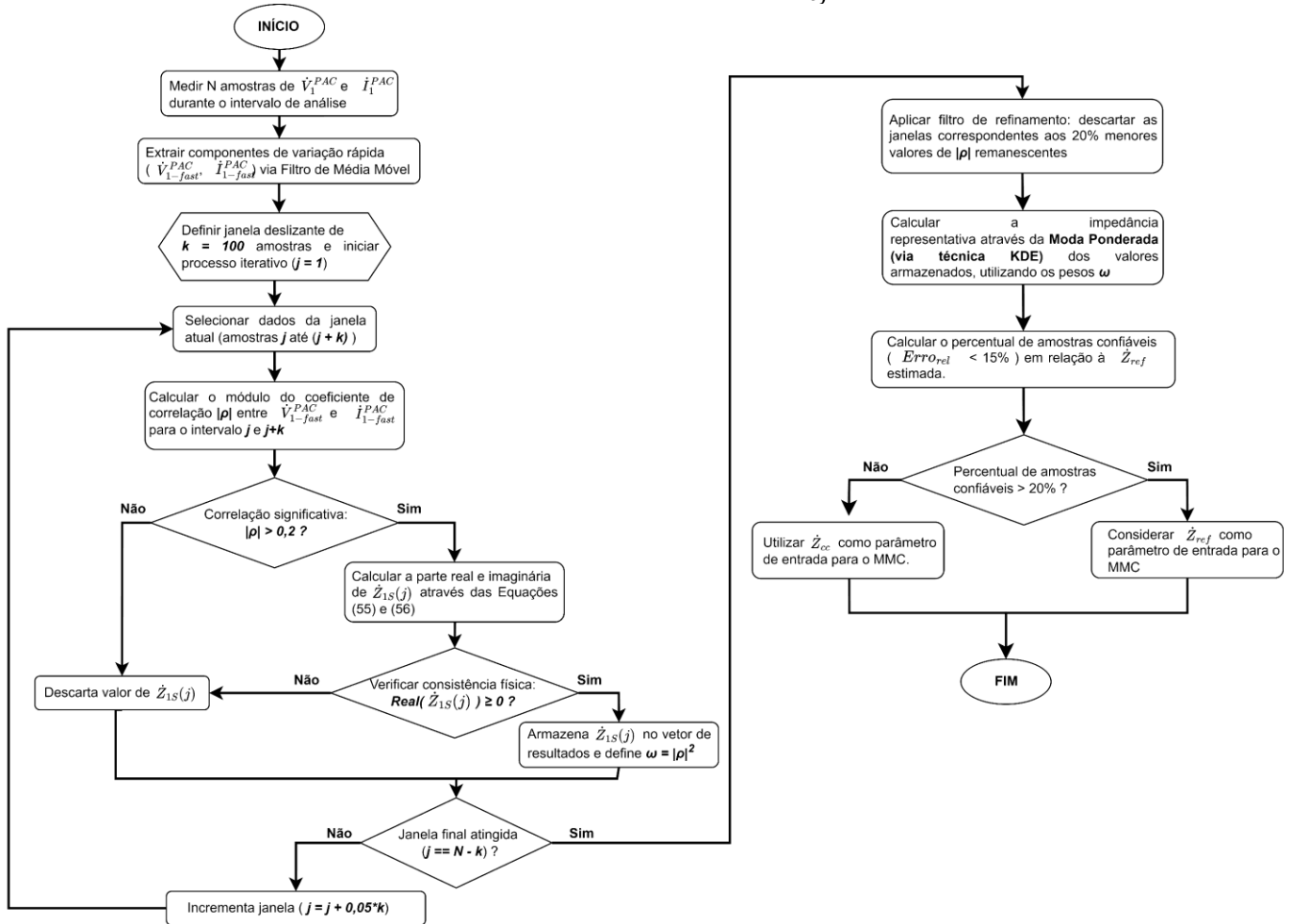
Portanto, as constatações apresentadas ratificaram, experimentalmente, para o caso avaliado, a veracidade da premissa da descorrelação das componentes de variação rápida, usada como base para o MMC. Adicionalmente, a comprovação da distribuição não gaussiana valida a potencial aplicação do MCICA para a análise de desequilíbrios.

3.3 Determinação da impedância de referência do supridor

Como já abordado, o MMC encontra-se alicerçado no fato de que a impedância de sequência negativa do supridor (\dot{Z}_{2S}), considerando-se uma predominância de componentes estáticos para sua definição, se apresenta no entorno da impedância de sequência positiva (\dot{Z}_{1S}), bem como da impedância de curto-circuito (\dot{Z}_{CC}). Esta hipótese não restringe as impedâncias à igualdade, mas estabelece um parâmetro de balizamento para delimitar o espaço de busca do algoritmo de otimização, acelerando a convergência do método. Para conferir autonomia ao método e mitigar imprecisões em dados fornecidos por concessionárias, neste trabalho propõe-se a estimativa de uma impedância de referência (\dot{Z}_{ref}) por meio de um procedimento preliminar que utiliza as grandezas elétricas de sequência positiva obtidas diretamente no PAC. Vale destacar que estes registros já são realizados quando das medições conduzidas em campo, não representando, assim, qualquer monitoração adicional àquelas já executadas para as grandezas de sequência negativa.

A estratégia proposta baseia-se na aplicação de uma versão adaptada do MCCVA [112], aqui denominada MCCVA Adaptado. Esta escolha justifica-se pela eficácia do método em condições de dominância do consumidor [113], [114] e por demandar uma quantidade de amostras reduzida em comparação a abordagens como o MCICA, facilitando a implementação prática em campo. O fluxograma da Figura 14 sintetiza o procedimento completo, cujas etapas são detalhadas nas subseções a seguir.

Figura 14 – Fluxograma detalhado: estimativa de \hat{Z}_{ref} (MCCVA Adaptado).

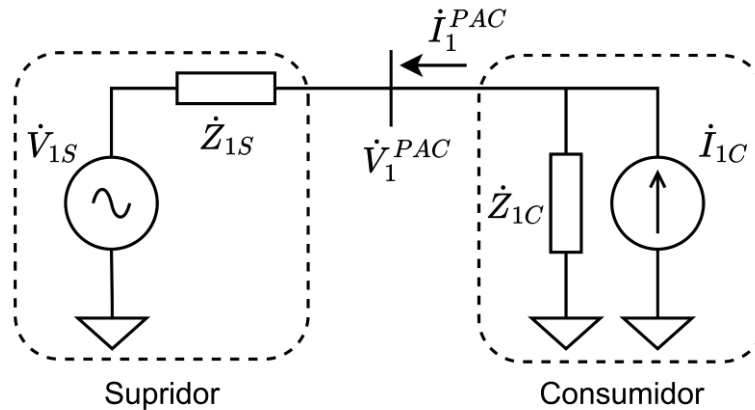


Fonte: Autoria própria.

3.3.1 Fundamentos e modelo matemático

Visto que a impedância equivalente do consumidor (\hat{Z}_{1C}) é intrinsecamente superior à do supridor (\hat{Z}_{1S}), esta característica física favorece a aplicação do MCCVA Adaptado utilizando grandezas de sequência positiva. Tal condição se verifica na prática pela própria exigência de regulação de tensão no PAC, a qual impõe que a queda de tensão em \hat{Z}_{1S} seja reduzida. O modelo matemático fundamenta-se no circuito equivalente da Figura 15, no qual o agente supridor é representado por um equivalente de *Thévenin* de sequência positiva (\hat{V}_{1S} e \hat{Z}_{1S}) e o agente consumidor por um equivalente de Norton de sequência positiva (\hat{I}_{1C} e \hat{Z}_{1C}). A interação entre esses agentes resulta na tensão (\hat{V}_1^{PAC}) e na corrente (\hat{I}_1^{PAC}) de sequência positiva no PAC.

Figura 15 – Circuito equivalente de Norton de sequência positiva representativo dos agentes supridor e consumidor conectados ao PAC.



Fonte: Autoria própria.

Considerando o limite regulatório de queda de tensão adequada de 5% e adotando uma simplificação das impedâncias, a queda de tensão no supridor representa 5% da tensão total enquanto os 95% restantes ficam sobre o consumidor, o que implica $|\dot{Z}_{1C}|/|\dot{Z}_{1S}| = 0,95/0,05 = 19$. Portanto, a impedância do consumidor é ao menos 19 vezes maior que a do supridor. Com base nessa relação, a corrente total observada no PAC é aproximada pela corrente do consumidor ($\dot{I}_1^{PAC} \approx \dot{I}_{1C}$). Como \dot{V}_{1S} e \dot{I}_1^{PAC} são aproximadamente independentes [112], a covariância entre esses vetores aleatórios é nula, o que fundamenta a estimativa de \dot{Z}_{1S} a partir das grandezas medidas no PAC.

O procedimento é aplicado de forma iterativa sobre janelas deslizantes de k amostras, indexadas por j . As partes real e imaginária da estimativa de \dot{Z}_{1S} na j -ésima janela, denotadas $Z_{1S-r}(j)$ e $Z_{1S-i}(j)$, são calculadas por meio de (55) e (56).

$$\frac{1}{k} \sum_k Z_{1S-r}(j) \cong \frac{\sum_k (\delta \dot{I}_{1-r}^{PAC} \cdot \delta \dot{V}_{1-r}^{PAC} + \delta \dot{I}_{1-i}^{PAC} \cdot \delta \dot{V}_{1-i}^{PAC})}{\sum_k ((\delta \dot{I}_{1-r}^{PAC})^2 + (\delta \dot{I}_{1-i}^{PAC})^2)} \quad (55)$$

$$\frac{1}{k} \sum_k Z_{1S-i}(j) \cong \frac{\sum_k (\delta \dot{I}_{1-r}^{PAC} \cdot \delta \dot{V}_{1-i}^{PAC} - \delta \dot{I}_{1-i}^{PAC} \cdot \delta \dot{V}_{1-r}^{PAC})}{\sum_k ((\delta \dot{I}_{1-r}^{PAC})^2 + (\delta \dot{I}_{1-i}^{PAC})^2)} \quad (56)$$

Onde:

$$\delta i_{1-r}^{PAC} = i_{1-r}^{PAC} - \frac{1}{k} \sum_k i_{1-r}^{PAC} \quad (57)$$

$$\delta i_{1-i}^{PAC} = i_{1-i}^{PAC} - \frac{1}{k} \sum_k i_{1-i}^{PAC} \quad (58)$$

$$\delta \dot{V}_{1-r}^{PAC} = \dot{V}_{1-r}^{PAC} - \frac{1}{k} \sum_k \dot{V}_{1-r}^{PAC} \quad (59)$$

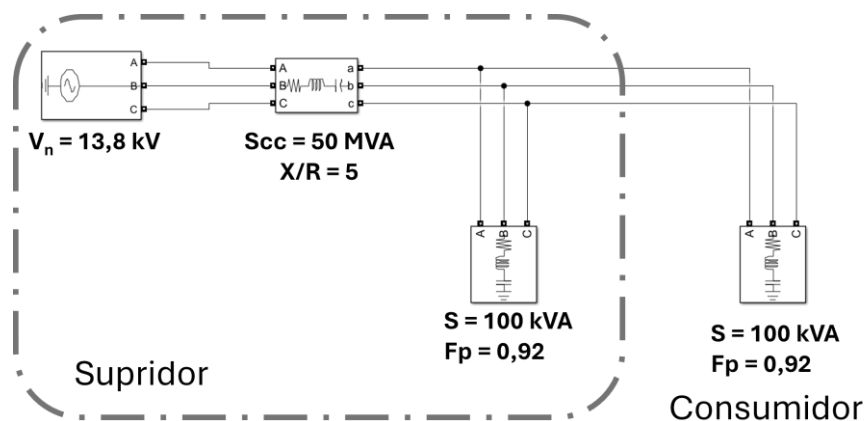
$$\delta \dot{V}_{1-i}^{PAC} = \dot{V}_{1-i}^{PAC} - \frac{1}{k} \sum_k \dot{V}_{1-i}^{PAC} \quad (60)$$

3.3.2 Filtragem, estimativa e validação de \dot{Z}_{ref}

Nem todas as janelas deslizantes produzem estimativas igualmente confiáveis de \dot{Z}_{1S} , pois janelas em que o consumidor não exerce dominância suficiente sobre a tensão do PAC tendem a produzir resultados espúrios. Portanto, faz-se necessário um critério capaz de quantificar o grau de dominância do consumidor em cada janela, de forma a selecionar apenas aquelas que produzem estimativas representativas. O desenvolvimento e a validação desse critério são apresentados a seguir.

Objetivando avaliar a efetividade das hipóteses estabelecidas, procede-se à aplicação do procedimento para um sistema elétrico típico, nos moldes indicados na Figura 16. Nesta, a área em destaque refere-se ao agente 1, enquanto o agente 2 corresponde à unidade consumidora indicada.

Figura 16 – Sistema elétrico utilizado para ilustrar o processo da determinação da impedância de referência do supridor.

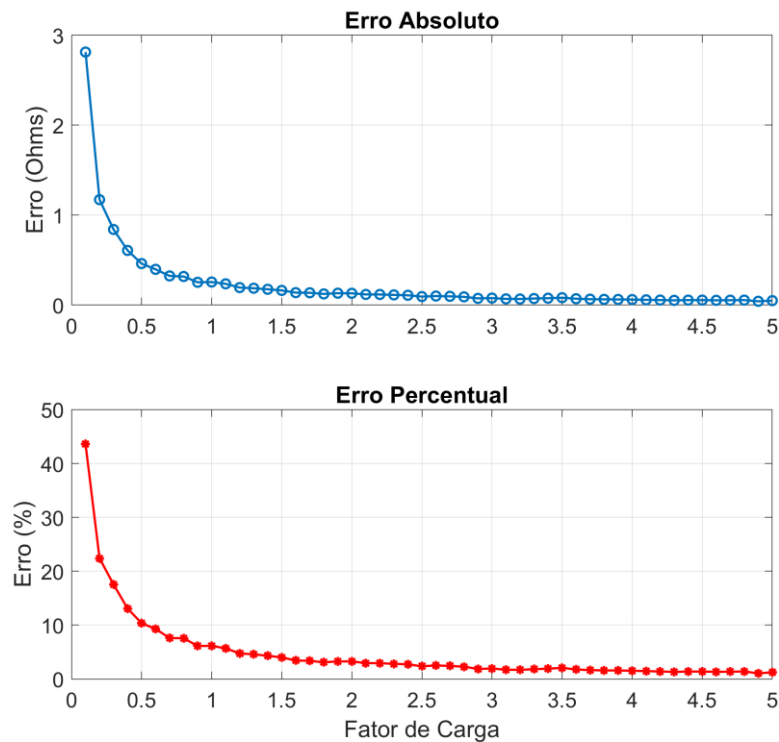


Fonte: Autoria própria.

A simulação foi realizada considerando múltiplos cenários independentes, cada um composto por 360 amostras com variações aleatórias de carga seguindo uma distribuição supergaussiana, em consonância com [114]. Em cada cenário, a magnitude da potência da carga do consumidor foi mantida constante em um determinado valor, sendo esse variado entre os cenários de 0,1 pu a 5 pu, em passos de 0,1 pu (onde 1 pu corresponde à potência de 100 kVA). Esse procedimento permitiu avaliar o desempenho do MCCVA [112] diante de diferentes níveis de dominância da carga frente às variações do supridor.

Os resultados demonstram que a exatidão do método é diretamente influenciada pelo fator de carga (Figura 17), observando-se que, em cenários de baixo consumo (fator de carga de 0,1 pu), a reduzida influência da corrente sobre a tensão no PAC eleva o erro da estimativa para 43,7%. Tal comportamento confirma que a identificação da impedância do supridor requer que a magnitude da carga seja suficiente para sensibilizar a tensão no ponto de medição.

Figura 17 – Erro do MCCVA ao estimar a impedância de sequência positiva do supridor em função do fator de carga.



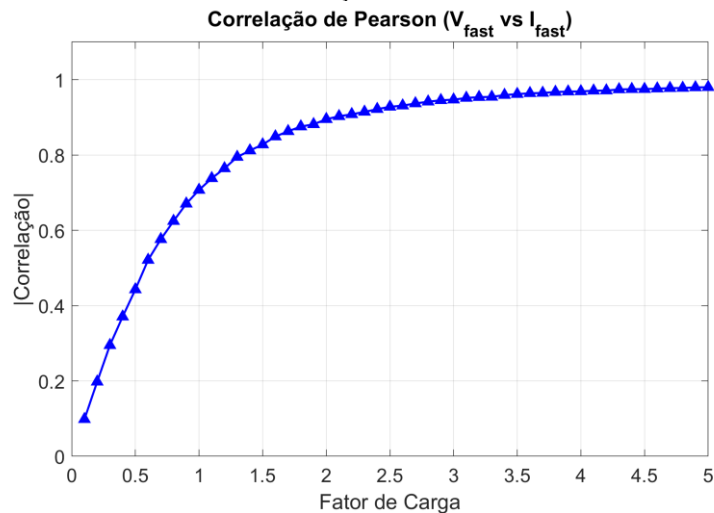
Fonte: Autoria própria.

Esses resultados evidenciam que a confiabilidade das estimativas está diretamente atrelada ao grau de dominância do consumidor sobre a tensão do PAC. Visando quantificar este grau em cada janela deslizante, este trabalho propõe o uso do coeficiente de correlação de

Pearson (ρ) como critério de seleção. De fato, em termos práticos, este grau de dominância não é de fácil determinação, dada a impossibilidade de uma monitoração dinâmica de todos os componentes conectados a montante do ponto de medição.

Para o atendimento ao acima posto, destaca-se que a correlação almejada deve ser calculada exclusivamente entre as componentes de variação rápida da tensão (\dot{V}_1^{PAC}) e da corrente (\dot{I}_1^{PAC}), e não sobre as grandezas diretamente medidas (V_1^{PAC} e I_1^{PAC}). Isto se apoia no fato que as grandezas elétricas totais possuem correlações intrínsecas decorrentes de fatores externos, como o horário do dia, temperatura e clima [28]. O uso das componentes rápidas na análise isola a relação de causalidade entre a corrente do consumidor e a tensão no PAC, uma vez que, quando o consumidor é dominante, suas variações de corrente são a principal causa das flutuações de tensão observadas, fazendo com que $|\rho|$ se aproxime da unidade. Essa correspondência entre $|\rho|$ e o grau de dominância é ilustrada na Figura 18. Inversamente, se a carga for pouco dominante, as flutuações da tensão serão regidas por outras cargas estocásticas, resultando em uma correlação próxima de zero. Este comportamento, ilustrado na Figura 18, fundamenta o uso de $|\rho|$ como critério de seleção das janelas deslizantes, conforme detalhado a seguir.

Figura 18 – Coeficiente de Correlação entre a Tensão e a Corrente no PAC.



Fonte: Autoria própria.

Portanto, a estimativa de \dot{Z}_{ref} é obtida por meio de um processo de filtragem, seguido pelo cálculo da moda ponderada das janelas válidas:

- **Primeiro filtro (eliminação de janelas sem causalidade significativa):** descartam-se janelas com $|\rho| < 0,2$, pois valores abaixo desse limiar indicam que as flutuações de tensão

no PAC não são predominantemente causadas pelo consumidor, comprometendo a confiabilidade da estimativa de \dot{Z}_{1S} naquela janela.

- **Segundo filtro (seleção das janelas de maior dominância):** das janelas remanescentes, descartam-se aquelas situadas nos 20% inferiores de correlação, conforme critério estabelecido em [115], assegurando que apenas os instantes de maior dominância do consumidor contribuam para a estimativa final.
- **Filtro de consistência física:** descartam-se estimativas com parte real negativa ($real(\dot{Z}_{1S}(j)) < 0$), por violarem a realidade física do sistema elétrico.
- **Estimativa de \dot{Z}_{ref} por moda ponderada:** o valor final de \dot{Z}_{ref} é determinado pela Moda Ponderada das janelas válidas, via Estimativa de Densidade por Kernel, do inglês *Kernel Density Estimation* (KDE) [116], atribuindo a cada amostra um peso $\omega = |\rho|^2$, de forma a privilegiar os resultados obtidos nos instantes de maior dominância da carga.
- **Validação da estimativa:** dado que a impedância de sequência positiva do supridor apresenta baixa variabilidade [109], estimativas que divergem significativamente de \dot{Z}_{ref} são indicativas de janelas pouco representativas. Para cada amostra remanescente, calcula-se o erro relativo por meio de (61), sendo consideradas confiáveis aquelas com $Erro_{rel} < 15\%$.

$$Erro_{rel}(\%) = 100\% \cdot \frac{|\dot{Z}_{1S}(j) - \dot{Z}_{ref}|}{|\dot{Z}_{ref}|} \quad (61)$$

Se ao menos 20% do total de amostras apresentar erro relativo inferior a 15%, \dot{Z}_{ref} é considerada uma estimativa válida e utilizada como parâmetro de entrada do MMC. Caso contrário, recomenda-se substituí-la pela impedância de curto-circuito nominal (\dot{Z}_{CC}) fornecida pela concessionária.

3.4 Estratégia aplicativa do MMC

Em virtude da descorrelação entre as componentes de variação rápida das correntes, é válido afirmar que o coeficiente de correlação de *Spearman* entre as componentes dos dois agentes, no que tange aos respectivos equivalentes de Norton, é aproximadamente zero, conforme expresso em (62).

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \cong 0 \quad (62)$$

Onde:

$$F_1 = \left| \rho \left(\Re(\dot{I}_{2S-fast}), \Re(\dot{I}_{2C-fast}) \right) \right| \quad (63)$$

$$F_2 = \left| \rho \left(\mathcal{J}(\dot{I}_{2S-fast}), \mathcal{J}(\dot{I}_{2C-fast}) \right) \right| \quad (64)$$

$$F_3 = \left| \rho \left(\Re(\dot{I}_{2S-fast}), \mathcal{J}(\dot{I}_{2C-fast}) \right) \right| \quad (65)$$

$$F_4 = \left| \rho \left(\mathcal{J}(\dot{I}_{2S-fast}), \Re(\dot{I}_{2C-fast}) \right) \right| \quad (66)$$

Sendo $\rho(x, y)$ o coeficiente de *Spearman* entre x e y .

Assim, a partir das informações advindas das medições das tensões e correntes de sequência negativa, conduzidas no PAC ao longo de um determinado intervalo, o método proposto realiza a determinação dos valores de \dot{Z}_{2S} e \dot{Z}_{2C} por meio da minimização da função objetivo (F), expressa em (62). Para tanto, as correntes de sequência negativa dos agentes são calculadas por meio de (67) e (68), obtidas do circuito equivalente de Norton.

$$\dot{I}_{2S-fast} = \frac{\dot{V}_{2-fast}^{PAC}}{\dot{Z}_{2S}} - \dot{i}_{2-fast}^{PAC} \quad (67)$$

$$\dot{I}_{2C-fast} = \frac{\dot{V}_{2-fast}^{PAC}}{\dot{Z}_{2C}} + \dot{i}_{2-fast}^{PAC} \quad (68)$$

Uma vez que não há uma equação que correlacione (62) com as variáveis \dot{Z}_{2C} e \dot{Z}_{2S} para a determinação direta das impedâncias requeridas, a alternativa adotada baseou-se num algoritmo de otimização. Para os fins deste trabalho, empregou-se o Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas, do inglês *Particle Swarm Optimization* (PSO), a ser detalhado na seção subsequente. Com o intuito de acelerar a convergência e mitigar o risco de soluções discrepantes, emprega-se uma restrição no espaço de busca da impedância de sequência negativa do supridor, cujo balizamento é definido a partir da impedância de referência \dot{Z}_{ref} determinada na Seção 3.3.

Diante do exposto, as etapas a serem contempladas para a aplicação do método proposto consistem em:

- Realização das medições das correntes e tensões do PAC e, a partir dessas informações, determinação das respectivas componentes de sequência negativa (\dot{V}_2^{PAC} e \dot{I}_2^{PAC}), durante o intervalo de medição;
- Aplicação de um filtro de média móvel de 4 valores em \dot{V}_2^{PAC} e \dot{I}_2^{PAC} , obtendo-se as componentes de variação rápida das tensões e correntes de sequência negativa no PAC (\dot{V}_{2-fast}^{PAC} e \dot{I}_{2-fast}^{PAC});
- Determinação dos valores de \dot{Z}_{2S} e \dot{Z}_{2C} por meio do algoritmo PSO com o objetivo de minimizar a função objetivo (62), utilizando as seguintes configurações:
 - Tamanho da população: 2400.
 - Espaço de busca da impedância do supridor:

$$0,5 \cdot |\dot{Z}_{ref}| \leq |\dot{Z}_{2S}| \leq 2 \cdot |\dot{Z}_{ref}|$$

$$0^\circ \leq \theta(\dot{Z}_{2S}) \leq +90^\circ$$
 - Espaço de busca da impedância do consumidor:

$$0 \leq |\dot{Z}_{2C}| \leq 1000 \cdot |\dot{Z}_{ref}|$$

$$-90^\circ \leq \theta(\dot{Z}_{2C}) \leq +90^\circ$$
- Estabelecimento de um critério de convergência em que o processo de busca é encerrado quando não houver variação no melhor dos resultados das últimas 20 gerações. Esse critério assegura que o algoritmo convergiu para uma solução estável.

Por fim, vale destacar que o espaço de busca da impedância de sequência negativa do supridor foi definido entre $0,5 \cdot |\dot{Z}_{ref}|$ e $2 \cdot |\dot{Z}_{ref}|$, intervalo que assegura ao algoritmo a exclusão de valores incompatíveis com a realidade física do sistema elétrico, evitando, portanto, resultados discrepantes, mesmo diante de possíveis imprecisões na estimativa de \dot{Z}_{ref} .

É importante notar também que, para a impedância do consumidor, o espaço de busca foi definido como $0 \leq |\dot{Z}_{2C}| \leq 1000 \cdot |\dot{Z}_{ref}|$, com a condição de que seu ângulo esteja entre -90° e $+90^\circ$. O limite superior de $1000 \cdot |\dot{Z}_{ref}|$ apoia-se no fato de que valores acima desse patamar não exercem influência considerável nos cálculos das contribuições.

3.5 Algoritmo PSO Clássico

Dentre os diversos algoritmos de otimização, cada qual com suas particularidades, eficiência e robustez, selecionou-se para esta tese o algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO), cuja implementação demonstra simplicidade e eficácia na convergência. Vale,

entretanto, ressaltar que, além do PSO, também foram avaliados algoritmos genéticos (AG) e de evolução diferencial (ED), sendo que o PSO evidenciou melhor convergência quando comparado aos demais.

Desenvolvido em 1995, o PSO é inspirado no comportamento coletivo de pássaros e cardumes na busca por alimento [117]. O processo envolve a criação de um enxame de partículas que percorre o espaço do problema visando um objetivo específico, em que as posições das partículas são avaliadas por uma função de aptidão (*fitness*) [118]. Ao contrário dos algoritmos evolutivos, o PSO não emprega seleção, permitindo que todos os indivíduos da população permaneçam ativos durante toda a execução.

Considerando uma partícula \vec{x}_i em um espaço de busca na iteração k , sua posição é atualizada a cada iteração pela adição de sua velocidade \vec{v}_i à posição atual, conforme (69).

$$\vec{x}_i(k+1) = \vec{x}_i(k) + \vec{v}_i(k+1) \quad (69)$$

No contexto do algoritmo PSO, a velocidade é o elemento que guia o processo de otimização, refletindo as experiências de aprendizado tanto individual quanto coletiva. Nesse processo, as partículas buscam alcançar duas posições: a melhor posição que cada uma delas já encontrou, conhecida como *pbest* (*particular best position*), e a melhor posição identificada pelo conjunto do enxame, considerando todas as posições individuais, conhecida como *gbest* (*global best position*). Ao concluir o processo, o algoritmo retorna à solução correspondente o *gbest* final, conforme determinado pela função objetivo.

Para um conjunto de partículas, a modelagem matemática do PSO é expressa por:

$$\vec{v}_i(k+1) = W \cdot \vec{v}_i(k) + C_1 \cdot rand_1 \cdot (pbest_i - \vec{x}_i(k)) + C_2 \cdot rand_2 \cdot (gbest - \vec{x}_i(k)) \quad (70)$$

Onde:

- $\vec{v}_i(k+1)$ é a velocidade da partícula i na iteração $k+1$;
- $\vec{v}_i(k)$ é a velocidade da partícula i na iteração k ;
- w é o coeficiente de inércia da partícula;
- C_1 e C_2 são os fatores de aprendizado;
- $rand_1$ e $rand_2$ correspondem a números aleatórios entre 0 e 1;
- $\vec{x}_i(k)$ é a posição da partícula i na iteração k ;
- $pbest_i$ é a posição da melhor solução obtida pela partícula i ;
- $gbest$ é a posição do melhor valor do enxame.

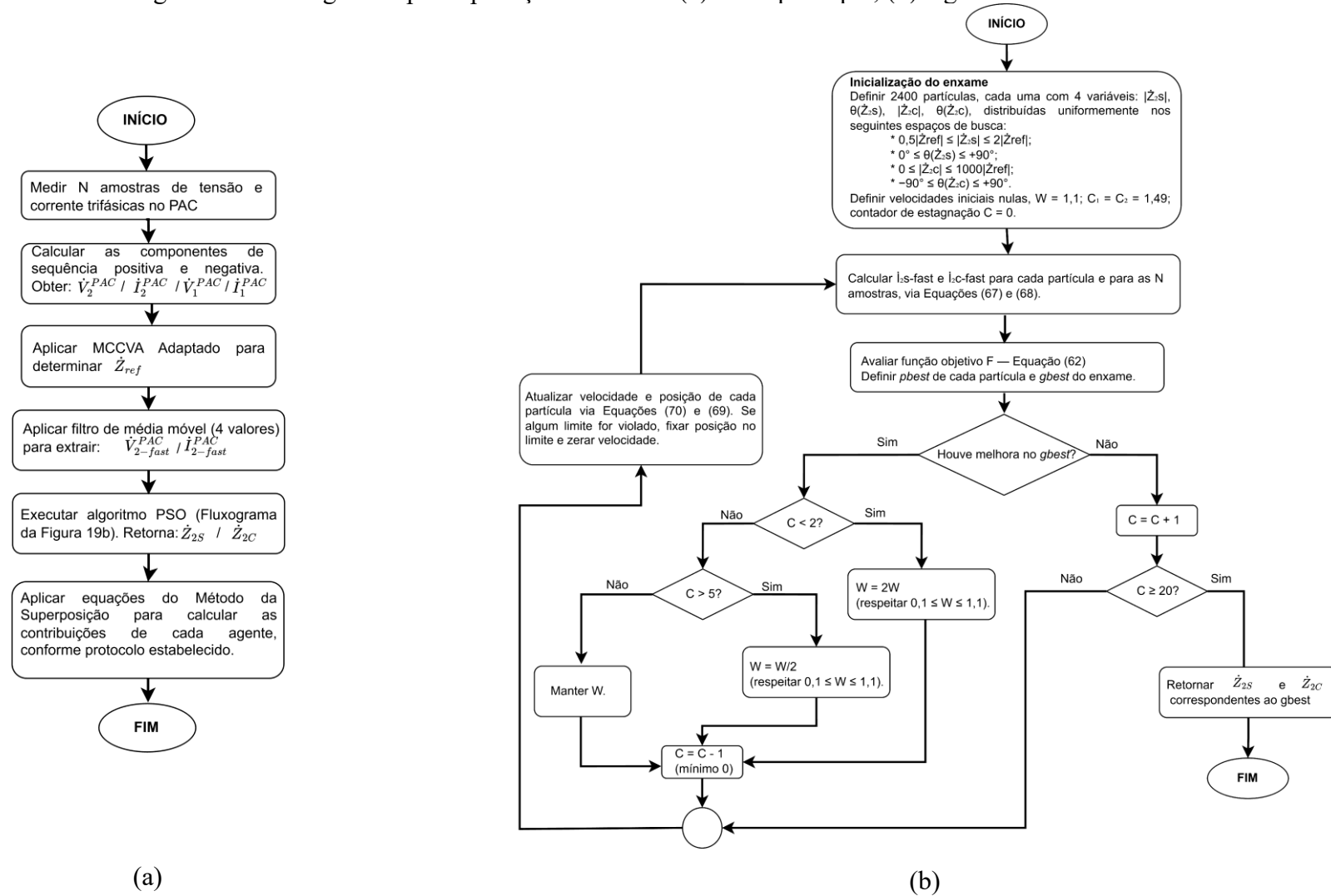
3.5.1 Especificações do algoritmo PSO empregado

Para resolver o problema de otimização relacionado à determinação das impedâncias de sequência negativa dos agentes, recorreu-se a uma *toolbox* específica do Matlab [119], que emprega o PSO com as modificações sugeridas em [120], [121].

O fluxograma apresentado na Figura 19 detalha o método para a determinação das impedâncias dos agentes e suas respectivas contribuições para o fenômeno dos desequilíbrios de tensão. O fluxo principal do MMC, ilustrado na Figura 19(a), sintetiza as etapas desde a aquisição das medições até a obtenção das contribuições dos agentes. O detalhamento do algoritmo PSO é apresentado na Figura 19(b). Na fase de inicialização, as partículas são distribuídas uniformemente no espaço de busca e as velocidades iniciais são definidas como nulas. Durante as iterações do PSO, são calculadas novas velocidades e posições. Caso, em alguma iteração, a partícula atinja um valor que extrapole os limites estabelecidos, sua posição é definida como o próprio valor do limite e sua velocidade é zerada.

Um aspecto importante a ser destacado do algoritmo refere-se ao uso de um contador de estagnação, fundamental tanto para verificar a convergência quanto para definir o valor do fator de inércia (W), visto que este parâmetro varia durante as iterações.

Figura 19 – Fluxogramas para aplicação do MMC: (a) fluxo principal; (b) algoritmo PSO.



Fonte: Autoria Própria.

3.6 Considerações finais

Este capítulo contemplou a apresentação de uma proposta inovadora para o atendimento aos objetivos desta pesquisa, aqui denominada MMC. A abordagem desenvolvida centrou-se na busca de recursos para superar as limitações de consistência e convergência observadas nos métodos clássicos da literatura. Os fundamentos que norteiam o processo de análise elaborado encontram sustentação na premissa da independência estatística entre as fontes de corrente dos agentes.

Um dos pilares para a consolidação dessa proposta foi a validação empírica das premissas adotadas. Por meio de análises estatísticas realizadas com dados de medição em campo para um sistema comercial simplificado, constatou-se que as componentes de variação rápida das correntes de sequência negativa apresentaram distribuição não gaussiana e mostraram-se, de fato, decorrelacionadas. Tais constatações não apenas sustentam a base teórica do MMC, como também validam a aplicabilidade de ferramentas estatísticas robustas no contexto dos desequilíbrios.

Adicionalmente, o procedimento incorporou uma estratégia híbrida para a definição do parâmetro de balizamento do espaço de busca. Ao adaptar o método MCCVA para operar com grandezas de sequência positiva, foi possível estimar uma impedância de referência \dot{Z}_{ref} , cuja confiabilidade é verificada pelo critério estabelecido na Seção 3.3. Na ausência de estimativa confiável, \dot{Z}_{CC} assume o papel de parâmetro de entrada, preservando a operacionalidade do método. A integração dessa estratégia com o algoritmo PSO confere ao MMC robustez e maior capacidade de convergir para valores fisicamente coerentes.

Dessa forma, o MMC apresenta-se como uma solução prática que se vale das características intrínsecas da operação do sistema elétrico (flutuações naturais e topologia da rede) como elementos úteis ao processo de identificação, indicando adequação aos fins aqui almejados.

4 AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DAS METODOLOGIAS NÃO INVASIVAS

4.1 Considerações iniciais

Uma vez estabelecidas as metodologias não invasivas definidas como ferramentas de análise aos propósitos desta pesquisa, procede-se, neste capítulo, a uma avaliação da efetividade das mesmas. Para tanto, a estratégia empregada consiste em avaliar o desempenho do MMC, de forma comparativa com o MCICA, MCCVA, MMQ e o Método das Flutuações.

Desta feita, diferentemente dos estudos conduzidos para uma rede elétrica simplificada, como feito anteriormente e utilizado na literatura, as simulações são conduzidas empregando um complexo elétrico adaptado do *IEEE Benchmark Test System*. A adoção de um sistema-teste com tal topologia se mostra adequada, visto sua maior identidade com redes elétricas comerciais.

No que tange ao ambiente de simulação, optou-se pela plataforma MATLAB/*Simulink*. Essa escolha justificou-se pelas características do ambiente computacional do *software*, que permitem a execução de simulações em paralelo, utilizando os múltiplos núcleos de processamento do supercomputador disponível nas instalações da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), cujo recurso possibilita o processamento simultâneo dos diversos cenários avaliados. Somado a isso, a integração entre o *Simulink* e o ambiente MATLAB facilita a transferência e o tratamento de dados, contribuindo para a implementação dos métodos em análise.

4.2 Caracterização do sistema teste para os estudos computacionais

Como mencionado acima, as simulações computacionais utilizaram por base o arranjo elétrico *IEEE Benchmark Test System for Harmonic Contribution Determination Studies* (IEEE-BTS-HCD), elaborado pela força-tarefa do IEEE [44], [67], [122]. Embora este sistema-teste seja amplamente utilizado na literatura, com mais de 21 publicações registradas sobre o uso desta estrutura [46], vale destacar que sua concepção original foi focada na análise de propagação e na identificação de fontes relacionadas com o indicador de distorção harmônica.

Feitas as adequações necessárias, foi então estabelecido o sistema elétrico indicado no diagrama unifilar da Figura 20, o qual, de forma a preservar as condições operativas iniciais, foi mantido com sua frequência original de 50 Hz.

As alterações feitas em relação ao arranjo original *IEEE-BTS-HCD* compreendem simplificações dos elementos constituintes dos três consumidores. Estes, muito embora tenham mantido as cargas, passaram a incluir cargas passivas monofásicas visando a imposição dos desequilíbrios de corrente e tensão nos PACs. Cabe destacar que a opção por cargas monofásicas como mecanismo de imposição do desequilíbrio foi motivada pelo objetivo de amplificar a intensidade do desequilíbrio no PAC, haja vista que por concentrar toda a assimetria em uma única fase, a carga monofásica produz uma componente de sequência negativa de corrente mais elevada do que produziria uma carga bifásica de mesma potência. Reconhece-se que desequilíbrios dessa magnitude são mais comumente associados a cargas distribuídas entre duas fases do que a cargas estritamente monofásicas. Todavia, do ponto de vista da aplicação dos métodos avaliados, essa distinção não tem relevância, uma vez que ambas as configurações geram componentes de sequência negativa de corrente no PAC, que é a grandeza efetivamente explorada pelos métodos. Ademais, as potências dos transformadores de atendimento dos consumidores foram também alteradas. Ainda, foi feito um ajuste da magnitude da impedância equivalente da rede em Alta Tensão (AT), visando a obtenção de níveis elevados de desequilíbrios nos PACs.

A topologia estabelecida compreende uma rede contendo áreas em Alta Tensão (AT), MT e BT, sendo o suprimento feito em 110 kV (AT) com a magnitude da impedância equivalente ajustada para obtenção de um nível de desequilíbrio máximo de 1,5% nos PACs. A relação X/R para a impedância equivalente do supridor é igual a 10. O barramento de AT está conectado ao transformador TR4, do qual são derivados os alimentadores que suprem as unidades consumidoras através de ramais independentes (LT 1, Cabo 1 e Cabo 2). Os PACs a serem focados nos estudos encontram-se identificados junto aos transformadores (TR1, TR2 e TR3). Os parâmetros dos componentes do sistema estão indicados na Tabela 9.

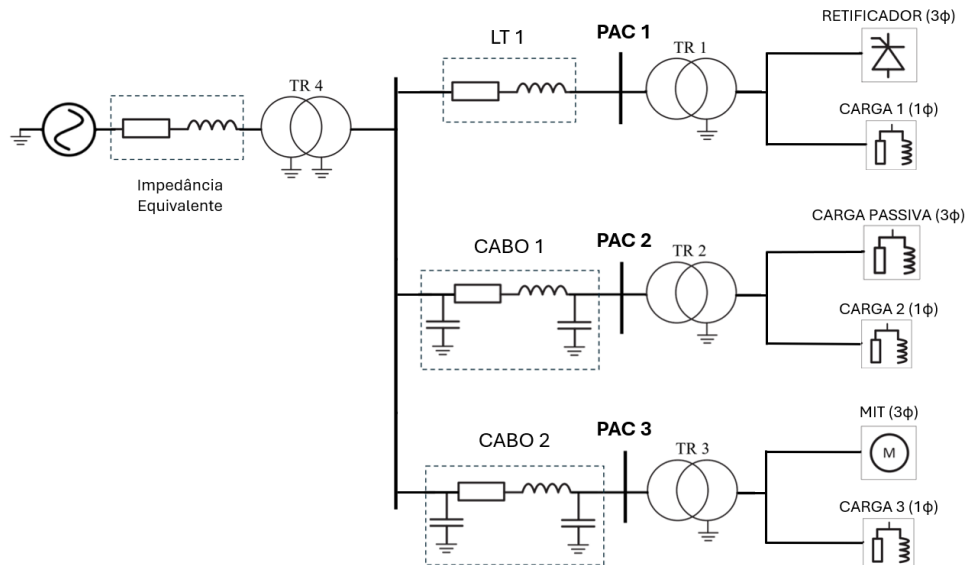
Com o objetivo de validar a eficácia dos métodos frente a diferentes perfis de consumo, definiu-se uma composição heterogênea de cargas, em que pese o fato de que cada consumidor possui uma demanda constituída por uma carga trifásica equilibrada predominante e uma passiva monofásica, objetivando a introdução de desequilíbrios controlados no sistema.

As características específicas de cada consumidor são:

- **Consumidor 1 (Predominância Não-Linear):** Composto por um retificador trifásico equilibrado e uma carga passiva monofásica.

- **Consumidor 2 (Predominância Passiva):** Formado por uma carga RL trifásica equilibrada e uma carga passiva monofásica.
- **Consumidor 3 (Predominância Motriz):** Constituído por um motor de indução trifásico (MIT) e uma carga passiva monofásica.

Figura 20 – Diagrama unifilar do sistema elétrico teste para estudos sobre a determinação das contribuições de desequilíbrios.



Fonte: Adaptado de [122].

Tabela 9 – Parâmetros do sistema elétrico em análise.

Elementos do Sistema	Parâmetros
Fonte de suprimento	$V_n = 110 \text{ kV}; f = 50 \text{ Hz}; Z = 12,04 + j120,40 \ \Omega$.
Transformador TR4	$S_n = 10 \text{ MVA}; V_p/V_s = 110 \text{ kV}/21 \text{ kV}; \text{Conexão} = \text{YN}/\text{yn}; Z\% = 11\%$.
Transformador TR1, TR2 e TR3	$S_n = 2 \text{ MVA}; V_p/V_s = 21 \text{ kV}/0,42 \text{ kV}; \text{Conexão} = \text{D}/\text{yn}; Z\% = 4\%$.
(LT 1) Linha de transmissão 1	$V_n = 20 \text{ kV}; R' = 0,57 \ \Omega/\text{km}; L' = 0,38 \text{ mH}/\text{km}; \text{Comprimento} = 1 \text{ km}$.
Cabo 1	$V_n = 20 \text{ kV}; R' = 0,5 \ \Omega/\text{km}; L' = 0,45 \text{ mH}/\text{km}; C' = 0,09 \ \mu\text{F}/\text{km}; \text{Comprimento} = 2 \text{ km}$.
Cabo 2	$V_n = 20 \text{ kV}; R' = 0,5 \ \Omega/\text{km}; L' = 0,45 \text{ mH}/\text{km}; C' = 0,09 \ \mu\text{F}/\text{km}; \text{Comprimento} = 1,5 \text{ km}$.

CARGA 1, CARGA 2, e CARGA 3	$S_n = 400$ kVA (monofásico); FP = 0,98 indutivo.
Retificador (consumidor 1)	$S_n = 900$ kVA (trifásico/equilibrado); FP = 0,97 indutivo.
Carga passiva (consumidor 2)	$S_n = 900$ kVA (trifásico/equilibrado); FP = 0,97 indutivo.
Carga Motriz (consumidor 3)	$S_n = 900$ kVA (trifásico/equilibrado); FP = 0,91 indutivo.

Fonte: Autoria própria.

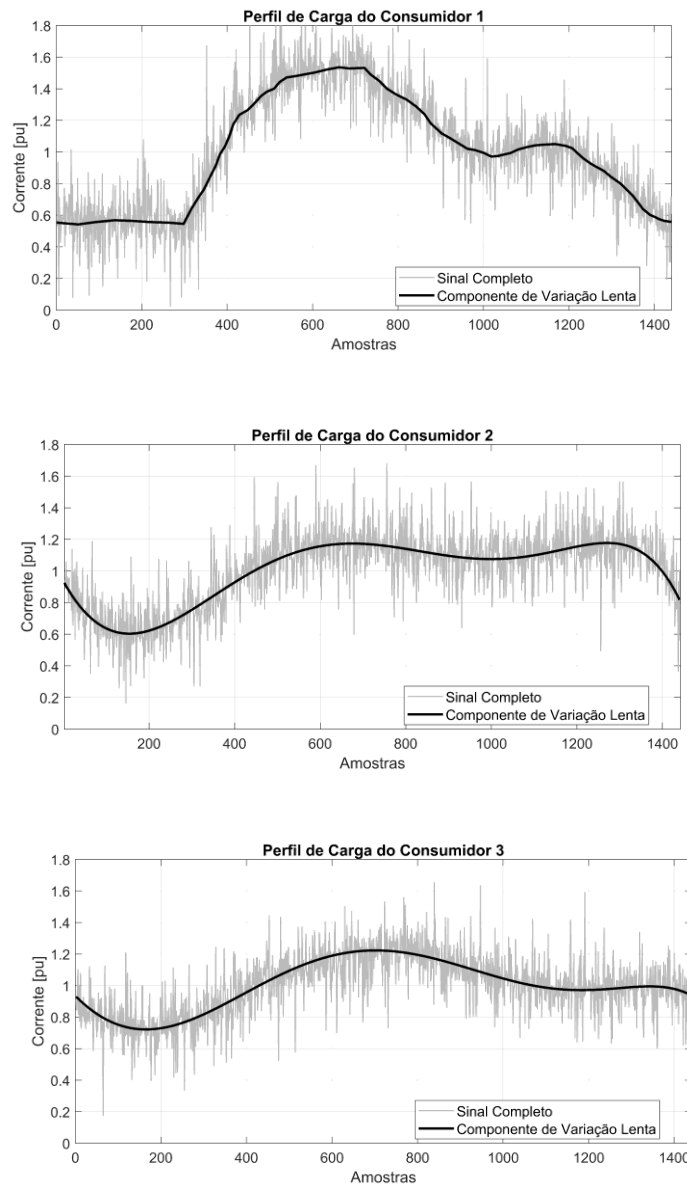
4.2.1 Modelagem dinâmica do sistema elétrico

De acordo com os fundamentos estabelecidos, a aplicação de métodos não invasivos exige, além das informações topológicas e paramétricas, um comportamento dinâmico nos registros de tensão e corrente. Portanto, simulações em regime puramente estático (carga constante) são insuficientes e, para emular um cenário com identidade operacional com sistemas comerciais, adotou-se uma estratégia baseada na imposição de perfis de variação temporal às cargas. Embora essa abordagem metodológica encontre respaldo na literatura [113], [123], destaca-se que, para fins da obtenção de um banco de dados similares àqueles advindos de medições, o comportamento dinâmico é considerado diretamente nos parâmetros dos consumidores modelados, permitindo, assim, uma avaliação do comportamento dos métodos frente às interações reais entre diferentes tipos de carga e a rede.

Para a construção dos perfis de carga, foram impostas duas componentes distintas, como mostrado na Figura 21. Estas compreendem:

- **Uma Componente de Variação Lenta:** a qual reflete o comportamento macro do consumo, influenciado por rotinas operacionais. No estudo em questão foram utilizadas curvas típicas normalizadas para cada consumidor, baseadas nas referências [79], [124], com valor médio ajustado para 1,0 pu. O Consumidor 1 apresenta um perfil de característica industrial, com rampa acentuada de crescimento, pico de demanda concentrado no meio do período e queda simétrica ao final. Os Consumidores 2 e 3, por sua vez, exibem comportamento mais estável ao longo do período, típico de unidades comerciais ou residenciais, com variações lentas e sem picos pronunciados.
- **Uma Componente de Variação Rápida:** representando as flutuações aleatórias do sistema (comutações, transientes etc.). Esta componente foi modelada através de uma distribuição de Laplace (que se caracteriza como uma distribuição supergaussiana) com média (μ) igual a zero e variância (σ^2) igual a 0,02. A escolha da distribuição e dos valores citados foram baseadas nas referências [28], [113].

Figura 21 – Perfis de carga impostos aos consumidores.



Fonte: Autoria Própria.

É importante ressaltar que os perfis ilustrados na Figura 21 foram aplicados exclusivamente às cargas monofásicas, visto que estas são as fontes causadoras de desequilíbrio no sistema. Para os componentes trifásicos equilibrados de cada consumidor (retificador, carga RL e motor), a componente de variação lenta foi fixada em um patamar constante de 1,0 pu, mantendo-se, contudo, a inserção da variação rápida com distribuição de Laplace. Optou-se por um patamar constante pelo fato de variações lentas em cargas equilibradas não influenciarem o desempenho dos métodos de compartilhamento de responsabilidade.

Para os estudos de caso, definiu-se um horizonte de simulação composto por 1440 amostras, como estabelecido em pesquisas já realizadas sobre o tema [28], [39], [79]. Este número de amostras representa um ciclo diário de 24 horas, a cada intervalo de 1 minuto. Ressalta-se, contudo, que a metodologia não se restringe a este intervalo ou taxa de registros, sendo aplicável a diferentes janelas de agregação temporal, conforme será explorado no próximo capítulo.

A simulação no ambiente MATLAB/*Simulink* foi estruturada de forma sequencial e automatizada através de um *script*. Para cada amostra, o valor instantâneo de potência é convertido nos parâmetros físicos dos componentes: resistência equivalente do retificador, impedância das cargas passivas e torque mecânico do motor, garantindo que o perfil da demanda siga a curva estipulada. Após a atualização dos parâmetros, o sistema é simulado até atingir a resposta em regime permanente, momento em que os valores de tensão e corrente são armazenados. Esse processo é repetido para cada uma das 1440 amostras, e a concatenação desses resultados gera a série temporal utilizada na análise dos métodos.

As simulações foram conduzidas no domínio do tempo, em modo discreto, utilizando o Simulink integrado ao MATLAB. O ambiente *Specialized Power Systems* foi empregado para a modelagem dos elementos elétricos, com o solver *Tustin/Backward Euler* (TBE) adotado para a integração numérica. Os dados de tensão e corrente foram coletados diretamente do ambiente de simulação e tratados no MATLAB para a aplicação dos métodos de compartilhamento de responsabilidade.

Os transformadores e a fonte equivalente de suprimento seguiram a modelagem adotada para o sistema IEEE-BTS-HCD, com a ressalva de que os cabos do lado de baixa tensão não foram representados, dado que seu impacto é desprezível para os fins desta análise. O Consumidor 1 foi representado por uma carga indutiva trifásica em série com um retificador trifásico não controlado de ponte completa (seis diodos), implementado por meio do bloco *Universal Bridge* da biblioteca do Simulink, com carga resistiva na saída CC e sem filtro. O Consumidor 2 foi representado por uma carga RL trifásica equilibrada. O Consumidor 3 foi representado pelo bloco *Asynchronous Machine* da biblioteca do Simulink, que implementa o modelo de máquina de indução trifásica em referencial dq. As cargas responsáveis pela introdução dos desequilíbrios nos três consumidores foram representadas por elementos RL monofásicos, conectados individualmente em cada PAC.

4.3 Condições operacionais consideradas na análise

Para avaliar a robustez dos métodos de determinação de responsabilidade sobre os desequilíbrios, foram estruturados seis cenários operacionais distintos. Estes cenários correspondem a diferentes proporções para os desequilíbrios injetados na rede por cada agente, ressaltando-se que a topologia do sistema e o perfil de consumo base permaneceram inalterados. Quanto às cargas trifásicas equilibradas presentes nos consumidores, estas foram mantidas com valor médio da curva de carga fixado em 1,0 pu para todos os casos estudados. Dessa forma, a variação entre os cenários ocorre exclusivamente pela alteração dos fatores de escala aplicados sobre os perfis das cargas monofásicas, criando situações de responsabilidade distintas.

Quanto aos estudos feitos nas simulações, estes foram divididos em dois grupos estratégicos:

- **Cenários de Dominância Isolada (Condição I a III):** Visando uma contribuição majoritária de um dos consumidores, este estudo compreende o funcionamento da instalação tal que apenas um único consumidor opera com sua carga monofásica em valor nominal (média de 1,0 pu), enquanto os demais com uma contribuição baixa (média de 0,1 pu);
- **Cenários de Responsabilidade Compartilhada (Condição IV a VI):** Nesta condição operacional, todos os agentes contribuem de forma significativa para o desequilíbrio, sendo um deles com carga monofásica nominal (1,0 pu) e os demais produzindo desequilíbrios de 0,5 pu.

As condições operacionais específicas para cada caso são detalhadas a seguir:

- **Condição I (Dominância do Consumidor 1):** O Consumidor 1 opera com potência média da carga monofásica em 1,0 pu, enquanto os Consumidores 2 e 3 operam com cargas monofásicas reduzidas (0,1 pu).
- **Condição II (Dominância do Consumidor 2):** O Consumidor 2 assume a dominância do desequilíbrio (carga monofásica em 1,0 pu) e os demais operam em 0,1 pu.
- **Condição III (Dominância do Consumidor 3):** O Consumidor 3 é o dominante (carga monofásica em 1,0 pu), com os outros em 0,1 pu.
- **Condição IV (Responsabilidade compartilhada com foco no Consumidor 1):** O Consumidor 1 é mantido com sua carga monofásica em 1,0 pu, e os Consumidores 2 e 3 passam a contribuir com cargas monofásicas de 0,5 pu.

- **Condição V (Responsabilidade compartilhada com foco no Consumidor 2):** O Consumidor 2 opera com carga monofásica em 1,0 pu, com os demais contribuindo com 0,5 pu.
- **Condição VI (Responsabilidade compartilhada com foco no Consumidor 3):** O Consumidor 3 opera com carga monofásica em 1,0 pu, com os demais operando com 0,5 pu.

Para todas as seis condições simuladas, as séries temporais de tensão e corrente trifásicas nos três PACs são armazenadas, formando o banco de dados que compõe a entrada para a aplicação dos métodos de identificação de responsabilidade.

4.4 Estratégia para avaliação dos métodos

Nesta seção é apresentada a lógica aplicativa dos estudos conduzidos para os cenários operacionais de simulação supramencionados. Destaca-se que, muito embora os fundamentos teóricos de cada metodologia (MMC, MCICA, MCCVA, MMQ e Método das Flutuações) tenham sido apresentados no Capítulo 2, as etapas associadas com a estratégia para a aplicação prática e o tratamento dos dados resultantes são aqui pormenorizadas.

4.4.1 Condições operacionais e tratamento de dados

A aplicação de métodos não invasivos exige o cumprimento de dois requisitos fundamentais, cujas naturezas são, muitas vezes, conflitantes. Primeiramente, observa-se que os modelos assumem que a impedância dos agentes permanece constante durante a janela de análise. Isso favorece o uso de janelas temporais curtas para minimizar a influência de alterações dos agentes supridor e consumidor. Por outro lado, vale destacar que os algoritmos baseados em correlações e variâncias (como o MCCVA, MCICA e MMC) demandam uma quantidade mínima de amostras para garantir a convergência dos cálculos e reduzir o erro estatístico, o que favorece o uso de janelas mais longas.

Para equilibrar esses requisitos, adotou-se uma estratégia de segmentação na qual o período total de 1440 amostras foi dividido em quatro subjanelas de 360 amostras cada. Estudos preliminares de desempenho indicaram que o conjunto de 360 pontos representa uma quantidade mínima de amostras sem comprometer excessivamente a convergência dos métodos [27].

Portanto, o procedimento de estimação ocorre em duas etapas principais, sendo que a primeira compreende o cálculo por subjanela, na qual os algoritmos são aplicados individualmente em cada segmento, gerando quatro valores distintos de impedância complexa. Nesse ponto, vale destacar que o MMC e o MCICA estimam tanto as impedâncias do supridor quanto as do consumidor, enquanto o MCCVA, MMQ e o Método da Flutuação estimam apenas a impedância do supridor e usam o Método da Superposição Simplificado. Num segundo momento, é feita a identificação e o descarte de valores discrepantes (*outliers*) através de um procedimento baseado na *Distância de Mahalanobis* [125], [126]. Essa técnica avalia o valor de cada impedância estimada em relação à mediana, e aquelas amostras de impedâncias que se distanciam excessivamente da mediana são eliminadas. Após a exclusão das amostras mais divergentes, o valor final representativo é obtido pela mediana dos valores remanescentes. Essa abordagem garante que erros pontuais de convergência em uma subjanela não distorçam o resultado final. Esse procedimento é aplicado tanto para o agente supridor quanto para o consumidor, quando for o caso. Vale destacar que esse tratamento foi aplicado uniformemente a todos os métodos, garantindo isonomia na comparação.

Na etapa do MMC destinada à estimativa da impedância de referência de sequência positiva (\dot{Z}_{ref}), conforme discutido no Capítulo 3, utilizou-se o período completo para a estimação da impedância de referência.

4.4.2 Determinação dos índices de responsabilidade

Uma vez estimadas as impedâncias equivalentes dos agentes (Seção 4.4.1) e conhecidas as correntes e tensões medidas nos PACs, resta a quantificação das participações dos agentes quanto ao nível total de desequilíbrio observado. Conforme estabelecido no Capítulo 2, este cálculo é feito com base na projeção dos fasores representativos das tensões individuais produzidas pelos agentes sobre a tensão de sequência negativa total, como determina (6).

A agregação temporal desses valores instantâneos requer uma abordagem criteriosa, visto que a utilização de uma média aritmética simples dos índices percentuais ($PR\%$) ao longo da janela de medição pode conduzir a resultados enganosos devido à variabilidade da magnitude do desequilíbrio. O problema reside no fato de que o índice percentual é uma grandeza relativa, assim, para as regiões em que a tensão de sequência negativa total ($|\dot{V}_2^{PAC}|$) é muito baixa (próxima de zero), qualquer pequena flutuação nos cálculos pode resultar em índices percentuais elevados, porém desprovidos de relevância física para o sistema.

Visando superar essa limitação, esta tese utiliza um indicador de responsabilidade que pondera a contribuição de cada agente pela magnitude da tensão de sequência negativa em cada instante. Assim, o índice global é obtido pela razão entre o somatório das tensões projetadas e o somatório das magnitudes totais ao longo do período, conforme (71).

$$PR\%_{Consumidor} = \frac{\sum_{k=1}^N V_{2C-proj.}^{PAC}(k)}{\sum_{k=1}^N |\dot{V}_2^{PAC}(k)|} \cdot 100\% \quad (71)$$

Essa métrica assegura que os períodos com maiores níveis de desequilíbrio, que de fato impactam a operação da rede, exerçam maiores influências sobre o resultado final. Assim, este procedimento é utilizado nas seções seguintes para a avaliação comparativa entre o método proposto (MMC) e os demais encontrados na literatura.

4.5 Resultados computacionais

Em conformidade com a estratégia comparativa já estabelecida, procede-se, a seguir, a aplicação das metodologias de compartilhamento de desequilíbrio para os seis cenários operacionais descritos anteriormente. Uma vez obtidos os resultados, estabelece-se a correlação entre os resultados associados com o método proposto (MMC) e os procedimentos MCICA, MCCVA, MMQ e M. da Flutuação. Para fins de comparação, utiliza-se um valor exato, aqui designado como "gabarito". Esta grandeza de referência foi obtida através de um método invasivo, aplicado computacionalmente, e baseado nas equações estabelecidas em [31]. Para a obtenção do “gabarito”, foi feita a injeção de uma corrente de sequência negativa no PAC, permitindo o cálculo das impedâncias a partir das variações das grandezas elétricas registradas nos estados pré e pós-injeção. Tal abordagem foi utilizada, devido à dificuldade de determinar analiticamente a impedância de sequência negativa de determinados componentes, como os retificadores, garantindo, assim, meios para a validação dos métodos não invasivos. Assim procedendo, obtiveram-se os resultados indicados na Tabela 10 e Tabela 11, que apresentam o Fator de Desequilíbrio (FD%) médio e a responsabilidade individual dos consumidores.

Tabela 10 – Grandezas elétricas e contribuições para as condições I, II e III – “gabaritos”.

		PAC 01	PAC 02	PAC 03
Caso 1	FD% médio	0,94%	0,92%	0,92%
	Resp. Consumidor	84,32%	9,58%	7,24%

Caso 2	FD% médio	0,91%	0,95%	0,92%
	Resp. Consumidor	8,75%	85,63%	6,99%
Caso 3	FD% médio	0,77%	0,77%	0,78%
	Resp. Consumidor	10,41%	10,76%	80,21%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 11 – Grandezas elétricas e contribuições para as condições IV, V e VI – “gabaritos”.

		PAC 01	PAC 02	PAC 03
Caso 4	FD% médio	1,49%	1,50%	1,48%
	Resp. Consumidor	52,33%	28,17%	21,75%
Caso 5	FD% médio	1,48%	1,50%	1,48%
	Resp. Consumidor	26,72%	54,11%	21,62%
Caso 6	FD% médio	1,40%	1,41%	1,40%
	Resp. Consumidor	28,17%	29,13%	45,11%

Fonte: Autoria própria.

Estabelecidos os valores de referência, procede-se à análise do desempenho dos procedimentos estabelecidos para os estudos, assim como do método proposto nesta pesquisa.

Para tanto, de forma consonante com o método proposto, na Seção 4.5.1 é detalhado o processo de aplicação do MCCVA Adaptado para determinação da impedância de referência para o primeiro cenário (Condição I, PAC 1). Na sequência, a Seção 4.5.2 sintetiza os resultados da aplicação das metodologias para todos os cenários operacionais, culminando na Seção 4.5.3, com uma discussão comparativa acerca do desempenho, da eficácia e da robustez dos métodos com base nos erros observados.

4.5.1 Aplicação do MCCVA Adaptado para a determinação de \dot{Z}_{ref}

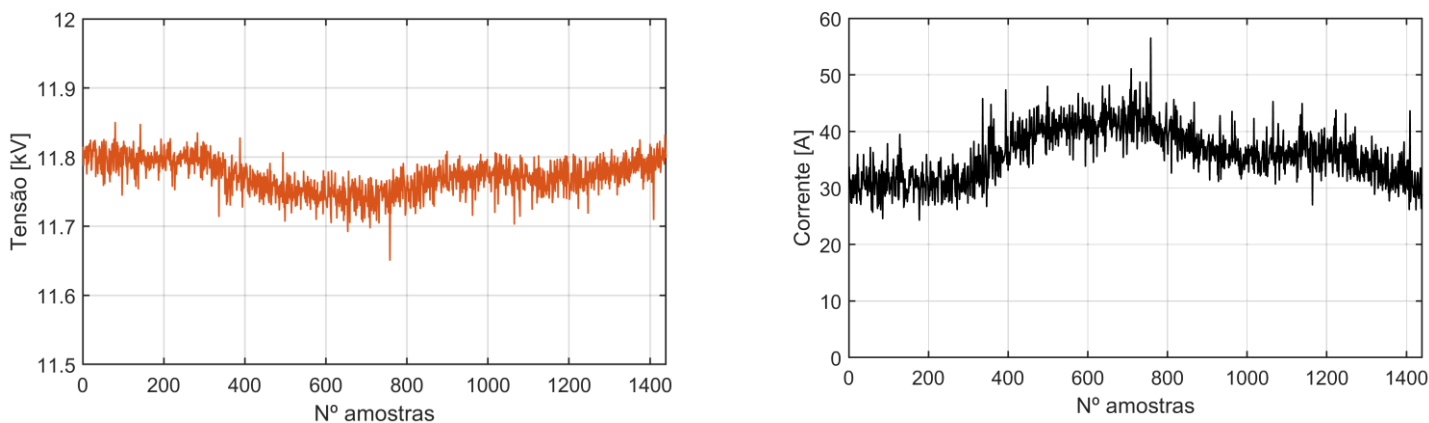
De acordo com o estabelecido na seção 3.3 (fluxograma da Figura 14), a aplicação do MMC requer um valor de impedância de \dot{Z}_{ref} por meio do MCCVA Adaptado, o qual é utilizado como parâmetro de entrada para o algoritmo principal de compartilhamento de responsabilidade dos desequilíbrios.

Considerando a análise específica para a Condição I, os registros das grandezas associadas com as tensões e correntes “registradas” para o PAC 1, que se apresentam como dados de entrada para o algoritmo proposto, são indicados na Figura 22. Esta mostra as séries

temporais de tensão e corrente de sequência positiva (\dot{V}_1^{PAC} e \dot{I}_1^{PAC}), cujas magnitudes variam ao longo das 1440 amostras registradas.

Vale destacar que o mesmo procedimento foi empregado para as demais condições e PACs, cujos respectivos resultados encontram-se no Apêndice A.

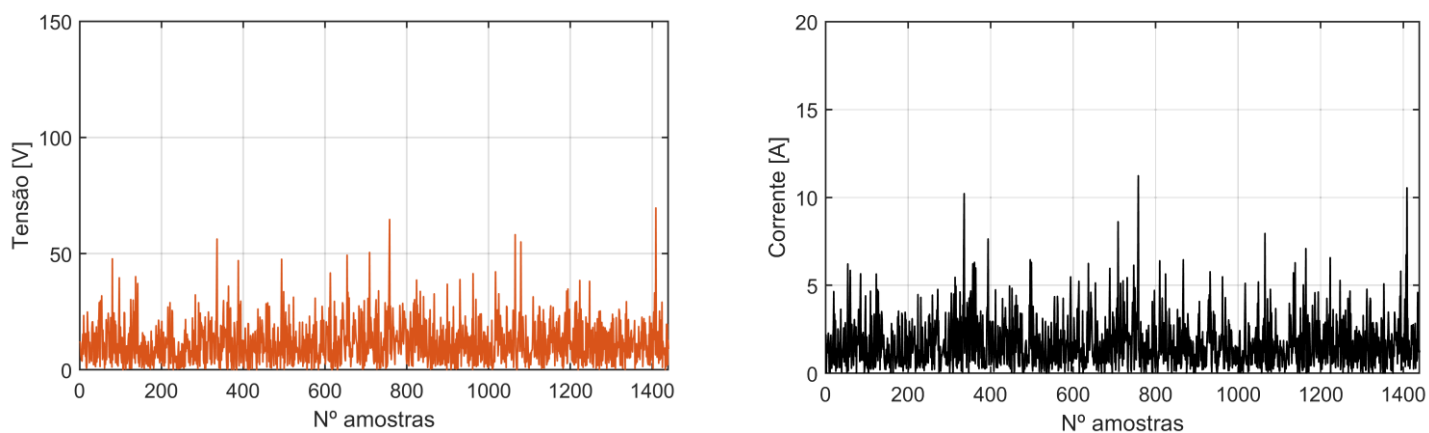
Figura 22 – Tensão e corrente de sequência positiva medidas no PAC 01 - Condição I.



Fonte: Autoria Própria.

Objetivando o isolamento da característica dinâmica do sistema, como se faz necessário à estimação, é feito o cálculo da componente de variação rápida dessas grandezas, subtraindo o sinal original de sua média móvel (calculada com uma janela de 4 amostras). As componentes resultantes (\dot{V}_{1-fast}^{PAC} e \dot{I}_{1-fast}^{PAC}), contendo apenas as flutuações, são apresentadas na Figura 23.

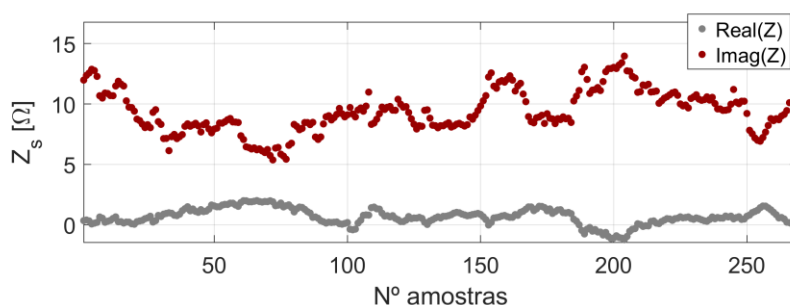
Figura 23 – Componentes de variação rápida da tensão e corrente de sequência positiva medidas no PAC 01 - Condição I.



Fonte: Autoria Própria.

O processamento desses sinais pelo MCCVA Adaptado ocorre de forma iterativa através de janelas deslizantes. Para este estudo, definiu-se intervalos compreendendo 100 amostras com um passo de deslocamento de 5 amostras, resultando em 269 iterações de cálculo ao longo do período. A Figura 24 apresenta os valores de impedância calculados para cada janela, evidenciando uma tendência de valores para a resistência (parte real) e reatância (imaginária), não obstante a presença de uma variabilidade significativa, incluindo impedâncias com resistência negativa.

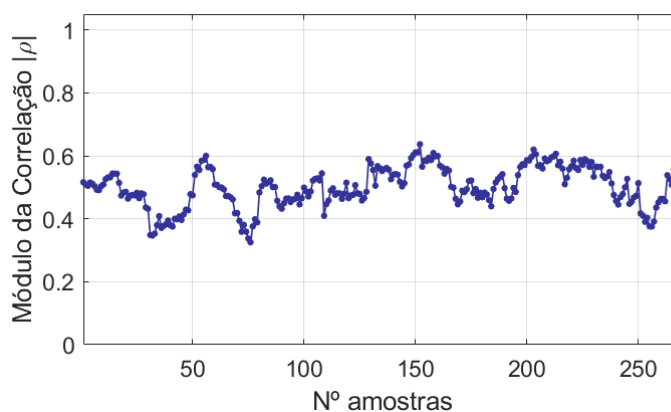
Figura 24 – Impedâncias de sequência positiva calculadas no PAC 01 - Condição I.



Fonte: Autoria Própria.

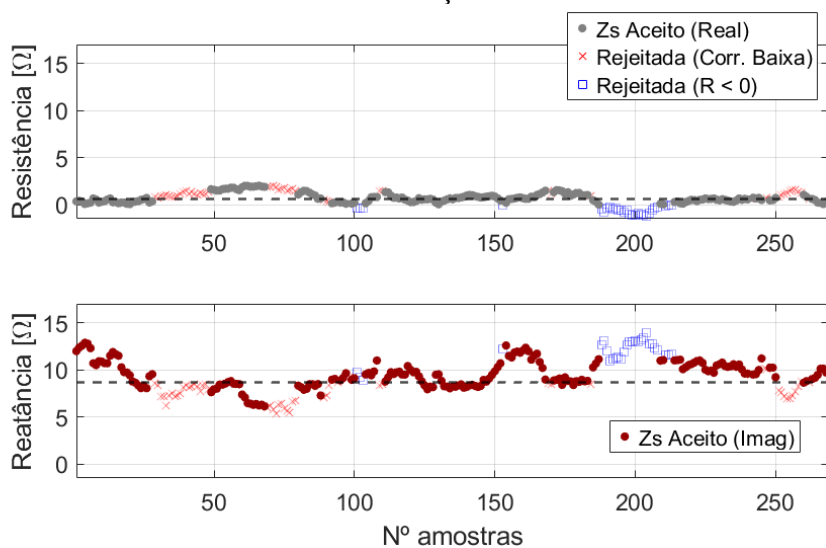
Para contornar essa dispersão e viabilizar a determinação de um valor representativo para a impedância, aplica-se um processo de filtragem destinado a rejeitar amostras inconsistentes. A filtragem utiliza os módulos dos coeficientes de correlação, presentes na Figura 25, eliminando as amostras com baixo coeficiente de correlação e com presença de parte real negativa. O resultado desse procedimento é detalhado na Figura 26, onde se observa que impedâncias com grandes variações são eliminadas, restando um conjunto de dados mais coeso.

Figura 25 – Módulo do fator de correlação entre \dot{V}_{1-fast}^{PAC} e \dot{I}_{1-fast}^{PAC} no PAC 1 - Condição I.



Fonte: Autoria Própria.

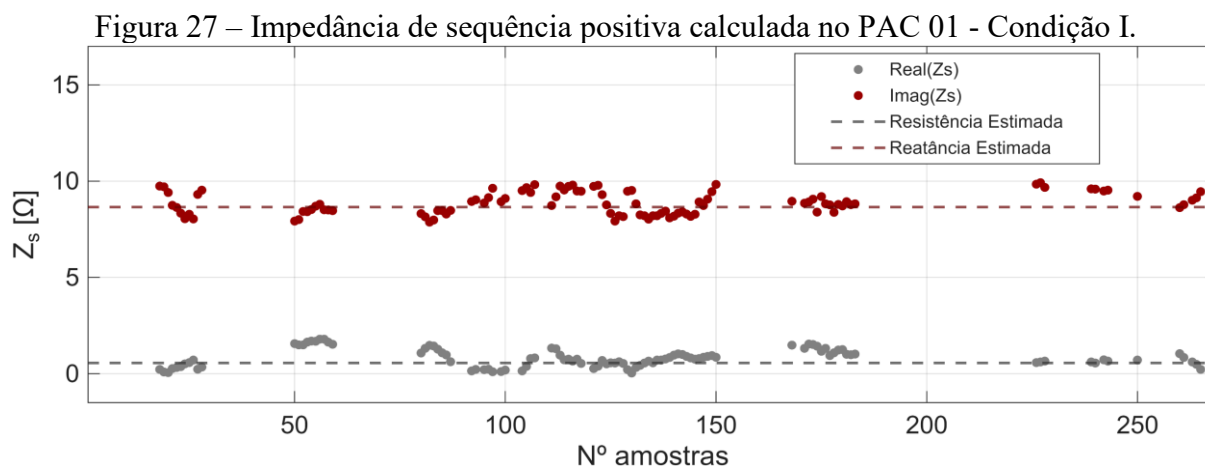
Figura 26 – Processo de seleção das impedâncias através do processo de filtragem no PAC 1 - Condição I.



Fonte: Autoria Própria.

Uma vez selecionadas as amostras, calcula-se então a impedância estimada via Moda Ponderada, atribuindo-se maior peso às janelas com elevados índices de correlação. Assim, a impedância estimada pelo MCCVA Adaptado foi de $\hat{Z}_{ref} = 0,56 + j8,65 \Omega$. Ao comparar este resultado com a impedância de curto-circuito nominal do sistema ($\hat{Z}_{CC} = 1,38 + j9,20 \Omega$), utilizada como referência de validação, observa-se que o método foi capaz de estimar a impedância com um erro de 10,62%. Nota-se que, embora a reatância tenha sido assertiva, a resistência apresentou uma discrepância considerável. Todavia, esse nível de erro é considerado adequado para a aplicação do MMC, visto que o algoritmo estabelece um espaço de busca abrangente (compreendido entre $0,5 \cdot |\hat{Z}_{ref}|$ e $2 \cdot |\hat{Z}_{ref}|$, com variação de ângulo de 0° à $+90^\circ$).

Por fim, a Figura 27 apresenta as estimativas consideradas confiáveis, ou seja, com variações inferiores a $\pm 15\%$ em relação ao valor estimado. Visto que 56,68% das amostras situam-se nesse intervalo, \hat{Z}_{ref} é validada como parâmetro de entrada para o algoritmo MMC.



Ao analisar os resultados do MCCVA Adaptado para todos os PACs e condições operativas, cujos valores de \dot{Z}_{ref} calculados encontram-se detalhados no Apêndice A, observa-se um erro médio de 10,14% na estimativa em relação à \dot{Z}_{CC} calculado analiticamente. Ressalta-se que, como será demonstrado nas seções subsequentes, esse patamar de precisão é suficiente para garantir a convergência do algoritmo MMC, haja vista os limites de busca estabelecidos para o método.

4.5.2 Determinação das contribuições para o desequilíbrio de tensão

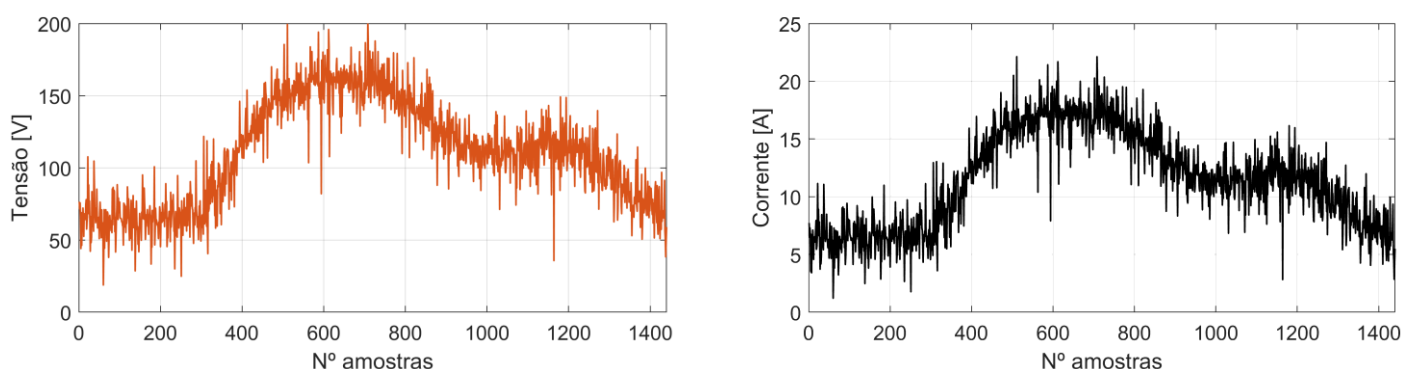
Uma vez determinada a impedância de referência do supridor, procede-se ao cálculo das parcelas de responsabilidade atribuídas a cada agente. Com o intuito de detalhar o processo de análise, a Condição I é apresentada minuciosamente, compreendendo o comportamento das grandezas elétricas de sequência negativa, as impedâncias estimadas, as projeções de tensão e os índices de contribuição resultantes. Para as demais condições (II a VI), os resultados de desempenho são apresentados de forma sintetizada, focando-se nos resultados finais e nos respectivos erros percentuais, visando uma avaliação objetiva dos métodos frente a diferentes cenários.

4.5.2.1 Condição I (dominância do consumidor I)

• Análise do PAC 1

Neste cenário, o Agente 2 (consumidor) é constituído pela unidade consumidora identificada pelo transformador TR1, retificador trifásico e Carga 1. O Agente 1 (supridor) compreende a fonte de alimentação, operando de forma conjunta com os demais consumidores e componentes que perfazem a estrutura física do arranjo utilizado. Os sinais de tensão e corrente de sequência negativa considerados como advindos de medições feitas no PAC 1, os quais formam o banco de dados requerido para a análise de compartilhamento de responsabilidade e que compreendem 1440 amostras ao longo do tempo total de “registro”, são apresentados na Figura 28.

Figura 28 – Tensão e corrente de sequência negativa no PAC 1 – Condição I.



Fonte: Autoria Própria.

Com base nas grandezas elétricas de sequência negativa e conhecendo \dot{Z}_{ref} previamente determinada pelo MCCVA Adaptado, aplicam-se, então, as metodologias conforme estabelecidas na seção 4.4. Os resultados obtidos para as impedâncias são destacados na Tabela 12 e Tabela 13. Vale lembrar que apenas o MMC e o MCICA estimam a impedância do consumidor, enquanto os demais métodos utilizam exclusivamente o parâmetro do supridor.

Tabela 12 – Impedâncias do supridor obtidas pelos métodos em relação ao gabarito no PAC 1.

Condição	Gabarito $\dot{Z}_{2S} [\Omega]$	MMC $\dot{Z}_{2S} [\Omega]$	MCICA $\dot{Z}_{2S} [\Omega]$	MCCVA $\dot{Z}_{2S} [\Omega]$	MMQ $\dot{Z}_{2S} [\Omega]$	M. Flutuação $\dot{Z}_{2S} [\Omega]$
Condição I	$1,31 + j8,12$	$1,25 + j8,15$	$1,24 + j8,22$	$1,28 + j8,12$	$1,30 + j8,09$	$1,25 + j8,18$

Fonte: Autoria própria.

Tabela 13 – Impedâncias do consumidor obtidas pelos métodos em relação ao gabarito no PAC 1.

Condição	Gabarito \dot{Z}_{2c} [Ω]	MMC \dot{Z}_{2c} [Ω]	MCICA \dot{Z}_{2c} [Ω]
Condição I	403,10 - j34,75	8,58 - j45,44	-7,61 - j6,05

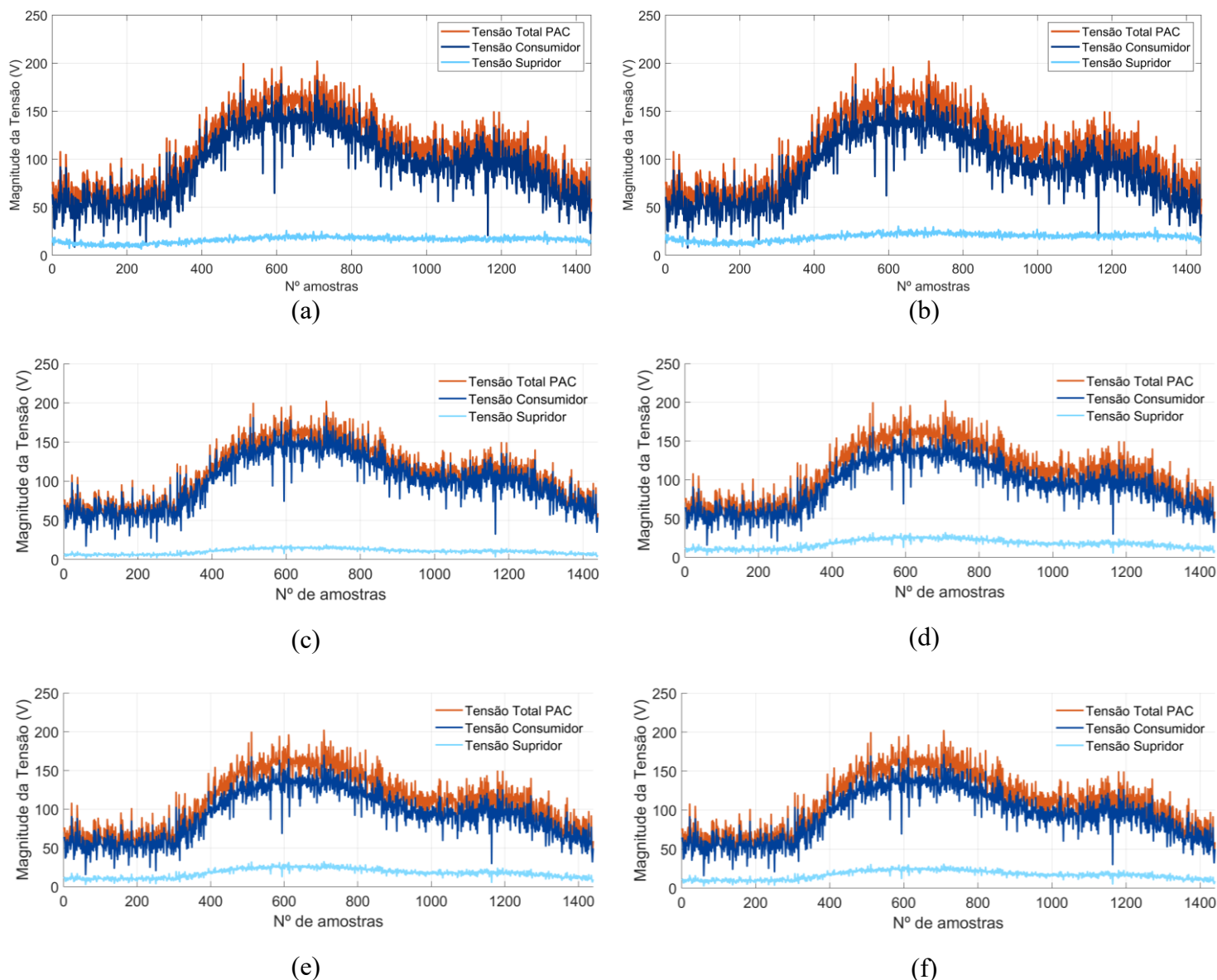
Fonte: Autoria própria.

Como pode ser constatado, as impedâncias de sequência negativa do supridor estimadas por todos os métodos apresentaram boa aderência em relação ao gabarito. Em contrapartida, as estimativas para o consumidor exibiram desvios significativos em suas magnitudes. Contudo, é fundamental destacar que erros na estimativa das impedâncias não se traduzem, necessariamente, em erros equivalentes no cálculo da responsabilidade. Isso decorre do fato de que a sensibilidade desse cálculo em relação à impedância não é linear, sendo fortemente influenciada pelo cenário de dominância e pela relação entre as magnitudes das correntes e impedâncias de cada agente.

Em relação à impedância do consumidor, nota-se que ambos os métodos calcularam valores divergentes. Todavia, como será discutido na sequência, mesmo com divergências na estimativa das impedâncias, os métodos convergem para índices de responsabilidade condizentes com o gabarito. Esse fato reforça que a métrica principal de eficácia deve ser a precisão da contribuição calculada, e não isoladamente a exatidão dos parâmetros de impedância.

Com as impedâncias estimadas, procedeu-se ao cálculo das parcelas de responsabilidades sobre o efeito final das tensões de sequência negativa totais. Para o MMC e o MCICA, utilizou-se o Método da Superposição Completo, conforme (4) e (5). Para os métodos MCCVA, MMQ e M. Flutuação, empregou-se o Método da Superposição Simplificado, de acordo com (29) e (30). As tensões de cada agente foram então projetadas sobre a tensão total de sequência negativa no PAC, conforme estabelece a estratégia sintetizada na Figura 5. A magnitude dessas projeções ao longo do tempo é apresentada na Figura 29.

Figura 29 – Magnitude das projeções das tensões de responsabilidade no PAC 1 - Condição I
 – (a): Gabarito, (b): MMC, (c): MCICA, (d): MCCVA, (e): MMQ, (f): M. Flutuação.

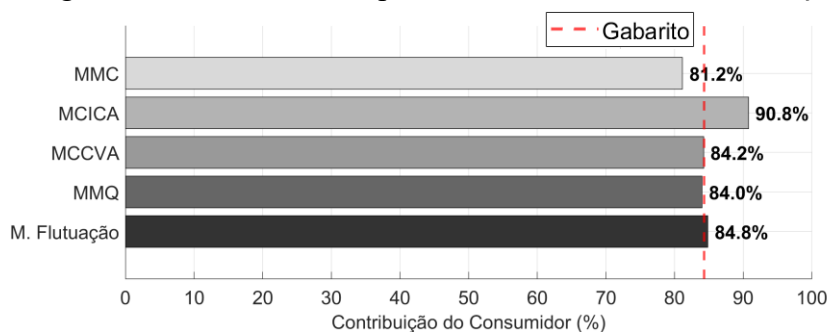


Fonte: Autoria Própria.

Com base nas projeções acima apresentadas, (71) é então aplicada para consolidar os índices de responsabilidade do consumidor. Os resultados assim obtidos são indicados na Figura 30, a qual ilustra esses percentuais e suas correlações com o gabarito, que é de 84,32%. Ressalta-se que a avaliação da precisão é realizada por meio da diferença aritmética entre esses valores, portanto, os erros de cada método são expressos em pontos percentuais (pp) na Tabela 14. Nesta e nas demais tabelas de erro, células destacadas em amarelo indicam erros entre 10 pp e 20 pp, enquanto células destacadas em vermelho indicam erros superiores a 20 pp ou

condições em que o método não foi capaz de convergir para um resultado. Erros abaixo de 10 pp, sem destaque, são considerados adequados para os propósitos desta análise.

Figura 30 – Parcelas de responsabilidade no PAC 1 – Condição I.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 14 – Erro dos métodos em análise.

	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação
Consumidor 1	3,15 pp	6,45 pp	0,08 pp	0,32 pp	0,52 pp

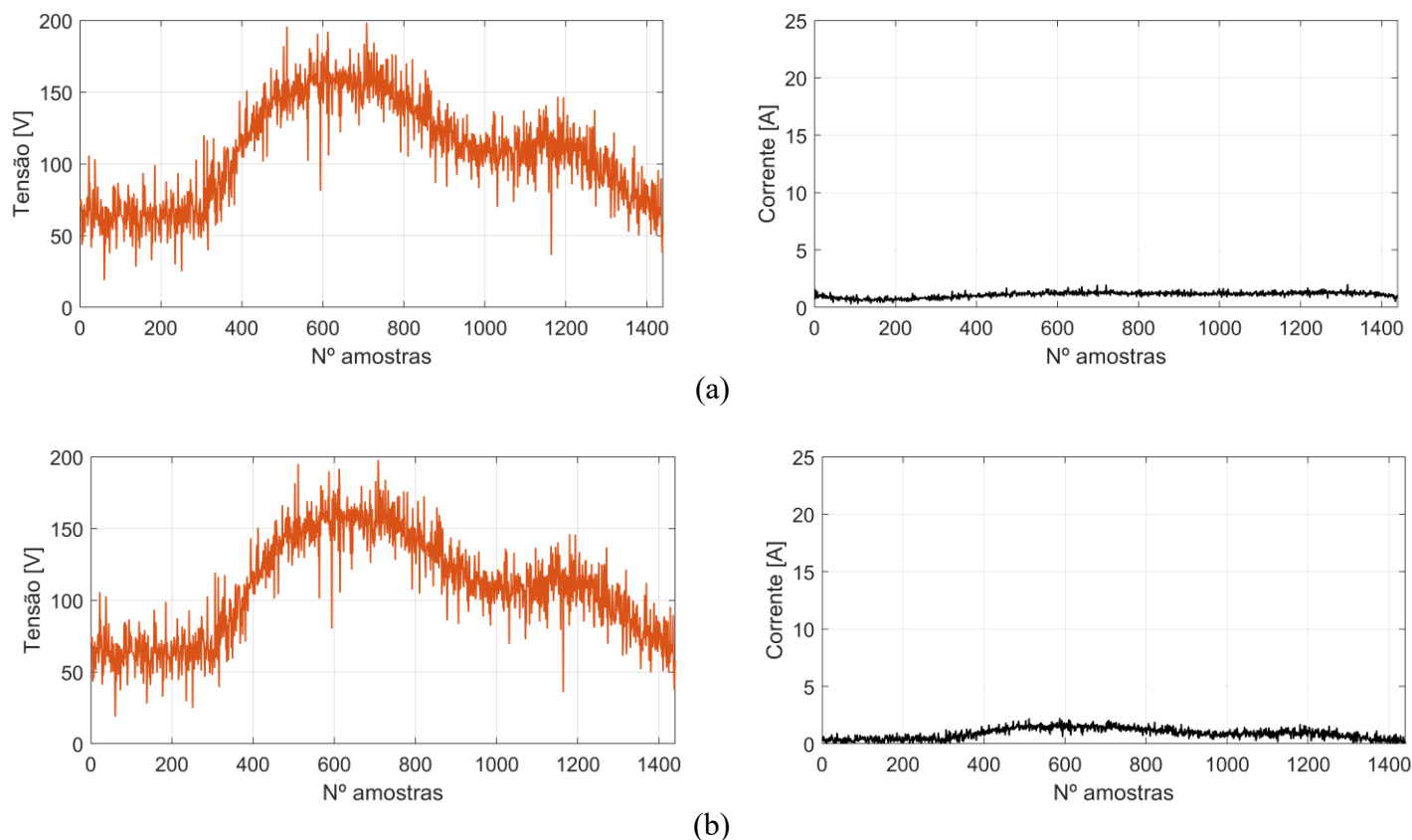
Fonte: Autoria própria.

- **Análise dos demais consumidores (PACs 2 e 3)**

Para os consumidores 2 e 3, que se apresentam com suas cargas monofásicas de menor potência, a análise segue a mesma lógica. Como já mencionado, objetivando evitar redundâncias explicativas, apenas os resultados finais são mostrados abaixo. As demais informações associadas com estes barramentos encontram-se pormenorizadas no Apêndice A.

Assim, a Figura 31 apresenta as grandezas elétricas que representam a dinâmica operacional das componentes de sequência negativa nos PACs 2 e 3, respectivamente. Nota-se que as correntes de sequência negativa para os barramentos 2 e 3 se apresentam com valores inferiores aos estabelecidos para o PAC 1.

Figura 31 – Tensão e corrente de sequência negativa para Condição I – a: PAC 2, b: PAC 3.



Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 15 e Tabela 16 apresentam as impedâncias estimadas para os métodos em análise.

Tabela 15 – Impedâncias do supridor obtidas pelos métodos em relação ao gabarito.

Condição	PAC	Gabarito	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação
		$\dot{Z}_{2S} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2S} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2S} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2S} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2S} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2S} [\Omega]$
Condição I	PAC 2	$1,74 + j8,33$	$1,19 + j12,88$	$1,89 + j13,57$	$0,25 + j16,37$	$0,65 + j15,04$	$5,75 + j20,01$
	PAC 3	$1,62 + j9,39$	$0,92 + j7,50$	$-0,17 + j1,32$	***	***	$2,00 - j26,80$

*** O Método não calculou nenhum valor de impedância.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 16 – Impedâncias do consumidor obtidas pelos métodos em relação ao gabarito.

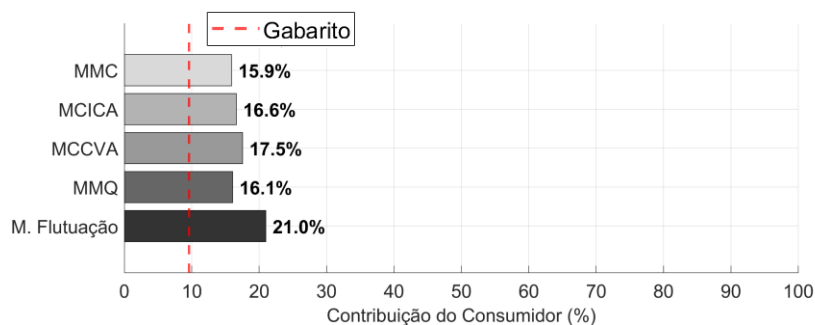
Condição	PAC	Gabarito	MMC	MCICA
		$\dot{Z}_{2C} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2C} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2C} [\Omega]$
Condição I	PAC 2	$378,90 + j78,72$	$255,47 + j158,16$	$256,29 + j123,34$
	PAC 3	$13,76 + j60,06$	$9,05 + j59,02$	$9,22 + j61,13$

Fonte: Autoria própria.

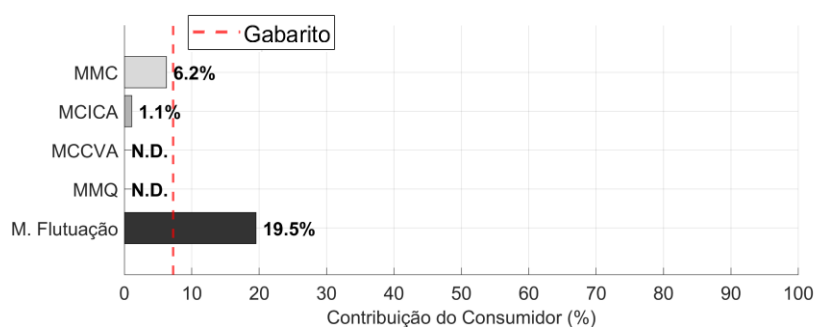
As parcelas de responsabilidade de referência (gabarito), destacadas pela linha tracejada em vermelho, para os consumidores dos PACs 2 e 3 foram de 9,58% e 7,24%, respectivamente.

Na Figura 32 é feita a correlação dos valores obtidos para os percentuais de responsabilidade estimados por cada método com os esperados.

Figura 32 – Parcelas de responsabilidade para Condição I – (a): PAC 2, (b): PAC 3.



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria.

Por fim, o erro referente a cada método é apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 – Erro dos métodos em análise nos PACs 2 e 3 – Condição I.

	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação
Consumidor 2	6,34 pp	7,05 pp	7,96 pp	6,50 pp	11,42 pp
Consumidor 3	1,00 pp	6,14 pp	***	***	12,29 pp

*** Não foi possível calcular.

Fonte: Autoria própria.

4.5.2.2 Condição II (dominância do consumidor 2)

Na Condição II, o cenário operacional foi configurado de tal modo que o Consumidor 2 fosse dominante sobre os níveis obtidos para os desequilíbrios no sistema. Para isso, a magnitude de sua carga desequilibrada foi elevada para 1,0 pu, enquanto as cargas monofásicas dos Consumidores 1 e 3 foram reduzidas para 0,1 pu.

Os resultados obtidos para os estudos em pauta, no que tange ao gabarito, encontram-se apresentados na Tabela 18.

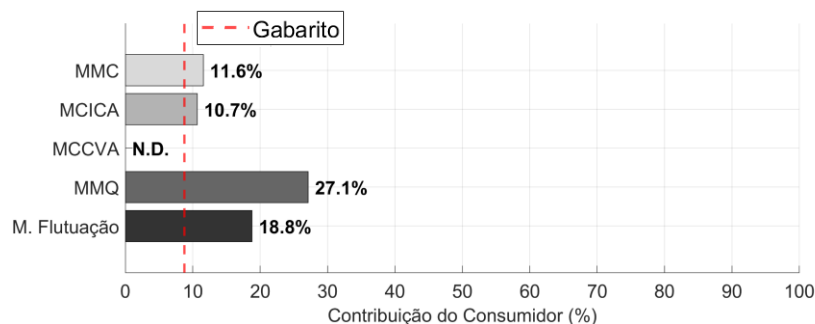
Tabela 18 – Parcela de contribuição dos consumidores – Condição II.

Consumidor 1	Consumidor 2	Consumidor 3
8,75%	85,63%	6,99%

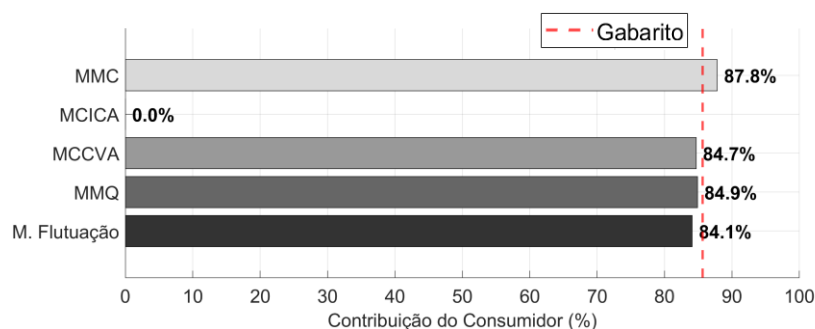
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 33 são apresentadas as parcelas de responsabilidade estimadas pelos métodos avaliados para cada PAC e a correlação entre os valores e os esperados (linha vertical tracejada). Novamente, maiores informações sobre as etapas para se chegar aos resultados encontram-se no Apêndice A.

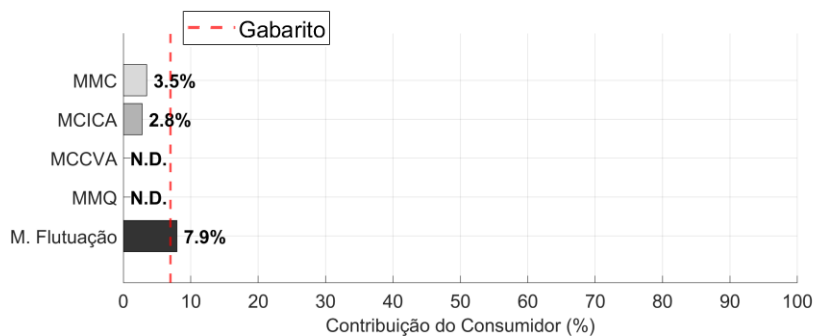
Figura 33 – Parcelas de responsabilidade para Condição II – (a): PAC 1, (b): PAC 2, (c): PAC 3.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria Própria.

Por fim, os erros associados com cada método estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Erro dos métodos em análise – Condição II.

	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação
Consumidor 1	2,82 pp	1,93 pp	***	18,39 pp	10,04 pp
Consumidor 2	2,20 pp	85,63 pp	0,92 pp	0,72 pp	1,54 pp
Consumidor 3	3,53 pp	4,21 pp	***	***	0,95 pp

*** Não foi possível calcular.

Fonte: Autoria própria.

4.5.2.3 Condição III (dominância do consumidor 3)

Prosseguindo com as análises, para esta situação as condições operativas do sistema foram ajustadas de forma tal que o Consumidor do PAC 3 se apresente como a fonte dominante de desequilíbrio. Para tanto, a magnitude de sua carga desequilibrada foi elevada para 1,0 pu, enquanto as cargas monofásicas dos Consumidores dos PACs 1 e 2 foram reduzidas para 0,1 pu.

A Tabela 20 exhibe os valores de contribuição de referência (gabarito) calculados para cada PAC.

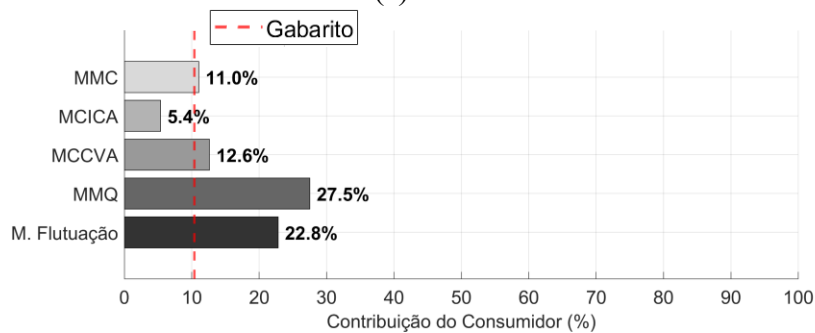
Tabela 20 – Parcela de contribuição dos consumidores – Condição III.

Consumidor 1	Consumidor 2	Consumidor 3
10,41%	10,76%	80,21%

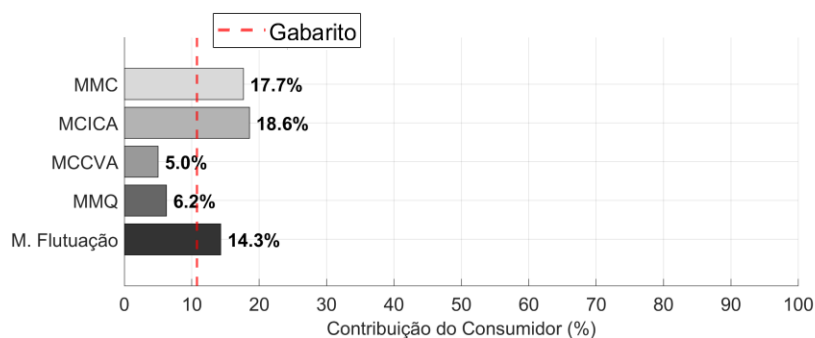
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 34 apresentam-se as parcelas de responsabilidade estimadas pelos métodos avaliados.

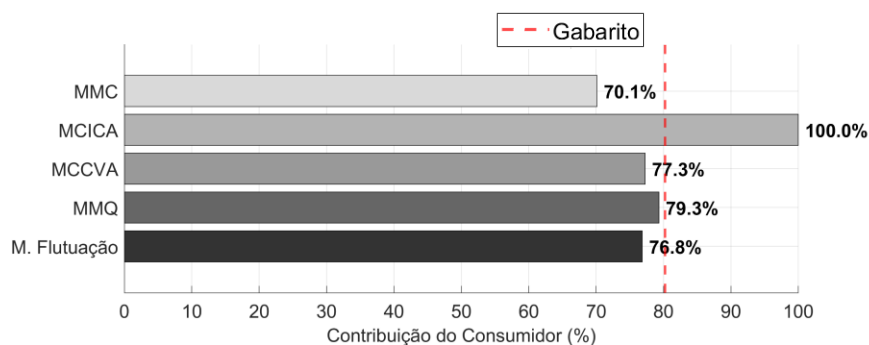
Figura 34 – Parcelas de responsabilidade para Condição III – (a): PAC 1, (b): PAC 2, (c): PAC 3.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria Própria.

Por fim, a Tabela 21 apresenta a síntese dos erros percentuais em relação aos valores de referência.

Tabela 21 – Erro dos métodos em análise – Condição III.

	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação
Consumidor 1	0,64 pp	5,02 pp	2,23 pp	17,12 pp	12,40 pp
Consumidor 2	6,90 pp	7,80 pp	5,76 pp	4,51 pp	3,54 pp
Consumidor 3	10,08 pp	19,79 pp	2,92 pp	0,89 pp	3,37 pp

Fonte: Autoria própria.

4.5.2.4 Condição IV (Responsabilidade compartilhada – análise para o PAC 1)

Avançando, as avaliações de desempenho realizadas a seguir encontram-se associadas com condições operativas do complexo elétrico teste tais que os cenários de responsabilidade se apresentam sob condições compartilhadas entre as unidades de consumo.

Assim, na Condição IV, o consumidor do PAC 1 é mantido com uma contribuição majoritária para os desequilíbrios, com sua carga desequilibrada ajustada em 1,0 pu. Por outro lado, as contribuições das cargas desequilibradas dos consumidores dos PACs 2 e 3, antes impostas como 0,1 pu, são elevadas para 0,5 pu.

Ressalta-se que apenas os resultados mais conclusivos estão contidos nos textos subsequentes, sendo que as demais informações sobre a aplicação dos métodos encontram-se disponibilizados no Apêndice A.

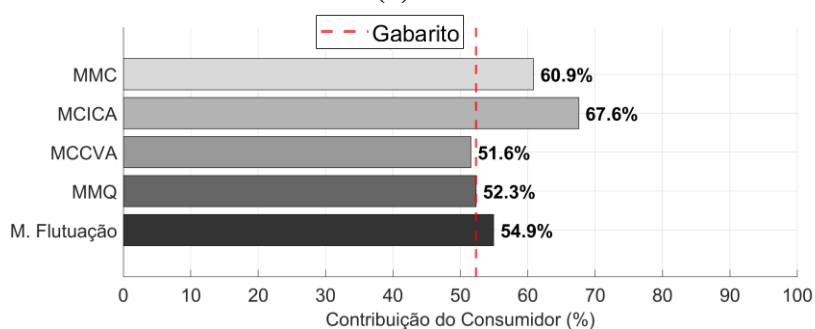
Na Tabela 22 são indicados os valores de referência (gabarito) que expressam as contribuições individuais para cada PAC. Na Figura 35, por sua vez, têm-se os valores obtidos pelos métodos em análise.

Tabela 22 – Parcela de contribuição dos consumidores – Condição IV.

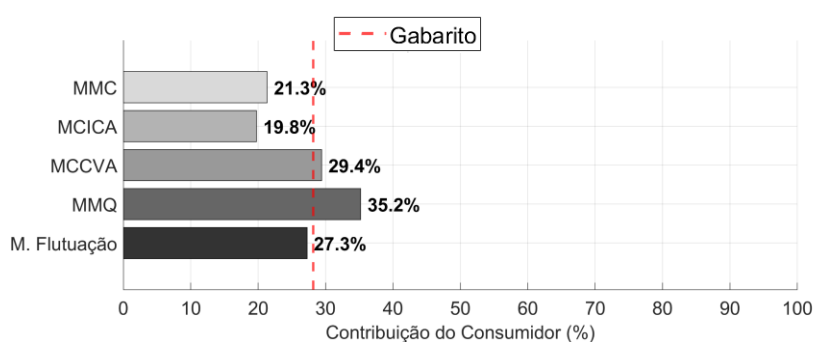
Consumidor 1	Consumidor 2	Consumidor 3
52,33%	28,17%	21,75%

Fonte: Autoria própria.

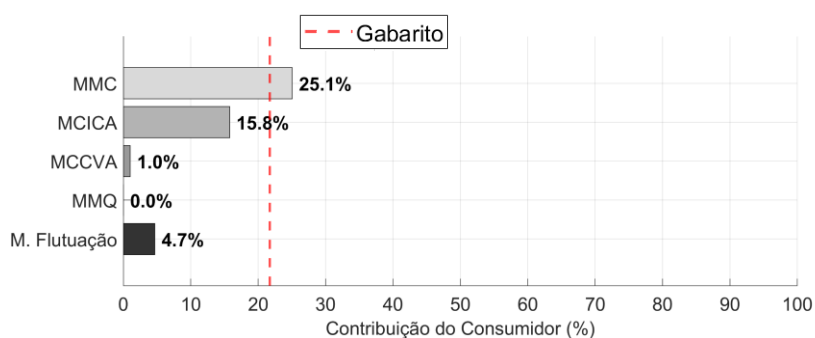
Figura 35 – Parcelas de responsabilidade para Condição IV – (a): PAC 1, (b): PAC 2, (c): PAC 3.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria Própria.

Como anteriormente, os erros percentuais obtidos estão mostrados na Tabela 23.

Tabela 23 – Erro dos métodos em análise – Condição IV.

	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação
Consumidor 1	8,52 pp	15,23 pp	0,77 pp	0,01 pp	2,61 pp
Consumidor 2	6,84 pp	8,41 pp	1,25 pp	7,03 pp	0,91 pp
Consumidor 3	3,31 pp	5,98 pp	20,73 pp	21,74 pp	17,08 pp

Fonte: Autoria própria.

4.5.2.5 Condição V (Responsabilidade compartilhada – análise para o PAC 2)

Na condição V, o arranjo operacional foi definido para que o consumidor do PAC 2 assumisse a dominância do desequilíbrio (carga desequilibrada ajustada para 1,0 pu). Simultaneamente, as cargas desequilibradas dos consumidores dos PACs 1 e 3 foram configuradas em 0,5 pu. Assim como nas condições anteriores, o detalhamento das grandezas elétricas encontra-se no Apêndice A.

A Tabela 24 apresenta os valores de contribuição de referência (gabarito) para cada PAC.

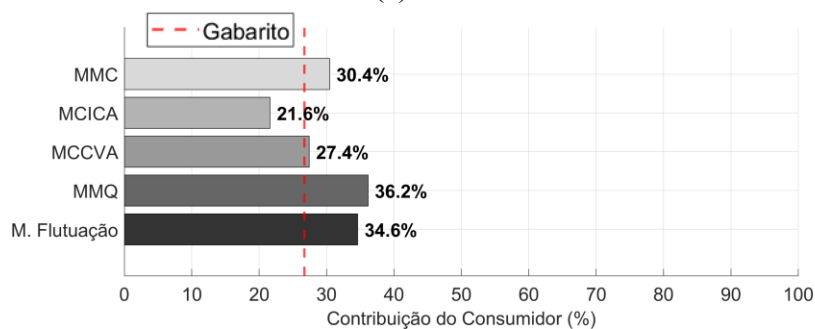
Tabela 24 – Parcela de contribuição dos consumidores – Condição V.

Consumidor 1	Consumidor 2	Consumidor 3
26,72%	54,11%	21,62%

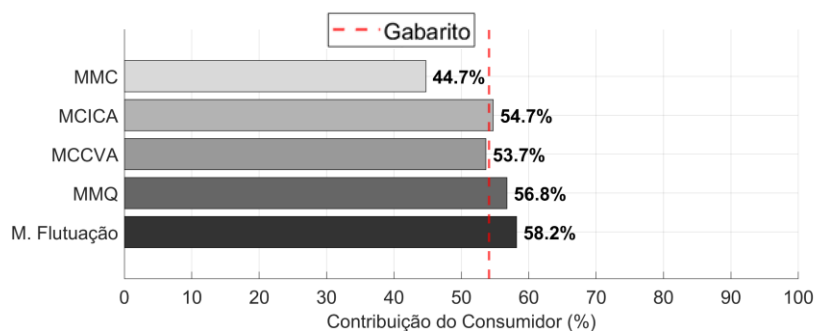
Fonte: Autoria própria.

A Figura 36 ilustra comparativamente as parcelas de responsabilidade estimadas por cada método.

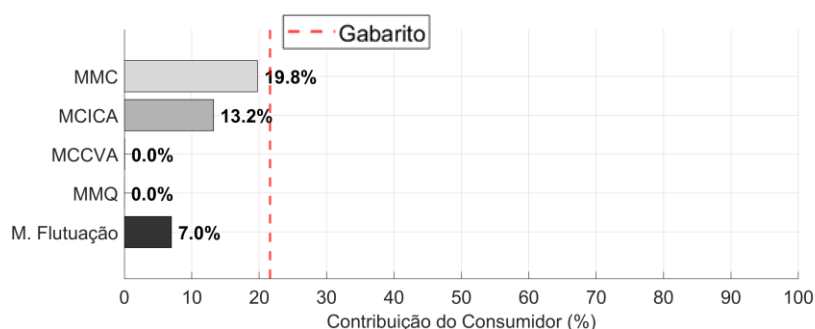
Figura 36 – Parcelas de responsabilidade para Condição V – (a): PAC 1, (b): PAC 2, (c): PAC 3.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 25 sintetiza os erros percentuais obtidos nesta análise.

Tabela 25 – Erro dos métodos em análise – Condição V.

	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação
Consumidor 1	3,71 pp	5,12 pp	0,71 pp	9,43 pp	7,90 pp
Consumidor 2	9,37 pp	0,61 pp	0,46 pp	2,65 pp	4,09 pp
Consumidor 3	1,87 pp	8,39 pp	21,58 pp	21,62 pp	14,63 pp

Fonte: Autoria própria.

4.5.2.6 Condição VI (Responsabilidade compartilhada - análise para o PAC 3)

Por fim, o consumidor do PAC 3 foi definido de forma a assumir a dominância do desequilíbrio (carga ajustada para 1,0 pu). As cargas desequilibradas dos consumidores dos PACs 1 e 2 foram estabelecidas em 0,5 pu.

Como para os demais casos, apenas os resultados finais são apresentados abaixo, e maiores detalhes sobre as etapas que constituem o processo de análise podem ser encontrados no Apêndice A.

A Tabela 26 exhibe os valores de contribuição de referência (gabarito) para cada PAC.

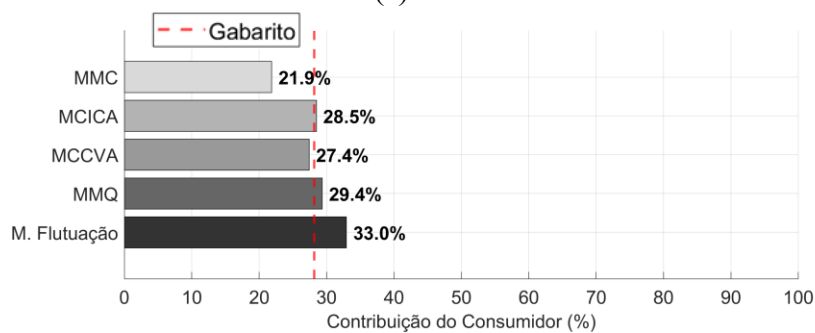
Tabela 26 – Parcela de contribuição dos consumidores – Condição VI

Consumidor 1	Consumidor 2	Consumidor 3
28,17%	29,13%	45,11%

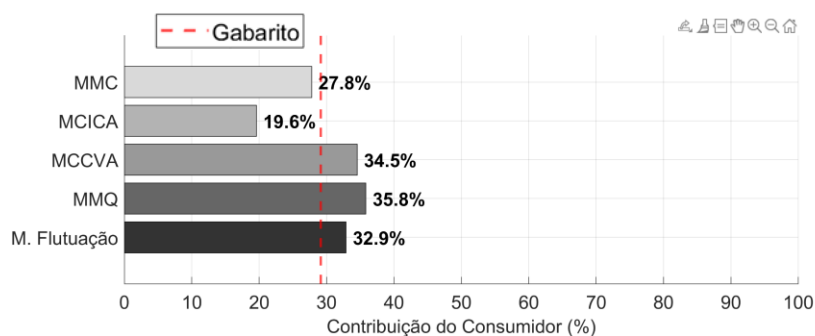
Fonte: Autoria própria.

A Figura 37 ilustra, comparativamente, os índices de responsabilidade estimados por cada método.

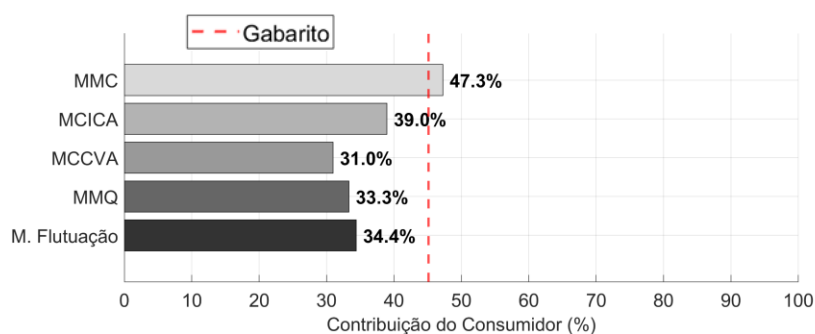
Figura 37 – Parcelas de responsabilidade para Condição VI – (a): PAC 1, (b): PAC 2, (c): PAC 3.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria Própria.

Na Tabela 27 são indicados os erros percentuais entre os valores “gabarito” e aqueles fornecidos pelos métodos de análise.

Tabela 27 – Erro dos métodos em análise – Condição VI

	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação
Consumidor 1	6,31 pp	0,33 pp	0,74 pp	1,18 pp	4,78 pp
Consumidor 2	1,34 pp	9,55 pp	5,41 pp	6,70 pp	3,76 pp
Consumidor 3	2,15 pp	6,15 pp	14,13 pp	11,79 pp	10,69 pp

Fonte: Autoria própria.

4.5.3 Análise dos resultados obtidos

A Tabela 28 sintetiza os resultados obtidos pelas simulações para as Condições I, II e III, cenários caracterizados pela existência de um agente com dominância significativa. Nota-se que os métodos baseados na superposição simplificada (MMQ, M. Flutuação e MCCVA) obtiveram resultados satisfatórios ao estimarem a contribuição do consumidor dominante (Condição I/PAC 1, Condição II/PAC 2 e Condição III/PAC 3). Esse desempenho é fundamentado na aderência das condições operativas às premissas matemáticas de cada algoritmo, cujas naturezas de erro, embora distintas, convergem para a necessidade de predominância da carga sobre a rede.

No caso do MMQ e do Método da Flutuação, a precisão depende da hipótese de que os parâmetros do supridor permanecem estáveis. Quando o consumidor é o agente de significativa dominância, as flutuações do supridor tornam-se desprezáveis frente à dinâmica da carga, o que valida a premissa de estabilidade necessária para a acurácia dessas técnicas. Para o MCCVA, a eficácia reside na premissa de que a corrente medida no PAC e a tensão de sequência negativa causada pelo supridor são fenômenos estatisticamente independentes. Em situações de dominância do consumidor, a dinâmica da corrente medida no PAC é ditada primordialmente pelo consumidor, o que assegura tal independência. Contudo, para as condições em que os consumidores são pouco dominantes, esses métodos apresentaram erros consideráveis. Vale destacar que o MMC e o MCICA apresentaram desempenho superior nessas situações específicas.

É importante observar, contudo, a sensibilidade dos métodos à magnitude relativa das impedâncias envolvidas no processo. Nos PACs 1 e 2, onde a impedância do consumidor (\dot{Z}_{2C}) é muito superior à do supridor (\dot{Z}_{2S}), com razões $|\dot{Z}_{2C}|/|\dot{Z}_{2S}|$ de aproximadamente 49 e 45, respectivamente. Nessas condições, erros na estimativa de \dot{Z}_{2C} (seja pelo MMC ou pelo MCICA) não impactam significativamente o cálculo final da contribuição. Isso ocorre porque

esta condição determina um impacto de menor relevância para as grandezas elétricas do PAC, visto o embasamento oferecido pelo equivalente de Norton do sistema.

Fazendo uma análise crítica dos desempenhos obtidos pelos métodos de análise para o caso considerado, fica constatado que:

- O MMQ e o MCCVA apresentaram limitações de convergência consideráveis;
- O MCICA, embora aderente para a maioria dos casos, apresentou erro discrepante na Condição 2 (Cons. 2), superando a casa dos 85%. Para esta situação, analisando-se a correlação entre as impedâncias, fica identificado que o algoritmo convergiu para uma solução espúria onde $\dot{Z}_{2C} \cong -\dot{Z}_{2S}$. Esse "espelhamento", já é reconhecido na literatura, como apontado em [46], e tende a ocorrer sobretudo em cenários de dominância muito acentuada de um agente sobre o outro;
- De forma geral, o método proposto (MMC) apresentou o melhor desempenho entre os métodos avaliados. A única situação em que o erro superou 10 pp foi na Condição III no PAC 3, o que, ainda assim, evidencia uma vantagem relevante do método. Mesmo operando sobre premissas similares às do MCICA, os limites de busca impostos ao algoritmo de otimização impediram a convergência para soluções discrepantes, contendo o erro dentro de um patamar aceitável.

Tabela 28 – Síntese dos erros dos métodos para as avaliações – Caso 1, 2 e 3.

Caso	Consumidor	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação
Caso 1	Cons. 1	3,15 pp	6,45 pp	0,08 pp	0,32 pp	0,52 pp
	Cons. 2	6,34 pp	7,05 pp	7,96 pp	6,50 pp	11,42 pp
	Cons. 3	1,00 pp	6,14 pp	***	***	12,29 pp
Caso 2	Cons. 1	2,82 pp	1,93 pp	***	18,39 pp	10,04 pp
	Cons. 2	2,20 pp	85,63 pp	0,92 pp	0,72 pp	1,54 pp
	Cons. 3	3,53 pp	4,21 pp	***	***	0,95 pp
Caso 3	Cons. 1	0,64 pp	5,02 pp	2,23 pp	17,12 pp	12,40 pp
	Cons. 2	6,90 pp	7,80 pp	5,76 pp	4,51 pp	3,54 pp
	Cons. 3	10,08 pp	19,79 pp	2,92 pp	0,89 pp	3,37 pp

*** Não foi possível calcular.

Fonte: Autoria própria.

Em se tratando das condições impostas para os estudos identificados por IV, V e VI, os seus respectivos resultados estão apresentados na Tabela 29. Nestes cenários, observa-se uma

falha recorrente dos métodos simplificados (MMQ, M. Flutuação e MCCVA) ao calcular a contribuição do Consumidor 3 (carga motriz). Analisando as impedâncias envolvidas, fica evidenciado que, embora esses métodos tenham estimado corretamente a impedância do supridor, como verificado, por exemplo, na Condição VI, o erro na contribuição final permaneceu elevado. Isso evidencia uma limitação do Método da Superposição Simplificado que, ao ignorar a impedância do consumidor (\dot{Z}_{2C}) no cálculo da responsabilidade, assume, implicitamente, que $|\dot{Z}_{2C}| \gg |\dot{Z}_{2S}|$. Todavia, tomando por base o consumidor 3, este possui uma impedância baixa devido à presença significativa de cargas motrizes, e, nessas condições, tal hipótese se mostra falha. Assim, muito embora o valor de \dot{Z}_{2S} esteja adequado, a ausência de informações sobre \dot{Z}_{2C} é determinante e resulta em erros significativos para o cálculo da contribuição.

Resumidamente:

- O MCICA apresentou melhor desempenho quando a contribuição dos agentes é compartilhada, embora tenha sido alvo de dificuldades de convergência para uma das situações investigadas;
- O M. Flutuação merece destaque em relação aos demais métodos existentes na literatura, pela consistência dos seus filtros de seleção de dados, mantendo os erros sempre abaixo de 20 pp, ainda que limitado pelo modelo simplificado;
- O MMC demonstrou superioridade ao aliar o modelo completo (considerando \dot{Z}_{2C} e \dot{Z}_{2S}) às restrições impostas, apresentando resultados adequados em todas as condições de dominância compartilhada.

Tabela 29 – Síntese dos erros dos métodos para as avaliações – Caso 4, 5 e 6.

Caso	Consumidor	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação
Caso 4	Cons. 1	8,52 pp	15,23 pp	0,77 pp	0,01 pp	2,61 pp
	Cons. 2	6,84 pp	8,41 pp	1,25 pp	7,03 pp	0,91 pp
	Cons. 3	3,31 pp	5,98 pp	20,73 pp	21,74 pp	17,08 pp
Caso 5	Cons. 1	3,71 pp	5,12 pp	0,71 pp	9,43 pp	7,90 pp
	Cons. 2	9,37 pp	0,61 pp	0,46 pp	2,65 pp	4,09 pp
	Cons. 3	1,87 pp	8,39 pp	21,58 pp	21,62 pp	14,63 pp
Caso 6	Cons. 1	6,31 pp	0,33 pp	0,74 pp	1,18 pp	4,78 pp
	Cons. 2	1,34 pp	9,55 pp	5,41 pp	6,70 pp	3,76 pp
	Cons. 3	2,15 pp	6,15 pp	14,13 pp	11,79 pp	10,69 pp

Fonte: Autoria própria.

Por fim, a Tabela 30 resume as métricas globais de desempenho, indicando que o MMC se consolidou, dentre os procedimentos explorados, como a técnica mais robusta, apresentando a menor média de erro (4,53 pp). Diferentemente dos demais métodos, que apresentaram instabilidades (MCICA) ou limitações de modelo (MMQ/MCCVA), o MMC obteve apenas um erro acima de 10 pp e nenhum erro superior a 20 pp em todo o conjunto de testes.

Tabela 30 – Métricas de desempenho dos métodos.

	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação
Média do Erro*	4,53 pp	11,32 pp	5,71 pp	8,16 pp	6,80 pp
Mediana do Erro*	3,42 pp	6,30 pp	2,23 pp	6,60 pp	4,44 pp
Taxa de erros > 10 pp*	1	3	3	5	7
Taxa de erros > 20 pp*	0	1	2	2	0
Condições não calculadas	0	0	3	2	0

*Não foram considerados os valores de contribuição não calculados no cálculo.

Fonte: Autoria própria.

4.6 Considerações finais

Este capítulo foi centrado numa estratégia para avaliação de métodos não invasivos para a determinação das contribuições entre os agentes, diante da ocorrência de registros de níveis de desequilíbrio de tensões em um determinado barramento, conectando redes elétricas mistas, formadas por supridores e consumidores.

As investigações conduzidas, de cunho computacional, revelaram as limitações associadas com diversas metodologias existentes na literatura, as quais, baseadas num princípio comum, advindo da aplicação do Teorema da Superposição (MMQ, MCCVA e Método das Flutuações), alicerçado em simplificações próprias às correlações entre as impedâncias das partes, se mostram inadequadas, particularmente para cenários de baixa dominância do consumidor. Ademais, em situações de responsabilidade compartilhada e com a presença de cargas com baixa impedância (motores de indução), a premissa da desconsideração da impedância do consumidor mostrou-se imprópria, resultando em erros elevados.

Em relação às técnicas baseadas em Separação Cega de Fontes, o MCICA se mostrou consistente em diversos cenários, especialmente naqueles com dominância compartilhada. No entanto, este procedimento se mostrou fragilizado diante de instabilidades numéricas,

convergindo ocasionalmente para soluções inconsistentes (fenômeno de espelhamento da impedância), o que compromete sua confiabilidade para aplicação.

Por fim, o Método de Minimização da Correlação (MMC), proposto nesta tese, indicou perspectivas aplicativas promissoras, visto sua maior robustez entre as estratégias avaliadas. Os resultados demonstraram que o MMC não apenas apresentou a menor média global de erro, mas também garantiu a estabilidade das estimativas nas condições operacionais testadas, validando sua aplicabilidade para a correta atribuição de responsabilidades em sistemas elétricos complexos.

5 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS METODOLOGIAS

5.1 Considerações iniciais

Uma vez constatadas, computacionalmente, as perspectivas aplicativas e os limites associados com os métodos de análise da literatura (especificamente o MCICA, o MCCVA, o MMQ e o Método da Flutuação), bem como a proposição do método MMC feita nesta pesquisa, os trabalhos contemplados nesta etapa avançam no sentido de estabelecer uma base comparativa do desempenho dos procedimentos através de uma estratégia experimental.

No que tange à base para a abordagem experimental, a utilização de um ambiente laboratorial controlado apresenta dificuldades para a realização dos testes de desempenho, visto que a emulação de flutuações randômicas, tanto do agente supridor quanto do consumidor, exigiria recursos não disponíveis nas instalações laboratoriais da UFU para o momento. Somado a isto, o emprego de uma instalação real, certamente, viabiliza meios para os estudos sob condições operativas com maior identidade com aquelas encontradas em campo. Nesse sentido, ressalta-se que a escolha de uma estrutura de uma instalação comercial foi a opção adotada, visto que as operações de suprimento elétrico para tais complexos oferecem as bases para a obtenção de bancos de dados contemplando as flutuações randômicas intrínsecas ao comportamento do supridor e do consumidor.

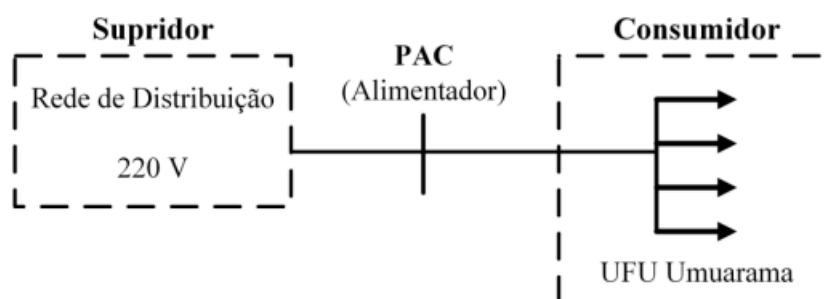
Por outro lado, vale observar que o emprego de uma instalação comercial, diferentemente daquela obtida através de um arranjo laboratorial controlado, não permite a obtenção do que se poderia designar por “gabaritos” para os resultados do compartilhamento. Naturalmente, o ideal seria dispor de uma instalação cujos componentes fossem totalmente conhecidos quanto aos parâmetros e condições operativas. Não obstante este aspecto, as investigações foram conduzidas nos termos acima postos.

O sistema de teste utilizado corresponde à rede de suprimento de um dos blocos da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Campus Umuarama. Este possui uma dinâmica operacional tal que, os registros feitos para as tensões e correntes se mostraram compatíveis com os requisitos dos procedimentos de análise investigados para fins do compartilhamento de responsabilidades sobre os desequilíbrios de tensão.

5.2 Caracterização do sistema e campanha de medição

Conforme mencionado, o complexo elétrico avaliado consiste em um sistema de distribuição destinado ao suprimento de cargas na UFU, Campus Umuarama, o qual se apresenta, simplificadamente, ilustrado no diagrama unifilar da Figura 38. Nesta configuração, o Agente 1 representa o equivalente de rede visto do PAC, englobando a rede de suprimento da concessionária local, Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), e demais alimentadores que não compõem o objeto de estudo deste trabalho. Quanto ao Agente 2, este compreende um conjunto diversificado de cargas supridas pelo alimentador derivado de um barramento em BT. Dentre as cargas supridas por este alimentador destaca-se: um anfiteatro, uma agência bancária, blocos de laboratórios (Odontologia, Ciências Biomédicas e Agronomia), setores administrativos e o sistema de iluminação externa.

Figura 38 – Diagrama unifilar do sistema elétrico teste.



Fonte: [46].

Para a realização da campanha de medição, foi empregado um analisador de qualidade de energia Fluke 435 Série II, equipamento de Classe A conforme a norma IEC 61000-4-30. As tensões trifásicas foram registradas por meio das quatro ponteiros de tensão do próprio instrumento (fases A, B, C e neutro), enquanto as correntes foram medidas com anéis flexíveis do tipo *Rogowski* para corrente alternada, com capacidade de medição de até 6000 A RMS, instalados nos condutores de cada fase do alimentador monitorado. O cálculo das componentes simétricas de sequência positiva e negativa, tanto de tensão quanto de corrente, foi realizado internamente pelo próprio analisador, a partir das grandezas trifásicas medidas, com os resultados de módulo e ângulo registrados diretamente por meio do *logger* do equipamento. Diferentemente da campanha de medição descrita no Capítulo 3, a qual exigiu a sincronização entre dois instrumentos distintos, nesta etapa as medições foram realizadas em um único ponto, dispensando, portanto, o uso do Módulo de Sincronização de Tempo GPS430.

Os registros realizados, em consonância com os requisitos dos métodos em estudo, compreenderam um intervalo de medição de uma semana (sete dias), cujos dados de tensões e correntes foram realizados de acordo com o arranjo de medição ilustrado na Figura 39. De acordo com o protocolo de medições aplicável para o indicador de desequilíbrio de tensão, a regulamentação (PRODIST) estabelece que seja utilizado um período de integralização de 10 minutos [4]. Todavia, objetivando um banco de dados mais consistente quanto à dinâmica operacional, para fins desta pesquisa foi utilizado um período de agregação de 10 segundos. Essa escolha, realizada por meio de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), teve por propósito capturar, de forma mais pormenorizada, as variações rápidas das grandezas elétricas e a dinâmica de consumo da carga. Ressalta-se que, embora períodos menores sejam tecnicamente viáveis e recomendados pela literatura [46], o intervalo de 10 segundos se mostra adequado aos critérios de compartilhamento aqui explorados.

Figura 39 – Sistema de Medição Implementado – Instalação no Campus Umuarama (UFU).

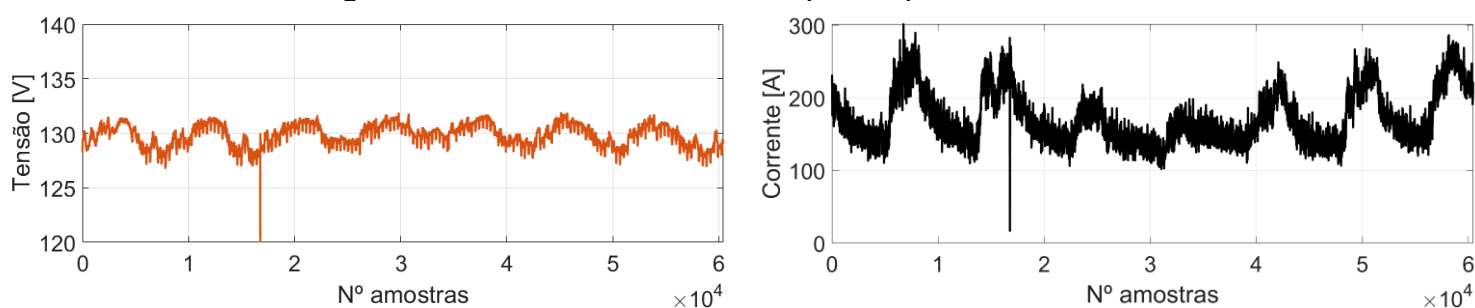


Fonte: Autoria Própria.

5.3 Grandezas elétricas no PAC

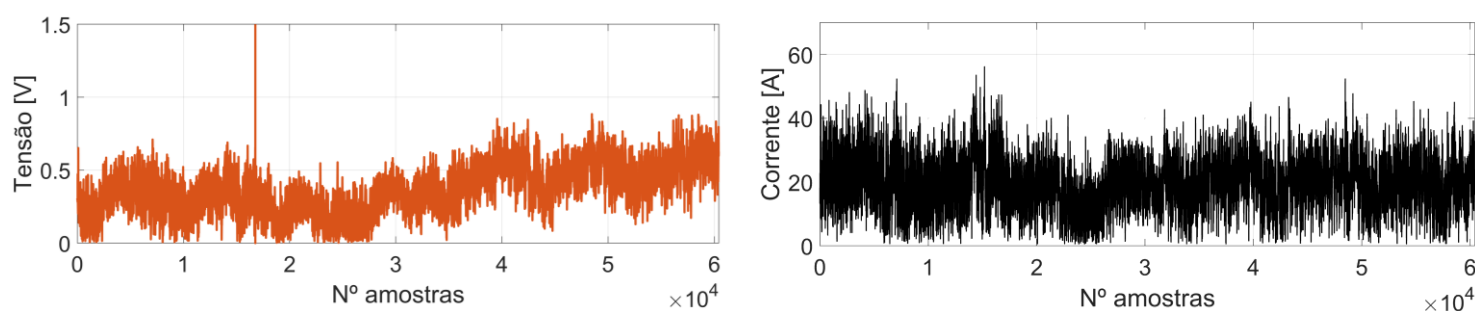
A Figura 40 e Figura 41 apresentam os resultados dos registros das tensões (rms) e correntes (rms) de sequência positiva e negativa, respectivamente. O período de monitoração corresponde a sete dias completos, adotando-se um período de amostragem de 10 segundos. É importante destacar que, embora uma semana exata de medição equivalha a 60.480 amostras, a estratégia de processamento, conforme será abordada na seção seguinte, exigiu uma pequena extensão desse registro. Dessa forma, o banco de dados final utilizado no processamento totaliza 60.825 amostras.

Figura 40 – Tensões e correntes de sequência positiva medidas no PAC.



Fonte: Autoria Própria.

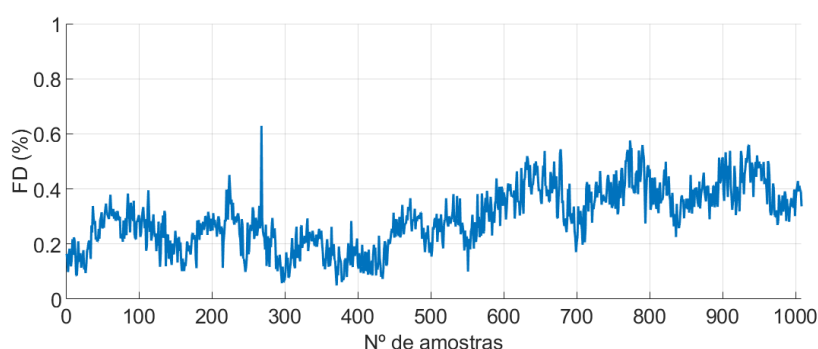
Figura 41 – Tensões e correntes de sequência negativa medidas no PAC.



Fonte: Autoria Própria.

A partir das grandezas obtidas, na Figura 42 tem-se o comportamento dos fatores de desequilíbrio das tensões ao longo do período de medição total.

Figura 42 – Fator de Desequilíbrio no PAC.



Fonte: Autoria Própria.

Sintetizando, na Tabela 31 são apresentados os valores médios das grandezas de interesse no PAC obtidos durante a campanha de medição.

Tabela 31 – Grandezas elétricas representativas dos valores médios das tensões e correntes de sequência positiva, negativa e do fator de desequilíbrio em termos de P95%.

Valor Médio de $ \dot{V}_1^{PAC} $	Valor Médio de $ \dot{V}_2^{PAC} $	Valor Médio de $ \dot{I}_1^{PAC} $	Valor Médio de $ \dot{I}_2^{PAC} $	P95 FD%
129,8 V	0,38 V	171,6 A	21,39 A	0,48%

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que o FD% embora tenha permanecido abaixo dos limites regulamentares (de 3%), seu comportamento ao longo do período de registo não prejudica a análise de desempenho dos métodos de compartilhamento de responsabilidade.

5.4 Tratamento de dados e estratégia de processamento

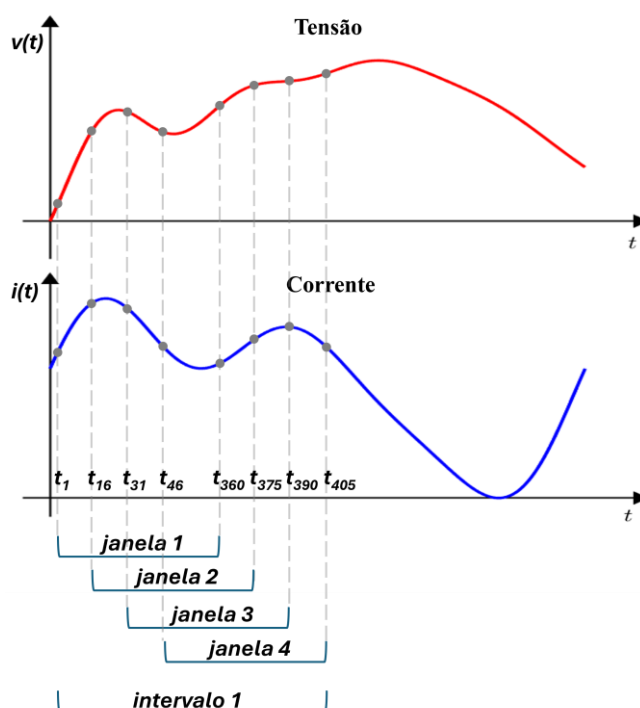
Para a aplicação das metodologias de atribuição de responsabilidades, adotou-se o processamento dos dados por meio de janelas deslizantes. A fim de compatibilizar a taxa de amostragem das grandezas elétricas de tensão e corrente (de uma amostra a cada 10 segundos) com a resolução de 10 minutos estabelecida pelo PRODIST, estruturou-se o processamento para gerar 144 intervalos diários (totalizando 1008 intervalos em uma semana de medição).

Previamente à aplicação dos métodos, os intervalos em que foram registradas Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs) foram identificados e expurgados do banco de dados. Essa identificação foi possível pelo próprio analisador de qualidade de energia empregado na campanha de medição, o qual detecta e sinaliza a ocorrência de VTCDs. A exclusão desses

intervalos é necessária pois as perturbações associadas às VTCDs alteram transitoriamente as grandezas de sequência negativa no PAC, podendo distorcer as estimativas de impedância e comprometer a confiabilidade dos resultados de compartilhamento de responsabilidade.

Com o propósito de manter o padrão utilizado na avaliação computacional, para cada intervalo de avaliação foram consideradas quatro janelas consecutivas, contemplando 360 amostras por janela. O primeiro intervalo abrange as amostras t_1 a t_{405} . O deslocamento entre as janelas internas é de 15 amostras, resultando na seguinte configuração para o intervalo 1: t_1 a t_{360} (janela 1); t_{16} a t_{375} (janela 2); t_{31} a t_{390} (janela 3); t_{46} a t_{405} (janela 4). Para garantir a cadência de 10 minutos entre os registros, os intervalos subsequentes avançam em passos de 60 amostras, de modo que o intervalo 2 inicia-se em t_{61} e estende-se até t_{465} , aplicando-se a mesma lógica sucessivamente até o intervalo 1008. A Figura 43 ilustra o processo de definição das janelas referente ao primeiro intervalo.

Figura 43 – Definição das janelas para aplicação dos métodos.

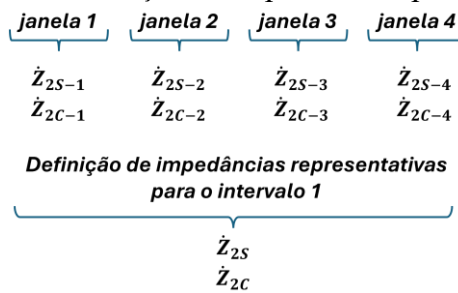


Fonte: Autoria Própria.

A cada janela, calculam-se as impedâncias de sequência negativa do supridor e, dependendo do método empregado, do consumidor. A definição da impedância do consumidor é aplicável especificamente para os métodos MMC e MCICA. Para os métodos MCCVA, MMQ e o Método da Flutuação, as simplificações inerentes às suas formulações dispensam o

uso da impedância do consumidor. Para mitigar a influência de transitórios e evitar valores discrepantes na consolidação das impedâncias, aplica-se um critério de expurgo sobre o conjunto das quatro janelas de cada intervalo, seguindo o mesmo critério empregado na avaliação computacional. Assim, utilizando a distância de *Mahalanobis* [125], [126], identifica-se e descarta-se a janela que apresenta a maior discrepância. Em seguida, a impedância representativa do intervalo é definida pela mediana das partes real e imaginária das três janelas remanescentes. A Figura 44 ilustra a obtenção dessa impedância representativa para o intervalo 1.

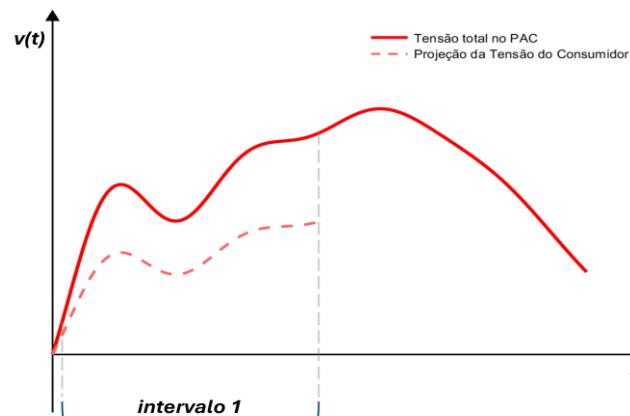
Figura 44 – Definição da impedância representativa.



Fonte: Autoria Própria.

Estabelecidos os valores representativos das impedâncias para o intervalo, processam-se as equações de projeção da tensão. A projeção é calculada ponto a ponto para todas as 405 amostras que compõem o intervalo em questão, conforme exemplificado na Figura 45.

Figura 45 – Determinação da projeção da tensão do consumidor.



Fonte: Autoria Própria.

Para consolidar um único valor representativo para o intervalo k , calcula-se a média das magnitudes das 405 amostras da projeção da tensão do consumidor, grandeza denotada por

$V_{2C-proj.}^{PAC}(k)$. O mesmo procedimento de extração da média das magnitudes é aplicado à tensão total de sequência negativa no PAC, obtendo-se $|\dot{V}_2^{PAC}(k)|$. Por fim, de posse das grandezas representativas de cada intervalo, a parcela de responsabilidade do consumidor ($PR\%_{Consumidor}$) é determinada por (72), que avalia a razão entre os somatórios das projeções e da tensão total no PAC para um determinado intervalo. A avaliação subsequente dos resultados será realizada em duas partes: primeiramente, será determinada a parcela de responsabilidade para cada um dos sete dias de medição isoladamente; posteriormente, será realizada uma avaliação total da semana. Para contemplar ambas as análises, a equação (72) considera um intervalo inicial k_i e um intervalo final de k_f . Assim, para o primeiro dia, os limites são $k_i = 1$ e $k_f = 144$; para o segundo dia $k_i = 145$ e $k_f = 288$, e assim sucessivamente. Para a avaliação da semana completa, os limites adotados são $k_i = 1$ e $k_f = 1008$.

$$PR\%_{Consumidor} = \frac{\sum_{k=k_i}^{k_f} V_{2C-proj.}^{PAC}(k)}{\sum_{k=k_i}^{k_f} |\dot{V}_2^{PAC}(k)|} \cdot 100\% \quad (72)$$

Por fim, cabe ressaltar que a configuração das janelas deslizantes apresentada depende diretamente do período de amostragem do medidor. Neste caso, com a medição fornecida com tempo de 10 segundos foi utilizado um passo de deslocamento de 15 amostras (345 amostras sobrepostas). Quanto menor for o tempo entre os registros, menor será a necessidade de sobreposição para compor o intervalo de avaliação. Se o período de amostragem fosse, por exemplo, de 0,5 segundos, haveria uma necessidade consideravelmente menor de sobreposição de amostras para enquadrar as quatro janelas consecutivas dentro dos 10 minutos regulamentares do PRODIST.

5.5 Resultados

Uma vez obtido o banco de dados necessário à aplicação dos procedimentos de análise, procede-se à avaliação do desempenho das metodologias contempladas nesta tese. Como destacado anteriormente, os trabalhos são conduzidos em duas etapas associadas aos períodos de monitoração: uma primeira compreende os registros avaliados de forma diária e, posteriormente, realiza-se a avaliação total ao longo dos sete dias de medição.

No que tange aos resultados, inicialmente são estimadas as impedâncias de sequência, conforme os requisitos já postos, seguidas da determinação das parcelas de responsabilidade pelo desequilíbrio de tensão, nos termos estabelecidos como meta para esta pesquisa.

5.5.1 Estimação das impedâncias de sequência

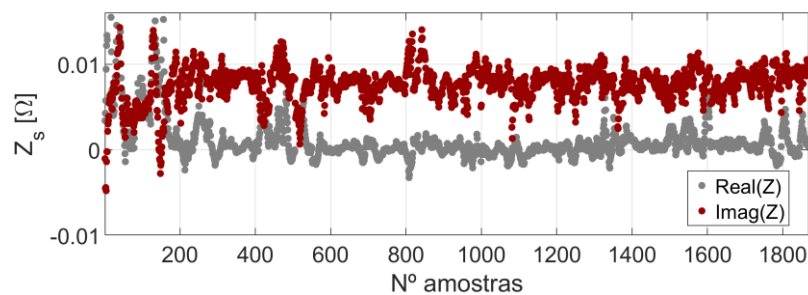
A determinação das impedâncias equivalentes do supridor e do consumidor é uma etapa fundamental para a correta atribuição das responsabilidades pelo desequilíbrio de tensão. Para organizar a apresentação dos resultados, esta subseção foi estruturada em duas etapas. Inicialmente, aborda-se a estimação da impedância de referência (sequência positiva) para o método proposto. Na sequência, detalha-se a obtenção das impedâncias de sequência negativa para as metodologias avaliadas.

5.5.1.1 Estimação de \dot{Z}_{ref} pelo MCCVA Adaptado

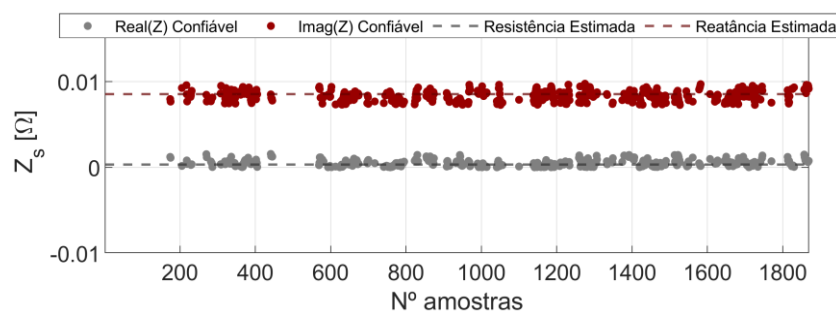
Para a aplicação do método proposto (MMC), faz-se necessário estimar, primeiramente, uma impedância de referência \dot{Z}_{ref} . Conforme fundamentado no Capítulo 3, essa etapa ampara-se na premissa física de que as impedâncias do supridor de sequência positiva e negativa são numericamente próximas. Para tanto, empregou-se o MCCVA Adaptado, utilizando as grandezas de sequência positiva de tensão e corrente medidas no PAC.

Os resultados desta etapa são apresentados na Figura 46, na qual se observam os valores não filtrados (brutos) e os valores processados após a aplicação dos filtros. A aplicação do MCCVA Adaptado conduziu a $\dot{Z}_{ref} = 0,34 + j8,56 \text{ m}\Omega$, com um nível de confiança de 53,15%.

Figura 46 – Impedâncias calculadas pelo MCCVA adaptado –
(a): valores brutos, (b): valores filtrados.



(a)

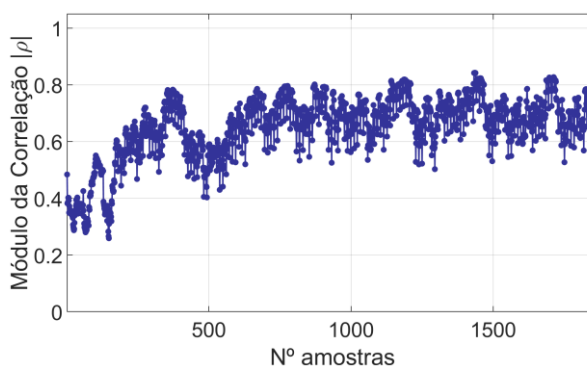


(b)

Fonte: Autoria Própria.

A Figura 47 expressa o perfil, ao longo do tempo, do fator de correlação calculado. Observa-se que o período de maior variação da impedância, compreendendo as 200 primeiras amostras, coincidiu com o de menor correlação entre a tensão e a corrente.

Figura 47 – Fator de correlação calculado ao longo do período de amostragem.



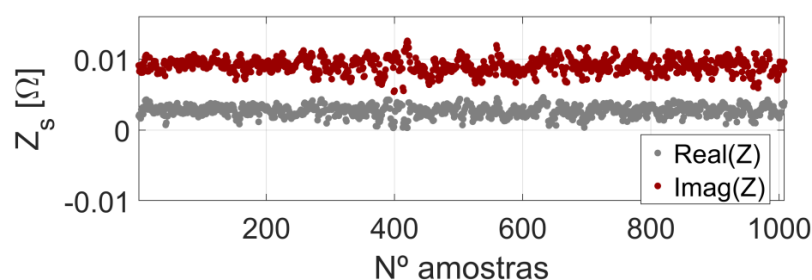
Fonte: Autoria Própria.

5.5.1.2 Impedância de Sequência Negativa

A partir de \dot{Z}_{ref} determinada pelo MCCVA Adaptado, procedeu-se ao cálculo da impedância de sequência negativa para o MMC e para os demais métodos. Na Figura 48 são indicadas as impedâncias de sequência negativa do supridor estimadas pelo MMC ao longo dos sete dias de medição. Adicionalmente, o método permitiu estimar a impedância de sequência negativa do consumidor (\dot{Z}_{2C}), que apresentou um valor médio de $914,01 - j240,18$ mΩ. Este valor, significativamente superior à impedância do supridor (\dot{Z}_{2S}), mostra-se fisicamente coerente com as características das cargas do campus, uma vez que a inexistência de cargas trifásicas especiais (como motores de indução de grande porte) justifica uma impedância equivalente de consumidor com magnitude elevada. Vale ressaltar que a determinação de \dot{Z}_{2C} apresentou uma variação significativa para o MMC e o MCICA, todavia, como esse parâmetro

é consideravelmente superior a \dot{Z}_{2S} , essa grandeza não exerce influência significativa no cálculo das contribuições. Os gráficos das impedâncias de sequência negativa do suprridor estimadas pelos demais métodos, bem como as impedâncias do consumidor estimadas pelo MMC e pelo MCICA, encontram-se detalhados no Apêndice B.

Figura 48 – Impedâncias de sequência negativa do suprridor estimadas pelo MMC.



Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 32 apresenta os valores médios de \dot{Z}_{2S} obtidos para cada dia de medição por todas as metodologias avaliadas. Ressalta-se que o M. Flutuação não apresentou convergência em várias janelas; por conseguinte, tais janelas foram desconsideradas nos cálculos de contribuição subsequentes. Os dias em que o M. Flutuação apresentou intervalos sem convergência estão destacados na tabela em questão.

Tabela 32 – Valores médios das impedâncias calculados pelos métodos.

	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação
	\dot{Z}_{2S} [mΩ]	\dot{Z}_{2S} [mΩ]	\dot{Z}_{2S} [mΩ]	\dot{Z}_{2S} [mΩ]	\dot{Z}_{2S} [mΩ]
Dia 1	3,34 + j9,32	3,12 + j9,28	3,21 + j9,18	3,50 + j9,29	3,92 + j9,46
Dia 2	3,73 + j8,92	2,24 + j8,70	3,28 + j9,05	3,64 + j9,25	3,63 + j8,58*
Dia 3	4,11 + j8,61	3,37 + j8,46	3,59 + j8,96	4,19 + j9,04	4,37 + j8,77
Dia 4	3,13 + j8,59	3,05 + j8,52	3,49 + j9,01	3,98 + j9,3	4,39 + j8,52
Dia 5	3,04 + j9,2	0,88 + j3,33	3,58 + j9,09	3,94 + j9,12	1,93 + j4,19*
Dia 6	2,79 + j9,27	1,03 + j2,79	3,32 + j8,76	3,97 + j8,72	1,41 + j3,15*
Dia 7	3,12 + j9,25	3,01 + j9,12	3,53 + j9,35	3,97 + j9,48	4,26 + j9,18

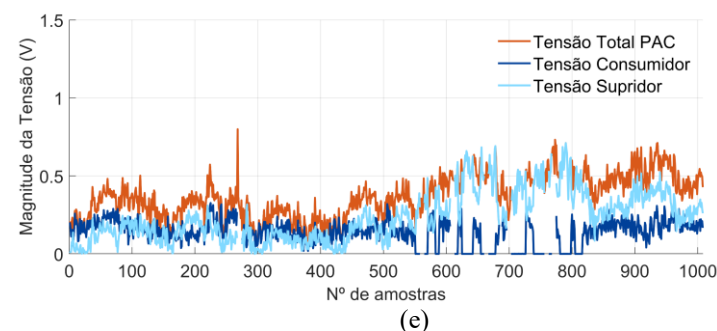
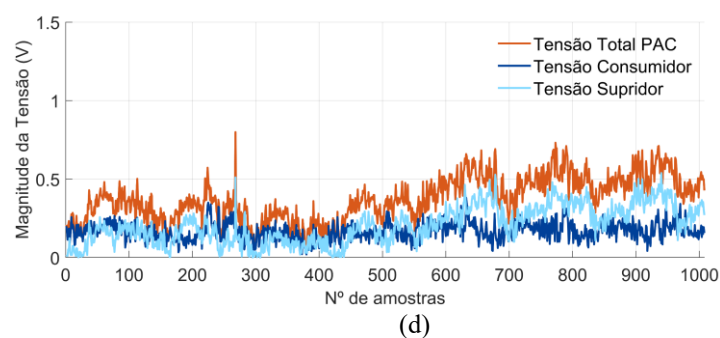
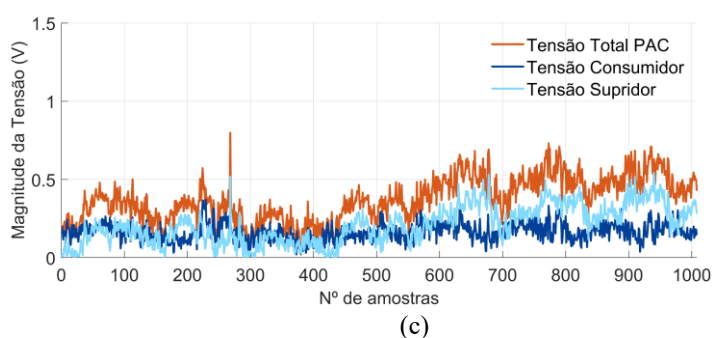
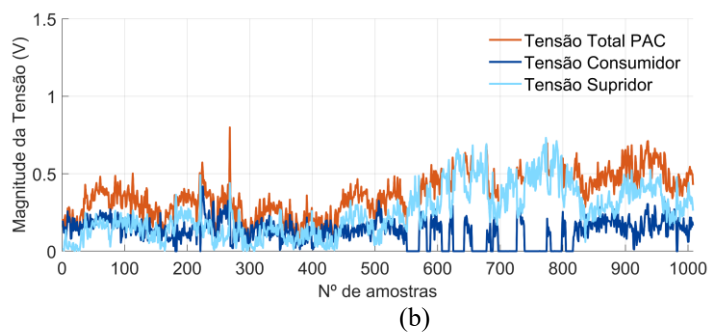
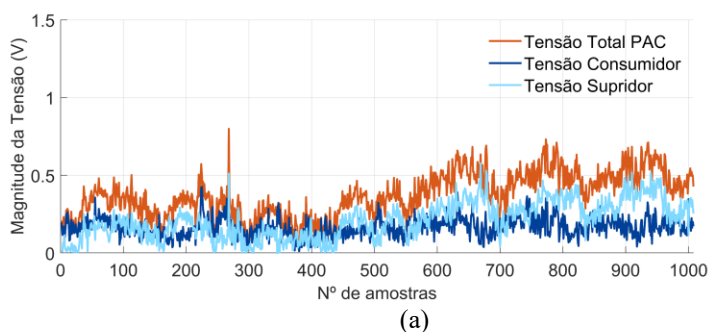
* Indica dias com janelas de não convergência.

Fonte: Autoria própria.

5.5.2 Determinação do compartilhamento de responsabilidades

Uma vez consolidadas as impedâncias, procede-se ao cálculo das parcelas de responsabilidade sobre o efeito final das tensões de sequência negativa totais. Para o MMC e o MCICA, utilizou-se o Método da Superposição Completo, conforme (4) e (5). Já para os métodos MCCVA, MMQ e M. Flutuação, empregou-se o Método da Superposição Simplificado, de acordo com (29) e (30). As tensões de cada agente foram então projetadas sobre a tensão total de sequência negativa no PAC, conforme estabelece a estratégia sintetizada na Figura 5. A magnitude dessas projeções ao longo do tempo é apresentada na Figura 49.

Figura 49 – Magnitude das projeções das tensões de responsabilidade – Avaliação em Campo
– (a): MMC, (b): MCICA, (c): MCCVA, (d): MMQ, (e): M. Flutuação.



Fonte: Autoria Própria.

Com base nas projeções das tensões, obtiveram-se os resultados de contribuição percentual do consumidor para cada dia de medição isoladamente, conforme detalhado na Tabela 33.

Tabela 33 – Parcelas de responsabilidade de desequilíbrio – Avaliação em Campo.

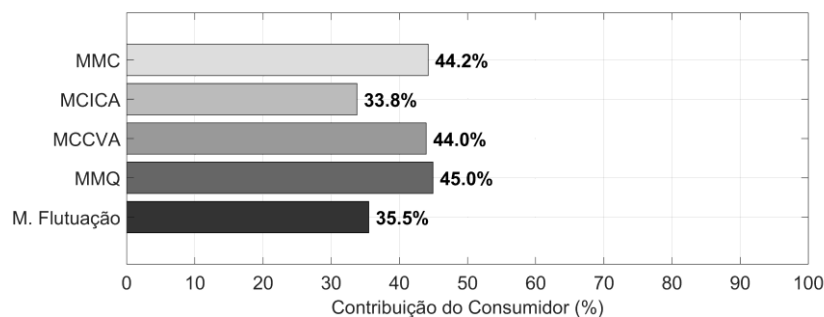
	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação
Dia 1	56,32%	55,64%	55,54%	56,82%	58,96%
Dia 2	52,38%	49,62%	52,25%	53,51%	53,96% *
Dia 3	57,83%	53,75%	56,71%	58,25%	57,24%
Dia 4	47,39%	47,10%	49,47%	51,67%	49,58%
Dia 5	39,78%	14,67%	39,86%	40,38%	18,48% *
Dia 6	38,91%	10,37%	36,87%	37,02%	11,71% *
Dia 7	34,81%	34,39%	35,24%	36,21%	35,61%

* O método não apresentou convergência em determinadas janelas de medição.

Fonte: Autoria própria.

Por fim, consolidando as 1008 janelas de medição correspondentes à semana completa, determinou-se o resultado total de contribuição de cada método. O gráfico de barras da Figura 50 ilustra essas parcelas totais de responsabilidade atribuídas ao consumidor ao término do período de monitoramento. A análise aprofundada das variações diárias e a discussão comparativa destes indicadores globais serão conduzidas no tópico subsequente.

Figura 50 – Resultados totais de contribuição da semana.



Fonte: Autoria Própria.

5.6 Análise dos resultados

A partir dos resultados obtidos na campanha de medição, observa-se que, nos dias 1, 2, 3, 4 e 7, todas as metodologias apresentaram convergência. Nestes períodos, os valores das impedâncias médias do supridor mantiveram-se estáveis, situando-se em torno do patamar de $3 + j9 \text{ m}\Omega$. A convergência de resultados entre abordagens fundamentadas em premissas distintas é um indicativo de que os valores calculados para a impedância e para as parcelas de contribuição estão corretos e representam a realidade operativa do sistema.

Ademais, no que tange à impedância de referência, \dot{Z}_{ref} estimada pelo MCCVA Adaptado ($0,34 + j8,56 \text{ m}\Omega$) apresentou uma magnitude de aproximadamente $8,57 \text{ m}\Omega$. Ao compará-la com a magnitude média de \dot{Z}_{2S} obtida para o supridor ao longo dos sete dias ($3 + j9 \text{ m}\Omega$, magnitude de $9,49 \text{ m}\Omega$), constata-se um desvio inferior a 10%. Ressalta-se que, embora a parte real de \dot{Z}_{ref} apresente uma discrepância relativa mais expressiva em relação à média de \dot{Z}_{2S} , sua contribuição para o módulo total é pequena diante da predominância da reatância, razão pela qual o desvio global permanece inferior a 10%. Como a formulação do método proposto (MMC) baseia-se primordialmente na magnitude da impedância de referência, esse erro de estimação situa-se em patamar aceitável. Vale ressaltar que a própria referência de proposição do MCCVA reporta desvios de magnitude dessa ordem [112]. O aspecto mais relevante dessa constatação reside na comprovação da robustez do algoritmo proposto: mesmo partindo de uma impedância de referência com desvios inerentes à prática experimental, o MMC demonstrou uma convergência adequada no cálculo das impedâncias de sequência negativa e na atribuição correta das parcelas de responsabilidade.

Entretanto, verifica-se uma divergência significativa nos resultados dos métodos MCICA e da Flutuação, especificamente nos dias 5 e 6. Tratando-se de uma instalação típica de distribuição, espera-se que a impedância equivalente do supridor não sofra variações bruscas diárias, o que sugere que as discrepâncias observadas decorrem de erros de estimação inerentes a tais métodos. No caso do Método da Flutuação, a falta de convergência em janelas específicas nos dias 2, 5 e 6 é um indicativo de que o fator Nair (detalhado na fundamentação teórica do Capítulo 2) foi bastante criterioso, restringindo a obtenção de uma base de amostras válida para o cálculo.

Já em relação ao MCICA, o comportamento assemelhou-se ao observado nos estudos computacionais prévios do Capítulo 4, apresentando valores discrepantes de impedância e,

consequentemente, de contribuição. Vale destacar ainda que a avaliação em campo introduz incertezas e ruídos de medição não presentes no ambiente computacional, fator este que assume uma importância ainda maior por se tratar de uma medição com baixo fator de desequilíbrio de tensão (0,48%).

Por fim, avaliando o resultado total dos sete dias de medição no que tange ao compartilhamento de responsabilidades, observa-se uma forte convergência entre os métodos MMC, MMQ e MCCVA. Ao término da semana, esses três métodos apresentaram índices de contribuição do consumidor situados em uma faixa muito estreita, entre 44,0% e 45,0%.

Um aspecto adicional que merece discussão diz respeito à influência da taxa de amostragem do instrumento de medição na qualidade dos resultados do MMC. No presente estudo, as grandezas elétricas foram registradas com período de agregação de 10 segundos, de modo que cada janela de 360 amostras corresponde a um intervalo de 60 minutos. Taxas de amostragem menores, como 1 ou 5 segundos, reduziriam esse intervalo, permitindo capturar com maior fidelidade as variações rápidas de cada janela e, possivelmente, melhorando a acurácia das estimativas do MMC. Adicionalmente, a necessidade de sobreposição entre janelas consecutivas seria reduzida, tornando a aplicação do método mais eficiente em campo. Essa análise configura uma das direções naturais para trabalhos futuros, conforme apontado na Seção 6.

5.7 Considerações finais

Este capítulo apresentou a avaliação experimental das metodologias de compartilhamento de responsabilidade, aplicando-as a um banco de dados real proveniente de uma campanha de medição de sete dias em uma instalação da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). O objetivo principal foi transpor a análise do ambiente computacional para a complexidade das condições operativas práticas.

Os resultados obtidos demonstram que, na maior parte do período monitorado, houve uma convergência significativa entre os métodos, atestando a estabilidade da impedância equivalente da rede. No que tange ao compartilhamento de responsabilidades para o período integral da semana, observou-se um alinhamento direto entre o método proposto (MMC), MMQ e o MCCVA.

Entretanto, constatou-se que os métodos MCICA e da Flutuação apresentaram inconsistências importantes. A divergência acentuada dessas abordagens em dias específicos comprometeu o cálculo das parcelas de responsabilidade ao final do período de medição. É

fundamental salientar que o MCICA é frequentemente apontado na literatura como o método mais promissor para a separação de fontes, devido à sua fundamentação teórica baseada na independência estatística de componentes. Todavia, sob as condições em campo apresentadas, o MCICA mostrou-se sensível e impreciso, enquanto o método MMC demonstrou um desempenho superior.

Em suma, a aplicação prática confirmou a viabilidade da metodologia MMC em campo, validando as premissas teóricas adotadas na concepção desta tese. A constatação de que o algoritmo suporta os desvios práticos inerentes à estimação da impedância de referência, convergindo adequadamente para os parâmetros de sequência negativa, corrobora a robustez do modelo proposto frente às incertezas das medições reais.

6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Esta tese abordou uma temática cuja relevância para a QEE foi fundamentada no capítulo introdutório, centrando-se na determinação de responsabilidade sobre os desequilíbrios de tensão. Como contribuição principal, o trabalho apresentou uma nova metodologia não invasiva, denominada MMC.

Dando início à fundamentação teórica, o Capítulo 2 dedicou-se à apresentação do estado da arte sobre o compartilhamento de responsabilidade nos desequilíbrios de tensão. A revisão identificou duas grandes categorias de métodos: os invasivos e os não invasivos. Os métodos invasivos exigem intervenções programadas na rede, como desligamentos ou chaveamentos de elementos desequilibrados, esses foram descartados por seus riscos operacionais e inviabilidade prática. Os métodos não invasivos se apoiam exclusivamente em medições de tensão e corrente e dentro desta segunda categoria, pode-se distinguir três abordagens distintas. Os métodos que requerem o conhecimento dos parâmetros detalhados da rede, os que dependem de medições distribuídas em múltiplos barramentos e os que utilizam apenas medições no PAC. Os dois primeiros grupos foram descartados na análise, pois exigem infraestrutura de dados ou de medição incompatível com a realidade da maioria dos sistemas de distribuição. Portanto, o grupo mais promissor do ponto de vista prático são os métodos não invasivos que utilizam medição em um único PAC, sobretudo aqueles fundamentados no Método da Superposição. Dentro deste grupo, dois métodos se destacam na literatura, o MMQ e o MCICA. O MMQ adota o Método da Superposição Simplificado e estima apenas a impedância do supridor, dispensando o conhecimento da impedância do consumidor. O MCICA que emprega o Método da Superposição Completo e estima ambas as impedâncias por meio de técnicas estatísticas de separação cega de fontes. Esses dois métodos foram, portanto, adotados como principais referências comparativas desta tese.

Ainda sob essa perspectiva, o Capítulo 2 detalhou a adaptação dos métodos MCCVA e da Flutuação para o contexto dos desequilíbrios de tensão, a qual constitui uma contribuição original desta tese. Embora originalmente concebidos para a determinação de impedâncias harmônicas, tais procedimentos foram propostos e aplicados nesta pesquisa sob a premissa do Método da Superposição Simplificado. A revisão do estado da arte e o detalhamento dessas metodologias permitiram identificar lacunas e limitações técnicas nas abordagens existentes, o que fundamentou a necessidade de proposição do método MMC.

Avançando na proposição central da tese, o Capítulo 3 introduziu o MMC, alicerçado em duas premissas. A primeira estabelece que a impedância de sequência negativa do supridor se situa no entorno de sua impedância de sequência positiva, o que delimita o espaço de busca do algoritmo. A segunda estabelece que as componentes de variação rápida das fontes de corrente de sequência negativa dos agentes são estatisticamente independentes e apresentam distribuição não gaussiana. Essa segunda hipótese foi verificada experimentalmente por meio de medições de campo realizadas ao longo de sete dias consecutivos em dois alimentadores comerciais, que confirmaram, simultaneamente, a distribuição não gaussiana e a correlação desprezível entre os sinais, dois requisitos necessários para a validade do método. O parâmetro de referência (\dot{Z}_{ref}), utilizado para balizar o espaço de busca, é estimado diretamente a partir dos registros de medição pelo MCCVA Adaptado, que utiliza as grandezas de sequência positiva, eliminando a dependência de dados fornecidos pela concessionária. Quando a estimativa de \dot{Z}_{ref} não atinge o critério mínimo de confiabilidade estabelecido, o método recorre à impedância de curto-circuito nominal (\dot{Z}_{CC}) como parâmetro substituto. Por fim, o algoritmo PSO foi adotado para minimizar a função objetivo de descorrelação, consolidando uma estratégia robusta e prática para a identificação das impedâncias de sequência negativa e o subsequente compartilhamento de responsabilidades.

A eficácia desta proposta foi verificada no Capítulo 4, que apresentou a avaliação computacional das metodologias utilizando um sistema-teste adaptado do IEEE, simulando cenários de dominância isolada e de responsabilidade compartilhada. As investigações revelaram que os métodos fundamentados na Superposição Simplificada (MMQ, MCCVA e Flutuação) apresentaram falhas ao desconsiderarem a impedância do consumidor, limitação que se mostrou crítica diante de cargas motrizes (baixa impedância de sequência negativa). Nesses cenários, a premissa de que a impedância da carga é significativamente superior à da rede mostrou-se inválida, sendo que no PAC 3 a razão $|\dot{Z}_{2C}|/|\dot{Z}_{2S}|$ é de apenas 6,5. Nessa condição, mesmo uma estimativa correta da impedância do supridor não foi suficiente para evitar erros elevados no cálculo da contribuição final. Cabe destacar, ainda, que o MMQ e o MCCVA não foram capazes de produzir qualquer resultado em determinados cenários, o que representa uma significativa limitação operacional. Adicionalmente, observou-se que o método MCICA, apesar de sua fundamentação estatística promissora, apresentou instabilidades numéricas que conduziram a resultados discrepantes em determinadas condições operacionais, o que compromete sua confiabilidade para aplicação prática. Em contrapartida, o MMC consolidou-

se como a técnica mais robusta e estável entre as avaliadas, apresentando o melhor desempenho geral nos cenários simulados.

Concluindo a fase de validação, o Capítulo 5 consolidou a avaliação experimental do MMC por meio de uma campanha de medição real no Campus Umuarama da UFU. Enquanto o Capítulo 4 demonstrou que as simplificações de modelo não se mostraram adequadas para todos os cenários, o Capítulo 5 avançou essa análise para o ambiente de campo. Os resultados da campanha de medição revelaram que o MCICA, embora considerado o método mais promissor na literatura, apresentou instabilidades e resultados discrepantes em dias específicos da medição. O Método da Flutuação, por sua vez, não apresentou convergência em janelas específicas dos dias 2, 5 e 6. Em contrapartida, o MMC manteve a convergência e a estabilidade ao longo de todo o período monitorado, demonstrando ser uma alternativa adequada e robusta para a atribuição de responsabilidades em condições operativas reais.

Dessa forma, a superioridade prática do MMC foi ratificada pela sua consistência física, comprovando a premissa desta tese de que as impedâncias de sequência negativa guardam similaridade numérica com as de sequência positiva. O uso da impedância de referência obtida via MCCVA Adaptado permitiu que o algoritmo de otimização convergisse para valores estáveis de aproximadamente $3 + j9 \text{ m}\Omega$ para o supridor, mesmo diante das incertezas e ruídos inerentes ao ambiente de campo. Ao término dos sete dias de medição, o MMC, o MMQ e o MCCVA apresentaram forte convergência entre si, situando os índices de contribuição do consumidor em uma faixa estreita entre 44,0% e 45,0%, sendo o valor obtido pelo MMC de 44,2%. Essa consistência entre métodos fundamentados em premissas distintas constitui um indicativo adicional de que os resultados calculados representam a realidade operativa do sistema. Em suma, a validação experimental confirmou que o MMC superou as limitações de sensibilidade do MCICA, consolidando-se como a contribuição central e eficaz desta pesquisa.

6.1 Propostas de continuidade

Não obstante os desenvolvimentos apresentados e os resultados obtidos, os seguintes tópicos podem ser elencados como merecedores de pesquisas futuras:

- Realização de um estudo aprofundado acerca dos métodos de otimização, incluindo a exploração de outras técnicas meta-heurísticas, em termos de custo computacional e qualidade de convergência, visando tornar o algoritmo ainda mais eficaz;
- Desenvolvimento de uma versão em tempo real do MMC, com vistas à sua integração em sistemas de monitoramento contínuo da QEE, como medidores de qualidade de energia;

- Utilização de plataformas de simulação em tempo real, como alternativa à validação experimental em campo, permitindo reproduzir condições operacionais controladas e avaliar o desempenho dos métodos de forma mais adequada;
- Estudo do impacto da resolução e da taxa de amostragem dos instrumentos de medição sobre a acurácia das estimativas do MMC, visando estabelecer requisitos mínimos para sua aplicação prática em campo;
- Investigação dos limiares de confiabilidade adotados empiricamente no MCCVA Adaptado, fundamentados em critérios estatísticos que considerem o número de amostras, o nível de ruído de medição e as características operacionais do sistema, visando melhorar a resposta do método;
- Implementação em campo do método em instalações que apresentem cargas de baixa impedância de sequência negativa, como grandes motores de indução, para validar a robustez da ferramenta sob condições operativas severas, incluindo cenários com fator de desequilíbrio acima do limite regulatório, de modo a evidenciar com maior clareza o desempenho do MMC;
- Investigação da robustez do MMC em cenários com elevada penetração de recursos energéticos distribuídos baseados em inversores com controle ativo de tensão, como sistemas fotovoltaicos de grande porte e compensadores estáticos de reativos, nos quais o acoplamento entre a corrente injetada e a tensão no PAC pode comprometer a premissa de independência estatística entre as fontes equivalentes dos agentes;
- Proposição de melhorias na formulação do MMC, buscando aperfeiçoar a convergência do método e reduzir o custo computacional associado ao processo de estimação.

6.2 Produções acadêmicas resultantes

A pesquisa realizada gerou os seguintes produtos diretos e indiretos:

- **Artigos publicados em periódicos**

1. **V. H. F. Brito**, J. C. d. Oliveira and R. C. F. Gregory, "A Novel Impedance Estimation Method for Determining Voltage Unbalance Contributions Based on an Optimization Algorithm," in IEEE Access, vol. 12, pp. 145944-145954, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3473790.

2. M. A. Moraes; **V. H. F. Brito**; J. C. de Oliveira. “An Approach for Determining Voltage Imbalance Contributions Based on Complex Independent Component Analysis”. *Energies*, v. 15, p. 7014, 2022.

- **Artigos publicados em congressos/conferências**

1. **V. H. F. Brito**; M. A. Moraes; B. M. Giancesini; J. C. de Oliveira; R. C. F. Gregory. “Análise de desempenho das técnicas para o compartilhamento de responsabilidade dos desequilíbrios de tensão”. *O SETOR ELÉTRICO*, v. 195, p. 48-50, 2023.
2. **V. H. F. Brito**; M. A. Moraes; J. C. de Oliveira ; R. C. F. Gregory. “Aplicação do Método da Análise de Componentes Independentes para a Determinação das Contribuições sobre os Desequilíbrios de Tensão”. In: XV Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2023, São Luiz.
3. **V. H. F. Brito**; J. C. de Oliveira ; R. C. F. “Avaliação crítica dos Métodos da Superposição e IEC para determinação da reponsabilidade sobre os desequilíbrios de tensão”. In: XV Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2023, São Luiz.
4. I. N. Santos; B. M. Giancesini; G. S. Troncha; R. C. F. Gregory; C. R. Azevedo Jr; **V. H. F. Brito**. “Application of a Methodology for Determining Voltage Harmonic Contributions in a Low-Voltage Busbar”. In: 2022 CIGRE SESSION, 2022, Paris. 2022 CIGRE SESSION, 2022.
5. **V. H. F. Brito**; B. M. Giancesini; I. N. Santos. “Avaliação da representação de cargas não lineares na aplicação de metodologia para compartilhamento de responsabilidades harmônicas”. In: XIV Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2021, Foz do Iguaçu.
6. J. A. ARAÚJO; I. N. SANTOS; **V. H. F. BRITO**; M. A. ALVES. “Compartilhamento de desequilíbrio de tensão em uma usina que utiliza biogás para geração de energia elétrica”. In: XVI Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2025.
7. GIANESINI, B. M. et al. Investigação da análise das componentes independentes na determinação de contribuições harmônicas. In: XVI Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2025.

REFERÊNCIAS

- [1] D. Razmi, T. Lu, B. Papari, E. Akbari, G. Fathi, and M. Ghadamyari, “An Overview on Power Quality Issues and Control Strategies for Distribution Networks With the Presence of Distributed Generation Resources,” 2023, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3238685>.
- [2] T. F. Etanya, P. Tsafack, and D. K. Ngwashi, “Grid-connected distributed renewable energy generation systems: Power quality issues, and mitigation techniques – A review,” Jun. 01, 2025, *Elsevier Ltd.* <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.02.050>.
- [3] P. Kumar, D. S. Chand, R. K. Gupta, and A. B. Singh, “Impact of Renewable Energy Integration on Power Quality- Challenges and Solutions,” *International Journal of Innovative Research in Engineering and Management*, vol. 11, no. 4, pp. 95–99, Aug. 2024, <https://doi.org/10.55524/ijirem.2024.11.4.12>.
- [4] Agência Nacional de Energia Elétrica, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST): Módulo 8 – Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica,” Brasília, 2021.
- [5] T. Antić, T. Capuder, and M. Bolfek, “A comprehensive analysis of the voltage unbalance factor in pv and ev rich non-synthetic low voltage distribution networks,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 1, Jan. 2021, <https://doi.org/10.3390/en14010117>.
- [6] A. N. de E. Elétrica, “Geração Distribuída.” Accessed: Dec. 07, 2023. [Online]. Available:
<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiY2VmMmUwN2QtYWFiOS00ZDE3LWI3NDMtZDk0NGI4MGU2NTkxIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LVVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>
- [7] K. Ma, R. Li, and F. Li, “Quantification of Additional Asset Reinforcement Cost from 3-Phase Imbalance,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 4, pp. 2885–2891, Jul. 2016, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2481078>.
- [8] K. Ma, R. Li, and F. Li, “Utility-Scale Estimation of Additional Reinforcement Cost from Three-Phase Imbalance Considering Thermal Constraints,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 5, pp. 3912–3923, Sep. 2017, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2639101>.
- [9] K. Ma, L. Fang, and W. Kong, “Review of distribution network phase unbalance: Scale, causes, consequences, solutions, and future research directions,” *CSEE Journal of Power*

and *Energy Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 479–488, Sep. 2020, <https://doi.org/10.17775/CSEEPES.2019.03280>.

- [10] U. Jayatunga, “Further Contributions to the Development of the Technical Report IEC / TR 61000-3-13 : 2008 on Voltage Unbalance Management Methodologies,” no. September, 2013.
- [11] IEC 61000-2-12:2003, “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-12: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public medium-voltage power supply systems.”
- [12] IEEE Std 1159-2019 (Revision of IEEE Std 1159-2009), *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. New York, 2019.
- [13] ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico, “Submódulo 2.9 - Requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à Rede Básica,” 2020.
- [14] J. Zhu, G. Bilbro, and Mo-Yuen Chow, “Phase balancing using simulated annealing,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 4, pp. 1508–1513, 1999, <https://doi.org/10.1109/59.801943>.
- [15] Jinxiang Zhu, Mo-Yuen Chow, and Fan Zhang, “Phase balancing using mixed-integer programming [distribution feeders],” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, no. 4, pp. 1487–1492, 1998, <https://doi.org/10.1109/59.736295>.
- [16] D. Singh, R. K. Misra, and S. Mishra, “Distribution system feeder re-phasing considering voltage-dependency of loads,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 76, pp. 107–119, Mar. 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.09.006>.
- [17] Tsai-Hsiang Chen and Jeng-Tyan Cherng, “Optimal phase arrangement of distribution transformers connected to a primary feeder for system unbalance improvement and loss reduction using a genetic algorithm,” in *Proceedings of the 21st International Conference on Power Industry Computer Applications. Connecting Utilities. PICA 99. To the Millennium and Beyond (Cat. No.99CH36351)*, IEEE, pp. 145–151. <https://doi.org/10.1109/PICA.1999.779397>.
- [18] W. M. Siti, A. Jimoh, and D. Nicolae, “Distribution network phase load balancing as a combinatorial optimization problem using fuzzy logic and Newton-Raphson,” *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 5, pp. 1079–1087, May 2011, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2010.12.006>.
- [19] L. T. de Oliveira, “Uma proposta para a compensação dinâmica de cargas desequilibradas,” Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1169>.

- [20] L. S. Czarnecki and S. M. Hsu, "Thyristor controlled susceptances for balancing compensators operated under nonsinusoidal conditions," 1994. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:19949984>.
- [21] S. M. Fazeli, H. W. Ping, N. B. A. Rahim, and B. T. Ooi, "Individual-phase decoupled P-Q control of three-phase voltage source converter," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 7, no. 11, pp. 1219–1228, 2013, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2012.0417>.
- [22] S. Yan, S. C. Tan, C. K. Lee, B. Chaudhuri, and S. Y. R. Hui, "Electric springs for reducing power imbalance in three-phase power systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 7, pp. 3601–3609, Jul. 2015, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2350001>.
- [23] P. Lico, M. Marinelli, K. Knezovic, and S. Grillo, "Phase balancing by means of electric vehicles single-phase connection shifting in a low voltage Danish grid," in *2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, IEEE, Sep. 2015, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2015.7339967>.
- [24] S. Sun, B. Liang, M. Dong, and J. A. Taylor, "Phase balancing using energy storage in power grids under uncertainty," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 5, pp. 3891–3903, Sep. 2016, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2492359>.
- [25] E. Vega-Fuentes and M. Denai, "Enhanced Electric Vehicle Integration in the UK Low-Voltage Networks With Distributed Phase Shifting Control," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 46796–46807, 2019, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909990>.
- [26] M. A. Moraes, "Uma proposta para a atribuição de responsabilidades sobre desequilíbrios de tensão através da análise de componentes independentes," Universidade Federal de Uberlândia, 2022. <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2022.5040>.
- [27] V. H. F. Brito, J. C. de Oliveira, and R. C. F. Gregory, "A Novel Impedance Estimation Method for Determining Voltage Unbalance Contributions Based on an Optimization Algorithm," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 145944–145954, 2024, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3473790>.
- [28] F. Karimzadeh, S. Esmaili, and S. H. Hosseini, "Method for determining utility and consumer harmonic contributions based on complex independent component analysis," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 10, no. 2, pp. 526–534, 2016, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0997>.
- [29] U. Jayatunga, S. Perera, P. Ciufu, and A. P. Agalgaonkar, "Voltage unbalance emission assessment in radial power systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 4, pp. 2383–2393, 2013, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2196294>.

- [30] IEC TR 61000-3-13, “Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 3-13: Limits-Assessment of emission limits for the connection of unbalanced installations to MV, HV and EHV power systems,” 2008. [Online]. Available: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm
- [31] R. C. F. Gregory, A. C. Santos, I. N. Santos, L. Ran, and J. C. Oliveira, “A practical approach for determining voltage imbalance contributions from suppliers and consumers,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 30, no. 12, pp. 1–17, Dec. 2020, <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12627>.
- [32] C. Wang *et al.*, “A Noninvasive Method to Estimate the Variable Utility Harmonic Impedance,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 38, no. 3, pp. 1747–1754, 2023, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2022.3223662>.
- [33] U. Jayatunga, S. Perera, P. Ciufu, and A. P. Agalgaonkar, “Voltage unbalance emission assessment in interconnected power systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 4, pp. 2383–2393, 2013, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2274659>.
- [34] U. Jayatunga, S. Perera, P. Ciufu, and A. P. Agalgaonkar, “Deterministic methodologies for the quantification of voltage unbalance propagation in radial and interconnected networks,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 9, no. 11, pp. 1069–1076, 2015, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.0661>.
- [35] Y. Sun, X. Xie, and P. Li, “Unbalanced source identification at the point of evaluation in the distribution power systems,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 28, no. 1, Jan. 2018, <https://doi.org/10.1002/etep.2460>.
- [36] M. Abasi, S. Ghodrattollah Seifossadat, M. Razaz, and S. Sajad Moosapour, “Determining the contribution of different effective factors to individual voltage unbalance emission in n-bus radial power systems,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 94, pp. 393–404, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.08.006>.
- [37] A. Dadashzade, F. Aminifar, and M. Davarpanah, “Unbalanced Source Detection in Power Distribution Networks by Negative Sequence Apparent Powers,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 1, pp. 481–483, 2020, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.3029437>.
- [38] U. Singh, R. Solomon, and O. Alizadeh-Mousavi, “Monitoring-Based Localization of Unbalances and Root Cause Analysis in Low-Voltage Distribution Systems,” *IEEE Syst. J.*, vol. 17, no. 3, pp. 4177–4188, Sep. 2023, <https://doi.org/10.1109/JSYST.2022.3233878>.

- [39] M. A. Moraes, “Uma proposta para a atribuição de responsabilidades sobre desequilíbrios de tensão através da análise de componentes independentes,” Universidade Federal de Uberlândia, 2022. <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2022.5040>.
- [40] M. A. Moraes, V. H. F. Brito, and J. C. de Oliveira, “An Approach for Determining Voltage Imbalance Contributions Based on Complex Independent Component Analysis,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 19, p. 7014, 2022, <https://doi.org/10.3390/en15197014>.
- [41] Y. Sun, P. Li, Y. Wang, and Y. Zhiming, “Determination of the main unbalance sources on PCC in the distribution system,” in *Proceedings 2015 IEEE Power and Energy-Society General Meeting*, IEEE, 2015, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7285893>.
- [42] Y. Yang, Y. Wang, and X. Ma, “Determining the responsibility of three-phase unbalanced sources based on RICA,” *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 15, 2019, <https://doi.org/10.3390/en12152849>.
- [43] Y. Wang, Y. Yang, X. Ma, W. Yao, H. Wang, and Z. Tang, “Unbalanced responsibility division considering renewable energy integration,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 14, no. 24, pp. 5816–5822, 2020, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2020.0636>.
- [44] V. H. F. B. Brito, J. C. de Oliveira, and R. C. F. Gregory, “Avaliação crítica dos Métodos da Superposição e IEC para determinação da reponsabilidade sobre os desequilíbrios de tensão,” *XV CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA*, 2023, <https://proceedings.science/p/169874?lang=pt-br>.
- [45] F. Chen, N. Mao, Y. Wang, Y. Wang, and X. Xiao, “Improved utility harmonic impedance measurement based on robust independent component analysis and bootstrap check,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 14, no. 5, pp. 910–919, 2020, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1153>.
- [46] B. Giancesini, “Uma proposta metodológica para a determinação do indicador de contribuições harmônicas de agentes do sistema elétrico,” Universidade Federal de Uberlândia, 2024. <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2024.265>.
- [47] Y. Chen, M. Chen, M. Cui, W. Lu, and Y. Lv, “Voltage Unbalance Probability Pre-Assessment of Electrified Railways With Uncertain Traction Load,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 9, no. 1, pp. 1509–1520, Mar. 2023, <https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3158946>.
- [48] F. Möller, J. Meyer, and M. Radauer, “Impact of a high penetration of electric vehicles and photovoltaic inverters on power quality in an urban residential grid part i –

- unbalance,” *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1, no. 14, pp. 817–822, May 2016, <https://doi.org/10.24084/repqj14.474>.
- [49] D. Schwanz, S. K. Rönnerberg, and M. Bollen, “Hosting Capacity for Photovoltaic Inverters considering Voltage Unbalance.”
- [50] R. Shigenobu, A. Nakadomari, Y. Y. Hong, P. Mandal, H. Takahashi, and T. Senjyu, “Optimization of voltage unbalance compensation by smart inverter,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 18, Sep. 2020, <https://doi.org/10.3390/en13184623>.
- [51] R. Tucker, M. Norwalk, and P. Hung, “Distribution voltage imbalance mitigation through transmission line ideal phasing,” in *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, IEEE, Jul. 2016, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2016.7741377>.
- [52] D. Bellan, “Approximate Circuit Representation of Voltage Unbalance Emission Due to Load Asymmetry in Three-Phase Power Systems,” in *2018 IEEE 4th Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON)*, IEEE, Nov. 2018, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/GEMCCON.2018.8628545>.
- [53] T. D. Kahingala, S. Perera, A. P. Agalgaonkar, and U. Jayatunga, “Determining the Impact of Line Asymmetries on Network Voltage Unbalance based on Balanced Load Flow Studies,” in *2018 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, IEEE, Nov. 2018, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2018.8757897>.
- [54] W. Xu, S. Member, E. E. Ahmed, S. Member, X. Zhang, and X. Liu, “Measurement of Network Harmonic Impedances: Practical Implementation Issues and Their Solutions,” 2002. <https://doi.org/10.1109/61.974209>.
- [55] C4.109 CIGRE-CIRED Working Group, “Review of Emission assessment techniques,” *Group (New. York)*, no. January, pp. 1–84, 2011.
- [56] U. Jayatunga, “Further Contributions to the Development of the Technical Report IEC / TR 61000-3-13: 2008 on Voltage Unbalance Management Methodologies,” no. September, 2013.
- [57] R. Gregory, “Propostas de metodologias para a determinação das contribuições sobre os desequilíbrios em sistemas elétricos trifásicos,” Tese (Doutorado), Universidade Federal de Uberlândia, 2020. <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2020.725>.
- [58] U. Jayatunga, S. Perera, P. Ciufu, and A. P. Agalgaonkar, “A refined general summation law for VU emission assessment in radial networks,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 73, pp. 329–339, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.05.004>.

- [59] M. Abasi, M. Razaz, G. Seifossadat, and S. Moosapour, "Presenting a New Formulation to Analyze and Determine Unbalance Voltage Produced at the Place of Load Resulting From Network and Loads Unbalance and Asymmetry of Transmission Lines in Radial Power Systems," vol. 4, no. 3, 2015.
- [60] Y. Sayenko, D. Kalyuzhniy, V. Bolgov, and T. Baranenko, "Evaluating responsibility for voltage unbalance emission in three-phase three-wire networks," *Proceeding of the International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, EPQU*, vol. 2020-Septe, pp. 1–6, 2020, <https://doi.org/10.1109/EPQU50182.2020.9220312>.
- [61] Y. Sayenko, D. Kalyuzhniy, and V. Bolgov, "NEW WAY TO IDENTIFY AND ASSESS VOLTAGE UNBALANCE EMISSION SOURCES IN THREE-PHASE THREE-WIRE ELECTRICAL," pp. 65–72, 2019, doi: 10.32073/iepl.2019.07.
- [62] Y. Sayenko, M. Sukhonos, D. Kalyuzhniy, and V. Bolgov, "Mathematical model for real-time assessment of contributions of disturbing sources to power quality level at a Point of Common Coupling," in *2016 Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ)*, IEEE, Aug. 2016, pp. 29–35. <https://doi.org/10.1109/PQ.2016.7724085>.
- [63] V. Bolgov and D. Kalyuzhniy, "Accuracy of voltage unbalance source assessment in three-phase three-wire electrical networks," *Proceedings of the 2020 Ural Smart Energy Conference, USEC 2020*, pp. 1–4, 2020, <https://doi.org/10.1109/USEC50097.2020.9281165>.
- [64] W. Xu and Y. Liu, "A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 2, pp. 804–811, 2000, <https://doi.org/10.1109/61.853023>.
- [65] M. A. Moraes, R. C. F. Gregory, B. M. Giancesini, J. C. de Oliveira, and I. N. Santos, "Comparative analysis of methods for sharing the responsibility of voltage imbalances in electrical systems," in *Anais da XIV Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*, Galoa, 2021, pp. 2–7. <https://doi.org/10.17648/cbqee-2021-130581>.
- [66] R. C. F. Gregory, T. M. Scotti, and J. C. Oliveira, "Performance evaluation of unbalance sharing responsibility procedures," *SBSE 2018 - 7th Brazilian Electrical Systems Symposium*, 2018, <https://doi.org/10.1109/SBSE.2018.8395634>.
- [67] M. Arvelos Moraes, R. C. Filiagi Gregory, B. Morais Giancesini, J. C. de Oliveira, and I. Santos, "Análise Comparativa dos Métodos para o Compartilhamento da Responsabilidade dos Desequilíbrios de Tensão em Sistemas Elétricos," *Galoa Events Proceedings*, Aug. 2021. <https://doi.org/10.17648/cbqee-2021-130581>.

- [68] Z. Liu and J. V. Milanović, “Probabilistic Estimation of Voltage Unbalance in MV Distribution Networks With Unbalanced Load,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 2, pp. 693–703, Apr. 2015, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2322391>.
- [69] A. Pérez Vallés and P. Salmerón Revuelta, “A new distributed measurement index for the identification of harmonic distortion and/or unbalance sources based on the IEEE Std. 1459 framework,” *Electric Power Systems Research*, vol. 172, no. February, pp. 96–104, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.03.007>.
- [70] J. Kennedy, M. Morcos, and A. Lo, “Cost Allocation of Voltage Unbalance in Distribution Networks,” in *2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, IEEE, Jul. 2020, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICHQP46026.2020.9177935>.
- [71] K. Srinivasan and R. Jutras, “Conforming and non-conforming current for attributing steady state power quality problems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 1, pp. 212–217, 1998. <https://doi.org/10.1109/61.660880>
- [72] L. F. L. Arão, “Avaliação comparativa entre métodos para atribuição de responsabilidades devido ao desequilíbrio de tensão,” Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2014.
- [73] T. E. Seiphethlo and A. P. J. Rens, “On the assessment of voltage unbalance,” *ICHQP 2010 - 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, no. 1, pp. 0–5, 2010, <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2010.5625366>.
- [74] L. F. L. Arao, A. L. F. Filho, and M. V. B. Mendonca, “Comparative Evaluation of Methods for Attributing Responsibilities Due To Voltage Unbalance,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 2, pp. 743–752, Apr. 2016, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2493445>.
- [75] A. F. T. Neto, G. P. L. Cunha, M. V. B. Mendonca, and A. L. F. Filho, “A comparative evaluation of methods for analysis of propagation of unbalance in electric systems,” in *2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA)*, IEEE, Sep. 2012, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2012.6319083>.
- [76] C. J. Tuo, M. X. Tian, L. J. Sun, and J. Li, “An Adjustment scheme of rewarding and penalizing electricity charges considering unbalanced responsibility,” 2020.
- [77] L. Luan, H. Peng, W. Mo, Y. Wang, and Z. Xu, “Location Method for Three Phase Unbalance Sources in Distribution Network Based on CSO Optimized Deep Belief Network,” in *Proceedings - 2021 International Conference on Power System Technology*:

Carbon Neutrality and New Type of Power System, POWERCON 2021, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 1986–1990. <https://doi.org/10.1109/POWERCON53785.2021.9697787>.

- [78] Y. Sun, P. Li, S. Li, and L. Zhang, “Contribution determination for multiple unbalanced sources at the point of common coupling,” *Energies (Basel)*, vol. 10, no. 2, 2017, <https://doi.org/10.3390/en10020171>.
- [79] F. Pereira, “Separação cega de fontes aplicada ao compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas,” Universidade Federal de Uberlândia, 2022. <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2022.5047>.
- [80] F. A. Pereira, S. F. de P. Silva, and I. N. Santos, “Blind source separation methods applied to evaluate harmonic contribution,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 12, pp. 1–18, 2021, <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13149>.
- [81] Wilsun Xu and Yilu Liu, “A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 2, pp. 804–811, 2000, <https://doi.org/10.1109/61.853023>.
- [82] Wilsun Xu and Yilu Liu, “A method to determine customer harmonic contributions for incentive-based harmonic control applications,” in *1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.99CH36364)*, IEEE, 1999, pp. 361–366. <https://doi.org/10.1109/PSS.1999.784375>.
- [83] R. Gregory, “Propostas de metodologias para a determinação das contribuições sobre os desequilíbrios em sistemas elétricos trifásicos,” Universidade Federal de Uberlândia, 2020. <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2020.725>.
- [84] M. A. Moraes, V. H. F. Brito, and J. C. de Oliveira, “An Approach for Determining Voltage Imbalance Contributions Based on Complex Independent Component Analysis,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 19, p. 7014, 2022, <https://doi.org/10.3390/en15197014>.
- [85] F. Karimzadeh, S. Esmaeili, and S. H. Hosseinian, “Method for determining utility and consumer harmonic contributions based on complex independent component analysis,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 10, no. 2, pp. 526–534, 2016, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0997>.
- [86] J. N. Kutz, *Data-Driven Modeling and Scientific Computing: Methods for Complex Systems & Big Data*. Oxford University Press, 2013.
- [87] D. Niebur, E. Gursoy, and H. Liao, “Independent Component Analysis Techniques for Power System Load Estimation,” in *Applied Mathematics for Restructured Electric*

Power Systems, Boston, MA: Springer US, 2005, pp. 287–317. https://doi.org/10.1007/0-387-23471-3_13.

- [88] X. Yu, D. Hu, and J. Xu, *Blind Source Separation: Theory and Applications*, 1st ed. John Wiley & Sons, 2014. <https://doi.org/10.1002/9781118679852>
- [89] F. A. Pereira, S. F. de P. Silva, and I. N. Santos, “Blind source separation methods applied to evaluate harmonic contribution,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 12, pp. 1–18, 2021, <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13149>.
- [90] F. Pereira, “Separação cega de fontes aplicada ao compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas,” Universidade Federal de Uberlândia, 2022. <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2022.5047>.
- [91] J. Miettinen, S. Taskinen, K. Nordhausen, and H. Oja, “Fourth moments and independent component analysis,” *Statistical Science*, vol. 30, no. 3, pp. 372–390, 2015, <https://doi.org/10.1214/15-STS520>.
- [92] A. Hyvärinen and E. Oja, “Independent component analysis: algorithms and applications,” *Neural Networks*, vol. 13, no. 4–5, pp. 411–430, Jun. 2000, [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(00\)00026-5](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(00)00026-5).
- [93] E. B. A. Hyvarinen, “A fast fixed-point algorithm for independent component analysis of complex valued signals,” *Int. J. Neural Syst.*, vol. 10, no. 1, 2000. <https://doi.org/10.1142/S0129065700000028>
- [94] A. Hyvärinen, “The FastICA package for MATLAB,” Fast Independent Component Analysis (for Matlab). Accessed: Nov. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.cs.helsinki.fi/u/ahyvarin/software.shtml>
- [95] 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 Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 4, pp. 1843–1852, 2015, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2398820>.
- [96] E. Gursoy and D. Niebur, “Harmonic load identification using complex independent component analysis,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 1, pp. 285–292, 2009, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.2002968>.
- [97] F. Chen, N. Mao, Y. Wang, Y. Wang, and X. Xiao, “Improved utility harmonic impedance measurement based on robust independent component analysis and bootstrap check,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 14, no. 5, pp. 910–919, 2020, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1153>.

- [98] 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.
- [99] 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," *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP*, vol. 2018-May, pp. 1–5, 2018, <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378914>.
- [100] Q. Shu, T. Liu, and F. Xu, "A new algorithm for calculating utility harmonic impedance," *Electric Power Systems Research*, vol. 191, no. October 2020, p. 106893, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106893>.
- [101] T. Liu, Q. Shu, F. Xu, L. Fan, and H. Li, "A Method for Determining Harmonic Contribution and Harmonic Source Current Based on Minimum Mutual Information and Bayesian Optimization," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, pp. 1–1, Sep. 2023, <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3315411>.
- [102] Y. Xia and W. Tang, "Study on the estimation of harmonic impedance based on Bayesian optimized Gaussian process regression," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 142, no. PA, p. 108294, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108294>.
- [103] X. Y. Xiao and H. G. Yang, "The method of estimating customers harmonic emission level based on bilinear regression," *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT2004)*, vol. 2, no. April, pp. 662–665, 2004, <https://doi.org/10.1109/DRPT.2004.1338066>.
- [104] R. Fan, T. Tan, H. Chang, X. Tong, and Y. Gao, "A Method for Assessing Customer Harmonic Emission Level Based on the Iterative Algorithm for Least Square Estimation," *Engineering*, vol. 05, no. 09, pp. 6–13, 2013, <https://doi.org/10.4236/eng.2013.59B002>.
- [105] A. Zebardast and H. Mokhtari, "New method for assessing the utility harmonic impedance based on fuzzy logic," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 11, no. 10, pp. 2448–2456, 2017, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0881>.
- [106] J. Hui, W. Freitas, J. C. M. Vieira, H. Yang, and Y. Liu, "Utility Harmonic Impedance Measurement Based on Data Selection," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 4, pp. 2193–2202, Oct. 2012, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2207969>.
- [107] X. Huang, P. Nie, and H. Gong, "A new assessment method of customer harmonic emission level," *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*, pp. 1–5, 2010, <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2010.5449329>.

- [108] J. Hui, H. Yang, S. Lin, and M. Ye, "Assessing utility harmonic impedance based on the covariance characteristic of random vectors," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 3, pp. 1778–1786, 2010, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2046340>.
- [109] Y. Sun, X. Xie, and P. Li, "Unbalanced source identification at the point of evaluation in the distribution power systems," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 28, no. 1, pp. 1–20, 2018, <https://doi.org/10.1002/etep.2460>.
- [110] E. Gursoy, "Independent Component Analysis for Harmonic Source Identification in Electric Power Systems," *Thesis*, no. April, 2007.
- [111] A. G. Asuero, A. Sayago, and A. G. González, "The correlation coefficient: An overview," *Crit. Rev. Anal. Chem.*, vol. 36, no. 1, pp. 41–59, 2006, <https://doi.org/10.1080/10408340500526766>.
- [112] J. Hui, H. Yang, S. Lin, and M. Ye, "Assessing utility harmonic impedance based on the covariance characteristic of random vectors," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 3, pp. 1778–1786, 2010, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2046340>.
- [113] 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," *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP*, vol. 2018-May, pp. 1–5, 2018, <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378914>.
- [114] 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 Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 4, pp. 1843–1852, 2015, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2398820>.
- [115] J. Hui, W. Freitas, J. C. M. Vieira, H. Yang, and Y. Liu, "Utility Harmonic Impedance Measurement Based on Data Selection," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 4, pp. 2193–2202, Oct. 2012, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2207969>.
- [116] E. Parzen, "On Estimation of a Probability Density Function and Mode," *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 33, no. 3, pp. 1065–1076, Sep. 1962, <https://doi.org/10.1214/aoms/1177704472>.
- [117] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, Perth, WA, Australia: IEEE, 1995, pp. 1942–1948. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>.
- [118] B. B. Miranda, "Otimização multiobjetivo baseada na análise em elementos finitos e aplicada sobre o sistema de acionamento de um motor a relutância variável," Universidade Federal de Uberlândia, 2023.

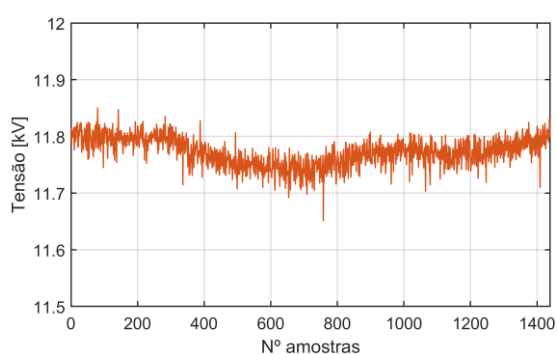
- [119] MathWorks, “Particle Swarm Optimization Algorithm.” Accessed: Nov. 27, 2023. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/gads/particle-swarm-optimization-algorithm.html>
- [120] M. Erik, H. Pedersen, and M. E. H. Pedersen, “Good parameters for particle swarm optimization,” *Technical Report HL1001, Hvass Laboratories*, vol. HL1001, pp. 1–12, 2010.
- [121] E. Mezura-Montes and C. A. Coello Coello, “Constraint-handling in nature-inspired numerical optimization: Past, present and future,” *Swarm Evol. Comput.*, vol. 1, no. 4, pp. 173–194, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2011.10.001>.
- [122] I. Papic *et al.*, “A Benchmark Test System to Evaluate Methods of Harmonic Contribution Determination,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 1, pp. 23–31, 2019, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2817542>.
- [123] Y. Xia and W. Tang, “Study on the estimation of harmonic impedance based on Bayesian optimized Gaussian process regression,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 142, Nov. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108294>.
- [124] P. Lazzeroni, S. Olivero, F. Stirano, and M. Repetto, “Impact of PV penetration in a distribution grid: A Middle-East study case,” in *2015 IEEE 1st International Forum on Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a better tomorrow (RTSI)*, IEEE, Sep. 2015, pp. 353–358. <https://doi.org/10.1109/RTSI.2015.7325123>.
- [125] L. Mili, M. G. Cheniae, N. S. Vichare, and P. J. Rousseeuw, “Robust state estimation based on projection statistics,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 2, pp. 1118–1127, May 1996, <https://doi.org/10.1109/59.496203>.
- [126] H. Zhang *et al.*, “Robust State Estimation Method Based on Mahalanobis Distance Under Non-Gauss Noise,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 9243–9250, 2024, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3348169>.

APÊNDICE A. RESULTADOS OBTIDOS NA AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL

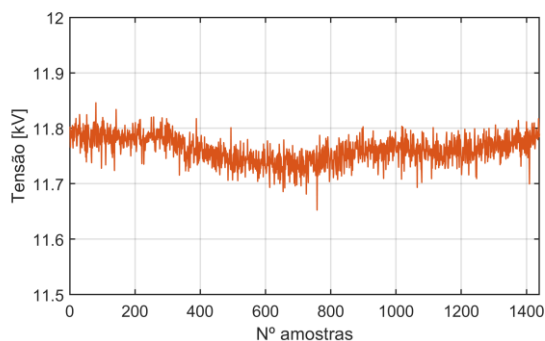
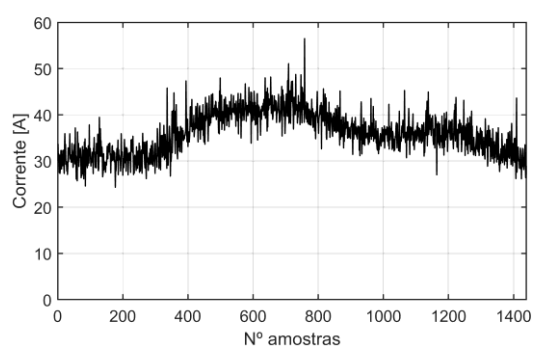
Além dos resultados apresentados no texto principal da tese, a seguir são mostrados os desenvolvimentos em detalhes para todas as condições e PACs avaliados.

Condição I (Dominância do Consumidor 1)

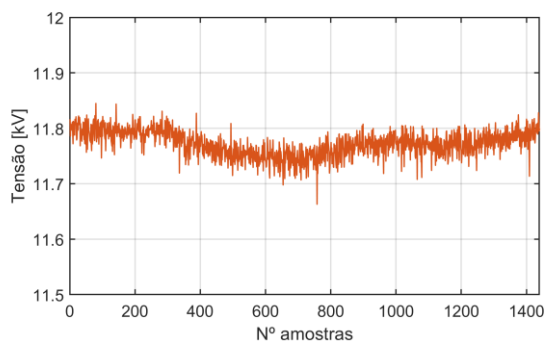
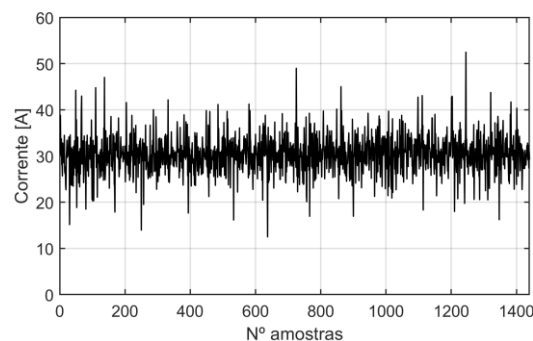
Figura 51 – Tensão e corrente de sequência positiva para Condição I – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.



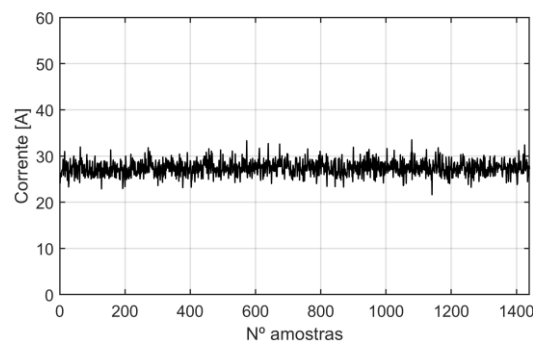
(a)



(b)

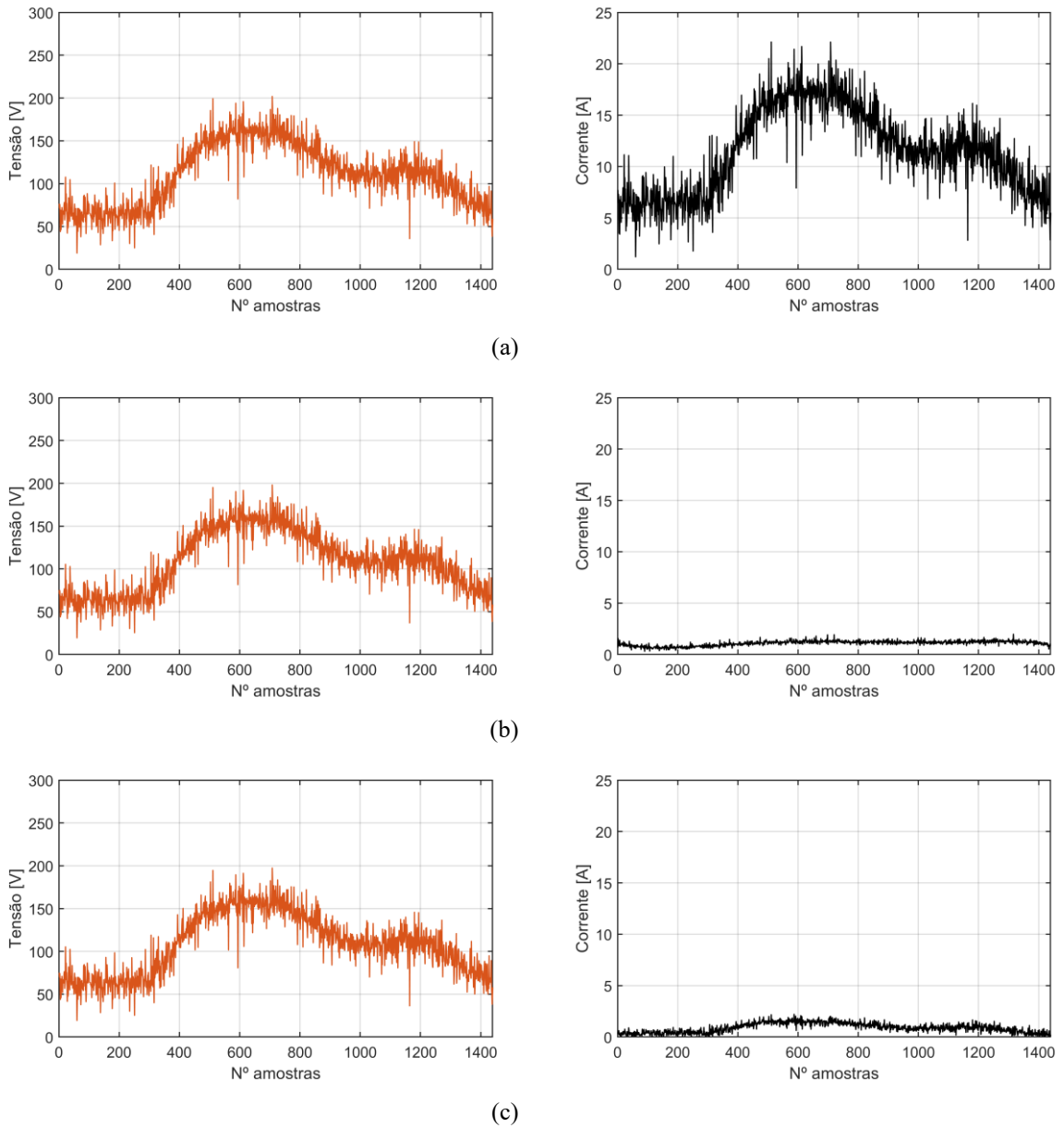


(c)



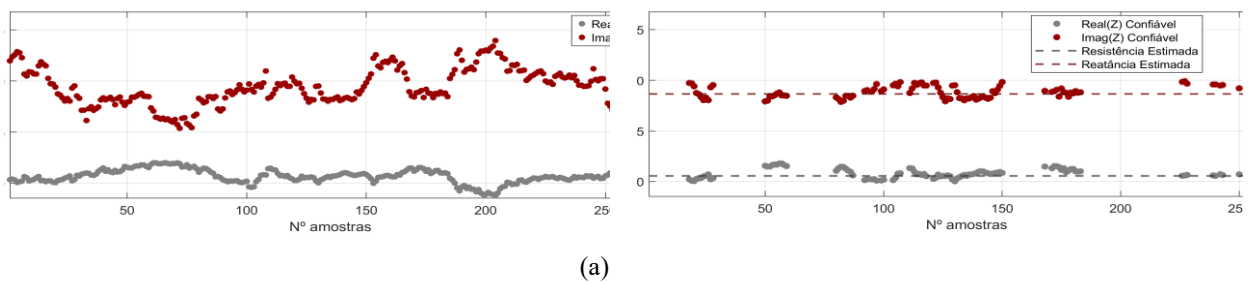
Fonte: Autoria Própria.

Figura 52 – Tensão e corrente de sequência negativa para Condição I – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.

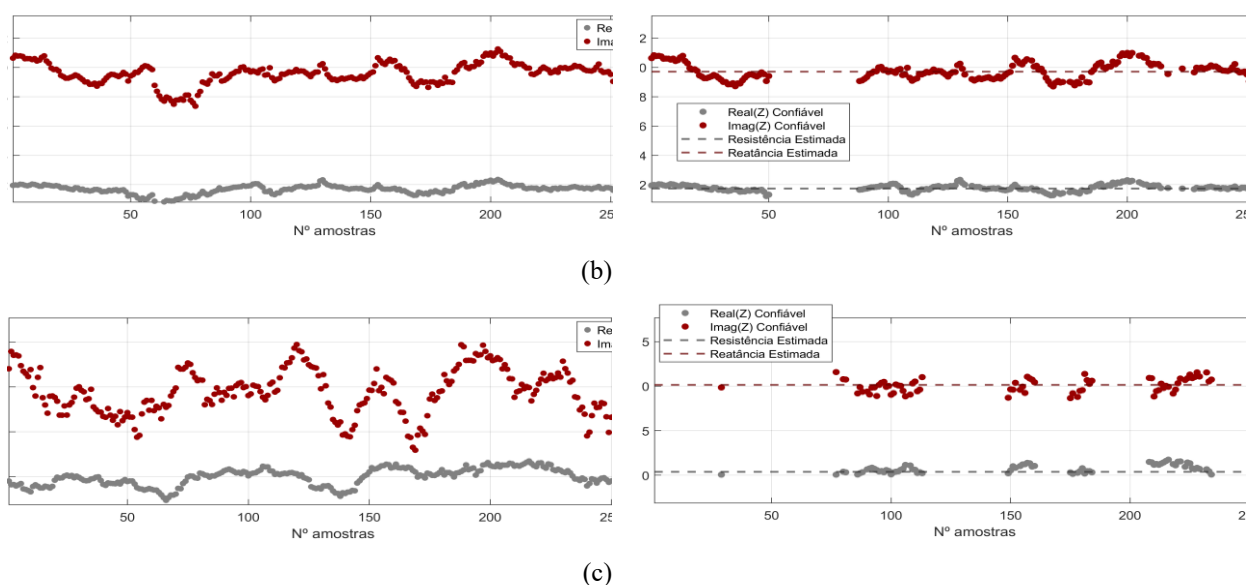


Fonte: Autoria Própria.

Figura 53 – Impedâncias de sequência positiva calculadas pelo MCCVA Adaptado para Condição I – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.



(a)



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 34 – Impedância de sequência positiva do supridor estimada pelo MCCVA adaptado para Condição I.

	PAC 01	PAC 02	PAC 03
	$\dot{Z}_{1S} [\Omega]$	$\dot{Z}_{1S} [\Omega]$	$\dot{Z}_{1S} [\Omega]$
Condição I	0,56 + j8,65	1,74 + j9,71	0,39 + j10,14

Fonte: Autoria própria.

Tabela 35 – Impedâncias de sequência negativa do supridor estimadas pelos métodos para Condição I.

	Gabarito	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação
	$\dot{Z}_{2S} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2S} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2S} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2S} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2S} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2S} [\Omega]$
PAC 1	1,31 + j8,12	1,25 + j8,15	1,24 + j8,22	1,28 + j8,12	1,30 + j8,09	1,25 + j8,18
Condição I PAC 2	1,74 + j8,33	1,19 + j12,88	1,89 + j13,57	0,25 + j16,37	0,65 + j15,04	5,75 + j20,01
PAC 3	1,62 + j9,39	0,92 + j7,50	-0,17 + j1,32	***	***	2,00 - j26,80

*** O Método não calculou nenhum valor de impedância.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 36 – Impedâncias de sequência negativa do consumidor estimadas pelos métodos para Condição I.

	Gabarito	MMC	MCICA
	$\dot{Z}_{2C} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2C} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2C} [\Omega]$
PAC 1	403,10 - j34,75	8,58 - j45,44	-7,61 - j6,05
Condição I PAC 2	378,90 + j78,72	255,47 + j158,16	256,29 + j123,34
PAC 3	13,76 + j60,06	9,05 + j59,02	9,22 + j61,13

Fonte: Autoria própria.

Tabela 37 – Contribuições do consumidor estimadas pelos métodos para Condição I.

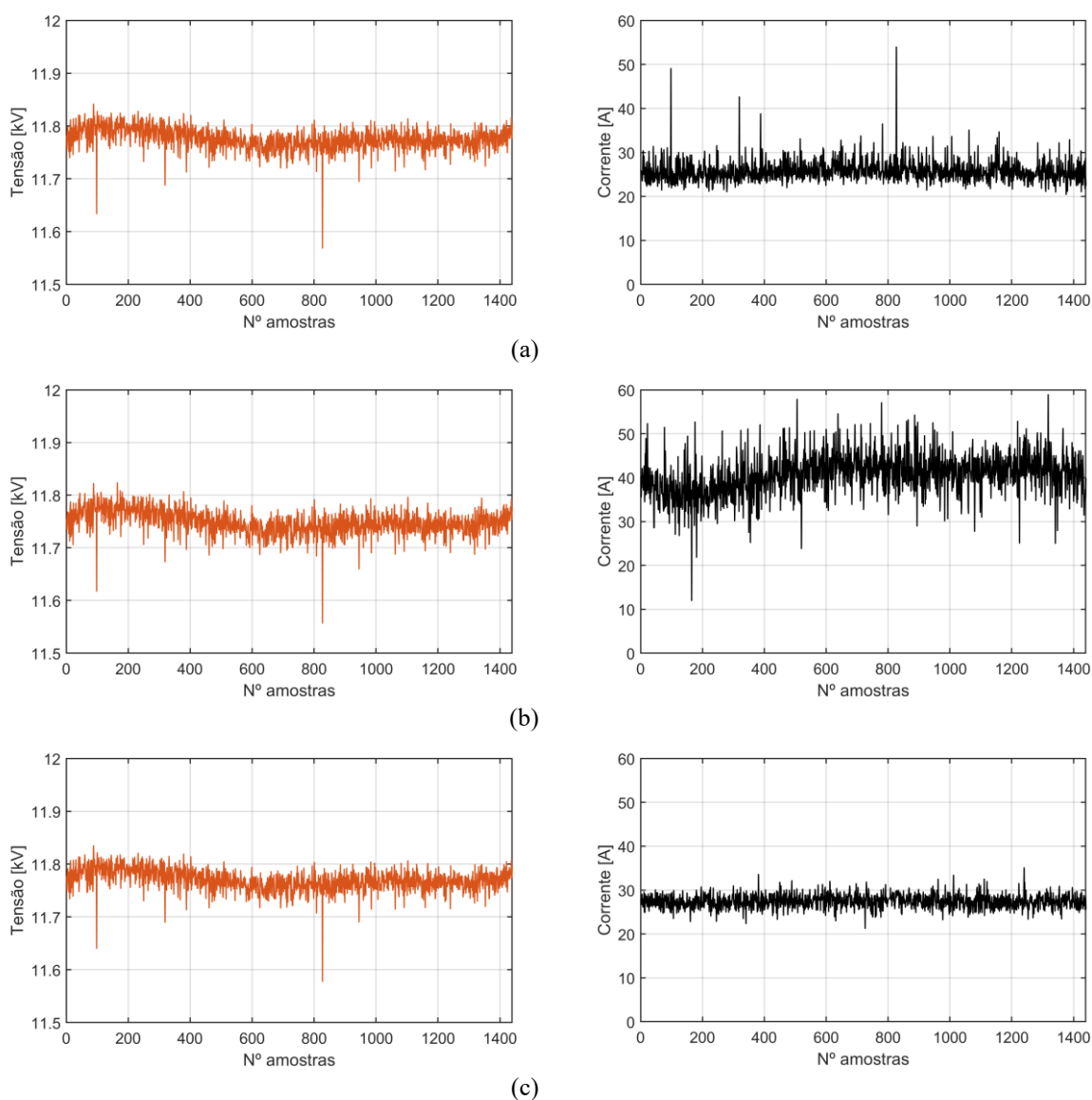
		Gabarito	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação
Condição I	PAC 1	84,3%	81,2%	90,8%	84,2%	84,0%	84,8%
	PAC 2	9,6%	15,9%	16,6%	17,5%	16,1%	21,0%
	PAC 3	7,2%	6,2%	1,1%	***	***	19,5%

*** Não foi possível calcular.

Fonte: Autoria própria.

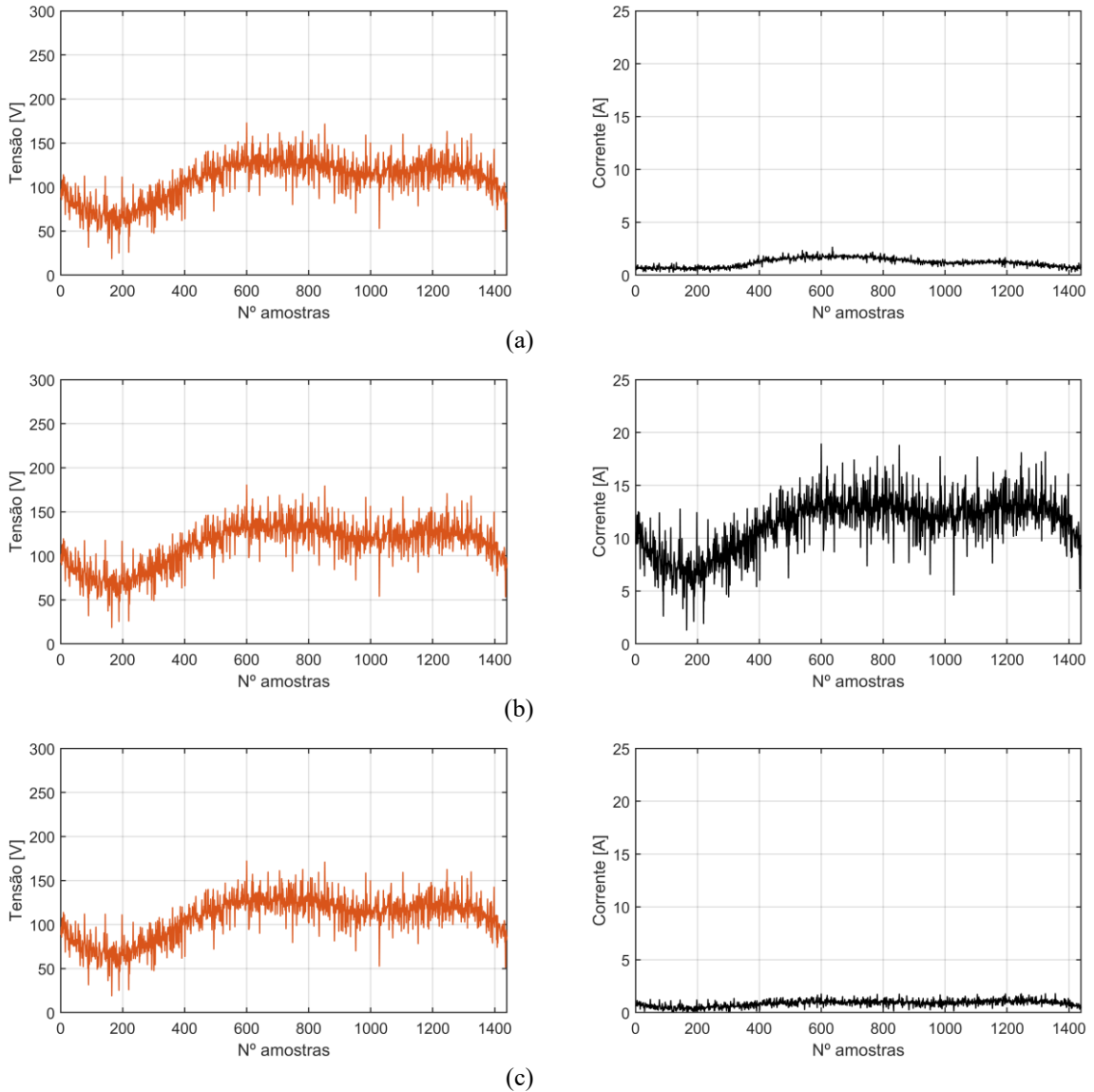
Condição II (Dominância do Consumidor 2)

Figura 54 – Tensão e corrente de sequência positiva para Condição II – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.



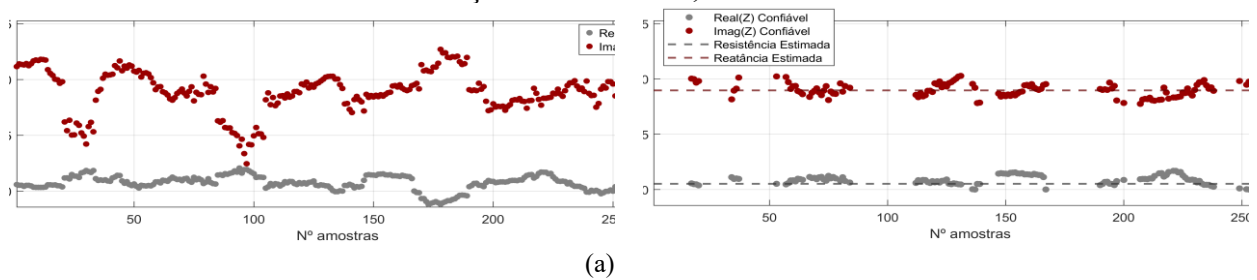
Fonte: Autoria Própria.

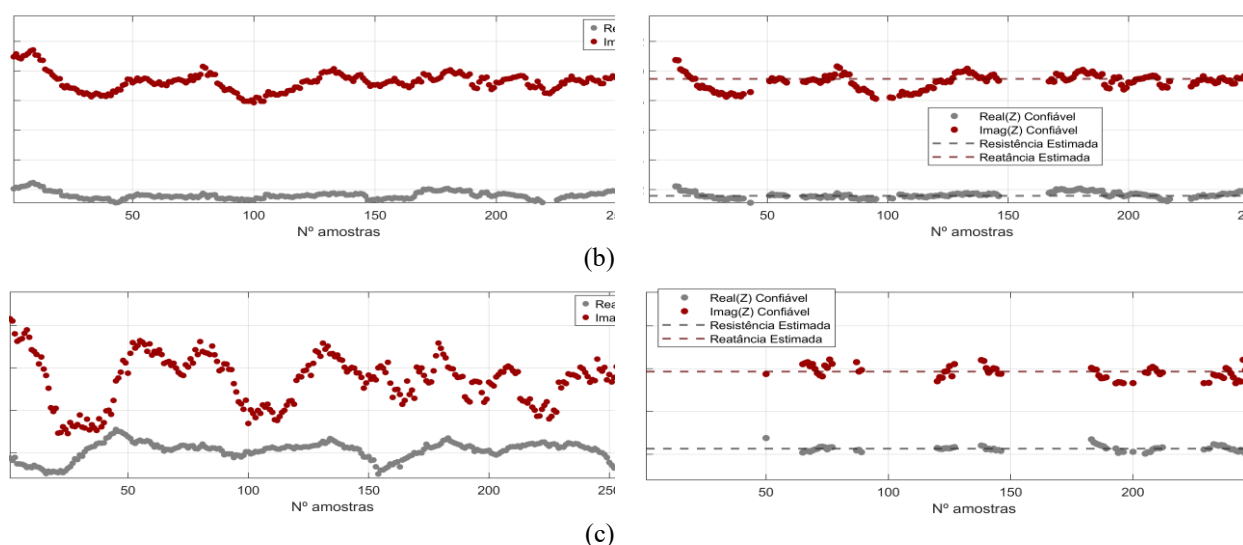
Figura 55 – Tensão e corrente de sequência negativa para Condição II – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 56 – Impedâncias de sequência positiva calculadas pelo MCCVA Adaptado para Condição II – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.





Fonte: Autoria Própria.

Tabela 38 – Impedância de sequência positiva do supridor estimada pelo MCCVA adaptado para Condição II.

	PAC 01	PAC 02	PAC 03
	$\hat{Z}_{1S} [\Omega]$	$\hat{Z}_{1S} [\Omega]$	$\hat{Z}_{1S} [\Omega]$
Condição II	0,51 + j8,95	1,57 + j9,47	0,66 + j9,20

Fonte: Autoria própria.

Tabela 39 – Impedâncias de sequência negativa do supridor estimadas pelos métodos para Condição II.

	Gabarito	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação
	$\hat{Z}_{2S} [\Omega]$	$\hat{Z}_{2S} [\Omega]$	$\hat{Z}_{2S} [\Omega]$	$\hat{Z}_{2S} [\Omega]$	$\hat{Z}_{2S} [\Omega]$	$\hat{Z}_{2S} [\Omega]$
PAC 1	1,31 + j8,12	0,80 + j9,90	-0,57 + j10,54	***	0,12 + j25,31	5,43 + j17,90
Condição II PAC 2	1,74 + j8,33	1,64 + j8,32	1,65 + j8,29	1,65 + j8,26	1,68 + j8,28	1,65 + j8,20
PAC 3	1,62 + j9,39	2,87 + j3,66	1,04 + j3,29	***	***	2,99 - j10,84

*** O Método não calculou nenhum valor de impedância.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 40 – Impedâncias de sequência negativa do consumidor estimadas pelos métodos para Condição II.

	Gabarito	MMC	MCICA
	$\hat{Z}_{2C} [\Omega]$	$\hat{Z}_{2C} [\Omega]$	$\hat{Z}_{2C} [\Omega]$
PAC 1	403,10 - j34,75	346,85 + j126,25	439,45 - j134,21
Condição II PAC 2	378,90 + j78,72	17,70 + j32,81	-1,64 - j8,47
PAC 3	13,76 + j60,06	8,86 + j59,12	8,93 + j60,46

Fonte: Autoria própria.

Tabela 41 – Contribuições do consumidor estimadas pelos métodos para Condição II.

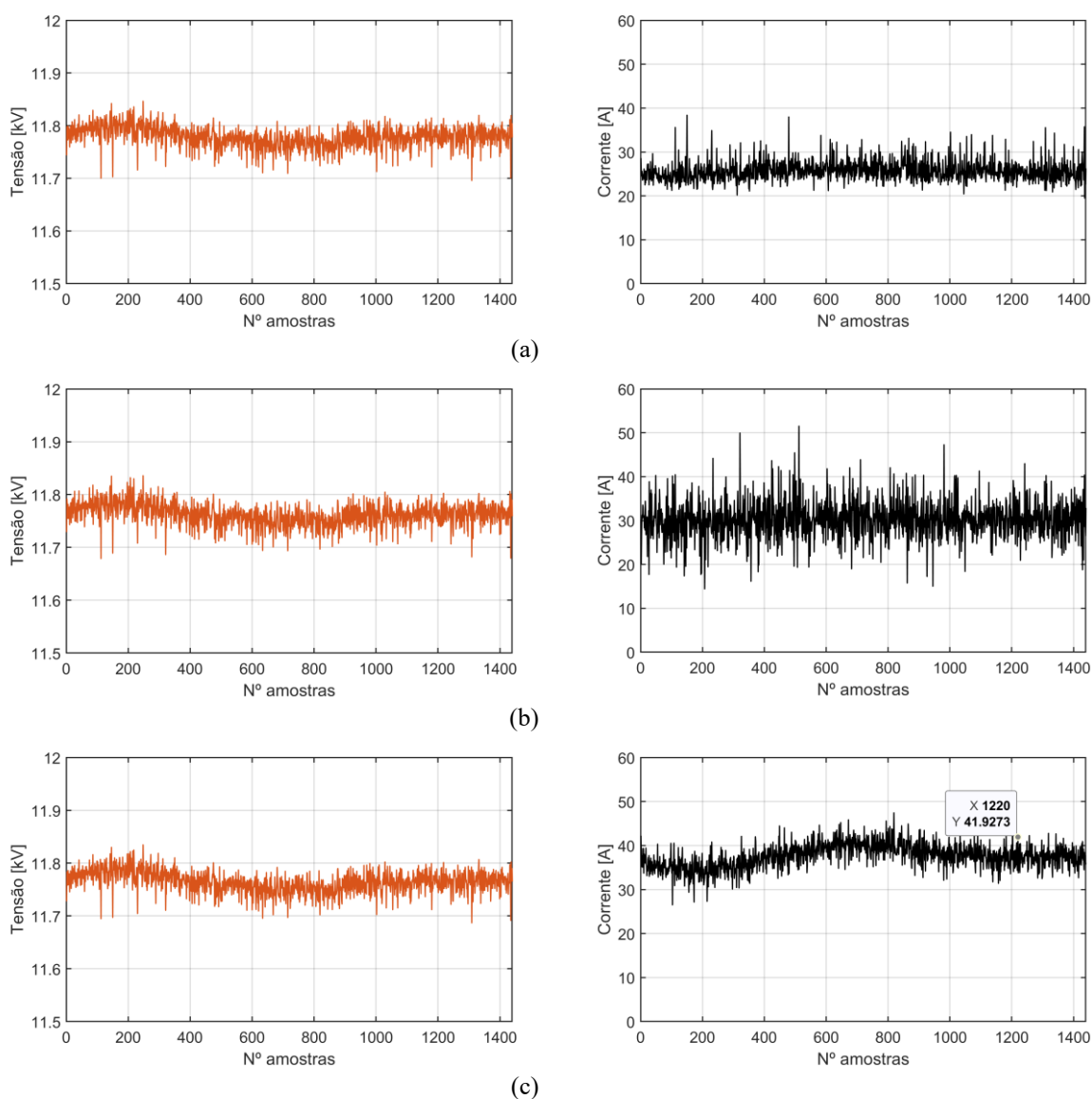
	Gabarito	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação
PAC 1	8,8%	11,6%	10,7%	***	27,1%	18,8%
Condição II PAC 2	85,6%	87,8%	0,0%	84,7%	84,9%	84,1%
PAC 3	7,0%	3,5%	2,8%	***	***	7,9%

*** Não foi possível calcular.

Fonte: Autoria própria.

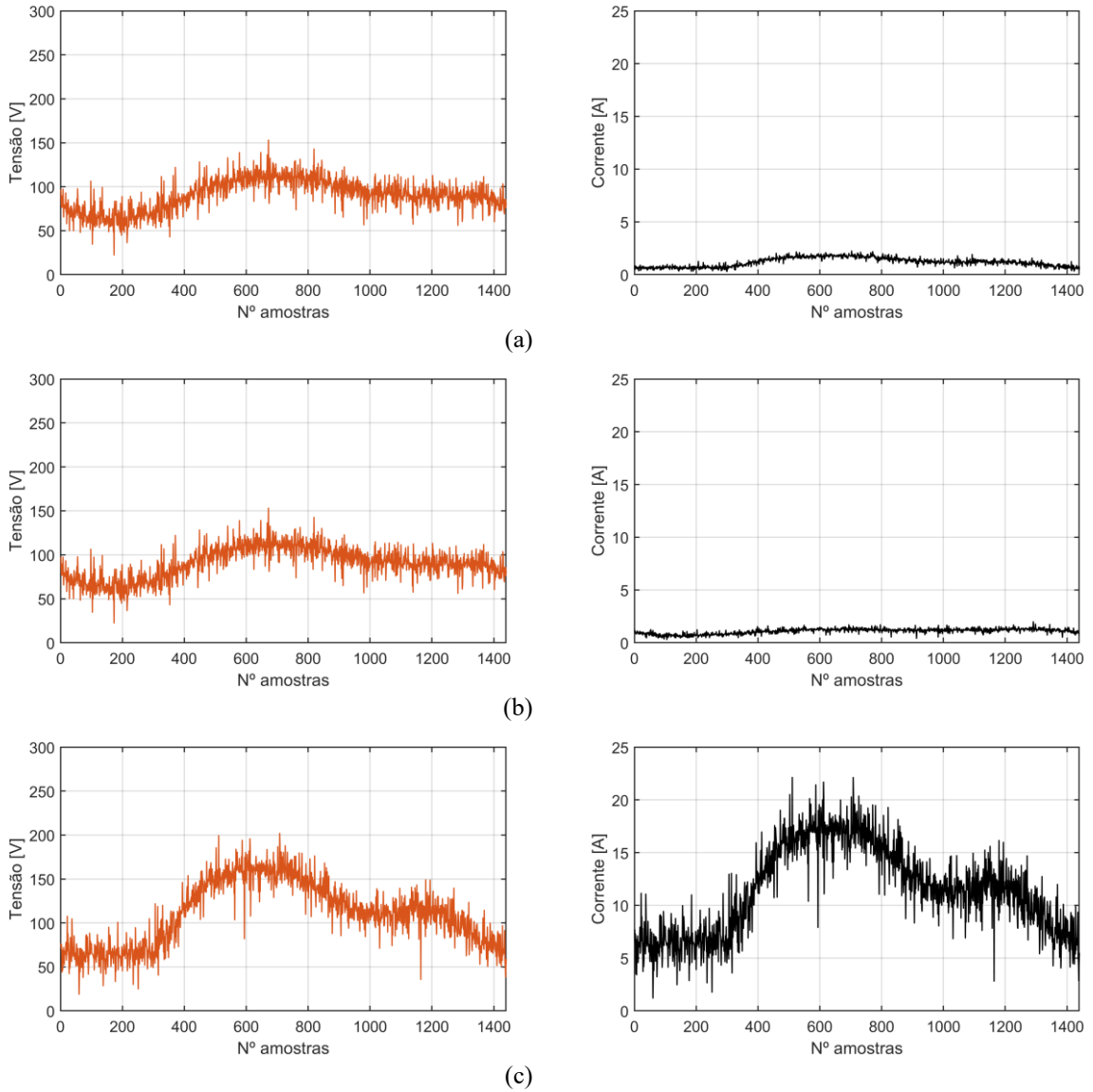
Condição III (Dominância do Consumidor 3)

Figura 57 – Tensão e corrente de sequência positiva para Condição III – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.



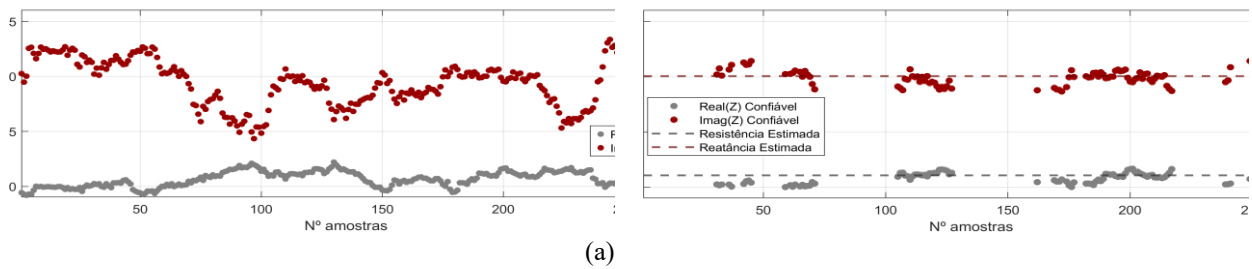
Fonte: Autoria Própria.

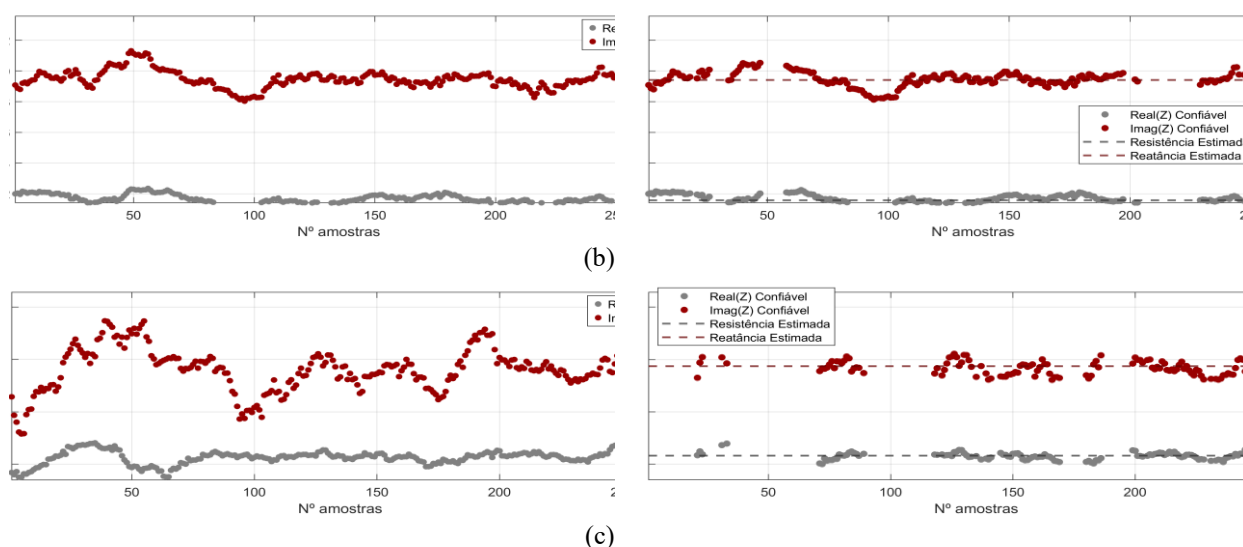
Figura 58 – Tensão e corrente de sequência negativa para Condição III – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 59 – Impedâncias de sequência positiva calculadas pelo MCCVA Adaptado para Condição III – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.





Fonte: Autoria Própria.

Tabela 42 – Impedância de sequência positiva do supridor estimada pelo MCCVA adaptado para Condição III.

	PAC 01	PAC 02	PAC 03
	$\dot{Z}_{1S} [\Omega]$	$\dot{Z}_{1S} [\Omega]$	$\dot{Z}_{1S} [\Omega]$
Condição III	1,05 + j10,08	1,58 + j9,41	0,82 + j9,36

Fonte: Autoria própria.

Tabela 43 – Impedâncias de sequência negativa do supridor estimadas pelos métodos para Condição III.

	Gabarito	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação
	$\dot{Z}_{2S} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2S} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2S} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2S} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2S} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2S} [\Omega]$
PAC 1	1,31 + j8,12	2,49 + j8,18	1,43 + j4,47	0,97 + j9,95	1,01 + j21,64	6,85 + j18,20
Condição III PAC 2	1,74 + j8,33	2,51 + j13,15	7,63 + j12,64	0,59 + j4,16	3,70 + j5,37	5,52 + j12,11
PAC 3	1,62 + j9,39	1,58 + j9,17	1,59 + j9,44	1,59 + j9,41	1,59 + j9,67	1,61 + j9,35

Fonte: Autoria própria.

Tabela 44 – Impedâncias de sequência negativa do consumidor estimadas pelos métodos para Condição III.

	Gabarito	MMC	MCICA
	$\dot{Z}_{2C} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2C} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2C} [\Omega]$
PAC 1	403,10 - j34,75	401,06 + j55,85	343,95 - j188,21
Condição III PAC 2	378,90 + j78,72	312,79 + j158,31	211,73 + j65,65
PAC 3	13,76 + j60,06	11,06 - j47,58	-1,54 - j9,38

Fonte: Autoria própria.

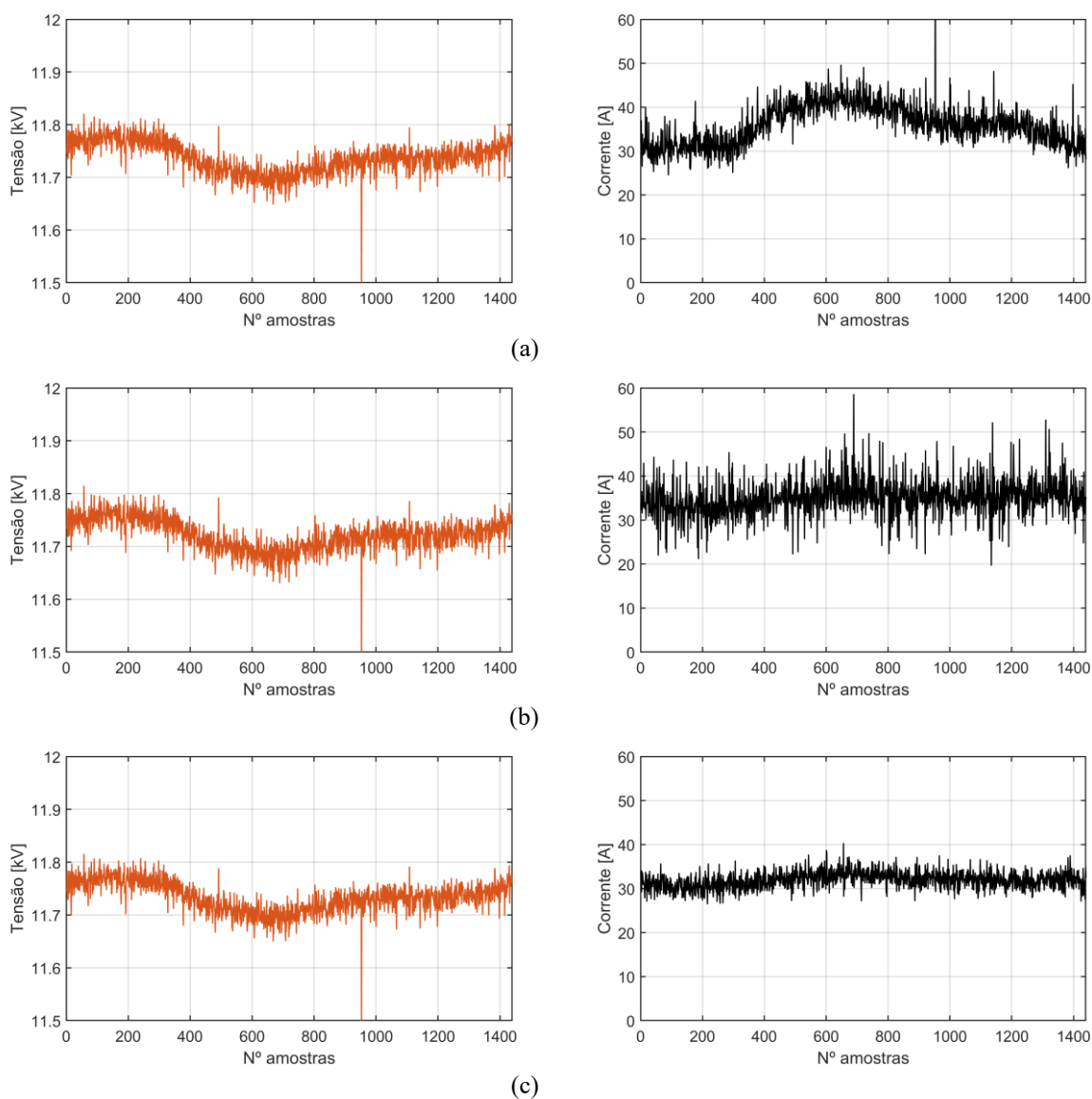
Tabela 45 – Contribuições do consumidor estimadas pelos métodos para Condição III

		Gabarito	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação
Condição III	PAC 1	10,4%	11,0%	5,4%	12,6%	27,5%	22,8%
	PAC 2	10,8%	17,7%	18,6%	5,0%	6,2%	14,3%
	PAC 3	80,2%	70,1%	100,0%	77,3%	79,3%	76,8%

Fonte: Autoria própria.

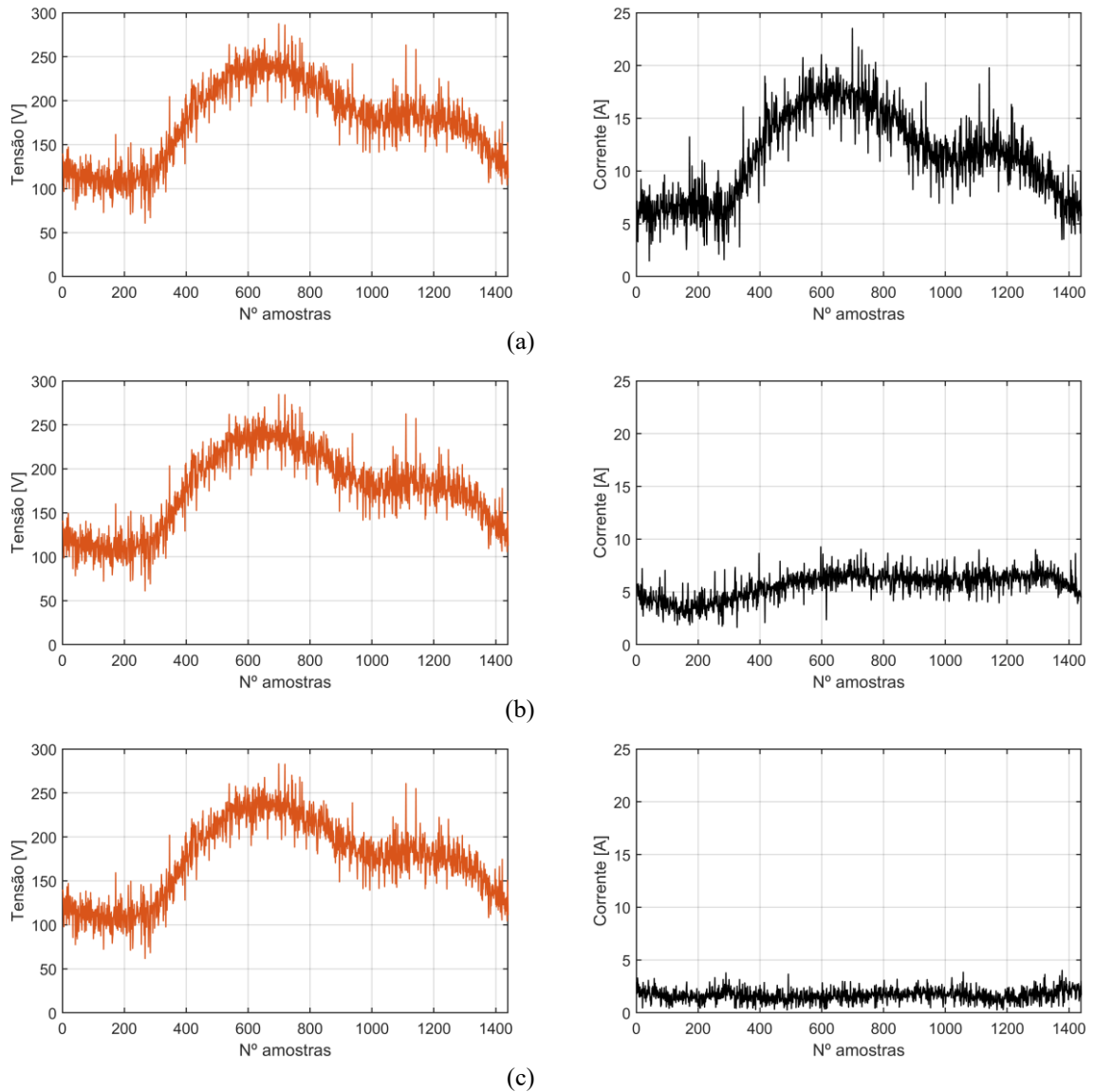
Condição IV (Responsabilidade compartilhada com foco no Consumidor 1)

Figura 60 – Tensão e corrente de sequência positiva para Condição IV – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.



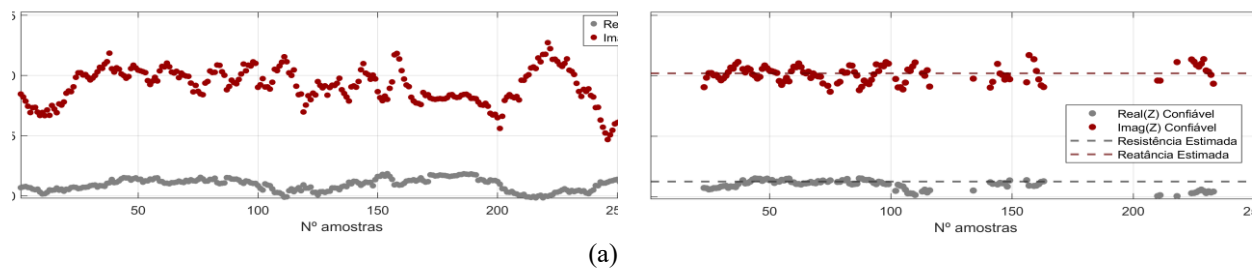
Fonte: Autoria Própria.

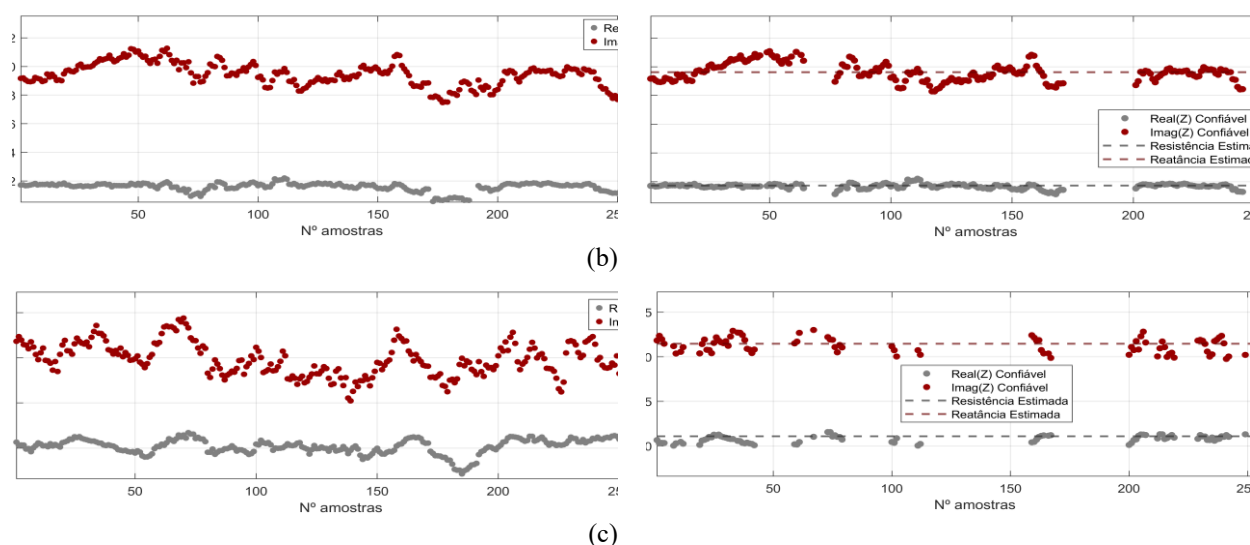
Figura 61 – Tensão e corrente de sequência negativa para Condição IV – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 62 – Impedâncias de sequência positiva calculadas pelo MCCVA Adaptado para Condição IV – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.





Fonte: Autoria Própria.

Tabela 46 – Impedância de sequência positiva do supridor estimada pelo MCCVA adaptado para Condição IV

	PAC 01	PAC 02	PAC 03
	$\hat{Z}_{1S} [\Omega]$	$\hat{Z}_{1S} [\Omega]$	$\hat{Z}_{1S} [\Omega]$
Condição IV	1,26 + j8,25	1,73 + j9,62	1,09 + j11,57

Fonte: Autoria própria.

Tabela 47 – Impedâncias de sequência negativa do supridor estimadas pelos métodos para Condição IV

	Gabarito	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação
	$\hat{Z}_{2S} [\Omega]$	$\hat{Z}_{2S} [\Omega]$	$\hat{Z}_{2S} [\Omega]$	$\hat{Z}_{2S} [\Omega]$	$\hat{Z}_{2S} [\Omega]$	$\hat{Z}_{2S} [\Omega]$
PAC 1	1,31 + j8,12	1,33 + j8,35	1,29 + j8,84	1,32 + j8,00	1,42 + j8,12	1,33 + j8,53
Condição IV PAC 2	1,74 + j8,33	1,73 + j7,62	1,40 + j7,16	1,05 + j8,94	1,43 + j10,69	1,94 + j8,22
PAC 3	1,62 + j9,39	1,71 + j10,00	0,86 + j7,61	0,98 + j0,93	1,03 - j2,98	2,20 + j4,43

Fonte: Autoria própria.

Tabela 48 – Impedâncias de sequência negativa do consumidor estimadas pelos métodos para Condição IV

	Gabarito	MMC	MCICA
	$\hat{Z}_{2C} [\Omega]$	$\hat{Z}_{2C} [\Omega]$	$\hat{Z}_{2C} [\Omega]$
PAC 1	403,10 - j34,75	10,27 + j45,09	-2,45 + j26,99
Condição IV PAC 2	378,90 + j78,72	45,22 - j126,66	46,10 - j118,41
PAC 3	13,76 + j60,06	9,16 + j50,62	9,97 + j80,34

Fonte: Autoria própria.

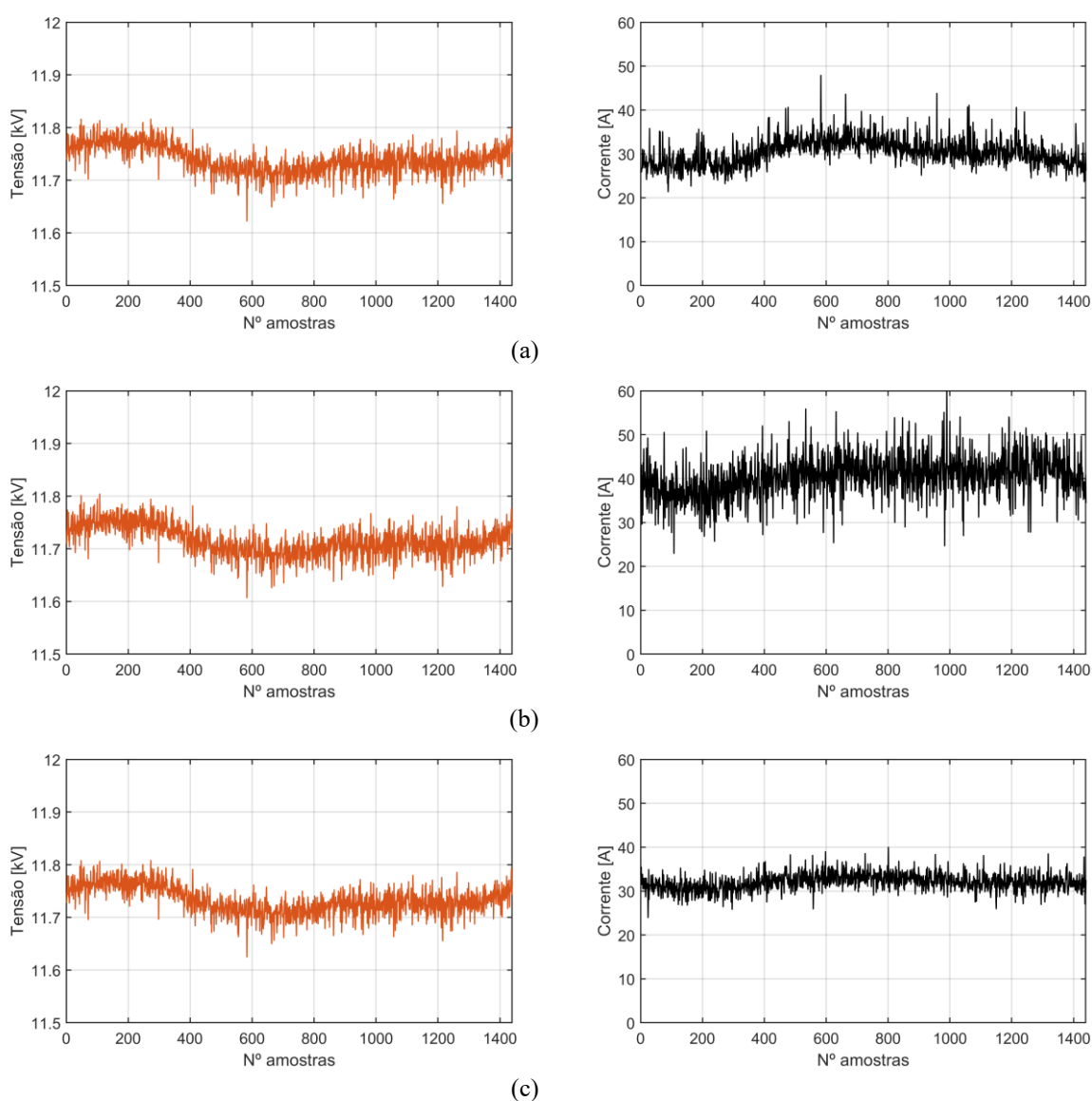
Tabela 49 – Contribuições do consumidor estimadas pelos métodos para Condição IV

		Gabarito	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação
Condição IV	PAC 1	52,33%	60,90%	67,60%	51,60%	52,30%	54,90%
	PAC 2	28,17%	21,30%	19,80%	29,40%	35,20%	27,30%
	PAC 3	21,75%	25,10%	15,80%	1,00%	0,00%	4,70%

Fonte: Autoria própria.

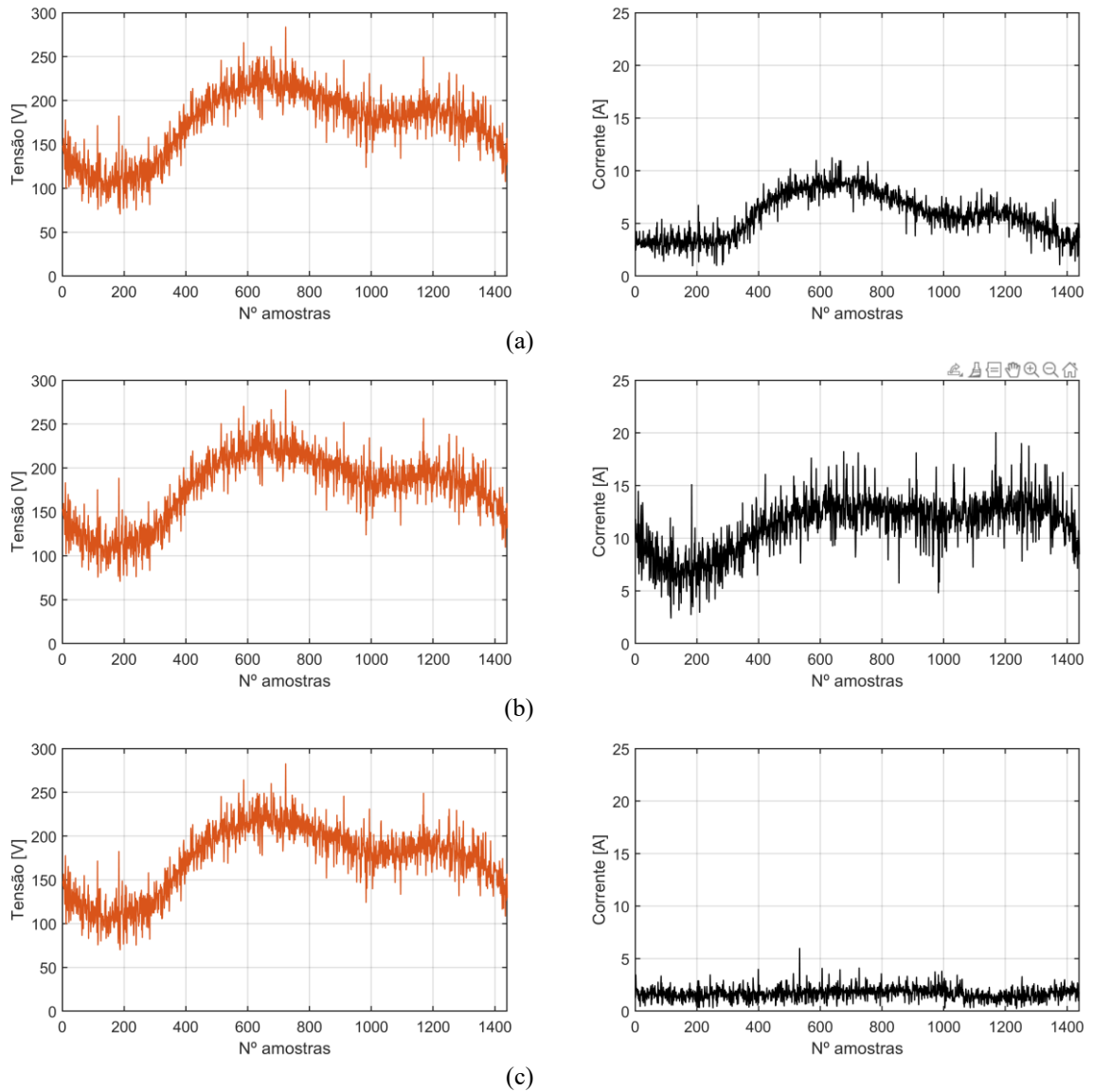
Condição V (Responsabilidade compartilhada com foco no Consumidor 2)

Figura 63 – Tensão e corrente de sequência positiva para Condição V – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.



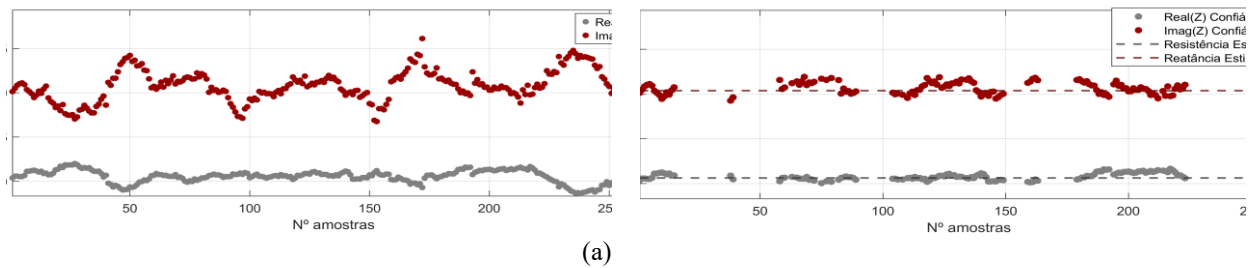
Fonte: Autoria Própria.

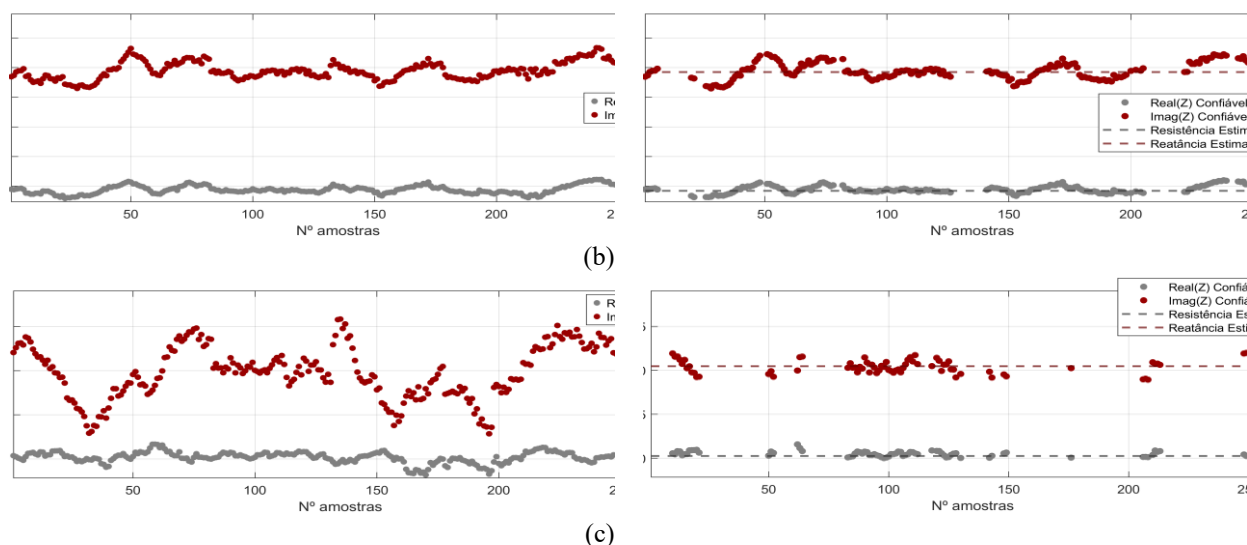
Figura 64 – Tensão e corrente de sequência negativa para Condição V – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 65 – Impedâncias de sequência positiva calculadas pelo MCCVA Adaptado para Condição V – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.





Fonte: Autoria Própria.

Tabela 50 – Impedância de sequência positiva do supridor estimada pelo MCCVA adaptado para Condição V.

	PAC 01	PAC 02	PAC 03
	$\hat{Z}_{1S} [\Omega]$	$\hat{Z}_{1S} [\Omega]$	$\hat{Z}_{1S} [\Omega]$
Condição V	$0,64 + j10,43$	$1,68 + j9,69$	$0,23 + j10,53$

Fonte: Autoria própria.

Tabela 51 – Impedâncias de sequência negativa do supridor estimadas pelos métodos para Condição V.

	Gabarito	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação
	$\hat{Z}_{2S} [\Omega]$	$\hat{Z}_{2S} [\Omega]$	$\hat{Z}_{2S} [\Omega]$	$\hat{Z}_{2S} [\Omega]$	$\hat{Z}_{2S} [\Omega]$	$\hat{Z}_{2S} [\Omega]$
PAC 1	$1,31 + j8,12$	$1,55 + j8,95$	$1,59 + j7,68$	$0,89 + j8,40$	$1,44 + j11,05$	$2,62 + j10,50$
Condição V PAC 2	$1,74 + j8,33$	$1,79 + j8,01$	$1,76 + j8,31$	$1,54 + j8,33$	$1,85 + j8,79$	$1,63 + j9,05$
PAC 3	$1,62 + j9,39$	$1,66 + j8,41$	$0,81 + j5,25$	$0,99 - j0,08$	$1,04 - j1,63$	$3,23 + j6,73$

Fonte: Autoria própria.

Tabela 52 – Impedâncias de sequência negativa do consumidor estimadas pelos métodos para Condição V.

	Gabarito	MMC	MCICA
	$\hat{Z}_{2C} [\Omega]$	$\hat{Z}_{2C} [\Omega]$	$\hat{Z}_{2C} [\Omega]$
PAC 1	$403,10 - j34,75$	$235,31 + j60,46$	$53,94 - j129,11$
Condição V PAC 2	$378,90 + j78,72$	$21,75 - j46,12$	$155,02 + j51,22$
PAC 3	$13,76 + j60,06$	$12,64 + j60,06$	$8,87 + j57,54$

Fonte: Autoria própria.

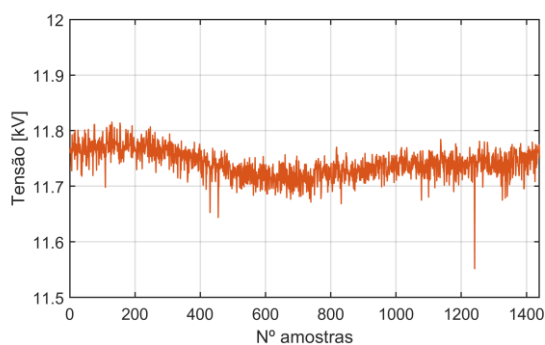
Tabela 53 – Contribuições do consumidor estimadas pelos métodos para Condição V.

	Gabarito	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação
PAC 1	26,7%	30,4%	21,6%	27,4%	36,2%	34,6%
Condição V PAC 2	54,1%	44,7%	54,7%	53,7%	56,8%	58,2%
PAC 3	21,6%	19,8%	13,2%	0,0%	0,0%	7,0%

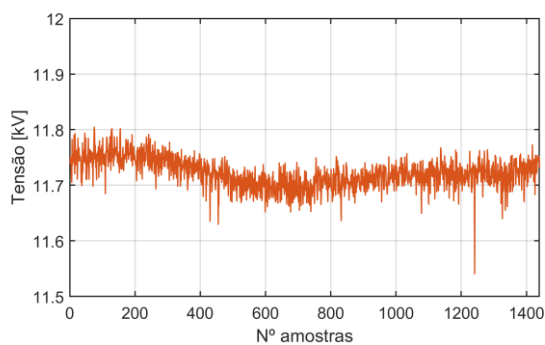
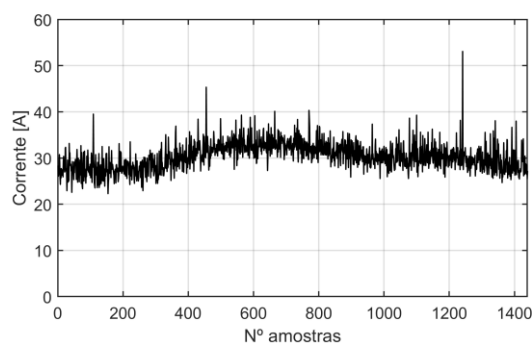
Fonte: Autoria própria.

Condição VI (Responsabilidade compartilhada com foco no Consumidor 3)

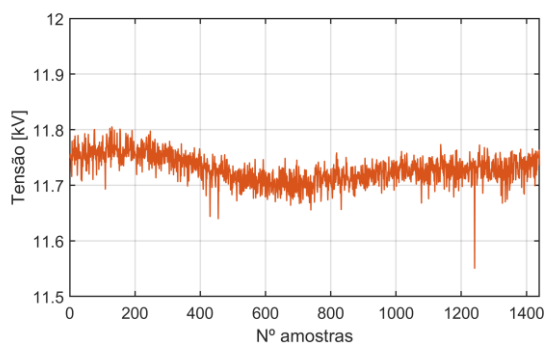
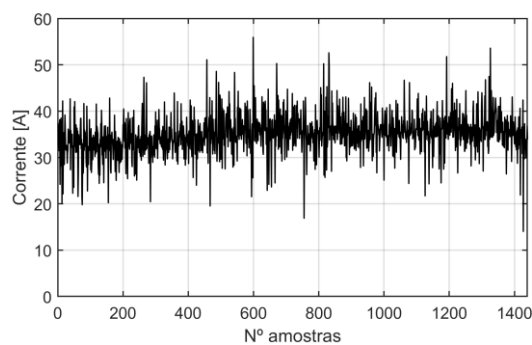
Figura 66 – Tensão e corrente de sequência positiva para Condição VI – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.



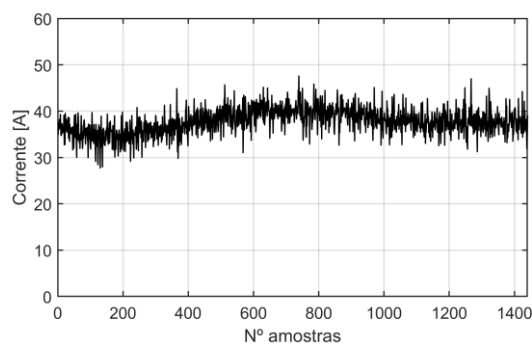
(a)



(b)

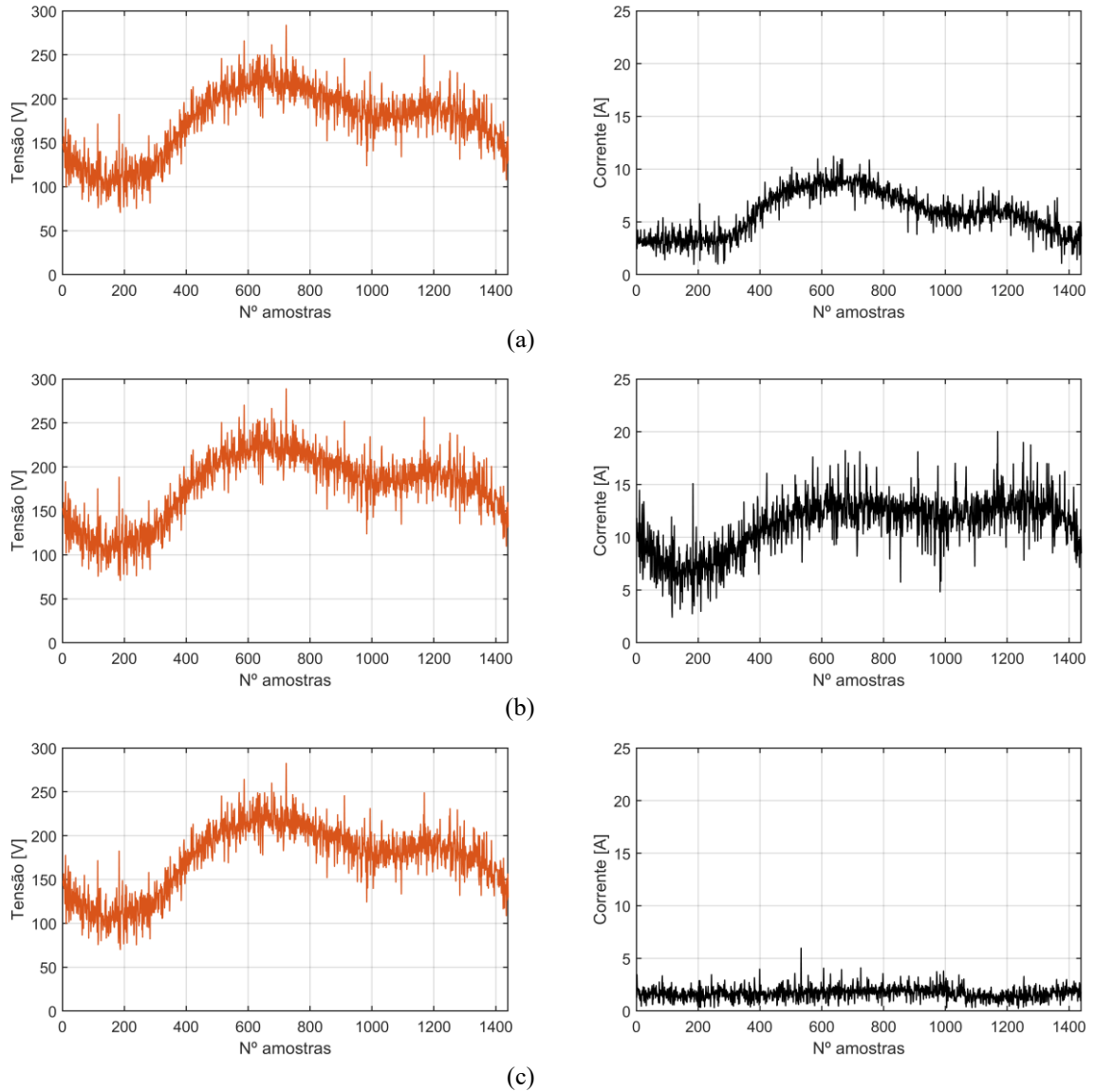


(c)



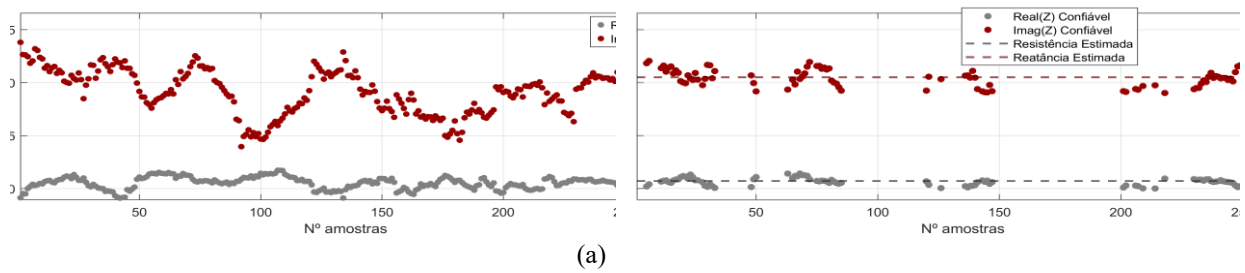
Fonte: Autoria Própria.

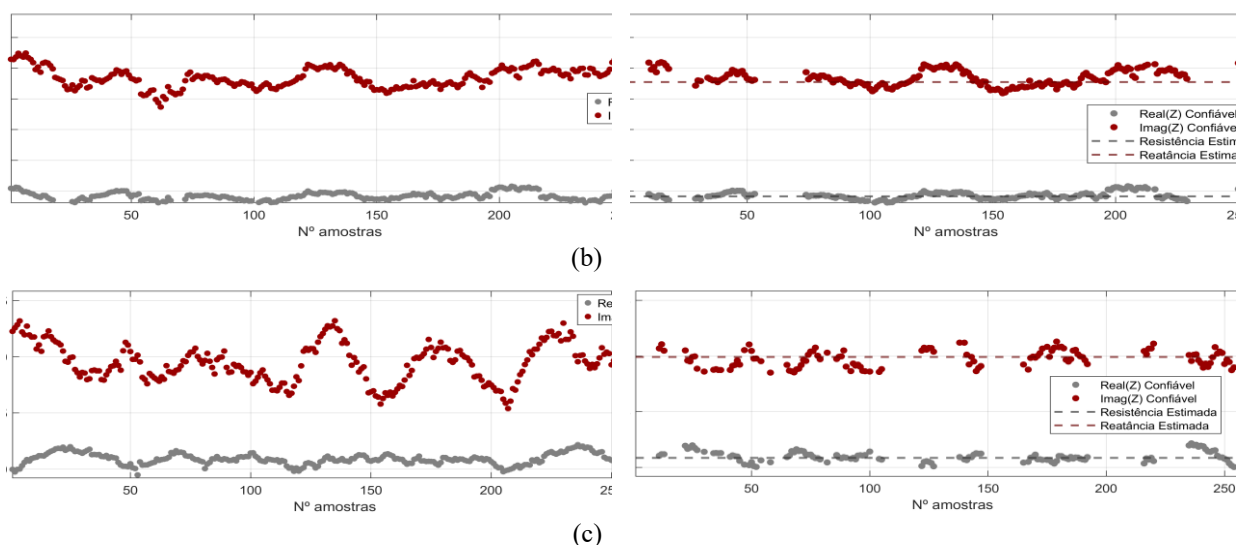
Figura 67 – Tensão e corrente de sequência negativa para Condição VI – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 68 – Impedâncias de sequência positiva calculadas pelo MCCVA Adaptado para Condição VI – a: PAC 1, b: PAC 2 e c: PAC 3.





Fonte: Autoria Própria.

Tabela 54 – Impedância de sequência positiva do supridor estimada pelo MCCVA adaptado para Condição VI

	PAC 01	PAC 02	PAC 03
	$\dot{Z}_{1s} [\Omega]$	$\dot{Z}_{1s} [\Omega]$	$\dot{Z}_{1s} [\Omega]$
Condição VI	$0,72 + j10,56$	$1,64 + j9,10$	$0,85 + j9,95$

Fonte: Autoria própria.

Tabela 55 – Impedâncias de sequência negativa do supridor estimadas pelos métodos para Condição VI

	Gabarito	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação	
	$\dot{Z}_{2s} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2s} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2s} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2s} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2s} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2s} [\Omega]$	
Condição VI	PAC 1	$1,31 + j8,12$	$1,45 + j8,01$	$1,27 + j8,73$	$1,36 + j8,49$	$1,86 + j9,51$	$0,88 + j7,96$
	PAC 2	$1,74 + j8,33$	$1,96 + j9,16$	$2,69 + j6,52$	$1,73 + j10,48$	$2,06 + j9,59$	$1,14 + j10,14$
	PAC 3	$1,62 + j9,39$	$1,67 + j9,98$	$1,85 + j9,18$	$1,53 + j8,53$	$1,98 + j8,78$	$1,46 + j7,93$

Fonte: Autoria própria.

Tabela 56 – Impedâncias de sequência negativa do consumidor estimadas pelos métodos para Condição VI

	Gabarito	MMC	MCICA	
	$\dot{Z}_{2c} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2c} [\Omega]$	$\dot{Z}_{2c} [\Omega]$	
Condição VI	PAC 1	$403,10 - j34,75$	$14,53 - j102,33$	$163,35 - j189,28$
	PAC 2	$378,90 + j78,72$	$61,82 - j142,54$	$46,32 - j42,65$
	PAC 3	$13,76 + j60,06$	$14,59 + j62,13$	$107,94 + j110,64$

Fonte: Autoria própria.

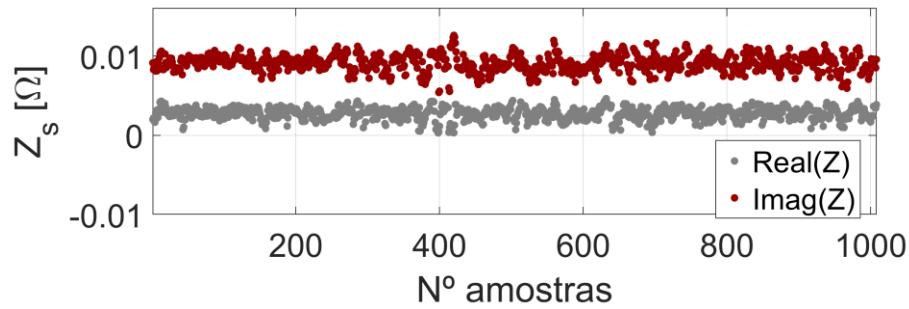
Tabela 57 – Contribuições do consumidor estimadas pelos métodos para Condição VI

		Gabarito	MMC	MCICA	MCCVA	MMQ	M. Flutuação
Condição VI	PAC 1	28,2%	21,9%	28,5%	27,4%	29,4%	33,0%
	PAC 2	29,1%	27,8%	19,6%	34,5%	35,8%	32,9%
	PAC 3	45,1%	47,3%	39,0%	31,0%	33,3%	34,4%

Fonte: Autoria própria.

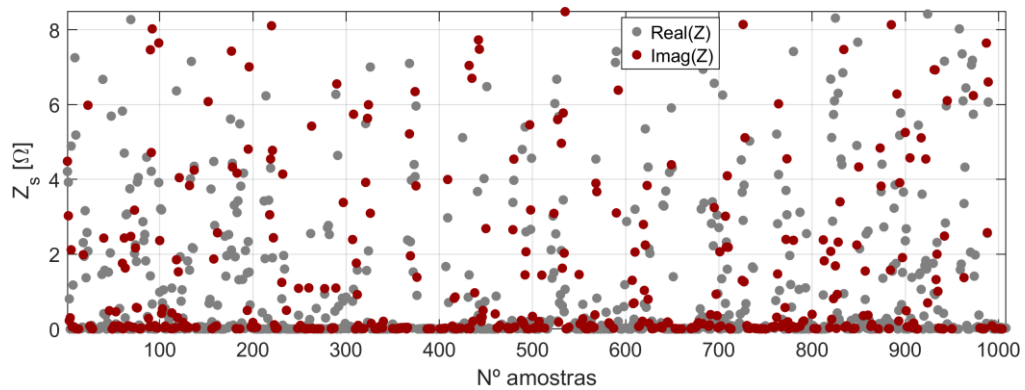
APÊNDICE B. RESULTADOS OBTIDOS NA AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

Figura 69 – Impedâncias de sequência negativa do supridor estimadas pelo MMC.



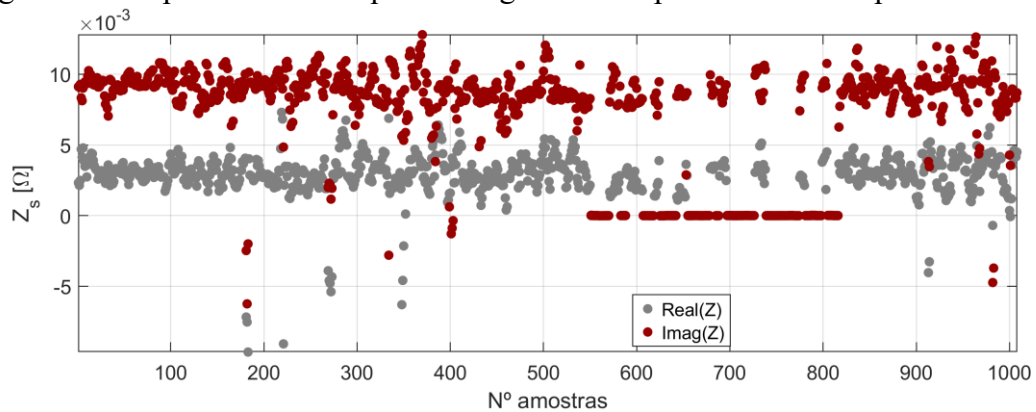
Fonte: Autoria Própria.

Figura 70 – Impedâncias de sequência negativa do consumidor estimadas pelo MMC.



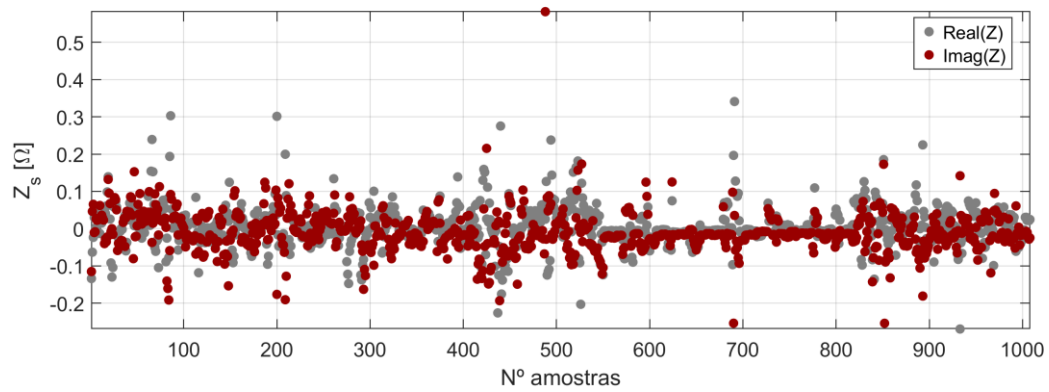
Fonte: Autoria Própria.

Figura 71 – Impedâncias de sequência negativa do supridor estimadas pelo MCICA.



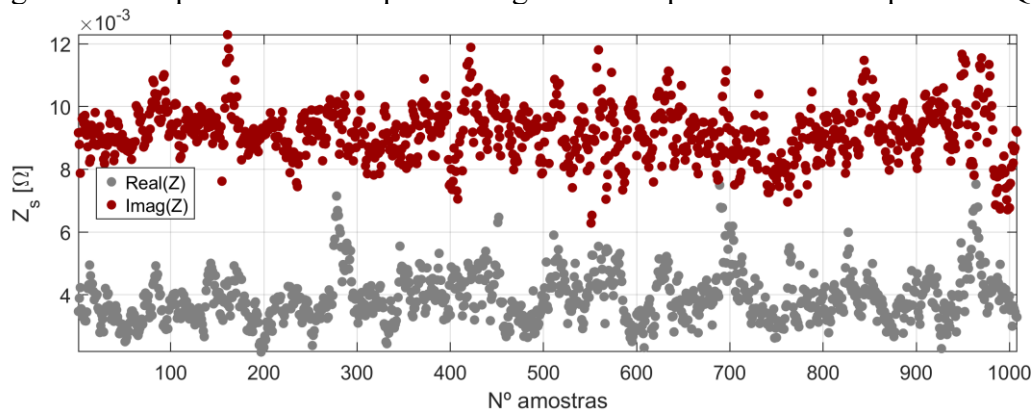
Fonte: Autoria Própria.

Figura 72 – Impedâncias de sequência negativa do consumidor estimadas pelo MCICA.



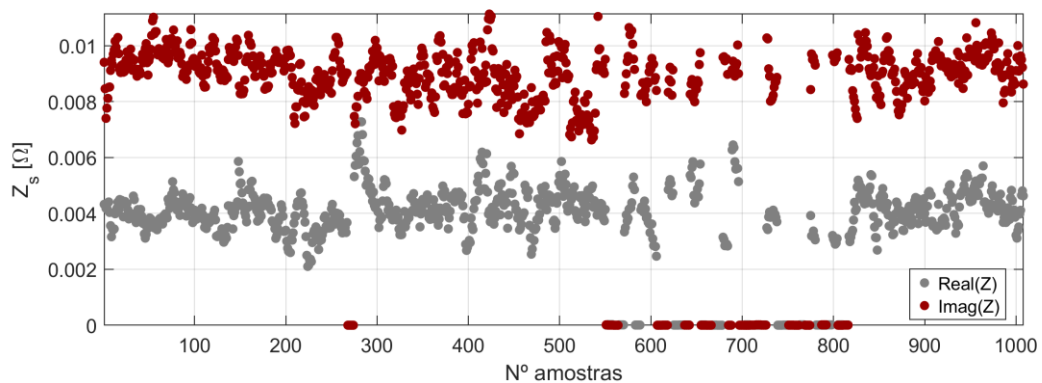
Fonte: Autoria Própria.

Figura 73 – Impedâncias de sequência negativa do supridor estimadas pelo MMQ.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 74 – Impedâncias de sequência negativa do supridor estimadas pelo M. Flutuação



Fonte: Autoria Própria.