

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MÁRCIO ARVELOS MORAES

Uma Proposta para a Atribuição de Responsabilidades sobre  
Desequilíbrios de Tensão através da Análise de Componentes  
Independentes

Uberlândia

2022

MÁRCIO ARVELOS MORAES

Uma Proposta para a Atribuição de Responsabilidades sobre  
Desequilíbrios de Tensão através da Análise de Componentes  
Independentes

Tese de doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Oliveira

Uberlândia

2022

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

---

M827p  
2022

Moraes, Márcio Arvelos, 1989-

Uma proposta para a atribuição de responsabilidades sobre  
desequilíbrios de tensão através da análise de componentes  
independentes [recurso eletrônico] / Márcio Arvelos Moraes. - 2022.

Orientador: José Carlos de Oliveira.

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

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2022.5040>

Inclui bibliografia.

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

---

CDU: 621.3

André Carlos Francisco  
Bibliotecário – CRB-6/3408

MÁRCIO ARVELOS MORAES

Uma Proposta para a Atribuição de Responsabilidades  
sobre Desequilíbrios de Tensão através da Análise de  
Componentes Independentes

Tese de doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Oliveira

Uberlândia, 01 de dezembro de 2022

Banca Examinadora:

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

Prof. Dr. Alex Reis – UNB

Prof. Dr. Antônio Carlos Delaiba – UFU

Prof. Dr. Isaque Nogueira Gondim – UFU

Prof. Dr. Mateus Duarte Teixeira – UFPR



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
 Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, 311, PPGEELT				
Data:	Um de dezembro de dois mil e vinte e dois	Hora de início:	10:00	Hora de encerramento:	13:00
Matrícula do Discente:	11723EEL004				
Nome do Discente:	Márcio Arvelos Moraes				
Título do Trabalho:	Uma Proposta para a Atribuição de Responsabilidades sobre Desequilíbrios de Tensão através da Análise de Componentes Independentes				
Área de concentração:	Sistemas de energia elétrica				
Linha de pesquisa:	Qualidade da Energia Elétrica				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Ivan Santos Nunes Título do projeto: Grupo de Pesquisa em Qualidade da Energia Elétrica Agência financiadora: Capes, Cnpq e Fapemig. Número do processo na agência financiadora: Não se aplica Vigência do projeto: 2005 - Atual.				

Reuniu-se por meio de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Isaque Nogueira Gondim - FEELT/UFU; Antônio Carlos Delaiba - FEELT/UFU; Alex Reis - UnB; Mateus Duarte Teixeira - UFPR; José Carlos de Oliveira - FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

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

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

Aprovado(a).

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

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

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



Documento assinado eletronicamente por **Alex Reis, Usuário Externo**, em 01/12/2022, às 13:04, 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 **Isaque Nogueira Gondim, Professor(a) do Magistério Superior**, em 01/12/2022, às 13:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mateus Duarte Teixeira, Usuário Externo**, em 01/12/2022, às 13:04, 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 01/12/2022, às 13:26, 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 **Antonio Carlos Delaiba, Usuário Externo**, em 02/12/2022, às 09:51, 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](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4059278** e o código CRC **67ED11F3**.

Dedico este trabalho especialmente à  
minha esposa Angélica, meus pais José e Maria, à  
minha irmã Cintia, aos meus demais familiares e  
amigos.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de manifestar minha gratidão à Deus pelo dom da vida, pela saúde e a família a mim concedidos. Estendo o agradecimento aos meus pais, pelo carinho, pelos cuidados e amor incondicional que me destinaram. A minha companheira de jornada, minha amada esposa, que está ao meu lado em todos os momentos. A minha querida irmã, amiga, que compartilha comigo essa existência e aos meus demais familiares e amigos pelo apoio.

Ao professor José Carlos de Oliveira quero externar meu eterno agradecimento e admiração, pois me orientou desde a graduação e conduziu-me magistralmente até aqui. Seus ricos ensinamentos na área da Engenharia Elétrica contribuíram imensamente para minha formação e especialização profissional. Seu exemplo de vida baseado na integridade e retidão ao lidar com situações diversas e pessoas, mostrando-se sempre disposto e comprometido a ensinar e disseminar seus conhecimentos, me transformou certamente em uma pessoa melhor.

Agradeço ao professor Antônio Carlos Delaiba, ao incentivo e motivação me dados durante a execução deste trabalho, que foram fundamentais para atingir meus objetivos. Estendo o agradecimento ao professor Ivan Nunes Santos, pelo seu empenho e dedicação frente a coordenação do Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica, que proporciona aos discentes, estrutura laboratorial com tecnologia de ponta e projetos de pesquisas e desenvolvimento, contribuindo para o enriquecimento da formação profissional.

Também agradeço aos colegas de laboratório pelas parcerias e momentos vividos. Em especial aos colegas, Vinícius Brito, que contribuiu de maneira significativa na elaboração do artigo publicado em periódico Qualis A1, fruto deste trabalho e aos demais colegas, Bárbara Giancesini, Raquel Filiagi, Celso Rosa, Giordani Troncha, Camila Dias, Abner Pacheco, Adrian Ferreira e Humberto Cunha.

Agradeço ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, pelo apoio financeiro à publicação do artigo e as demais contribuições administrativas deste trabalho, nas figuras do coordenador, professor Luiz Carlos Gomes de Freitas e do secretário Caio Siqueira.

Por fim, agradeço à CAPES pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos (Código de financiamento 001 – 88887.463310/2019-00).

Em tempos sombrios em que a desvalorização e o desprezo à educação e à ciência se fazem presentes, devemos lutar incessantemente a fim de reestabelecer seus valores. Caso contrário, estaremos fadados ao fracasso.

## RESUMO

Em virtude das manifestações de distintos fenômenos associados com desvios da qualidade dos suprimentos elétricos, dentre os desafios próprios à matéria, esforços têm sido empreendidos na busca do estabelecimento de meios para a determinação das contribuições e origem dos distúrbios. Dentro deste contexto ressaltam-se os níveis de desequilíbrios das tensões presentes nas redes, visto que o resultado final obtido para uma instalação elétrica é, via de regra, resultado da composição dos efeitos atrelados com a operação dos agentes envolvidos no processo. Esta área de estudos é conhecida pelo nome de Compartilhamento de Responsabilidades e se apresenta como cerne desta pesquisa de doutorado. Dentro desta temática, não obstante o reconhecimento de vários trabalhos científicos já publicados, ainda há muito a avançar até a definição de procedimentos que se mostrem consistentes, factíveis de implementação em campo e cujos resultados ofereçam uma confiabilidade exigida para atribuição das responsabilidades entre as partes. Focado neste tema, são realizados trabalhos avaliativos e comparativos dos principais métodos empregados para o compartilhamento de responsabilidades sobre os desequilíbrios em sistemas elétricos, identificando suas propriedades e limitações e, por fim, a proposição de uma estratégia metodológica não invasiva para os fins aqui postos. O processo estabelecido encontra embasamento na técnica denominada por Análise de Componentes Independentes Complexas (*Complex Independent Component Analysis – CICA*), empregando procedimentos de estatística de ordem superior (*Higher Order Statistics – HOS*), independência estatística, não-gaussianidade e em métodos de pré-processamentos de dados como por exemplo o branqueamento. A estratégia é apresentada quanto aos seus fundamentos físicos e matemáticos, assim como o seu direcionamento aplicativo para os fins desta pesquisa. Estudos avaliativos sobre o desempenho da proposta são conduzidos visando a avaliação computacional da metodologia quanto a sua factibilidade prática e eficácia aos objetivos almejados. Os resultados alcançados evidenciam grandes perspectivas para o emprego do método da CICA para a determinação das parcelas de contribuição entre os agentes, contribuindo assim, para que eventuais medidas mitigadoras possam ser estabelecidas de forma justa entre as partes.

**Palavras-chave:** Análise de Componentes Independentes Complexas, Compartilhamento de Responsabilidades sobre Desequilíbrios de Tensão, Qualidade da Energia Elétrica.

## **ABSTRACT**

Due to the occurrence of different phenomena associated with deviations in the power quality of electrical supplies, among the challenges inherent to the subject, efforts have been undertaken to establish means for determining the contributions and origin of the disturbances. Within this context, emphasizing the levels of imbalance of voltages present in the networks, the final results obtained for an electrical installation are the composition effects linked to the agents' operation. This area of study is known as Responsibility Sharing and is presented as the core of this doctoral research. Within this theme, despite the recognition of several published scientific works, there is still a long way to go until the definition of procedures that prove to be consistent, feasible to implement in the field, and whose results offer the required reliability for the attribution of responsibilities between the parties. Thus, evaluative and comparative works are carried out on the existing main methods used to share responsibilities regarding imbalances in electrical systems, identifying their properties and limitations, and finally, the proposition of a non-invasive methodological strategy for the purposes set forth here. The established process is based on the Complex Independent Component Analysis (CICA) technique, using Higher Order Statistics (HOS), statistical independence, non-Gaussianity, and pre-processing methods as whitening. The strategy is presented in terms of its physical and mathematical foundations and its application direction for this research. Evaluative studies on the proposal's performance aim at the computational evaluation of the methodology regarding its practical feasibility and effectiveness in relation to the desired objectives. The results achieved show great prospects for using the CICA method to determine the contribution portions between the agents, thus contributing so that any mitigating measures can be established fairly between the agents.

**Keywords:** Complex Independent Component Analysis, Sharing Responsibility for Voltage Imbalances, Power Quality.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Projeções das componentes individuais sobre o fasor desequilíbrio total .....	24
Figura 2.2 – Diagrama unifilar representativo das correntes conforme e não conforme .....	25
Figura 2.3 – Diagrama unifilar indicativo da aplicação do método IEC indicando as etapas pré e pós conexão do consumidor.....	27
Figura 2.4 – Circuito equivalente de Norton para as componentes de sequência negativa.....	28
Figura 2.5 – Circuito equivalente de Norton para o método MEC-CM.....	30
Figura 2.6 – Sistema elétrico radial hipotético .....	33
Figura 2.7 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método CCNC .....	35
Figura 2.8 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método FPT .....	35
Figura 2.9 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método IEC.....	36
Figura 2.10 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método da Superposição.....	36
Figura 2.11 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método MEC .....	36
Figura 2.12 – Análise comparativas das metodologias .....	37
Figura 3.1 – Cocktails Party e a Análise de Componentes Independentes.....	40
Figura 3.2 – Conjunto de variáveis aleatórias estatisticamente: a) dependentes e b) independentes .....	42
Figura 3.3 – Transformação linear de um conjunto de dados .....	43
Figura 3.4 – Etapas da transformação linear .....	44
Figura 3.5 – Métodos de pré-processamentos de dados e ICA .....	44
Figura 3.6 – Interpretação gráfica do processo para obtenção das componentes principais....	45
Figura 3.7 – Imagem de uma circunferência unitária $S$ , sendo transformada em uma híper-elipse $AS$ no espaço $\mathbb{R}^2$ .....	47
Figura 3.8 – a) Dados descorrelacionados; b) Dados branqueados.....	49
Figura 3.9 – Resultados de registros de grandezas ao longo do tempo - presença das componentes lenta e rápida.....	53

Figura 3.10 – Circuito equivalente de Norton .....	54
Figura 3.11 – Sinais originais criados com FDP uniformes – banco de medições das correntes $IS$ e $IC$ .....	57
Figura 3.12 – Sinais aferidos $X = VPAC, IPACT$ no PAC .....	58
Figura 3.13 – Sinais originais estimados .....	58
Figura 4.1 – Circuito equivalente de Norton do supridor e consumidor - sequência negativa	61
Figura 4.2 – Circuitos equivalentes para a determinação das contribuições do supridor (a) e consumidor (b) - superposição de efeitos .....	63
Figura 4.3 – Diagrama unifilar do sistema elétrico utilizado .....	64
Figura 4.4 – Curva de carregamento do consumidor.....	65
Figura 4.5 – Histograma e FDP de uma distribuição de Laplace.....	66
Figura 4.6 – Curvas de carregamento com as variações de consumo instantâneas adotada como referência para os estudos de desempenho da metodologia do compartilhamento das responsabilidades.....	66
Figura 4.7 – Curvas dos fatores de desequilíbrio dos estudos de caso.....	67
Figura 4.8 – Fluxograma do método CICA aplicado ao compartilhamento de responsabilidades .....	68
Figura 4.9 – Caso 01: decomposição dos sinais de tensão e corrente de sequência negativa em suas componentes rápida e lenta.....	69
Figura 4.10 – Caso 02: decomposição dos sinais de tensão e corrente de sequência negativa em suas componentes rápida e lenta.....	69
Figura 4.11 – Caso 03: decomposição dos sinais de tensão e corrente de sequência negativa em suas componentes rápida e lenta.....	70
Figura 4.12 – Caso 01 - Compartilhamento de responsabilidades: supridor e consumidor desequilibrados .....	70
Figura 4.13 – Caso 02 - Compartilhamento de responsabilidades: supridor equilibrado e consumidor desequilibrado.....	71

Figura 4.14 – Caso 03 - Compartilhamento de responsabilidades: supridor desequilibrado e consumidor equilibrado .....	71
Figura 4.15 – Análise comparativa dos resultados obtidos com CICA nos três casos.....	72
Figura 5.1 – Sistema elétrico adotado para avaliação das metodologias.....	75
Figura 5.2 – Fatores de desequilíbrio de tensão no PAC para os cenários operativos .....	75
Figura 5.3 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método CICA para o Caso 01	76
Figura 5.4 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método IEC para o Caso 01 ...	76
Figura 5.5 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método MEC para o Caso 01.	77
Figura 5.6 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método MEC para o Caso 01 (componente lenta) .....	77
Figura 5.7 – Caso 01 – Comparação dos resultados apresentados pelas metodologias CICA, IEC e MEC .....	78
Figura 5.8 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método CICA para o Caso 02	78
Figura 5.9 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método IEC para o Caso 02...	79
Figura 5.10 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método MEC para o Caso 02 .....	79
Figura 5.11 – Caso 02 – Comparação dos resultados apresentados pelas metodologias CICA, IEC e MEC .....	79
Figura 5.12 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método CICA para o Caso 03 .....	80
Figura 5.13 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método IEC para o Caso 03.	80
Figura 5.14 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método MEC para o Caso 03 .....	81
Figura 5.15 – Caso 03 – Comparação dos resultados apresentados pelas metodologias CICA, IEC e MEC .....	81
Figura 5.16 – Curvas de carregamento do supridor e do consumidor.....	82
Figura 5.17 – Curva do Fator de Desequilíbrio no PAC .....	83

Figura 5.18 - Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método CICA para o Caso 04 .....	83
Figura 5.19 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método IEC para o Caso 04.	84
Figura 5.20 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método MEC para o Caso 04 .....	84
Figura 5.21 – Caso 04 – Comparação dos resultados apresentados pelas metodologias CICA, IEC e MEC .....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Correlação entre as variáveis definidas pelos métodos e as componentes vetoriais representativas .....	32
Tabela 2.2 – Parâmetros do sistema elétrico .....	33
Tabela 2.3 – Parâmetros da carga utilizada para o método MEC.....	34
Tabela 2.4 – Resultados para o método Corrente Conforme e Não Conforme.....	34
Tabela 2.5 – Resultados para o método Fluxo de Potência Trifásico.....	34
Tabela 2.6 – Resultados para o método IEC .....	34
Tabela 2.7 – Resultados para o método da Superposição.....	34
Tabela 2.8 – Resultados do método MEC-CM .....	34
Tabela 4.1 – Parâmetros do Sistema Elétrico .....	65
Tabela 5.1 – Novos parâmetros elétricos para o consumidor.....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A-CMN	<i>Adaptive Complex Maximization of Nongaussianity algorithm</i>
BSS	<i>Blind Source Separation</i> – Separação Cega de Fontes
CCNC	Corrente Conforme e Não Conforme
CIGRÉ	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques a Haute Tension</i>
CICA	<i>Complex Independent Component Analysis</i> – Análise de Componentes Independentes Complexas
DP	Desvio Padrão
FD	Fator de Desequilíbrio
FDv	Fator de Desequilíbrio de Tensão
FDi	Fator de Desequilíbrio de Corrente
FPT	Fluxo de Potência Trifásico
FDP	Função Densidade de Probabilidade
HOS	<i>Higher Order Statistics</i> – Estatística de Ordem Superior
ICA	<i>Independent Component Analysis</i> – Análise de Componentes Independentes
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MEC-CM	Mudança de Estado Controlada via Chaveamento de Capacitor Monofásico
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PC	<i>Principal Component</i> – Componente Principal
PCA	<i>Principal Component Analysis</i> – Análise de Componentes Principais
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico
p.u.	Por Unidade
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SVD	<i>Singular Values Decomposition</i> – Decomposição em Valores Singulares
v.a.	variável aleatória

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Considerações Iniciais .....</b>	<b>12</b>
<b>1.2 Quantificação e Normatizações sobre Níveis de Desequilíbrios .....</b>	<b>14</b>
<b>1.3 Estado da Arte das Metodologias para o Compartilhamento de Responsabilidades.....</b>	<b>15</b>
<b>1.4 Objetivos Gerais.....</b>	<b>18</b>
<b>1.5 Estrutura do Trabalho .....</b>	<b>19</b>
<b>2 DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO: FUNDAMENTAÇÃO E MÉTODOS PARA A ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1 Introdução .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2 Fundamentos Sobre Desequilíbrios de Tensão .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3 Percentuais de Responsabilidade: Conceitos e Metodologias.....</b>	<b>23</b>
2.3.1 Corrente Conforme e Não Conforme (CCNC).....	25
2.3.2 Método Fluxo de Potência Trifásico (FPT).....	26
2.3.3 Método IEC .....	27
2.3.4 Método da Superposição.....	28
2.3.5 Mudança de Estado Controlada via Chaveamento de Capacitor Monofásico (MEC-CM) .....	30
2.3.6 Correlação Entre os Métodos Elucidados e os Percentuais de Responsabilidades .....	31
<b>2.4 Sistema Teste Utilizado para a Avaliação do Desempenho das Metodologias.....</b>	<b>32</b>
<b>2.5 Estudos Computacionais sobre o Desempenho das Metodologias .....</b>	<b>34</b>
<b>2.6 Considerações Finais .....</b>	<b>37</b>
<b>3 FUNDAMENTOS DA ANÁLISE DE COMPONENTES INDEPENDENTES – ICA</b>	<b>39</b>
<b>3.1 Introdução .....</b>	<b>39</b>
<b>3.2 Análise de Componentes Independentes .....</b>	<b>40</b>
<b>3.3 Independência Estatística .....</b>	<b>41</b>
<b>3.4 Métodos para o Pré-Processamento dos Dados .....</b>	<b>43</b>
3.4.1 Técnica de Análise das Componentes Principais .....	44
3.4.2 Decomposição em Valores Singulares .....	46
3.4.3 Branqueamento .....	48
<b>3.5 Método de Solução da ICA: Não-Gaussianidade.....</b>	<b>49</b>

<b>3.6</b>	<b>Indeterminações do Método ICA .....</b>	<b>51</b>
<b>3.7</b>	<b>Sistema Elétrico e ICA .....</b>	<b>52</b>
3.7.1	Independência Estatística.....	52
3.7.2	Modelo Elétrico para Aplicação da ICA – Superposição.....	54
<b>3.8</b>	<b>Considerações Finais .....</b>	<b>59</b>
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO COMPUTACIONAL DO MÉTODO ICA PARA COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES DOS DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO .....</b>	<b>60</b>
<b>4.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>60</b>
<b>4.2</b>	<b>Fundamentos da Análise do Compartilhamento de Responsabilidades via Complex-ICA (CICA) .....</b>	<b>61</b>
<b>4.3</b>	<b>Estudo de Caso.....</b>	<b>63</b>
<b>4.4</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>73</b>
<b>5</b>	<b>AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO MÉTODO CICA E AS PRINCIPAIS METODOLOGIA DE COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES .....</b>	<b>74</b>
<b>5.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>74</b>
<b>5.2</b>	<b>Avaliação Comparativa de Desempenho das Metodologias .....</b>	<b>75</b>
<b>5.3</b>	<b>Avaliação das Metodologias com Variação das Características de Consumo .....</b>	<b>81</b>
<b>5.4</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>85</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>86</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>90</b>
	<b>APÊNDICE A: TRABALHOS PUBLICADOS ORIUNDO DESTA TESE DE DOUTORADO .....</b>	<b>99</b>

# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Considerações Iniciais

Com os avanços na área de geração de energia elétrica e do desenvolvimento de dispositivos eletroeletrônicos energeticamente mais eficientes, é compreensível que a qualidade da energia elétrica sofra impactos que resultem em perda de suas características ideais, com destaque ao contexto do produto. De fato, a evolução dos sistemas, processos, produtos, etc., em sua maioria, estão embasados em tecnologias que, de um lado, oferecem incontestáveis atrativos e, numa outra via, conduzem a situações operacionais tais que os indicadores de qualidade da energia elétrica se apresentam com degradações importantes.

Visando, pois, a manutenção dos padrões mínimos de fornecimento dos suprimentos elétricos quanto a qualidade do produto, as agências reguladoras, cumprindo seu papel fundamental de reger as leis que governam a relação entre os fornecedores e consumidores, através de documentos normativos específicos a cada país, buscam definir os padrões visando a compatibilização de interesses destes dois agentes. Estas normativas definem os indicadores de qualidade a serem observados, suas definições, técnicas para medição e, por fim, os denominados valores de referência a serem aplicados aos mais distintos níveis de tensão empregados no país. Neste cenário, grandezas como: níveis de tensão de longa duração, fenômenos associados com variações de curta-duração, distorções harmônicas, desequilíbrios, dentre outros, se apresentam claramente expostos nos documentos que regulamentam a matéria.

No cenário dos indicadores de qualidade da energia, a questão dos desequilíbrios das tensões, diante de sua relevância, se apresenta como ponto focal desta tese de doutorado, em que pese o fato de, no amplo escopo deste indicador, reconhece-se a existência de uma série de desafios merecedores de análises e considerações.

De um modo geral, é sabido que os desequilíbrios de tensão se apresentam como distúrbios manifestados pela diferença entre as amplitudes e/ou na defasagem angular de  $120^\circ$  observada em um determinado sistema elétrico trifásico [1]. Como motivações para tal, ressaltam-se características intrínsecas de muitas cargas industriais, comerciais e residenciais, e/ou, assimetrias provenientes do sistema elétrico de transmissão e distribuição[2]–[6]. De fato, situações atreladas com a distribuição de cargas monofásicas e/ou bifásicas entre fases [7], [8], assimetria entre as impedâncias dos componentes que perfazem uma rede de transmissão e distribuição, cargas industriais como fornos a arco [9], instalações associadas com pequenas gerações distribuídas, etc. [10] são condições corriqueiras e, como tais, se apresentam como potenciais fontes para agravar o fenômeno aqui tratado.

No que tange aos efeitos advindos de suprimento elétricos sob tensões desequilibradas, destaca-se o funcionamento anômalo de dispositivos e eventuais avarias de caráter físico, principalmente em máquinas rotativas. De fato, uma vez que as suas respectivas impedâncias de sequência negativa são relativamente pequenas quando comparadas aos valores de sequência positiva, mesmo níveis pequenos para os desequilíbrios das tensões podem resultar em expressivas consequências sobre suas respectivas correntes. Somado a tal efeito, há ainda a questão que, sob a ação de uma corrente de sequência negativa no estator das máquinas, há a manifestação de campos girantes com rotação contrária à do rotor, que pode conduzir a ação de frenagem e o surgimento de correntes rotóricas não esperadas, contribuindo, assim, para incrementos expressivos da temperatura em pontos importantes destes componentes [11], [12].

Estes efeitos prejudiciais são estendidos também a questão dos carregamentos a que ficam sujeito os condutores elétricos. Em especial destacam-se os cabos relacionados com as interligações dos neutros, os quais, sob a influência das componentes de sequência zero, frequentemente apresentam condições operacionais inadequadas quanto aos níveis de corrente e mesmo as diferenças de potencial entre o neutro e o terra. Por fim, vale reconhecer que, a presença de componentes de sequência negativa e zero, as assimetrias das correntes elétricas, certamente, podem ocasionar sobrecorrentes, incrementos térmicos e, por conseguinte, a redução da vida útil dos mesmos [13].

Do ponto de vista dos conversores eletrônicos, os desequilíbrios de tensão podem ocasionar também efeitos sobre os disparos dos seus componentes de chaveamento, produzindo, assim, situações de funcionamento que influenciam negativamente a questão da geração de correntes harmônicas por tais dispositivos [14].

Portanto, as preocupações pertinentes à matéria dos desequilíbrios das tensões e correntes, pelos motivos apresentados, justificam a regulamentação dos seus níveis máximos a serem considerados como referência para os documentos normativos, além de motivar a busca por aprimoramentos da aplicação destes. Este aspecto se apresenta como cerne desta pesquisa de doutorado.

## 1.2 Quantificação e Normatizações sobre Níveis de Desequilíbrios

Para quantificar os níveis de desequilíbrio do sistema pode-se destacar duas estratégias clássicas para, a partir dos sinais de tensão e corrente trifásicos, definir indicadores que expressam a severidade do fenômeno ora tratado. A primeira é baseada na decomposição das tensões e/ou correntes em suas respectivas componentes simétricas. Este procedimento foi proposto por C. Fortescue em seu trabalho [15], o qual mostra que um sistema polifásico assimétrico pode ser considerado como o resultado da composição fasorial de  $n$  sistemas polifásicos equilibrados. Assim, para o caso de sistemas trifásicos com características desequilibradas, estes podem ser considerados como advindos de três sistemas equilibrados, a saber: sequência positiva, negativa e zero. Utilizando tais componentes define-se o denominado Fator de Desequilíbrio (FD), dado pela razão entre a componente de sequência negativa e positiva [1]. Devido as dificuldades próprias da obtenção dos dados requeridos pela decomposição tradicional acima, surgiu uma outra metodologia, a qual foi elaborada pelo comitê internacional: *Conseil International des Grands Réseaux Électriques a Haute Tension* (CIGRÉ). De forma pontual, esta alternativa visa dispensar o conhecimento dos ângulos de fase das grandezas originais (tensões e correntes), e propõe uma formulação embasada tão apenas nos módulos facilmente aferidos via medidores convencionais[1]. Vale salientar que ambas as metodologias apresentadas fornecem resultados percentuais muito próximos [16] para os denominados indicadores do nível de desequilíbrio de sequência negativa.

Uma vez conhecidos os valores do indicador de qualidade próprio a caracterização do padrão dos suprimentos quanto a questão aqui tratada, à luz de suas consequências sobre o desempenho dos sistemas elétricos e seus componentes, surge a necessidade da regulamentação dos padrões. Para tanto, reconhece-se determinações normativas quer no cenário nacional como também no internacional. Estes documentos contemplam diversos fenômenos, como já referido, entretanto, para fins deste trabalho, será focado tão apenas a questão dos desequilíbrios presentes nas redes elétricas, com destaque aos padrões de suprimento junto aos pontos de

acoplamento comum (PAC) entre os supridores e consumidores, ou mesmo, nos barramentos de fronteira entre dois agentes quaisquer.

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio do documento Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST), determina que os níveis de desequilíbrio não devem ultrapassar 3,0% para níveis de tensão menores ou iguais a 1kV e, 2,0% para tensões entre 1kV e 230kV [1]. Em relação a Rede Básica, os limites são definidos pelos Procedimentos de Rede, elaborados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), o qual recomenda os limites de 2,0% e 1,5% para os indicadores globais e individuais, respectivamente [17].

Dentre as normas internacionais, as de maior notoriedade são: a europeia proposta pela *International Electrotechnical Commission* (IEC) [18], que estabelece um limite de 2,0% para sistemas de baixa tensão e, a americana estabelecida pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) que recomenda o limite de 2,0%, sendo desejado que os níveis sejam inferiores a 1,0% [16].

Quanto aos procedimentos aplicáveis à questão da monitoração e seus respectivos protocolos de medição visando atingir um valor representativo ao longo de um período de medição, estes são tratados em detalhes nas referências supracitadas. Não obstante a riqueza das informações contidas nas determinações definidas pelas normas aplicáveis, vale aqui reconhecer que, até o momento, o valor resultante para o grau de desequilíbrio ou outra grandeza atrelada com os padrões de qualidade, corresponde a uma composição entre as partes envolvidas no processo. De fato, até o momento, não há qualquer menção sobre os níveis de contribuições oferecidos por uma e outra parte, que conduziram ao montante global obtido nas campanhas de medição.

### **1.3 Estado da Arte das Metodologias para o Compartilhamento de Responsabilidades**

Contextualizando a temática envolvendo o fenômeno de desequilíbrio de tensão com os objetivos deste trabalho, apresenta-se nesta seção as principais metodologias consolidadas acerca do compartilhamento de responsabilidades do distúrbio em pauta, haja vista que, muitas vezes, as soluções mitigatórias podem exigir investimentos financeiros elevados e, como consequência, surgem questionamentos sobre as responsabilidades sobre os investimentos a serem feitos [19].

Em um contexto histórico, o método da Corrente Conforme e Não Conforme (CCNC) foi uma das primeiras metodologias propostas, que visava determinar o compartilhamento de responsabilidades dos agentes de um sistema elétrico frente aos distúrbios que afetam a qualidade da energia. Sendo assim, a estratégia adotada consiste em decompor as correntes elétricas em duas parcelas teóricas. A primeira parcela, dita conforme, reproduz o mesmo padrão de comportamento da tensão de alimentação e, por essa razão, representa as contribuições do supridor. A corrente não conforme se trata da parcela remanescente que produz os distúrbios adicionais àqueles presentes na tensão de suprimento, sendo atribuída ao consumidor [20].

No que diz respeito aos desequilíbrios, basta realizar a decomposição dos sinais de correntes trifásicos em suas componentes simétricas e aplicá-las ao conjunto de equações estabelecido para obter as contribuições individuais de sequência negativa e zero.

Muito embora reconheça-se os avanços e as contribuições dadas pelo método CCNC, os trabalhos [21]–[23] apontam fortes divergências quanto aos resultados esperados e os apresentados pela metodologia. Nesse contexto, os trabalhos supracitados esclarecem que a possível causa para estas inconsistências se baseia nas proposições feitas pelo método CCNC de que impedâncias de sequência positiva, negativa e zero comportam-se de forma semelhante. No entanto, como se sabe, as máquinas rotativas, especificamente os motores de indução trifásicos apresentam a amplitude da impedância de sequência negativa substancialmente menor que a de sequência positiva, fato que compromete os resultados.

Posteriormente, surgiam metodologias embasadas na teoria do fluxo de potência para determinar as contribuições majoritárias dos desequilíbrios [24], [25]. Estes procedimentos, via de regra, avaliam a direcionalidade do fluxo de potência e a sua correlação com a fonte proeminente do distúrbio, contudo, ainda assim não é possível determinar o percentual de responsabilidade de cada uma das fontes perturbadoras [26], [27]. Além disso, os trabalhos [21], [28]–[30], realizaram estudos laboratoriais e práticos sobre o método em questão e concluíram que nem sempre o sentido do fluxo de potência de sequência negativa era condizente com a fonte predominante. De maneira geral, estes trabalhos atribuíram esta inconsistência a multiplicidade das variáveis desconhecidas que estão presentes nas aplicações práticas e que não são contempladas pela metodologia.

Conjuntamente a estas metodologias, foi publicada a primeira edição do relatório técnico TR IEC 61000.3.13, apresentando uma estratégia para o cálculo do desequilíbrio

máximo provocado por instalações perturbadoras. O método se baseia na avaliação do fator de desequilíbrio de tensão (FD) antes e após a conexão da instalação ao ponto de acoplamento comum, sendo que o FD pré-conexão representa as contribuições da rede de acesso. Assim, a parcela resultante da diferença entre os indicadores pré e pós-conexão da instalação se trata da contribuição do consumidor [31]. Além disso, a partir desta metodologia foram desenvolvidos outros procedimentos [32]–[34], como o método CIGRÉ [35]–[37], que propõe a separação das contribuições advindas dos sistemas de transmissão, das tensões preexistentes no barramento e das relacionadas ao consumidor. Embora reconheça-se as vantagens destes métodos, ainda são constatadas algumas inconsistências no que tange a precisão dos resultados apresentados, fatos estes, que estão atrelados a dinamicidade que podem ocorrer nos sistemas elétricos antes e após a conexão da carga em análise e que é negligenciada pelo procedimento [29], [38].

Somada às estratégias supracitadas, cabe ainda ressaltar a existência de duas novas metodologias, publicadas nos últimos anos, que vêm apresentando resultados promissores, quais sejam: método da Superposição e método da Mudança de Estado Controlada [39].

O método da Superposição aplicado a desequilíbrios se baseia no Teorema da Superposição para a determinação das contribuições dos agentes supridores e consumidores, sendo ele, inspirado nos procedimentos que são aplicados aos fenômenos de distorções harmônicas amplamente difundidos na literatura[40]–[43]. Dessa forma, com base nas tensões e correntes no ponto de análise e também nas informações de impedância do sistema, é possível determinar os percentuais de responsabilidade entre as partes envolvidas. Nesse sentido, evidencia que o conhecimento das impedâncias equivalentes que representam o supridor e o consumidor em aplicações práticas é um fator limitante desta metodologia [44]–[46].

Quanto ao método da Mudança de Estado Controlada, este consiste em provocar alterações nas tensões e correntes no ponto de avaliação por meio da inserção de uma pequena fonte de perturbação impactando sobre os níveis dos desequilíbrios. Assim, medindo-se as tensões e correntes antes e após a conexão da fonte, calculam-se as contribuições de tensão de cada agente. Embora este procedimento resolva o problema que o método da Superposição apresenta a respeito do conhecimento das impedâncias equivalentes, ainda deve-se realizar maiores investigações de cunho prático acerca dos impactos que podem ser provocados no sistema quando uma carga monofásica for chaveada [46].

Neste contexto, apresenta-se uma metodologia não invasiva que constitui o cerne deste trabalho e que tem se mostrado eficiente na determinação das impedâncias equivalentes em

estudos de compartilhamento de responsabilidades frente a distorções harmônicas. Este procedimento está embasado na Análise de Componentes Independentes (ICA), que representa a principal ferramenta utilizada na área de Separação Cega de Fontes (*Blind Sources Separation* – BSS).

Os estudos utilizando esta técnica para fins de determinar o compartilhamento de responsabilidades foram iniciados através de sua aplicação para as distorções harmônicas e visaram a estimação das impedâncias equivalentes de um supridor e um consumidor conectados a um dado ponto de acoplamento comum. Tais trabalhos utilizaram o algoritmo Complex-FastICA desenvolvido por [47], e seus resultados se mostraram otimistas para os fins postos [48]–[55].

No que se refere ao compartilhamento de responsabilidades sobre desequilíbrios de tensão utilizando recursos associados com a técnica acima referida, encontrou-se na literatura apenas o trabalho [56], que utiliza um algoritmo baseado na maximização da não gaussianidade através da curtose, conhecido como *RobustICA*, [57]. Além disso, os autores aplicaram esta metodologia em um sistema elétrico simplificado e realizam uma avaliação de desempenho com os resultados obtido para a ICA e para outras técnicas de análise, evidenciando as vantagens computacionais e a acurácia do procedimento em questão. Por fim, com o intuito de realizar uma validação de caráter prático, utilizou-se uma base de dados de uma estação ferroviária de alta velocidade monofásica, que contribui expressivamente com a assimetria das tensões da rede de distribuição local. Os resultados finais, evidenciaram a robustez em determinar as impedâncias do supridor e do consumidor, mesmo com a pré-existência de ruídos na rede.

#### 1.4 Objetivos Gerais

Diante das considerações supramencionadas e da existência dessa gama de procedimentos, justificada pela ausência de metodologias consolidadas, visto que todas apresentam certas limitações, seja no campo teórico ou prático, esta tese encontra-se alicerçada no âmbito do compartilhamento de responsabilidades frente ao fenômeno de desequilíbrio de tensão, apresentando as seguintes contribuições:

- Realizar estudos comparativos dos procedimentos de maior destaque na literatura, quais sejam, método da Corrente Conforme e Não Conforme, método do Fluxo de Potência Trifásico, método IEC, método da Superposição e método da Mudança de Estado Controlada, através de uma mesma base de dados oriunda

de um sistema hipotético com características semelhantes a uma rede de distribuição;

- Retratar os fundamentos basilares da análise de componentes independentes no que tange as ferramentas matemáticas e computacionais empregadas na solução do método. Além disso, discorrer sobre a independência estatística, não gaussianidade e as técnicas de pré-processamento de sinais;
- Apresentar o algoritmo A-CMN baseado na maximização da não-gaussianidade através da entropia, que reuni as principais vantagens do método de Newton, do algoritmo Complex-FastICA e a adaptabilidade de indicadores para garantir a convergência dos resultados;
- Desenvolver os equacionamentos relacionados a aplicação da ICA em sistemas elétricos visando os propósitos desta pesquisa, bem como explicitar a relação entre os sinais elétricos e a independência estatística;
- Realizar estudos de caso por meio de um sistema elétrico radial hipotético, objetivando a avaliação do desempenho da metodologia proposta para fins da atribuição de responsabilidade sobre o indicador de qualidade considerado neste trabalho.
- Realizar uma avaliação de desempenho da metodologia proposta nesta tese, através de estudos comparativos dos resultados alcançados para o compartilhamento de responsabilidades entre ela e as metodologias IEC e MEC.

## **1.5 Estrutura do Trabalho**

Em consonância com a temática explicitada, além deste capítulo introdutório esta tese será estruturada da seguinte maneira:

### **Capítulo 2 – DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO: FUNDAMENTAÇÃO E MÉTODOS PARA A ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES**

Este capítulo, destina-se a apresentar um estudo comparativo entre as principais metodologias sobre compartilhamento de desequilíbrios utilizando um sistema elétrico hipotético com características equivalentes a um sistema de distribuição.

### **Capítulo 3 – FUNDAMENTOS DA ANÁLISE DE COMPONENTES INDEPENDENTES - ICA**

Nessa unidade, são apresentados os fundamentos teóricos essenciais para aplicação da análise de componentes independentes, os métodos de pré-processamento de dados, a relação entre os sinais elétricos e a independência estatística. Por fim, elucida-se os elementos basilares para aplicar a ICA em sistemas elétricos, juntamente com a exposição de um exemplo numérico.

### **Capítulo 4 – APLICAÇÃO COMPUTACIONAL DO MÉTODO ICA PARA COMPARTILHAMENTO DOS DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO**

Neste capítulo, é apresentado um estudo de caso para avaliar o desempenho da ICA frente a determinação dos percentuais de responsabilidades sobre os desequilíbrios de tensão em um sistema elétrico hipotético.

### **Capítulo 5 – AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO MÉTODO CICA E AS PRINCIPAIS METODOLOGIA DE COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES**

Com o objetivo de estabelecer as bases conclusivas sobre a efetividade do método de análise proposto, é aplicado a uma comparação entre ela e as metodologia IEC e Mudança de Estado Controlada, assim é realizada uma análise conclusiva sobre a efetividade do processo de compartilhamento.

### **Capítulo 6 – CONCLUSÕES GERAIS**

Nesta etapa final, são expostas as discussões acerca do desempenho obtido.

# 2

## **DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO: FUNDAMENTAÇÃO E MÉTODOS PARA A ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES**

### **2.1 Introdução**

Este capítulo se reveste do objetivo de sintetizar os principais conceitos associados com o tema central desta tese, e ainda, em apresentar as metodologias de maior destaque até então encontradas na literatura, voltadas para o estabelecimento de processos para o compartilhamento de responsabilidades.

Assim, serão fundamentados os princípios dos métodos de análise conhecidos por: Corrente Conforme e Não Conforme, Fluxo de Potência Trifásico, IEC, Superposição e Mudança de Estado Controlada. Estes, visando uma elucidação da sua aplicabilidade e desempenho para aplicações específicas, serão utilizados para a atribuição das parcelas de responsabilidades sobre desequilíbrios de tensões produzidos para um sistema elétrico típico. Para tanto, será empregado para a base dos estudos um sistema radial hipotético, com características de uma rede de distribuição que permitirá uma avaliação da efetividade e limitações dos procedimentos supramencionados.

### **2.2 Fundamentos Sobre Desequilíbrios de Tensão**

De acordo com a topologia dos sistemas elétricos trifásicos, as tensões e correntes geradas devem, idealmente, possuir as mesmas amplitudes e defasamento angular de  $120^\circ$  entre as fases. No entanto, em condições reais é comum que estas grandezas apresentem desvios dos valores ideais (assimetria), causando um desequilíbrio no sistema. Dessa maneira, para quantificar o nível de desequilíbrio no sistema, utiliza-se o denominado fator de desequilíbrio

(FD), que pode ser calculado através do método das componentes simétricas e/ou pelo método CIGRÉ [1], [16], [17].

A teoria das componentes simétricas foi desenvolvida por Fortescue [15] e propõe que um sistema trifásico desequilibrado pode ser decomposto em 3 sistemas equilibrados, de acordo com as equações (2.1) e (2.2). Estas permitem a transformação, em uma ou outra via, das grandezas representativas da rede desequilibrada. Isto é, a partir das componentes de sequência a obtenção das grandezas de fase, ou o contrário.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Onde:

$\dot{V}_a, \dot{V}_b$  e  $\dot{V}_c$  – Representam os fasores das tensões das fases  $a, b$  e  $c$ , respectivamente;

$\dot{V}_0, \dot{V}_1$  e  $\dot{V}_2$  – Representam os fasores das componentes simétricas de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente;

$a$  – o operador rotacional de  $120^\circ$ , portanto  $a = 1 \angle 120^\circ$ .

Vale salientar que as transformações associadas com as equações (2.1) e (2.2) também são validas para correntes e grandezas de linha.

Isto posto, o fator de desequilíbrio baseado nas componentes simétricas, para as tensões e correntes trifásicas, respectivamente, é definido por:

$$FD_V\% = \frac{V_2}{V_1} 100 \quad (2.3)$$

$$FD_I\% = \frac{I_2}{I_1} 100 \quad (2.4)$$

Onde:  $FD_V$  e  $FD_I$  correspondem ao fator de desequilíbrio de tensão e corrente, respectivamente.

A utilização do processo de cálculo nos termos supra postos se apresenta com fundamentação física e em consonância com os procedimentos definidos pela transformação das grandezas de fase em correspondentes valores para as componentes de sequência positiva,

negativa e zero. Todavia, há dificuldades inerentes a esta proposição, a qual consiste na necessidade do conhecimento das amplitudes e ângulos de fase das respectivas variáveis. A obtenção das amplitudes é relativamente corriqueira, entretanto, o mesmo não ocorre para os seus correspondentes ângulos de fase. Diante desta conjuntura, surgiu uma alternativa para a obtenção dos indicadores dos níveis dos desequilíbrios através de uma proposição feita pela CIGRÉ. Esta utiliza somente as magnitudes das tensões de linhas, dispensando a necessidade de conhecer seus ângulos, fato este que facilita a obtenção do indicador de qualidade da energia ora em foco, visto que os medidores utilizados, com dito, comumente disponibilizam apenas os valores eficazes ou RMS (*root mean square*) das grandezas monitoradas.

De acordo com a proposição da CIGRÉ, o fator de desequilíbrio de um conjunto de tensões trifásicas pode ser obtido como a seguir, cuja expressão contempla tão apenas as magnitudes das tensões medidas.

$$FD_V\% = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} 100 \quad (2.5)$$

Em que:

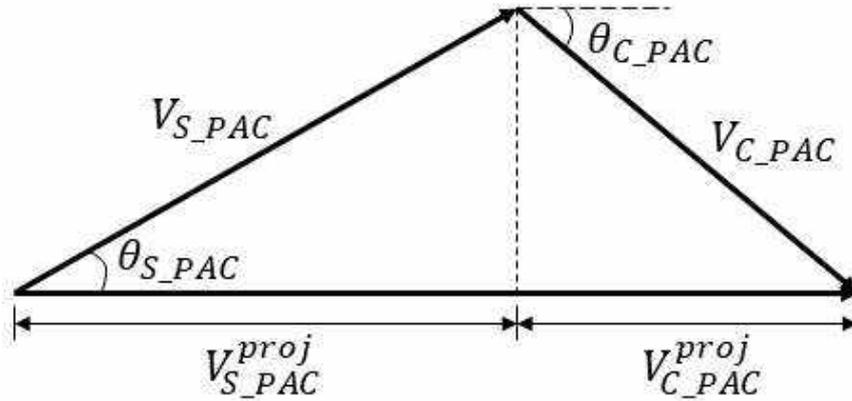
$$\beta = \frac{|V_{AB}|^4 + |V_{BC}|^4 + |V_{CA}|^4}{(|V_{AB}|^2 + |V_{BC}|^2 + |V_{CA}|^2)^2} \quad (2.6)$$

Onde:  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  e  $V_{CA}$  são as magnitudes das tensões de linha.

### 2.3 Percentuais de Responsabilidade: Conceitos e Metodologias

De forma conceitual, o cálculo das parcelas de responsabilidade encontra-se embasado numa composição vetorial das contribuições dos agentes, ou seja, os níveis de desequilíbrios advindos da instalação elétrica a montante e aquela a jusante do ponto do sistema elétrico focado na determinação do nível do desequilíbrio. Para tanto utiliza-se das projeções vetoriais [58] indicadas pela Figura 2.1 e traduzidas, matematicamente, pelas equações (2.7) e (2.8).

Figura 2.1 – Projeções das componentes individuais sobre o fasor desequilíbrio total



Fonte: Próprio Autor

$$Resp_S\% = \frac{|\dot{V}_{S\_PAC}| \cos \theta_{S\_PAC}}{|\dot{V}_{PAC}|} 100 = \frac{V_{S\_PAC}^{proj}}{|\dot{V}_{PAC}|} 100 \quad (2.7)$$

$$Resp_C\% = \frac{|\dot{V}_{C\_PAC}| \cos \theta_{C\_PAC}}{|\dot{V}_{PAC}|} 100 = \frac{V_{C\_PAC}^{proj}}{|\dot{V}_{PAC}|} 100 \quad (2.8)$$

Onde:

$\dot{V}_{S\_PAC}$  e  $\dot{V}_{C\_PAC}$  – os vetores representativos das contribuições do supridor e do consumidor no PAC, respectivamente;

$\dot{V}_{PAC}$  – vetor representativo da contribuição total no PAC;

$V_{S\_PAC}^{proj}$  e  $V_{C\_PAC}^{proj}$  – projeções das contribuições do supridor e do consumidor no PAC sobre o vetor total, respectivamente;

$Resp_S\%$  e  $Resp_C\%$  – percentuais de responsabilidade do supridor e consumidor, respectivamente.

Para a obtenção das parcelas supra mencionadas, de um modo geral, a literatura apresenta algumas estratégias fundamentadas nos procedimentos tradicionais empregados pela engenharia elétrica através da clássica decomposição das tensões e correntes trifásicas desequilibradas em suas correspondentes Componentes Simétricas [15]. A partir destes tratamentos, torna-se possível a determinação das componentes de interesse para estes estudos, quais seja, as de sequência negativa, visto que estas são as de maior impacto sobre os componentes dos sistemas elétricos [18], [32]. De fato, não obstante o reconhecimento da existência daquelas de sequência nula, estas não representam motivações maiores, a não ser as questões associadas com deslocamentos de potenciais fase-terra ou mesmo a circulação de correntes nos condutores neutro. Muito embora tenha-se discutido também a questão dos

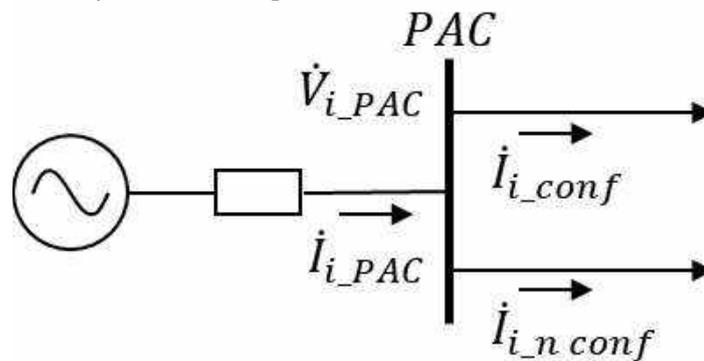
indicadores de desequilíbrios de sequência zero, até o momento, as diretrizes normativas encontram-se focadas totalmente nas componentes de sequência negativa. Por tal motivo, as tratativas feitas na sequência encontram-se focadas tão apenas nesta grandeza.

A seguir, são apresentados os fundamentos físicos e matemáticos que norteiam as metodologias existentes e consideradas para fins deste trabalho investigativo.

### 2.3.1 Corrente Conforme e Não Conforme (CCNC)

O método da Corrente Conforme e Não Conforme preconiza que a corrente drenada por uma carga pode ser dividida em duas partes, uma que apresenta o mesmo comportamento da tensão de alimentação, denominada corrente conforme; e outra, que contribui para o aumento do desequilíbrio do sistema, definida como corrente não conforme [20]. A Figura 2.2 ilustra os dois conjuntos de correntes supracitados em um diagrama unifilar.

Figura 2.2 – Diagrama unifilar representativo das correntes conforme e não conforme



Fonte: Próprio Autor

Onde:

$\dot{V}_{i\_PAC}$  e  $\dot{I}_{i\_PAC}$  – componentes simétricas da tensão e corrente no PAC, respectivamente;

$\dot{I}_{i\_conf}$  e  $\dot{I}_{i\_n\ conf}$  – correntes conforme e não conforme da carga.

Em consonância com a Figura 2.2, a equação (2.9) sintetiza a relação entre a corrente total no PAC e as correntes conforme e não conforme. Vale ressaltar que corrente total de sequência positiva equivale somente a parcela da corrente conforme, uma vez que, o método considera o fluxo de potência ativa unidirecional em concordância com os sistemas de geração centralizada, ou seja, a carga não produz potência ativa.

$$\dot{I}_{i\_PAC} = \dot{I}_{i\_conf} + \dot{I}_{i\_n\ conf} \quad (2.9)$$

$$\dot{I}_{1\_PAC} = \dot{I}_{1\_conf} \quad (2.10)$$

Embora possa também ocorrer correntes conforme e não conforme associadas com a sequência zero, estas não serão apresentadas, conforme justificativa já discutida [20], [45].

Partindo do pressuposto que as impedâncias do consumidor sejam representadas na forma de componentes passivos e que estas sejam iguais a de sequência positiva, isto resulta em que a parcela da corrente de sequência positiva seja diretamente proporcional ao fator de desequilíbrio complexo das tensões, ou seja:

$$\dot{I}_{2\_conf} = \dot{I}_{1\_PAC} \left( \frac{\dot{V}_{2\_PAC}}{\dot{V}_{1\_PAC}} \right) \quad (2.11)$$

A partir das equações (2.11) e (2.12) fica pois evidenciado que a expressão da corrente não conforme de sequência negativa pode ser obtida como indicado em (2.13):

$$\dot{I}_{2\_Total} = \dot{I}_{2\_PAC} \quad (2.12)$$

$$\dot{I}_{2\_n\_conf} = \dot{I}_{2\_Total} - \dot{I}_{2\_conf} \quad (2.13)$$

A correlação entre as correntes conforme e não conforme, nos termos estabelecidos pelas formulações, se apresenta como fundamento básico para o processo do compartilhamento, uma vez que, possuem relação com as contribuições do supridor e consumidor, respectivamente.

### 2.3.2 Método Fluxo de Potência Trifásico (FPT)

O método do Fluxo de Potência Trifásico baseia-se na avaliação do sentido do fluxo de potência ativa de sequência negativa para determinar o agente dominante sobre os desequilíbrios de sequência negativa, conforme estabelecido em [25]–[27]. Isto posto, resta que a metodologia em questão não se apresenta com o propósito de compartilhar as responsabilidades sobre o efeito final, senão apenas indicar a fonte majoritária.

Reconhecida a limitação supra posta, a equação (2.14) apresenta a expressão para o cálculo da potência ativa de sequência negativa em consonância com a o padrão IEEE Std 1459[59].

$$P_2 = 3V_2I_2\cos(\theta_2) \quad (2.14)$$

Onde:

$V_2$  e  $I_2$  – módulo da tensão e da corrente de fase de sequência negativa no PAC;

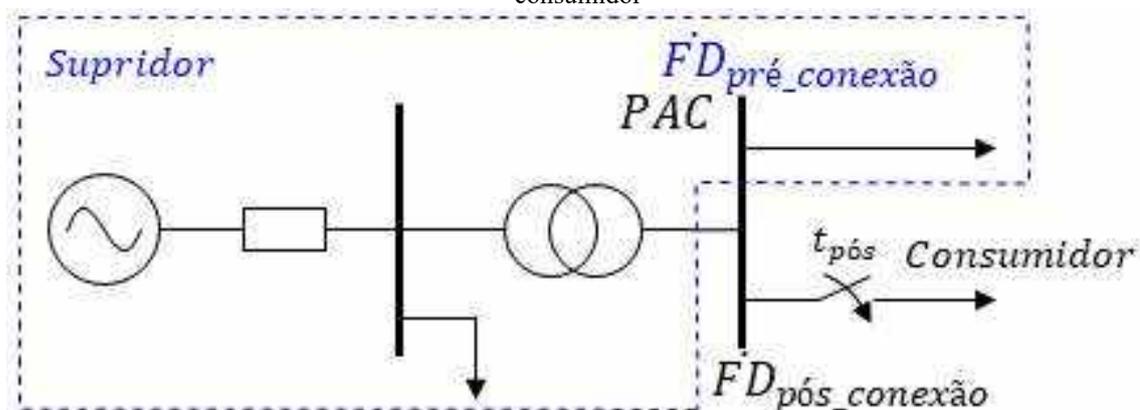
$\theta_2$  – ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente de sequência negativa.

Fundamentalmente, o princípio físico do método se apoia no fato que, quando o valor da potência de sequência negativa for positivo, assume-se que a contribuição do supridor se apresenta como predominante, pois seu fluxo está concordante com o da potência de sequência positiva. Em caso contrário, ou seja, sendo seu valor seja negativo, atribui-se ao consumidor a parcela predominante de responsabilidade sobre o desequilíbrio.

### 2.3.3 Método IEC

O método IEC estabelece que as medições de tensão e corrente sejam feitas em duas etapas, uma anteriormente à conexão de uma unidade consumidora e, na sequência, pela sua inserção na rede de suprimento. Este procedimento permite determinar a componente vetorial do fator de desequilíbrio no PAC para estas duas situações operativas [60] e, com base neste procedimento, obter as parcelas de contribuição dos dois agentes envolvidos. A Figura 2.3 ilustra o acima exposto.

Figura 2.3 – Diagrama unifilar indicativo da aplicação do método IEC indicando as etapas pré e pós conexão do consumidor



Fonte: Próprio Autor

A parcela de responsabilidade do supridor ( $FD_{supr}$ ) será, naturalmente, aquela obtida com o consumidor desconectado, enquanto que a contribuição do consumidor ( $FD_{cons}$ ), se apresenta constituída pela diferença entre o fator de desequilíbrio pós-conexão e pré-conexão, tal como indicado em (2.15), (2.16) e (2.17). Vale ressaltar que as grandezas em pauta se

apresentam com seus respectivos módulos e ângulos, fato este que exige um tratamento vetorial para os cálculos.

$$\dot{F}D_{Total} = \dot{F}D_{Pós\_conexão} \quad (2.15)$$

$$\dot{F}D_{supr} = \dot{F}D_{Pré\_conexão} \quad (2.16)$$

$$\dot{F}D_{cons} = \dot{F}D_{Total} - \dot{F}D_{supr} \quad (2.17)$$

Onde:

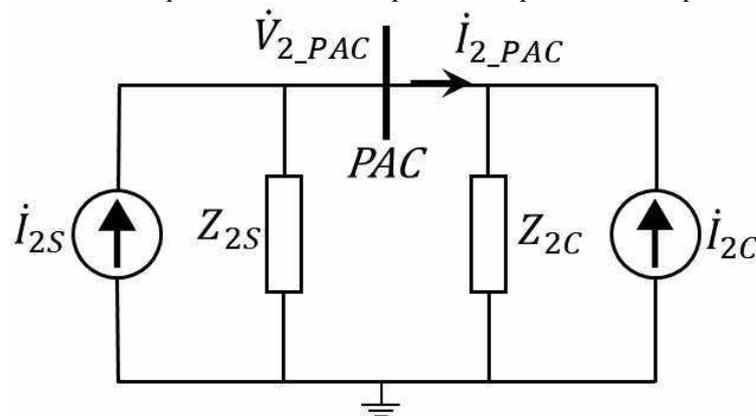
$\dot{F}D_{Pré\_conexão}$  – Componente vetorial do fator de desequilíbrio de tensão no PAC obtido antes da conexão da unidade consumidora;

$\dot{F}D_{Pós\_conexão}$  – Componente vetorial do fator de desequilíbrio de tensão no PAC obtido após a conexão da unidade consumidora.

### 2.3.4 Método da Superposição

Como o próprio nome sugere, o método se baseia no Teorema da Superposição e na análise do circuito equivalente de Norton. A abordagem dessa metodologia está em consonância com a proposição apresentada por [19], que contempla, de maneira detalhada, as particularidades frente a atribuição de responsabilidades de desequilíbrios de tensão. Dessa forma, para se obter as parcelas de responsabilidade no PAC, aplica-se os conceitos básicos de circuitos elétricos sob a perspectiva das contribuições das componentes de sequência negativa, tal como ilustrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Circuito equivalente de Norton para as componentes de sequência negativa



Fonte: Próprio Autor

Onde:

$\dot{i}_{2S}$  e  $\dot{i}_{2C}$  – fontes de corrente representativas de sequência negativa das contribuições do supridor e consumidor;

$Z_{2S}$  e  $Z_{2C}$  – impedâncias equivalentes de sequência negativa do supridor e consumidor;

$\dot{V}_{2\_PAC}$  e  $\dot{I}_{2\_PAC}$  – tensão e corrente no PAC de sequência negativa.

De acordo com o circuito da Figura 2.4, pode-se expressar o comportamento do circuito por:

$$\dot{i}_{2S} = \frac{\dot{V}_{2\_PAC}}{Z_{2S}} + \dot{i}_{2\_PAC} \quad (2.18)$$

$$\dot{i}_{2C} = \frac{\dot{V}_{2\_PAC}}{Z_{2C}} - \dot{i}_{2\_PAC} \quad (2.19)$$

Como os limites máximos regulamentados para desequilíbrios em sistemas elétricos estão diretamente associados à indicadores de tensão, as equações (2.18) e (2.19) podem ser rearranjadas com base na Figura 2.4 da seguinte forma:

$$\dot{V}_{2S\_PAC} = \left( \frac{Z_{2S}Z_{2C}}{Z_{2S} + Z_{2C}} \right) \frac{\dot{V}_{2\_PAC}}{Z_{2S}} + \dot{i}_{2\_PAC} \quad (2.20)$$

$$\dot{V}_{2C\_PAC} = \left( \frac{Z_{2S}Z_{2C}}{Z_{2S} + Z_{2C}} \right) \frac{\dot{V}_{2\_PAC}}{Z_{2C}} - \dot{i}_{2\_PAC} \quad (2.21)$$

$$\dot{V}_{2\_PAC} = \dot{V}_{2S\_PAC} + \dot{V}_{2C\_PAC} \quad (2.22)$$

Por fim, os valores associados com as responsabilidades das partes são determinados através da projeção das tensões encontradas pelas equações (2.20) e (2.21) sobre o fasor total, conforme já elucidado. Muito embora o método apresentar boa acurácia e baixa complexidade para os cálculos, deve-se reconhecer que o prévio conhecimento e/ou determinação das impedâncias se apresenta com grandes desafios quando da aplicação do processo para situações reais. Diante deste fato, devem ser buscadas alternativas visando contornar tais limitações, o que pode ser conduzido através dos mecanismos de aprimoramento do processo considerados a seguir.

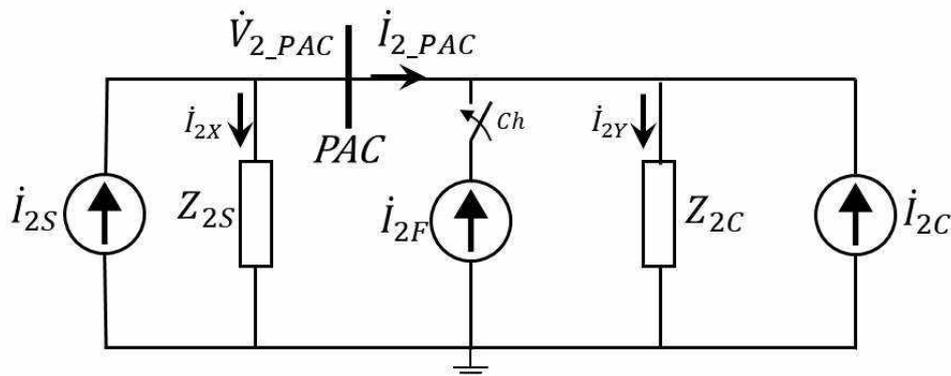
### 2.3.5 Mudança de Estado Controlada via Chaveamento de Capacitor Monofásico (MEC-CM)

O método MEC propõe uma estratégia para a determinação das contribuições dos desequilíbrios de tensão de consumidores e supridores por meio da inserção de uma fonte de perturbação conhecida e controlada. Assim é possível provocar alterações das tensões e correntes no PAC, para as grandezas associadas com os desequilíbrios das tensões aqui consideradas, visando a determinação das contribuições de cada parte.

Dentre as possibilidades para promover tais alterações do estado operacional da rede, a referência [19] emprega o chaveamento de um capacitor monofásico requerido pelo método MEC-CM. Este componente se apresenta como uma estratégia para a inserção de um desequilíbrio, visto que sendo suprido por uma fonte trifásica e com forte característica desequilibrada irá produzir, controladamente, uma corrente de sequência negativa em proporções tal a promover uma alteração da situação vigente para o sistema elétrico sob análise. Naturalmente, outros componentes e configurações poderiam ser também utilizados visando a viabilização de uma fonte controlada de corrente de sequência negativa.

A Figura 2.5 sintetiza o circuito equivalente de Norton de sequência negativa representando as duas condições operativas, ou seja, antes (Ch aberta) e após (Ch fechada) a conexão do capacitor monofásico ou outro componente. A corrente de sequência negativa identificado por  $I_{2F}$  representa a injeção controlada supra referida.

Figura 2.5 – Circuito equivalente de Norton para o método MEC-CM



Fonte: Próprio Autor

Onde:

$\dot{V}_{2\_PAC}$  e  $\dot{V}'_{2\_PAC}$  – tensões de sequência negativa no PAC nos períodos de pré-conexão e pós-conexão da fonte de perturbação, respectivamente;

$\dot{I}_{2\_PAC}$  e  $\dot{I}'_{2\_PAC}$  – correntes de sequência negativa no PAC nos períodos de pré-conexão e pós-conexão da fonte de perturbação, respectivamente;

$\dot{I}_{2X}$  e  $\dot{I}'_{2X}$  – correntes de sequência negativa drenada pela impedância do supridor nos períodos de pré-conexão e pós-conexão da fonte de perturbação, respectivamente;

$\dot{I}_{2Y}$  e  $\dot{I}'_{2Y}$  – correntes de sequência negativa drenada pela impedância do consumidor nos períodos de pré-conexão e pós-conexão da fonte de perturbação, respectivamente;

$\dot{I}_{2F}$  – corrente de sequência negativa da fonte de perturbação.

As grandezas identificadas com apóstrofo (‘), se referem à condição pós-conexão do capacitor monofásico. Tendo em vista que o sistema não sofre mudanças substanciais entre as condições operativas representadas, considera-se que as impedâncias do supridor e consumidor não são alteradas entre os dois estados. Dessa maneira, empregando-se a Lei de Kirchhoff ao circuito da Figura 2.5 e realizando as devidas operações matemáticas, têm-se as expressões (2.23), (2.24) e (2.25).

$$\dot{I}_{2S} = \frac{(\dot{V}_{2\_PAC} \times \dot{I}'_{2\_PAC}) - (\dot{V}'_{2\_PAC} \times \dot{I}_{2\_PAC})}{(\dot{V}_{2\_PAC} - \dot{V}'_{2\_PAC})} \quad (2.23)$$

$$\dot{I}_{2C} = \frac{(\dot{V}'_{2\_PAC} \times \dot{I}_{2\_PAC}) - \dot{V}'_{2\_PAC}(\dot{I}'_{2\_PAC} - \dot{I}_{2F})}{(\dot{V}_{2\_PAC} - \dot{V}'_{2\_PAC})} \quad (2.24)$$

$$\dot{I}_{2\_PAC \text{ total}} = \dot{I}_{2S} + \dot{I}_{2C} \quad (2.25)$$

Embora as variáveis de destaque sejam as correntes, na verdade, a aplicação desta metodologia resulta na determinação das contribuições de tensão, tal como exposto em [39].

Destaca-se que, diferentemente do método da Superposição, o procedimento estabelecido pelo MEC-CM não requer o conhecimento das impedâncias de sequência negativa dos sistemas supridor e consumidor. Este fato torna o método vantajoso, pois tais impedâncias, como já apontado, não são simples de serem obtidas em situações práticas [19].

### 2.3.6 Correlação Entre os Métodos Elucidados e os Percentuais de Responsabilidades

A Tabela 2.1 apresenta uma correlação entre as variáveis fornecidas pelas metodologias e os respectivos vetores de contribuição para o cálculo dos percentuais de responsabilidade de

cada agente. Novamente, vale ressaltar que, por não ser capaz de fornecer vetores de contribuição, o método do Fluxo de Potência Trifásico não fornece os percentuais de responsabilidade de cada parte.

Tabela 2.1 – Correlação entre as variáveis definidas pelos métodos e as componentes vetoriais representativas

Método	Projeção Vetor Supridor	Projeção Vetor Consumidor	Vetor Total
CCNC	$I_{2\_conf}^{proj}$	$I_{2\_n\ conf}^{proj}$	$ \dot{I}_{2\ Total} $
FPT	-	-	-
IEC	$FD_{supr}^{proj}$	$FD_{cons}^{proj}$	$ \dot{F}D_{Total} $
Superposição	$V_{2S\_PAC}^{proj}$	$V_{2C\_PAC}^{proj}$	$ \dot{V}_{2\_PAC} $
MEC-CM	$I_{2S}^{proj}$	$I_{2C}^{proj}$	$ \dot{I}_{2\_PAC\ total} $

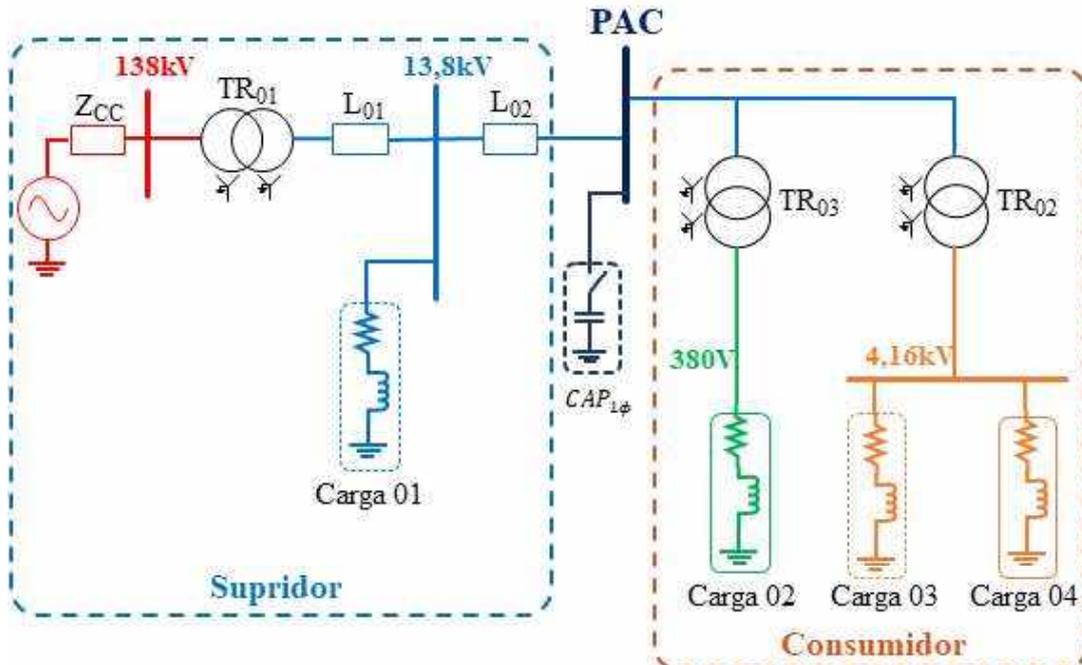
Fonte: Próprio Autor

## 2.4 Sistema Teste Utilizado para a Avaliação do Desempenho das Metodologias

Visando uma análise sobre a eficácia das metodologias para o compartilhamento de responsabilidade sobre os desequilíbrios, utilizou-se um sistema elétrico radial hipotético, que representa de forma geral um arranjo típico encontrado em redes de distribuição reais. Esta opção visa oferecer meios para uma melhor compreensão e análise do desempenho das metodologias. Neste sentido, a plataforma computacional utilizada foi o Matlab/Simulink, que permitiu simular o sistema elétrico adotado, amostrar os sinais de interesses, aplicar as metodologias e a calcular os percentuais de responsabilidades em consonância com os equacionamentos supra explicitados.

O arranjo elétrico estabelecido se encontra exibido na Figura 2.6 e indica uma composição associada com um agente supridor, representado na forma de uma fonte de tensão trifásica equilibrada, seguida das impedâncias equivalentes que expressam o nível de curto-circuito, uma subestação abaixadora, as linhas de distribuição e uma carga de média tensão desequilibrada, retratando a contribuição do referido agente no distúrbio do desequilíbrio de tensão à montante do PAC. No ponto de acoplamento é feita a conexão de uma unidade consumidora constituída por cargas equilibradas e desequilibradas, permitindo, assim, a representação da contribuição deste agente para o fator de desequilíbrio total do barramento. Vale aqui destacar que a presença do capacitor monofásico no diagrama unifilar não está atrelada com uma carga capacitiva nos termos tradicionais, mas apenas indica a inserção de um componente desequilibrado controlado para o atendimento aos requisitos do método MEC.

Figura 2.6 – Sistema elétrico radial hipotético



Fonte: Próprio Autor

Dessa maneira, os parâmetros elétricos do sistema que são utilizados nas simulações estão sintetizados nas Tabelas 2.2 e 2.3.

Tabela 2.2 – Parâmetros do sistema elétrico

Componentes	Parâmetros
Sistema supridor	$V_{3\phi} = 138kV$ ; $f = 60Hz$ ; $S_{CC} = 800MVA$ ; $X/R = 20$
Linhas de Distribuição L <sub>01</sub> e L <sub>02</sub>	$Z_{Cabo} = 0,045 + j0,32 \left[ \frac{\Omega}{km} \right]$ ; distância L <sub>01</sub> = 0,3km; distância L <sub>02</sub> = 0,2km
Transformador TR <sub>01</sub>	$S = 50MVA$ ; $V_{pri.} = 138kV / V_{sec.} = 13,8kV$ ; $Z\% = 6\%$
Transformador TR <sub>02</sub>	$S = 10MVA$ ; $V_{pri.} = 13,8kV / V_{sec.} = 4,16kV$ ; $Z\% = 7\%$
Transformador TR <sub>03</sub>	$S = 500kVA$ ; $V_{pri.} = 13,8kV / V_{sec.} = 0,38kV$ ; $Z\% = 6\%$
Carga 01	Se balanceado: $S_A = S_B = S_C = (4,7 + j1,7)MVA$ ; $S_{3\phi} = (15 \angle 20^\circ)MVA$ Se desequilibrado: $S_A = (7,7 + j1,9)MVA$ ; $S_B = (6,8 + j3,0)MVA$ ; $S_C = (0,6 + j0,2)MVA$ ; $\rightarrow S_{3\phi} = (15 \angle 20^\circ)MVA$
Carga 02	Equilibrado: $S_{3\phi} = (0,5 + j0,2)MVA = (0,53 \angle 22^\circ)MVA$
Carga 03	Se equilibrado: $S_A = S_B = S_C = (2,2 + j0,8)MVA$ ; $S_{3\phi} = (7,0 \angle 19^\circ)MVA$ Se desequilibrado: $S_A = (3,3 + j0,8)MVA$ ; $S_B = (3,7 + j0,6)MVA$ ; $S_C = (0,3 + j1,4)MVA$ ; $\rightarrow S_{3\phi} = (7,8 \angle 21^\circ)MVA$
Carga 04	Equilibrado: $S_{3\phi} = k(1,9 + j0,7)MVA = k(2,0 \angle 20^\circ)MVA$

Fonte: Próprio Autor

Tabela 2.3 – Parâmetros da carga utilizada para o método MEC

Capacitor Monofásico ( $CAP_{1\phi}$ )	$C = 20\mu F$	$V_n = 7,97kV$	<i>Fase A</i>
--	---------------	----------------	---------------

Fonte: Próprio Autor

Os estudos computacionais, norteados a partir do sistema apresentado conduziu a um FD de 3,41% no barramento de média tensão (PAC). Portanto, um nível cerca de 170% maior que aquele definido pelas normas vigentes [1], [17]. Esta violação do valor preconizado motiva as investigações para a determinação das responsabilidades entre os agentes envolvidos. Tal nível total para o fator de desequilíbrio se apresenta como resultado da combinação dos efeitos individuais promovidos pelo supridor e a carga desequilibrada, os quais, isoladamente produziram valores de 2,33% e 1,31%, respectivamente. Dessa forma, a partir do prévio conhecimento das contribuições dos agentes envolvidos, tem-se os valores de referência, os quais servirão como base para os estudos de desempenho das metodologias apresentadas.

## 2.5 Estudos Computacionais sobre o Desempenho das Metodologias

Em consonância com seus fundamentos previamente apresentados, os resultados obtidos para cada uma das metodologias em análise conduziram às grandezas (correntes, tensões ou potências) indicadas nas Tabelas 2.4 a 2.8.

Tabela 2.4 – Resultados para o método Corrente Conforme e Não Conforme

Variável	$\dot{I}_{2\_conf}$		$\dot{I}_{2\_n\_conf}$		$\dot{I}_{2\_Total}$	
	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.
	1543,8	73,66°	1673,1	-103,42°	153,05	-72,48°

Fonte: Próprio Autor

Tabela 2.5 – Resultados para o método Fluxo de Potência Trifásico

Variável	$P_2$
	-61031W

Fonte: Próprio Autor

Tabela 2.6 – Resultados para o método IEC

Variável	$FD_{supr}$		$FD_{cons}$		$FD_{total}$	
	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.
	2,34	59,13°	1,31	17,65°	3,41	43,88°

Fonte: Próprio Autor

Tabela 2.7 – Resultados para o método da Superposição

Variável	$\dot{V}_{2S\_PAC}$		$\dot{V}_{2C\_PAC}$		$\dot{V}_{2\_PAC}$	
	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.
	99,58	20,61°	179,32	62,85°	261,75	48,03°

Fonte: Próprio Autor

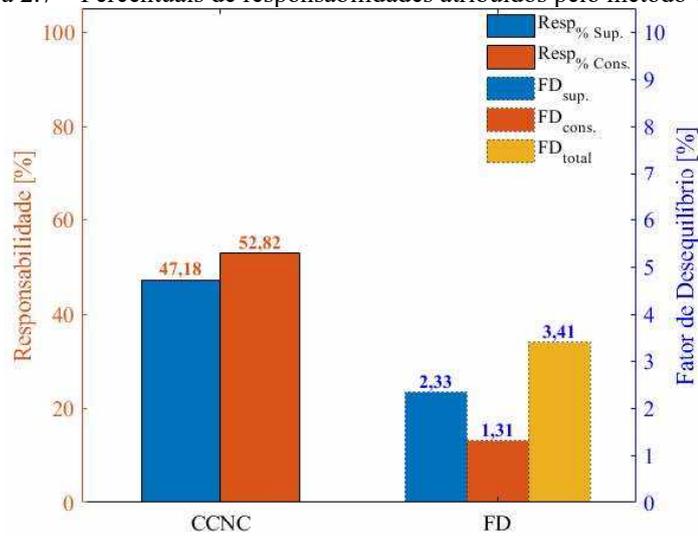
Tabela 2.8 – Resultados do método MEC-CM

Variável	$\dot{I}_{2s}$		$\dot{I}_{2c}$		$\dot{I}_{2\_PAC\ total}$	
	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.	Mag.	Ang.
	207,26	146,07°	169,68	-16,33°	68,6	97,65°

Fonte: Próprio Autor

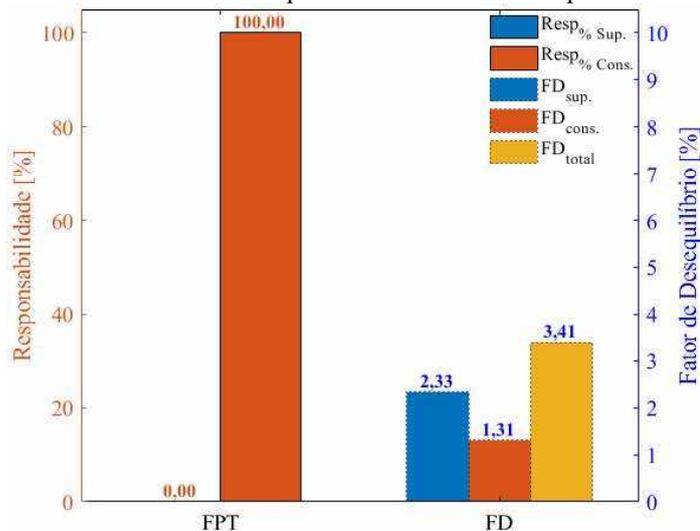
De posse dos resultados obtidos para cada uma das metodologias propostas, foram elaboradas as Figuras 2.7 a 2.11, as quais apresentam os percentuais de responsabilidades fornecidos por eles a cada agente e os fatores de desequilíbrios para as situações explicitadas. Nesse sentido, no que tange ao desempenho do método do Fluxo de Potência Trifásico, foram atribuídos valores de 100% ou 0%, que correspondem às contribuições majoritárias de acordo com o sinal da Potência Ativa de Sequência Negativa. Além disso, em consonância com os objetivos centrais do presente capítulo, foram organizados os resultados de todas as metodologias na Figura 2.12, para efetuar a análise comparativa.

Figura 2.7 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método CCNC



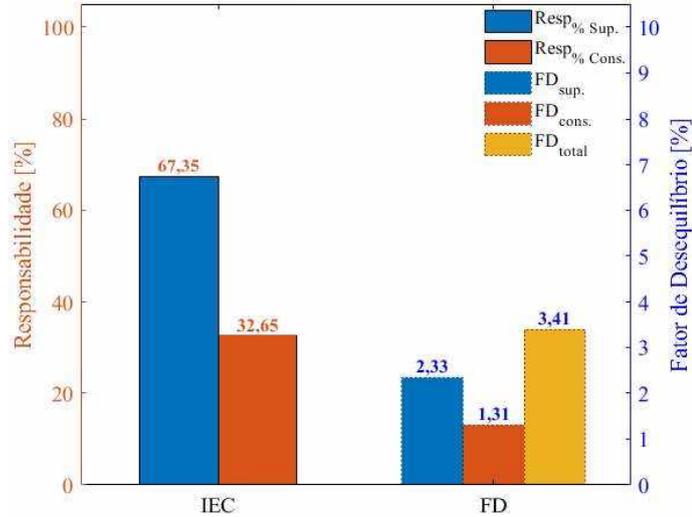
Fonte: Próprio Autor

Figura 2.8 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método FPT



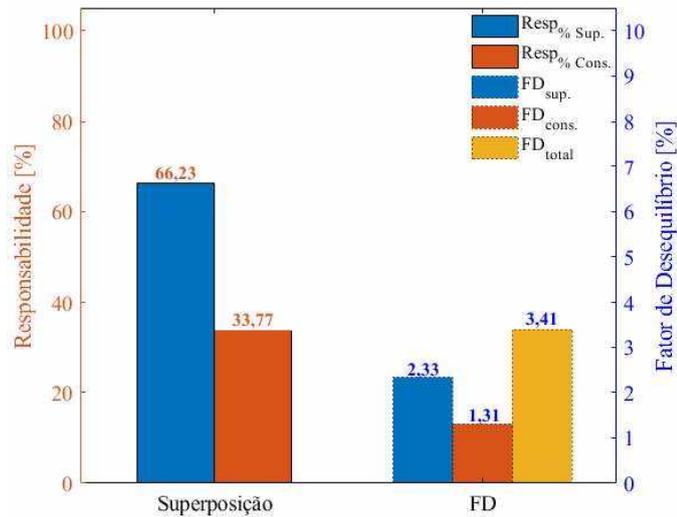
Fonte: Próprio Autor

Figura 2.9 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método IEC



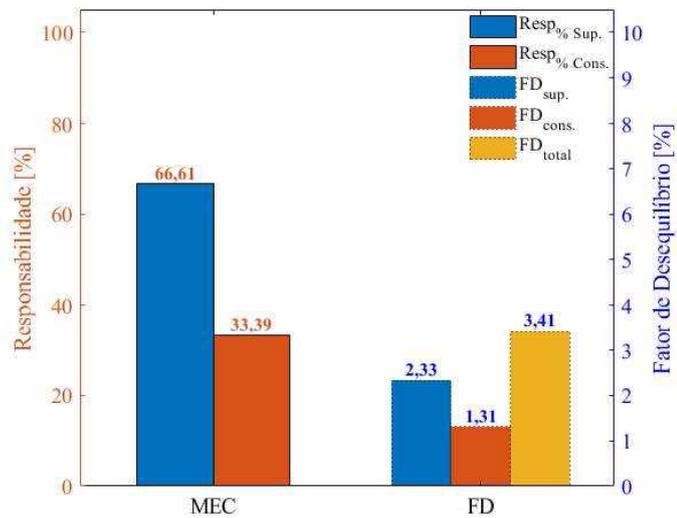
Fonte: Próprio Autor

Figura 2.10 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método da Superposição

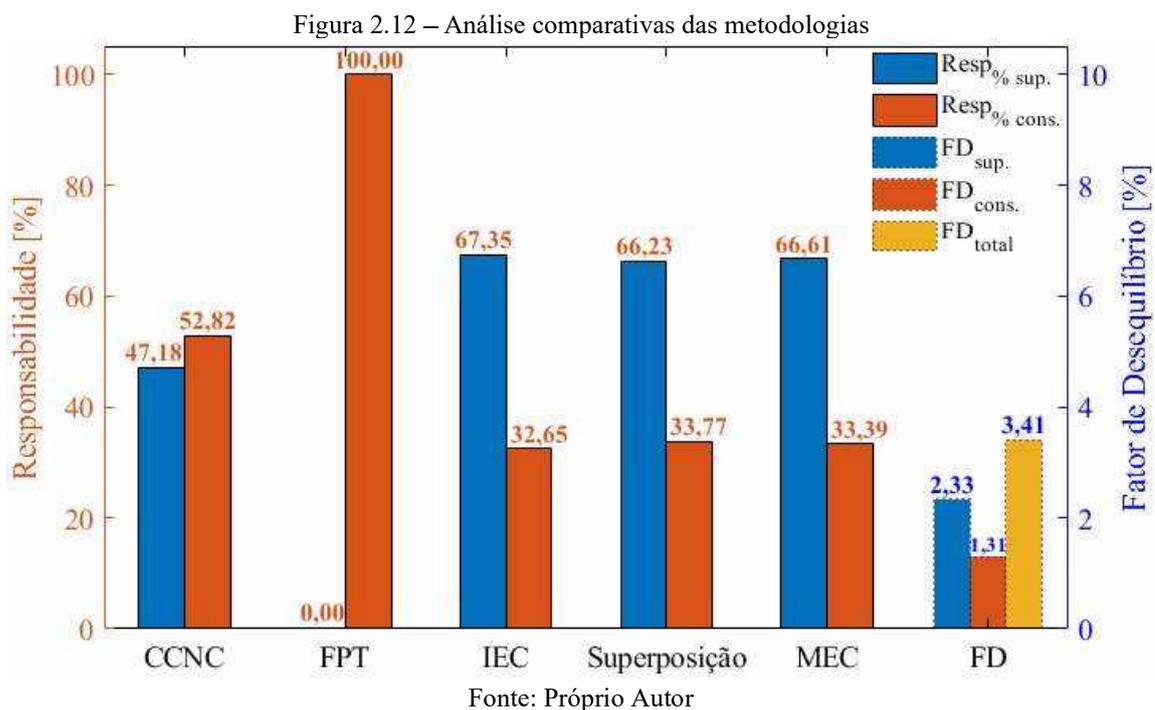


Fonte: Próprio Autor

Figura 2.11 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método MEC



Fonte: Próprio Autor



De acordo com os resultados apresentados para o consumidor, nota-se que os métodos da Corrente Conforme e Não Conforme e do Fluxo de Potência Trifásico atribuíram a maior parcela de responsabilidade a este agente. Todavia, comparando-se os percentuais de desequilíbrios individualmente provocados pelo Supridor (2,33%) e Consumidor (1,31%), esperar-se-ia que as contribuições majoritárias fossem incumbidas ao supridor. Além de apresentarem resultados muito próximos, os métodos IEC, da Superposição e da Mudança de Estado Controlada atribuíram as responsabilidades majoritárias ao supridor de forma pertinente.

De um modo geral, percebe-se que as metodologias que apresentaram desempenho insatisfatório foram os métodos da Corrente Conforme e Não Conforme e do Fluxo de Potência Trifásico, pois manifestam fragilidades inerentes aos seus fundamentos, tal como evidenciado em [45]. Embora tenham performado de forma eficaz, os métodos IEC e da Superposição demonstram limitações práticas quanto a necessidade de condições operacionais específicas e distintas das usualmente encontradas em sistemas elétricos reais. Por fim, constata-se que além de resultados acurados a metodologia da Mudança de Estado Controlada se apresenta como uma opção de fácil implementação em aplicações práticas.

## 2.6 Considerações Finais

Este capítulo objetivou realizar uma síntese dos métodos hoje conhecidos para fins da atribuição da responsabilidade entre dois agentes quanto a manifestação de indicadores de desequilíbrios nos pontos de conexão entre os mesmos. Somado a isto, foram também

contemplados estudos computacionais comparativos sobre a eficácia das metodologias para os fins ora postos.

Os resultados evidenciaram que o método da Corrente Conforme e Não Conforme e o método do Fluxo de Potência Trifásico apresentaram resultados dissonantes ao desempenho físico esperado, enquanto que os métodos IEC, Superposição e MEC-CM se mostraram consistentes com os objetivos delineados.

Todavia, vale lembrar que o método IEC, como esclarecido, requer o conhecimento do fator de desequilíbrio antes da conexão da instalação consumidora, fato este praticamente inexequível para instalações existentes. Por outro lado, o método da Superposição demanda o conhecimento das impedâncias, cujos valores são de difícil obtenção. Estas questões evidenciam, pois, que tais procedimentos, não obstante suas consistências quanto ao desempenho computacional, certamente possuem limitações de ordem práticas quanto a sua aplicabilidade em campo.

Por fim, o MEC-CM, embora necessite de uma fonte de perturbação externa, se mostra como uma alternativa promissora, quer no âmbito teórico como também na sua praticidade para implementação em campo.

# 3

## FUNDAMENTOS DA ANÁLISE DE COMPONENTES INDEPENDENTES – ICA

### 3.1 Introdução

Uma vez estabelecido os objetivos desta tese de doutorado, apresentados os métodos até então estabelecidos para fins do compartilhamento das responsabilidades sobre o fenômeno aqui tratado e, por fim, realizada uma análise computacional visando uma análise de suas aderências aos valores esperados procede-se, nesta etapa, a sintetizar os princípios que norteiam uma estratégia alternativa que se apresenta como cerne desta pesquisa.

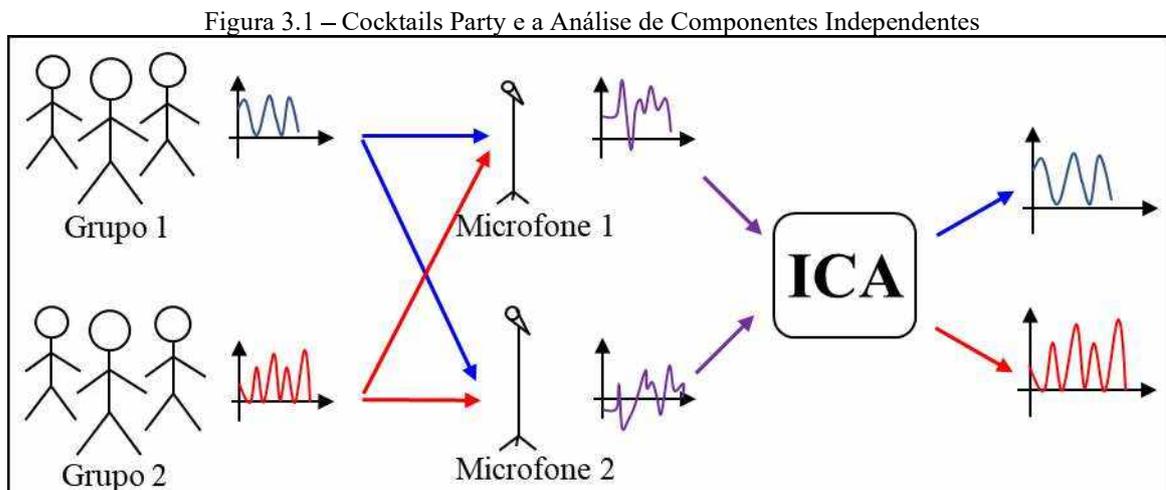
Tendo em vista os fundamentos da proposta a ser feita, torna-se essencial a apresentação dos principais conceitos que sustentam o processo de análise, os quais se apresentam baseados em princípios estatísticos e probabilísticos, já empregados em vários outros campos da engenharia elétrica. Neste sentido, as tratativas aqui realizadas não têm a pretensão de apresentar a teoria básica da ferramenta a ser utilizada, mas tão somente os pontos considerados relevantes para a compreensão do procedimento.

Nesse sentido, o presente capítulo encontra-se elaborado de forma a condensar as técnicas estatísticas e matemáticas fundamentais a análise das componentes independentes (ICA) e a apresentar métodos utilizados para o pré-processamento dos dados amostrados, uma vez que estes processos colaboram para a redução da complexidade matemática e numérica da ICA. Ademais, realiza-se a contextualização da ICA com aplicações em sistemas elétricos, haja vista que, em casos reais os sinais elétricos não são, via de regra totalmente independentes do ponto de vista estatístico.

### 3.2 Análise de Componentes Independentes

Em consonância com a temática apresentada no capítulo introdutório, a análise de componentes independentes é um dos métodos mais utilizados na Separação Cega de Fontes (BSS – *Blind Source Separation*) destinado a recuperação dos sinais originais (ou fontes) a partir de sinais misturados, sem o conhecimento prévio (ou pouca informação) sobre as fontes e a forma com que os sinais foram misturados [61].

Portanto pode-se explicitar o tema abordado acima, através do exemplo clássico que ilustra o comportamento desta metodologia, conhecido como *Cocktails Party Problem* [62], [63]. Desta forma, estabelece-se que em uma sala estão dois grupos de pessoas conversando isoladamente entre si, e são colocados dois microfones em posições diferentes e aleatórias para captar os áudios deles, conforme ilustra a Figura 3.1. Dessa forma, os sinais obtidos pelos microfones são uma mistura das conversas dos dois grupos e a priori nada se sabe a respeito da forma em que foram misturados. Assim, o objetivo central da ICA é separar estes sinais e obter as fontes que os geraram.



Fonte: Próprio Autor

Sendo assim, pode-se representar matematicamente este problema pela equação (3.1):

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) \quad (3.1)$$

Onde:  $\mathbf{A}$ , é uma matriz de constantes de ordem  $m \times n$ , conhecida como matriz de mistura;  $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), x_3(t), \dots, x_m(t)]^T$  é o vetor com os sinais amostrados e  $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), s_3(t), \dots, s_n(t)]^T$  é o vetor das fontes.

A partir da equação (3.1), constata-se que a modelagem matemática do problema recai em um sistema linear de equações que por sua vez, também pode ser representado na forma matricial:

$$X_{[mxk]} = A_{[mxn]}S_{[nxk]} \quad (3.2)$$

Primeiramente poder-se-ia buscar uma solução trivial como apresentada na equação (3.3), no entanto, a única informação que se dispõe é matriz de sinais amostrados,  $X$ , ou seja, os elementos  $a_{ij}$  da matriz  $A$  são, a priori, desconhecidos:

$$S = A^{-1}X \quad (3.3)$$

Assim, o principal objetivo da ICA é determinar uma matriz  $\hat{A}_{[mxn]}$ , que corresponde aos valores estimados de  $A$ , e, a partir de então, obter os valores estimados das fontes que constituem  $\hat{S}_{[nxk]}$ :

$$\hat{S} = \hat{A}^{-1}X \quad (3.4)$$

Portanto, em consonância com exposto, para que seja possível obter uma solução através do método ICA, algumas hipóteses e condições devem ser adotadas [61], [64] e [65]:

- Os sinais originais devem ser estatisticamente independentes;
- Os sinais devem apresentar distribuições de probabilidade não-gaussiana;
- O número de sinais misturados deve ser maior ou igual ao número de fontes  $m \geq n$ .

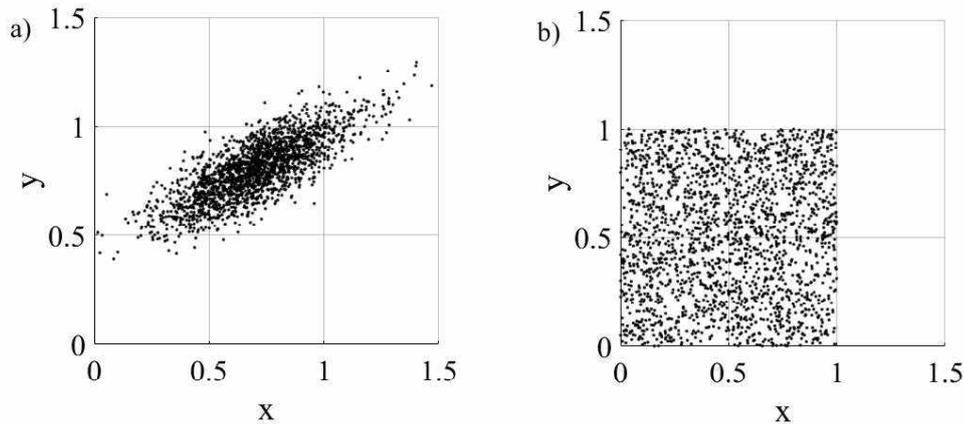
Com base nestes princípios, apresenta-se, a seguir, um sumário dos fundamentos acerca do conceito de independência estatística, tendo em vista que essa é a condição essencial e indispensável para a convergência do método ICA. Complementando, são também apresentadas as metodologias de pré-processamento destinadas a auxiliar na redução das complexidades matemáticas e nos esforços computacionais.

### 3.3 Independência Estatística

A independência estatística entre variáveis aleatórias (v.a.) constitui o cerne do método de análise de componentes independentes. Dessa maneira, pode-se dizer que duas (ou mais) variáveis aleatórias são independentes se o conhecimento dos valores de uma delas não fornece informações sobre as outras. Isto posto, a título de exemplificação, a Figura 3.2 ilustra dois

casos a respeito do comportamento de v.a.: o primeiro (a), em que as variáveis são dependentes, pois há uma tendência dos valores de ambas crescerem simultaneamente e o segundo (b), no qual as variáveis são independentes, uma vez que seus comportamentos se apresentam consonantes aos requisitos de independência estatística estabelecidos anteriormente, ou seja, o conhecimento dos valores de qualquer uma das variáveis não se correlaciona com o comportamento da outra.

Figura 3.2 – Conjunto de variáveis aleatórias estatisticamente: a) dependentes e b) independentes



Fonte: Próprio Autor

Matematicamente, a independência estatística é definida em função das densidades conjunta e marginal das v.a. [61], [62], [66].

$$f_{xy}(x, y) = f_x(x)f_y(y) \quad (3.5)$$

Portanto, haverá independência se, e somente se, a identidade (3.5) for satisfeita para todos os valores das v.a. Em termos dos momentos estatísticos, parâmetros que caracterizam as distribuições e facilitam a análise matemática, a expressão supracitada equivale a [62], [67]:

$$E\{\mathbf{x}^k, \mathbf{y}^r\} = E\{\mathbf{x}^k\}E\{\mathbf{y}^r\} \quad (3.6)$$

$$k \text{ e } r \in \mathbb{N}$$

Para o caso em que a covariância de duas variáveis aleatórias é nula, ou seja,  $C_{xy} = E\{(\mathbf{x} - m_x)(\mathbf{y} - m_y)^T\} = 0$ , a correlação cruzada se torna,  $R_{xy}\{\mathbf{x}, \mathbf{y}^T\} = E\{\mathbf{x}\}E\{\mathbf{y}^T\}$ . Nestas condições as variáveis são descorrelacionadas.

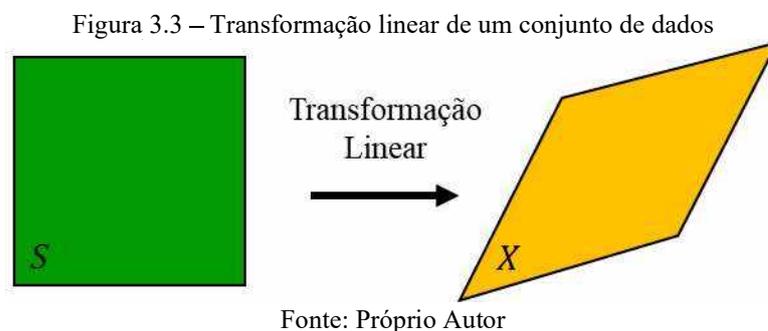
No entanto, a independência estatística é uma propriedade mais restrita que a correlação, pois deve satisfazer a equação (3.6) para todos os valores de  $k$  e  $r$ . Portanto, quando v.a. são

independentes, elas serão necessariamente decorrelacionadas e para variáveis decorrelacionadas, não se pode afirmar que são independentes [63], [66], [67].

### 3.4 Métodos para o Pré-Processamento dos Dados

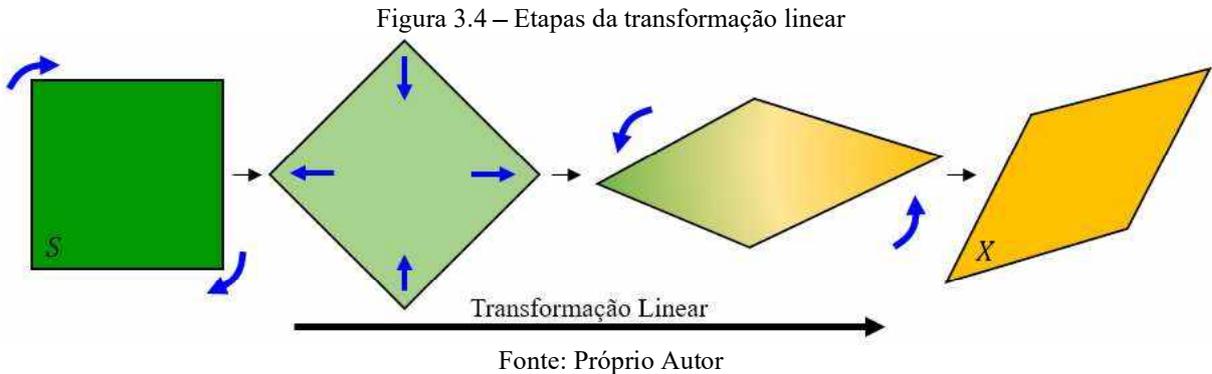
A partir dos fundamentos estatísticos que formam a base para a aplicação do processo de análise das componentes independentes, torna-se essencial o conhecimento dos métodos voltados para o pré-tratamento do conjunto de dados amostrados, objetivando, sobretudo, a otimização dos processos computacionais e matemáticos necessários para realizar a separação dos sinais.

Visando clareza didática para a elucidação destas estratégias, emprega-se, na sequência, um exemplo ilustrativo para representar as técnicas de pré-processamento de forma simplificada e genérica. Dessa forma, em consonância com a teoria da ICA, os sinais amostrados são o resultado da mistura dos sinais estatisticamente independentes, denominados fontes, com uma matriz  $A$ , que representa os agentes modificadores do sistema, os quais são expressos matematicamente através uma transformação linear. Assim, a Figura 3.3 demonstra que um conjunto de dados amostrados,  $X$  (em laranja), nada mais é do que o resultado de uma transformação linear imposta em um conjunto de dados fonte,  $S$  (em verde), analogamente tem-se o que ocorre com os sinais elétricos de tensão e corrente aferidos após a conexão de determinada carga. Neste sentido, demonstra-se a seguir, tanto o processo de transformação que os sinais fontes sofrem, quanto os procedimentos que contribuem para determinar quais foram as alterações realizadas, sendo estes, conhecidos como métodos de pré-processamento de dados.

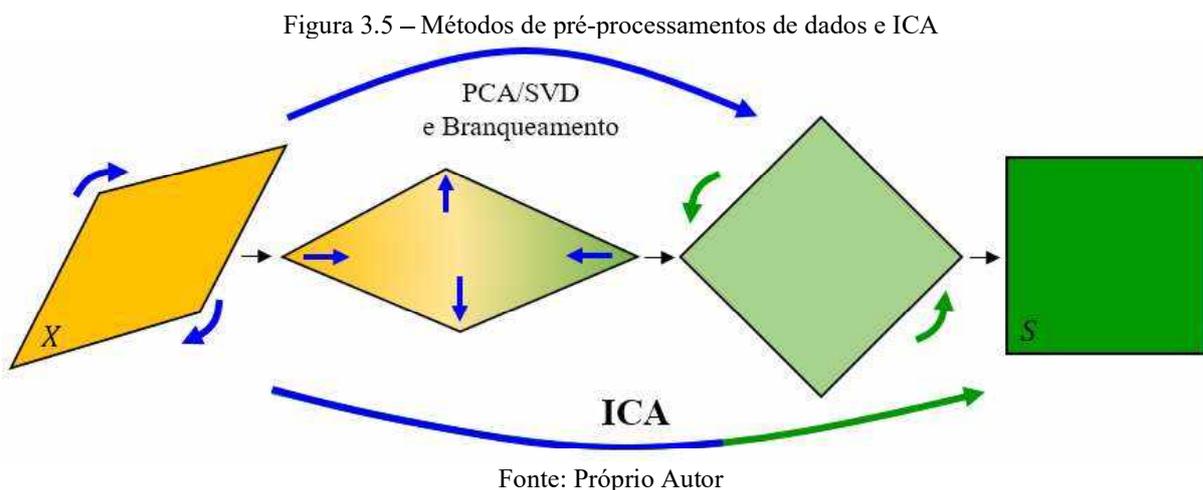


Numa perspectiva do tratamento dos sinais, a transformação linear promove a rotação e compressão, ou expansão, dos dados. Tal processo pode ser compreendido ao se observar as

etapas de transformação representadas na Figura 3.4, destacando-se que, didaticamente, a técnica da rotação foi subdividida em dois passos.



Nos termos acima postos, isto implica que, para aplicações práticas, um conjunto de dados semelhante ao representado pelo losango são os sinais de entrada para o método ICA. Para estes, se desconhece informações sobre os valores originais e os parâmetros da transformação linear, sendo que somente as premissas estabelecidas nas hipóteses apresentadas na seção introdutória servem como balizadores. Assim, os métodos de pré-processamento contribuem para obtenção dos elementos e das fontes que manipularam os dados amostrados. Em outras palavras, o pré-tratamento de dados auxilia o método ICA a percorrer o caminho inverso da transformação linear outrora realizada, reduzindo os esforços matemáticos e computacionais, como representado na lógica indicada da Figura 3.5.

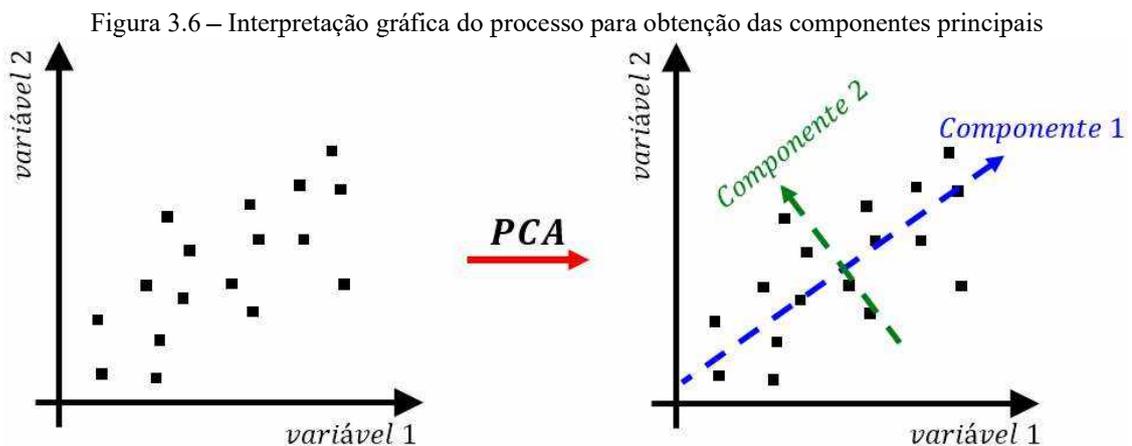


### 3.4.1 Técnica de Análise das Componentes Principais

Partindo de um conjunto de dados multivariados, a Técnica de Análise das Componentes Principais (PCA) permite a obtenção de um conjunto de dados com menor número de variáveis e redundância, que representam de forma adequada o sistema original. A redução da quantidade

de variáveis é baseada na correlação entre os dados, que possui a vantagem de operar com a estatística de segunda ordem [61]–[63], [68].

O ponto inicial para o emprego da PCA baseia-se em uma transformação linear que fornece um sistema de coordenadas ortogonais, rotacionado em relação ao original, de forma que os elementos nas novas coordenadas se tornem descorrelacionados. O primeiro eixo das novas coordenadas é obtido na direção que ocorre a variância máxima das projeções dos dados originais, enquanto que o segundo eixo corresponde a máxima variância na direção ortogonal ao primeiro eixo, e assim por diante. Visando uma interpretação gráfica do processo, a Figura 3.6 ilustra a obtenção das componentes principais de um conjunto de dados genéricos associados a uma amostragem de grandezas obtidas, em função de duas variáveis. Como se constata através da figura a direita, a mesma transmite a ideia da descorrelação entre as variáveis amostradas na forma de 2 (duas) componentes principais, cada qual expressando um significado físico relacionado com o nível de impacto sobre a amostragem feita.



Em termos matemáticos a transformação linear imposta pela PCA é representada por:

$$\mathbf{y} = \mathbf{W}_{PCA}\mathbf{x} \quad (3.7)$$

$$y_1 = \sum_{j=1}^n w_{j1}x_j = \mathbf{w}_1^T\mathbf{x} \quad (3.8)$$

Onde,  $x_j$  representa os  $n$ -ésimos elementos do vetor  $\mathbf{x}$ ,  $w_{j1}$  são os  $n$ -ésimos coeficientes escalares (ou pesos) do vetor  $\mathbf{w}_1$ .

O fator  $y_1$  corresponde a componente principal de primeira ordem para  $\mathbf{x}$ , caso este corresponda a máxima variância, a qual depende tanto da norma quanto da orientação de  $\mathbf{w}_1$ , e

crece juntamente com ela. Por tal motivo, é comum impor uma restrição para que a norma seja constante e, usualmente, limita-se seu valor à 1, buscando-se, assim, uma otimização através de um vetor  $\mathbf{w}_1$  que maximize a função objetivo da PCA.

$$J_1^{PCA}(\mathbf{w}_1) = E\{y_1^2\} = E\{(\mathbf{w}_1^T x)^2\} = \mathbf{w}_1^T E\{xx^T\}\mathbf{w}_1 = \mathbf{w}_1^T C_x \mathbf{w}_1 \quad (3.9)$$

De modo que,  $\|\mathbf{w}_1\| = 1$ .

A solução da equação (3.9) é encontrada em função dos autovetores de norma unitária  $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_n)$  da matriz covariância  $C_x = E\{xx^T\}$ . A ordem dos autovetores é correspondente aos autovalores  $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$  que satisfazem a relação  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$ . Dessa forma, com  $\mathbf{w}_1 = \lambda_1 \mathbf{e}_1$ , a primeira componente principal de  $\mathbf{x}$  será  $y_1 = \mathbf{w}_1^T x$ . Além disso, pode-se generalizar a equação (3.9) para a  $m$ -ésima componente principal ( $1 \leq m \leq n$ ),  $\mathbf{y}_m = \mathbf{w}_m^T x$ , que terá uma norma unitária de  $\mathbf{w}_m$ , que maximiza a variância de  $\mathbf{y}_m$ . Vale destacar que,  $\mathbf{y}_m$  deve ser descorrelacionado com as componentes principais precedentemente encontradas. Assim,  $E\{\mathbf{y}_m, \mathbf{y}_j\} = 0$ ,  $j < m$ .

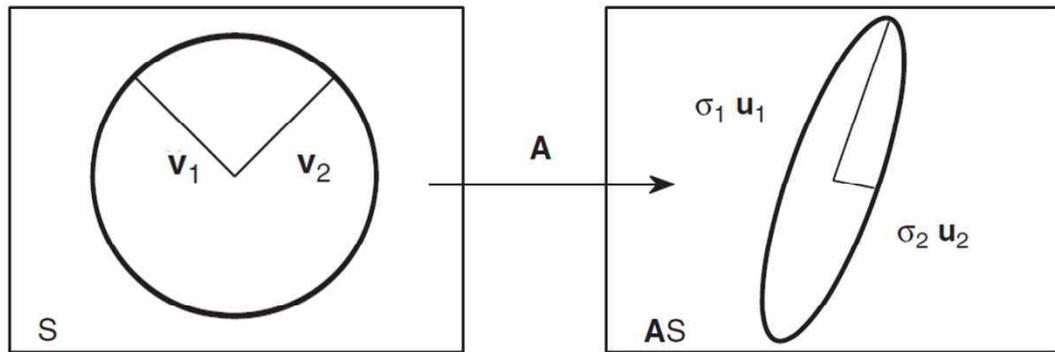
Diante do exposto, chega-se a que a  $k$ -ésima componente principal será obtida por:

$$\mathbf{y}_j = \lambda_j \mathbf{e}_j^T x \quad (3.10)$$

### 3.4.2 Decomposição em Valores Singulares

Outra forma comumente utilizada em transformações lineares para a determinação dos autovalores e autovetores consiste no emprego da técnica da Decomposição em Valores Singulares (SVD), a qual oferece boa precisão e baixa complexidade numérica [66]. Assim, a SVD pode ser interpretada como a fatoração de uma matriz capaz de determinar os elementos constituintes da transformação linear que alongou ou comprimiu e rotacionou um conjunto de dados. Em outras palavras, a SVD corresponde em determinar quais vetores que geraram a transformação e seus respectivos valores de escala. Para exemplificar, uma circunferência unitária, ao ser multiplicada por uma matriz de transformação genericamente designada por  $A$ , pode resultar numa hiper-elipse, como ilustrado na Figura 3.7. Dessa forma, o intuito do método é justamente determinar os elementos desta matriz  $A$  [61] que conduzam a tal transformação.

Figura 3.7 – Imagem de uma circunferência unitária  $S$ , sendo transformada em uma hiper-elipse  $AS$  no espaço  $\mathbb{R}^2$



Fonte: [61]

Uma hiper-elipse no espaço  $\mathbb{R}^m$  pode ser definida pela superfície da circunferência ou esfera unitária que foi alterada no espaço  $\mathbb{R}^m$  pelos fatores  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m$  nas direções ortogonais  $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_m \in \mathbb{R}^m$ . Matematicamente, esta transformação pode ser representada por [61]:

$$A\mathbf{v}_j = \sigma_j\mathbf{u}_j \quad 1 \leq j \leq m \quad (3.11)$$

Ou ainda, na forma matricial:

$$AV = U\Sigma \quad (3.12)$$

Assim, a matriz  $A$  representando a transformação linear, pode ser explicitada como:

$$A = U\Sigma V^T \quad (3.13)$$

Na expressão anterior: a matriz  $U$  se apresenta constituída por colunas ortogonais de ordem  $m \times m$ , conhecida pelo nome de vetores singulares à esquerda;  $V$  corresponde a uma matriz  $n \times n$  unitária, denominada por vetores singulares à direita; e  $\Sigma$  é uma matriz diagonal,  $m \times n$  com  $m$  valores singulares  $\sigma_i$ , ordenados  $\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3 \leq \dots \leq \sigma_m$ , para  $i = 1, 2, \dots, m$ . Cada valor  $\sigma_i$  relaciona-se com um vetor singular em  $U$  e  $V$ , sendo estes ortogonais entre si. Além disso, por convenção, os vetores singulares obtidos possuem módulo unitário [69]. Portanto, pode-se afirmar que as matrizes  $U$ ,  $V$  e  $\Sigma$  são responsáveis por rotacionar e esticar/comprimir o conjunto de vetores, respectivamente.

Retornando ao caso dos autovalores e autovetores da matriz covariância  $C_x$  em PCA, estes podem ser obtidos sem a necessidade de realizar os produtos  $X^T X$  ou  $XX^T$ . Para tanto basta utilizar as relações existentes entre os métodos SVD e PCA, a saber: os valores singulares de  $X$  são equivalentes ao quadrado dos autovalores  $\lambda_i = \sigma_i^2$ ; as colunas de  $V$  são

correspondentes os autovetores da covariância de  $E\{X^T X\}$  e as colunas de  $U$  são os autovetores de  $E\{XX^T\}$  [63], [66], [68], [70].

### 3.4.3 Branqueamento

O branqueamento (*whitening*) se apresenta como uma técnica amplamente utilizada nas etapas de pré-processamento de sinais. Não obstante na ICA, ela é capaz de reduzir aproximadamente pela metade do esforço matemático e computacional necessários para encontrar os elementos da matriz de mistura. O termo “branco” está relacionado ao espectro de potência constante para todas as frequências em ruído branco, algo parecido com o espectro da luz branca que possui todas as cores [63], [71].

Portanto, um vetor aleatório,  $\mathbf{z} = [z_1, z_2, \dots, z_n]^T$  é dito branco, se seus elementos forem decorrelacionados entre si e possuírem variância unitária,  $E\{\mathbf{z}\mathbf{z}^T\} = I$ , sendo  $I$  a matriz identidade.

Essencialmente, o branqueamento é um processo que decorrelaciona e ajusta o valor da variância dos dados para que se torne unitária. Além disso, vale destacar que é sempre possível realizar o branqueamento e representa-lo como uma transformação linear [63].

$$\mathbf{z} = V\mathbf{x} \quad (3.14)$$

Onde  $V$  é uma matriz da transformação linear que fará o branqueamento do vetor  $\mathbf{x}$ . Portanto, a partir da equação (3.14) deve-se buscar uma matriz  $V$  que realize a transformação proposta:

$$E\{\mathbf{z}\mathbf{z}^T\} = E\{V\mathbf{x}(V\mathbf{x})^T\} = E\{V\mathbf{x}\mathbf{x}^T V^T\} = VE\{\mathbf{x}\mathbf{x}^T\}V^T = I \quad (3.15)$$

Sendo a matriz covariância do vetor  $\mathbf{x}$ , representada por:  $E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^T\} = EDE^T$ . Onde  $E$  é uma matriz cuja as colunas são autovetores ortonormais e  $D$  a matriz diagonal de autovalores de  $E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^T\}$ . Isto posto, a matriz  $V$  deve ser escolhida de modo a satisfazer a equação (3.15). Nestes termos:

$$V = D^{-\frac{1}{2}}E^T \quad (3.16)$$

Dessa forma, vale ressaltar que embora os dados sejam branqueados ou somente decorrelacionados através de PCA, não se pode garantir que estes sejam independentes e, por conseguinte, esta condição não é suficiente para separar as fontes.

Em consonância com a temática desenvolvida, ao aplicar-se o branqueamento à matriz de mistura da equação da ICA,  $\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{s}$ , obtém-se uma nova matriz ortogonal, como abaixo.

$$\mathbf{z} = \mathbf{V}\mathbf{x} = \mathbf{V}\mathbf{A}\mathbf{s} \rightarrow \therefore \tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{V}\mathbf{A}$$

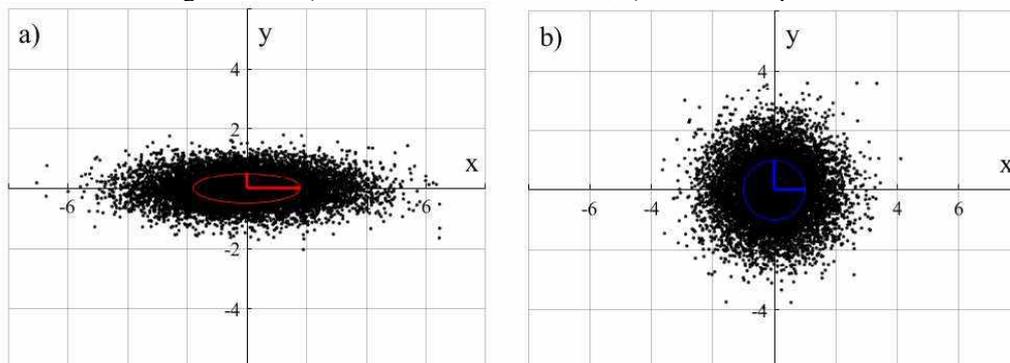
Assim:

$$\mathbf{z} = \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{s} \quad (3.17)$$

Portanto, como a matriz  $\tilde{\mathbf{A}}$  é ortogonal e a busca de seus elementos está limitada aos espaços de matrizes ortogonais, ao invés de estimar-se  $n^2$  elementos da matriz original  $\mathbf{A}$ , busca-se pelos parâmetros de  $\tilde{\mathbf{A}}$  que, por ser ortogonal, apresenta apenas  $n(n-1)/2$  graus de liberdade. Assim, evidencia-se a considerável redução de complexidade no método ICA, ao aplicar o branqueamento de dados.

Sintetizando os conceitos aqui tratados, na Figura 3.8 são apresentadas as distribuições para um conjunto de dados descorrelacionados, que foram objeto da aplicação da técnica do branqueamento.

Figura 3.8 – a) Dados descorrelacionados; b) Dados branqueados.



Fonte: Próprio Autor

Em termo matemáticos, pode-se sintetizar os efeitos provocados no conjunto de dados através da comparação das matrizes de covariância apresentadas a seguir:

$$C_{descor} = \begin{bmatrix} 1,7912 & 0 \\ 0 & 0,502 \end{bmatrix}, \quad C_{branco} = \begin{bmatrix} 1,0 & 0 \\ 0 & 1,0 \end{bmatrix}$$

Os resultados do exemplo simplificado acima exposto evidenciam as vantagens da aplicação da Técnica do Branqueamento como ferramenta de pré-processamento.

### 3.5 Método de Solução da ICA: Não-Gaussianidade

Esta seção apresenta uma das estratégias utilizadas para estimar modelos capazes de separar os sinais amostrados [63], [65]. A mesma está pautada na maximização da não-

gaussianidade dos sinais, empregando-se conceitos da teoria da informação por meio da negentropia.

A busca por uma solução para ICA através da não-gaussianidade está fundamentada no Teorema do Limite Central, o qual estabelece que a soma de um conjunto de variáveis aleatórias independentes, com distribuições semelhantes, tende a ser mais gaussiana do que cada variável original. Assim, ao analisar duas v.a. independentes  $s_1$  e  $s_2$ , sua FDP conjunta,  $y$ , será mais gaussiana do que as FDP marginais.

Dessa forma, a metodologia utilizada para medir a não-gaussianidade das distribuições é fundamentada na entropia, que é a base da teoria da informação. A entropia de uma v.a. está relacionada ao grau de aleatoriedade, imprevisibilidade e desestruturação que tem as observações da variável, ou seja, quanto maior for essa aleatoriedade, maior será o valor da entropia. Assim sendo, pode-se expressar a entropia de um vetor aleatório  $y$  com distribuição de probabilidade  $f_y(y)$  por:

$$H(y) = - \int f_y(y) \log f_y(y) dy \quad (3.18)$$

Segundo a teoria da informação, a variável gaussiana é a que apresenta maior entropia dentre todas as v.a. de mesma variância [63]. Isto equivale a dizer que as variáveis gaussianas são as mais aleatórias e menos estruturadas dentre todas as distribuições, portanto, a entropia pode ser empregada como medida de não-gaussianidade.

Frequentemente utiliza-se como medida de não-gaussianidade uma versão normalizada da entropia, chamada de negentropia, abaixo indicada, sendo  $y_{gauss}$  um vetor aleatório gaussiano com a mesma correlação do vetor  $y$ .

$$J(y) = H(y_{gauss}) - H(y) \quad (3.19)$$

Vale aqui ressaltar que a negentropia é considerada de certa maneira, um estimador ótimo de não-gaussianidade devido ao seu desempenho estatístico, robustez perante a *outliers* e ser invariante para transformações lineares invertíveis. A negentropia se apresenta com um resultado nulo para variáveis gaussianas e para as demais v.a. será sempre positivo diferente de zero.

Dessa forma, o algoritmo utilizado neste trabalho foi o *Adaptive Complex Maximization of Nongaussianity* (A-CMN) desenvolvido por M. Novey e T. Adali, que mantem as

propriedades de convergência do algoritmo Complex-FastICA (amplamente utilizado na literatura) proposto por Bingham e Hyvarinen pois, também busca uma solução de não linearidade baseada na aproximação do método de Newton [47], [72]. Além disso, este algoritmo utiliza as funções contraste e  $G$  para v.a. complexas dadas por:

$$J_G(\mathbf{w}) = E\{G|\mathbf{w}^H \mathbf{x}|^2\} \quad (3.20)$$

$$G(z) = \frac{z^K}{\sqrt{2K}}, K \in \mathbb{R} \quad (3.21)$$

Cabe ressaltar, muito embora seja de suma importância o detalhamento do algoritmo A-CMN no que tange as técnicas e os procedimentos utilizados para realizar a separação das fontes, o tema foge ao escopo dessa tese. Por tal motivo a matéria não será aqui tratada e, em havendo necessidade de informações sobre a mesma, indica-se [47], [63], [72].

### 3.6 Indeterminações do Método ICA

A estimação dos dados associados com a utilização do método ICA pode gerar duas indeterminações, as quais são atribuídas ao fato de desconhecer-se as fontes que produziram os sinais e a matriz de mistura,  $A$ . Estas indeterminações estão relacionadas com as amplitudes e ordens dos sinais estimados em comparação com os sinais originais [63].

Para solucionar a indeterminação da amplitude pode-se multiplicar um escalar por qualquer fonte fora de escala e dividir a linha correspondente da matriz  $A$ , sem alterar o sistema, como expresso abaixo.

$$X = \frac{1}{\alpha_i} A_{iN} \alpha_i S_i \quad (3.22)$$

Onde,  $\alpha$  é um escalar e  $i$ , a  $i$ -ésima linha da matriz  $A$

No que se refere a ordem das fontes, estas podem ser reordenadas sem prejuízo no resultado do método através de uma matriz  $P$ , conhecida como matriz de permutação, conforme indicado pela equação subsequente.

$$X = AP^{-1}PS \quad (3.23)$$

Os elementos da matriz obtida pelo produto,  $PS$ , correspondem aos elementos das fontes na ordem correta. Já o produto  $AP^{-1}$  representa outra matriz de mistura com seus elementos rearranjados de forma a garantir a igualdade da equação (3.23).

### 3.7 Sistema Elétrico e ICA

Uma vez apresentada uma síntese dos fundamentos que norteiam o processo de análise a ser empregado para fins desta pesquisa, procede-se, a seguir, a abordagem de algumas características intrínsecas dos sinais elétricos no que tange aos aspectos estatísticos, mais especificamente, a independência estatística. Ademais, é apresentado o modelo elétrico tradicionalmente utilizado em estudos de atribuições de responsabilidades, frente aos fenômenos que afetam a qualidade da energia elétrica.

#### 3.7.1 Independência Estatística

As principais condições para realizar a separação de fontes através do método ICA são: a independência estatística e a não-gaussianidade dos sinais envolvidos. Neste contexto, via de regra, destaca-se que as cargas de um sistema elétricos não são completamente independentes, visto que há uma correlação entre elas, advinda de fatores externos, como: estação do ano, clima, hora do dia, dia da semana, etc. [50].

Geralmente as variações de carga no sistema elétrico podem ser divididas em duas partes: uma componente de variação lenta (*slow varying*), relacionada a fatores externos como: temperatura, clima, estações do ano, etc.; e outra componente de variação rápida (*fast varying*), associada ao consumo instantâneo. A combinação destas duas componentes se apresenta com um resultado típico de um sinal elétrico como o indicado na Figura 3.9.

A componente rápida é estatisticamente independente devido a sua natureza estocástica, visto que as variações temporais das cargas, para o caso de amostragem de sinais elétricos são aferidas em intervalos de tempo da ordem de segundos ou minutos. Quanto as lentas, estas compreendem registros em intervalos, por exemplo, de uma hora [73]. Sendo assim, diante dos sinais elétricos monitorados, basta aplicar um filtro linear para separar as componentes em questão.

Considerando um filtro de média móvel representado por uma matriz  $M$ , os valores dos sinais filtrados serão:

$$X_{slow} = XM \quad (3.24)$$

A partir da equação geral da ICA,  $X = AS$  e, em assim sendo, a equação (3.24) pode ser expressa por:

$$X_{slow} = ASM = AS_{slow} \quad (3.25)$$

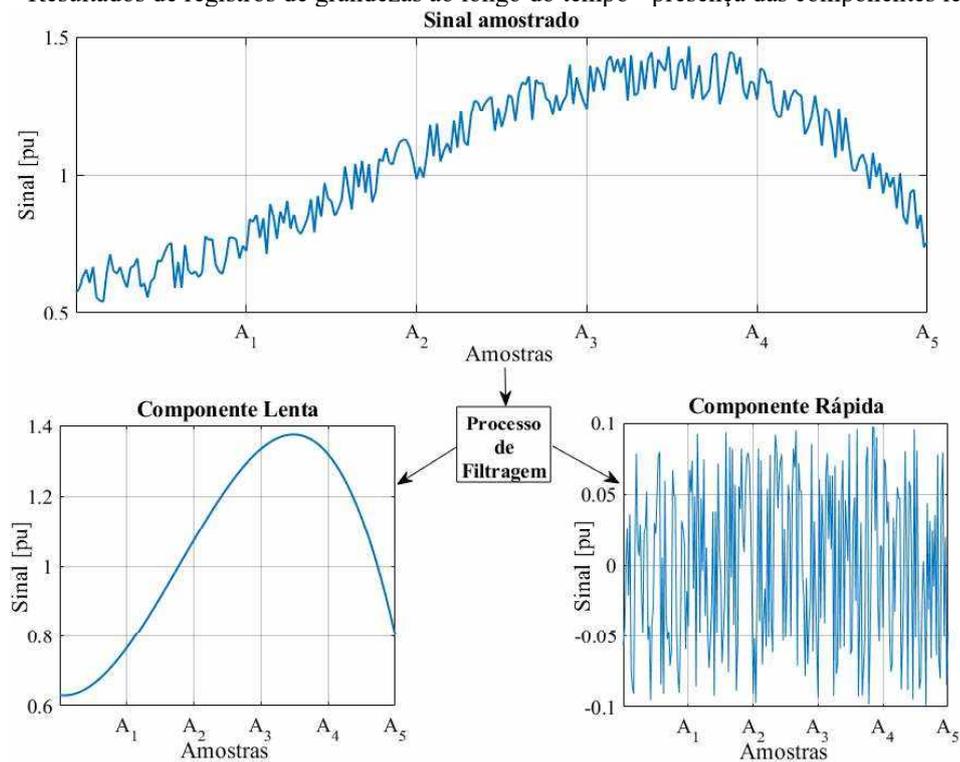
Uma vez que, o sinal aferido é constituído pelas duas componentes supramencionadas, tem-se:

$$X = X_{fast} + X_{slow} \quad (3.26)$$

$$X_{fast} = X - X_{slow} = AS - AS_{slow}$$

$$\therefore X_{fast} = AS_{fast} \quad (3.27)$$

Figura 3.9 – Resultados de registros de grandezas ao longo do tempo - presença das componentes lenta e rápida



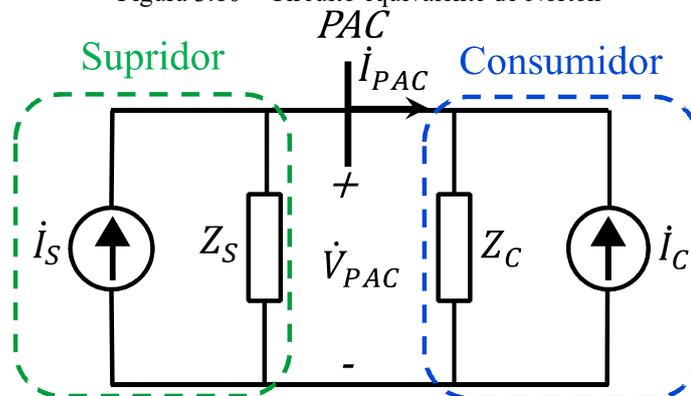
Fonte: Próprio Autor

Portanto, numa fase anterior à aplicação do método ICA para os bancos de dados advindos de registros em campo, é imprescindível que seja executada sua filtragem, a fim de obter a componente rápida, haja vista que ela apresenta as características indispensáveis para convergência do método.

### 3.7.2 Modelo Elétrico para Aplicação da ICA – Superposição

O método da superposição é amplamente utilizado na literatura, para quantificar o compartilhamento de responsabilidades pelos distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica num barramento comum de interligação de um agente supridor e um consumidor. Estas partes são, via de regra, representados por seus circuitos elétricos equivalentes de Norton, como indicado na Figura 3.10. A partir desta são realizados os equacionamentos necessários para o emprego do método ICA aos fins aqui almejados

Figura 3.10 – Circuito equivalente de Norton



Fonte: Próprio Autor

De acordo com a Figura 3.10, a tensão e corrente no PAC, poderão ser obtidas por:

$$\dot{V}_{PAC} = \frac{Z_S Z_C}{Z_S + Z_C} \dot{i}_S + \frac{Z_S Z_C}{Z_S + Z_C} \dot{i}_C \quad (3.28)$$

$$\dot{i}_{PAC} = \frac{Z_S}{Z_S + Z_C} \dot{i}_S - \frac{Z_C}{Z_S + Z_C} \dot{i}_C \quad (3.29)$$

As equações (3.28) e (3.29), representadas na forma matricial conduzem a:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{PAC} \\ \dot{i}_{PAC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_S Z_C}{Z_S + Z_C} & \frac{Z_S Z_C}{Z_S + Z_C} \\ \frac{Z_S}{Z_S + Z_C} & -\frac{Z_C}{Z_S + Z_C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_S \\ \dot{i}_C \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$P_{PAC} = Z I \quad (3.31)$$

A partir da equação (3.31) pode-se estabelecer a relação entre as matrizes desse sistema linear com as matrizes da equação (3.2), como requerido pelo método ICA.

$$\begin{array}{ccc}
P_{PAC} & Z & I \\
\downarrow & = & \downarrow \downarrow \\
X & & A S
\end{array} \tag{3.32}$$

Portanto, para aplicar o método ICA para os objetivos em pauta, basta aferir a tensão e a corrente no PAC e executar o algoritmo CICA. Assim procedendo, podem ser estimados os sinais originais e a matriz de separação, conforme estabelecido pela equação (3.33):

$$\begin{array}{ccc}
\hat{S} & W^H & X \\
\downarrow = & \downarrow & \downarrow \\
\hat{I} & U & P_{PAC}
\end{array} \tag{3.33}$$

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

Onde:  $Q$  é a matriz de branqueamento;  $W^H$  é a matriz de separação estimada e; o sobre-índice H especifica que a matriz  $W$  é Hermitiana, ou seja, é uma matriz quadrada complexa em que seus elementos são iguais aos da sua matriz transposta conjugada.

Um aspecto meritório de destaque refere-se ao fato que cada elemento da matriz  $Z$  não representa as impedâncias do supridor e do consumidor, e sim, impedâncias equivalentes provenientes da análise do circuito equivalente de Norton da Figura 3.10.

Com base na equação (3.33) a matriz  $\hat{Z}$  é invertida, resultando em:

$$\begin{aligned}
\hat{Z}^{-1} &= \begin{bmatrix} \frac{Z_S Z_C}{Z_S + Z_C} & \frac{Z_S Z_C}{Z_S + Z_C} \\ \frac{Z_S}{Z_S + Z_C} & \frac{-Z_C}{Z_S + Z_C} \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{\det(Z)} \begin{bmatrix} \frac{-Z_C}{Z_S + Z_C} & -\frac{Z_S Z_C}{Z_S + Z_C} \\ \frac{-Z_S}{Z_S + Z_C} & \frac{Z_S Z_C}{Z_S + Z_C} \end{bmatrix} \\
\hat{Z}^{-1} &= \left( \frac{(Z_S + Z_C)^2}{-Z_S^2 Z_C - Z_C^2 Z_S} \right) \begin{bmatrix} \frac{-Z_C}{Z_S + Z_C} & -\frac{Z_S Z_C}{Z_S + Z_C} \\ \frac{-Z_S}{Z_S + Z_C} & \frac{Z_S Z_C}{Z_S + Z_C} \end{bmatrix} \\
\hat{Z}^{-1} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_S} & 1 \\ \frac{1}{Z_C} & -1 \end{bmatrix} \tag{3.34}
\end{aligned}$$

Portanto:

$$\hat{Z}^{-1} = W^H Q = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & u_{22} \end{bmatrix}$$

Onde:  $u_{ij}$  são os elementos da matriz  $\hat{Z}^{-1}$ .

A ambiguidade do método ICA, referente a amplitude, pode ocorrer. Para mitigá-las, pode-se utilizar os fatores  $k_S$  e  $k_C$ , em conjunto com as correntes advindas do supridor e do consumidor, como expresso a seguir:

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_S \\ \hat{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_S \dot{I}_S \\ k_C \dot{I}_C \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Substituindo a equação (3.35) em (3.33), tem-se:

$$\begin{aligned} \hat{I} \quad \hat{Z}^{-1} \quad P_{PAC} \\ \downarrow \quad \quad \quad \downarrow \quad \quad \downarrow \\ \begin{bmatrix} k_S \dot{I}_S \\ k_C \dot{I}_C \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & u_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{PAC} \\ \dot{I}_{PAC} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \dot{I}_S \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{u_{11}}{k_S} & \frac{u_{12}}{k_S} \\ \frac{u_{21}}{k_C} & \frac{u_{22}}{k_C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{PAC} \\ \dot{I}_{PAC} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.36)$$

Das equações (3.36) e (3.34):

$$1 = \frac{u_{12}}{k_S} \rightarrow k_S = u_{12} \quad (3.37)$$

$$\frac{1}{Z_S} = \frac{u_{11}}{k_S} \rightarrow Z_S = \frac{k_S}{u_{11}} \quad (3.38)$$

$$-1 = \frac{u_{22}}{k_C} \rightarrow k_C = -u_{22} \quad (3.39)$$

$$\frac{1}{Z_C} = \frac{u_{21}}{k_C} \rightarrow Z_C = \frac{k_C}{u_{21}} \quad (3.40)$$

No que tange a indeterminação proveniente da ordem em que as correntes  $\hat{I}_S$  e  $\hat{I}_C$  apresentam-se na matriz  $\hat{I}$ , pode-se adotar um procedimento baseado no sinal da parte real de  $Z_S$  visando a identificação de suas consistências. Para tanto, adota-se a premissa de que a parte resistiva da impedância do supridor é sempre positiva, ou seja,  $Real(Z_S) > 0$ , para a ordem correta [49]. Assim, assume-se arbitrariamente uma ordem para  $\hat{I}_S$  e  $\hat{I}_C$  e, caso a parte real da equação (3.38) seja maior que zero, a ordem atribuída é a correta, caso contrário, significa que a ordem está incorreta e a inversão de posição da correntes é necessária para sanar a indeterminação.

Com o propósito de ilustrar, didaticamente, as questões supra tratadas, utiliza-se, na sequência, o sistema elétrico simplificado já indicado na Figura 3.10., com os parâmetros e grandezas associadas com as impedâncias e correntes ( $Z_S, Z_C, \hat{I}_S$  e  $\hat{I}_C$ ) definidos como abaixo. Vale destacar que o uso do método ICA encontra-se direcionado para as grandezas aferidas no PAC e a estimação dos valores originais atribuídos às impedâncias e correntes.

Os parâmetros adotados para as impedâncias são:

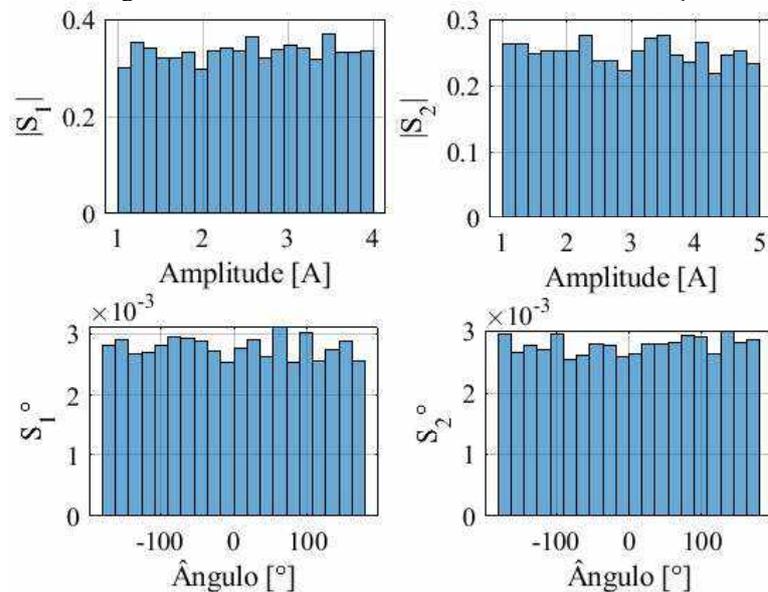
$$Z_S = 1 + j3,5 \Omega \text{ e } Z_C = 3 + j7 \Omega$$

Desta forma, a equação (3.30) conduz a matriz  $Z$  correspondente, como a seguir:

$$Z = \begin{bmatrix} 0,77 + j2,34 & 0,77 + j2,34 \\ 0,32 + j0,028 & -0,68 + j0,028 \end{bmatrix} \Omega$$

Quanto as amplitudes das correntes  $\hat{I}_S$  e  $\hat{I}_C$ , seus valores se apresentam na forma de bancos de dados advindos de medições hipotéticas, as quais geram as distribuições de probabilidades uniformes ( $1 \leq x_S \leq 4$ ) e ( $1 \leq x_C \leq 5$ ) indicadas nos histogramas da Figura 3.11. Os ângulos também são formados por FDP uniformes com intervalo de  $-\pi \leq \phi \leq \pi$ .

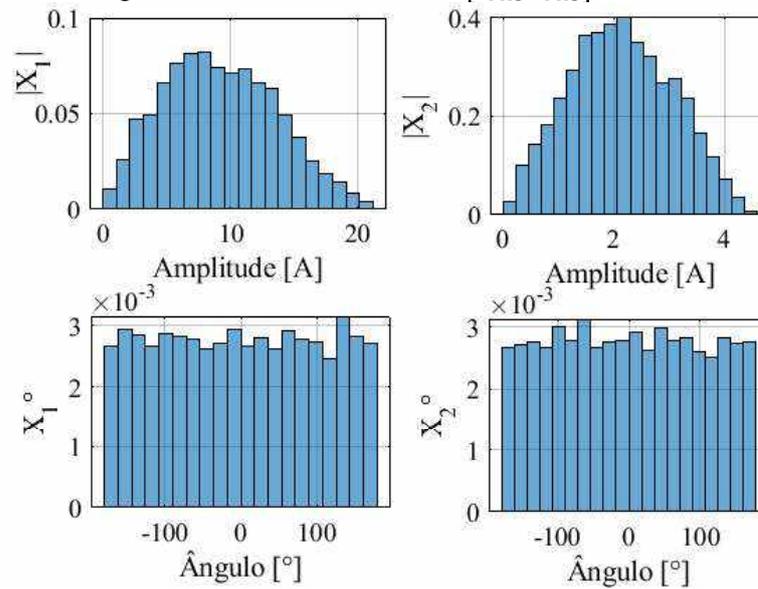
Figura 3.11 – Sinais originais criados com FDP uniformes – banco de medições das correntes  $\hat{I}_S$  e  $\hat{I}_C$



Fonte: Próprio Autor

De posse dos valores de  $I$  e  $Z$ , os sinais de tensão e corrente no PAC são obtidos em consonância com a equação (3.30), originando os histogramas da Figura 3.12.

Figura 3.12 – Sinais aferidos  $X = [\dot{V}_{PAC}, \dot{I}_{PAC}]^T$  no PAC



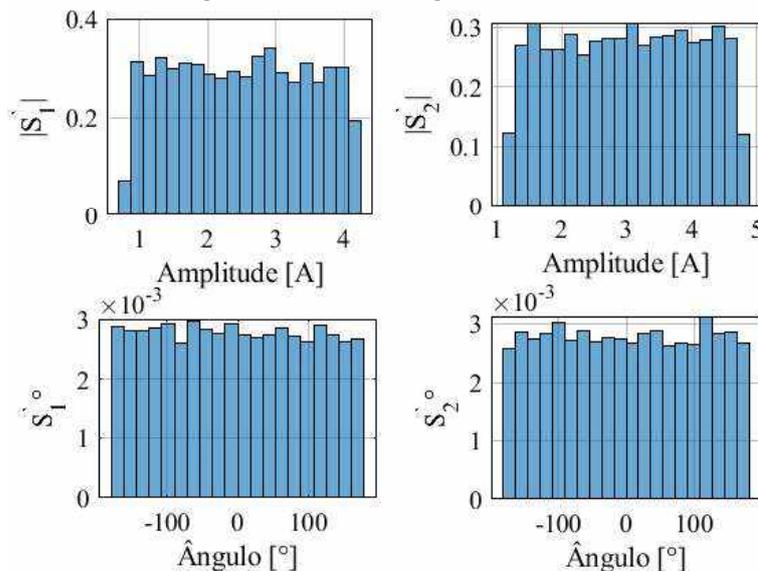
Fonte: Próprio Autor

Em consonância com as informações apresentadas, ao aplicar a matriz dos sinais do PAC ( $X = [\dot{V}_{PAC}, \dot{I}_{PAC}]^T$ ) no algoritmo que realizará a CICA, obtém-se os resultados indicados nas matrizes subsequentes e na Figura 3.13.

$$\hat{Z} = \begin{bmatrix} 0,78 + j2,35 & 0,78 + j2,35 \\ 0,33 + j0,027 & -0,67 + j0,027 \end{bmatrix} \Omega$$

$$\hat{Z}_S = 1,01 + j3,52 \Omega \quad e \quad \hat{Z}_C = 2,93 + j6,93 \Omega$$

Figura 3.13 – Sinais originais estimados



Fonte: Próprio Autor

Os resultados obtidos evidenciam, com clareza, a exatidão oferecida pelo emprego do método ICA quanto a estimação dos sinais originais (fontes de corrente), tomando por base o conjunto de dados conhecidos. Desempenho similar pode ser também constatado quanto a

determinação dos elementos que os misturaram,  $\hat{A} = \hat{Z}$ . No que se refere os valores obtidos para as impedâncias, ao compará-las com os valores adotados, o erro máximo foi de 2,3% para a parte resistiva de  $Z_C$  e até 1% para os demais elementos.

### 3.8 Considerações Finais

Nesse capítulo foram abordadas as ferramentas basilares necessárias para a implementação do método ICA, contemplando as propriedades dos métodos PCA, SVD e branqueamento de dados, utilizados para otimizar a preparação de dados.

Além disso, foram apresentadas as propriedades, formulações matemáticas, premissas e restrições do método ICA, tal como a técnica utilizada para realizar a separação dos sinais que outrora foram misturados de maneira desconhecida.

Expôs-se também, as indeterminações inerentes ao método ICA e a sua aplicabilidade em sistemas elétricos, ressaltando a necessidade de realizar a decomposição das componentes rápidas e lentas dos sinais elétricos para garantir a sua independência estatística.

Por fim, foi realizado uma primeira etapa, ainda bastante embrionária e simplificada, do desempenho da metodologia a ser utilizada para fins do compartilhamento das responsabilidades a ser explorado em detalhes nos desenvolvimentos subsequentes. Não obstante ainda não se tratar do tema central desta pesquisa, qual seja, o compartilhamento das responsabilidades de fenômenos associados com os desequilíbrios de tensão, o nível de aderência obtido quanto a reprodução dos sinais adotados como premissas, assim como os parâmetros representativos da rede elétrica utilizada, se mostraram altamente promissores.

# 4

## **APLICAÇÃO COMPUTACIONAL DO MÉTODO ICA PARA COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES DOS DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO**

### **4.1 Introdução**

Este capítulo destina-se a aplicação e avaliação do desempenho do método ICA para fins da atribuição de responsabilidades dos desequilíbrios de tensão junto ao barramento de conexão (PAC) entre um agente supridor e outro o consumidor.

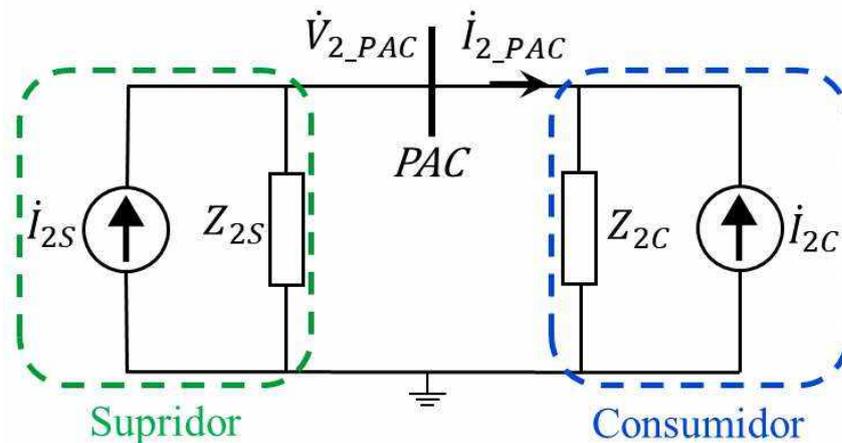
A partir das componentes simétricas das tensões e correntes trifásicas aferidas no PAC, as quais, em termos práticos são obtidas através de uma monitoração contínua de um determinado barramento de um sistema elétrico ao longo de um período típico estipulado pelos protocolos de medição da qualidade da energia elétrica, é gerado um banco de dados constituídos por informações temporais sobre o desempenho da grandeza em foco, qual seja os indicadores dos níveis de desequilíbrios manifestados na rede elétrica.

Uma vez disponibilizado um conjunto de informações, caracterizando um banco representativo de diversas condições operacionais impostas pela agência supridora e a adversidade dos carregamentos impostos pela unidade consumidora, são traçados os perfis dos desequilíbrios de tensão, contemplando as variações rápidas e lentas das grandezas em foco. Estes dados são então empregados para os fins estabelecidos como propósito desta tese de doutorado, empregando-se, para tanto, da ferramenta de análise sintetizada no capítulo anterior.

## 4.2 Fundamentos da Análise do Compartilhamento de Responsabilidades via Complex-ICA (CICA)

Em consonância com os objetivos definidos para o método de análise ao tema a ser aplicado para o compartilhamento de responsabilidade entre agentes, no que tange ao indicador de qualidade – Desequilíbrios de Tensão, o princípio da superposição de efeitos se apresenta como base física para os estudos. Em assim sendo, como já considerado anteriormente, as tratativas matemáticas a serem desenvolvidas encontram-se embasadas no circuito equivalente de Norton indicado na Figura 4.1, ressaltando-se que tal arranjo representa tão apenas as grandezas associadas com a sequência negativa para as tensões, correntes e impedâncias.

Figura 4.1 – Circuito equivalente de Norton do supridor e consumidor - sequência negativa



Fonte: Próprio Autor

Para o circuito supra estabelecido, a correlação entre as grandezas explicitadas, as quais já foram alvo de considerações anteriores, pode ser expressa através da relação a seguir:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{2-PAC} \\ \dot{I}_{2-PAC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_{2S}Z_{2C}}{Z_{2S} + Z_{2C}} & \frac{Z_{2S}Z_{2C}}{Z_{2S} + Z_{2C}} \\ \frac{Z_{2S}}{Z_{2S} + Z_{2C}} & \frac{-Z_{2C}}{Z_{2S} + Z_{2C}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{2S} \\ \dot{I}_{2C} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Tomando por base o fato que o algoritmo é alimentado com os sinais amostrados, aqui indicados por:  $[\dot{V}_{2-PAC}, \dot{I}_{2-PAC}]^T$  e oferece os valores estimados dos elementos independentes e da matriz de mistura, representados por:  $\hat{I}_{2S}, \hat{I}_{2C}$  e  $W^H$ , respectivamente, apresenta-se, na sequência, as equações (4.2) e (4.3). Estas retratam as relações entre essas grandezas, fornecendo as informações necessárias para a determinação das expressões que permitirão a estimação das impedâncias requeridas pela matriz de transformação.

$$\hat{\mathbf{I}} = \mathbf{U} \mathbf{P}_{PAC} \quad (4.2)$$

$$\mathbf{U} = \mathbf{W}^H \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & u_{22} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Onde:

$\mathbf{P}_{PAC}$  – matriz com os valores da tensão e corrente de sequência negativa do PAC de todas as amostras;

$\mathbf{W}^H$  – matriz com os coeficientes da matriz de mistura estimados;

$\hat{\mathbf{I}}$  – matriz com as correntes de sequência negativa estimadas do supridor e do consumidor;

$\mathbf{U}$  – matriz inversa da matriz mistura estimada;

$\mathbf{Q}$  – matriz de branqueamento.

Portanto, os valores estimados para as impedâncias, correntes do supridor e do consumidor são estabelecidas pelas expressões a seguir, as quais são advindas das formulações já identificadas por (3.35) a (3.40) e a equação (4.2):

$$Z_{2S} = \frac{u_{12}}{u_{11}} \quad (4.4)$$

$$Z_{2C} = -\frac{u_{22}}{u_{21}} \quad (4.5)$$

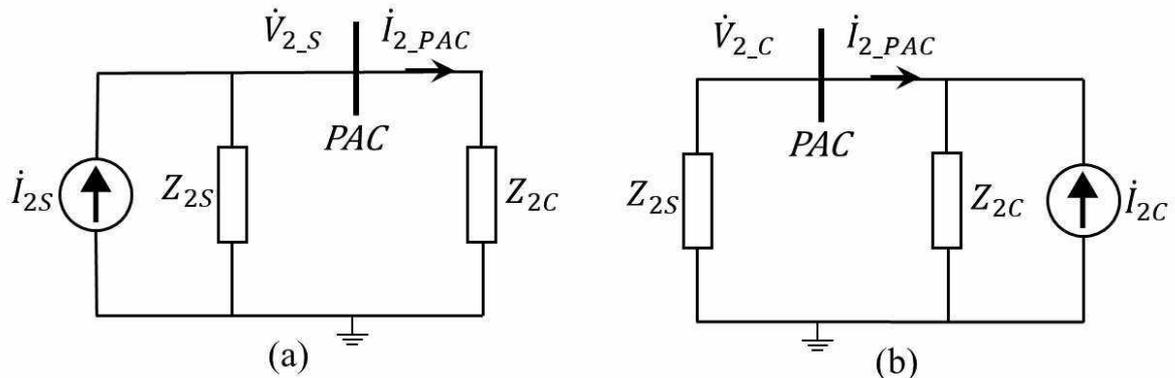
$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{I}}_{2S} \\ \hat{\mathbf{I}}_{2C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\hat{\mathbf{I}}_{2S}}{u_{12}} \\ \frac{\hat{\mathbf{I}}_{2C}}{-u_{22}} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Em atenção aos desenvolvimentos conduzidos, as correntes obtidas pelo método CICA e, conseqüentemente, as tensões que representam o comportamento do supridor e do consumidor, são vetores com  $N$  elementos, a depender da dimensão da amostra analisada. Portanto, os parâmetros em negrito representam o conjunto de valores destas grandezas.

Visto que os limites estabelecidos para o indicador de qualidade da energia elétrica são, via de regra, regulamentados em termos da grandeza tensão, as variáveis a serem focadas nos desenvolvimentos das atribuições de responsabilidade aqui propostas, se apresentam constituídas pelas respectivas grandezas de sequência negativa do supridor e do consumidor.

Assim, suas expressões são derivadas do circuito apresentado na Figura 4.1, e visam contemplar os princípios físicos que norteiam a metodologia da superposição. Assim sendo, as contribuições individuais dos dois agentes podem ser obtidas através dos circuitos equivalentes ilustrados na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Circuitos equivalentes para a determinação das contribuições do supridor (a) e consumidor (b) - superposição de efeitos



Fonte: Próprio Autor

As parcelas individuais e total das tensões de sequência negativa são:

$$\dot{V}_{2S} = \frac{Z_S Z_C}{Z_S + Z_C} \dot{I}_{2S} \quad (4.7)$$

$$\dot{V}_{2C} = \frac{Z_S Z_C}{Z_S + Z_C} \dot{I}_{2C} \quad (4.8)$$

$$\dot{V}_{2_{total}} = \dot{V}_{2_{PAC}} \quad (4.9)$$

Portanto, os indicadores do percentual de responsabilidades frente aos desequilíbrios de tensão do supridor e do consumidor podem ser quantificados como a seguir:

$$Resp_S\% = \frac{|\dot{V}_{2S}|}{|\dot{V}_{2_{PAC}}|} \cos(\theta_{\dot{V}_{2S}} - \theta_{\dot{V}_{2_{PAC}}}) 100 \quad (4.10)$$

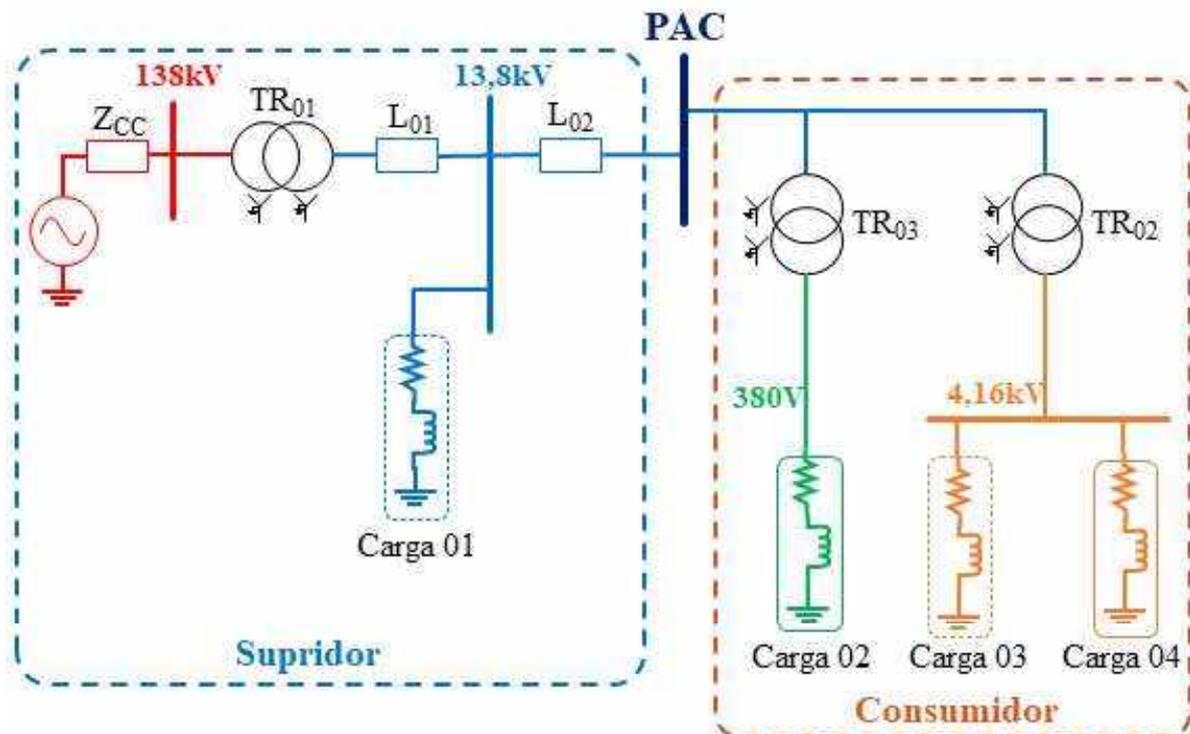
$$Resp_C\% = \frac{|\dot{V}_{2C}|}{|\dot{V}_{2_{PAC}}|} \cos(\theta_{\dot{V}_{2C}} - \theta_{\dot{V}_{2_{PAC}}}) 100 \quad (4.11)$$

### 4.3 Estudo de Caso

O arranjo elétrico utilizado para os estudos propostos nesta seção é o mesmo apresentado no Capítulo 2, diferindo pela ausência do capacitor monofásico e a inserção de um fator multiplicador  $k$ , a alguns parâmetros do sistema conforme a Tabela 4.1. Os parâmetros são

autoexplicativos e estão em conformidade com os valores apresentados em capítulo anterior, exceto a quantidade  $k$ . Esta magnitude destina-se a controlar o grau de desequilíbrio produzido pela concessionária e pelo consumidor. Ao usar  $k = 1$ , isso implica na inserção de carga nominal. Para representar perfis típicos de fatores de desequilíbrio de tensão obtidos através da medição, são utilizadas variações de  $k$  para obter maior ou menor gravidade do desequilíbrio de tensão. Além disso, com o intuito de facilitar a compreensão sobre os procedimentos adotados, o sistema é indicado novamente na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Diagrama unifilar do sistema elétrico utilizado



Fonte: Próprio Autor

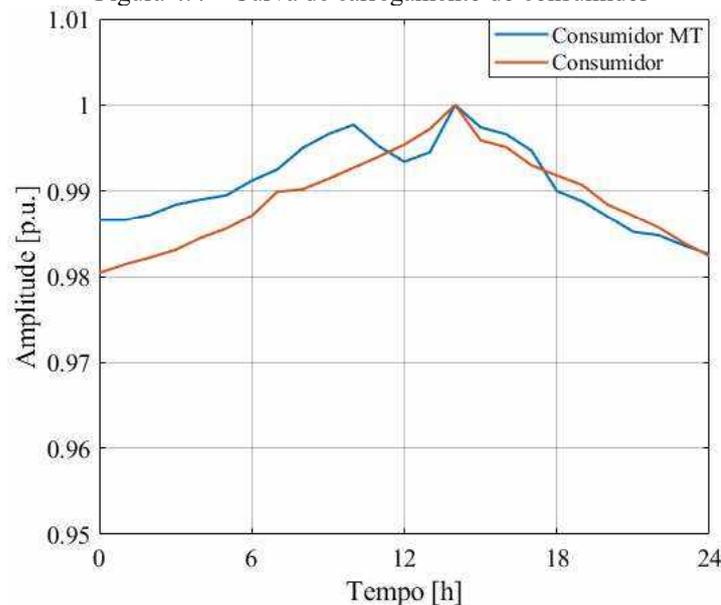
Em atendimento aos princípios estabelecidos pelo método em análise, visando uma representação típica àquelas advindas de medições em campo, foram utilizadas curvas de carregamento para o consumidor comercial em questão e a carga em média tensão (Carga 01), como ilustrado na Figura 4.4. Estas curvas, representam os resultados de monitorações conduzidas ao longo de um dia. Tal desempenho de demanda, como já mencionado, se apresenta como uma entrada requerida pelo método CICA para realizar a separação dos sinais. Os valores em p.u. são referenciados à potência nominal dos consumidores, informados na sequência.

Tabela 4.1 – Parâmetros do Sistema Elétrico

Componentes	Parâmetros
Sistema supridor	$V_{3\phi} = 138kV$ ; $f = 60Hz$ ; $S_{CC} = 800MVA$ ; $X/R = 20$
Linhas de Distribuição L <sub>01</sub> e L <sub>02</sub>	$Z_{Cabo} = 0,045 + j0,32 \left[ \frac{\Omega}{km} \right]$ ; distância L <sub>01</sub> = 0,3km; distância L <sub>02</sub> = 0,2km
Transformador TR <sub>01</sub>	$S = 50MVA$ ; $V_{pri.} = 138kV / V_{sec.} = 13,8kV$ ; $Z\% = 6\%$
Transformador TR <sub>02</sub>	$S = 10MVA$ ; $V_{pri.} = 13.8kV / V_{sec.} = 4,16kV$ ; $Z\% = 7\%$
Transformador TR <sub>03</sub>	$S = 500kVA$ ; $V_{pri.} = 13.8kV / V_{sec.} = 0,38kV$ ; $Z\% = 6\%$
Carga 01	Se balanceado: $S_A = S_B = S_C = k(4,7 + j1,7)MVA$ ; $S_{3\phi} = k(15 \angle 20^\circ)MVA$ Se desequilibrado: $S_A = k(7,7 + j1,9)MVA$ ; $S_B = k(6,8 + j3,0)MVA$ ; $S_C = k(0,6 + j0,2)MVA$ ; $\rightarrow S_{3\phi} = k(15 \angle 20^\circ)MVA$
Carga 02	Equilibrado: $S_{3\phi} = k(0,5 + j0,2)MVA = k(0,53 \angle 22^\circ)MVA$
Carga 03	Se equilibrado: $S_A = S_B = S_C = k(2,2 + j0,8)MVA$ $S_{3\phi} = k(7,0 \angle 19^\circ)MVA$ Se desequilibrado: $S_A = k(3,3 + j0,8)MVA$ ; $S_B = k(3,7 + j0,6)MVA$ ; $S_C = k(0,3 + j1,4)MVA$ ; $\rightarrow S_{3\phi} = k(7,8 \angle 21^\circ)MVA$
Carga 04	Equilibrado: $S_{3\phi} = k(1,9 + j0,7)MVA = k(2,0 \angle 20^\circ)MVA$

Fonte: Próprio Autor

Figura 4.4 – Curva de carregamento do consumidor

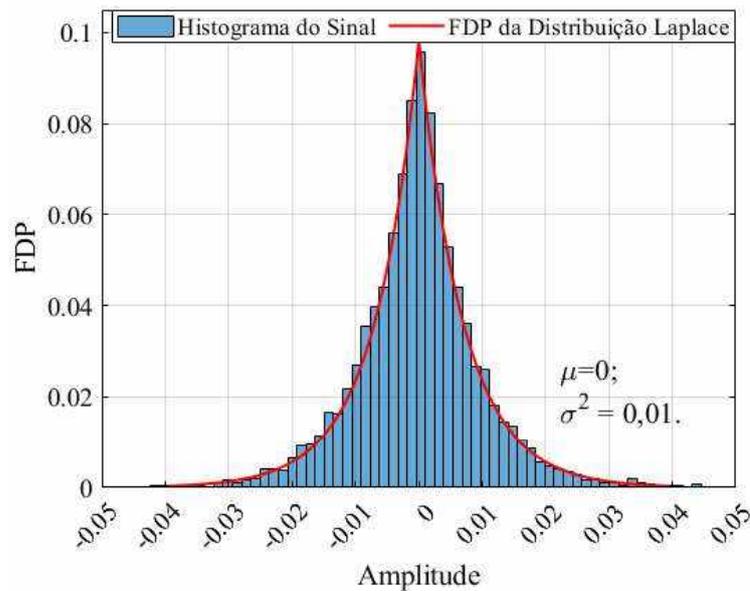


Fonte: Próprio Autor

Novamente, em função dos requisitos impostos pelo processo de análise, informações associadas com as variações lentas e rápidas das grandezas em foco se fazem necessárias. Para

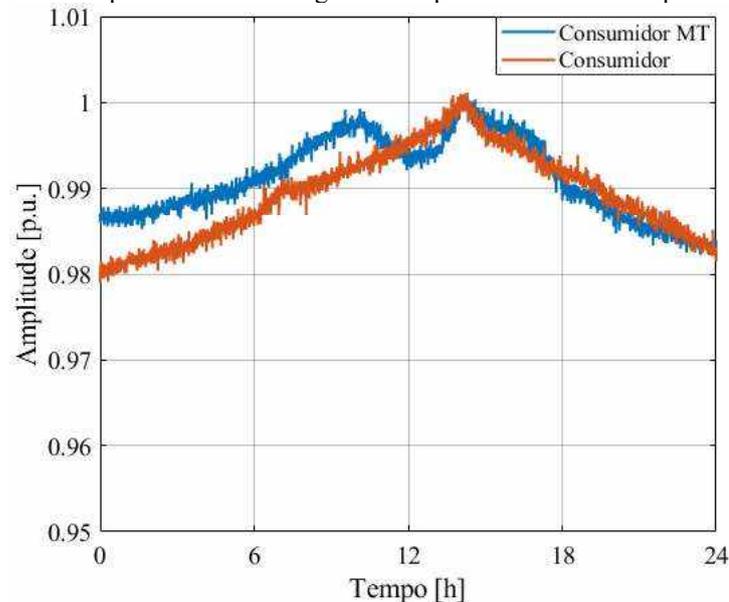
tanto, combina-se a distribuição de Laplace, com média zero e variância de 0,01 apresentada na Figura 4.5, com a curva de demanda da Figura 4.4 a fim de estabelecer o sinal completo, envolvendo ambas as componentes supracitadas. O resultado é apresentado na Figura 4.6 conforme [49], [64].

Figura 4.5 – Histograma e FDP de uma distribuição de Laplace



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.6 – Curvas de carregamento com as variações de consumo instantâneas adotada como referência para os estudos de desempenho da metodologia do compartilhamento das responsabilidades



Fonte: Próprio Autor

Para os estudos investigativos vale pontuar que os mesmos foram conduzidos através de três condições operativas, as quais implicam em três perfis para os fatores de desequilíbrio. Estes foram adotados de forma hipotética e com um desempenho compatível com a

representação do indicador de assimetria tais que seus valores viessem a apresentar violações dos níveis preconizados pelos documentos normativos. Assim sendo, as situações estabelecidas para os estudos são:

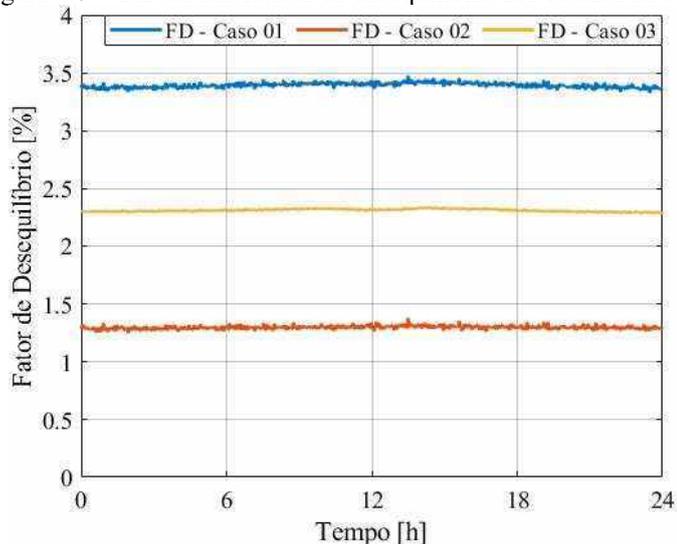
Caso 01: Supridor e consumidor desequilibrados;

Caso 02: Supridor equilibrado e consumidor desequilibrado;

Caso 03: Supridor desequilibrado e consumidor equilibrado.

A Figura 4.7 fornece os fatores de desequilíbrio para os três casos, os quais, embora adotados, se apresentam com características de variação tais a contemplar uma correlação com o desempenho da demanda registrada.

Figura 4.7 – Curvas dos fatores de desequilíbrio dos estudos de caso



Fonte: Próprio Autor

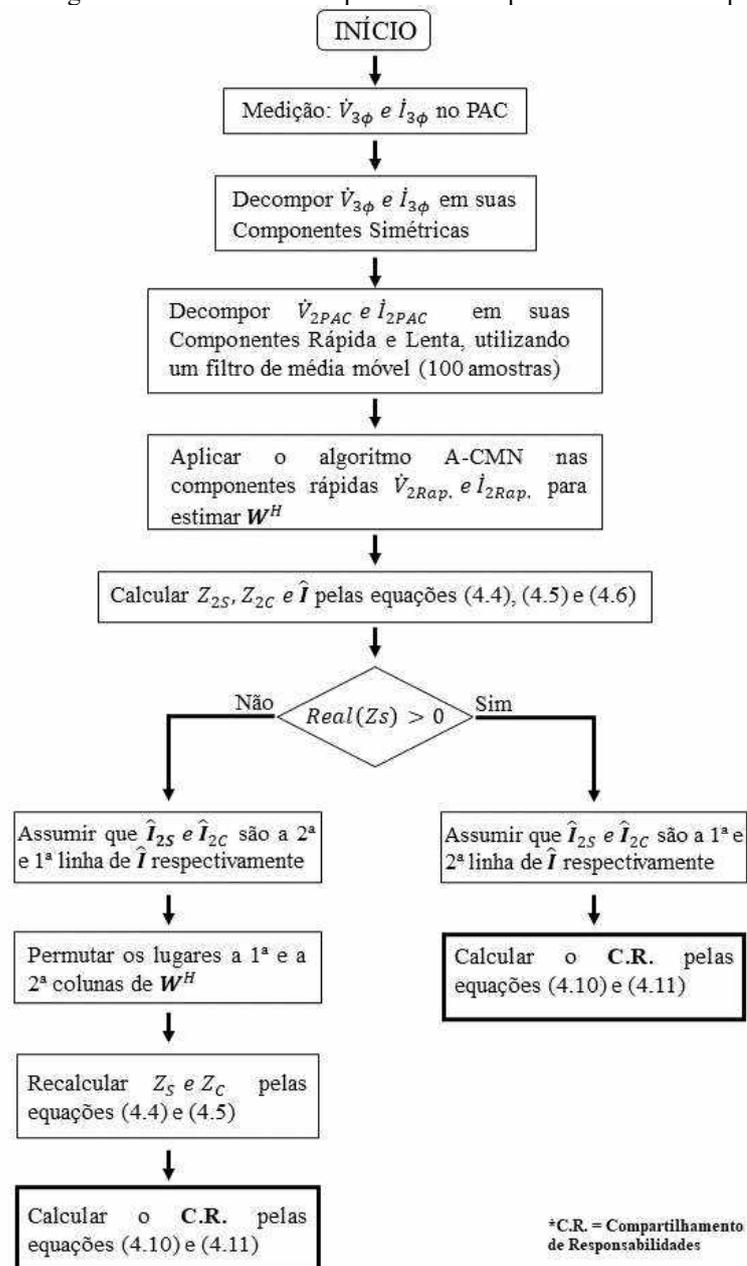
O desempenho expresso para os fatores de desequilíbrio evidenciam, com clareza, que as condições de operações do sistema elétrico, diante dos níveis de desequilíbrios impostos para os casos, determinam, para os Casos 1 e 3, fatores de desequilíbrio, como já mencionado, em proporções acima dos valores definidos em [1], [16]–[18]. Para o caso em que o consumidor apresenta características desequilibradas (Caso 2), o nível de desequilíbrio proveniente do supridor impõe um percentual pouco acima de 1%.

Tendo em vista os valores encontrados para os indicadores de qualidade da energia para duas situações impostas para a operação, é de se entender que, objetivando o atendimento aos padrões de qualidade requeridos, medidas mitigatórias se fazem necessárias. Para tanto haverá investimentos financeiros que podem ser expressivos e a quantificação das contribuições de cada agente, visando, dentre outros fatores, uma distribuição dos gastos, de forma equânime e

justa, determina a busca das parcelas de responsabilidade dos agentes envolvidos. Neste cenário, como já dito, o uso do método CICA, proposto neste trabalho, se apresenta como uma estratégia não invasiva para o atendimento a tais premissas.

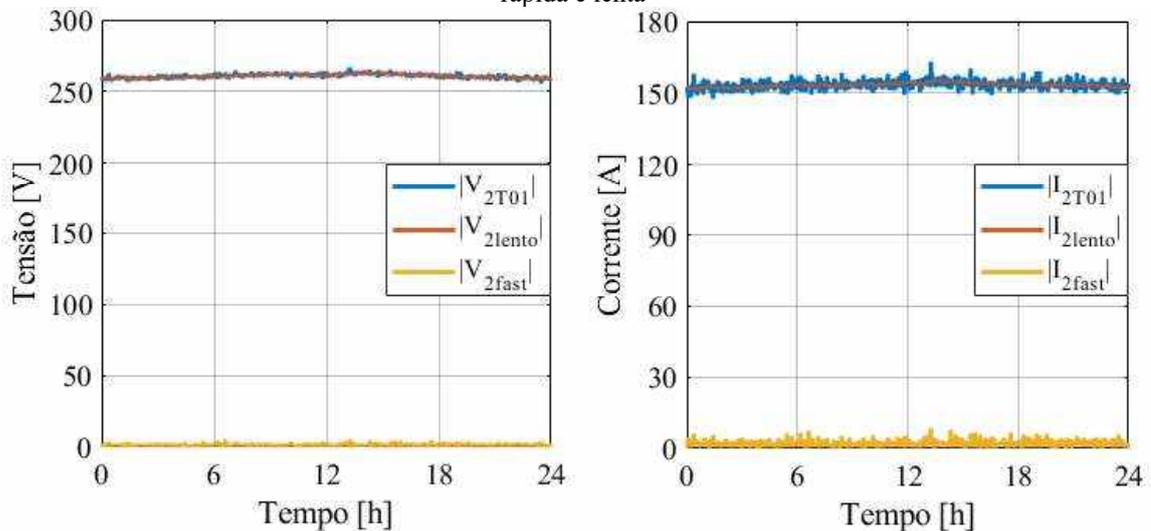
Nesta perspectiva, a Figura 4.8 sintetiza, através de um fluxograma, as etapas a serem realizadas para os fins ora postos, nas quais foram implementadas no programa Matlab/Simulink. O mesmo esclarece as diversas fases do procedimento, desde a aferição dos sinais elétricos até a obtenção dos resultados associados com o compartilhamento da responsabilidade entre as partes.

Figura 4.8 – Fluxograma do método CICA aplicado ao compartilhamento de responsabilidades



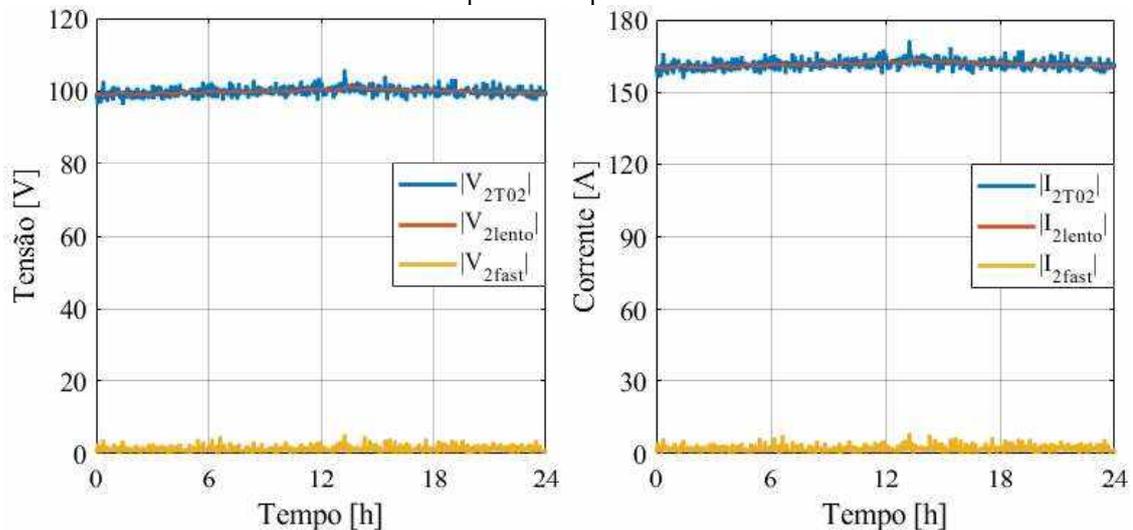
Em conformidade com as etapas expostas no fluxograma, os sinais de sequência negativa de tensão e corrente do PAC foram então traduzidos na forma das componentes: rápida e lenta; conforme estabelecido pelo método CICA. Os resultados deste procedimento de decomposição se apresentam indicados nas Figuras 4.9 a 4.11, as quais são indicativas das magnitudes das grandezas ora referidas. Como se constata, para cada um dos casos considerados nos estudos, os gráficos traçados indicam os perfis, ao longo do tempo, das tensões e respectivas correntes, advindas do banco de dados estabelecido para os propósitos desta pesquisa. Cabe ressaltar que, por se tratar de condições de operação distintas, não se tem o intuito de comparar as amplitudes dos sinais apresentados nas figuras citadas e sim, apresentar as componentes que compõem os sinais amostrados.

Figura 4.9 – Caso 01: decomposição dos sinais de tensão e corrente de sequência negativa em suas componentes rápida e lenta



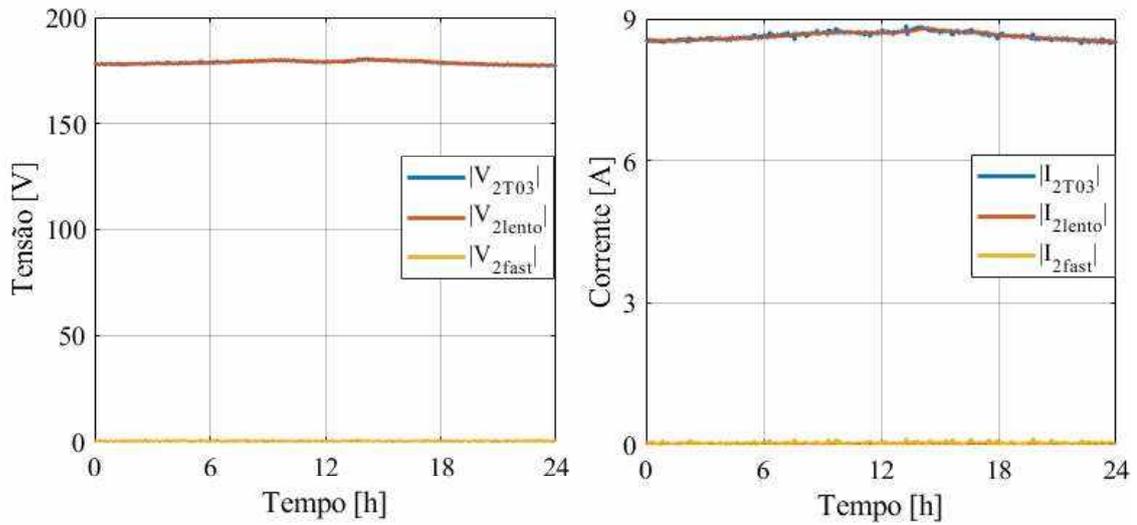
Fonte: Próprio Autor

Figura 4.10 – Caso 02: decomposição dos sinais de tensão e corrente de sequência negativa em suas componentes rápida e lenta



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.11 – Caso 03: decomposição dos sinais de tensão e corrente de sequência negativa em suas componentes rápida e lenta

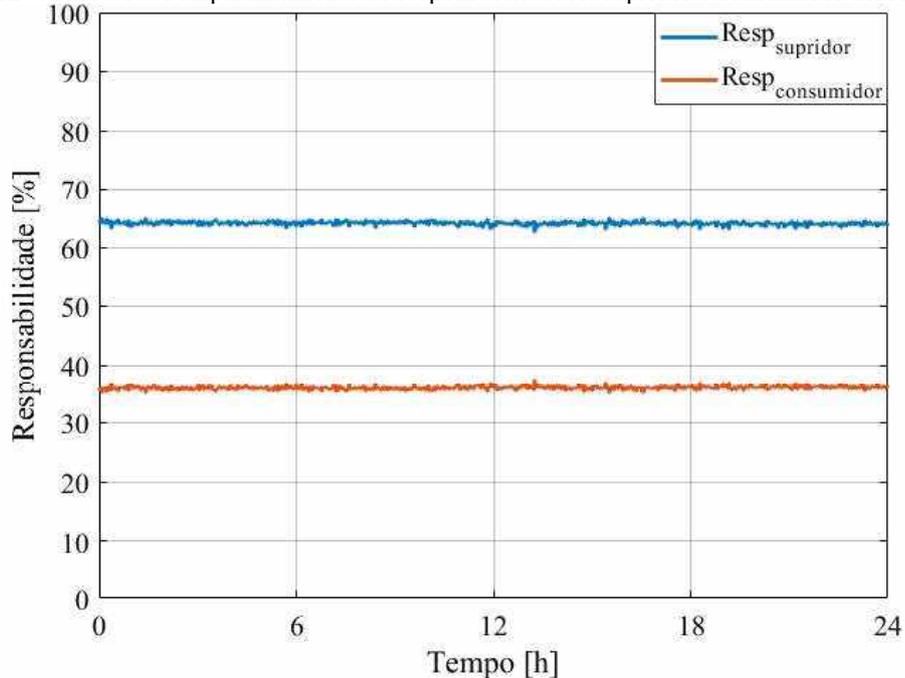


Fonte: Próprio Autor

É importante ressaltar que somente as componentes rápidas são aplicadas no algoritmo, pelo fato de serem estatisticamente independentes. As componentes lentas são empregadas, ao final do processo de análise, para a reconstituição dos sinais de tensão e corrente.

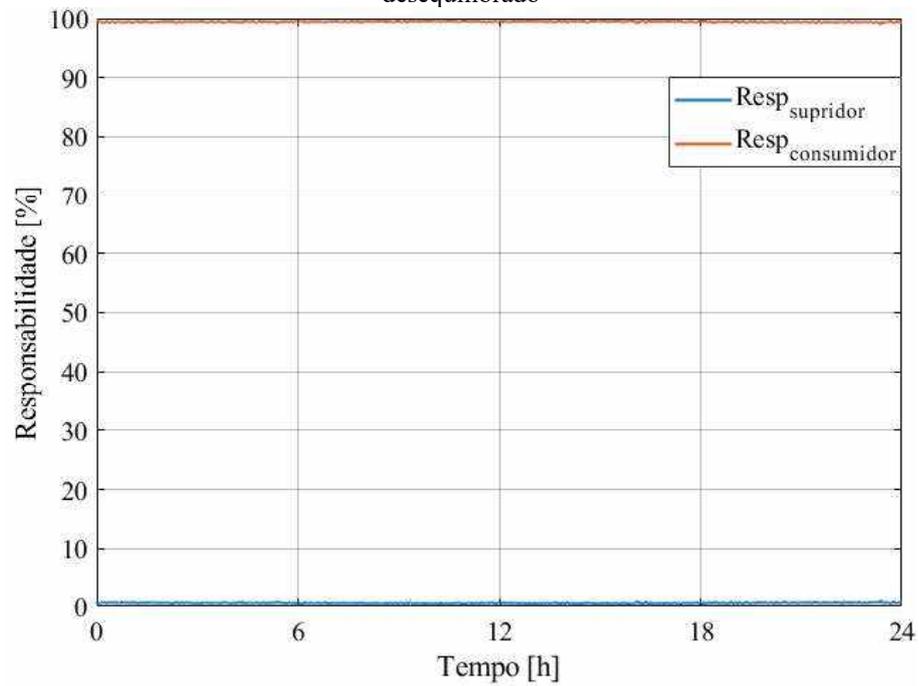
Dessa forma, a metodologia estabelecida conduz, nos termos estabelecidos, aos resultados expressos nas Figuras 4.12 a 4.15, associadas, respectivamente, aos denominados Casos 1,2 e 3.

Figura 4.12 – Caso 01 - Compartilhamento de responsabilidades: supridor e consumidor desequilibrados



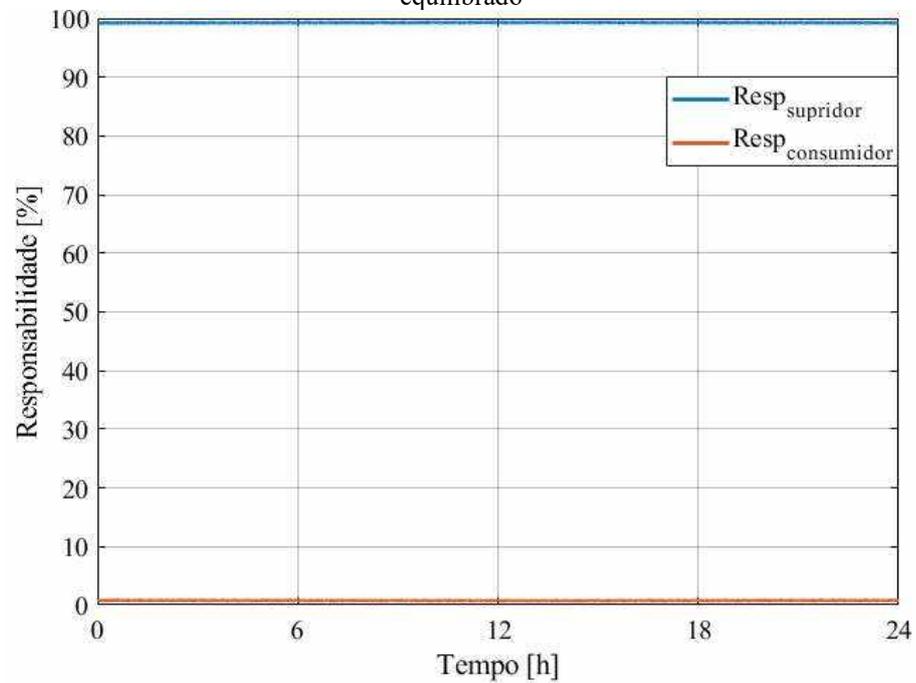
Fonte: Próprio Autor

Figura 4.13 – Caso 02 - Compartilhamento de responsabilidades: supridor equilibrado e consumidor desequilibrado



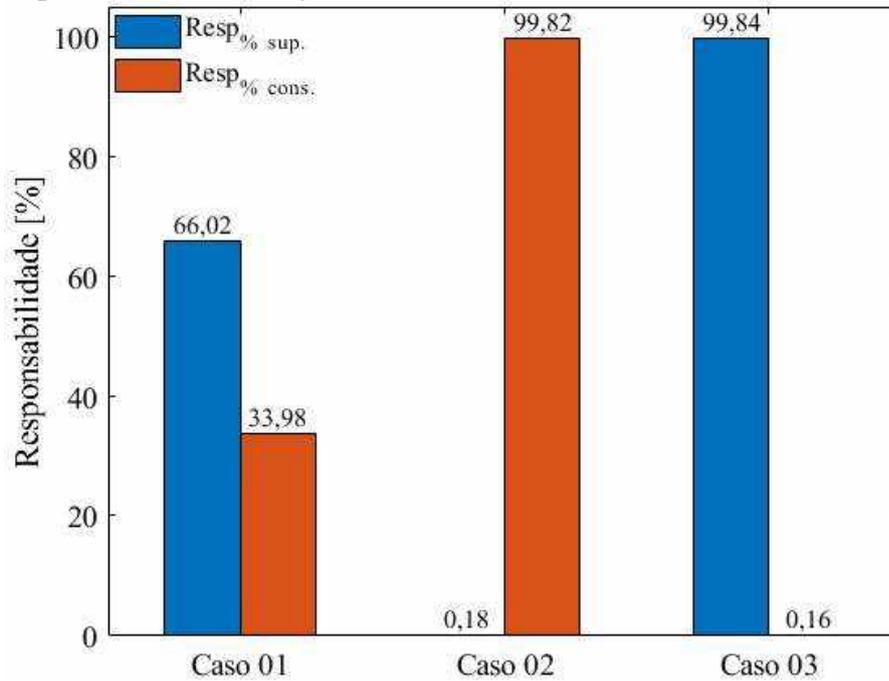
Fonte: Próprio Autor

Figura 4.14 – Caso 03 - Compartilhamento de responsabilidades: supridor desequilibrado e consumidor equilibrado



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.15 – Análise comparativa dos resultados obtidos com CICA nos três casos



Sendo o primeiro caso relacionado com a condição em que ambos os agentes se apresentam como fontes geradoras de desequilíbrios, a contribuição proveniente do consumidor apontada pelo método, está compreendida, ao longo do período de amostragem, com valor médio de 33,98%. Quanto ao supridor, este contribui com valor médio igual a 66,02%. Dessa maneira, pode-se considerar que os resultados estão condizentes com a realidade, uma vez que, o método atribuiu a parcela majoritária de responsabilidade ao supridor, sendo este, de fato, o agente que apresenta maior desequilíbrio em sua operação, conforme indicado na Figura 4.7.

Para o segundo caso, em que consumidor está desequilibrado e o supridor equilibrado, o método determinou com acurácia que, durante todo o período de análise, o consumidor é aproximadamente 100% responsável pelo desequilíbrio de tensão no barramento, como esperado.

Seguindo a análise, o caso 03, com o supridor desequilibrado e o consumidor equilibrado, o procedimento determinou novamente com exatidão que a parcela de responsabilidade imputada ao supridor equivale a aproximadamente 100%.

Neste contexto, pode-se afirmar que os resultados alcançados com a metodologia são satisfatórios e condizentes com as condições operativas impostas nos estudos apresentados. Assim, conclui-se que os resultados obtidos pela aplicação da metodologia proposta, mostra um desempenho promissor aos fins a que se destina, ou seja, o compartilhamento das

responsabilidades sobre o fenômeno resultante e manifestado na forma de desequilíbrios das tensões junto ao um determinado PAC.

#### **4.4 Conclusões**

As tratativas realizadas neste capítulo foram imbuídas do propósito aplicativo da metodologia de análise para fins do compartilhamento das responsabilidades entre dois agentes, utilizando para tanto, a Análise de Componentes Complexas Independentes (CICA).

Para tanto, uma vez feita a proposição de um sistema elétrico com características topológicas hipotéticas que representa as características de uma rede de distribuição, foram estabelecidas diretrizes voltadas para a adoção de informações requeridas pelo processo de análise, através de bancos de dados que viessem a expressar, mesmo que ainda de forma hipotética, os resultados de medições conduzidas em campo. Para tanto, empregando-se de registros advindos de perfis representativos das tensões e correntes de sequência negativa, as quais, em termos reais, seriam obtidas dos registradores de qualidade de energia. Muito embora tenham sido meramente adotados para os estudos, os dados empregados para as avaliações de desempenho do processo de análise se mostram condizentes e próprios às investigações feitas.

Visando oferecer uma base para a lógica sequencial dos procedimentos próprios à aplicação do método de análise, através de um fluxograma foi estabelecida uma síntese das etapas a serem contempladas nos estudos e, na sequência, através da adoção de 3 situações operativas estipuladas para o complexo elétrico utilizado como sistema teste. Assim, foram então apresentadas as performances da aplicação da metodologia de análise através da explicitação dos valores dos percentuais atribuídos aos dois agentes envolvidos, em termos de suas contribuições para os níveis de desequilíbrios das tensões totais para o barramento de acoplamento.

Por fim, como pôde ser verificado através dos resultados obtidos, de um modo geral, ainda que pese o fato que os desenvolvimentos aplicativos possam ser considerados embrionários, ficou esclarecida as perspectivas promissoras da proposição feita por esta pesquisa.

# 5

## **AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO MÉTODO CICA E AS PRINCIPAIS METODOLOGIA DE COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES**

### **5.1 Introdução**

Este capítulo destina-se a realização de uma análise comparativa entre a metodologia desenvolvida nesta tese e as principais metodologias presentes na literatura para compartilhamento de responsabilidades em desequilíbrio de tensão que foram apresentadas no Capítulo 2, com o diferencial de avalia-las ao longo do tempo.

Neste sentido, serão empregados somente os métodos que melhor performam no estudo inicial elaborado para o sistema elétrico hipotético adotado e que apresentam viabilidade de serem aplicados em situações práticas e/ou computacionais, sendo estes, IEC e Mudança de Estado Controlada.

Vale salientar, que o método da Superposição não será aplicado, mesmo apontando resultados concretos como as duas metodologias citadas, porque a obtenção das impedâncias equivalentes dos agentes do sistema torna-se uma tarefa inviável mesmo em aplicações computacionais, haja visto, a necessidade de alteração das características elétricas do supridor e do consumidor.

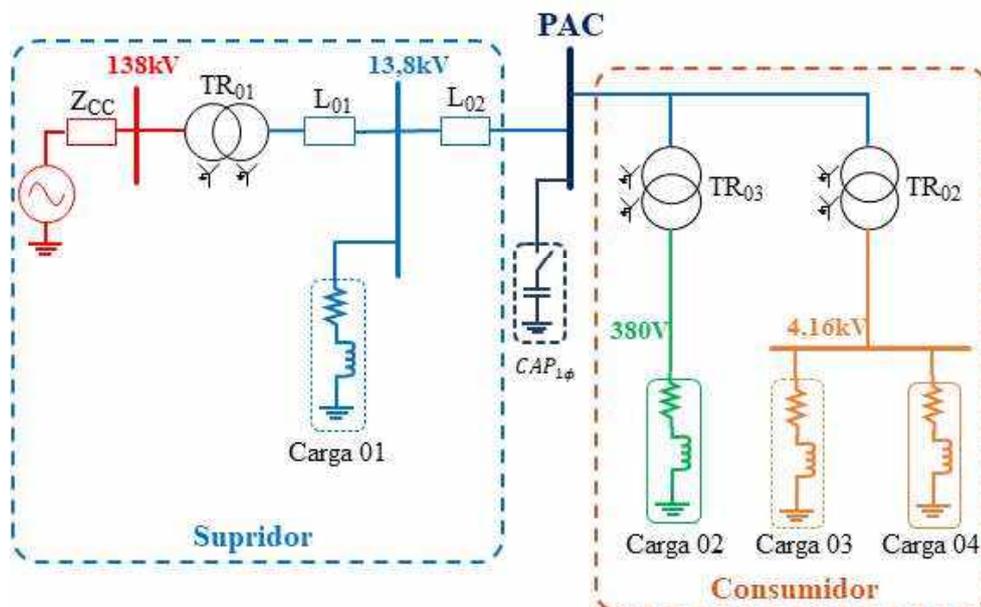
Por fim, realiza-se um novo estudo de caso substituindo o perfil de carregamento do consumidor que apresentava um comportamento mais suavizado e estável simbolizando a natureza comportamental de um sistema de distribuição equivalente que estaria conectado a

jusante do PAC, por um perfil mais variante que representa, via de regra, as peculiaridades típicas de um consumidor industrial.

## 5.2 Avaliação Comparativa de Desempenho das Metodologias

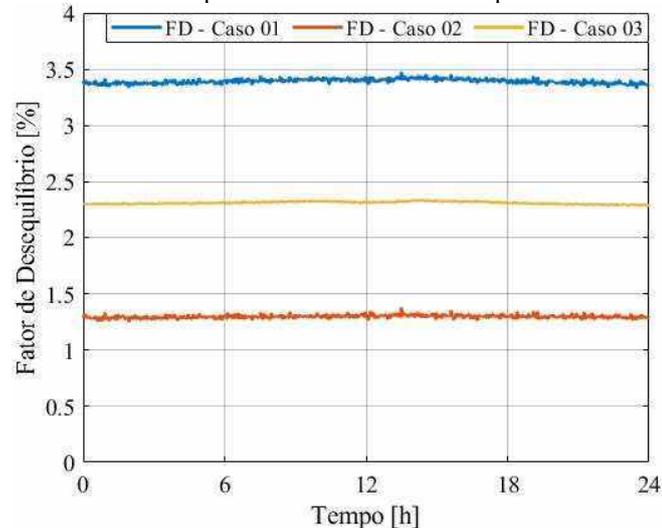
Nesta etapa, as investigações de desempenho das metodologias serão conduzidas com o mesmo sistema elétrico, perfis de carregamento ao longo do tempo e condições operativas adotadas nos capítulos anteriores. Dessa maneira, com a finalidade possibilitar uma compreensão mais clara e objetiva dos propósitos almejados as Figuras 5.1 e 5.2 ilustram o novamente o sistema adotado e os fatores de desequilíbrio obtidos nos três cenários operativos estabelecidos.

Figura 5.1 – Sistema elétrico adotado para avaliação das metodologias



Fonte: Próprio Autor

Figura 5.2 – Fatores de desequilíbrio de tensão no PAC para os cenários operativos



Fonte: Próprio Autor

As simulações para o método IEC foram conduzidas de maneira a garantir as condições operativas inerente a ele, ou seja, foram realizadas aferições pré e pós conexão do consumidor ao sistema. Para a metodologia MEC realizou-se o chaveamento de um capacitor monofásico a cada mudança instantânea de operação do sistema, seguindo as características da componente rápida do perfil de carga utilizado. Por fim, as condições operativas do sistema que foram adotadas anteriormente serão mantidas e estão indicadas a seguir.

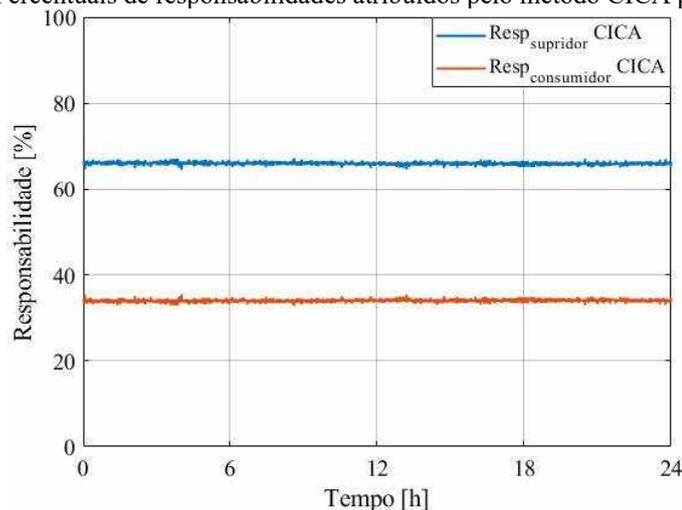
Caso 01: Supridor e consumidor desequilibrados;

Caso 02: Supridor equilibrado e consumidor desequilibrado;

Caso 03: Supridor desequilibrado e consumidor equilibrado.

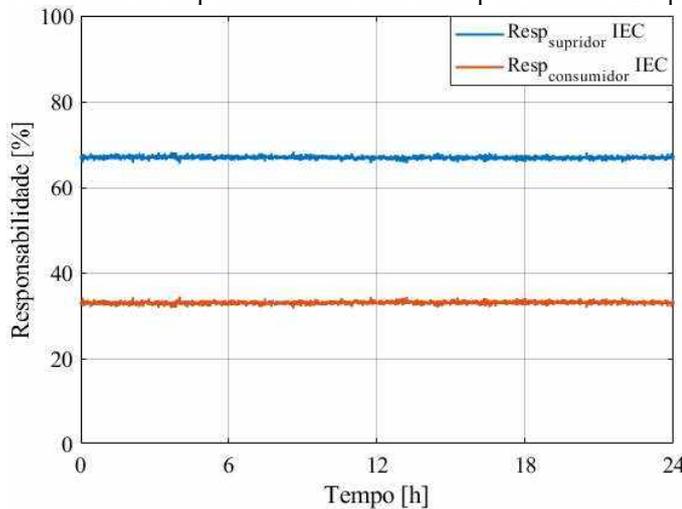
Dessa maneira, os resultados alcançados para o primeiro cenário operativo, Caso 01, são representados pelas Figuras 5.3 a 5.5.

Figura 5.3 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método CICA para o Caso 01



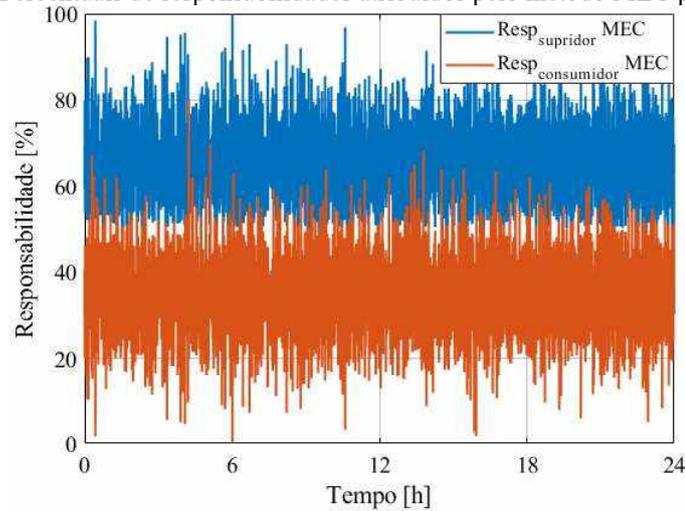
Fonte: Próprio Autor

Figura 5.4 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método IEC para o Caso 01



Fonte: Próprio Autor

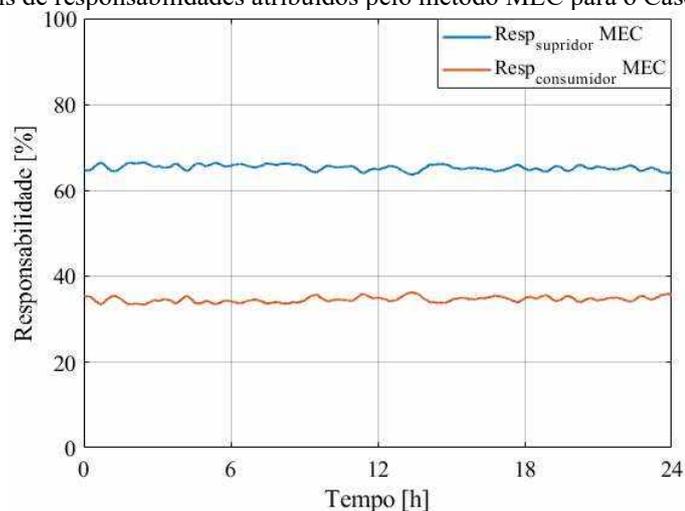
Figura 5.5 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método MEC para o Caso 01



Fonte: Próprio Autor

Ao analisar os resultados obtidos, constata-se que os percentuais de responsabilidades atribuídos pelos métodos CICA e IEC foram similares, sendo os valores médios conferidos ao supridor de 66,02% e 66,99% e ao consumidor de 33,98% e 33,01%, respectivamente. Por outro lado, fica evidente que o método MEC teve a sua performance afetada pela variação instantânea dos sinais de tensão e correntes no PAC, ocasionando resultados imprecisos. Dessa forma, levando em consideração as exigências do método CICA quanto as características dos sinais de entrada, que devem ser filtrados para a obtenção da componente rápida indispensável para a sua convergência, utiliza-se desse processo de filtragem para solucionar o problema apresentado pelo MEC, empregando somente a parcela do sinal correspondente a componente lenta, uma vez que suas variações ao longo do tempo são mais suaves. Com isso, a Figura 5.6 exibe os novos resultados atingidos.

Figura 5.6 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método MEC para o Caso 01 (componente lenta)

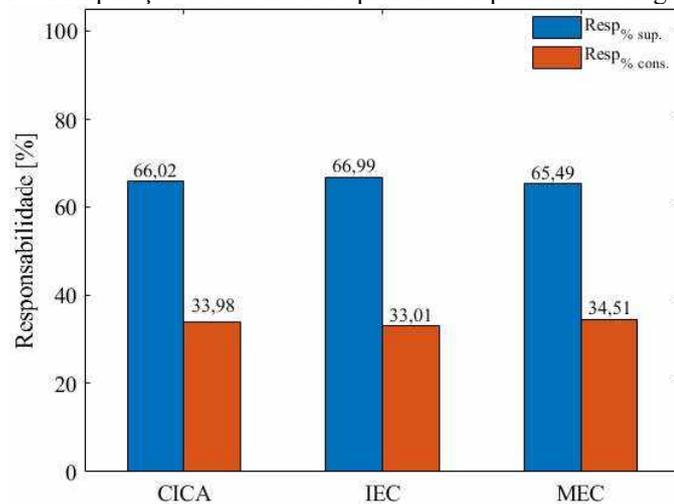


Fonte: Próprio Autor

A partir da Figura 5.6 constata-se que atribuições de responsabilidades proferidas pelo método MEC com a utilização da componente lenta dos sinais, mostraram-se condizentes com o comportamento do sistema elétrico para o Caso 01 e com as outras metodologias. Assim, valores médios obtidos foram de 65,49% e 34,51% para o supridor e o consumidor, respectivamente. Portanto, doravante somente as componentes lentas dos sinais serão utilizadas no método MEC.

Neste contexto, a Figura 5.7 reuni as atribuições de responsabilidades determinadas aos agentes do sistema pelas três metodologias em análise, com isso, é possível constatar as semelhanças dos resultados e o grau de aderência entre elas.

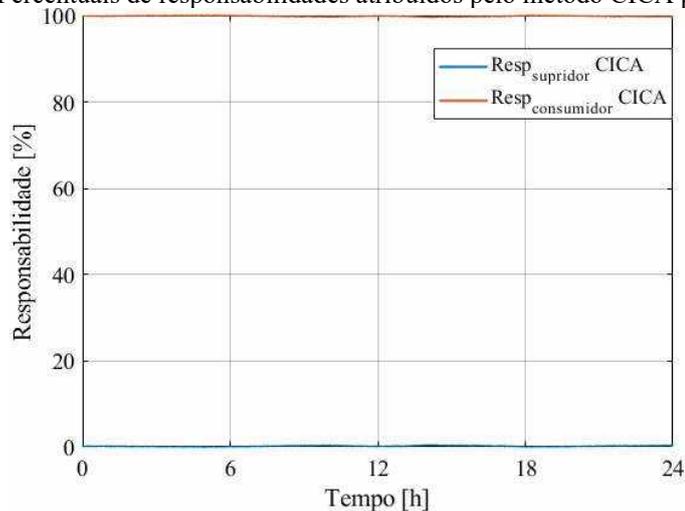
Figura 5.7 – Caso 01 – Comparação dos resultados apresentados pelas metodologias CICA, IEC e MEC



Fonte: Próprio Autor

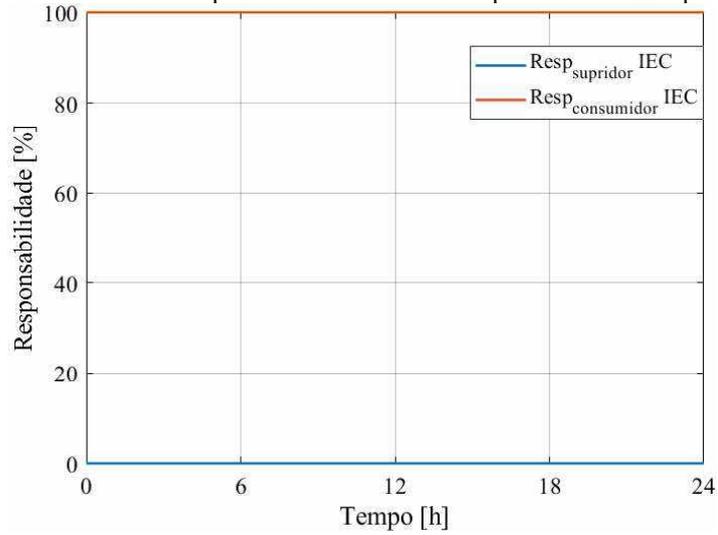
Para o Caso 02, em que somente o consumidor contribui para os níveis de desequilíbrios no PAC, as Figuras 5.8 a 5.11 ilustram os resultados encontrados.

Figura 5.8 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método CICA para o Caso 02



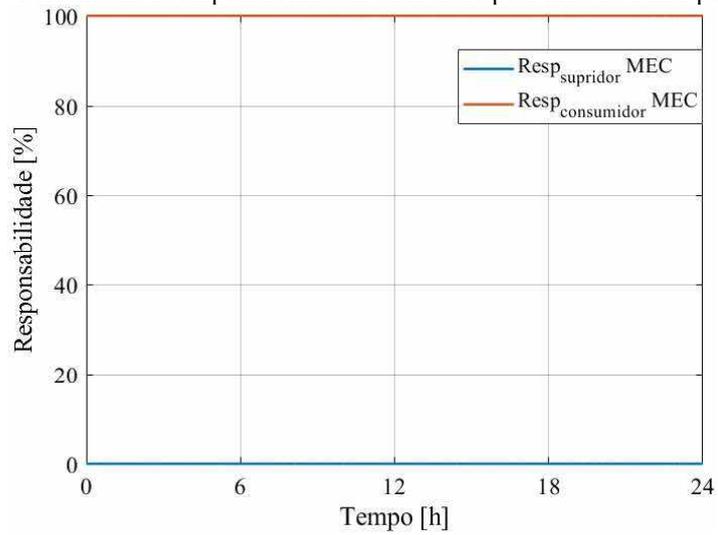
Fonte: Próprio Autor

Figura 5.9 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método IEC para o Caso 02



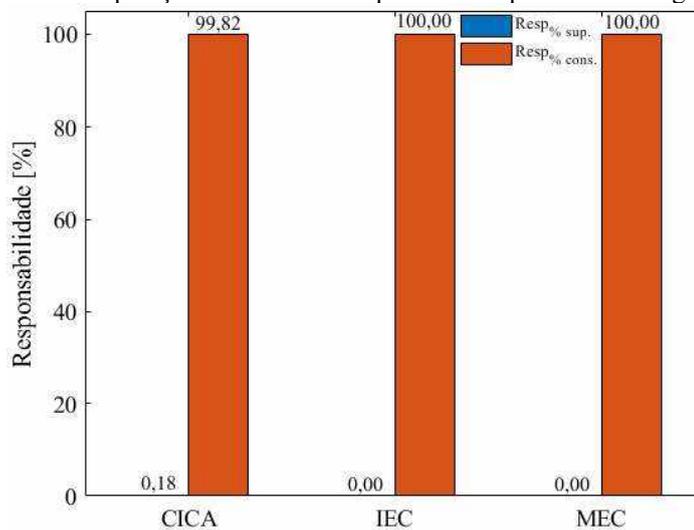
Fonte: Próprio Autor

Figura 5.10 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método MEC para o Caso 02



Fonte: Próprio Autor

Figura 5.11 – Caso 02 – Comparação dos resultados apresentados pelas metodologias CICA, IEC e MEC

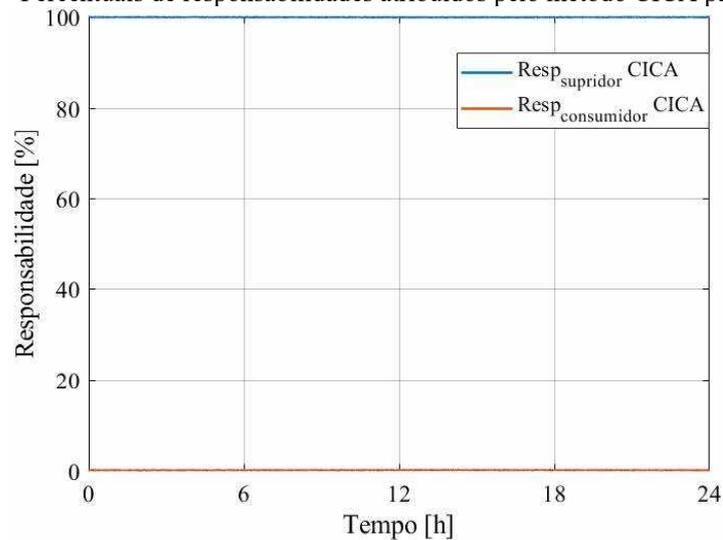


Fonte: Próprio Autor

Os resultados apresentados ratificam as acurácias dos métodos em análise uma vez que atribuíram ao consumidor a responsabilidade integral pelo distúrbio de desequilíbrio de tensão presente no barramento em questão, por unanimidade.

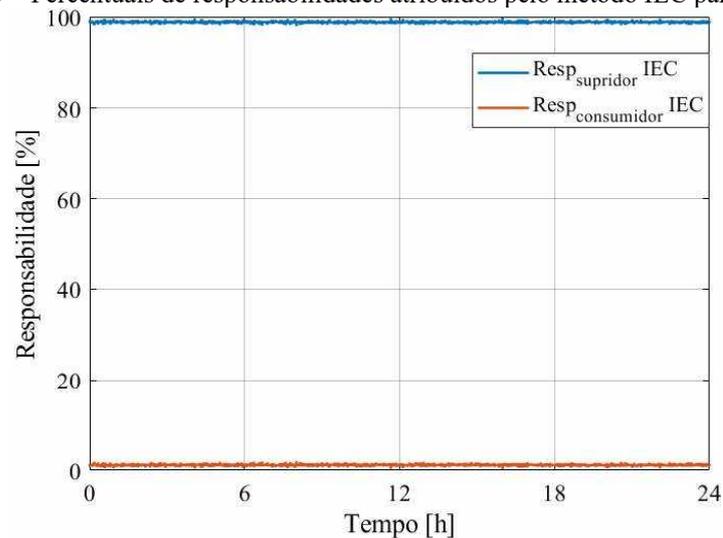
Seguindo a análise, as Figuras 5.12 a 5.15 apresentam as atribuições de responsabilidades conferidas para o Caso 03, em que somente o agente a montante do PAC denominado supridor contribui para o desequilíbrio os resultados obtidos com as metodologias.

Figura 5.12 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método CICA para o Caso 03



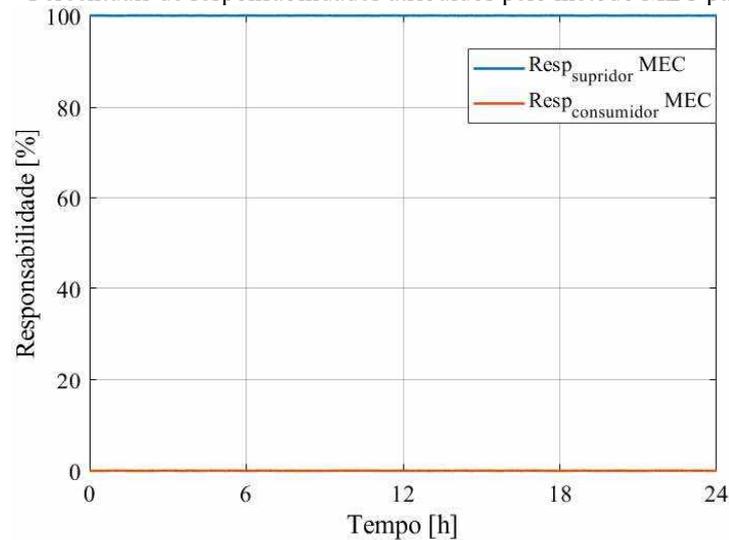
Fonte: Próprio Autor

Figura 5.13 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método IEC para o Caso 03



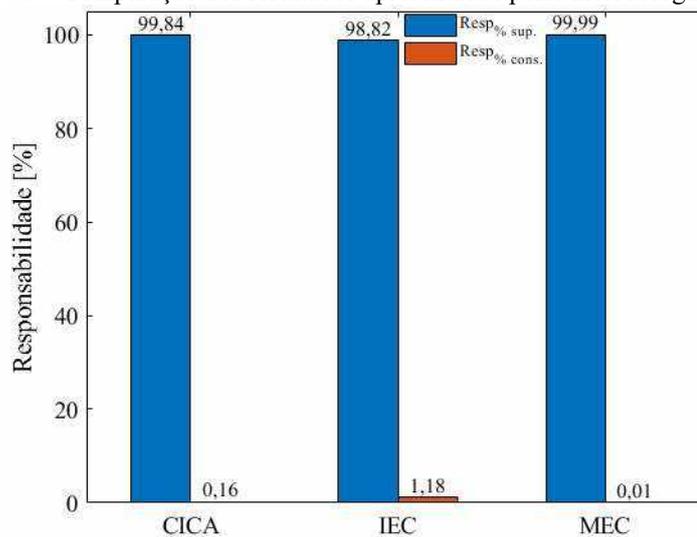
Fonte: Próprio Autor

Figura 5.14 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método MEC para o Caso 03



Fonte: Próprio Autor

Figura 5.15 – Caso 03 – Comparação dos resultados apresentados pelas metodologias CICA, IEC e MEC



Fonte: Próprio Autor

Mais uma vez os resultados obtidos foram acurados e estão em consonância com as características impostas neste cenário operativo, no qual somente o supridor contribui para o nível de desequilíbrio no PAC.

### 5.3 Avaliação das Metodologias com Variação das Características de Consumo

Nesta seção será introduzido um perfil de carregamento ao longo do tempo ao consumidor que exibe um comportamento mais variável em determinados períodos, sendo equivalente as características típicas observadas em consumidores industriais. Para o supridor, devido as particularidades físicas e operacionais encontradas frequentemente em sistemas elétricos reais, mantem-se o perfil de consumo com o padrão contínuo, ou seja, as variações no carregamento ocorrem de maneira suavizada ao longo do tempo. As parcelas correspondentes

as variações rápidas permanecem sendo constituída pela distribuição de probabilidade de Laplace com médio zero e variância igual à 0,01, conforme indicado na Figura 5.16.

Além disso, foram realizadas algumas alterações nas impedâncias desequilibradas do consumidor, o que ocasionou um aumento no nível de desequilíbrio de tensão verificado no barramento em análise. Sendo assim, os novos valores das impedâncias desse agente e a curva do fator de desequilíbrio aferida estão exibidas na Tabela 5.1 e na Figura 5.17, respectivamente. Cabe ressaltar que as demais características do sistema elétrico adotado como, topologia, transformadores, impedâncias de linha e do supridor permaneceram inalteradas.

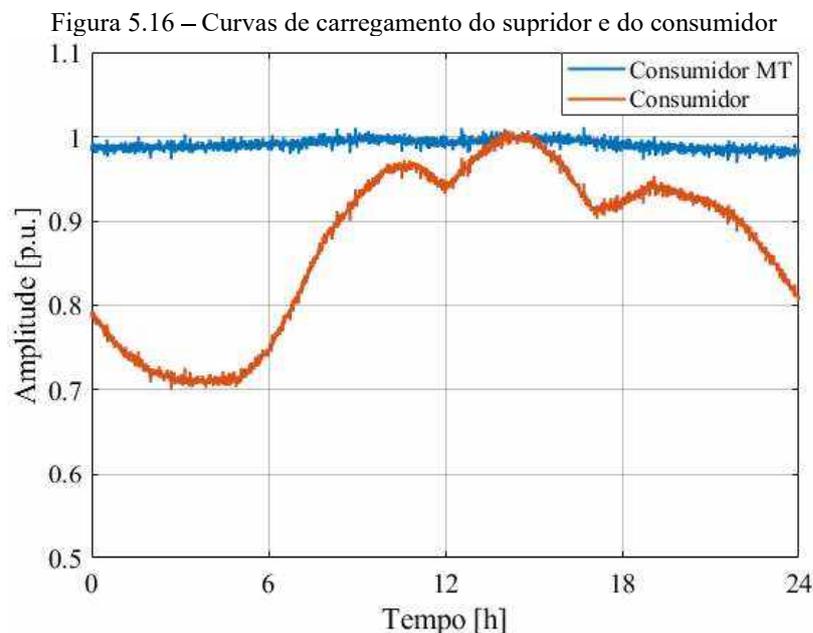
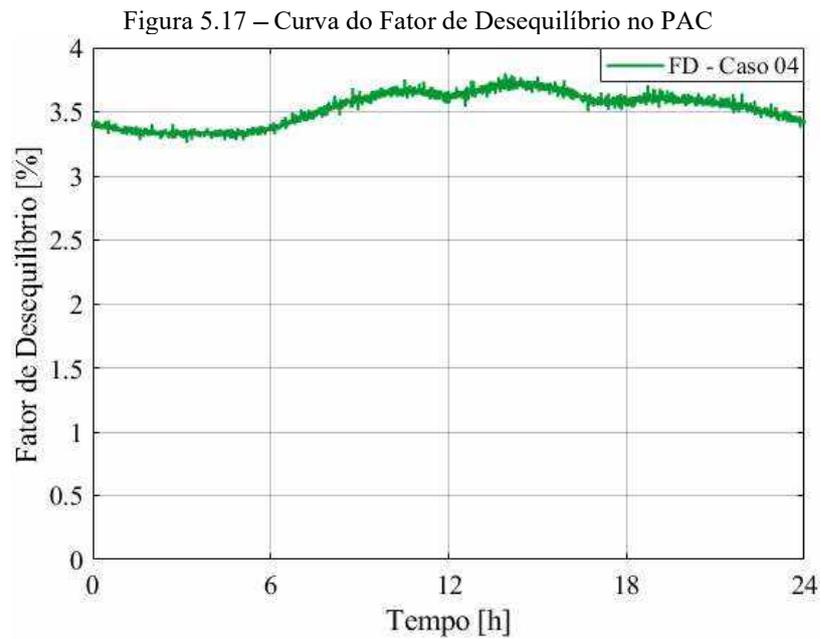


Tabela 5.1 – Novos parâmetros elétricos para o consumidor

Operação com Características Inalteradas	
Carga 01	Equilibrado: $S_{3\phi} = k(0,5 + j0,2)MVA = k(0,53\angle 22^\circ)MVA$
Carga 04	Equilibrado: $S_{3\phi} = k(1,9 + j0,7)MVA = k(2,0\angle 20^\circ)MVA$
Operação com Mudança de Características	
Carga 03	<p>Se equilibrado: <math>S_A = S_B = S_C = k(2,3 + j0,8)MVA</math>  <math>S_{3\phi} = k(7,0\angle 19^\circ)MVA</math></p> <p>Se desequilibrado: <math>S_A = k(1,23 + j0,02)MVA</math>; <math>S_B = k(5,88 + j1,25)MVA</math>;  <math>S_C = k(0,25 + j1,4)MVA</math>; <math>\rightarrow S_{3\phi} = k(7,8\angle 20^\circ)MVA</math></p>

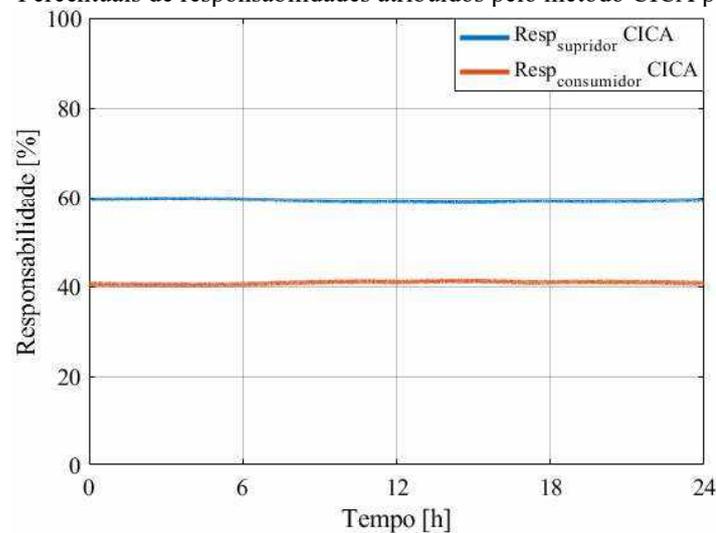
Fonte: Próprio Autor



Fonte: Próprio Autor

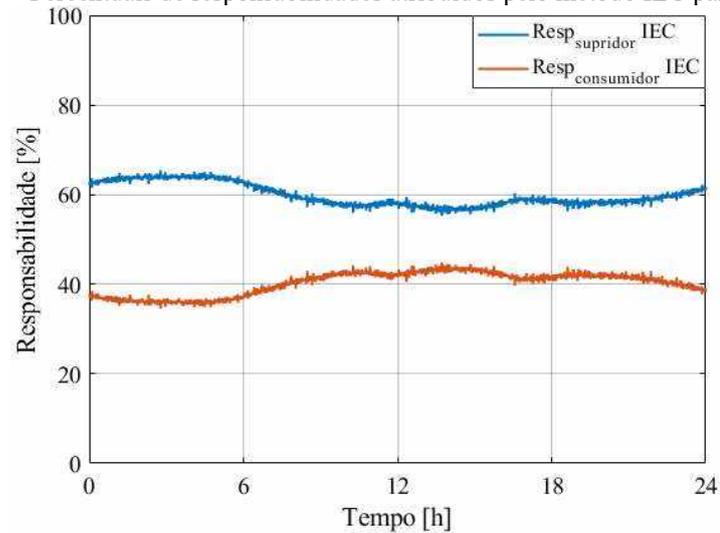
De maneira análoga aos estudos anteriores, os sinais utilizados nas metodologias em análise seguem os mesmos procedimentos já explicitados, no que tange, o pré-processamento dos dados, decomposição e filtragem, seleção das grandezas necessárias e/ou de suas parcelas e as expressões que definem os percentuais de responsabilidades. Neste sentido, os resultados alcançados por cada um dos métodos estão expostos nas Figuras 5.18 a 5.21.

Figura 5.18 - Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método CICA para o Caso 04



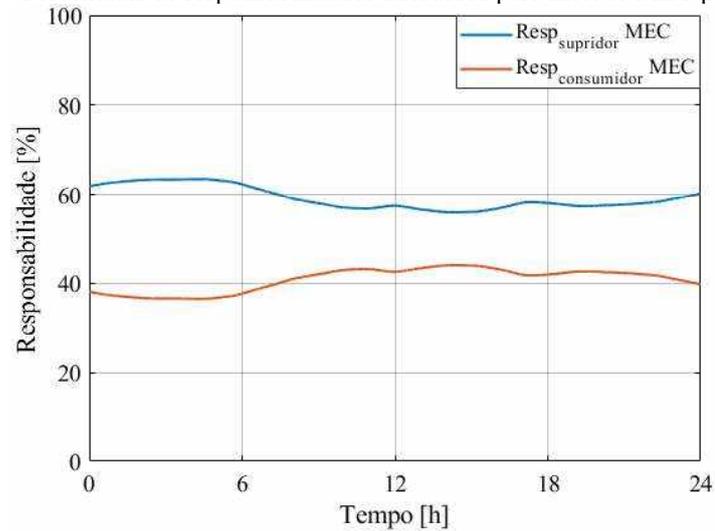
Fonte: Próprio Autor

Figura 5.19 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método IEC para o Caso 04



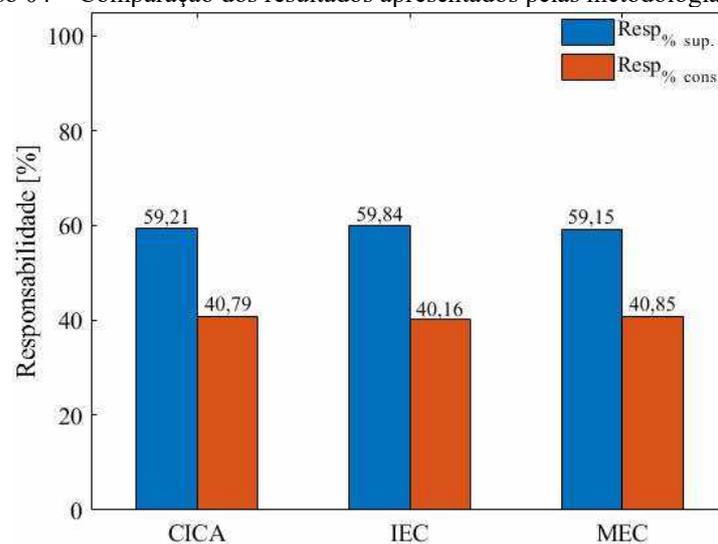
Fonte: Próprio Autor

Figura 5.20 – Percentuais de responsabilidades atribuídos pelo método MEC para o Caso 04



Fonte: Próprio Autor

Figura 5.21 – Caso 04 – Comparação dos resultados apresentados pelas metodologias CICA, IEC e MEC



Fonte: Próprio Autor

Com base nos resultados apresentados conclui-se que os desempenhos das três metodologias são semelhantes e acurados, imputando os percentuais de responsabilidades de aproximadamente 59,4% e 40,6% para o supridor e para o consumidor, respectivamente. Estes valores estão em consonância com as características do sistema elétrico adotado, os perfis de consumo e as potências de operação de cada agente.

Assim, pode-se certificar a eficiência da metodologia proposta, uma vez que os resultados obtidos estão em consonância com os principais métodos consolidados na literatura. Isto, ratifica o grau de aderência apresentado pelo CICA ao ser empregada na análise de distúrbios relacionados aos desequilíbrios de tensão em sistemas trifásicos que afetam a qualidade da energia elétrica, em especial o compartilhamento de responsabilidades dos agentes envolvidos.

#### **5.4 Conclusões**

Os desenvolvimentos realizados neste capítulo foram baseados na análise comparativa de desempenho das metodologias já consolidadas na literatura com o método proposto nesta tese. Para tal, realizou-se o estudo investigativo durante um período de tempo que representa 24 horas de operação do sistema. Com isso, foi obtido um banco de dados com as grandezas elétricas e condições operativas necessárias para a aplicação de cada método.

Um ponto que merece destaque é o fato de que até o momento somente estudos pontuais com grandezas agregadas haviam sido publicados para a metodologia da Mudança de Estado Controlada. Dessa forma, esta investigação colaborou para elucidação das condições necessárias para a aplicação do referido método em análises ao longo do tempo. Neste contexto, pode-se dizer que mesmo de maneira sucinta e elementar, que este trabalho contribuiu para esclarecer as suas nuances operativas.

Em consonância com os estudos realizado no capítulo anterior, comparou-se os resultados obtidos com o método CICA e os métodos IEC e MEC para os três casos propostos. Os valores dos percentuais de responsabilidade obtidos para cada agente com as metodologias foram muito próximos, validando assim a eficácia da CICA. Por fim, para certificar a sua precisão, foi realizada a alteração do perfil de carregamento consumidor para um que apresenta as características típicas em uma indústria. Novamente os resultados foram precisos e consonantes com critérios de referência.

# 6

## CONCLUSÃO

Diante dos desenvolvimentos realizados neste trabalho, este capítulo destina-se a apresentar sumariamente as constatações obtidas acerca dos estudos efetuados no tocante ao compartilhamento de responsabilidades sobre desequilíbrios. Dessa forma, reconhece-se que as contribuições produzidas vão de encontro com os esforços das demais pesquisas realizadas na atualidade, no que diz respeito a avaliação e proposição de técnicas e ferramentas capazes de solucionar de maneira eficaz a problemática em questão.

Neste sentido, no capítulo introdutório contextualizou-se a definição de assimetria nas grandezas do sistema elétrico com os principais elementos causadores desse distúrbio, seja por parte do supridor ou dos consumidores. Além, discorreu-se sobre os efeitos prejudiciais que são produzidos nos diversos tipos de cargas e dispositivos conectados à rede quando da incidência desse fenômeno, que culminam na área de estudos sobre os compartilhamentos de responsabilidades, uma vez que as soluções mitigatórias, via de regra, são onerosas e devem ser custeadas de maneira igualitária. Por fim, foi apresentado o estado da arte com as metodologias mais relevantes da literatura, sobre as técnicas para atribuições de responsabilidade para desequilíbrios e também as que até então foram massivamente destinadas aos estudos de distorções harmônica e que integra o ponto focal deste trabalho.

Assim, o capítulo 2 teve como cerne o desenvolvimento de uma síntese dos desempenhos computacionais dos principais métodos abordados no estado da arte em um sistema com características semelhantes a uma rede de distribuição, com o propósito de avaliar seus desempenhos na atribuição da responsabilidade frente ao desequilíbrio de tensão. Foram contemplados: o método da Corrente Conforme e Não Conforme; o método do Fluxo de Potência Trifásico, o método IEC; o método da Superposição e, por fim; o método da Mudança de Estado Controlada. Os resultados evidenciaram que, embora ainda haja certas limitações teóricas e/ou práticas, os métodos IEC, Superposição e MEC-CM se mostraram consistentes

com os propósitos almejados, e método da Corrente Conforme e Não Conforme e o método do Fluxo de Potência Trifásico apresentaram resultados dissonantes ao desempenho físico esperado.

No que tange ao capítulo 3, este foi imbuído do propósito de sintetizar os fundamentos que norteiam a Análise das Componentes Independentes Complexas. Nesta direção foram tecidas considerações sobre suas proposições e restrições referentes aos tipos de sinais a serem analisados, técnicas estatísticas, e diversos conceitos relacionados com os princípios da independência entre as variáveis aleatórias e da não-gaussianidade de suas distribuições de probabilidades. Além disso, foram elucidadas as ferramentas basilares necessárias para a implementação do método ICA, contemplando as propriedades dos métodos PCA, SVD e branqueamento de dados, utilizados para otimizar a preparação dos dados. Foram também feitas considerações sobre as indeterminações inerentes ao método ICA e a sua aplicabilidade em sistemas elétricos, ressaltando a necessidade da decomposição das componentes rápidas e lentas dos sinais elétricos visando, sobretudo, a garantia da independência estatística. Em consonância com a temática exposta e a sua relação com os sistemas elétricos, ao final desta etapa elaborou-se um exemplo simplificado voltado a determinar as impedâncias equivalentes aplicadas ao Teorema de Norton, que representam as características do supridor e do consumidor. Dessa forma, obteve-se uma boa aderência quanto a reprodução dos sinais adotados como premissas, assim como os parâmetros representativos da rede elétrica utilizada.

No capítulo 4, foram então realizados os desenvolvimentos matemáticos que se fazem necessários à aplicação do método CICA ao compartilhamento de responsabilidades sobre os desequilíbrios das tensões. Visando ilustrar didaticamente as etapas e a eficácia do método de análise proposto, foi então selecionado um sistema elétrico com características radiais e envolvendo tão apenas dois agentes, um supridor e outro consumidor. Para este caso teste, foram feitas adoções de perfis de desempenho quanto aos indicadores associados com uma operação desequilibradas, as quais culminaram pela proposição de perfis de tensões e correntes de sequência negativa, aplicável a um período de amostragem de 24 horas e similares àqueles advindos de medições reais em campo.

Através da caracterização de 3 (três) casos para fins dos estudos avaliativos, cada qual com propriedades próprias e bem definidas quanto às contribuições para o fenômeno aqui tratado, foram então conduzidos os estudos de desempenho do processo de análise. Assim

procedendo, foram então realizados os trabalhos aplicativos da metodologia, cujos resultados foram indicativos de boas perspectivas quanto a eficácia da proposta aos objetivos postos.

Neste sentido, no capítulo 5, foi desenvolvida uma avaliação e validação dos resultados obtidos com a metodologia proposta nesta tese, através de estudo comparativo com os métodos já consolidados na literatura que apresentaram melhor desempenho nas investigações realizadas no capítulo 2 e que fossem passíveis de aplicação prática e computacional. Dessa forma, selecionou-se os métodos IEC e MEC por exibirem os requisitos necessários para a condução dos estudos avaliativos, dada a eficácia em determinar os percentuais de responsabilidades dos agentes perturbadores do sistema. Com isso, foram empregadas inicialmente as três condições operativas utilizadas no capítulo 4, nas metodologias supracitadas para obter-se os valores de referências que servirão como parâmetros de avaliação do CICA. Cabe destacar, que embora não seja o objetivo deste trabalho desenvolver investigação pormenorizadas sobre o método de Mudança de Estado Controlada, realizou-se pela primeira vez sua aplicação em análises ao longo do tempo e constatou-se as condições necessárias dos sinais de entrada para o seu correto funcionamento. De posse dos valores de referências para os três casos operativos em análise constatou-se que os resultados provenientes do método CICA são consonantes com o real comportamento do sistema e que para determinar o compartilhamento de responsabilidade de desequilíbrio de tensão se mostraram acurados.

Por fim, realizou-se um novo estudo de caso alterando o perfil de carregamento do consumidor para que estivesse uma característica operativa mais próxima das encontradas em consumidores industriais. Além disso, os valores de suas impedâncias também foram modificados para obtenção de níveis de desequilíbrios no PAC diferentes dos já apresentados. Os demais elementos do sistema, tais como, impedância do consumidor de média tensão a montante do PAC que representa as contribuições do supridor e os elementos constituintes da rede elétrica permaneceram inalterados. Mais uma vez o resultado obtido com a CICA foi preciso e consonante com as metodologias IEC e MEC, ratificando assim, a eficácia e aplicabilidade do método proposto e desenvolvido nesta tese.

Não obstante o reconhecimento acima posto, cabe destacar que atividades complementares se fazem ainda necessárias para a consolidação do método CICA para a atribuição de responsabilidades dos níveis de desequilíbrios das tensões entre as partes, como esclarecido a seguir:

- Aplicação do método para a um sistema elétrico típico, com o intuito de realizar uma análise de desempenho mais concisa e fidedigna aos cenários encontrados na prática;
- Avaliação do desempenho do método diante da presença de cargas motrizes e com características de não-linearidade, a exemplo de motores diretamente conectados à rede elétrica e por conversores de frequência;
- Realização de estudos investigativos sobre a efetividade da resposta do método para distintas relações entre as magnitudes das impedâncias do supridor e do consumidor e as indeterminações inerentes do método CICA que possam surgir nestes cenários.
- Aplicação da metodologia em sistemas elétricos reais para avaliar seu desempenho em condições operativas não controladas.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANEEL, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica,” *Revisão 12*, Jan. 2021.
- [2] 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, Feb. 2021.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.3029437>
- [3] C. I. Ciontea and F. Iov, “A Study of Load Imbalance Influence on Power Quality Assessment for Distribution Networks,” *Electricity*, vol. 2, no. 1, pp. 77–90, Mar. 2021.  
<https://doi.org/10.3390/electricity2010005>
- [4] 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, 2020.  
<https://doi.org/10.1109/EPQU50182.2020.9220312>
- [5] 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>
- [6] Y. L. P. A. C. School, “Voltage balancing in low-voltage radial feeders using Scott transformers.”
- [7] L. S. Czarnecki, S. M. Hsu, and G. Chen, “Adaptive Balancing Compensator,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, no. 3, pp. 1663–1669, 1995.  
<https://doi.org/10.1109/61.400954>
- [8] O. C. N. Souto, “Modelagem e Análise de Desempenho Térmico de Motores de Indução Sob Condições Não Ideais de Alimentação,” Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001.
- [9] A. L. Ferreira Filho, “Análise do Comportamento do Fator de Desequilíbrio Frente a Variação da Amplitude e do Ângulo de Tensão,” Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

- [10] IEEE Std 1547.7<sup>TM</sup>, “IEEE Guide for Conducting Distribution Impact Studies for Distributed Resource Interconnection,” New York, USA, 2013.
- [11] A. von Jouanne and B. (Ben) Banerjee, “Assessment of Voltage Unbalance,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, no. 4, pp. 782–790, 2001.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2002.805032>
- [12] E. El-Kharashi, J. G. Massoud, and M. A. Al-Ahmar, “The impact of the unbalance in both the voltage and the frequency on the performance of single and cascaded induction motors,” *Energy*, vol. 181, pp. 561–575, 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.169>
- [13] L. F. L. Arão, “Avaliação Comparativa entre Métodos para Atribuição de Responsabilidades devido ao Desequilíbrio de Tensão,” Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2014.
- [14] C. F. Nascimento *et al.*, “Analysis of Noncharacteristic Harmonics Generated by Voltage-Source Converters Operating Under Unbalanced Voltage,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 2, pp. 951–961, 2017.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2593684>
- [15] C. L. Fortescue, “Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. XXXVII, no. 2, pp. 1027–1140, 1918.  
<https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1918.4765570>
- [16] IEEE Std 1159<sup>TM</sup>, “Recommended practice for monitoring electric power quality,” New York, USA, 2009.  
<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2009.5154067>
- [17] ONS, “Procedimentos de Rede, Submódulo 2.9 - Requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à Rede Básica,” 2020.
- [18] TR IEC 61000.3.13:2012, “Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3.13: Limits – Assessment of emission limits for the connection of unbalanced installations to MV, HV and EHV power systems,” 2012.
- [19] R. C. F. Gregory, “Proposals for methodologies for determining voltage imbalance contributions in three-phase electric systems,” Tese (doutorado), Federal University of Uberlandia - UFU, 2020.

- [20] 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>
- [21] R. C. F. Gregory, J. C. Oliveira, C. R. Azevedo Jr., and L. Ran, "An Experimental Evaluation of Procedures Aimed at Sharing the Voltage Imbalance Responsibility," in *XIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*, 2019.
- [22] 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>
- [23] P. H. L. S. Pinto, M. V. B. Mendonça, and F. A. M. Moura, "Avaliação de Método para Atribuição da Responsabilidade pelo Desequilíbrio de Tensão em Sistemas com Motores Elétricos," in *XII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*, 2017.
- [24] C. A. Reineri, J. C. Gómez, B. E. Belenguer, and M. Felici, "Revision of concepts and approaches for unbalance problems in distribution," in *2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, TDC'06*, 2006.  
<https://doi.org/10.1109/TDCLA.2006.311575>
- [25] T. E. Seiphethlho and A. P. J. Rens, "On the assessment of voltage unbalance," in *ICHQP 2010 - 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, 2010.  
<https://doi.org/10.1109/ICHQP.2010.5625366>
- [26] T. Seiphethlho and J. Rens, "Practical evaluation of voltage unbalance at a distribution transformer based on 50 Hz negative sequence active power," in *IEEE AFRICON Conference*, 2011.  
<https://doi.org/10.1109/AFRCON.2011.6072129>
- [27] Z. Hanzelka and Y. Varetsky, "Negative-sequence active power stream as an index of unbalance source," in *11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, Oct. 2011.  
<https://doi.org/10.1109/EPQU.2011.6128928>

- [28] T. Seiphethlo and J. Rens, “Practical evaluation of voltage unbalance at a distribution transformer based on 50 Hz negative sequence active power,” in *IEEE AFRICON Conference*, 2011.  
<https://doi.org/10.1109/AFRCON.2011.6072129>
- [29] L. F. L. Arão, “Avaliação Comparativa entre Métodos para Atribuição de Responsabilidades devido ao Desequilíbrio de Tensão,” Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2014.
- [30] 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>
- [31] TR IEC 61000.3.13:2012, “Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3.13: Limits – Assessment of emission limits for the connection of unbalanced installations to MV, HV and EHV power systems,” 2012.
- [32] U. Jayatunga, S. Perera, and P. Ciufu, “Voltage unbalance management in power systems based on IEC 61000-3-13:2008: Implications on the use of ‘kuE factor,’” in *15th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2012, no. June.  
<https://doi.org/10.1109/ICHQP.2012.6381180>
- [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, P. Ciufu, S. Perera, and A. P. Agalgaonkar, “Deterministic methodologies for the quantification of voltage unbalance propagation in radial and interconnected networks,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, no. 11, pp. 1069–1076, 2015.  
<https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.0661>
- [35] CIGRE/CIREN JWG C4.109, “Review of disturbance emission assessment techniques,” no. 468, 2011.
- [36] 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)*, Sep. 2012.

<https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2012.6319083>

- [37] U. Jayatunga, S. Perera, and P. Ciufu, “Voltage unbalance management in power systems based on IEC 61000-3-13:2008: Implications on the use of ‘kuE factor,’” in *15th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2012, no. June. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2012.6381180>
- [38] L. F. L. Arão, A. L. Ferreira Filho, and M. V. B. Mendonça, “Comparative Evaluation of Methods for Attributing Responsibilities Due To Voltage Unbalance,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 2, pp. 743–752. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2493445>
- [39] R. C. F. Gregory, A. C. dos Santos, I. N. Santos, L. Ran, and J. C. De Oliveira, “A practical approach for determining voltage imbalance,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2020. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12627>
- [40] 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, Apr. 2000. <https://doi.org/10.1109/61.853023>
- [41] I. N. Santos, “Método da Superposição Modificado como uma Nova Proposta de Atribuição de Responsabilidades sobre Distorções Harmônicas,” Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0103-17592012000600010>
- [42] A. C. Santos, “Uma Contribuição ao Processo do Compartilhamento de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas via Chaveamento de Unidades Capacitivas,” Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.
- [43] A. C. Santos, “Compartilhamento de responsabilidades harmônicas: análises, contribuições e proposições,” Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2445>

- [44] R. C. F. Gregory, J. C. Oliveira, C. R. Azevedo Jr., and L. Ran, "An Experimental Evaluation of Procedures Aimed at Sharing the Voltage Imbalance Responsibility," in *XIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*, 2019.
- [45] R. C. F. Gregory, "Propostas de Metodologias para a Determinação das Contribuições sobre os Desequilíbrios em Sistemas Elétricos Trifásicos," Universidade Federal de Uberlândia - UFU, 2020.
- [46] M. A. Moraes, R. C. F. Gregory, B. M. Giancesini, I. N. Santos, and J. C. de Oliveira, "Análise Comparativa dos Métodos para o Compartilhamento da Responsabilidade dos Desequilíbrios de Tensão em Sistemas Elétricos," 2021.  
<https://doi.org/10.17648/cbqee-2021-130581>
- [47] A. Hyvärinen and E. Oja, "A fast fixed-point algorithm for independent component analysis," *Neural Comput*, vol. 9, no. 7, pp. 1483–1492, Oct. 1997.  
<https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.7.1483>
- [48] F. Karimzadeh, S. Esmaeili, 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*, 2015.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2398820>
- [49] 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*, 2016.  
<https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0997>
- [50] D. Niebur, E. Gursoy, and H. Liao, "Independent Component Analysis Techniques for Power System Load Estimation," in *Applied Mathematics for Restructured Electric Power Systems: Optimization, Control and Computational Intelligence*, 1st ed., J. H. Chow, F. F. Wu, and J. A. Momoh, Eds. Boston, MA: Springer, pp. 287–317.  
[https://doi.org/10.1007/0-387-23471-3\\_13](https://doi.org/10.1007/0-387-23471-3_13)
- [51] X. Xiao, X. Zheng, Y. Wang, S. Xu, and Z. Zheng, "A Method for Utility Harmonic Impedance Estimation Based on Constrained Complex Independent Component Analysis," *Energies (Basel)*, 2018.  
<https://doi.org/10.3390/en11092247>

- [52] 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 & Distribution*, vol. 14, no. 5, 2019.  
<https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1153>
- [53] X. Zhao and H. Yang, "A New Method to Calculate the Utility Harmonic Impedance Based on FastICA," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 1, 2016.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2491644>
- [54] Y. Jia, Y. Liu, B. Wang, D. Lu, and Y. Lin, "Power Network Fault Location with Exact Distributed Parameter Line Model and Sparse Estimation," *Electric Power Systems Research*, no. May, p. 108137, 2022.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108137>
- [55] 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>
- [56] Y. Yang, Y. Wang, and X. Ma, "Determining the Responsibility of Three-Phase Unbalanced Sources Based on RICA," *Energies (Basel)*, 2019.  
<https://doi.org/10.3390/en12152849>
- [57] V. Zarzoso and P. Comon, "Robust Independent Component Analysis by Iterative Maximization of the Kurtosis Contrast with Algebraic Optimal Step Size," *IEEE Trans Neural Netw*, 2010.  
<https://doi.org/10.1109/TNN.2009.2035920>
- [58] 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, Apr. 2000.  
<https://doi.org/10.1109/61.853023>
- [59] IEEE Std 1459<sup>TM</sup>, "IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions," 2010.

- [60] P. Paravithana, U. Jayatunga, S. Perera, and P. Ciufu, “A review of recent investigations with reference to IEC/TR 61000-3-13 on voltage unbalance emission allocation,” in *14th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, 2010. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2010.5625471>
- [61] J. N. Kutz, *Data-driven modeling and scientific computation*, 1st ed. New York: Oxford University Press, 2013.
- [62] J. v. Stone, *Independent Component Analysis: a tutorial introduction*, 1st ed. Cambridge: The MIT Press, 2004. <https://doi.org/10.7551/mitpress/3717.001.0001>
- [63] A. Hyvärinen, J. Karhune, and E. Oja, *Independent component analysis*, 1st ed. New York: John Wiley and Sons Ltd, 2001. <https://doi.org/10.1002/0471221317>
- [64] D. Niebur, E. Gursoy, and H. Liao, “Independent component analysis techniques for power system load estimation,” in *Applied Mathematics for Restructured Electric Power Systems*, 1st ed., J. H. Chow, F. F. Wu, and J. A. Momoh, Eds. Boston, MA: Springer US, 2005, pp. 287–317. [https://doi.org/10.1007/0-387-23471-3\\_13](https://doi.org/10.1007/0-387-23471-3_13)
- [65] P. Comon, “Independent Component Analysis, A New Concept?,” *Signal Processing*, 1994. [https://doi.org/10.1016/0165-1684\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0165-1684(94)90029-9)
- [66] C. W. Therrien, *Discrete Random Signals and Statistical Signal Processing*, 1st ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall. Inc., 1992.
- [67] F. A. de L. Moreto, “Análise de Componentes Independentes Aplicada à Separação de Sinais de Áudio,” Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.
- [68] A. Papoulis and S. U. Pillai, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, 4th ed. New York: McGraw Hill Higher Education, 2002.
- [69] A. R. Horn and C. R. Johnson, *Matrix Analysis*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

- [70] A. K. Nandi, *Blind Estimation Using Higher Order Statistics*, 1st ed. Springer Science, 1999.  
<https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2985-6>
- [71] K. Shin and J. K. Hammond, *Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers*, 1st ed. Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 2008.
- [72] M. Novey and T. Adali, “Adaptable nonlinearity for complex maximization of nongaussianity and a fixed-point algorithm,” in *2006 16th IEEE Signal Processing Society Workshop on Machine Learning for Signal Processing*, Sep. 2006, pp. 79–84.  
<https://doi.org/10.1109/MLSP.2006.275526>
- [73] E. Hirst and B. Kirby, “Defining Intra and Interhour Load Swings,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, no. 4, 1998.  
<https://doi.org/10.1109/59.736280>

# **APÊNDICE A: TRABALHOS PUBLICADOS ORIUNDO DESTA TESE DE DOUTORADO**

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

<https://doi.org/10.3390/en15197014>

M. A. Moraes, R. C. F. Gregory, B. M. Giancesini, I. N. Santos, e J. C. de Oliveira, “**Análise Comparativa dos Métodos para o Compartilhamento da Responsabilidade dos Desequilíbrios de Tensão em Sistemas Elétricos**” 2021.

<https://doi.org/10.17648/cbqee-2021-130581>