



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RAQUEL CRISTINA FILIAGI GREGORY

Propostas de Metodologias para a Determinação das
Contribuições sobre os Desequilíbrios em Sistemas Elétricos
Trifásicos

Uberlândia

2020

RAQUEL CRISTINA FILIAGI GREGORY

Propostas de Metodologias para a Determinação das
Contribuições sobre os Desequilíbrios em Sistemas Elétricos
Trifásicos

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

Área de concentração: Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Oliveira

Uberlândia

2020

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

G822	Gregory, Raquel Cristina Filiagi, 1991-
2020	Propostas de Metodologias para a Determinação das Contribuições sobre os Desequilíbrios em Sistemas Elétricos Trifásicos [recurso eletrônico] / Raquel Cristina Filiagi Gregory. - 2020.
<p>Orientador: José Carlos de Oliveira. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.te.2020.725 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p>	
<p>1. Engenharia elétrica. I. Oliveira, José Carlos de, 1947-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.</p>	
CDU: 621.3	

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

RAQUEL CRISTINA FILIAGI GREGORY

Propostas de Metodologias para a Determinação das
Contribuições sobre os Desequilíbrios em Sistemas Elétricos
Trifásicos

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

Área de concentração: Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

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

Prof. Dr. Ivan Nunes Santos – UFU

Prof. Dr. Paulo Henrique Oliveira Rezende – UFU

Prof. Dr. Olívio Carlos Nascimento Souto – IFG

Prof. Dr. Luís Carlos Origa de Oliveira – UNESP



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, 276, PPGEELT				
Data:	Trinta de outubro de dois mil e vinte	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	12:50
Matrícula do Discente:	11623EEL006				
Nome do Discente:	Raquel Cristina Filiagi Gregory				
Título do Trabalho:	Propostas de Metodologias para a Determinação das Contribuições sobre os Desequilíbrios em Sistemas Elétricos Trifásicos				
Área de concentração:	Sistemas de energia elétrica				
Linha de pesquisa:	Qualidade da energia elétrica				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Título: Método Modificado da Superposição para o Compartilhamento de Responsabilidades Harmônicas Agência Financiadora: Grupo Neoenergia através do Programa de P&D ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) Início: 29/07/2016 Término: 29/07/2021 No. do Projeto na agência: PD-7284-0001/2016 (Código ANEEL) Professor Coordenador: Ivan Nunes Santos				

Reuniu-se por meio de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Ivan Nunes Santos - FEELT/UFU; Paulo Henrique Oliveira Rezende - FEELT/UFU; Olívio Carlos Nascimento Souto - IFG; Luís Carlos Origa de Oliveira - UNESP; José Carlos de Oliveira - FEELT/UFU, orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr. José Carlos de Oliveira, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a participação do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da 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(as) 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):

Aprovada.

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 **Ivan Nunes Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 04/11/2020, às 15:05, 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 **Paulo Henrique Oliveira Rezende, Professor(a) do Magistério Superior**, em 04/11/2020, às 15:08, 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 **OLÍVIO CARLOS NASCIMENTO SOUTO, Usuário Externo**, em 05/11/2020, às 09:54, 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 **JOSE CARLOS DE OLIVEIRA, Usuário Externo**, em 05/11/2020, às 10:01, 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 **LUIS CARLOS ORIGA DE OLIVEIRA, Usuário Externo**, em 05/11/2020, às 11:51, 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, informando o código verificador **2285754** e o código CRC **D00A3728**.

Dedico este trabalho à minha falecida mãe que sempre me inspirou a confiar nas minhas capacidades e lutar pelos meus ideais.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente expresso minha profunda gratidão pela vida e pelas mais diversas experiências ao longo dessa jornada. Sou grata pelas oportunidades que, de alguma forma, me motivaram a seguir em frente e me trouxeram até aqui, mesmo diante de tantas dificuldades.

Dedico este parágrafo para agradecer à minha musa inspiradora, minha querida mãe, mais conhecida como professora Doia. Mãe, obrigada por me ensinar que a vida é muito mais que ambições próprias e construções individualistas. Obrigada por ter me mostrado que pequenos gestos podem fazer a diferença e que todos somos igualmente relevantes e meritórios de respeito. Sua memória estará sempre eternizada em minhas ações.

Sou grata, com toda a sinceridade, às minhas irmãs Kássia e Bárbara. Vocês são o motivo pelo qual as lutas do dia-a-dia valem a pena. Também estendo os agradecimentos ao meu querido pai, Jaime, que mesmo distante se faz presente em minha vida. A vocês, deixo aqui registrado meu amor e gratidão pela paciência, compreensão, união e confiança em momentos de dificuldade e plenitude.

Gostaria de expressar meus profundos agradecimentos ao meu orientador, professor José Carlos. Muito obrigada pelos conselhos, confiança, incentivo e acolhimento em todas as etapas dessa trajetória. Obrigada por ser inspirador e pela orientação técnica e pessoal ao longo desses anos de trabalho. Espero, um dia, poder inspirar novas gerações, assim como o senhor o faz.

Exerno meus agradecimentos ao professor Li Ran e a University of Warwick pela pronta receptividade e colaboração com os trabalhos realizados durante o período de doutorado sanduíche para o Reino Unido. Thank you very much! Aproveito para estender meus agradecimentos a todos os professores que, de diferentes formas, contribuíram para a minha formação acadêmica e intelectual desde o ensino básico ao nível superior.

Também agradeço aos familiares, amigos e aos companheiros de laboratório. Todos contribuíram, cada qual à sua maneira, para que a conclusão desta etapa de profunda transformação e amadurecimento fosse possível.

Agradeço, também, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade ofertada e pela pronta colaboração.

Por fim, agradeço à CAPES pelo apoio financeiro concedido por meio de bolsas de estudos na modalidade nacional (Código de Financiamento 001 – 88882.428969/2018-01) e sanduíche (Código de Financiamento 001 – PDSE 88881.187935/2018-01).

Em tempos de desinformação, fazer ciência é um
ato de responsabilidade social.

RESUMO

Os desequilíbrios são fenômenos tipicamente manifestados nas instalações elétricas trifásicas, os quais estão relacionados às assimetrias existentes nas redes, englobando os sistemas de geração, transmissão, distribuição e os centros de consumo. Uma vez reconhecidos os diversos efeitos nocivos que os distúrbios podem provocar no sistema como um todo, sejam eles manifestados em termos das tensões ou correntes assimétricas, os desequilíbrios devem ser limitados de acordo com os níveis recomendados pelos padrões vigentes. Dessa forma, caso os limites sejam extrapolados, estratégias de mitigação são recomendadas para a compatibilização dos indicadores de conformidade de acordo com os padrões de fornecimento tidos como aceitáveis. Neste contexto, há uma grande variedade de estratégias de compensação de desequilíbrios, as quais são empregadas de acordo com a natureza e fonte do problema. Por conseguinte, haja vista que a implementação de soluções pode envolver custos elevados, pondera-se a relevância do processo de determinação (ou compartilhamento) das contribuições sobre os desequilíbrios entre as partes envolvidas. Esta temática surge da necessidade de se determinar as parcelas de contribuição individuais oriundas de diferentes fontes de perturbação sobre o desequilíbrio global manifestado no barramento comum entre tais fontes, as quais são aqui denominadas por supridor e consumidor. Na literatura, há uma série de trabalhos voltados para esta problemática. Todavia, por se tratar de um assunto de tamanha complexidade, na atualidade, não há procedimento que se mostre consistente nos campos teórico e prático de forma simultânea. À luz dessas constatações, além de contribuir com a apresentação atualizada do estado da arte sobre o tema e avaliar os principais procedimentos existentes na literatura, este trabalho tem como objetivo propor duas estratégias inovadoras para a determinação das contribuições sobre os desequilíbrios: uma de cunho teórico e fundamentada em princípios clássicos de circuitos elétricos; e outra de caráter prático, visando estabelecer meios para que o processo possa ser executado em campo. Ambas as propostas se complementam e podem ser utilizadas conjuntamente. Com o intuito de avaliar a resposta das metodologias pormenorizadas ao longo do trabalho, são realizados estudos computacionais e laboratoriais utilizando um sistema elétrico hipotético e com forte característica motriz, visto que isto tem se apresentado como fator de influência relevante em estudos qualitativos.

Palavras-chave: Avaliação das emissões de desequilíbrios. Determinação das contribuições sobre os desequilíbrios. Identificação das fontes de desequilíbrios. Método da Mudança de Estado Controlada. Método da Superposição.

ABSTRACT

Imbalances are common phenomena on three-phase electric power systems. These anomalies may come at the expense of asymmetries inherent to networks, comprising the generation, transmission and distribution systems as well as the consumption centres. Since they can cause harmful effects upon electric power system components and operation, whether they are manifested in terms of asymmetric voltages and/or currents, imbalances must be limited according to power quality national standards. In this way, whether the limits are exceeded, mitigating approaches must be provided accordingly in order to make the levels compatible with the standard requirements. In fact, there are several imbalance compensation strategies available, which shall be used according to the nature and source of the problem. Therefore, as it may involve considerable costs, the matter of determining (or sharing) the imbalance contributions among the parts involved shows itself as relevant. This topic emerges from the need to determine the individual contributions of different disturbance sources regarding the global voltage imbalance at a given busbar. It should be noted that these sources are here defined as supplier and consumer agents. In the literature there are a number of researches focused on this matter. However, due to its complexity, as it currently stands, there is no procedure that has proved to be trustworthy simultaneously in both theoretical and practical aspects. For this reason, in addition to the updated state of the art concerning imbalance responsibility sharing, which includes pointing out and assess the most popular procedures existing in the literature, this work aims to propose two innovative strategies to address this matter. The first one is a theoretical-based principle that lies in common knowledge of electrical circuits. The second one is a practical-based approach that aims to establish means for determining voltage imbalance contributions in the field. Both propositions support each other and they may be used together. Furthermore, in order to assess the proposed methods and others, computational and laboratory studies are carried out on an electric hypothetical system with a strong motor load. In fact, this characteristic seems to be a relevant influence factor in qualitative studies.

Keywords: Controlled State-Change method. Determining imbalance contributions. Imbalance source identification. Superposition method. Unbalance emission assessment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2. 1 – Distribuição do levantamento bibliográfico de acordo com o número de citações em trabalhos.....	33
Figura 2. 2 – Representação do método da Corrente Conforme e Não Conforme.....	38
Figura 2. 3 – Representação do método do Fluxo de Potência Trifásico.	41
Figura 2. 4 – Representação do método IEC: (a) pré-conexão da instalação; (b) pós-conexão da instalação.	43
Figura 3. 1 – Equivalente elétrico representativo utilizado nos estudos computacionais e laboratoriais.	48
Figura 3. 2 – Magnitudes das correntes conforme e não conforme – computacional.	50
Figura 3. 3 – Parcelas de responsabilidade de acordo com método da Corrente Conforme e Não Conforme – computacional.	51
Figura 3. 4 – Potência ativa de sequência negativa – computacional.....	52
Figura 3. 5 – Atribuição de responsabilidades de acordo com o método do Fluxo de Potência Trifásico – computacional.	53
Figura 3. 6 – Magnitudes dos fatores de desequilíbrio de tensão do supridor e consumidor – computacional.....	54
Figura 3. 7 – Parcelas de responsabilidade de acordo com o método IEC – computacional. ..	55
Figura 3. 8 – Esquema laboratorial: 1) microcomputador; 2) fonte controlada; 3) indutores; 4) PAC; 5) transformador; 6) motor de indução trifásico; 7) banco resistivo.	56
Figura 3. 9 – Magnitudes das correntes conforme e não conforme – laboratorial.	57
Figura 3. 10 – Parcelas de responsabilidade de acordo com o método da Corrente Conforme e Não Conforme – laboratorial.	58
Figura 3. 11 – Potência Ativa de Sequência Negativa – laboratorial.	59
Figura 3. 12 – Atribuição de responsabilidade de acordo com o método do Fluxo de Potência Trifásico – laboratorial.	60
Figura 3. 13 – Magnitudes dos fatores de desequilíbrio de tensão do supridor e consumidor – laboratorial.....	61
Figura 3. 14 – Parcelas de responsabilidade de acordo com o método IEC – laboratorial.	62
Figura 4. 1 – Arranjo representativo do ponto de acoplamento entre o sistema supridor e consumidor.	66
Figura 4. 2 – Circuito equivalente de Norton no domínio das componentes simétricas.	66

Figura 4. 3 – Circuito equivalente de Norton representando as contribuições individuais: (a) supridor e (b) consumidor.....	67
Figura 4. 4 – Equivalente elétrico representativo utilizado nos estudos computacionais e laboratoriais.	71
Figura 4. 5 – Magnitudes das tensões de sequência negativa no PAC – computacional.	73
Figura 4. 6 – Comparação entre o FDv obtido pela operação individual de cada fonte de desequilíbrio e o calculado pelo método da Superposição – computacional.	74
Figura 4. 7 – Parcelas de responsabilidade de acordo com o método da Superposição – computacional.....	75
Figura 4. 8 – Magnitudes das tensões de sequência negativa no PAC – laboratorial.	77
Figura 4. 9 – Comparação entre o FDv obtido pela operação individual de cada fonte de desequilíbrio e o calculado pelo método da Superposição – laboratorial.....	78
Figura 4. 10 – Parcelas de responsabilidade de acordo com o método da Superposição – laboratorial.....	79
Figura 5. 1 – Representação do método da Mudança de Estado Controlada.	84
Figura 5. 2 – Circuito equivalente de Norton representativo do método MEC: (a) pré-conexão da fonte de perturbação; (b) pós-conexão da fonte de perturbação.....	84
Figura 5. 3 – Diagrama representativo do capacitor monofásico conectado entre a Fase A e o terra.....	88
Figura 5. 4 – Diagrama representativo do capacitor monofásico conectado entre as Fases A e B.	89
Figura 5. 5 – Equivalente elétrico representativo utilizado nos estudos computacionais e laboratoriais.	92
Figura 5. 6 – Magnitudes das correntes de sequência negativa do supridor e consumidor – computacional.....	94
Figura 5. 7 – Magnitudes das tensões de sequência negativa no PAC (método MEC-CM amparado pela Superposição) – computacional.	95
Figura 5. 8 – Comparação entre o FDv obtido pela operação individual de cada fonte de desequilíbrio e o calculado pelo método MEC-CM e Superposição – laboratorial.	96
Figura 5. 9 – Parcelas de responsabilidade de acordo com o método MEC-CM – computacional.	97
Figura 5. 10 – Magnitudes das correntes de sequência negativa do supridor e consumidor – laboratorial.....	99

Figura 5. 11 – Magnitudes das tensões de sequência negativa no PAC (método MEC-CM amparado pela Superposição) – laboratorial.	100
Figura 5. 12 – Comparaçao entre o FDv obtido pela operação individual de cada fonte de desequilíbrio e o calculado pelo método MEC-CM e Superposição – laboratorial.	101
Figura 5. 13 – Parcelas de responsabilidade de acordo com o método MEC-CM – laboratorial.	102
Figura B. 1 – Representação da projeção das componentes vetoriais individuais sobre o vetor total.	116
Figura C. 1 – Equivalente elétrico representativo utilizado nos estudos computacionais e laboratoriais.	118
Figura C. 2 – Equivalente elétrico implementado no programa MATLAB/Simulink®.	119
Figura C. 3 – Esquema laboratorial: microcomputador.	120
Figura C. 4 – Esquema laboratorial: indutores.	121
Figura C. 5 – Esquema laboratorial: a) fonte controlada; b) transformador; c) carga resistiva.	121
Figura C. 6 – Esquema laboratorial: a) motor de indução trifásico (MIT); b) painel de acionamento do MIT.	121
Figura C. 7 – Transdutores utilizados nas medições: a) tensão; b) corrente.	122
Figura C. 8 – Placa de aquisição CP1103 – dSPACE.	122
Figura E. 1 – Comparaçao entre os resultados para o Subcaso 1.1 – computacional.	129
Figura E. 2 – Comparaçao entre os resultados para o Subcaso 1.2 – computacional.	130
Figura E. 3 – Comparaçao entre os resultados para o Subcaso 1.3 – computacional.	130
Figura E. 4 – Comparaçao entre os resultados para o Subcaso 1.4 – computacional.	130
Figura E. 5 – Comparaçao entre os resultados para o Subcaso 1.5 – computacional.	131
Figura E. 6 – Comparaçao entre os resultados para o Subcaso 2.1 – computacional.	131
Figura E. 7 – Comparaçao entre os resultados para o Subcaso 2.2 – computacional.	131
Figura E. 8 – Comparaçao entre os resultados para o Subcaso 1.1 – laboratorial.	132
Figura E. 9 – Comparaçao entre os resultados para o Subcaso 1.2 – laboratorial.	132
Figura E. 10 – Comparaçao entre os resultados para o Subcaso 1.3 – laboratorial.	133
Figura E. 11 – Comparaçao entre os resultados para o Subcaso 1.4 – laboratorial.	133
Figura E. 12 – Comparaçao entre os resultados para o Subcaso 1.5 – laboratorial.	133
Figura E. 13 – Comparaçao entre os resultados para o Subcaso 2.1 – laboratorial.	134
Figura E. 14 – Comparaçao entre os resultados para o Subcaso 2.2 – laboratorial.	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 – Síntese dos estudos de casos.....	48
Tabela 3. 2 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva desconectada – computacional.....	49
Tabela 3. 3 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva conectada – computacional.....	49
Tabela 3. 4 – Resultados do método da Corrente Conforme e Não Conforme – computacional.....	50
Tabela 3. 5 – Resultados do método do Fluxo de Potência Trifásico – computacional.....	52
Tabela 3. 6 – Resultados do método IEC – computacional.....	54
Tabela 3. 7 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva desconectada – laboratorial.....	56
Tabela 3. 8 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva conectada – laboratorial.	57
Tabela 3. 9 – Resultados do método da Corrente Conforme e Não Conforme – laboratorial..	57
Tabela 3. 10 – Resultados do método do Fluxo de Potência Trifásico – laboratorial.....	59
Tabela 3. 11 – Resultados do método IEC – laboratorial.....	61
Tabela 4. 1 – Síntese dos estudos de casos.....	71
Tabela 4. 2 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva desconectada – computacional.....	72
Tabela 4. 3 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva conectada – computacional.....	72
Tabela 4. 4 – Resultados do método da Superposição – computacional.....	72
Tabela 4. 5 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva desconectada – laboratorial.....	76
Tabela 4. 6 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva conectada – laboratorial.	76
Tabela 4. 7 – Resultados do método da Superposição – laboratorial.....	76
Tabela 5. 1 – Arranjo do capacitor monofásico (CM).....	92
Tabela 5. 2 – Síntese dos estudos de casos.....	92
Tabela 5. 3 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva desconectada – computacional.....	93
Tabela 5. 4 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva desconectada e CM conectado – computacional.....	93

Tabela 5. 5 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva conectada – computacional.....	93
Tabela 5. 6 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva e CM conectados – computacional.....	93
Tabela 5. 7 – Resultados do método MEC-CM – computacional	94
Tabela 5. 8 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva desconectada – laboratorial.....	98
Tabela 5. 9 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva desconectada e CM conectado – computacional.....	98
Tabela 5. 10 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva conectada – laboratorial.....	98
Tabela 5. 11 – Tensões e correntes no PAC com a carga resistiva e CM conectados – laboratorial.....	98
Tabela 5. 12 – Resultados do método MEC-CM – laboratorial	99
Tabela A. 1 – Lista de referências atreladas à determinação das contribuições sobre os desequilíbrios.....	113
Tabela B. 1 – Correlação entre as variáveis definidas pelos métodos e as componentes vetoriais representativas	117
Tabela C. 1 – Sistema supridor.....	118
Tabela C. 2 – Transformador.....	119
Tabela C. 3 – Motor de indução trifásico	119
Tabela C. 4 – Carga resistiva variável (desequilibrada).....	119
Tabela D. 1 – Tensões de parametrização da fonte de suprimento – Caso 1	123
Tabela D. 2 – Tensões de parametrização da fonte de suprimento – Caso 2	124
Tabela D. 3 – Síntese dos estudos de casos.....	124
Tabela D. 4 – Tensões e correntes no PAC com a carga resistiva desconectada – computacional.....	125
Tabela D. 5 – Tensões e correntes no PAC com a carga resistiva desconectada e CM conectado – computacional.....	125
Tabela D. 6 – Tensões e correntes no PAC com a carga resistiva conectada – computacional.....	126
Tabela D. 7 – Tensões e correntes no PAC com a carga resistiva e CM conectados – computacional.....	126

Tabela D. 8 – Tensões e correntes no PAC com a carga resistiva desconectada – laboratorial.....	127
Tabela D. 9 – Tensões e correntes no PAC com a carga resistiva desconectada e CM conectado – laboratorial.....	127
Tabela D. 10 – Tensões e correntes no PAC com a carga resistiva conectada – laboratorial.	127
Tabela D. 11 – Tensões e correntes no PAC com a carga resistiva e CM conectados – laboratorial.....	128

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>a</i>	Operador Rotacional
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BT	Baixa Tensão
C	Capacitância
CCNC	Corrente Conforme e Não Conforme
CIGRÉ	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques a Haute Tension</i>
CM	Capacitor Monofásico
FD	Fator de Desequilíbrio
FDv	Fator de Desequilíbrio de Tensão
FDi	Fator de Desequilíbrio de Corrente
FPT	Fluxo de Potência Trifásico
GD	Geração Distribuída
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MEC	Mudança de Estado Controlada
MEC-CM	Mudança de Estado Controlada via Chaveamento de Capacitor Monofásico
MT	Média Tensão
NT	Nota Técnica
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico
TR	<i>Technical Report</i>
ω	Frequência Angular

SUMÁRIO

UNIDADE 1

INTRODUÇÃO.....	22
1.1 Considerações iniciais	22
1.2 Contextualização do tema e escopo da pesquisa	27
1.3 Objetivos e contribuições	29
1.4 Estrutura do trabalho.....	30

UNIDADE 2

ESTADO DA ARTE: DETERMINAÇÃO DAS CONTRIBUIÇÕES SOBRE OS DESEQUILÍBRIOS.....	32
2.1 Considerações iniciais	32
2.2 Revisão Bibliográfica	32
2.3 Fundamentos sobre as principais metodologias	37
2.3.1 Método da Corrente Conforme e Não Conforme	38
2.3.2 Método do Fluxo de Potência Trifásico.....	40
2.3.3 Método IEC	42
2.4 Considerações finais	44

UNIDADE 3

AVALIAÇÃO DAS PRINCIPAIS METODOLOGIAS PARA A DETERMINAÇÃO DAS CONTRIBUIÇÕES SOBRE OS DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO.....	46
3.1 Considerações iniciais	46
3.2 Estudos investigativos	47
3.3 Avaliação computacional.....	49
3.3.1 Método da Corrente Conforme e Não Conforme – computacional.....	49
3.3.2 Método do Fluxo de Potência Trifásico – computacional	52
3.3.3 Método IEC – computacional	54
3.4 Avaliação laboratorial.....	56
3.4.1 Método da Corrente Conforme e Não Conforme – laboratorial.....	57

3.4.2	Método do Fluxo de Potência Trifásico – laboratorial	59
3.4.3	Método IEC – laboratorial	60
3.5	Considerações finais	62

UNIDADE 4

MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO PARA A DETERMINAÇÃO DAS CONTRIBUIÇÕES SOBRE OS DESEQUILÍBRIOS

4.1	Considerações iniciais	64
4.2	Aspectos gerais	64
4.3	Desenvolvimentos matemáticos	65
4.4	Quanto ao critério para a determinação das impedâncias	69
4.5	Estudos investigativos	71
4.6	Avaliação computacional.....	72
4.7	Avaliação laboratorial.....	75
4.8	Considerações finais	80

UNIDADE 5

MÉTODO DA MUDANÇA DE ESTADO CONTROLADA PARA A DETERMINAÇÃO DAS CONTRIBUIÇÕES SOBRE OS DESEQUILÍBRIOS

5.1	Considerações iniciais	81
5.2	Aspectos gerais	82
5.3	Desenvolvimentos matemáticos	82
5.4	Método da Mudança de Estado Controlada via Chaveamento de Capacitor Monofásico (MEC-CM)	87
5.6	Estudos investigativos	91
5.7	Avaliação computacional.....	92
5.8	Avaliação laboratorial.....	97
5.9	Considerações finais	103

UNIDADE 6

CONCLUSÕES	105
------------------	-----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
----------------------------------	-----

APÊNDICES

APÊNDICE A	113
TRABALHOS RELACIONADOS À DETERMINAÇÃO DAS CONTRIBUIÇÕES SOBRE OS DESEQUILÍBRIOS	113
APÊNDICE B	116
CÁLCULO DOS PERCENTUAIS DE RESPONSABILIDADE	116
APÊNDICE C	118
ARRANJO ELÉTRICO UTILIZADO NOS ESTUDOS	118
APÊNDICE D	123
DESCRIÇÃO DOS ESTUDOS DE CASOS E VALORES DE REFERÊNCIA	123
APÊNDICE E	129
COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DAS METODOLOGIAS	129

INTRODUÇÃO

1

1.1 Considerações iniciais

O aumento da demanda energética global e as preocupações com as questões climáticas têm contribuído, sobremaneira, para a diversificação da matriz energética e para o crescimento do número de empreendimentos de geração de energia elétrica centralizada e distribuída.

No Brasil, é fato que os clássicos sistemas centralizados se desenvolveram com as grandes centrais de geração de energia elétrica em sua forma trifásica, a exemplo das termoelétricas e hidrelétricas. Na atualidade, com o desenvolvimento de novas tecnologias, o uso de outros recursos renováveis para a produção de energia elétrica tem se popularizado, com destaque as fontes eólica e fotovoltaica. Estas filosofias já representam cerca de 11% da matriz energética brasileira, o que equivale a 19 GW de potência instalada. Além disso, as previsões apontam para um incremento substancial nos próximos anos, com mais de 4,5 GW de potência outorgada aos empreendimentos em construção (ANEEL, 2020). De fato, estes recursos possibilitaram a diversificação da matriz energética e a expansão dos empreendimentos de geração centralizada, os quais, via de regra, são construtivamente alocados em regiões distantes dos maiores centros de consumo.

Aliada às principais fontes de geração de energia centralizada, tem-se a crescente penetração dos reforços oriundos dos complexos de geração distribuída (GD), os quais já contam com mais de 2,4 GW de potência instalada em território nacional e com grandes perspectivas de crescimento (ANEEL, 2018). Via de regra, tais empreendimentos se tratam de arranjos fotovoltaicos projetados para gerar energia nas proximidades do local de consumo e, para atender aos mais diversos tipos de consumidores, estes podem ser conectados em redes com topologia monofásica, bifásica ou trifásica.

Dessarte, é fato que existem inúmeros atrativos associados aos programas de reforços e expansão do sistema elétrico, cujo propósito é fornecer energia elétrica com desempenho adequado ao maior número de consumidores, respeitando os requisitos de qualidade, continuidade e segurança operacional (Brasil, 2020).

No quesito qualidade do produto – energia elétrica –, a incorporação de novas filosofias de geração, somada às ampliações dos sistemas de transmissão e distribuição e à crescente utilização de cargas com características operacionais diversas, têm provocado o aumento da complexidade dos sistemas e consequente danos aos suprimentos elétricos. Isso ocorre devido à presença de distúrbios oriundos da operação dos diversos componentes inerentes a estes sistemas.

No contexto dos fenômenos de regime permanente, destacam-se os desequilíbrios, os quais são caracterizados pela disparidade entre as tensões e/ou correntes trifásicas. Estas assimetrias podem se manifestar e termos das magnitudes e/ou ângulos de fase, quando estes resultam em defasagens diferentes de 120º (ANEEL, 2017).

Na prática, pode-se afirmar que os desequilíbrios são inerentes a qualquer sistema que opera com topologia trifásica, visto que estes são constituídos de elementos físicos cujas características construtivas apresentam desvios naturais daquelas que se esperaria de um componente ideal. Adicionalmente, existem fatores operacionais e topológicos que podem potencializar estas assimetrias, impactando nos níveis de desequilíbrios desde as etapas de produção, transporte e utilização da energia gerada, quer seja por sistemas centralizados e/ou distribuídos.

Quanto aos sistemas de geração centralizada, quando estes se encontram física e eletricamente distantes dos centros consumo, o transporte de energia é tipicamente realizado por meio de longas linhas transmissão. Assim, caso a transposição entre as fases não seja realizada de forma efetiva, isso resulta assimetrias nas impedâncias longitudinais e admitâncias transversais dos condutores, provocando desequilíbrios de corrente e, também, de tensão em seus terminais (Flores, 2006). Longas linhas de distribuição rurais também podem impactar diretamente nos níveis de desequilíbrios existentes (Jouanne, von e Banerjee, 2001).

Atualmente, sabe-se que os empreendimentos de microgeração e minigeração distribuída também exercem influência sobre a intensificação dos desequilíbrios nos sistemas *On-grid*, visto que, via de regra, estes complexos são dispostos em arranjos monofásicos.

Complementarmente às constatações suprapostas, os processos de conexão e/ou desconexão de cargas monofásicas e trifásicas desequilibradas ainda são um dos principais responsáveis pelas assimetrias nas correntes drenadas pelas instalações, o que também provoca desequilíbrios de tensão (Czarnecki, Hsu e Chen, 1995; Ferreira Filho, 2008; Souto, 2001).

Uma vez manifestados, os distúrbios podem provocar uma série de prejuízos aos sistemas elétricos como um todo. Quanto aos efeitos nos equipamentos elétricos, sabe-se que pequenos percentuais de desequilíbrio de tensão são capazes de provocar elevados níveis de

desequilíbrio de corrente, sobretudo em máquinas rotativas, devido a sua baixa impedância de sequência negativa. Além disso, as correntes de sequência negativa provocam o surgimento de campo magnético girante em sentido contrário ao de sequência positiva, causando conjugados amortecedores, vibrações, sobreaquecimentos, perdas adicionais e redução de vida útil da máquina (Jouanne, von e Banerjee, 2001).

No tocante aos condutores elétricos, os desequilíbrios são capazes de provocar o sobreaquecimento de condutores de fase e neutro e o a aumento de perdas. Isso ocorre em virtude da condução de correntes adicionais àquelas previstas em projeto, o que impacta negativamente na ampacidade e vida útil dos condutores (Arão, 2014).

Não obstante as implicações ora postas, ressalta-se que, sob condições de suprimento desequilibradas, a operação de conversores eletrônicos pode propiciar o surgimento de harmônicos não-característicos pela ocorrência de disparos assimétricos. Nesse sentido, além do aumento da complexidade do problema, maiores investimentos podem ser requeridos para a mitigação harmônica (Grotzbach e Xu, 1993; Nascimento *et al.*, 2017).

Com o intuito de monitorar os distúrbios, na literatura, são apresentadas estratégias para o cálculo de indicadores numéricos que expressam a intensidade do fenômeno em termos percentuais. O mais comum dos indicadores se trata do denominado fator de desequilíbrio de sequência negativa (ou apenas fator de desequilíbrio - FD), podendo ser calculado utilizando a magnitude das tensões (FDv) ou das correntes (FDi). Contudo, a grande maioria dos documentos norteadores sugerem o monitoramento das tensões, visto que o controle do fornecimento de energia elétrica tem correlação direta com este parâmetro (ANEEL, 2017; ONS, 2016).

Para o cálculo do fator de desequilíbrio, o método das Componentes Simétricas se apresenta como ferramenta amplamente consolidada. Esta metodologia é fundamentada na decomposição de um sistema trifásico desequilibrado em três sistemas de fasores balanceados, os quais são denominados por componentes de sequência positiva, negativa e zero (Fortescue, 1918). O método consiste em obter a relação percentual entre as magnitudes das tensões de sequência negativa e positiva (ANEEL, 2017; ONS, 2016). Não obstante, o procedimento permite a determinação do fator de desequilíbrio de sequência zero (relação entre as tensões de sequência zero e positiva), podendo também ser aplicado para o cálculo dos indicadores de corrente.

Alternativamente, o indicador FDv pode ser calculado a partir do emprego direto das magnitudes das tensões de linha, dispensando a necessidade dos ângulos de defasagem entre as tensões no barramento de interesse (ANEEL, 2017). Tais considerações são de grande utilidade

para a avaliação das anomalias em campo, visto que nem todos os medidores são capazes de fornecer as magnitudes e ângulos de fase das grandezas (Arão, 2014). Adicionalmente, salienta-se que esta metodologia, conhecida como método CIGRÉ, retorna o mesmo valor percentual do método das Componentes Simétricas (IEEE Std 1159TM, 2009).

Uma vez constatadas as implicações da propagação dos desequilíbrios pelo sistema elétrico, orientações nacionais e internacionais são definidas com a finalidade de fornecer valores de referência para os indicadores de conformidade.

Em um contexto global, segundo as orientações europeias, o fator de desequilíbrio deve ser limitado em 2% em sistemas de baixa tensão (BT), tendo a possibilidade de emprego dos métodos CIGRÉ e Componentes Simétricas para o cálculo do FDv (IEC/TR 61000-2-2:2002, 2002; IEC 61000-2-12:2003, 2003). Similarmente, o padrão norte americano orienta que os percentuais de desequilíbrios de tensão sejam monitorados utilizando o método das Componentes Simétricas, visto que o mesmo apresenta uma correlação física direta com fenômeno sem quaisquer aproximações. Nesse sentido o fator de desequilíbrio deve ser limitado em 2%, sendo desejável um valor inferior a 1% (IEEE Std 1159TM, 2009).

No Brasil, em conformidade com Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico (PRODIST), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) orienta que os percentuais de desequilíbrio de tensão sejam limitados a 3% em complexos com tensões inferiores a 1 kV e 2% para sistemas entre 1 kV e 230 kV. O fator de desequilíbrio pode ser calculado utilizando o método das Componentes Simétricas ou o método CIGRÉ (ANEEL, 2017). No que tange a Rede Básica, de acordo com os Procedimentos de Rede – Submódulo 2.8 –, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) recomenda que os limites individuais e globais para o FDv não ultrapassem os percentuais de 1,5% e 2,0%, respectivamente, os quais devem ser obtidos em consonância com o método das Componentes Simétricas (ONS, 2016).

Nas situações em que rede apresenta violação dos limites estipulados, objetivando compatibilizar os níveis de desequilíbrios existentes aos valores recomendados, a bibliografia contempla um número substancial de trabalhos envolvendo estratégias de mitigação, as quais devem ser empregadas de acordo com a natureza e origem do problema.

No contexto dos complexos de transmissão tradicionalmente existentes, historicamente reconhece-se a aplicação das técnicas baseadas na transposição de condutores, cujo propósito é balancear a reatância indutiva série e a reatância capacitiva *shunt* das linhas de transmissão. Em decorrência do aumento progressivo do número de subestações, tem se tornado cada vez mais inviável realizar múltiplas transposições entre cada estação. Além disso, este procedimento

poderia impactar negativamente na qualidade do serviço, uma vez que pode causar certa confusão no momento do restabelecimento imediato da energia após uma falta de emergência (Jouanne, von e Banerjee, 2001).

No tocante aos sistemas GD, há grandes esforços na concepção de estratégias para a correta distribuição e balanceamento das fases (IEEE Std 1547.7TM, 2013). Todavia, sua característica operacional intermitente dificulta o estabelecimento de soluções efetivas para abrandar o problema.

No que concerne às soluções tipicamente empregadas pelos agentes de distribuição de energia, tem-se o processo de remanejamento manual ou automático das cargas, de forma a propiciar o equilíbrio entre as correntes drenadas por cada fase. Neste particular, estratégias de reconfiguração de carga são tipicamente empregadas para otimizar os chaveamentos de alimentadores. Para tanto, são utilizados algoritmos de estimação de carga que fornecem informações da carga para cada instante de avaliação. Contudo, uma vez que tais processos são executados de forma discreta, estes procedimentos não são capazes de realizar o balanceamento dinâmico de cargas (Broadwater *et al.*, 1993).

Por outro lado, entre as mais diversas possibilidades mitigatórias cabidas aos consumidores que operam com carregamentos assimétricos, destacam-se os compensadores de desequilíbrio passivos (Chen, Lee e Chen, 1999; Czarnecki, 1989; Czarnecki e Hsu, 1994; Gyugyi, Otto e Putman, 1978) e ativos (Bhavaraju e Enjeti, 1996; Campos *et al.*, 1994; Jacobina *et al.*, 2001).

As estratégias de compensação baseadas em componentes passivos são tipicamente formadas por indutores e capacitores que, quando conectados em paralelo com a carga, resultam um arranjo perfeitamente equilibrado sob a perspectiva do sistema de suprimento (Gregory, Oliveira e Oliveira, 2017). Não obstante o reconhecimento de que o mencionado conjunto é constituído de componentes fixos, salienta-se que os compensadores passivos são capazes de atender solicitações dinâmicas da carga quando utilizados juntamente com chaves estáticas controladas. Naturalmente, isso resulta no surgimento de distorções harmônicas, podendo requisitar o emprego de estratégias de mitigação (Jouanne, von e Banerjee, 2001). Diante dessa realidade, propostas de aprimoramentos são também elucidadas em (Czarnecki, Hsu e Chen, 1995; Das, Chatterjee e Goswami, 2016).

Alternativamente, em virtude dos avanços das tecnologias de materiais e do surgimento de semicondutores com capacidade de chaveamento em altas frequências, os compensadores ativos têm ganhado visibilidade nas últimas décadas. Tais dispositivos, a depender da sua topologia, geram tensões ou correntes desequilibradas com polaridade oposta às originadas pela

carga desbalanceada, resultando no cancelamento das componentes de sequência negativa no ponto de conexão do equipamento (Bhavaraju e Enjeti, 1996; Campos *et al.*, 1994; Hanelka e Varetsky, 2011).

À luz das constatações suprapostas, para que sejam incorporadas soluções pertinentes à mitigação dos fenômenos ora tratados e considerando que os níveis de desequilíbrio se tratam de uma composição de efeitos de múltiplas fontes, torna-se imperativo o estabelecimento de meios que permitam determinar as contribuições oriundas dos agentes envolvidos. Este procedimento irá, certamente, contribuir para dirimir eventuais conflitos entre as partes e conduzir a uma solução harmoniosa no que tange aos investimentos necessários para a compatibilização dos níveis de desequilíbrio existentes.

1.2 Contextualização do tema e escopo da pesquisa

A temática da determinação (ou compartilhamento) das contribuições sobre os desequilíbrios em sistemas elétricos trifásicos surge da necessidade de se estabelecer meios para determinar as contribuições individuais dos agentes que compartilham um mesmo barramento elétrico e que se encontra em situação de violação. Neste sentido, para a compatibilização dos níveis excedentes aos limites regulamentados, é imperativo o emprego de estratégias de mitigação com a finalidade de evitar prejuízos de caráter financeiro e operacional às instalações. Portanto, entende-se que o processo de compartilhamento de responsabilidades pela origem e propagação dos distúrbios trata-se de uma etapa anteposta ao estabelecimento de soluções pertinentes à mitigação do problema, a fim de realizar o compartilhamento equânime dos custos de implementação da estratégia entre a partes.

Em teoria, por se tratar de um problema que ocorre em sistemas elétricos com suprimentos trifásicos, é comum inferir que a responsabilidade pela origem dos distúrbios poder-se-ia ser atribuída unicamente às cargas que operam com topologia trifásica não ideal, ou seja, aquelas cujas impedâncias por fase não são simétricas entre si. Todavia, por ser de natureza propagativa, os desequilíbrios resultam da composição de efeitos oriundos das diferentes partes que constituem um dado sistema (do fornecimento, ao transporte e consumo), o que agrupa maior complexidade aos processos de determinação dos percentuais de responsabilidade entre os envolvidos.

Dessarte, é justamente neste contexto que a presente pesquisa se encontra inserida, na busca por estratégias capazes de determinar as contribuições individuais proporcionais àquelas advindas de quaisquer fontes precursoras de desequilíbrios, sejam elas à montante e/ou à jusante

do local de monitoramento. Estas partes, por sua vez, são aqui tratadas por supridor e consumidor, todavia, esta convenção é genérica e tem propósito meramente didático. Ademais, este procedimento deve apresentar um conteúdo teórico-prático consistente, a fim de atender as demandas por parte do setor elétrico sem grandes limitações.

É oportuno salientar que, de fato, existem relatórios internacionais contendo orientações e procedimentos para limitar a propagação de distúrbios de instalações potencialmente perturbadoras. Porém, tais documentos se restringem às etapas antepostas à plena operação do sistema. Por conseguinte, ainda que existam procedimentos que, a priori, se apresentam como factíveis para atender aos propósitos aqui definidos, até o momento, não há metodologias consolidadas.

Não obstante o reconhecimento das dificuldades nos processos de determinação das contribuições oriundas de múltiplas fontes de assimetrias, alguns fatores de influência podem, ainda, adicionar maior grau de incerteza à real manifestação do problema, com destaque aos seguintes:

- Representação das impedâncias: A representação das impedâncias em estudos de qualidade da energia elétrica trata-se de um fator de destaque. Embora algumas simplificações sejam usuais, isso pode negligenciar aspectos relevantes no processo de compartilhamento de responsabilidades. Os motores de indução trifásicos, por exemplo, os quais são tipicamente utilizados em instalações industriais, apresentam uma baixa impedância de sequência negativa quando comparada a respectiva componente de sequência positiva. Dessa forma, em instalações com forte presença de cargas motrizes, considerar as impedâncias de sequência positiva e negativa como análogas acarreta prejuízos no processo de determinação das contribuições sobre os desequilíbrios. Nesse sentido, ressalta-se que os procedimentos propostos neste trabalho dispensam a necessidade das simplificações mencionadas;
- Desequilíbrios pré-existentes: é fato que as redes elétricas, via de regra, apresentam desequilíbrios pré-existentes à conexão de uma dada instalação. Isso ocorre em função das interações entre as assimetrias oriundas de diferentes fontes, sejam estas provenientes dos sistemas GD, transmissão, distribuição e demais consumidores. Nessas circunstâncias, o comportamento das cargas pode ser discrepante daquele que se esperaria caso esta fosse submetida a um suprimento ideal, o que impacta na real contribuição da carga sobre o indicador global;

- Nível de curto-circuito: mesmo em condições de suprimento idealmente equilibradas, o nível de curto-circuito do sistema pode exercer influência sobre o fator de desequilíbrio de tensão. Sistemas com baixos níveis de curto-circuito tendem a ser mais susceptíveis aos desequilíbrios. De fato, uma carga que não necessariamente é capaz de provocar um alto fator de desequilíbrio de tensão em redes tidas como fortes pode causar a violação dos limites regulamentados quando conectada a um barramento com baixo nível de curto-circuito;
- Dinamicidade do sistema: O comportamento dinâmico do sistema, seja em função das variações da rede de conexão, ou da operação de cargas e gerações intermitentes, dificulta a avaliação dos distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica em regime permanente. Quando a rede apresenta forte dinamicidade, o compartilhamento de responsabilidades sobre os desequilíbrios se torna um assunto de grande complexidade, visto que as características do sistema sob avaliação podem sofrer mudanças substanciais em um curto intervalo de tempo. É oportuno salientar que os procedimentos propostos nesta tese partem da premissa de que a rede não apresenta forte dinamicidade;
- Interações com outros distúrbios: Não obstante a complexidade da temática aqui tratada, salienta-se que a presença de outros distúrbios de regime permanente agrupa maior número de variáveis não conhecidas ao problema. Nesse contexto, cabe ressaltar que não há um consenso na literatura sobre a avaliação conjunta de diferentes distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica.

Diante das considerações supracitadas, este trabalho não pretende esgotar as discussões concernentes à temática aqui focada. Todavia, as contribuições oferecidas por esta tese vão de encontro às demandas do setor elétrico e, portanto, são de grande relevância para a comunidade científica.

1.3 Objetivos e contribuições

Uma vez identificada a matéria na qual a pesquisa encontra-se alicerçada, o propósito geral desta tese de doutorado é versar sobre o tema aqui denominado por: determinação das contribuições sobre os desequilíbrios em sistemas elétricos trifásicos. Nesse sentido, além de

tratar das particularidades que envolvem a matéria em questão, esta tese de doutorado tem como objetivos específicos:

- Contribuir com o levantamento bibliográfico atualizado e identificar os principais procedimentos existentes na literatura para a determinação das contribuições sobre os desequilíbrios;
- Propor metodologia teórica consistente que possa ser empregada como instrumento de referência para avaliação dos procedimentos de compartilhamento das contribuições sobre os desequilíbrios;
- Propor metodologia prática consistente para a determinação das parcelas de responsabilidade sobre os desequilíbrios de tensão em ambientes práticos;
- Realizar avaliação crítica de desempenho qualitativo das principais estratégias difundidas na literatura e, também, das metodologias propostas quanto ao aspecto das contribuições de tensão.

Dessarte, ressalta-se que este trabalho oferece as seguintes contribuições de caráter inovador:

- Proposição de método teórico para aplicação no contexto da determinação das contribuições sobre os desequilíbrios embasado em princípios clássicos de circuitos elétricos;
- Proposição de método prático que, por meio de recursos físicos e matemáticos, possibilita o compartilhamento de responsabilidades sobre os desequilíbrios de tensão em ambientes práticos;

1.4 Estrutura do trabalho

Em consonância com o exposto, além do presente conteúdo de caráter introdutório, esta tese encontra-se estruturada da seguinte forma:

2 Estado da Arte: Determinação das Contribuições sobre os Desequilíbrios: Esta unidade destina-se à apresentação do estado da arte sobre a temática da determinação das contribuições sobre os desequilíbrios em sistemas elétricos trifásicos, contemplando as discussões de maior relevância a respeito do tema. Além disso, após a identificação

das principais metodologias existentes na literatura, são apresentados os fundamentos físicos e matemáticos que norteiam estes procedimentos, os quais são aqui denominados por: método da Corrente Conforme e Não Conforme, método do Fluxo de Potência Trifásico e método IEC.

- 3 Avaliação das Principais Metodologias para a Determinação das Contribuições sobre os Desequilíbrios de Tensão:** Nesta etapa, são realizados estudos de caráter computacional e laboratorial para a avaliação da resposta das metodologias salientadas na Unidade 2. Os estudos são conduzidos considerando diferentes condições operativas associadas com a origem e intensidade dos desequilíbrios.
- 4 Método da Superposição para a Determinação das Contribuições sobre os Desequilíbrios:** Esta unidade é dedicada à proposição de metodologia teórica para a determinação dos percentuais de contribuição sobre os desequilíbrios manifestados nas redes elétricas, a qual baseia-se em princípios clássicos de circuitos elétricos. Nesse sentido, além da apresentação dos seus fundamentos físicos e matemáticos, são realizados estudos computacionais e laboratoriais para a avaliação da metodologia.
- 5 Método da Mudança de Estado Controlada para a Determinação das Contribuições sobre os Desequilíbrios:** Nesta etapa, é proposta uma metodologia prática que se baseia na mudança do estado operativo do sistema. A estratégia se trata de uma abordagem matemática que, por meio de recursos físicos, possibilita a determinação das contribuições individuais sobre os desequilíbrios de tensão. Dessarte, somada a apresentação dos fundamentos que norteiam a estratégia, são realizados estudos computacionais e laboratoriais com a finalidade de avaliar o método.
- 6 Conclusões:** Esta unidade encontra-se direcionado à apresentação e discussão das principais constatações levantadas ao longo do trabalho.

Referências Bibliográficas: Nesta etapa, são destacadas as referências bibliográficas que ampararam o desenvolvimento desta tese de doutorado.

Apêndices: A fim de consubstanciar esclarecimentos complementares, nesta etapa, são apresentados os apêndices do trabalho.

ESTADO DA ARTE: DETERMINAÇÃO DAS CONTRIBUIÇÕES SOBRE OS DESEQUILÍBRIOS

2

2.1 Considerações iniciais

Em harmonia com a estruturação previamente exposta, o presente conteúdo encontra-se alicerçado na apresentação do estado da arte sobre o tema central desta tese de doutorado, qual seja, a determinação das contribuições sobre os desequilíbrios em sistemas elétricos trifásicos.

Dessarte, nesta unidade, é apresentada uma síntese da revisão bibliográfica concernente ao tema, explorando a progressão histórica dos procedimentos de maior reconhecimento na literatura.

Na sequência, são enunciados os desenvolvimentos físicos e matemáticos que norteiam os principais procedimentos identificados na literatura, a saber, método da Corrente Conforme e Não Conforme, método do Fluxo de Potência Trifásico e método IEC.

Adicionalmente, sob a perspectiva bibliográfica, ao longo do capítulo são tecidas discussões a respeito da consistência e limitação dos procedimentos salientados, cujos aspectos de maior relevância são destacados ao final da unidade.

2.2 Revisão Bibliográfica

A partir de uma busca criteriosa em ferramentas de pesquisa que acessam trabalhos da área de Engenharia Elétrica, foram identificadas 37 bibliografias diretamente relacionadas à avaliação da origem e determinação das contribuições sobre os desequilíbrios. Ainda, maiores informações sobre estas referências são detalhadas no Apêndice A.

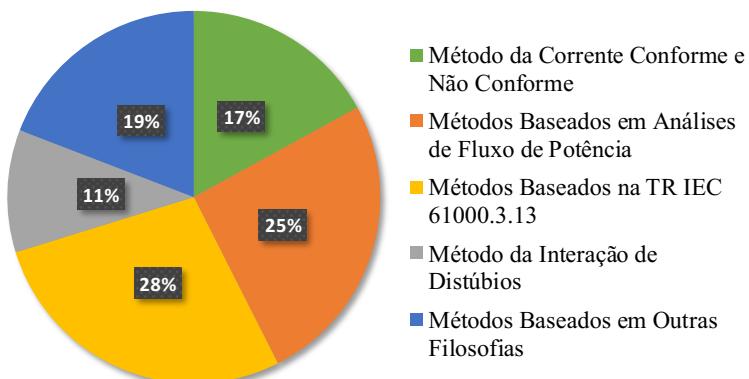
Os trabalhos avaliados estão subdivididos da seguinte forma:

- 14 artigos publicados em revistas de circulação nacional e internacional;

- 21 publicações em conferências de alcance nacional e internacional;
- 1 dissertação de mestrado nacional;
- 1 relatório técnico fornecido por organização internacional.

Genericamente, a bibliografia supracitada contempla uma variedade de trabalhos que abordam proposições, avanços, aplicações e estudos de desempenho comparativos de uma série de procedimentos para a avaliação da origem e emissão dos desequilíbrios nos sistemas elétricos trifásicos. A Figura 2.1 apresenta uma distribuição do levantamento bibliográfico, salientando as metodologias com maior reconhecimento e número de citações na literatura.

Figura 2. 1 – Distribuição do levantamento bibliográfico de acordo com o número de citações em trabalhos.



Fonte: Autoria própria.

Historicamente, reconhece-se que uma das primeiras pesquisas relacionadas ao tema concerne ao denominado método da Corrente Conforme e Não Conforme (CCNC) – *Conforming and Non-Conforming Current* – (Srinivasan e Jutras, 1998). O procedimento lança mão de uma abordagem interessante para a determinação das contribuições sobre alguns dos fenômenos capazes de deteriorar a qualidade da energia elétrica, quais sejam, distorções harmônicas, flutuações de tensão e desequilíbrios. A estratégia é essencialmente fundamentada na separação da corrente drenada por um conjunto de cargas hipotéticas, as quais são denominadas por corrente conforme e corrente não conforme (Srinivasan, 1998). A parcela dita conforme reproduz o mesmo padrão da tensão de alimentação, sendo, portanto, de responsabilidade do supridor. Por outro lado, a corrente não conforme é aquela que produz distúrbios adicionais aos originalmente presentes na tensão de suprimento, cuja incumbência é atribuída ao consumidor.

No que tange aos desequilíbrios, para se obter as contribuições do consumidor e supridor, basta realizar a decomposição das correntes trifásicas medidas no barramento de

interesse utilizando o método das Componentes Simétricas. Em seguida, utilizando um conjunto de equações algébricas, em teoria, é possível calcular as contribuições individuais de sequência zero e negativa.

Trabalhos evolvendo a aplicação do método da Corrente Conforme e Não Conforme apontaram fortes discrepâncias entre os resultados esperados e os propiciados pela metodologia (Gregory *et al.*, 2019; Gregory, Scotti e Oliveira, 2018). Além disso, tal inconsistência se acentua quando a carga apresenta característica fortemente motriz (Pinto, Mendonça e Moura, 2017). A provável explicação para este comportamento insatisfatório se baseia nas premissas adotadas para a representação das impedâncias de sequência zero, positiva e negativa, as quais são tratadas como análogas. Todavia, é cônito que máquinas rotativas, a exemplo dos motores de indução trifásicos, apresentam impedância de sequência negativa com magnitude muito inferior à de sequência positiva, o que compromete a resposta da metodologia.

Os métodos baseados em análises de fluxo de potência, como o próprio nome sugere, são procedimentos que avaliam a direcionalidade do fluxo de potência e a sua correlação com a fonte proeminente do distúrbio. No contexto aqui tratado, reconhece-se que a primeira proposta de uso desta ferramenta é datada em 2006 (Reineri *et al.*, 2006). No trabalho em questão, os autores avaliam computacionalmente a relação entre a direção do fluxo da potência aparente de sequência negativa e a fonte majoritária de desequilíbrios utilizando um sistema de distribuição radial. Adicionalmente, em 2010, foi sugerido um novo estudo semelhante ao anterior, porém, utilizando o sistema radial IEEE 4 barras (Seiphetlho e Rens, 2010). Neste, foi avaliada a correlação entre os fluxos independentes de potência ativa e reativa de sequência negativa e a propagação dos desequilíbrios. Os resultados preliminares apontaram que apenas a parcela ativa poderia, de fato, ter uma correlação com a fonte preponderante do distúrbio.

Nos anos seguintes, outros trabalhos foram publicados apresentando maiores contribuições ao método do Fluxo de Potência Trifásico (FPT), também popularizado como método do Fluxo de Potência Ativa de Sequência Negativa – *Negative-Sequence Active Power Stream* – (Hanzelka e Varetsky, 2011; Seiphetlho e Rens, 2011). Contudo, cabe ressaltar que a estratégia apenas indica o sentido dominante do fluxo de potência de sequência negativa, não sendo, portanto, aplicável aos processos de determinação dos percentuais de contribuição advindos de supridores e consumidores.

Além disso, estudos envolvendo aplicações práticas e labororiais evidenciaram que nem sempre o sentido do fluxo de potência ativa de sequência negativa é coincidente com a fonte predominante dos desequilíbrios (Arão, 2014; Gregory *et al.*, 2019; Gregory, Scotti e Oliveira, 2018; Seiphetlho e Rens, 2011). A justificativa levantada para esta limitação se deve

ao fato de que, no contexto prático, os sistemas elétricos apresentam um número substancialmente elevado de variáveis desconhecidas. Estes parâmetros, por sua vez, podem impactar no sinal das grandezas e, consequentemente, na direcionalidade do fluxo de potência de sequência negativa. Ademais, também foi constatado que não há uma clara correspondência entre o fator de desequilíbrio e a magnitude da potência ativa de sequência negativa, o que inviabiliza a definição de uma correlação entre as grandezas avaliadas (Seiphetlho e Rens, 2011).

Em 2008, foi publicada a primeira edição do atual relatório técnico TR IEC 61000.3.13:2012, no qual foi apresentada uma proposta para estimar os níveis máximos de emissão permitidos à uma instalação com característica perturbadora. Esta avaliação é feita no ponto de acoplamento comum (PAC) entre um supridor e um consumidor, a fim de respeitar os limites de compatibilidade eletromagnética no local de monitoramento. O procedimento é fundamentado na avaliação do fator desequilíbrio de tensão antes e após à conexão da unidade consumidora, sugerindo que a contribuição do supridor está diretamente associada ao indicador obtido quando o consumidor se encontra desconectado. Assim, a parcela do consumidor é calculada pela diferença entre os indicadores nas condições pós-conexão e pré-conexão da instalação (TR IEC 61000.3.13:2012, 2012).

De fato, o denominado método IEC impulsionou o aprimoramento e desenvolvimento de novos procedimentos (Jayatunga *et al.*, 2013, 2015; Jayatunga, Perera e Ciufo, 2012a), a exemplo do método CIGRÉ (CIGRE/CIRED JWG C4.109, 2011; Jayatunga, Perera e Ciufo, 2012b; Neto *et al.*, 2012). Este método lança mão de uma proposta para separar as contribuições individuais dos desequilíbrios oriundos das linhas de transmissão (impedâncias) e das tensões de suprimento (desequilíbrio pré-existente) e, também, daqueles provocadas pelas cargas. Todavia, é oportuno salientar que estas metodologias são restritas às etapas de planejamento e pré-operação de novas instalações, haja vista a necessidade de se obter o FDv antes da conexão do consumidor (Arão, 2014; Arão, Ferreira Filho e Mendonça, 2016). Adicionalmente, o método IEC gerou indagações no cenário científico devido ao seu desempenho insatisfatório em estudos laboratoriais. Tal inconsistência é atribuída à dinamicidade da rede que reflete em diferenças nas características do sistema antes e após à conexão da instalação (Arão, 2014; Arão, Ferreira Filho e Mendonça, 2016).

Paralelamente aos desenvolvimentos supramencionados, foi proposto, em 2010, o método da Interação de Distúrbios – *Method of Disturbances Interaction* – (Pavas, Torres-Sánchez e Staudt, 2010). Este se baseia na decomposição das correntes drenadas por uma dada instalação em distintas componentes, a fim de determinar as contribuições de três fenômenos

que exercem influência sobre as tensões em regime permanente, quais sejam, distorções harmônicas, desequilíbrios e fator de potência. Dessa forma, a partir de teorias de potência, são determinados três indicadores de corrente para sistemas monofásicos e cinco para sistemas trifásicos, os quais estão associados com os fenômenos mencionados. As interações entre cargas e supridores são avaliadas a partir de uma série de conjecturas atreladas ao sinal das grandezas obtidas pela matriz de interação de distúrbios.

Nesse contexto, é oportuno salientar que o método da Interação de Distúrbios não é capaz de avaliar a origem dos fenômenos propriamente ditos, pois apenas indica a região na qual cada distúrbio tem maior concentração (Pavas, Torres-Sánchez e Staudt, 2012). Segundo os autores, a responsabilidade sobre os indicadores não necessariamente está relacionada com a origem do problema. Mesmo quando há presença de apenas uma fonte perturbadora, devido à interação do fenômeno com os demais elementos constituintes do circuito, sugere-se que a responsabilidade não deve ser unicamente atribuída à esta fonte. Esta afirmação leva à interpretação de que a responsabilidade pela propagação dos distúrbios é invariavelmente comunitária e que, portanto, deve ser compartilhada com todos os agentes que utilizam um mesmo barramento. Todavia, tais alegações são evidentemente questionáveis, pois sugere que até mesmo instalações que não apresentam características perturbadoras podem ser penalizadas pelos distúrbios advindos de outras fontes. Além disso, a metodologia apresenta resultados falhos e inconclusivos mesmo em estudos computacionais (Pavas, Torres-Sánchez e Staudt, 2010).

Em trabalho posterior, foram propostos aprimoramentos ao método da Interação de Distúrbios por meio da incorporação de procedimentos estatísticos para a determinação proporcional das parcelas de responsabilidades entre os envolvidos (Pavas, Torres-Sánchez e Staudt, 2012). No estudo, são utilizadas medições em campo de um sistema composto de cargas com características desconhecidas. Não obstante, os valores de referência para a validação dos resultados não foram mencionados, não sendo possível avaliar se o método apresenta resposta condizente com a realidade física esperada. Outros avanços foram também apresentados (Garzon e Pavas, 2015; Pavas e Garzon, 2014; Pavas e Garzón, 2016), todavia, os desenvolvimentos não progrediram na direção de preencher as lacunas ponderadas.

Além dos procedimentos supracitados, outros desenvolvimentos foram propostos, quer seja na direção da definição de indicadores numéricos associados às características da carga (Dell'Aquila *et al.*, 2004; Herrera e Vázquez, 2014; Jia *et al.*, 2008), ou mediante à aplicação de métodos probabilísticos que estimam as contribuições de diferentes fontes utilizando

ferramentas estatísticas (Liu e Milanovic, 2013; Schwanz *et al.*, 2017; Woolley e Milanović, 2012).

2.3 Fundamentos sobre as principais metodologias

Nesta etapa, são apresentados os fundamentos físicos e matemáticos dos principais procedimentos utilizados para a determinação das contribuições sobre os desequilíbrios, a saber, método da Corrente Conforme e Não Conforme, método do Fluxo de Potência Trifásico e método IEC. O motivo pelo qual optou-se pela apresentação detalhada de tais metodologias se baseia no fato de que estas têm maior número de citações nos trabalhos investigados.

É conveniente salientar que as metodologias aqui tratadas são essencialmente focadas nas contribuições das componentes de sequência negativa, visto que seus impactos nos equipamentos elétricos são mais significativos que aqueles provocados pelas componentes de sequência zero. Ademais, grande parte das instalações em média tensão (MT) e baixa tensão (BT) são projetadas para evitar a circulação das correntes de sequência zero (Jayatunga, Perera e Ciuffo, 2012a; TR IEC 61000-3-13:2012, 2012). Por conseguinte, ainda que estas sejam mencionadas, as contribuições das componentes de sequência zero não são avaliadas ao longo do trabalho.

Para realizar a decomposição das tensões e correntes trifásicas em suas respectivas componentes de sequência positiva, negativa e zero, utiliza-se a inversa da matriz de Fortescue (Fortescue, 1918), em consonância com (2.1) e (2.2).

$$\begin{bmatrix} \dot{F}_a \\ \dot{F}_b \\ \dot{F}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{F}_{a0} \\ \dot{F}_{a1} \\ \dot{F}_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{F}_{a0} \\ \dot{F}_{a1} \\ \dot{F}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{F}_a \\ \dot{F}_b \\ \dot{F}_c \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Onde:

\dot{F}_a , \dot{F}_b e \dot{F}_c – fasores das tensões ou as correntes das fases a , b e c , respectivamente;

\dot{F}_{a0} , \dot{F}_{a1} e \dot{F}_{a2} – fasores das tensões ou correntes da fase a de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente.

a – operador rotacional cuja coordenada polar é equivalente a $1\angle 120^\circ$.

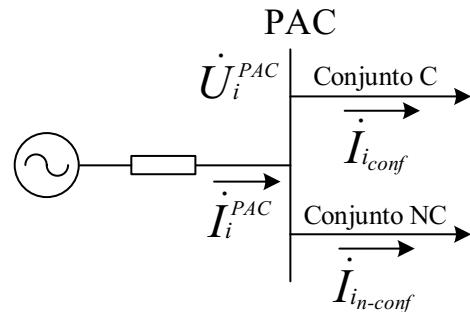
Visto que as componentes de sequência zero, positiva e negativa das fases a , b e c são análogas entre si, respeitando-se as devidas defasagens angulares, salienta-se que estas são aqui meramente tratadas pelos subscritos 0, 1 e 2.

2.3.1 Método da Corrente Conforme e Não Conforme

O método da Corrente Conforme e Não Conforme faz uso da hipótese de que a corrente total no PAC pode ser decomposta em duas partes: uma dita conforme e outra não conforme (Srinivasan e Jutras, 1998). Assim, a parcela de corrente que flui pelas cargas que reproduzem o mesmo padrão de comportamento da tensão de suprimento – Conjunto C – é definida como conforme. Em contrapartida, a fração de corrente resultante responsável pelo suprimento das cargas que produzem desequilíbrios adicionais àqueles originalmente presentes na tensão de suprimento – Conjunto NC – é denominada por não conforme (Srinivasan, 1998).

Com o propósito de elucidar o procedimento em destaque, a Figura 2.2 apresenta um complexo elétrico genérico composto de cargas representativas de ambos os conjuntos.

Figura 2.2 – Representação do método da Corrente Conforme e Não Conforme.



Fonte: Autoria própria.

Onde:

i – índice representativo das componentes de sequência zero (0), positiva (1) e negativa (2);

I_i^{PAC} – corrente no PAC no domínio das componentes simétricas;

\dot{U}_i^{PAC} – tensão no PAC no domínio das componentes simétricas;

$\dot{I}_{i,conf}$ – parcela de corrente conforme no domínio das componentes simétricas;

$\dot{I}_{i,n-conf}$ – parcela de corrente não conforme no domínio das componentes simétricas.

A partir da Figura 2.2, enuncia-se a expressão da corrente total no PAC no domínio das componentes simétricas, tal como exposto em (2.3).

$$\dot{I}_i^{PAC} = \dot{I}_{i_{conf}} + \dot{I}_{i_{n-conf}} \quad (2.3)$$

Embora a equação (2.3) seja genérica para qualquer componente de sequência, ressalta-se que a corrente total de sequência positiva apenas compreenderá a parcela conforme, visto que esta possui relação direta com o fluxo de potência de sequência positiva. As cargas, por sua vez, são incapazes de fornecer potência ativa de sequência positiva em sistemas radiais com fluxo de potência unidirecional, o que resulta na simplificação exposta em (2.4).

$$\dot{I}_1^{PAC} = \dot{I}_{1_{conf}} \quad (2.4)$$

No tocante às correntes conformes de sequência negativa e zero, a metodologia sugere que estas correspondem a uma parcela da corrente de sequência positiva, a qual é proporcional ao vetor do fator de desequilíbrio de tensão associado a cada componente. Dessa forma, as correntes conformes de sequência negativa e zero são dadas pelas respectivas equações (2.5) e (2.6).

$$\dot{I}_{2_{conf}} = \dot{I}_1^{PAC} \times \left(\frac{\dot{U}_2^{PAC}}{\dot{U}_1^{PAC}} \right) \quad (2.5)$$

$$\dot{I}_{0_{conf}} = \dot{I}_1^{PAC} \times \left(\frac{\dot{U}_0^{PAC}}{\dot{U}_1^{PAC}} \right) \quad (2.6)$$

A fim de avaliar o significado físico dos termos contidos nas expressões supracitadas, estas são reescritas em função de suas respectivas admitâncias, tal como (2.7) e (2.8).

$$\dot{I}_{2_{conf}} = \dot{Y}_1 \times \dot{U}_2^{PAC} \quad (2.7)$$

$$\dot{I}_{0_{conf}} = \dot{Y}_1 \times \dot{U}_0^{PAC} \quad (2.8)$$

Analizando as expressões (2.7) e (2.8), nota-se que ambas as correntes conformes de sequência negativa e zero são dependentes do produto entre a admitância de sequência positiva

e as respectivas tensões de sequência negativa e zero. Nesse sentido, é plausível afirmar que a metodologia sugere que as impedâncias de sequência positiva, negativa e zero são análogas entre si.

Dando continuidade aos desenvolvimentos matemáticos, isolando a corrente não conforme da expressão (2.3) e substituindo, individualmente, as expressões (2.7) e (2.8) em (2.3), obtêm-se as equações (2.9) e (2.10), as quais representam as contribuições de sequência negativa e zero, respectivamente.

$$\dot{I}_{2_{n-conf}} = \dot{I}_2^{PAC} - (\dot{Y}_1 \times \dot{U}_2^{PAC}) \quad (2.9)$$

$$\dot{I}_{0_{n-conf}} = \dot{I}_0^{PAC} - (\dot{Y}_1 \times \dot{U}_0^{PAC}) \quad (2.10)$$

Dessarte, segundo o procedimento, a corrente conforme está diretamente atrelada as contribuições do supridor, da mesma forma que corrente não conforme associa-se com as contribuições do consumidor.

2.3.2 Método do Fluxo de Potência Trifásico

Os procedimentos que se enquadram nesta etapa são genericamente embasados em estudos analíticos que utilizam ferramentas de fluxo de potência para a determinação da fonte proeminente do distúrbio.

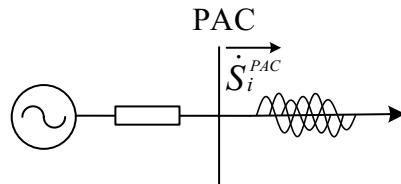
Inicialmente, sugeriu-se que as contribuições dos desequilíbrios de carga estariam intimamente relacionadas com o ângulo de fase da potência aparente de sequência negativa (Reineri *et al.*, 2006). Neste contexto, uma vez que em sistemas equilibrados a direcionalidade do fluxo de potência de sequência positiva é determinada pelo ângulo de fase entre a tensão e a corrente – entre -90° e $+90^\circ$ com sentido da fonte para a carga –, este raciocínio é extrapolado para a respectiva componente de sequência negativa em sistemas desequilibrados. Por conseguinte, reconhecendo que instalações que operam com cargas assimétricas são potenciais fontes de injeção de potência de sequência negativa, quando estas resultam em ângulos de fase maiores que $+90^\circ$ e inferiores a -90° , isto indica forte presença de cargas desequilibradas à jusante do local de monitoramento. Todavia, salienta-se que não foi verificada a resposta do procedimento na presença de desequilíbrios pré-existentes na tensão de suprimento.

Posteriormente, observou-se que somente a parcela ativa da potência de sequência negativa teria, de fato, relação com a origem dos desequilíbrios (Seiphetlho e Rens, 2010).

Paralelamente, outros estudos baseados nesta premissa foram conduzidos, os quais contemplaram a presença de assimetrias à montante e à jusante do local de monitoramento (Hanelka e Varetsky, 2011; Seiphetlho e Rens, 2011). Dessarte, o procedimento que será descrito nesta etapa se trata de uma síntese dos desenvolvimentos propostos nestes três últimos trabalhos.

O procedimento em evidência é fundamentado na avaliação da direcionalidade da potência ativa de sequência negativa. A fim de ilustrar a problemática aqui tratada, a Figura 2.3 denota a representação genérica do ponto de acoplamento comum entre o supridor e consumidor, no qual é feita a avaliação.

Figura 2.3 – Representação do método do Fluxo de Potência Trifásico.



Fonte: Autoria própria.

A partir da Figura 2.3, tem-se que a potência complexa no PAC (\dot{S}_i^{PAC}), para cada componente de sequência, é dada pela expressão (2.11).

$$\dot{S}_i^{PAC} = P_i^{PAC} + jQ_i^{PAC} \quad (2.11)$$

Onde:

i – índice representativo das componentes de sequência zero (0), positiva (1) e negativa (2);

P_i^{PAC} – potência ativa no PAC, no domínio das componentes simétricas;

Q_i^{PAC} – potência reativa no PAC, no domínio das componentes simétricas;

Em consonância com a IEEE Std 1459TM, 2010, focando-se na potência ativa, a expressão para o cálculo de sua respectiva componente de sequência negativa em função dos parâmetros de tensão e corrente no PAC é escrita em conformidade com (2.12).

$$P_2^{PAC} = 3 \times U_2^{PAC} \times I_2^{PAC} \times \cos \varphi_2 \quad (2.12)$$

Onde:

U_2^{PAC} – tensão de sequência negativa no PAC;

I_2^{PAC} – corrente de sequência negativa no PAC;

φ_2 – ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente de sequência negativa no PAC.

Tendo o fluxo de potência de sequência positiva como referência, a metodologia sugere que, nas condições em que a potência ativa de sequência negativa resulte sinal positivo ($P_2^{PAC} > 0$), as contribuições do supridor são majoritárias. Em contrapartida, caso a potência ativa de sequência negativa tenha sinal negativo ($P_2^{PAC} < 0$), admite-se que as contribuições do consumidor são predominantes.

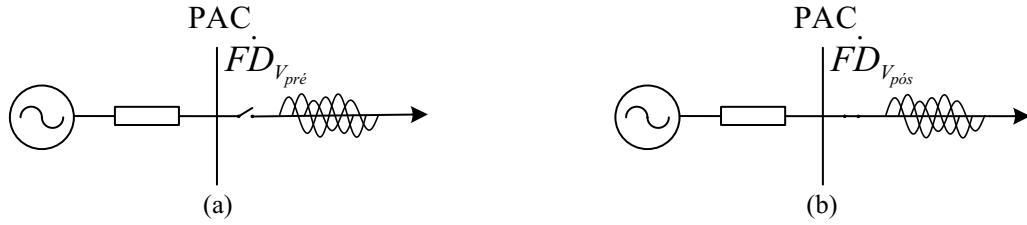
2.3.3 Método IEC

No Relatório Técnico TR IEC 61000.3.13:2012, é apresentada uma proposta para a avaliação das emissões dos desequilíbrios nas etapas de planejamento e pré-operação de uma determinada instalação. O documento abrange uma série de instruções que vão desde sugestões para a realização das medições e o seu tratamento estatístico, até a proposição de metodologia para a determinação dos níveis máximos de emissão para instalações com características perturbadoras.

Nesse sentido, para a conexão de determinada instalação que opera com cargas assimétricas, é de inteira responsabilidade do consumidor que os seus níveis de emissão se enquadrem nos patamares especificados pelas regulamentações vigentes. Por conseguinte, a partir da avaliação da componente vetorial do fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa, antes e após à conexão da instalação, é possível determinar o denominado vetor de emissão. Este fator está associado com o nível máximo de emissão permitido ao consumidor, a fim de respeitar os limites de compatibilidade eletromagnética.

Com o propósito de elucidar a lógica que fundamenta este procedimento, apresenta-se, na Figura 2.4 (a) e (b), o equivalente elétrico representativo dos instantes de pré-conexão e pós-conexão da instalação perturbadora.

Figura 2.4 – Representação do método IEC: (a) pré-conexão da instalação; (b) pós-conexão da instalação.



Fonte: Autoria própria.

A metodologia sugere que a componente vetorial do fator de desequilíbrio de tensão no PAC, medida no instante de pré-conexão da instalação – Figura 2.4 (a) –, está diretamente associada às contribuições da rede de acesso (\dot{FD}_{V_S}), em consonância com (2.13).

$$\dot{FD}_{V_{pré}} = \dot{FD}_{V_S} = \frac{\dot{U}_{2S}^{PAC}}{\dot{U}_{1S}^{PAC}} \quad (2.13)$$

Por outro lado, de acordo com a Figura 2.4 (b), a contribuição total se trata da componente vetorial do fator desequilíbrio de tensão obtido após a conexão da instalação consumidora ($\dot{FD}_{V_{total}}$), em consonância com (2.14).

$$\dot{FD}_{V_{pós}} = \dot{FD}_{V_{total}} = \frac{\dot{U}_{2_{total}}^{PAC}}{\dot{U}_{1_{total}}^{PAC}} \quad (2.14)$$

Por conseguinte, o denominado vetor de emissão (\dot{FD}_{V_C}), o qual se trata da contribuição oriunda do consumidor, é calculado pela diferença vetorial entre os fatores de desequilíbrio medidos nos períodos de pós-conexão e pré-conexão da instalação, tal como indicado em (2.15).

$$\dot{FD}_{V_C} = \dot{FD}_{V_{pós}} - \dot{FD}_{V_{pré}} = \frac{\dot{U}_{2C}^{PAC}}{\dot{U}_{1C}^{PAC}} \quad (2.15)$$

Adicionalmente, quando há múltiplas instalações potencialmente perturbadoras, ou quando estas apresentam comportamento fortemente dinâmico e/ou aleatório ao longo do tempo, o relatório propõe que seja realizado o somatório probabilístico das tensões ($FD_{V_{C\Sigma}}$) a partir do critério de agregação de fontes, tal como enunciado em (2.16).

$$FD_{V_{C_{\Sigma}}} = \sqrt[n]{\sum_{n=1}^{\infty} FD_{V_{C_n}}^{\alpha}} \quad (2.16)$$

Onde:

$FD_{V_{C_n}}$ – magnitude do fator de desequilíbrio de tensão de n consumidores, ou de n instantes para cargas dinâmicas;

α – coeficiente probabilístico atrelado ao comportamento das instalações desequilibradas, cujo valor típico é equivalente a 1,4.

Ressalta-se que o valor atribuído ao coeficiente α resulta de uma série de ponderações relativas ao comportamento empírico da carga, tais como: a probabilidade do valor real não exceder o valor calculado; o grau de variação da magnitude e ângulo de fase do desequilíbrio de tensão ao longo do tempo; número de variações aleatórias e/ou número de fontes de emissão. Dessa forma, informações adicionais acerca deste indicador, bem como de outras particularidades a respeito do procedimento sintetizado, estão disponíveis na TR IEC 61000-3-13:2012.

2.4 Considerações finais

Nesta unidade, foi apresentado o estado da arte a respeito da determinação das contribuições sobre os desequilíbrios, o qual compreendeu dois momentos distintos, a saber, levantamento bibliográfico atualizado sobre o tema e apresentação dos fundamentos que sobre as principais estratégias para os propósitos aqui postos.

Nesse contexto, com base nas informações apresentadas até o momento, é oportuno destacar que:

- Dos 37 trabalhos diretamente atrelados à temática da determinação das contribuições sobre os desequilíbrios, a grande maioria envolve as metodologias: método da Corrente Conforme e Não Conforme, método do Fluxo de Potência Trifásico e método IEC;
- Embora o método da Corrente Conforme e Não Conforme tenha se mostrado, a priori, atrativo, foi constatado que as premissas são inconsistentes com as teorias clássicas de circuitos elétricos, visto que adota simplificações para a representação das impedâncias de sequência negativa e zero do sistema. De fato, conforme pontuado, para instalações compostas de cargas predominantemente

motrizes, o método resulta falhas expressivas na determinação das contribuições de sequência negativa;

- O método conhecido por Fluxo de Potência Trifásico apenas indica o sentido preponderante do fluxo de potência ativa de sequência negativa, não permitindo a determinação das parcelas de responsabilidade propriamente ditas. Ainda assim, foi constatado que, nem sempre, a direcionalidade do fluxo de potência ativa de sequência negativa é coincidente com a contribuição majoritária, podendo apresentar falhas quando de sua aplicação em ambientes práticos;
- No que tange ao método IEC, ressalta-se que este pode ser empregado na etapa de planejamento e acesso de novas instalações. Todavia, nas situações em que a unidade consumidora já se encontra operante, o mesmo torna-se impraticável. Ademais, o método IEC apresentou fragilidades quanto ao seu desempenho prático em alguns trabalhos, cuja inconsistência é atribuída ao comportamento dinâmico da rede elétrica;
- Não obstante as considerações suprapostas, visando maiores esclarecimentos e com o propósito de comparar os procedimentos utilizando o mesmo critério e base de dados, na unidade subsequente são conduzidos estudos de caráter computacional e laboratorial a fim de avaliar, em maiores detalhes, a eficácia dos procedimentos supracitados.

AVALIAÇÃO DAS PRINCIPAIS METODOLOGIAS PARA A DETERMINAÇÃO DAS CONTRIBUIÇÕES SOBRE OS DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO

3

3.1 Considerações iniciais

Diante das considerações tecidas até o momento, nesta unidade, são realizados estudos investigativos aplicando as metodologias pormenorizadas na Unidade 2, quais sejam, método da Corrente Conforme e Não Conforme, método do Fluxo de Potência Trifásico e método IEC. Ainda que os procedimentos já tenham sido alvo de investigações em trabalhos anteriores, a finalidade desta etapa se baseia na avaliação dos métodos utilizando um conjunto de dados padronizados.

Nesse sentido, frisa-se que o critério para a avaliação da eficácia dos métodos se apoia no estabelecimento de uma correlação com o fator de desequilíbrio de tensão de sequência negativa, visto que as regulamentações vigentes são majoritariamente calcadas no monitoramento deste indicador.

Portanto, são realizados estudos computacionais e laboratoriais considerando níveis de desequilíbrios pré-definidos e impostos ao supridor e consumidor, o que permite o prévio conhecimento das contribuições de cada parte. Estes estudos contemplam diferentes condições operativas associadas com a presença de desequilíbrios incrementais gerados pelo chaveamento de diferentes arranjos de cargas e, também, com a existência de assimetrias na tensão de suprimento. Além disso, é avaliada a influência da distribuição da carga entre as fases na resposta das metodologias.

Por fim, apresenta-se uma síntese geral do capítulo com o intuito de salientar as observações de maior relevância no contexto aqui tratado.

3.2 Estudos investigativos

O arranjo implementado tem a finalidade de avaliar o desempenho das metodologias, em termos computacionais e labororiais, sob a perspectiva de um sistema com forte característica motriz, muito embora seu caráter hipotético. Em consonância com o estado da arte articulado, este aspecto tem se apresentado como fator de grande influência em estudos de desempenho qualitativos.

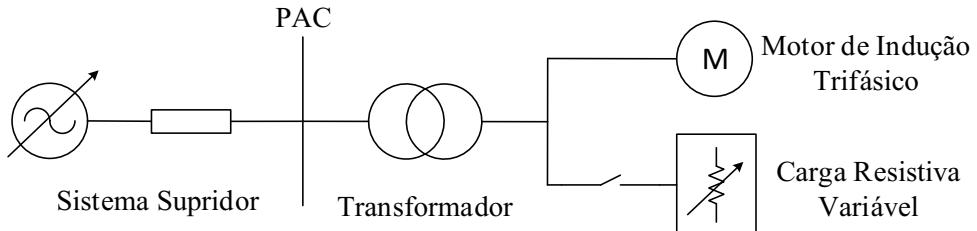
O sistema de suprimento implementado é inspirado em redes de distribuição BT tipicamente existentes no Reino Unido, ou seja, considerando uma alimentação trifásica e alternada em 50 Hz e com tensão nominal de 400 V. A justificativa para o uso de um modelo com estas características se deve ao fato de que parte dos trabalhos que contribuíram para a completude desta tese de doutorado, em específico o desenvolvimento experimental, foi realizada utilizando a estrutura laboratorial de uma universidade situada no Reino Unido. Adicionalmente, haja vista as limitações técnicas em termos da disponibilidade de recursos para o desenvolvimento laboratorial, o arranjo em questão é tratado como um equivalente elétrico simplificado.

Quanto as características de assimetria do sistema sob avaliação, quando aplicáveis, as contribuições provenientes da parcela supridora são conduzidas por meio da imposição de tensões assimétricas à própria fonte de alimentação, a fim caracterizar os desequilíbrios pré-existentes que competem à concessionária de energia. Este conteúdo é deliberadamente imposto com o propósito de representar as contribuições remanescentes de um conjunto de instalações perturbadoras que, por ventura, possam estar presentes nas imediações do local de monitoramento.

A instalação consumidora, é constituída de um motor de indução trifásico equilibrado que opera em regime contínuo. Há, também, uma carga resistiva trifásica variável, com características desequilibradas. Isto, por sua vez, possibilita carregamentos assimétricos com distribuição distinta entre fases, o que provoca diferentes níveis de desequilíbrio de tensão no PAC. Embora reconheça-se que os desbalanceamentos de carga em redes de distribuição não estejam necessariamente associados com a operação assimétrica de elementos puramente resistivos, o intuito do estudo é avaliar se há uma clara influência dos níveis de desequilíbrios, ou da própria distribuição das cargas, no desempenho das metodologias. Informações complementares acerca do arranjo estão disponíveis no Apêndice C.

O arranjo descrito é sintetizado na Figura 3.1 (Figura C.1).

Figura 3. 1 – Equivalente elétrico representativo utilizado nos estudos computacionais e laboratoriais.



Fonte: Autoria própria.

Os estudos de casos foram subdivididos em duas partes gerais atreladas à existência, ou não, dos desequilíbrios pré-existentes na tensão de suprimento, de acordo com o seguinte critério:

- Caso 1 – neste caso é englobado um conjunto de avaliações que contemplam diferentes desequilíbrios de carga em intensidades incrementais, cuja origem é proveniente da distribuição assimétrica da carga resistiva entre as fases;
- Caso 2 – juntamente com algumas das assimetrias de carga definidas para o Caso 1, também é imposto um desequilíbrio de 1% às tensões de suprimento.

A fim de sintetizar os detalhamentos expostos, é apresentada a Tabela 3.1 (Tabela D.3), a qual apresenta um quadro resumo dos estudos realizados. Ressalta-se que maiores detalhamentos sobre os estudos investigativos são apresentados no Apêndice D.

Tabela 3. 1 – Síntese dos estudos de casos.

Caso	Subcaso	FDv imposto à fonte (aprox.)	Carga conectada	Tipo de distribuição da carga	FDv gerado pela carga (aprox.)
1	.1	0%	Carga 1	Trifásica desequilibrada	0,5%
	.2		Carga 2	Monofásica	1,0%
	.3		Carga 3	Trifásica desequilibrada	1,5%
	.4		Carga 4	Monofásica	2,0%
	.5		Carga 5	Monofásica	2,5%
2	.1	1%	Carga 2	Monofásica	1,0%
	.2		Carga 3	Trifásica desequilibrada	1,5%

Quanto aos processos avaliativos, pontua-se, ainda, que:

- Estes são feitos unicamente em termos das contribuições de tensão de sequência negativa;
- Os percentuais de responsabilidade resultantes da aplicação do método da Corrente Conforme e Não conforme e do método IEC são determinados a partir

da projeção dos vetores individuais sobre o vetor total. Maiores detalhamentos sobre este procedimento matemático são apresentados no Apêndice B;

- Conforme mencionado previamente, o método do Fluxo de Potência Trifásico restringe-se à detecção da fonte preponderante dos desequilíbrios, não quantificando a parcela de responsabilidade de cada agente. Entretanto, para fins comparativos, os resultados deste método serão expressos em termos percentuais, atribuindo-se os valores de 0% ou 100% a depender da direcionalidade do fluxo de potência ativa de sequência negativa.
- No que tange à aplicação do método IEC, as tensões e correntes no PAC foram obtidas antes e após a conexão de cada carga desequilibrada.

3.3 Avaliação computacional

Nesta etapa, são expostos os estudos computacionais para a avaliação de desempenho das metodologias. O complexo elétrico em questão foi implementado no programa MATLAB/Simulink® utilizando a ferramenta *SimPowerSystems*. Informações adicionais acerca da parametrização do sistema estão dispostas no Apêndice C.

As Tabela 3.2 e 3.3 indicam os percentuais de desequilíbrio de tensão e corrente no PAC para diferentes condições operativas.

Tabela 3. 2 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva desconectada – computacional.

Fonte	Fator de desequilíbrio (%)	
	Tensão	Corrente
Equilibrada	0,00	0,00
Desequilibrada	1,04	6,68

Tabela 3. 3 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva conectada – computacional.

Fator de desequilíbrio	Caso/Subcaso						
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2
Tensão (%)	0,51	0,90	1,54	2,15	2,51	1,61	2,29
Corrente (%)	5,08	10,99	12,97	21,44	23,76	15,28	15,32

3.3.1 Método da Corrente Conforme e Não Conforme – computacional

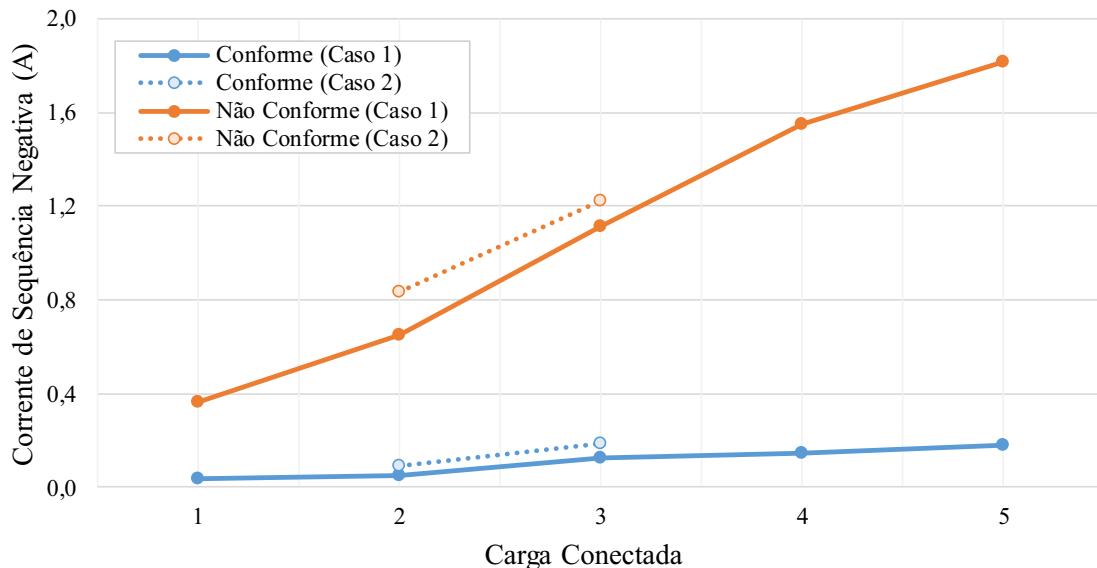
A Tabela 3.4 apresenta os resultados fornecidos pelo método da Corrente e Conforme e Não Conforme em consonância com os casos/subcasos avaliados.

Tabela 3. 4 – Resultados do método da Corrente Conforme e Não Conforme – computacional.

Variável		Caso/Subcaso						
		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2
$i_{2,conf}$	Mag	0,0351 A	0,0511 A	0,1260 A	0,1484 A	0,1829 A	0,0917 A	0,1871 A
	Ang	85,20°	142,70°	161,01°	-96,68°	143,18°	179,10°	-177,39°
$i_{2,n-conf}$	Mag	0,3670 A	0,6506 A	1,1127 A	1,5509 A	1,8139 A	0,8349 A	1,2217 A
	Ang	-154,80°	-93,95°	-80,84°	23,92°	-96,71°	-109,37°	-92,52°
i_{2}^{PAC}	Mag	0,3508 A	0,6239 A	1,0590 A	1,4808 A	1,7293 A	0,8683 A	1,2524 A
	Ang	-159,78°	-97,87°	-86,86°	18,97°	-101,96°	-115,11°	-101,08°

Com a finalidade de ilustrar os resultados supracitados, a Figura 3.2 apresenta a resposta do procedimento, em termos das magnitudes das correntes, de acordo com a conexão das cargas.

Figura 3. 2 – Magnitudes das correntes conforme e não conforme – computacional.



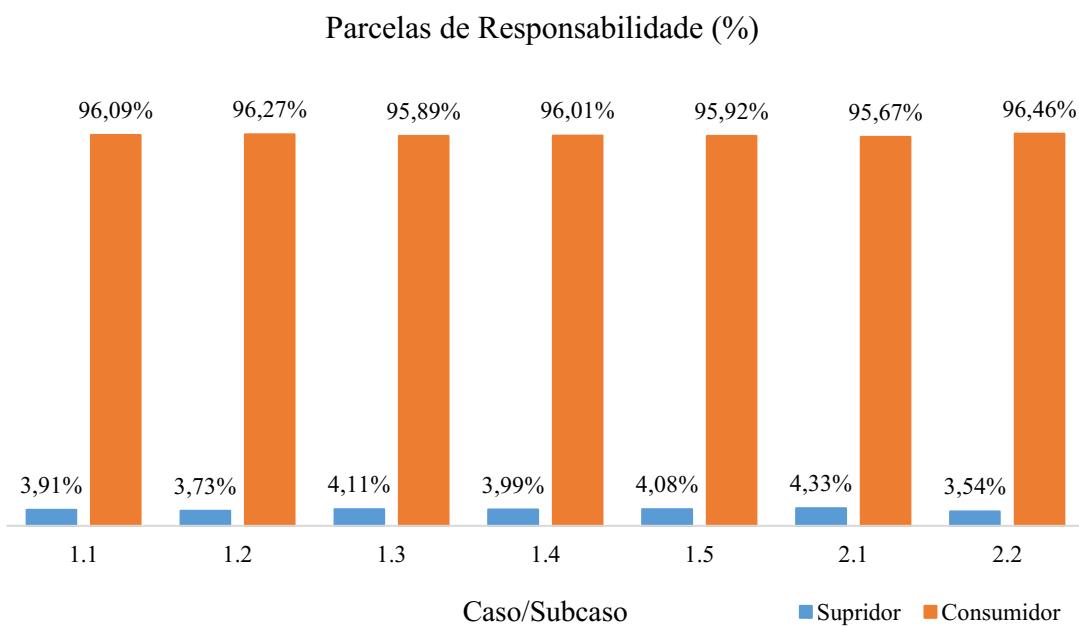
Fonte: Autoria própria.

No Caso 1, a corrente conforme de sequência negativa, a qual representa as contribuições da parcela supridora, apresenta-se relativamente constante para todos os subcasos. Por outro lado, a corrente não conforme é linearmente incrementada de acordo com o aumento do desequilíbrio de carga. Nas condições em que a fonte de suprimento também é responsável pelos desequilíbrios de tensão no PAC (Caso 2), esperar-se-ia que as contribuições do supridor sofressem um incremento proporcional ao percentual de desequilíbrio de tensão

gerado pela fonte (1.04%). Todavia, o que ocorre é que a parcela representativa das contribuições do supridor quase não sofre alterações do Caso 1 para o Caso 2, sugerindo que a leitura feita pelo procedimento não é condizente com a realidade física esperada.

A Figura 3.3 apresenta os percentuais de responsabilidade atribuídos à cada fonte perturbadora de acordo com o método da Corrente Conforme e Não Conforme.

Figura 3.3 – Parcelas de responsabilidade de acordo com método da Corrente Conforme e Não Conforme – computacional.



Fonte: Autoria própria.

Em consonância com os resultados supramencionados, observa-se que, para o Caso 1, o método atribuiu percentuais que variam de 3,91% a 4,11% ao supridor. Todavia, é fato que, para este caso, a fonte de suprimento opera de forma ideal, não sendo, portanto, responsável pela origem de qualquer distúrbio. No tocante ao Caso 2, nota-se que os resultados quase não diferem do caso anterior, indicando que as contribuições do supridor não se alteram mesmo na presença de tensões pré-desequilibradas. De fato, isso ratifica a constatação de que, quando a rede passa a contribuir com o suprimento de tensões assimétricas, o procedimento não apresenta resposta condizente com o comportamento físico esperado quanto aos desequilíbrios de tensão.

No tocante à influência da distribuição da carga na resposta do procedimento, não foi observada qualquer diferença significativa entre os resultados com as cargas monofásicas (Cargas 2, 4 e 5) e trifásicas desequilibradas (Cargas 1 e 3).

3.3.2 Método do Fluxo de Potência Trifásico – computacional

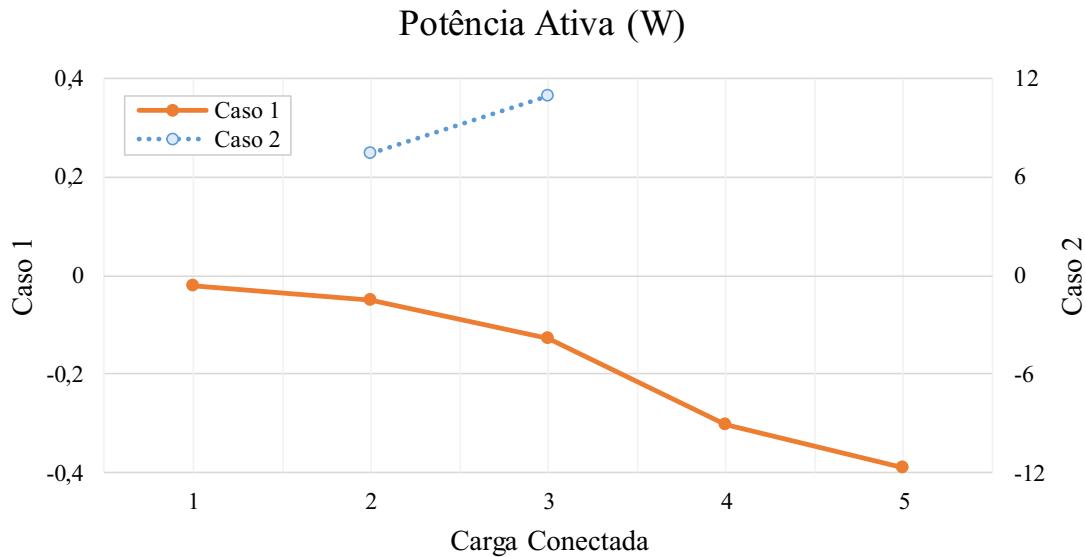
A Tabela 3.5 apresenta os resultados do método do Fluxo de Potência Trifásico para cada subcaso caracterizado.

Tabela 3.5 – Resultados do método do Fluxo de Potência Trifásico – computacional.

Variável	Caso/Subcaso						
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2
Potência Ativa de Sequência Negativa	-0,0206 W	-0,0505 W	-0,1271 W	-0,3011 W	-0,3903 W	7,4422 W	10,9251 W

Com o propósito de contribuir com a interpretação dos resultados, estes são ilustrados na Figuras 3.4.

Figura 3.4 – Potência ativa de sequência negativa – computacional.



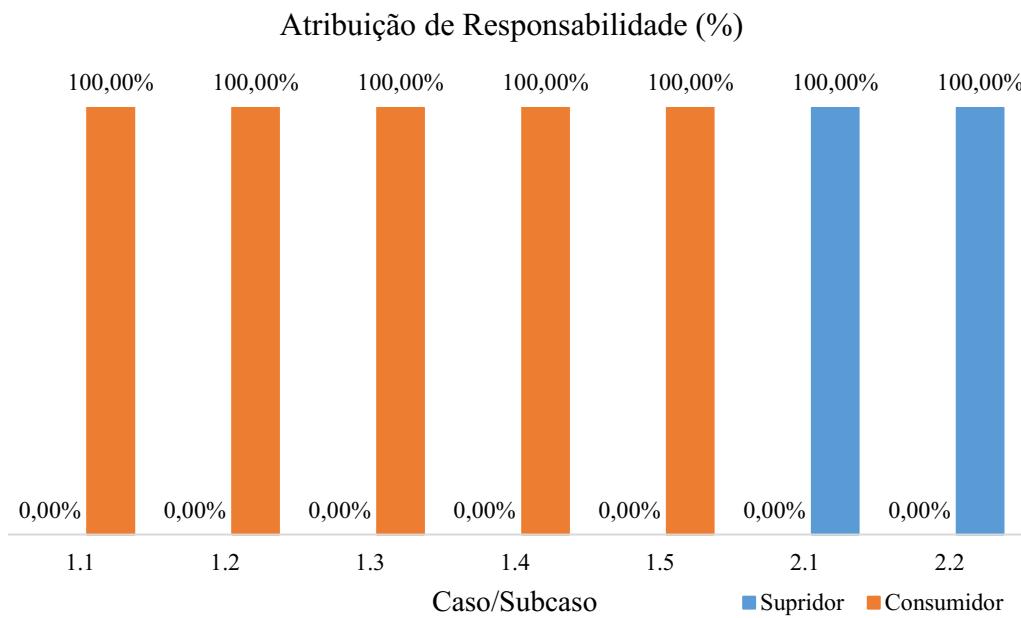
Fonte: Autoria própria.

Em consonância com os resultados apresentados, nota-se que, para o Caso 1, a direcionalidade do fluxo de potência de sequência negativa é oposta ao fluxo de referência (sequência positiva). De fato, a magnitude da potência é incrementada de acordo com o aumento do desequilíbrio de carga, indicando que a contribuição preponderante é advinda da instalação consumidora. Por outro lado, para o Caso 2, é possível constatar que o fluxo de potência ativa de sequência negativa passa a ter sinal positivo, sugerindo que o supridor se trata do responsável

majoritário pela origem dos distúrbios. Porém, ao comparar o FDv do Subcaso 0.3 (1.54%) com o FDv produzido pela fonte operando com tensões assimétricas (1,04%), esperar-se-ia que as contribuições da carga fossem prevalentes na condição 2.2. Dessa forma, para este caso, o procedimento apresentou resposta insatisfatória na determinação da fonte dominante de desequilíbrio de tensão.

A Figura 3.5 apresenta a atribuição de responsabilidade propriamente dita (0% ou 100%).

Figura 3.5 – Atribuição de responsabilidades de acordo com o método do Fluxo de Potência Trifásico – computacional.



Fonte: Autoria própria.

De fato, a metodologia apresentou resultados condizentes quando havia apenas uma fonte de perturbação. Todavia, quando a rede passou a contribuir com os desequilíbrios de tensão no PAC, o método resultou falha no Subcaso 2.1.

Quanto à configuração da carga, esta aparenta não exercer influência sobre a resposta do procedimento.

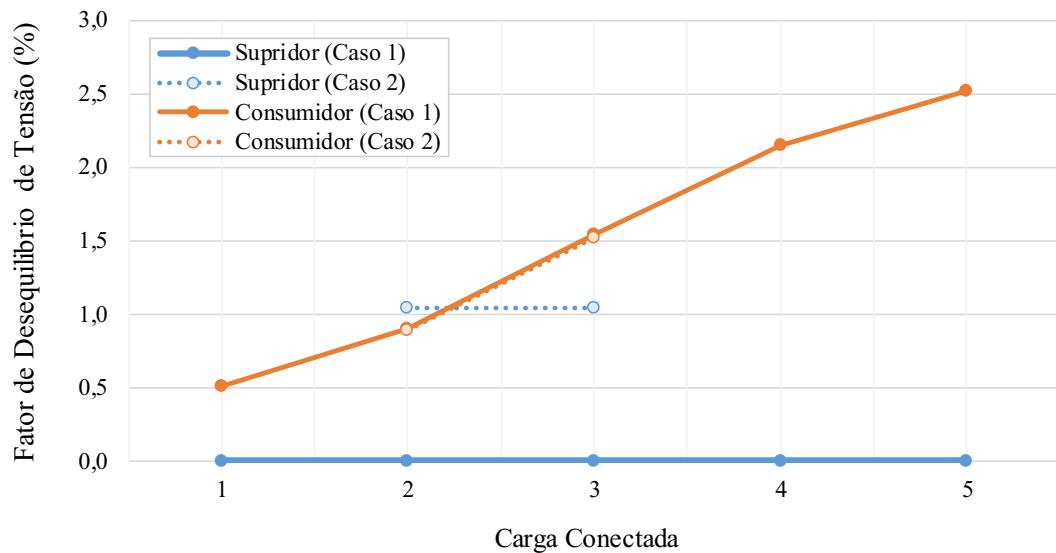
3.3.3 Método IEC – computacional

Os resultados oriundos da aplicação do método IEC são apresentados na Tabela 3.6. Adicionalmente, estes são graficamente ilustrados na Figura 3.6, com destaque aos valores das magnitudes.

Tabela 3. 6 – Resultados do método IEC – computacional.

Variável		Caso/Subcaso						
		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2
$\dot{FD}_{V_{p\acute{e}r}}$	Mag	0,0008 %	0,0008 %	0,0008 %	0,0008 %	0,0008 %	1,0431 %	1,0431 %
	Ang	-77,56°	-77,56°	-77,56°	-77,56°	-77,56°	-117,50°	-117,50°
$\dot{FD}_{V_{p\acute{o}s}}$	Mag	0,5085 %	0,9011 %	1,5435 %	2,1488 %	2,5127 %	1,6133 %	2,2884 %
	Ang	114,21°	175,28°	-171,52°	-66,90°	172,52°	-148,22°	-149,82°
\dot{FD}_{V_C}	Mag	0,5093 %	0,9013 %	1,5436 %	2,1480 %	2,5130 %	0,8929 %	1,5133 %
	Ang	114,19°	175,23°	-171,56°	-66,89°	172,50°	175,15°	-171,44°

Figura 3. 6 – Magnitudes dos fatores de desequilíbrio de tensão do supridor e consumidor – computacional.



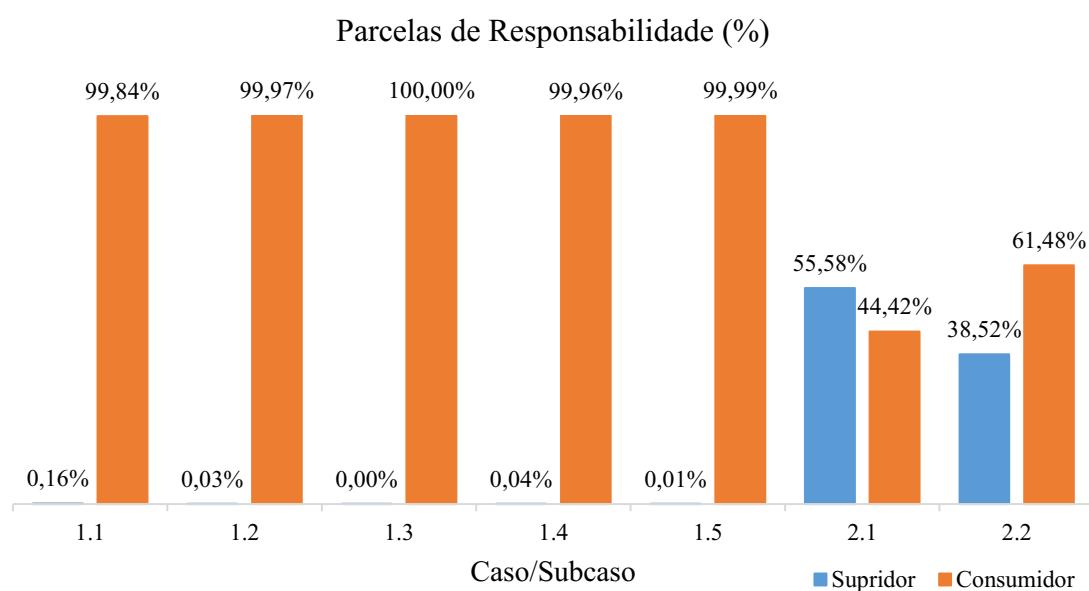
Fonte: Autoria própria.

Com base no exposto, para o Caso 1, o fator de desequilíbrio auferido antes da conexão carga resistiva (contribuição do consumidor) é nulo. Não obstante, o FDv do consumidor sofre incremento proporcional ao aumento do fator de desequilíbrio da carga. Para o Caso 2, observa-se que as contribuições do consumidor são consideravelmente próximas àquelas previamente auferidas para o Caso 1. Por outro lado, as contribuições da parcela supridora permanecem

constantes, todavia, com um deslocamento vertical que aponta para um acréscimo de 1% do FDv do supridor. De fato, isso sugere que o supridor passa a contribuir com os desequilíbrios globais manifestados no PAC.

Na sequência, a Figura 3.7 apresenta o gráfico de barras com a resposta do procedimento em termos percentuais.

Figura 3.7 – Parcelas de responsabilidade de acordo com o método IEC – computacional.



Fonte: Autoria própria.

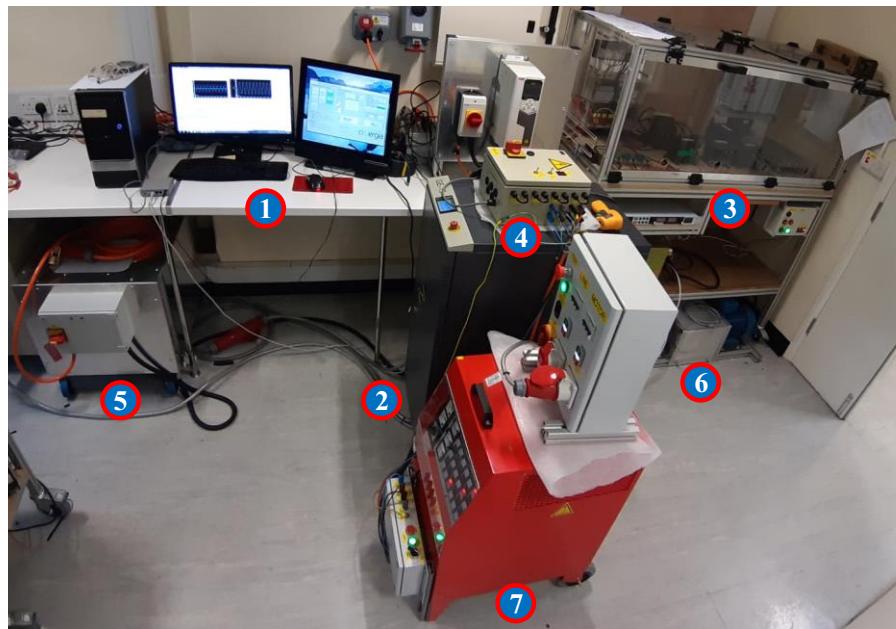
Dessarte, evidencia-se que, para os estudos aqui conduzidos, o método IEC apresentou forte correlação com a realidade física esperada. Em um primeiro momento, quando apenas a carga era responsável pela origem do distúrbio (Caso 1), o método atribuiu, de forma consistente, os percentuais de responsabilidade à instalação consumidora. Quando a rede também passa a contribuir com o desequilíbrio de tensão global no PAC (Caso 2), foi atribuído um percentual proporcional a esta contribuição. Tal afirmação pode ser claramente observada comparando-se os fatores de desequilíbrio de tensão obtidos quando a rede fornece tensões assimétricas (1,04%) com aquele auferido no Subcaso 1.2 (0,90%). Estes percentuais estão consonantes com os resultados fornecidos pelo método e indicam que as contribuições do supridor são ligeiramente majoritárias.

Quanto à influência da distribuição das cargas na resposta do procedimento, não foi constatada qualquer relação entre ambos os fatores.

3.4 Avaliação laboratorial

Objetivando avaliar o desempenho das metodologias em um contexto mais próximo à realidade, foi desenvolvido um esquema laboratorial nos termos estabelecidos na Figura 3.8. Ressalta-se que as informações complementares acerca deste arranjo estão disponíveis no Apêndice C.

Figura 3. 8 – Esquema laboratorial: 1) microcomputador; 2) fonte controlada; 3) indutores; 4) PAC¹; 5) transformador; 6) motor de indução trifásico; 7) banco resistivo.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 3.7 apresenta os percentuais de desequilíbrio de tensão e corrente no PAC quando a carga resistiva se encontra desconectada. Analogamente, a Tabela 3.8 fornece os fatores de desequilíbrio medidos para cada caso/subcaso avaliado.

Tabela 3. 7 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva desconectada – laboratorial.

Fonte	Fator de desequilíbrio (%)	
	Tensão	Corrente
Equilibrada	0,18	2,08
Desequilibrada	1,23	5,21

¹ Barra de monitoramento e invólucro contendo o arranjo CM para a aplicação do método MEC (vide Unidade 5).

Tabela 3. 8 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva conectada – laboratorial.

Fator de desequilíbrio	Caso/Subcaso						
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2
Tensão (%)	0,52	1,27	2,06	2,88	3,35	2,15	3,02
Corrente (%)	11,20	27,07	28,96	49,25	54,20	25,42	27,27

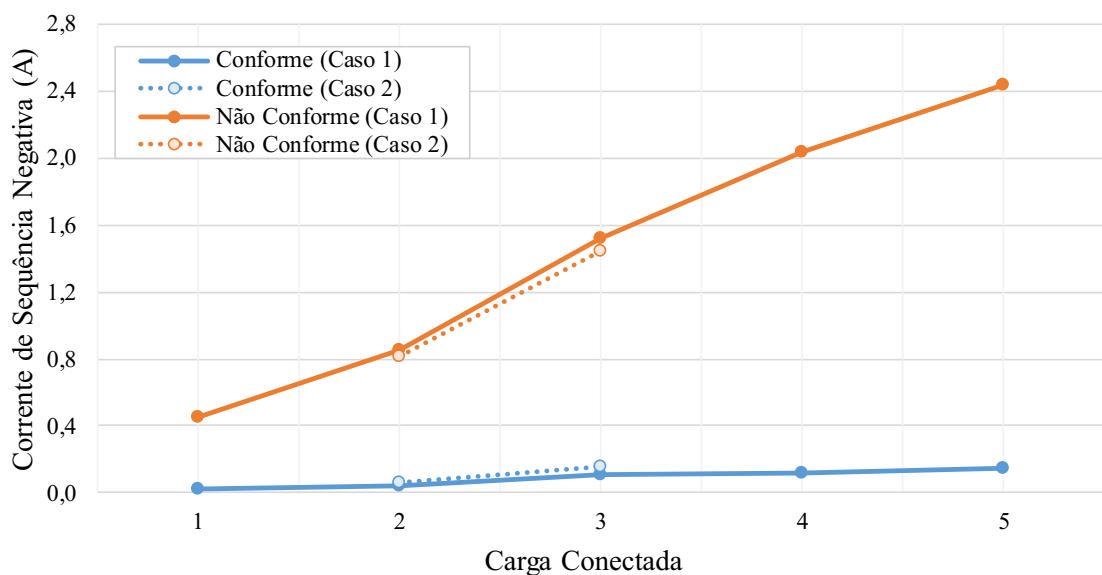
3.4.1 Método da Corrente Conforme e Não Conforme – laboratorial

Os resultados laboratoriais do método da Corrente Conforme e Não Conforme são apresentados na Tabela 3.9 e na Figuras 3.9.

Tabela 3. 9 – Resultados do método da Corrente Conforme e Não Conforme – laboratorial.

Variável	Caso/Subcaso						
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2
$i_{2,conf}$	Mag	0,0202 A	0,0382 A	0,1044 A	0,1144 A	0,1441 A	0,0654 A
	Ang	75,28°	99,62°	152,82°	-60,21°	144,27°	26,77°
$i_{2,n-conf}$	Mag	0,4490 A	0,8514 A	1,5253 A	2,0405 A	2,4328 A	0,8101 A
	Ang	-157,01°	-107,80°	-79,85°	80,95°	-79,55°	-150,92°
i_{2}^{PAC}	Mag	0,4370 A	0,8177 A	1,4643 A	1,9534 A	2,3310 A	0,7753 A
	Ang	-159,11°	-109,03°	-83,10°	78,22°	-82,01°	-146,92°

Figura 3. 9 – Magnitudes das correntes conforme e não conforme – laboratorial.



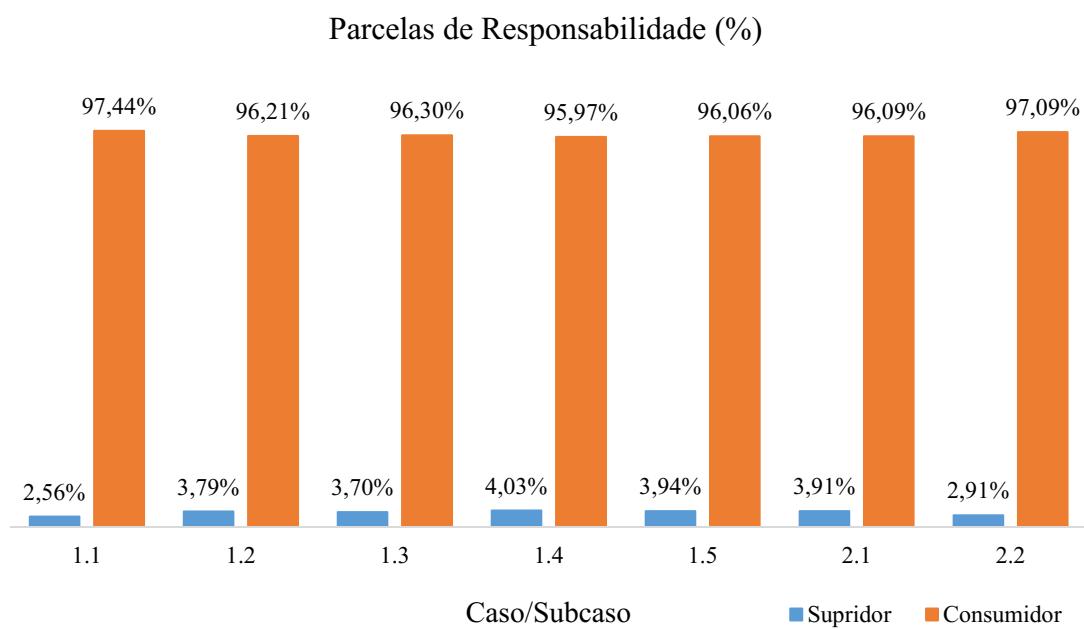
Fonte: Autoria própria.

Diante das informações suprapostas, nota-se que os resultados do procedimento nos estudos computacionais e laboratoriais são substancialmente semelhantes. Para o Caso 1, a

parcela conforme da corrente de sequência negativa (contribuição do supridor) apresenta comportamento praticamente constante para todos os subcasos avaliados. Por outro lado, a corrente não conforme (contribuições do consumidor) é incrementada de acordo com o aumento do FDv gerado pela carga. No tocante ao Caso 2, os resultados são muito próximos àqueles obtidos para o Caso 1. Nesse sentido, é evidente que para a condição na qual a rede apresenta perfil desequilibrado a leitura do método não é condizente com o comportamento físico esperado.

A Figura 3.10 apresenta os percentuais de responsabilidade de acordo com a metodologia em destaque.

Figura 3.10 – Parcelas de responsabilidade de acordo com o método da Corrente Conforme e Não Conforme – laboratorial.



Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, evidencia-se que o método da Corrente Conforme e Não Conforme apresentou resultados condizentes para as situações nas quais apenas a carga é desequilibrada. Contudo, quando a rede passou a operar com tensões assimétricas, o método atribuiu percentuais de responsabilidade muito próximos àqueles definidos para a primeira condição operativa. Portanto, estes resultados não são consonantes com as expectativas.

Quanto à influência da distribuição do carregamento na resposta do procedimento, nota-se que nas condições em que a carga apresentou distribuição trifásica desequilibrada (Subcasos 1.1 e 1.3) o método atribuiu os menores percentuais de desequilíbrio ao supridor.

Um outro fato meritório de destaque, também observado nos estudos computacionais, se trata da relação entre o fator de desequilíbrio de corrente e a resposta do procedimento. Neste particular, nota-se que os FDI praticamente não se alteram dos Subcasos 1.2 (27,07%) para o 2.1 (25,42%) e, também, dos Subcasos 1.3 (28,96%) para o 2.2 (27,27%). De fato, uma vez que o fator de desequilíbrio de corrente gerado pela fonte é relativamente baixo (5,21%) comparado ao das cargas, este fato sugere que o procedimento possui uma correlação com as contribuições de corrente. Todavia, ressalta-se que o método apresenta resultados insatisfatórios para a determinação das contribuições de tensão.

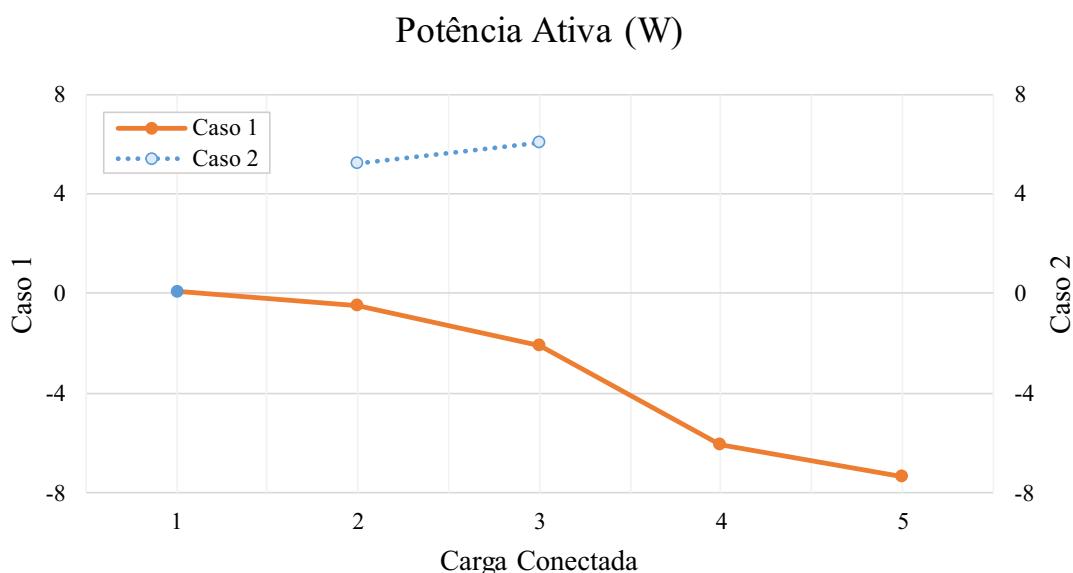
3.4.2 Método do Fluxo de Potência Trifásico – laboratorial

Os resultados da aplicação prática do método do Fluxo de Potência Trifásico são exibidos na Tabela 3.10 e nas Figuras 3.11 e 3.12.

Tabela 3. 10 – Resultados do método do Fluxo de Potência Trifásico – laboratorial.

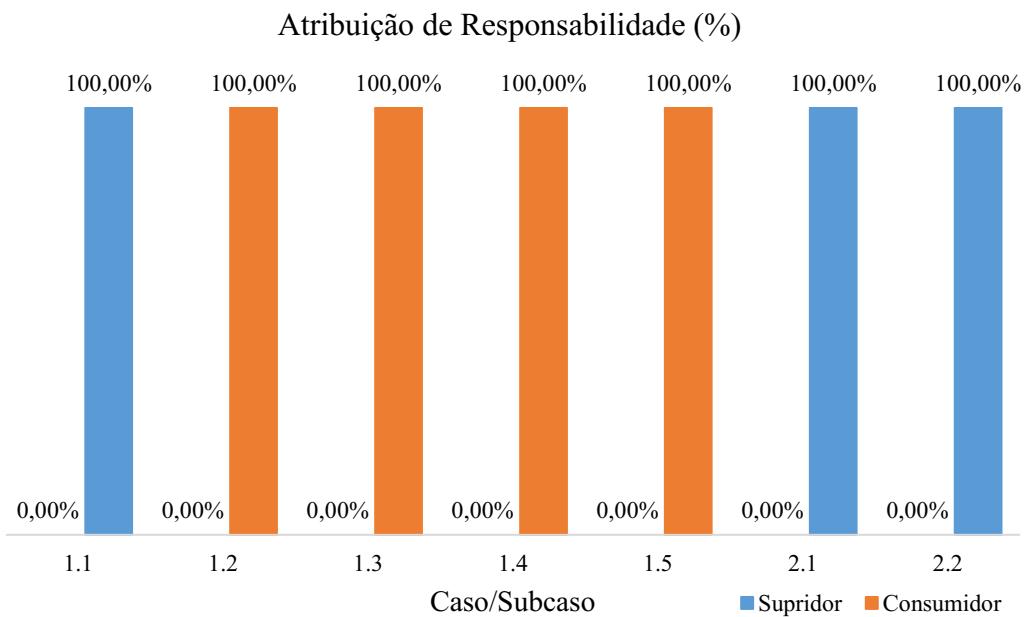
Variável	Caso/Subcaso						
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2
Potência Ativa de Sequência Negativa	0,0815 W	-0,5067 W	-2,1134 W	-6,0685 W	-7,3654 W	5,2341 W	6,0921 W

Figura 3. 11 – Potência Ativa de Sequência Negativa – laboratorial.



Fonte: Autoria própria.

Figura 3. 12 – Atribuição de responsabilidade de acordo com o método do Fluxo de Potência Trifásico – laboratorial.



Fonte: Autoria própria.

No tocante ao Caso 1, o procedimento indica que as contribuições do consumidor são majoritárias, com exceção do Subcaso 1.1. Todavia, esta leitura não é condizente com a expectativa, visto que, para este subcaso, a instalação consumidora se apresenta como fonte proeminente do distúrbio. Em se tratando do Caso 2, o método atribuiu a maior parcela de contribuição ao sistema de suprimento. Nesse sentido, é oportuno salientar que o fator de desequilíbrio gerado pela fonte (1,23%) é inferior ao FDv gerado pelas cargas nos Subcasos 1.2 (1,27%) e 1.3 (2,06%). Dessarte, mais uma vez, o procedimento se mostrou incapaz de indicar a parcela majoritária de forma coerente.

Para os casos aqui avaliados, não foi possível identificar se existe uma correlação entre a distribuição da carga e a resposta do método.

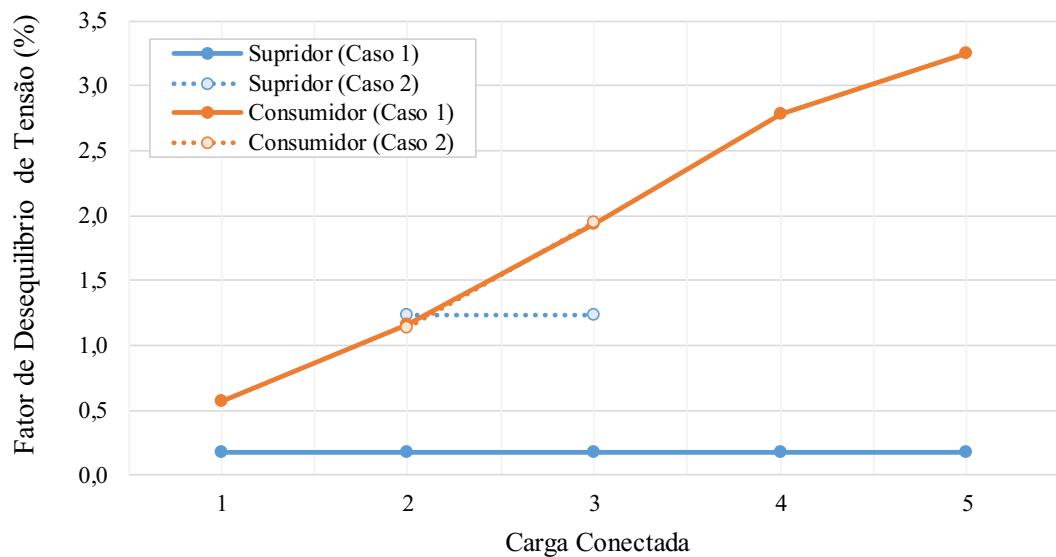
3.4.3 Método IEC – laboratorial

Os resultados do método IEC são apresentados na Tabela 3.11 e na Figura 3.13.

Tabela 3. 11 – Resultados do método IEC – laboratorial.

Variável		Caso/Subcaso						
		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2
$\dot{FD}_{V_{p\acute{e}r}}$	Mag	0,1777 %	0,1777 %	0,1777 %	0,1777 %	0,1777 %	0,1777 %	0,1777 %
	Ang	-103,50°	-103,50°	-103,50°	-103,50°	-103,50°	-103,50°	-103,50°
$\dot{FD}_{V_{p\acute{o}s}}$	Mag	0,5187 %	1,2656 %	2,0641 %	2,8847 %	3,3517 %	2,1452 %	3,0192 %
	Ang	160,66°	-151,85°	-141,56°	-157,18°	-156,53°	-130,69°	-129,59°
\dot{FD}_{V_C}	Mag	0,5651 %	1,1552 %	1,9274 %	2,7832 %	3,2480 %	1,1382 %	1,9465 %
	Ang	142,44°	-158,45°	-144,82°	-160,12°	-159,04°	-156,80°	-143,83°

Figura 3. 13 – Magnitudes dos fatores de desequilíbrio de tensão do supridor e consumidor – laboratorial.

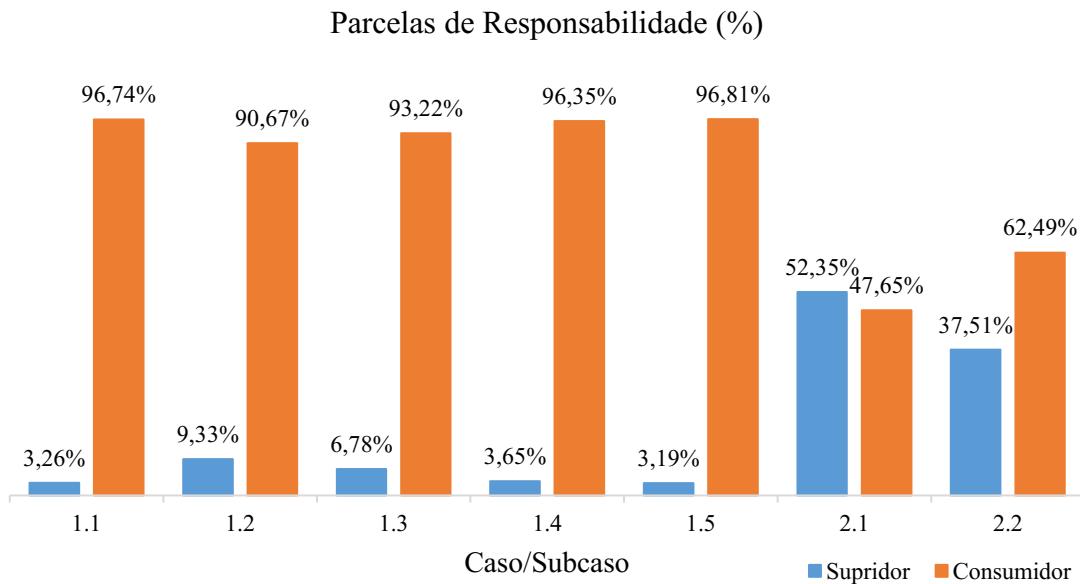


Fonte: Autoria própria.

Para o Caso 1, nota-se que o método IEC incumbiu a maior parcela das contribuições ao consumidor. De fato, embora isso se apresente condizente com o comportamento físico evidenciado, os percentuais atribuídos ao supridor variam para cada condição avaliada, atingindo valores de 3,19% (Subcaso 1.5) a 9,33% (Subcaso 1.2). A despeito da presença de um conteúdo fixo pré-existente (0,18%) de origem desconhecida, esperar-se-ia que a parcela atribuída ao supridor sofresse uma redução proporcional ao aumento do desequilíbrio de carga. Porém, isto só ocorre do Subcaso 1.2 ao 1.5. No que tange ao Caso 2, em virtude dos fatores de desequilíbrio de tensão provocados pelas Cargas 2 (1,27%) e 3 (2,06%) serem superiores ao FDv resultante das contribuições da rede (1,23%), a responsabilidade do consumidor dever-se-ia ser majoritária em ambos os casos. Todavia, o método IEC atribuiu, de forma equivocada, a maior parcela de responsabilidade ao supridor no Subcaso 2.1.

A Figura 3.14 ilustra os percentuais de responsabilidades atribuídos a cada agente de acordo com o método IEC.

Figura 3.14 – Parcelas de responsabilidade de acordo com o método IEC – laboratorial.



Fonte: Autoria própria.

Dessarte, comparado aos outros procedimentos, o método IEC apresentou resultados mais condizentes com relação ao fator de desequilíbrio de tensão, resultando falha em apenas uma das condições avaliadas (Subcaso 2.1)

Ademais, o desempenho do método não aparenta sofrer influência quanto à distribuição da carga entre as fases.

3.5 Considerações finais

Esta unidade foi dedicada à avaliação computacional e experimental dos principais procedimentos existentes na literatura para os propósitos de determinação das contribuições dos desequilíbrios de tensão, a saber, método da Corrente Conforme e Não Conforme, método do Fluxo de Potência Trifásico e método IEC. Assim, os estudos de caso foram divididos em dois grupos: um primeiro relacionado à presença de desequilíbrios incrementais gerados pelo chaveamento de diferentes arranjos de cargas; e um segundo que, além das assimetrias de carga, também conta com um nível de FDv imposto à fonte de suprimento, representando as

contribuições do supridor sobre os desequilíbrios globais. Diante desse cenário, as seguintes constatações são salientadas sobre a resposta de cada método:

- Quanto ao método da Corrente Conforme e Não Conforme, pondera-se que, nas situações em que a rede apresenta perfil desequilibrado, a resposta do procedimento é divergente do comportamento físico atrelado às contribuições de tensão. Pontua-se, todavia, que o método aparenta ter uma correlação com as contribuições de corrente. Não obstante este fato, haja vista que a grande maioria das regulamentações vigentes são embasadas no monitoramento de tensão, este procedimento não se mostrou uma solução viável para atender aos propósitos aqui postos;
- Quanto ao método do Fluxo de Potência Trifásico, este apresentou falhas da determinação da fonte proeminente do distúrbio, mesmo nos estudos computacionais. Na avaliação experimental, a resposta do procedimento foi ainda mais divergente da realidade física esperada. Dessa forma, salienta-se que esta metodologia não se trata de uma abordagem que apresenta resultados confiáveis, haja vista seu desempenho insatisfatório mesmo em avaliações em ambientes controlados;
- Quanto ao método IEC, embora este tenha apresentado resultados computacionais promissores, nos estudos experimentais a metodologia foi falha em uma das condições operativas preestabelecidas. Não obstante este fato, quando comparado aos demais procedimentos, o método IEC apresentou respostas mais consonantes com o comportamento físico atrelado às contribuições de tensão. Todavia, sua aplicação é dependente da desconexão da carga do consumidor;
- Diante das constatações evidenciadas nesta unidade, ratifica-se a necessidade do estabelecimento de uma metodologia consistente para a determinação das contribuições sobre o desequilíbrio global manifestado em um dado barramento elétrico.

MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO PARA A DETERMINAÇÃO DAS CONTRIBUIÇÕES SOBRE OS DESEQUILÍBRIOS

4

4.1 Considerações iniciais

Com o propósito de definir um procedimento de referência para a avaliação de metodologias para a determinação das contribuições sobre os desequilíbrios, esta unidade é dedicada a proposição de uma metodologia calcada em princípios clássicos de circuitos elétricos, a qual é aqui denominada por método da Superposição.

Dessarte, são explorados os aspectos físicos e matemáticos do procedimento aqui tratado, bem como as limitações atreladas ao seu emprego prático nas redes elétricas.

Na sequência, são propostos estudos investigativos de caráter computacional e laboratorial, visando avaliar o procedimento nos termos realizados na unidade precedente.

Ao final, são apresentadas, na forma de síntese, as principais constatações evidenciadas ao longo desta etapa.

4.2 Aspectos gerais

Em 2010, o denominado método da Superposição foi proposto como procedimento para o compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas (Xu e Liu, 2000). Muito embora sua aplicação no contexto harmônico já tenha sido alvo de grandes discussões por parte da comunidade científica, atualmente reconhece-se que esta ferramenta apresenta sólido embasamento físico-teórico, visto a grande quantidade de trabalhos que ratificam sua eficácia (Santos, 2015, 2019). De fato, esta constatação apresentou-se como motivadora no tocante à busca por uma ferramenta teórica consistente e com grandes potencialidades de aplicação para a determinação das contribuições sobre os desequilíbrios.

Antes de mais nada, foram realizadas buscas em diversos repositórios nacionais e internacionais utilizando as palavras-chaves “método da Superposição” e “desequilíbrios” concomitantemente, visando avaliar se esta ferramenta já havia sido empregada para os fins aqui postos.

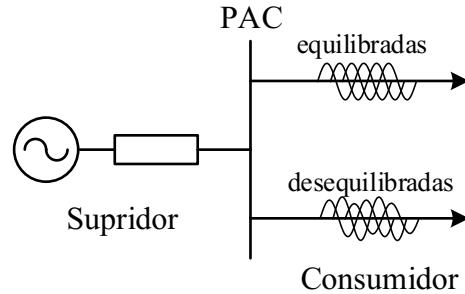
De fato, foram identificadas duas bibliografias correlacionando o método da Superposição com os desequilíbrios. A primeira refere-se ao trabalho proposto por (Liu e Milanovic, 2013), o qual sugere o uso de um procedimento probabilístico para a determinação dos níveis esperados de desequilíbrios oriundos de instalações perturbadoras. Na ocasião, os autores denominaram como método da Superposição o efeito cumulativo das contribuições individuais de cargas potencialmente capazes de operar de forma desequilibrada. O objetivo geral do trabalho é avaliar a influência da operação assimétrica de cada carga sobre a intensidade dos desequilíbrios em diferentes locais da rede, a fim de contribuir com o planejamento preditivo de instalações, para as quais os níveis máximos de emissão não ultrapassem os limites requisitados. É oportuno salientar que este método não permite avaliar a contribuição global manifestada em dado local físico que se encontra em situação de violação, pois apenas avalia a probabilidade de determinadas cargas apresentarem perfil desequilibrado e seus possíveis impactos sobre o sistema. Dessa forma, a metodologia definida na mencionada referência não está diretamente associada com os fundamentos que serão apresentados nesta unidade.

Não obstante o trabalho supramencionado, em (Arão, 2014), foi sugerida a possibilidade de adaptação de diferentes procedimentos de compartilhamento de responsabilidade harmônica para atender à problemática dos desequilíbrios. Embora o método da Superposição tenha sido citado, este foi a priori descartado sob a justificativa de sua aplicação ser inviável no contexto dos desequilíbrios. Contudo, tendo em vista a ausência de maiores esclarecimentos sobre o assunto, bem como evidências científicas que possam reiterar esta afirmação, enfatiza-se que a factibilidade de aplicação do método da Superposição para estudos de desequilíbrios é demonstrada neste trabalho, sendo, portanto, uma das contribuições oferecidas.

4.3 Desenvolvimentos matemáticos

Com o propósito de elucidar a problemática em pauta, a Figura 2.4 apresenta uma unidade consumidora composta de cargas com características equilibradas e desequilibradas, as quais são supridas por tensões assimétricas.

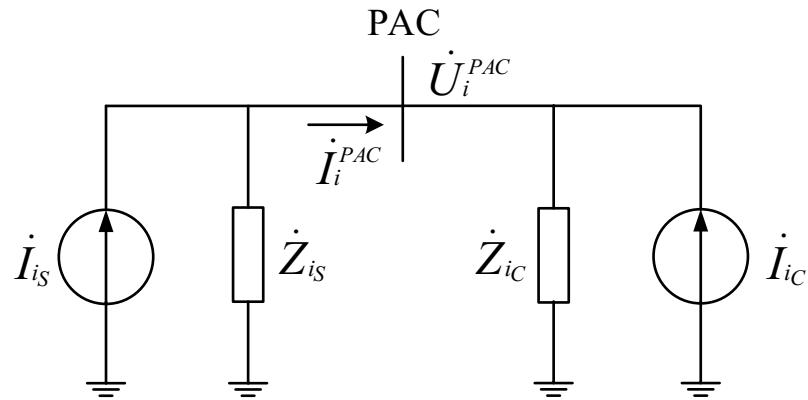
Figura 4. 1 – Arranjo representativo do ponto de acoplamento entre o sistema supridor e consumidor.



Fonte: Autoria própria.

Reconhecendo que sistemas trifásicos desequilibrados, além de apresentarem as típicas tensões e correntes de sequência positiva em frequência fundamental, são potenciais fontes de tensões e correntes de sequência negativa e zero, as contribuições de cada componente de sequência podem ser representadas pelo circuito equivalente de Norton, como ilustra a Figura 4.2.

Figura 4. 2 – Circuito equivalente de Norton no domínio das componentes simétricas.



Fonte: Autoria própria.

Onde:

\dot{I}_{i_S} e \dot{I}_{i_C} – fontes de corrente representativas das contribuições do supridor e consumidor no domínio das componentes simétricas, respectivamente.

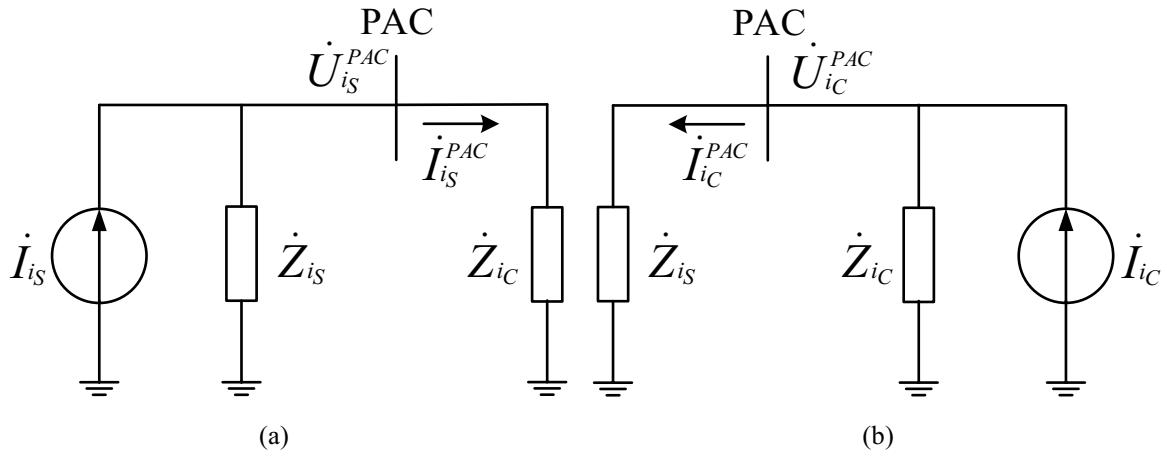
\dot{Z}_{i_S} e \dot{Z}_{i_C} – impedâncias equivalentes do supridor e consumidor no domínio das componentes simétricas, respectivamente.

\dot{U}_i^{PAC} – tensão no PAC no domínio das componentes simétricas;

\dot{I}_i^{PAC} – corrente no PAC no domínio das componentes simétricas.

Segundo o clássico Teorema da Superposição, em circuitos lineares compostos de múltiplas fontes alternadas de tensão e/ou corrente, a contribuição total produzida por estas fontes é equivalente ao somatório das contribuições de cada uma delas operando de forma independente. Assim sendo, o circuito equivalente de Norton representativo das contribuições individuais do supridor e consumidor é apresentado na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Circuito equivalente de Norton representando as contribuições individuais: (a) supridor e (b) consumidor.



Fonte: Autoria própria.

Onde:

$\dot{U}_{i_S}^{PAC}$ e $\dot{U}_{i_C}^{PAC}$ – tensões do supridor e consumidor no PAC no domínio das componentes simétricas, respectivamente;

$\dot{i}_{i_S}^{PAC}$ e $\dot{i}_{i_C}^{PAC}$ – correntes do supridor e consumidor no PAC no domínio das componentes simétricas, respectivamente.

A partir da Figura 4.2, tem-se que as correntes do supridor (\dot{i}_{i_S}) e consumidor (\dot{i}_{i_C}), no domínio das componentes simétricas, são dadas pelas equações (4.1) e (4.2), respectivamente.

$$\dot{i}_{i_S} = \frac{\dot{U}_{i_S}^{PAC}}{\dot{Z}_{i_S}} + \dot{i}_i^{PAC} \quad (4.1)$$

$$\dot{i}_{i_C} = \frac{\dot{U}_{i_C}^{PAC}}{\dot{Z}_{i_C}} - \dot{i}_i^{PAC} \quad (4.2)$$

Aplicando o método do divisor de corrente aos circuitos da Figura 4.3 (a) e (b), obtém-se as contribuições de corrente do supridor ($\dot{i}_{i_S}^{PAC}$) e consumidor ($\dot{i}_{i_C}^{PAC}$) no PAC, de acordo com (4.3) e (4.4).

$$\dot{I}_{i_S}^{PAC} = \dot{I}_{i_S} \times \frac{\dot{Z}_{i_S}}{\dot{Z}_{i_S} + \dot{Z}_{i_C}} \quad (4.3)$$

$$\dot{I}_{i_C}^{PAC} = \dot{I}_{i_C} \times \frac{\dot{Z}_{i_C}}{\dot{Z}_{i_S} + \dot{Z}_{i_C}} \quad (4.4)$$

Alternativamente, substituindo (4.1) em (4.3) e (4.2) em (4.4), são obtidas as respectivas expressões (4.5) e (4.6), as quais representam as contribuições individuais de corrente no PAC em função das impedâncias e das tensões e correntes no PAC.

$$\dot{I}_{i_S}^{PAC} = \frac{\dot{U}_i^{PAC} + (\dot{Z}_{i_S} \times \dot{I}_i^{PAC})}{\dot{Z}_{i_S} + \dot{Z}_{i_C}} \quad (4.5)$$

$$\dot{I}_{i_C}^{PAC} = \frac{\dot{U}_i^{PAC} - (\dot{Z}_{i_C} \times \dot{I}_i^{PAC})}{\dot{Z}_{i_S} + \dot{Z}_{i_C}} \quad (4.6)$$

Portanto, a corrente total no PAC (\dot{I}_i^{PAC}), de acordo com o sentido arbitrado nas Figuras 4.2 e 4.3, pode ser calculada em conformidade com (4.7).

$$\dot{I}_i^{PAC} = \dot{I}_{i_S}^{PAC} - \dot{I}_{i_C}^{PAC} \quad (4.7)$$

Similarmente, para o cálculo das contribuições de tensão do supridor ($\dot{U}_{i_S}^{PAC}$) e consumidor ($\dot{U}_{i_C}^{PAC}$) no PAC, têm-se (4.8) e (4.9), de acordo com a Figura 4.3 (a) e (b).

$$\dot{U}_{i_S}^{PAC} = \left(\frac{\dot{Z}_{i_S} \times \dot{Z}_{i_C}}{\dot{Z}_{i_S} + \dot{Z}_{i_C}} \right) \times \dot{I}_{i_S} = \left(\frac{\dot{Z}_{i_S} \times \dot{Z}_{i_C}}{\dot{Z}_{i_S} + \dot{Z}_{i_C}} \right) \times \frac{\dot{U}_i^{PAC}}{\dot{Z}_{i_S}} + \dot{I}_i^{PAC} \quad (4.8)$$

$$\dot{U}_{i_C}^{PAC} = \left(\frac{\dot{Z}_{i_S} \times \dot{Z}_{i_C}}{\dot{Z}_{i_S} + \dot{Z}_{i_C}} \right) \times \dot{I}_{i_C} = \left(\frac{\dot{Z}_{i_S} \times \dot{Z}_{i_C}}{\dot{Z}_{i_S} + \dot{Z}_{i_C}} \right) \times \frac{\dot{U}_i^{PAC}}{\dot{Z}_{i_C}} - \dot{I}_i^{PAC} \quad (4.9)$$

Dessa forma, a contribuição global de tensão no PAC (\dot{U}_i^{PAC}) resulta da composição fasorial das contribuições individuais de ambas as partes, tal como exposto em (4.10).

$$\dot{U}_i^{PAC} = \dot{U}_{i_S}^{PAC} + \dot{U}_{i_C}^{PAC} \quad (4.10)$$

A fim de determinar as parcelas de responsabilidade sobre os desequilíbrios de tensão ou corrente, sugere-se obter as projeções das contribuições do supridor e consumidor sobre o vetor total, em consonância com as orientações expostas no Apêndice B.

Adicionalmente, uma vez determinadas as tensões no PAC, é possível estimar os fatores de desequilíbrio de sequência negativa e zero atribuídos a cada fonte perturbadora. Para isto, basta obter a relação percentual entre as tensões de sequência negativa ou zero, obtidas pelas expressões (4.8) e (4.9), e as respectivas tensões de sequência positiva.

Embora os desenvolvimentos matemáticos aqui apresentados sejam genéricos para as componentes de sequência, cabe pontuar que as fontes de corrente de sequência positiva, mais comumente representadas por fontes de tensão pelo Teorema de Thévenin, estão diretamente relacionadas com a presença de forças eletromotrizas que caracterizam instalações com capacidade de geração ativa. Nesse sentido, para sistemas radiais, haverá fluxo de potência de sequência positiva apenas com sentido unidirecional – da fonte para a carga –. Salienta-se, ainda, que estas componentes não estão intimamente atreladas às assimetrias do sistema, não sendo, portanto, objeto de avaliação das contribuições dos desequilíbrios.

Quanto às componentes de sequência zero, ressalta-se que sua contribuição é dependente da topologia do sistema sob avaliação. Em redes cujo condutor de neutro é isolado da malha de aterramento, não há caminho para a circulação das correntes de sequência zero. Dessa forma, estas ficam confinadas ao seu circuito de origem e não se propagam para as regiões circunvizinhas. Ainda que o método da Superposição, em teoria, possa ser aplicado para a avaliação das contribuições dos desequilíbrios de sequência zero, estes não serão aqui tratados com o rigor de detalhes, em consonância com os argumentos já apresentados nas unidades anteriores.

Por fim, embora o método possibilite realizar a determinação das contribuições sobre os desequilíbrios de tensão e corrente no PAC, em virtude de os limites de compatibilidade eletromagnética regulamentados estarem diretamente associados aos indicadores de tensão, as contribuições advindas de supridores e consumidores serão avaliadas em termos deste indicador.

4.4 Quanto ao critério para a determinação das impedâncias

Embora o clássico método da Superposição se apresente como uma ferramenta teórica consistente para cumprir aos propósitos aqui postos, de fato, existem desafios a serem superados no tocante a sua aplicação em determinadas situações. Neste contexto, avaliando as expressões

(4.8) e (4.9), nota-se que a metodologia requer dois conjuntos de informações fundamentais: um primeiro relacionado às tensões e correntes trifásicas no barramento sob avaliação; e um segundo referente às impedâncias de sequência negativa do supridor e consumidor.

Em tese, a aquisição das tensões e correntes se trata de um processo relativamente simples, visto que instrumentos de medição clássicos, capazes de fornecer a magnitude e ângulo de fase das variáveis de forma precisa, são suficientes para este propósito.

No que tange às impedâncias de sequência negativa, há uma série de complexidades no processo de determinação destas grandezas, especialmente quando se tratam de redes elétricas reais. Isto se deve, sobretudo, ao grau de incerteza associado aos diferentes aspectos que englobam os sistemas elétricos como um todo.

De fato, uma das dificuldades reside na representação dos elementos constituintes de determinados sistemas. Na atualidade, é comum utilizar ferramentas matemáticas para a representação genérica de cargas. Todavia, é fato que, embora as modelagens sejam úteis em uma variedade de aplicações, por vezes, estas não são suficientes para representar a natureza e/ou as características operacionais de alguns dispositivos. Além disso, o comportamento dinâmico de certos equipamentos e, também, do próprio sistema agregaria maior grau de complexidade ao assunto, visto que as impedâncias podem sofrer grandes variações ao longo do tempo. Nesse sentido, ainda que a proposição do método da Superposição para estudos de desequilíbrios se trate de uma das contribuições oferecidas por esta tese, reconhece-se que a problemática da determinação das impedâncias se apresenta como tema desafiador.

Para fins de avaliação do método da Superposição, neste trabalho, o cálculo das impedâncias de sequência negativa foi realizado por meio da conexão, de forma independente, de cada fonte de perturbação ao circuito de sequência negativa representado na Figura 4.3 (a) e (b). Contudo, pondera-se que este procedimento só é possível em ambientes controlados, quando se tem a possibilidade de conexão/desconexão individual das fontes de perturbação. Portanto, esta solução não se trata de uma estratégia factível para contornar as limitações de aplicação prática do método da Superposição.

Objetivando obter as impedâncias de sequência negativa do supridor e consumidor pelo critério aqui estabelecido, são utilizadas as respectivas expressões (4.11) e (4.12), as quais são dependentes das tensões e correntes no PAC.

$$\dot{Z}_{2S} = \frac{\dot{U}_{2C}^{PAC}}{\dot{I}_{2C}^{PAC}} \quad (4.11)$$

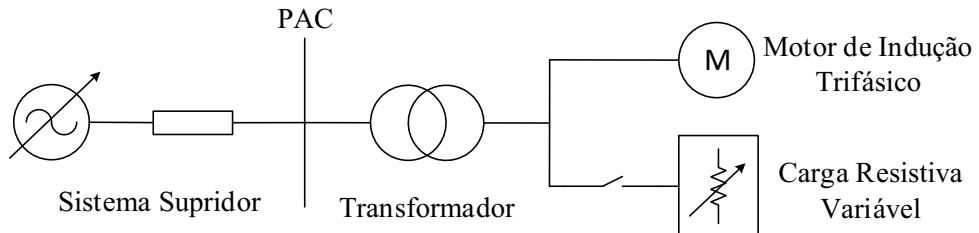
$$\dot{Z}_{2C} = \frac{\dot{U}_{2S}^{PAC}}{\dot{I}_{2S}^{PAC}} \quad (4.12)$$

Nesse sentido, é oportuno salientar que, neste trabalho, foram utilizadas as próprias fontes de desequilíbrio empregadas nos estudos de casos para representar as fontes de corrente da Figura 4.3.

4.5 Estudos investigativos

Os estudos de desempenho foram realizados de forma análoga aos desenvolvimentos apresentados na unidade precedente, os quais encontram-se detalhados no Apêndice D. Assim, o arranjo utilizado se trata da mesma configuração elucidada na Figura 4.1 (Figura C.1). Na sequência, a fim de facilitar as discussões dos resultados, a Tabela 4.1 (Tabela D.3) apresenta síntese dos casos/subcasos avaliados.

Figura 4. 4 – Equivalente elétrico representativo utilizado nos estudos computacionais e laboratoriais.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 4. 1 – Síntese dos estudos de casos.

Caso	Subcaso	FDv imposto à fonte (aprox.)	Carga conectada	Tipo de distribuição da carga	FDv gerado pela carga (aprox.)
1	.1	0%	Carga 1	Trifásica desequilibrada	0,5%
	.2		Carga 2	Monofásica	1,0%
	.3		Carga 3	Trifásica desequilibrada	1,5%
	.4		Carga 4	Monofásica	2,0%
	.5		Carga 5	Monofásica	2,5%
2	.1	1%	Carga 2	Monofásica	1,0%
	.2		Carga 3	Trifásica desequilibrada	1,5%

4.6 Avaliação computacional

De forma similar ao que foi feito na unidade anterior, os estudos computacionais foram realizados no programa MATLAB/Simulink® utilizando os mesmos grupos de simulações detalhados no Apêndice C.

A Tabela 4.2 (Tabela 3.2) apresenta salienta os fatores de desequilíbrio de tensão e corrente no PAC para a condição em que a carga resistiva se encontra desconectada. Similarmente, a Tabela 4.3 (Tabela 3.3) fornece os percentuais de desequilíbrio para cada caso/subcaso propriamente dito.

Tabela 4. 2 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva desconectada – computacional.

Fonte	Fator de desequilíbrio (%)	
	Tensão	Corrente
Equilibrada	0,00	0,00
Desequilibrada	1,04	6,68

Tabela 4. 3 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva conectada – computacional.

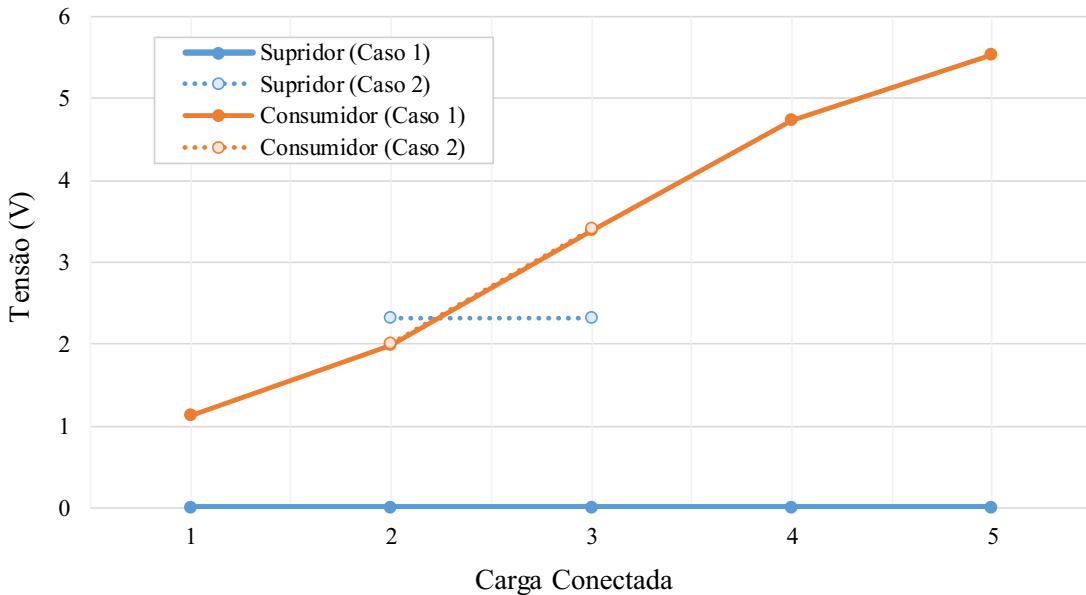
Fator de desequilíbrio	Caso/Subcaso						
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2
Tensão (%)	0,51	0,90	1,54	2,15	2,51	1,61	2,29
Corrente (%)	5,08	10,99	12,97	21,44	23,76	15,28	15,32

Os resultados do método da Superposição são apresentados na Tabela 4.4. Na sequência, a Figuras 4.5 ilustra as magnitudes das tensões de sequência negativas atribuídas ao supridor para cada condição.

Tabela 4. 4 – Resultados do método da Superposição – computacional.

Variável	Caso/Subcaso						
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2
\dot{Z}_{2s}	Mag	3,2004 Ω	3,1985 Ω	3,2031 Ω	3,1998 Ω	3,1990 Ω	3,1985 Ω
	Ang	89,00°	89,23°	89,32°	89,18°	89,22°	89,23°
\dot{Z}_{2c}	Mag	7,1735 Ω					
	Ang	28,46°	28,46°	28,46°	28,46°	28,46°	28,46°
\dot{U}_{2s}^{PAC}	Mag	0,0000 V	2,3159 V				
	Ang	-17,67°	0,00°	0,00°	72,29°	0,00°	-120,70°
\dot{U}_{2c}^{PAC}	Mag	1,1226 V	1,9955 V	3,3923 V	4,7383 V	5,5321 V	2,0067 V
	Ang	109,22°	171,35°	-177,54°	-71,85°	167,27°	170,86°
\dot{U}_2^{PAC}	Mag	1,1226 V	1,9955 V	3,3923 V	4,7383 V	5,5321 V	3,5786 V
	Ang	109,22°	171,35°	-177,54°	-71,85°	167,27°	-157,14°

Figura 4.5 – Magnitudes das tensões de sequência negativa no PAC – computacional.

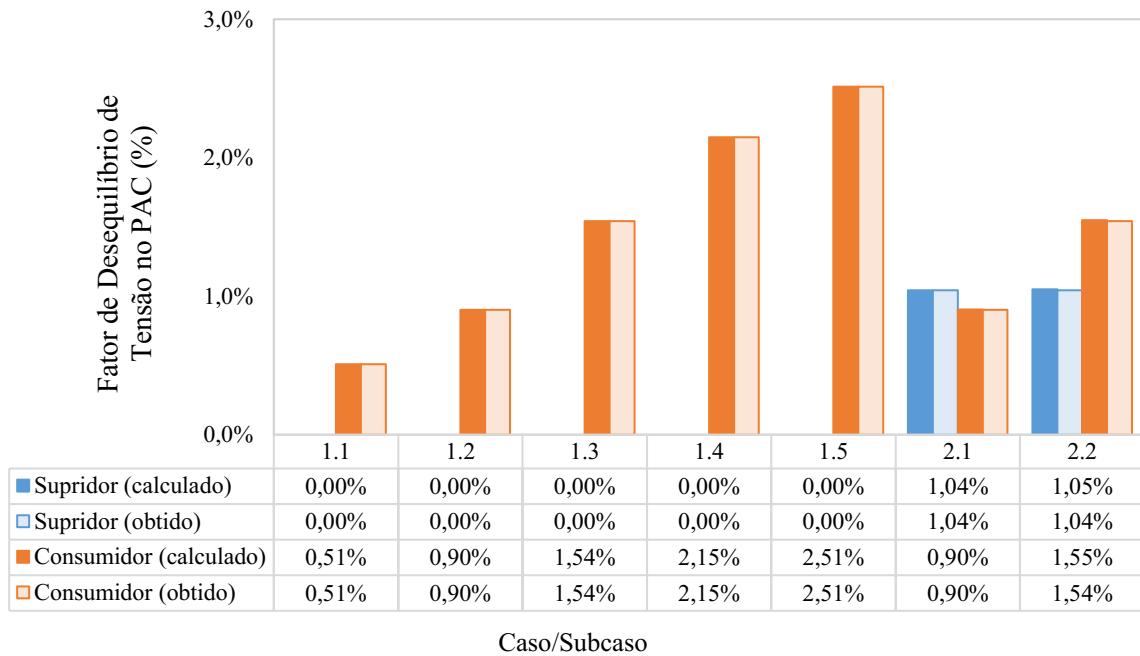


Fonte: Autoria própria.

Avaliando a Figura 4.5, nota-se que, para o Caso 1, a tensão de sequência negativa do supridor permanece constante e equivalente a zero em todos os subcasos avaliados. Por outro lado, as tensões de sequência negativa atribuídas ao consumidor são linearmente incrementadas de acordo com o aumento do desequilíbrio de carga. Para o Caso 2, quando a rede opera com tensões assimétricas, as contribuições do supridor novamente apresentam comportamento constante, todavia, há um deslocamento vertical na curva indicando que houve aumento das contribuições deste agente. Paralelamente, a tensões de sequência negativa do consumidor são equivalentes àquelas manifestadas no Caso 1, sugerindo que esta parcela não sofreu qualquer alteração.

Nesta etapa, os fatores de desequilíbrio de tensão provocados pela operação individual de cada uma das fontes de desequilíbrios foram comparados com os FDv calculados para o supridor e consumidor de acordo com o método da Superposição. Por conseguinte, a Figura 4.6 ilustra, de forma comparativa, estes resultados.

Figura 4. 6 – Comparação entre o FDv obtido pela operação individual de cada fonte de desequilíbrio e o calculado pelo método da Superposição – computacional.

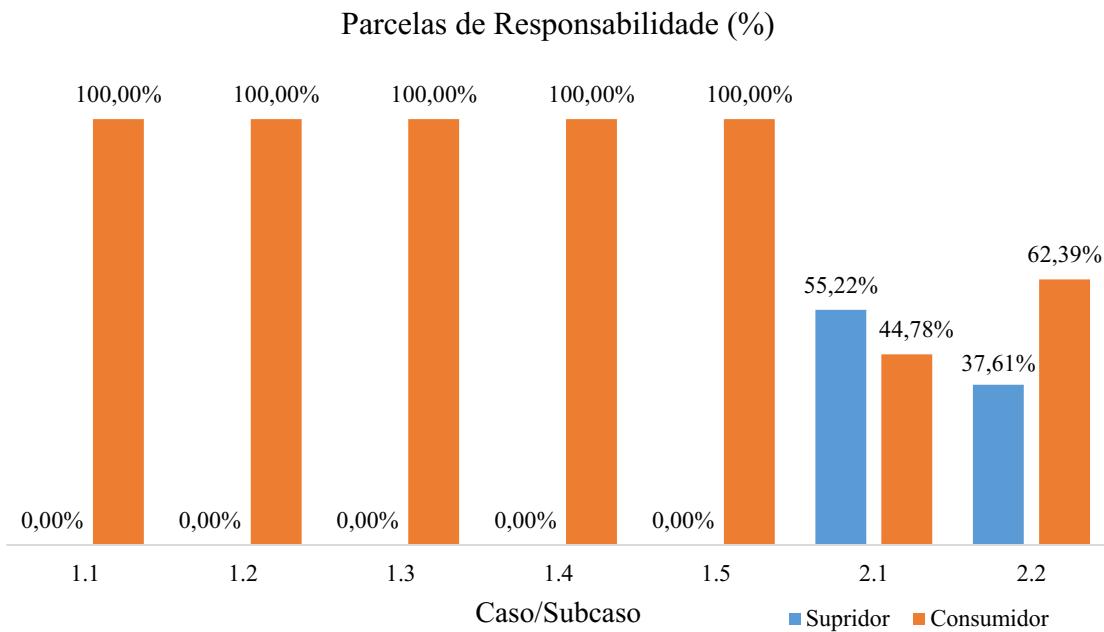


Fonte: Autoria própria.

Diante das informações supramencionadas, fica evidenciada a eficácia do procedimento aqui descrito, visto que os percentuais calculados pelo método são substancialmente próximos daqueles diretamente obtidos. O erro absoluto de maior expressividade resultou 0,01 pontos percentuais (Subcaso 1.3). De fato, na ausência de procedimentos de referência confiáveis para a comparação de resultados, a possibilidade de determinar os percentuais de desequilíbrio atribuídos a cada agente se mostra como uma alternativa consistente no tocante a avaliação da metodologia quanto ao seu aspecto qualitativo e quantitativo.

Quanto às parcelas de responsabilidade atribuídas a cada parte, estas são apresentadas na Figura 4.7.

Figura 4. 7 – Parcelas de responsabilidade de acordo com o método da Superposição – computacional.



Fonte: Autoria própria.

Do exposto, para o Caso 1, o método atribuiu integralmente as parcelas de responsabilidade ao supridor em todos os subcasos. No que tange ao Caso 2, foi incumbido um percentual de 55,22% (Subcaso 2.1) e 37,61% (Subcaso 2.2) ao supridor. Nesse sentido, comparando o FDv na condição em que a fonte opera com tensões assimétricas (1,04%) com o FDv provocado pelas Cargas 2 e 3 (0,90% e 1,54%, respectivamente), infere-se que tais percentuais refletem o comportamento físico esperado, reforçando a eficácia do procedimento em destaque. Ademais, a distribuição da carga entre as fases não aparenta exercer influência na resposta da metodologia.

4.7 Avaliação laboratorial

De forma análoga à unidade precedente, a avaliação laboratorial foi realizada nos termos estabelecidos na Seção C.2 do Apêndice C. Em resumo, o sistema supridor é representado por uma fonte de tensão trifásica, controlada, a qual é conectada em série com indutores para a representação do nível de curto-circuito. Na sequência, têm-se um transformador trifásico que acopla o sistema de suprimento à instalação consumidora, a qual é composta de um motor de indução trifásico conectado em paralelo com uma carga resistiva variável (desequilibrada). A ilustração genérica deste arranjo é aquela exposta na Figura 4.4.

As Tabelas 4.5 e 4.6 (Tabelas 3.7 e 3.8, respectivamente) são apresentadas, neste momento, com o propósito de elucidar os fatores de desequilíbrio no PAC para as condições operativas em destaque.

Tabela 4. 5 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva desconectada – laboratorial.

Fonte	Fator de desequilíbrio (%)	
	Tensão	Corrente
Equilibrada	0,18	2,08
Desequilibrada	1,23	5,21

Tabela 4. 6 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva conectada – laboratorial.

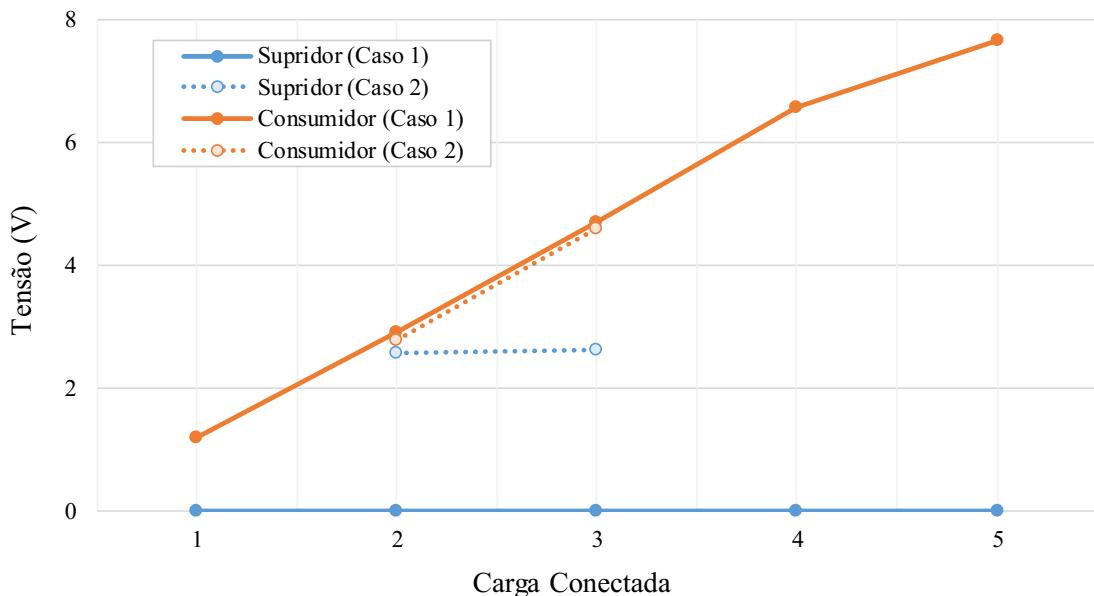
Fator de desequilíbrio	Caso/Subcaso						
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2
Tensão (%)	0,52	1,27	2,06	2,88	3,35	2,15	3,02
Corrente (%)	11,20	27,07	28,96	49,25	54,20	25,42	27,27

Dessarte, a Tabela 4.7 sintetiza a resposta do método da Superposição para cada caso/subcaso da aplicação experimental. Na sequência, a Figura 4.8 ilustra as magnitudes das tensões de sequência negativa obtidas via aplicação do método.

Tabela 4. 7 – Resultados do método da Superposição – laboratorial.

Variável	Caso/Subcaso						
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2
\dot{Z}_{2S}	Mag	2,7150 Ω	3,5454 Ω	3,2188 Ω	3,3656 Ω	3,2884 Ω	3,5454 Ω
	Ang	93,00°	85,92°	84,14°	80,94°	82,10°	85,92°
\dot{Z}_{2C}	Mag	19,9492 Ω					
	Ang	51,51°	51,51°	51,51°	51,51°	51,51°	51,51°
\dot{U}_{2S}^{PAC}	Mag	0,0000 V	2,5681 V				
	Ang	-17,67°	0,00°	0,00°	-94,38°	-94,20°	107,76°
\dot{U}_{2C}^{PAC}	Mag	1,1864 V	2,8990 V	3,3923 V	6,5745 V	7,6650 V	2,7915 V
	Ang	113,90°	156,88°	-177,54°	-20,85°	-179,90°	62,24°
\dot{U}_2^{PAC}	Mag	1,1864 V	2,8990 V	3,3923 V	6,5745 V	7,6650 V	4,9429 V
	Ang	113,90°	156,88°	-177,54°	-20,85°	-179,90°	84,00°

Figura 4. 8 – Magnitudes das tensões de sequência negativa no PAC – laboratorial.

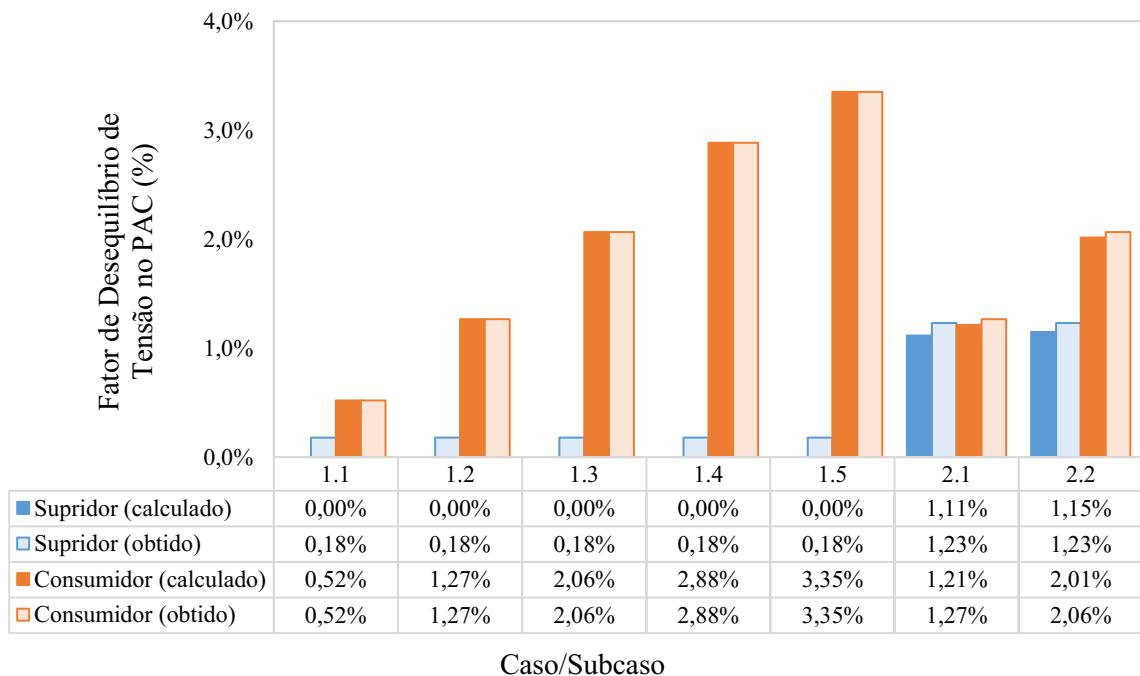


Fonte: Autoria própria.

Conforme evidenciado, para o Caso 1, as contribuições do supridor permanecem constantes e iguais a zero em todos os subcasos em questão. Por outro lado, a tensão de sequência negativa da instalação consumidora é incrementada em conformidade com o aumento do desequilíbrio de carga. Para o Caso 2, as contribuições do supridor permanecem constantes, todavia, há um deslocamento vertical indicativo de que a rede passa a operar com tensões desequilibradas. Para este caso, as contribuições do consumidor são consideravelmente próximas àquelas manifestadas no caso anterior, sugerindo que não houve aumento das contribuições deste agente.

A relação entre os fatores de desequilíbrio medidos antes e após a conexão da carga e aqueles obtidos pela aplicação do método da Superposição é apresentada na Figura 4.9.

Figura 4. 9 – Comparação entre o FDv obtido pela operação individual de cada fonte de desequilíbrio e o calculado pelo método da Superposição – laboratorial.

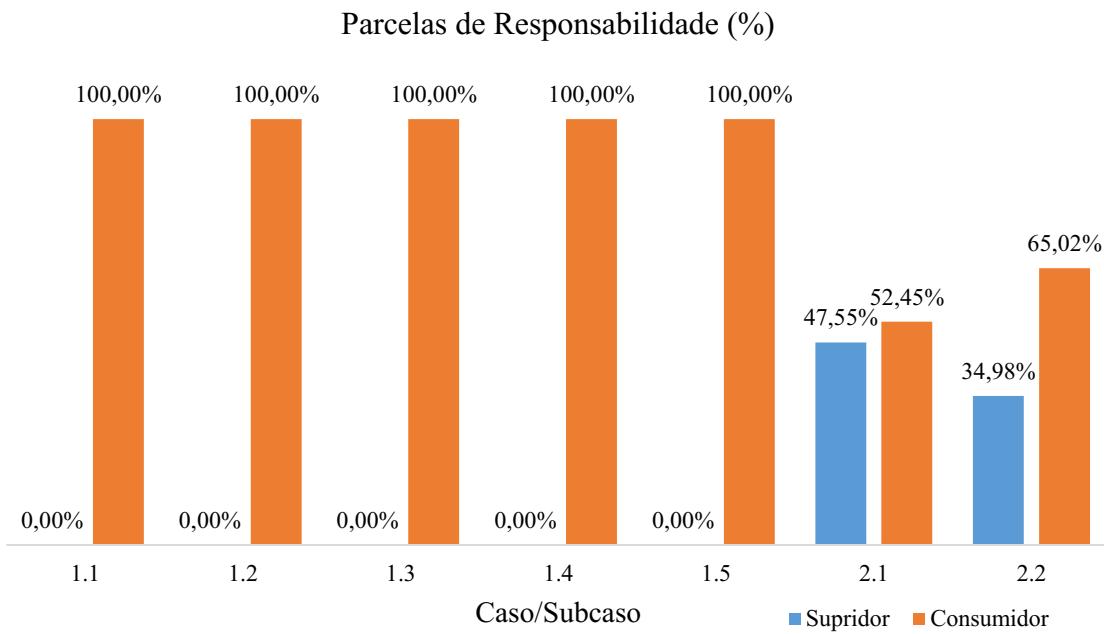


Fonte: Autoria própria.

Com base na Figura 4.9, nota-se que, para o Caso 1, o FDv atribuído ao consumidor é equivalente ao FDv medido após a conexão da carga desequilibrada. Já o FDv do supridor permanece constante e igual a zero em todos os subcasos. Observa-se que, embora as tensões impostas à fonte de suprimento tenham perfil simétrico para este caso, existe um percentual de desequilíbrio de tensão pré-existente de 0,18%. Este se trata de uma combinação das assimetrias inerentes ao circuito base, cuja origem não é particularmente conhecida. Ainda que a metodologia não tenha sido capaz de atribuir este percentual a nenhuma das partes, a resposta do procedimento apresentou resultados muito próximos dos valores esperados. Quanto ao Caso 2, o método atribuiu percentuais de desequilíbrio consonantes com os valores medidos, cujo maior erro absoluto foi de 0,12 pontos percentuais.

A Figura 10 apresenta as parcelas de responsabilidade propriamente ditas.

Figura 4. 10 – Parcelas de responsabilidade de acordo com o método da Superposição – laboratorial.



Fonte: Autoria própria.

Portanto, para o Caso 1, o método atribuiu integralmente as parcelas de responsabilidade à instalação consumidora. Para o Caso 2, os percentuais foram proporcionalmente distribuídos entre as partes. Esta proporção se mostra condizente com as expectativas, tal como observado no Subcaso 2.1. Nesta condição, de acordo com os fatores de desequilíbrio medidos quando a rede opera com tensões assimétricas (1,23%) e aqueles obtidos no Subcaso 1.2 (1,27%), os respectivos percentuais sugerem que as parcelas de responsabilidade devem ser próximas a 50%, cuja maior parte é incumbida ao consumidor. Além disso, o método não parece sofrer influência da distribuição das cargas entre as fases.

Não obstante as considerações suprapostas, vale ressaltar que, evidentemente, a determinação das impedâncias exerce influência direta na resposta do procedimento. Dessa forma, uma vez que a magnitude e o ângulo de fase das impedâncias sejam determinados de forma precisa, o método responderá satisfatoriamente. Neste contexto, embora o procedimento para o cálculo das impedâncias apresentado nesta unidade seja uma estratégia matemática interessante sob o ponto de vista teórico, de fato, ela se trata de um recurso limitado. Isto se deve, primeiramente, ao fato de que a estratégia é restrita a ambientes controlados, nos quais é possível manipular as fontes de perturbação. Além disso, para que este forneça resultados condizentes, as fontes de perturbação devem ser conectadas individualmente, a fim de determinar as impedâncias de cada parte. Por conseguinte, uma vez que existem assimetrias

inerentes ao circuito base, as fontes de perturbações estão sujeitas a sofrer interações com estas assimetrias, o que interfere nos resultados fornecidos.

4.8 Considerações finais

Esta unidade foi dedicada à proposição de uma metodologia para a determinação das parcelas de responsabilidade sobre os desequilíbrios, a qual é denominada por método da Superposição. Embora o caráter teórico, esta proposição se apresenta como relevante, visto que os métodos, até então, existentes manifestam fragilidades que dificulta a definição de um procedimento de referência para a avaliação do problema. Dessa forma, foram apresentados os fundamentos físicos e matemáticos da estratégia, além de reflexões sobre os diversos fatores que envolvem sua aplicação. Adicionalmente, foram realizados estudos computacionais e laboratoriais visando avaliar a resposta da metodologia. Dessarte, as principais considerações são destacadas na sequência:

- O método da Superposição se apresenta como sólida ferramenta teórica por ser fundamentado em princípios clássicos de circuitos elétricos. Os desenvolvimentos matemáticos aplicados à temática dos desequilíbrios são consonantes com o comportamento físico do fenômeno, o qual é avaliado de forma individualizada por meio da decomposição das componentes de sequência pelo método das Componentes Simétricas;
- No tocante à avaliação computacional, os resultados se mostraram fortemente condizentes com a realidade física esperada, evidenciando sua sólida consistência teórica;
- Nos estudos laboratoriais, ainda que tenha manifestado pequenas discrepâncias dos valores medidos, o método apresentou resposta satisfatória em todos as condições avaliadas, ratificando sua eficácia;
- Embora promissor, o método requer o conhecimento de parâmetros de difícil acesso no contexto prático, os quais estão associados com o módulo e ângulo das impedâncias de sequência negativa dos componentes inerentes aos sistemas;
- Não obstante, uma vez viabilizados os recursos necessários para a sua aplicação nos diferentes cenários, o método da Superposição apresenta grandes potencialidades.

MÉTODO DA MUDANÇA DE ESTADO CONTROLADA PARA A DETERMINAÇÃO DAS CONTRIBUIÇÕES SOBRE OS DESEQUILÍBRIOS

5

5.1 Considerações iniciais

Conforme evidenciado previamente, o método da Superposição, o qual se apresenta como ferramenta consistente para atender as metas pretendidas, carece de informações paramétricas concernentes às impedâncias de sequência negativa dos agentes supridores e consumidores. De fato, sem o conhecimento destes parâmetros, a utilização desta estratégia se mostra, em termos práticos, infactível.

Uma vez constatado que, de um modo geral, as metodologias enunciadas nas unidades precedentes denotam fragilidades evidentes, quer seja pela ausência de significado físico associado aos desenvolvimentos matemáticos, ou mesmo pelas limitações técnicas e práticas, esta unidade é dedicada à proposição de uma estratégia prática para contornar os entraves supracitados.

À luz destes fatos, inicialmente é apresentada a filosofia geral da estratégia com posterior detalhamento dos fundamentos físicos e matemáticos que a perfazem. Além disso, propõe-se o uso deste método juntamente com o da Superposição, a fim de estabelecer uma correlação física com o próprio fator de desequilíbrio de tensão, o qual será utilizado como instrumento de referência para avaliação da proposta. Por fim, são conduzidos estudos computacionais e labororiais, bem como uma síntese das principais constatações.

5.2 Aspectos gerais

Em termos gerais, o procedimento consiste em provocar uma alteração proposital nas condições operativas do sistema. Entre outras formas, isso pode ser feito mediante à inserção de uma pequena perturbação com características conhecidas. Por conseguinte, o ato de modificar o estado operativo da rede através da inserção de uma fonte perturbadora é aqui denominado por método da Mudança de Estado Controlada (MEC).

No tocante aos desequilíbrios, o propósito geral da inserção de um elemento perturbador consiste em provocar alterações nas tensões e correntes de sequência negativa originalmente presentes no local de monitoramento e, dessa forma, por intermédio de manipulações matemáticas, estimar as contribuições a montante e a jusante deste local. Dessa forma, para os objetivos aqui postos, a fonte de perturbação deve ter características desequilibradas.

Dito isto, pondera-se que o procedimento é inspirado nos desenvolvimentos apresentados em (Santos, 2019), cujo trabalho é direcionado aos propósitos do compartilhamento de responsabilidade harmônica. Contudo, salienta-se que a estratégia aqui exposta se apresenta como contribuição inovadora, visto que o procedimento foimeticulosamente desenvolvido para atender à temática dos desequilíbrios.

Nesse sentido, para que o procedimento seja factível, é necessário realizar o monitoramento das tensões e correntes em duas etapas distintas:

- Pré-inserção da perturbação: tensões e correntes no local de interesse;
- Pós-inserção da perturbação: tensões e correntes no local de interesse, bem como a corrente na entrada do elemento perturbador.

De fato, a ordem de execução das etapas não compromete o desempenho do processo. Todavia, recomenda-se que estas sejam executadas de forma consecutiva e com o mínimo intervalo de tempo entre elas, a fim de garantir que as características do sistema não sofram alterações substanciais.

5.3 Desenvolvimentos matemáticos

Os desenvolvimentos matemáticos são embasados em princípios físicos que vão de encontro com teorias clássicas de circuitos elétricos, assim como o próprio método da Superposição.

Analogamente às demais filosofias apresentadas, a proposta atual lança mão do método das Componentes Simétricas para a decomposição das tensões e correntes em suas respectivas componentes de sequência (Fortescue, 1918). Nesse sentido, ressalta-se que, em consonância com os argumentos previamente apresentados, especial atenção é dada às componentes de sequência negativa, uma vez que estas se apresentam como responsáveis precipuas no que tange à propagação dos desequilíbrios que acometem as redes elétricas (TR IEC 61000.3.13:2012, 2012).

Antes de mais nada, pondera-se que, na unidade precedente, foram desenvolvidas as expressões (4.8) e (4.9), as quais particularizam as contribuições de tensão do supridor e consumidor no PAC. A fim de consubstanciar maiores esclarecimentos acerca do procedimento aqui tratado, estas são conveniente e respectivamente reescritas como (5.1) e (5.2), todavia, focando-se nas contribuições de sequência negativa.

$$\dot{U}_{2S}^{PAC} = \left(\frac{\dot{Z}_{2S} \times \dot{Z}_{2C}}{\dot{Z}_{2S} + \dot{Z}_{2C}} \right) \times \dot{I}_{2S} = \dot{Z}_{2eq} \times \dot{I}_{2S} \quad (5.1)$$

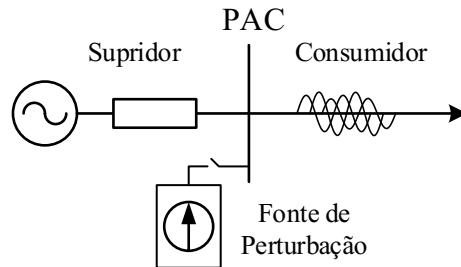
$$\dot{U}_{2C}^{PAC} = \left(\frac{\dot{Z}_{2S} \times \dot{Z}_{2C}}{\dot{Z}_{2S} + \dot{Z}_{2C}} \right) \times \dot{I}_{2C} = \dot{Z}_{2eq} \times \dot{I}_{2C} \quad (5.2)$$

De acordo com as equações supracitadas, nota-se que as contribuições de tensão de cada parte são dependentes do produto entre o paralelo das impedâncias do supridor e consumidor e das próprias correntes geradas por cada fonte. Nesse sentido, é evidente que o termo \dot{Z}_{2eq} se trata de um fator multiplicador comum à ambas equações. Assim, uma vez determinadas as correntes \dot{I}_{2S} e \dot{I}_{2C} , os percentuais de responsabilidade podem ser prontamente calculados sem o conhecimento das impedâncias do supridor e do consumidor.

Por conseguinte, a metodologia objetiva propor uma alternativa para o cálculo das correntes \dot{I}_{2S} e \dot{I}_{2C} , cujo valor proporcional resultará nas próprias contribuições de tensão no PAC.

A fim de simplificar os desenvolvimentos matemáticos, é utilizada a configuração disposta na Figura 5.1, ou seja, considerando que o local de interesse se trata do próprio ponto de acoplamento comum entre o supridor e consumidor.

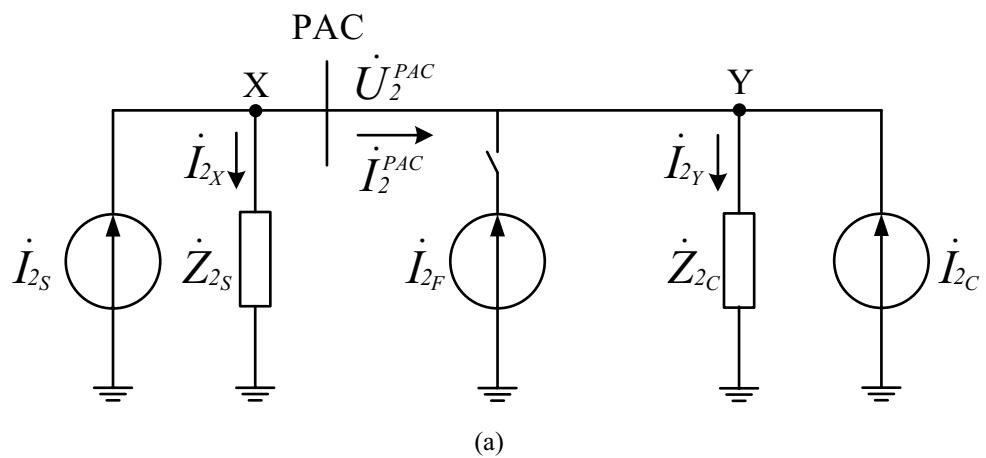
Figura 5. 1 – Representação do método da Mudança de Estado Controlada.



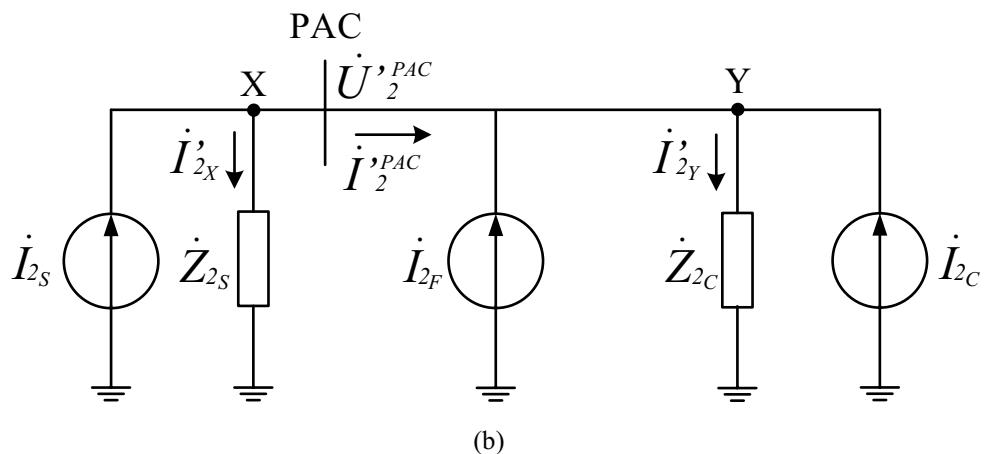
Fonte: Autoria própria.

Isto posto, a Figura 5.2 ilustra o circuito equivalente de Norton de sequência negativa para os períodos de pré-conexão e pós-conexão da fonte de perturbação, a qual é aqui representada por uma fonte de corrente de sequência negativa. Salienta-se que a direcionalidade desta fonte é meramente arbitrária.

Figura 5. 2 – Circuito equivalente de Norton representativo do método MEC: (a) pré-conexão da fonte de perturbação; (b) pós-conexão da fonte de perturbação.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria.

Onde:

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

\dot{Z}_{2S} e \dot{Z}_{2C} – impedâncias de sequência negativa do supridor e consumidor, respectivamente;

\dot{U}_2^{PAC} e \dot{U}'_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.

Com o propósito de encontrar as expressões para o cálculo das contribuições em função de grandezas mensuráveis, os desenvolvimentos matemáticos foram manipulados para que as variáveis de dependência se tratassem das próprias tensões e correntes no PAC e, também, da corrente da fonte de perturbação conhecida.

Adicionalmente, conforme indicado nos diagramas (a) e (b) da Figura 5.2, os equacionamentos têm como premissa que as características de impedância (\dot{Z}_{2S} e \dot{Z}_{2C}) e injeção de corrente (\dot{I}_{2S} e \dot{I}_{2C}) do sistema não sofrem mudanças substanciais nos instantes de pré-conexão e pós-conexão da fonte externa de perturbação.

Primeiramente, empregando-se a Lei de Kirchhoff das correntes ao nó X, da Figura 5.2 (a) e (b), têm-se as expressões (5.3) e (5.4), respectivamente.

$$\dot{I}_{2S} - \frac{\dot{U}_2^{PAC}}{\dot{Z}_{2S}} - \dot{I}_2^{PAC} = 0 \quad (5.3)$$

$$\dot{I}_{2S} - \frac{\dot{U}'_2^{PAC}}{\dot{Z}_{2S}} - \dot{I}'_2^{PAC} = 0 \quad (5.4)$$

Isolando as impedâncias do supridor de ambas equações, têm-se as expressões (5.5) e (5.6), respectivamente.

$$\dot{Z}_{2S} = \frac{\dot{U}_2^{PAC}}{(\dot{I}_{2S} - \dot{I}_2^{PAC})} \quad (5.5)$$

$$\dot{Z}_{2S} = \frac{\dot{U}'_2^{PAC}}{(\dot{I}_{2S} - \dot{I}'_2^{PAC})} \quad (5.6)$$

Portanto, a corrente de sequência negativa gerada pelo desequilíbrio do supridor é obtida igualando (5.5) a (5.6), o que resulta em (5.7).

$$\dot{I}_{2S} = \frac{(\dot{U}_2^{PAC} \times \dot{I}'_2^{PAC}) - (\dot{U}'_2^{PAC} \times \dot{I}_2^{PAC})}{(\dot{U}_2^{PAC} - \dot{U}'_2^{PAC})} \quad (5.7)$$

Similarmente, aplicando-se a Lei de Kirchhoff das correntes ao nó Y, da Figura 5.2 (a) e (b), têm-se as respectivas equações (5.8) e (5.9).

$$\dot{I}_2^{PAC} - \frac{\dot{U}_2^{PAC}}{\dot{Z}_{2C}} + \dot{I}_{2C} = 0 \quad (5.8)$$

$$\dot{I}'_2^{PAC} + \dot{I}_{2F} - \frac{\dot{U}'_2^{PAC}}{\dot{Z}_{2C}} + \dot{I}_{2C} = 0 \quad (5.9)$$

Isolando as impedâncias das expressões (5.8) e (5.9), se obtém (5.10) e (5.11), respectivamente.

$$\dot{Z}_{2C} = \frac{\dot{U}_2^{PAC}}{(\dot{I}_{2C} + \dot{I}_2^{PAC})} \quad (5.10)$$

$$\dot{Z}_{2C} = \frac{\dot{U}'_2^{PAC}}{(\dot{I}'_2^{PAC} + \dot{I}_{2C} + \dot{I}_{2F})} \quad (5.11)$$

Dessarte, igualando as equações (5.10) e (5.11), e isolando \dot{I}_{2C} , resulta na expressão da corrente de sequência negativa do consumidor, de acordo com (5.12).

$$\dot{I}_{2C} = \frac{(\dot{U}'_2^{PAC} \times \dot{I}_2^{PAC}) - \dot{U}'_2^{PAC}(\dot{I}'_2^{PAC} + \dot{I}_{2F})}{(\dot{U}_2^{PAC} - \dot{U}'_2^{PAC})} \quad (5.12)$$

Portanto, a contribuição total no PAC é determinada pela soma fasorial das expressões (5.7) e (5.12), resultando em (5.13).

$$\dot{I}_{2_{total}}^{PAC} = \dot{I}_{2_S} + \dot{I}_{2_C} \quad (5.13)$$

Para fins de determinação das parcelas de responsabilidade, sugere-se o uso das projeções, em conformidade com as orientações expostas no Apêndice B.

Embora as grandezas aqui tratadas possam sugerir que o compartilhamento de responsabilidades é feito em termos das contribuições de corrente, em verdade, os percentuais obtidos relacionam-se com as contribuições de tensão, de acordo com as expressões (5.1) e (5.2). De fato, para a determinação das contribuições de corrente, haveria a necessidade de conhecer as impedâncias do circuito.

Adicionalmente, salienta-se que a conexão da fonte de perturbação e monitoramento das variáveis podem ser realizados em local distinto daquele no qual almeja-se atribuir as responsabilidades. Todavia, para que isto seja factível, necessita-se conhecer as impedâncias de sequência negativa entre o local de execução e o ponto de interesse.

5.4 Método da Mudança de Estado Controlada via Chaveamento de Capacitor Monofásico (MEC-CM)

Para a aplicação do método da mudança de estado controlada, convém utilizar elementos/dispositivos com perfil desequilibrado, a exemplo de componentes monofásicos passivos como resistores, indutores e capacitores e, até mesmo, compensadores de desequilíbrios passivos e ativos. Em tese, uma carga trifásica altamente desequilibrada pode ser empregada para os fins aqui postos, desde que suas características sejam conhecidas. Todavia, componentes monofásicos são capazes de prover um desequilíbrio de corrente de 100%, o que possibilita sua representação como fonte de corrente de sequência negativa ideal sem prejuízos significativos. Além disso, estes componentes são comercialmente atrativos em termos de disponibilidade e custos.

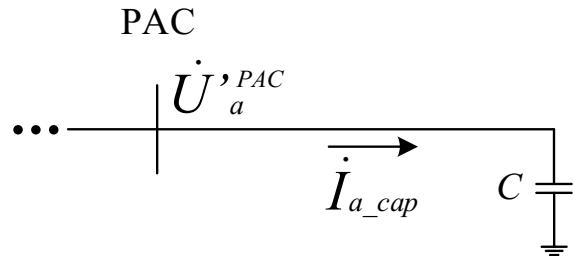
Neste trabalho, arbitrou-se pela utilização de um capacitor monofásico (CM) para representar a fonte de perturbação, cujo procedimento é aqui nomeado por método da Mudança de Estado Controlada via Chaveamento de Capacitor Monofásico (MEC-CM). A escolha do capacitor se deve ao fato de que este equipamento se apresenta como solução de elevada aplicabilidade industrial para o suporte de reativo (Santos, 2015).

Em complexos compostos de bancos de capacitores trifásicos para a correção do fator de potência, caso o chaveamento seja independente para cada fase, é factível a aplicação do procedimento em questão. Em contrapartida, se a unidade capacitiva requisitada não tiver chaveamento monopolar, ou não fizer parte da instalação, pode-se empregar um componente externo para a efetivação do processo.

De acordo com as diretrizes estabelecidas previamente, a corrente de sequência negativa da unidade capacitiva é um dos parâmetros requeridos para a aplicação do procedimento. Dessa forma, além dos transdutores trifásicos de tensão e corrente no PAC, tem-se a necessidade de um transdutor monofásico para a aquisição da corrente na entrada da unidade. Por outro lado, caso sua capacitância seja conhecida, é possível calcular esta corrente sem a necessidade de transdutores adicionais.

A Figura 5.3 ilustra o procedimento para o cálculo da corrente do capacitor quando este se encontra chaveado entre a Fase A e o terra. Ressalta-se que este raciocínio também se aplica ao chaveamento do capacitor às demais fases.

Figura 5.3 – Diagrama representativo do capacitor monofásico conectado entre a Fase A e o terra.



Fonte: Autoria própria.

Onde:

\dot{U}_a^{PAC} – tensão nos terminais do capacitor conectado a Fase A;

\dot{I}_{a_cap} – corrente do capacitor conectado a Fase A;

C – capacitância do capacitor monofásico.

De acordo com a Matriz de Fortescue, para a condição estabelecida, as correntes do capacitor de sequência positiva, negativa e zero são dadas pela expressão (5.14) e (5.15).

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{cap_0} \\ \dot{I}_{cap_1} \\ \dot{I}_{cap_2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_{a_cap} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

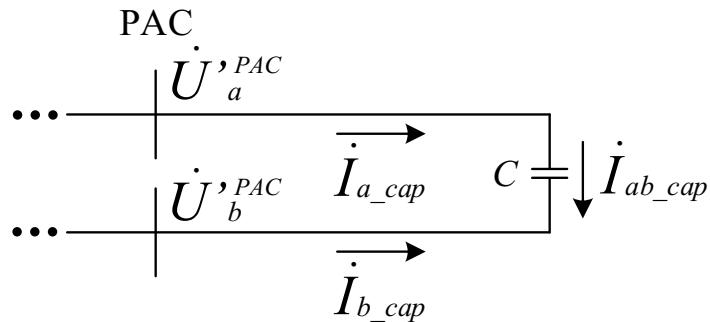
$$\therefore \dot{I}_{cap_0} = \dot{I}_{cap_1} = \dot{I}_{cap_2} = \frac{\dot{I}_{a_cap}}{3} \quad (5.15)$$

Dessa forma, a corrente de sequência negativa do capacitor, em função dos parâmetros de capacitância e tensão no PAC, é apresentada na equação (5.16).

$$\dot{I}_{cap_2} = \frac{j\omega C}{3} \times \dot{U}_a^{PAC} \quad (5.16)$$

Alternativamente, caso não seja possível conectar o banco na configuração supracitada, a Figura 5.4 ilustra a condição na qual o capacitor é chaveado entre fases, sendo aqui exemplificadas as Fases A e B

Figura 5.4 – Diagrama representativo do capacitor monofásico conectado entre as Fases A e B.



Fonte: Autoria própria.

Empregando a matriz das Componentes Simétricas, para o cálculo da corrente de sequência negativa do capacitor, têm-se as equações (5.17) e (5.18).

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{cap_0} \\ \dot{I}_{cap_1} \\ \dot{I}_{cap_2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_{ab_cap} \\ -\dot{I}_{ab_cap} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

$$\dot{I}_{cap_2} = \frac{1}{3} \times \dot{I}_{ab_cap} (1 - a^2) \quad (5.18)$$

Dessa forma, a corrente de sequência negativa do capacitor, em função de sua capacidade e das tensões no PAC, é dada pela equação (5.19).

$$I_{cap_2} = \frac{\omega C}{\sqrt{3}} \times a(\dot{U}'_a^{PAC} - \dot{U}'_b^{PAC}) \quad (5.19)$$

Não obstante o reconhecimento de que bancos de capacitores via de regra operam na configuração delta em sistemas BT, o que, em tese, resultaria na configuração fase-fase, para fins de avaliação do procedimento e por razões didáticas, o capacitor monofásico será aqui avaliado utilizando a configuração fase-terra.

Adicionalmente, caso a unidade seja composta de diferentes tipos componentes (indutores, resistores e capacitores), ou pela combinação dos mesmos, deve-se considerar as impedâncias destes elementos.

5.5 Aplicação do método MEC como estratégia para estimar as impedâncias equivalentes

Embora a abordagem proposta apresente uma alternativa para a determinação das contribuições percentuais sem qualquer necessidade do conhecimento das impedâncias, ressalta-se que o procedimento também é capaz de estimar estes parâmetros e levar ao compartilhamento de responsabilidades pelo método da Superposição.

Antes de mais nada, é oportuno salientar que as formulações matemáticas a serem expostas não implicam qualquer diferença nos percentuais de responsabilidade propriamente ditos, visto que emprega o mesmo procedimento e conjunto de equações. Assim sendo, o objetivo de expor esta etapa se deve ao estabelecimento de uma correlação física associada com a determinação dos respectivos fatores de desequilíbrio de tensão causados pela operação individual de cada fonte de perturbação.

De fato, em virtude da ausência de procedimentos de referência que possam ser empregados para a avaliação da eficácia do procedimento, esta alternativa se mostra particularmente útil, sobretudo no tocante aos estudos laboratoriais. Nestes, os fatores de desequilíbrio de cada agente podem ser medidos individualmente e correlacionados com os calculados pelo método.

Nesse sentido, igualando as expressões (5.3) e (5.4), e isolando a impedância de sequência negativa do supridor, tem-se a equação (5.20).

$$\dot{Z}_{2S} = \frac{\dot{U}_2^{PAC} - \dot{U}'_2^{PAC}}{(\dot{I}'_2^{PAC} - \dot{I}_2^{PAC})} \quad (5.20)$$

Similarmente, igualando (5.8) a (5.9), resulta na expressão para a determinação da impedância de sequência negativa do consumidor, de acordo com (5.21).

$$\dot{Z}_{2C} = \frac{\dot{U}_2^{PAC} - \dot{U}'_2^{PAC}}{(\dot{I}_2^{PAC} - \dot{I}'_2^{PAC} - \dot{I}_{2F})} \quad (5.21)$$

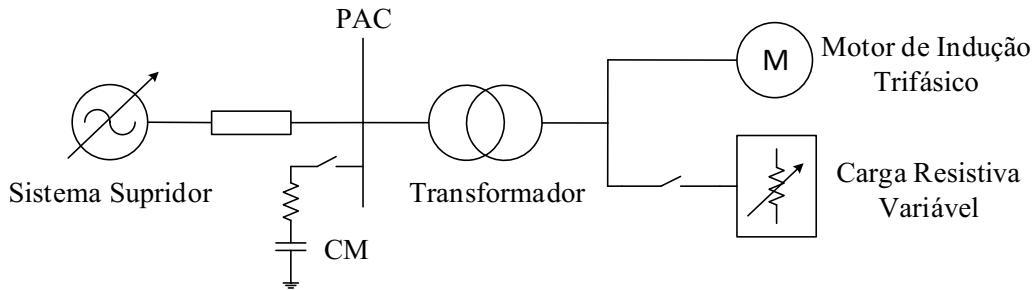
Dessarte, com base em (5.20) e (5.21) é possível encontrar as contribuições de tensão e seus respectivos percentuais de responsabilidade utilizando o método da Superposição, bem como os fatores de desequilíbrio incumbidos a cada agente.

É importante frisar que este procedimento se trata de artifício matemático para o estabelecimento de uma correlação física entre o fator de desequilíbrio de tensão e as contribuições propriamente ditas. Dessa forma, as impedâncias obtidas pelas equações supracitadas são meramente representativas.

5.6 Estudos investigativos

Novamente, os estudos investigativos foram realizados utilizando a base de dados disponibilizada no Apêndice C. Em suma, foi empregada uma fonte de tensão controlada em série com indutores para representar o sistema de suprimento. O PAC é delimitado por um transformador trifásico e, na sequência, tem-se a instalação consumidora. Esta, por sua vez, é composta de um motor de indução trifásico, equilibrado, conectado em paralelo a uma carga resistiva, variável e com características assimétricas. Adicionalmente, consta um capacitor monofásico em série com um resistor, o qual representa o arranjo CM para a aplicação do método MEC. Frisa-se que o elemento resistivo visou, tão somente, limitar os fenômenos transitórios associados ao chaveamento do capacitor nos estudos laboratoriais, sendo também incluído nos estudos computacionais. Assim, a Figura 5.5 sintetiza o arranjo aqui descrito.

Figura 5. 5 – Equivalente elétrico representativo utilizado nos estudos computacionais e laboratoriais.



Fonte: Autoria própria.

A parametrização do arranjo CM é apresentada na Tabela 5.1.

Tabela 5. 1 – Arranjo do capacitor monofásico (CM).

Tensão nominal (V)	Capacitância por fase (μ F)			Resistência por fase (Ω)		
	A	B	C	A	B	C
400	90	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0

A Tabela 5.2 (Tabela D.3) apresenta a síntese dos estudos avaliados.

Tabela 5. 2 – Síntese dos estudos de casos.

Caso	Subcaso	FDv imposto à fonte (aprox.)	Carga conectada	Tipo de distribuição da carga	FDv gerado pela carga (aprox.)
1	.1	0%	Carga 1	Trifásica desequilibrada	0,5%
	.2		Carga 2	Monofásica	1,0%
	.3		Carga 3	Trifásica desequilibrada	1,5%
	.4		Carga 4	Monofásica	2,0%
	.5		Carga 5	Monofásica	2,5%
2	.1	1%	Carga 2	Monofásica	1,0%
	.2		Carga 3	Trifásica desequilibrada	1,5%

5.7 Avaliação computacional

Analogamente ao que foi feito nas unidades precedentes, os estudos computacionais foram realizados no programa MATLAB/Simulink®, de acordo com as informações pormenorizadas no Apêndice C.

Nesse sentido, as Tabelas 5.3 (Tabela 3.2) e 5.4 apresentam os fatores de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva desconecta, considerando que o arranjo CM encontra-se desconectado e conectado, respectivamente.

Tabela 5. 3 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva desconectada – computacional.

Fonte	Fator de desequilíbrio (%)	
	Tensão	Corrente
Equilibrada	0,00	0,00
Desequilibrada	1,04	6,68

Tabela 5. 4 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva desconectada e CM conectado – computacional.

Fonte	Fator de desequilíbrio (%)		
	Tensão	Corrente	Corrente CM
Equilibrada	2,49	43,81	100
Desequilibrada	2,58	37,42	100

Na sequência, as Tabelas 5.5 (Tabela 3.3) e 5.6 apresentam os percentuais de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva conectada, para as respectivas condições nas quais o CM encontra-se desconectado e conectado.

Tabela 5. 5 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva conectada – computacional.

Fator de desequilíbrio	Caso/Subcaso						
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2
Tensão (%)	0,51	0,90	1,54	2,15	2,51	1,61	2,29
Corrente (%)	5,08	10,99	12,97	21,44	23,76	15,28	15,32

Tabela 5. 6 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva e CM conectados – computacional.

Fator de desequilíbrio	Caso/Subcaso						
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2
Tensão (%)	2,11	1,61	1,34	0,65	0,64	1,94	2,05
Corrente (%)	23,49	22,82	12,19	7,23	6,68	16,87	7,60
Corrente CM (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

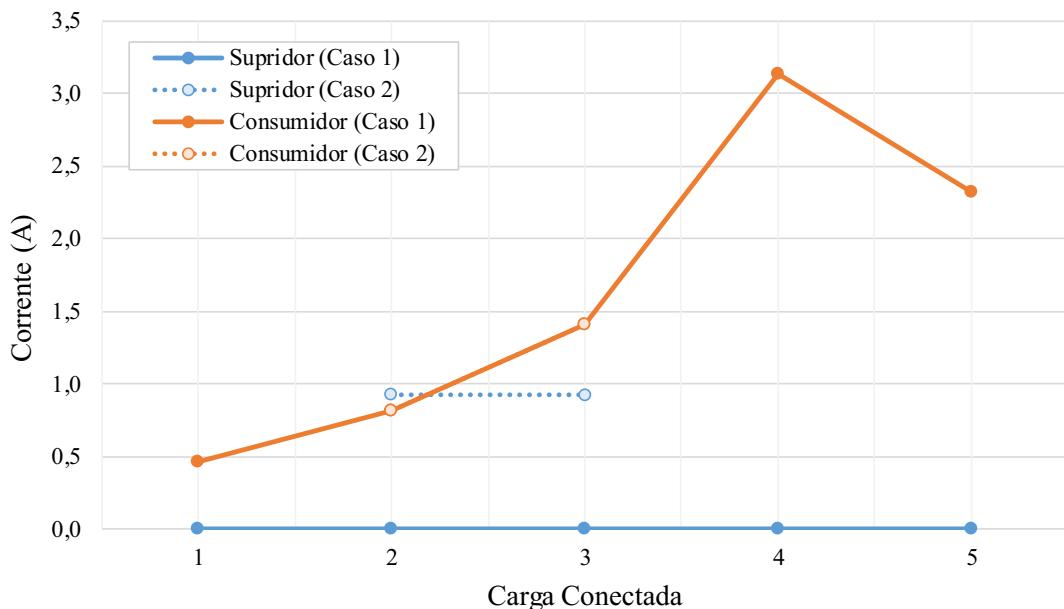
Dessa forma, a Tabela 5.7 fornece as variáveis de destaque para a determinação das contribuições de forma direta e, também, para a determinação das impedâncias representativas utilizando o método MEC-CM.

Tabela 5. 7 – Resultados do método MEC-CM – computacional.

Variável	Caso/Subcaso						
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.2	1.3
\dot{I}_{2S}	Mag	0,0006 A	0,0003 A	0,0023 A	0,0007 A	0,0004 A	0,9259 A
	Ang	-130,50°	-171,49°	136,71°	-127,89°	-161,93°	167,83°
\dot{I}_{2C}	Mag	0,4571 A	0,8111 A	1,4096 A	3,1386 A	2,3220 A	0,8132 A
	Ang	38,46°	100,43°	122,68°	75,43°	97,10°	101,23°
$\dot{I}_{2global}$	Mag	0,4571 A	0,8111 A	1,4075 A	3,1392 A	2,3220 A	0,9594 A
	Ang	-141,53°	-79,59°	-67,36°	-104,58°	-82,91°	-141,11°
\dot{Z}_{2S}	Mag	3,2051 Ω	3,1989 Ω	3,1981 Ω	3,1999 Ω	3,1993 Ω	3,1993 Ω
	Ang	89,05°	89,20°	89,24°	89,18°	89,21°	89,20°
\dot{Z}_{2C}	Mag	6,7810 Ω	6,7952 Ω	6,2479 Ω	6,3410 Ω	6,2196 Ω	6,7906 Ω
	Ang	29,22°	29,08°	29,07°	30,29°	30,77°	29,11°
\dot{U}_{2S}^{PAC}	Mag	0,0015 V	0,0007 V	0,0056 V	0,0011 V	0,0009 V	2,2775 V
	Ang	-59,72°	-100,59°	-153,54°	-49,29°	-91,78°	-121,28°
\dot{U}_{2C}^{PAC}	Mag	1,1241 V	1,9955 V	3,3872 V	4,7380 V	5,5323 V	2,0002 V
	Ang	109,24°	171,33°	-177,58°	168,15°	167,26°	172,13°
\dot{U}_2^{PAC}	Mag	1,1241 V	1,9955 V	3,3923 V	4,7372 V	5,5321 V	3,5786 V
	Ang	109,22°	171,35°	-177,54°	178,16°	167,27°	-152,14°

Assim, a Figura 5.6 ilustra o comportamento das magnitudes das correntes \dot{I}_{2C} e \dot{I}_{2S} associadas às contribuições de tensão no PAC.

Figura 5. 6 – Magnitudes das correntes de sequência negativa do supridor e consumidor – computacional.

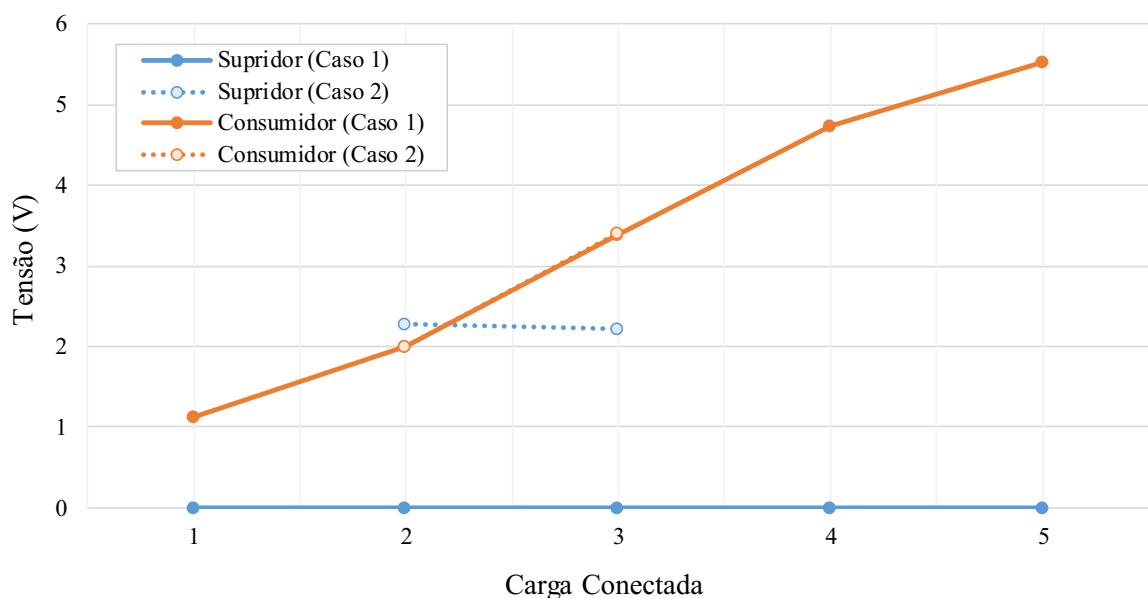


Fonte: Autoria própria.

Diante das informações suprapostas, para o Caso 1, a corrente do supridor permanece constante e próxima a zero em todas as condições avaliadas. Paralelamente, a corrente do consumidor é incrementada do Subcasos 1.1 ao 1.4 e decrementada no Subcaso 1.5, o que aparenta indicar uma redução das contribuições da carga. Porém, deve-se considerar que o parâmetro de referência se trata da corrente gerada pelas fontes de perturbação e, embora as magnitudes apresentem comportamento destoante da expectativa física, há uma composição fasorial que resultará na correta determinação dos percentuais de responsabilidades. No tocante ao Caso 2, a corrente do supridor sofre um deslocamento vertical de aproximadamente 1A, indicando que esta parcela passa a contribuir com os desequilíbrios de tensão no PAC. Já a corrente do consumidor replica o comportamento observado para o caso anterior, sugerindo que as contribuições do consumidor são as mesmas nos Casos 1 e 2.

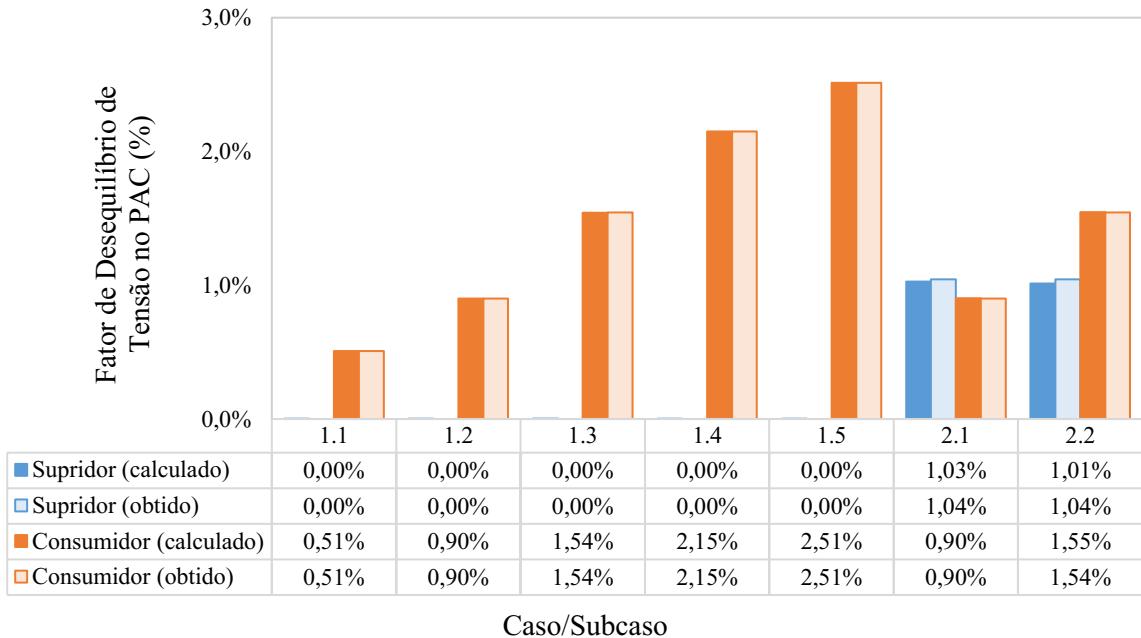
A fim de avaliar a resposta da metodologia quanto à variável de tensão, a Figura 5.7 ilustra as magnitudes das tensões de sequência negativa obtidas pela aplicação indireta do método MEC-CM amparado pelo método da Superposição. Na sequência, a Figura 5.8 apresenta, de forma comparativa, os fatores de desequilíbrios obtidos quando as fontes de desequilíbrio (supridor e consumidor) operam de forma individual e aqueles calculados pela aplicação indireta do método.

Figura 5.7 – Magnitudes das tensões de sequência negativa no PAC (método MEC-CM amparado pela Superposição) – computacional.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5. 8 – Comparação entre o FDv obtido pela operação individual de cada fonte de desequilíbrio e o calculado pelo método MEC-CM e Superposição – laboratorial.



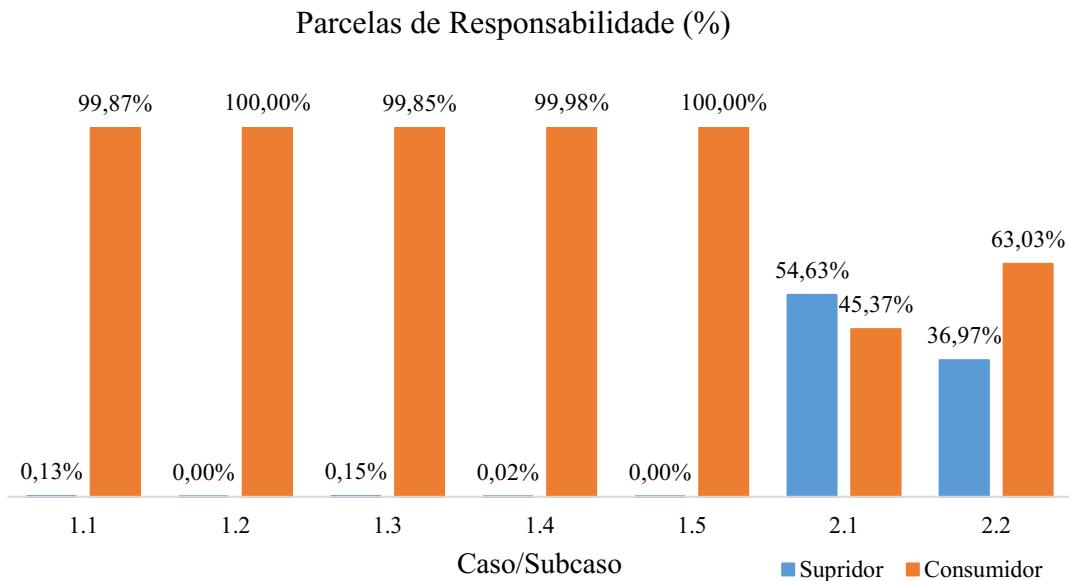
Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Figura 5.7, nota-se que, para o Caso 1, a tensão de sequência negativa do supridor é mantida constante e praticamente nula em todos os subcasos deste grupo. A tensão de sequência negativa do consumidor é linearmente incrementada de acordo com o aumento do desequilíbrio de carga. Para o Caso 2, nota-se que a tensão do supridor sofre um deslocamento vertical sugerindo que este agente passa a contribuir com os desequilíbrios manifestados no PAC. Quanto à tensão do consumidor, esta apresenta o mesmo padrão de comportamento descrito para o Caso 1.

Avaliando os fatores de desequilíbrio de tensão (Figura 5.8), é evidente a proximidade entre os valores diretamente obtidos e os calculados pelo método MEC-CM amparado pela Superposição. Dessa forma, estes resultados ratificam a consistência física e teórica do procedimento em foco, cujo maior erro absoluto observado foi de 0,03 pontos percentuais. De fato, isso aponta a clara correlação existente entre a origem do fenômeno e o indicador de tensão a ele atribuído.

Quanto às parcelas de contribuição, estas são graficamente ilustradas na Figura 5.9. Frisa-se, novamente que a aplicação direta ou indireta do método MEC-CM resulta os mesmos percentuais de responsabilidade.

Figura 5. 9 – Parcelas de responsabilidade de acordo com o método MEC-CM – computacional.



Fonte: Autoria própria.

Para o Caso 1, o método atribuiu praticamente 100% das responsabilidades ao sistema consumidor, com erros percentuais consideravelmente baixos. Quanto ao Caso 2, no Subcaso 2.1, o procedimento incumbiu a contribuição dominante ao supridor, enquanto no Subcaso 2.2 o maior percentual foi atribuído ao consumidor. De fato, comparando o FDv para a condição na qual a rede opera com tensões assimétricas (1,04%) com o FDv resultante da conexão individual das Cargas 2 (0,90%) e 3 (1,54%), nota-se que a resposta do método é consonante com a realidade física esperada.

Adicionalmente, pondera-se que os maiores erros observados foram aqueles manifestados nos Subcasos 1.1 e 1.3, os quais são coincidentemente atrelados ao chaveamento das cargas trifásicas desequilibradas. Não obstante este fato, o procedimento apresentou resultados satisfatoriamente precisos.

5.8 Avaliação laboratorial

Estudos laboratoriais foram conduzidos de forma análoga ao que foi apresentado nas outras unidades, ou seja, empregando o arranjo físico detalhado no Apêndice C.

Assim, os percentuais de desequilíbrio no PAC são indicados nas Tabelas 5.8 (Tabela 3.7) e 5.9, considerando que a carga resistiva se encontra desconectada e para as situações nas quais o arranjo CM está, respectivamente, desconectado e conectado.

Tabela 5. 8 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva desconectada – laboratorial.

Fonte	Fator de desequilíbrio (%)	
	Tensão	Corrente
Equilibrada	0,18	2,08
Desequilibrada	1,23	5,21

Tabela 5. 9 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva desconectada e CM conectado – computacional.

Fonte	Fator de desequilíbrio (%)		
	Tensão	Corrente	Corrente CM
Equilibrada	3,07	199,94	100
Desequilibrada	3,08	195,00	100

As Tabela 5.10 (Tabela 3.8) e 5.11 indicam os fatores de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva conectada e para as respectivas condições nas quais o CM se encontra desconectado e conectado.

Tabela 5. 10 – Fator de desequilíbrio no PAC com a carga resistiva conectada – laboratorial.

Fator de desequilíbrio	Caso/Subcaso						
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2
Tensão (%)	0,52	1,27	2,06	2,88	3,35	2,15	3,02
Corrente (%)	11,20	27,07	28,96	49,25	54,20	25,42	27,27

Tabela 5. 11 – Tensões e correntes no PAC com a carga resistiva e CM conectados – laboratorial.

Fator de desequilíbrio	Caso/Subcaso						
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2
Tensão (%)	2,21	1,95	2,08	1,94	2,24	2,70	3,11
Corrente (%)	45,52	70,38	30,14	35,41	37,13	63,54	26,05
Corrente CM (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

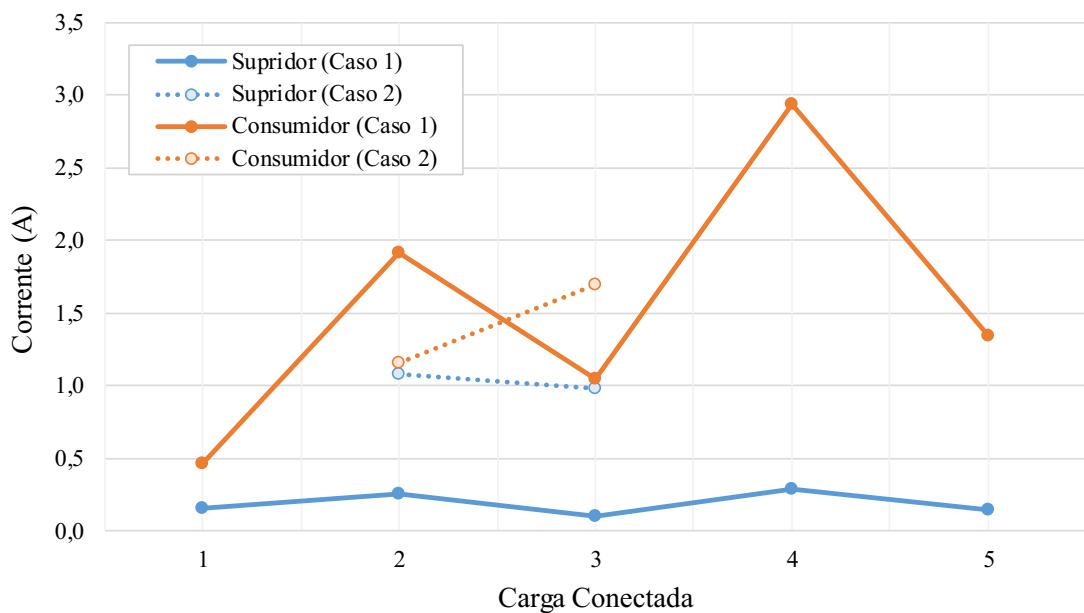
Assim, a Tabela 5.12 apresenta as variáveis de destaque para a direta determinação das parcelas de responsabilidade e, também, para a determinação das impedâncias equivalentes utilizando o método MEC-CM em conjunto com a Superposição.

Tabela 5. 12 – Resultados do método MEC-CM – laboratorial.

Variável		Caso/Subcaso						
		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2
i_{2s}	Mag	0,1575 A	0,2501 A	0,0966 A	0,2846 A	0,1483 A	1,0811 A	0,9829 A
	Ang	148,99°	140,00°	-137,70°	158,62°	-107,07°	135,17°	-46,98°
i_{2c}	Mag	0,4584 A	1,9178 A	1,0491 A	2,9425 A	1,3447 A	1,1575 A	1,6961 A
	Ang	56,91°	61,65°	148,29°	68,95°	167,09°	73,60°	-97,56°
$i_{2global}$	Mag	0,4792 A	1,9835 A	1,0797 A	2,9579 A	1,3635 A	1,9236 A	2,4413 A
	Ang	76,08°	68,75°	153,23°	74,48°	173,32°	103,22°	-79,44°
\dot{Z}_{2s}	Mag	3,2800 Ω	3,095 Ω	3,3415 Ω	3,4126 Ω	3,4880 Ω	13,7793 Ω	16,4010 Ω
	Ang	72,96°	71,48°	80,94°	89,31°	80,46°	-25,06°	114,55°
\dot{Z}_{2c}	Mag	4,2782 Ω	2,5913 Ω	4,0907 Ω	1,3471 Ω	3,4264 Ω	3,1540 Ω	2,4241 Ω
	Ang	-10,80°	102,02°	-50,50°	-93,49°	-63,74°	-17,88°	-52,77°
\dot{U}_{2s}^{PAC}	Mag	0,3899 V	0,3656 V	0,4218 V	0,6325 V	0,8337 V	2,7780 V	2,7821 V
	Ang	-173,20°	-131,87°	-109,88°	63,30°	-100,29°	115,95°	-97,58°
\dot{U}_{2c}^{PAC}	Mag	1,1347 V	2,8030 V	4,5798 V	6,5403 V	7,5594 V	2,9744 V	4,8008 V
	Ang	94,72°	149,79°	176,11°	-26,37°	173,87°	54,38°	-148,16°
\dot{U}_2^{PAC}	Mag	1,1864 V	2,8990 V	4,7134 V	6,5745 V	7,6650 V	4,9429 V	6,9101 V
	Ang	113,90°	156,88°	-178,96°	-20,85°	-179,90°	84,00°	-130,04°

Com o intuito de contribuir com a avaliação dos resultados, a Figura 5.10 ilustra o comportamento das magnitudes das correntes geradas para as condições avaliadas.

Figura 5. 10 – Magnitudes das correntes de sequência negativa do supridor e consumidor – laboratorial.



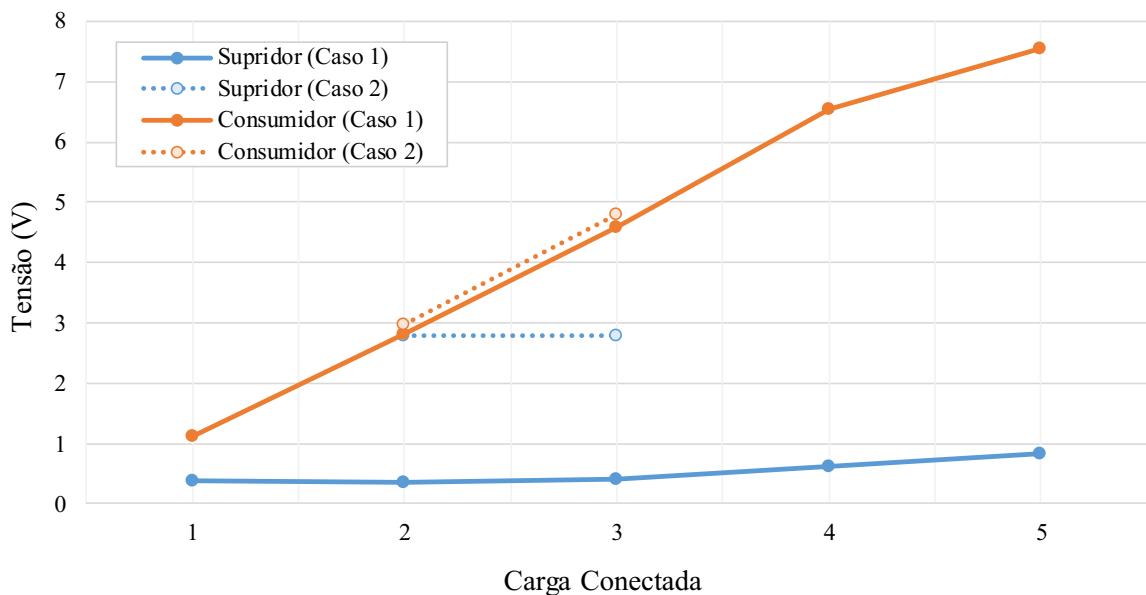
Fonte: Autoria própria.

No tocante ao Caso 1, as correntes de sequência negativa do supridor oscilam em torno de magnitudes consideravelmente baixas, entre 0,1A e 0,3A (respectivos Subcasos 1.3 e 1.4). As correntes de sequência negativa do consumidor também apresentam comportamento oscilatório, porém com amplitudes de cerca de 0,5A a 3,0A (Subcasos 1.1 e 1.5, respectivamente). Quanto ao Caso 2, a corrente do supridor sofre um deslocamento vertical, sugerindo a existência de um conteúdo desequilibrado, enquanto a corrente do consumidor tem comportamento aleatório e distinto àquele observado no Caso 1.

De fato, conforme já constatado nas avaliações computacionais, as magnitudes das correntes aparentam ter comportamento aleatório. Todavia os percentuais de contribuição são dependentes das relações de módulo e ângulo das grandezas e suas respectivas interações. Portanto, para fins de determinação dos percentuais de responsabilidade, este fato não causa qualquer depreciação dos resultados fornecidos pelo método, conforme será evidenciado posteriormente.

A fim de avaliar a resposta física do método quanto à sua correlação com as contribuições de tensão, a Figura 5.11 apresenta a resposta da aplicação indireta do método MEC-CM amparado pelo método da Superposição.

Figura 5. 11 – Magnitudes das tensões de sequência negativa no PAC (método MEC-CM amparado pela Superposição) – laboratorial.



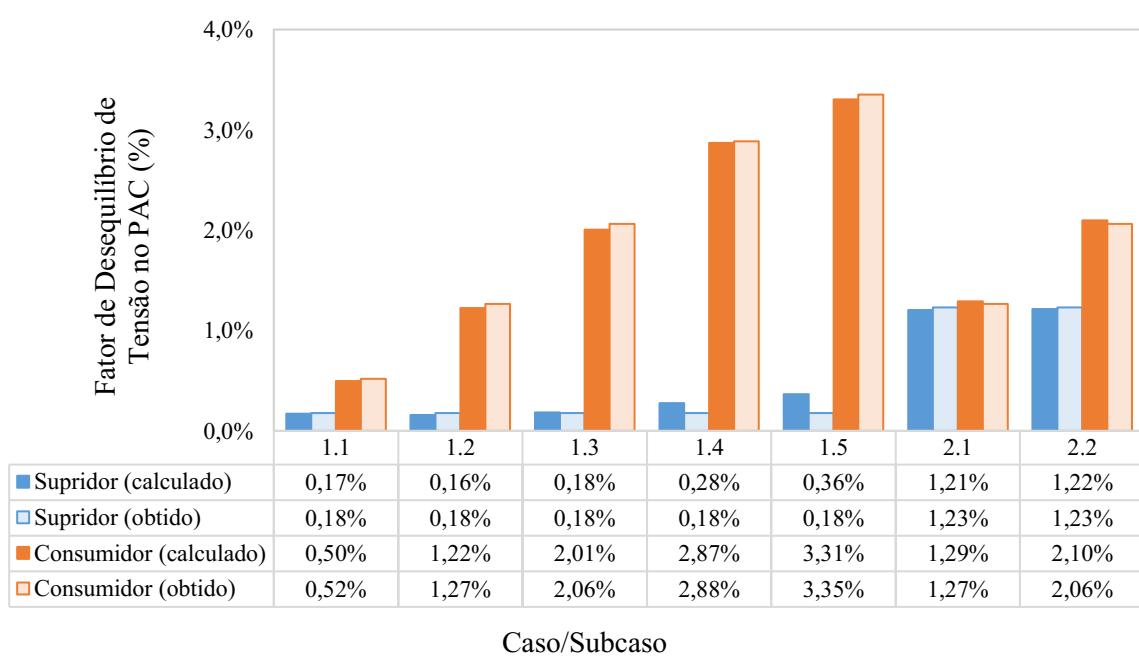
Fonte: Autoria própria.

De um modo geral, no tocante ao Caso 1, a parcela da tensão incumbida ao supridor é ligeiramente incrementada ao longo dos subcasos avaliados, cujas magnitudes variam de,

aproximadamente, 0,4V a 0,8V. A tensão do consumidor sofre incremento linear consonante com o aumento do desequilíbrio de carga. Quanto ao Caso 2, nota-se que a tensão do supridor é verticalmente deslocada, indicando que este agente passa a contribuir com os desequilíbrios de tensão manifestados. Por outro lado, a tensão do consumidor repete o mesmo padrão de comportamento averiguado para o Caso 1. Assim, conforme constatado para os estudos computacionais, a variável de tensão apresenta resultados coerentes com as expectativas.

A Figura 5.12 disponibiliza um gráfico comparativo entre o FDv medido e o FDv obtido pelo método MEC-CM amparado pela Superposição.

Figura 5.12 – Comparação entre o FDv obtido pela operação individual de cada fonte de desequilíbrio e o calculado pelo método MEC-CM e Superposição – laboratorial.



Fonte: Autoria própria.

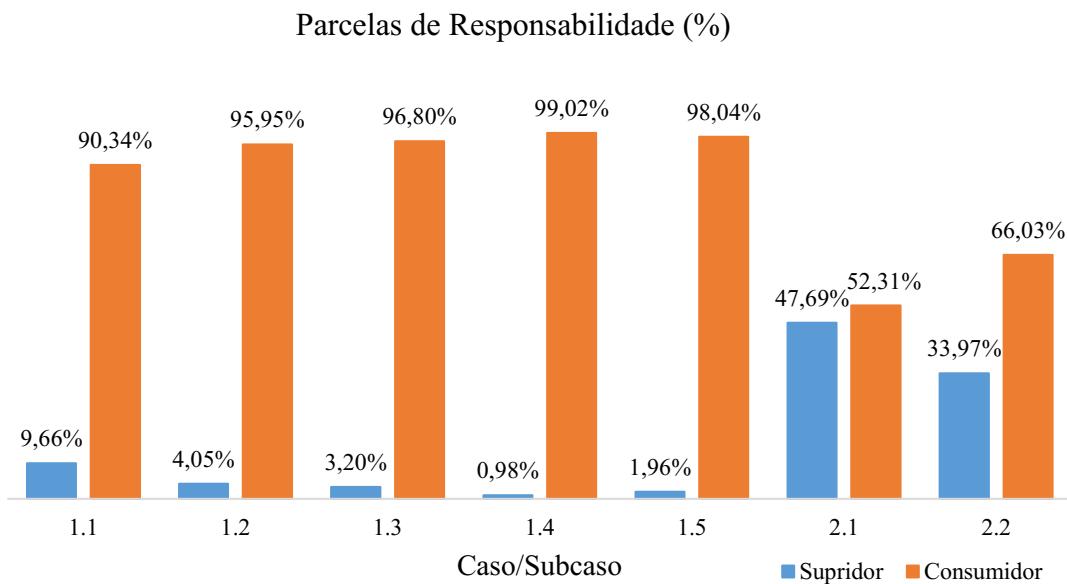
Diante das informações suprapostas, constata-se que a resposta do procedimento se apresenta muito próxima dos valores medidos. Cabe pontuar, ainda, que a metodologia foi capaz de atribuir o desequilíbrio remanescente das assimetrias inerentes ao circuito (0,18%), o qual foi majoritariamente incumbido ao supridor. Para o Caso 2, o maior erro observado foi de 0,04 pontos percentuais.

Outro fato interessante se trata do incremento do desequilíbrio do supridor de acordo com o aumento do desequilíbrio de carga. De fato, não se pode afirmar que esta resposta não é coerente com o comportamento físico esperado, visto que os desequilíbrios de carga podem intensificar as contribuições do supridor devido às interações presentes no circuito. Não

obstante este fato, pondera-se que o procedimento apresentou resposta condizente com a realidade física esperada.

Na sequência, a Figura 5.13 apresenta o quadro com os percentuais de responsabilidade propriamente ditos.

Figura 5. 13 – Parcelas de responsabilidade de acordo com o método MEC-CM – laboratorial.



Fonte: Autoria própria.

No que tange ao Caso 1, o método atribuiu a maior parcela de responsabilidade ao supridor. Nota-se que, de um modo geral, as contribuições do supridor são decrementadas ao longo dos casos avaliados. Isso ocorre devido ao aumento das assimetrias de carga frente ao percentual remanescente de 0,18%. Um breve incremento também é observado no Subcaso 1.5, porém, este desvio é irrisório. No que se refere ao Caso 2, na condição 2.1, o procedimento atribuiu valor próximo a 50% a cada parte, cujo maior percentual é incumbido ao consumidor. Comparando o FDv do Subcaso 1.2 (1,27%) com o FDv medido quando apenas a rede opera com tensões assimétricas (1,23%), evidencia-se que este resultado é condizente com o comportamento físico esperado.

Além disso, embora nas simulações computacionais tenha sido identificada a influência da distribuição da carga na resposta da metodologia, nos estudos laboratoriais não foi possível verificar esta relação.

5.9 Considerações finais

Nesta etapa, foi proposto um método para a determinação das parcelas de responsabilidade sobre os desequilíbrios de tensão, aqui denominado por método da Mudança de Estado Controlada (MEC). Além disso, foi discutida a possibilidade de uso indireto do método MEC juntamente com o da Superposição para o estabelecimento de uma correlação física com o fator de desequilíbrio de tensão. Dessa forma, com base no que foi exposto, as seguintes constatações são meritórias de destaque:

- O método MEC se trata de uma abordagem matemática que, por meio de recursos físicos, possibilita a determinação das contribuições individuais sobre os desequilíbrios de tensão sem a necessidade do conhecimento das impedâncias, além de apresentar boa consistência teórica por utilizar conceitos clássicos de circuitos elétricos em sua formulação;
- A aplicação do procedimento pode ser realizada chaveando-se um capacitor monofásico (MEC-CM), sendo este componente acessível e popularizado em instalações industriais. Além disso, o capacitor pode ser conectado na configuração fase-terra ou fase-fase, sem a necessidade de desconexão da instalação consumidora. Em se tratando de instalações industriais, este fato é de grande relevância pois evita a paralização de processos produtivos e consequentes prejuízos financeiros;
- O monitoramento das variáveis e a conexão da fonte de perturbação podem ser realizados em locais distintos daquele no qual almeja-se avaliar. Todavia, este procedimento requer o conhecimento das impedâncias existentes entre o local de execução e o ponto de interesse;
- No tocante aos estudos computacionais, os resultados ratificaram a consistência teórica da metodologia. Amparado pelo método da Superposição, o método MEC-CM foi capaz de estabelecer uma correlação física com o fator de desequilíbrio de tensão, cujos resultados se apresentaram muito próximos daqueles diretamente obtidos. Além disso, os percentuais de responsabilidade foram condizentes com o comportamento físico esperado;
- A resposta laboratorial do procedimento também se apresentou consonante com as expectativas. A aplicação do método MEC-CM juntamente com o da Superposição resultou percentuais de desequilíbrio próximos aos valores

medidos. Adicionalmente, o método foi capaz de atribuir a responsabilidade, até mesmo, pelo conteúdo pré-existente, apresentando resultados satisfatórios;

- Embora o arranjo CM tenha resultado um alto FDv nos estudos conduzidos, nota-se que, para os maiores percentuais de desequilíbrio de carga, a unidade contribuiu para a compensação intrínseca do fenômeno. Na prática, pelo fato do compartilhamento de responsabilidades se tratar de uma etapa posterior a constatação de uma violação de limites, os níveis de desequilíbrios serão naturalmente expressivos. Ainda assim, a perturbação pode ser minimizada ajustando-se a potência do banco a ser chaveado. Neste quesito, estudos computacionais preliminares apontaram que uma unidade com potência equivalente a 7% da indústria e 0,3% da potência de curto-círcuito foi suficiente para apresentar resultados satisfatórios, sem provocar grandes perturbações;
- Não obstante os resultados promissores, reconhece-se que o estabelecimento de um indicador que correlacione a potência a ser chaveada com os níveis de potência do sistema se apresenta como aspecto relevante para a consolidação da metodologia em campo.

CONCLUSÕES

6

Somada as considerações tecidas ao longo desta tese de doutorado, esta unidade encontra-se fundamentada na sintetização das principais constatações identificadas. Além disso, ao final, são apresentadas as possibilidades de estudos complementares às considerações aqui salientadas.

Antes de mais nada, reconhece-se que este trabalho avança na direção de contribuir com a temática da determinação das contribuições sobre os desequilíbrios em sistemas elétricos trifásicos, visto que, ao final das discussões expostas, foram estabelecidos direcionamentos relevantes sobre as possibilidades de tratamento da problemática em questão.

Assim, visando atender aos propósitos aqui postos, inicialmente apresentou-se uma contextualização sobre os desequilíbrios nos sistemas elétricos trifásicos, com especial atenção às prováveis causas, efeitos, indicadores de conformidade, percentuais limítrofes e possibilidades mitigatórias. De fato, tais ponderações delimitaram o escopo do trabalho e justificaram a relevância da pesquisa.

Na sequência, foi realizado o levantamento bibliográfico atualizado para a apresentação do estado da arte sobre a determinação das contribuições sobre os desequilíbrios. Por conseguinte, foram identificados os métodos de maior popularidade na literatura, a saber, método da Corrente Conforme e Não Conforme, método do Fluxo de Potência Trifásico e método IEC, cujas filosofias foram apresentadas em maiores detalhes.

Não obstante, como contribuições de caráter inovador, foram propostas duas metodologias para a determinação das parcelas de responsabilidade sobre os desequilíbrios. Uma delas trata-se do método da Superposição, ferramenta teórica baseada em conceitos clássicos de circuitos elétricos. A outra, de caráter prático, é aqui denominada por método da Mudança de Estado Controlada (MEC), cuja abordagem lança mão de recursos físicos e matemáticos para a determinação das contribuições de tensão.

A fim de avaliar o desempenho dos procedimentos, propostos e existentes, utilizando uma base de dados padronizada, foram conduzidos estudos computacionais e laboratoriais considerando diferentes condições operativas associadas à intensidade e à fonte precursora do

distúrbio. Dessarte, com base nas bibliografias investigadas e, também, nos resultados dos estudos aqui conduzidos, as principais constatações sobre cada método são salientadas na sequência.

Quanto ao método da Corrente Conforme e Não Conforme, este apresenta uma estratégia simples e. a priori, interessante sob o ponto de vista prático. Entretanto, ao considerar as impedâncias de sequência positiva, negativa e zero equivalentes entre si, a metodologia realiza simplificações matemáticas que refutam princípios consolidados na engenharia elétrica. Dessa forma, a depender das características das cargas que predominam a instalação, esta premissa pode influenciar de forma negativa na resposta do método. No tocante aos estudos computacionais e labororiais, pondera-se que, nas situações em que a rede apresentou perfil desequilibrado, a resposta do procedimento divergiu do comportamento físico esperado quanto ao fator de desequilíbrio de tensão. Assim, embora o método tenha apresentado uma correlação condizente com o fator de desequilíbrio de corrente, o procedimento não se mostrou viável para a avaliação das contribuições de tensão.

O método do Fluxo de Potência Trifásico se apresenta como ferramenta de fácil aplicação. Todavia, o mesmo não dispõe de recursos para o cálculo dos percentuais de responsabilidade propriamente ditos, visto que apenas indica o sentido predominante do fluxo de potência de sequência negativa. Ainda assim, trabalhos preliminares apontaram que a metodologia apresentou grandes fragilidades em estudos experimentais. No que tange às investigações aqui conduzidas, o método manifestou falhas na determinação da fonte proeminente do distúrbio já nos estudos computacionais. Na avaliação experimental, a resposta do procedimento foi ainda mais divergente da realidade física esperada, salientando sua inconsistência. Dessa forma, fica evidente que esta metodologia não se trata de uma abordagem confiável para o objetivo aqui posto, haja vista seu desempenho insatisfatório em estudos simples conduzidos em ambientes controlados.

O método IEC trata-se de uma estratégia que utiliza o fator de desequilíbrio de tensão no PAC em duas condições operativas distintas, sendo uma delas com o consumidor desconectado do sistema. Este fato, por si só, tem caráter limitador, visto que a sua aplicação é restrita ao planejamento e pré-operação de novas instalações. Com relação aos estudos realizados neste trabalho, embora o método IEC tenha apresentado respostas mais condizentes com o comportamento físico atrelado às contribuições de tensão, na avaliação experimental, a metodologia foi falha em uma das condições operativas.

Em consonância com o que foi exposto, o método da Superposição apresenta correlação física-teórica consistente, todavia, requer o conhecimento das impedâncias de sequência

negativa de cada subsistema. Uma vez que a determinação destas grandezas não se trata de um assunto trivial, sugere-se que, a priori, o método seja utilizado como ferramenta para estudos de compartilhamento de responsabilidades sobre desequilíbrios em ambientes controlados. Ainda assim, caso existam recursos para a determinação das impedâncias, a metodologia pode ser prontamente empregada. No tocante à avaliação computacional, os resultados foram fortemente condizentes com a realidade física esperada, evidenciando sua sólida consistência teórica. Nos estudos laboratoriais, embora não tenha sido capaz de atribuir o conteúdo pré-existente, o método apresentou resposta satisfatória em todos as condições avaliadas.

No tocante ao método da Mudança de Estado Controlada, este se trata de uma estratégia matemática que, por meio de recursos físicos, possibilita a determinação das contribuições sobre os desequilíbrios dispensando o conhecimento prévio de parâmetros. A sua aplicação em ambientes práticos pode ser realizada utilizando um capacitor monofásico (MEC-CM) ou outro elemento com característica fortemente desequilibrada. Não obstante este fato, amparado pela Superposição, a aplicação indireta do método MEC resulta no estabelecimento de uma correlação física com o próprio fator de desequilíbrio de tensão. Os resultados computacionais ratificaram a consistência teórica do procedimento proposto, visto que os percentuais de desequilíbrio atribuídos, bem como as parcelas de responsabilidade, se mostraram condizentes com o comportamento físico esperado. Os estudos laboratoriais também apresentaram respostas consonantes com a expectativa física. Neste particular, a aplicação indireta do método MEC-CM juntamente com a Superposição resultou em percentuais de desequilíbrios similares aos valores medidos. Adicionalmente, o método foi capaz de atribuir a responsabilidade pelo conteúdo pré-existente.

Não obstante o reconhecimento de que o método MEC apresenta resultados promissores, frisa-se a que outros estudos e aprofundamentos são desejáveis para o aprimoramento e consolidação da proposta. Neste contexto, são sugeridos os seguintes tópicos para futuros desenvolvimentos:

- Investigação da influência de cargas com características diversas e, também, da presença de outros distúrbios de regime permanente no desempenho do método MEC-CM;
- Visando a minimização das perturbações quanto à aplicação do método MEC-CM, estabelecer um indicador que correlacione o valor da potência do capacitor com os níveis de potência do sistema (nível de curto-circuito);
- Verificação pormenorizada da influência da distribuição das cargas entre as fases na resposta do método MEC-CM;

- Avaliação do método MEC-CM em estudos de campo utilizando valores reais;
- Aplicação do método MEC utilizando o chaveamento de cargas perturbadoras como possibilidade não invasiva. Esta carga, por sua vez, seria vista como a fonte de perturbação tratada no método MEC, a qual seria avaliada em dois estados operativos, em consonância com o procedimento enunciado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica.** Brasília, 2017.

—. **Geração Distribuída: Unidades Consumidoras com Geração Distribuída.** Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Estadual.asp>.

ARÃO, L. F. L. **Avaliação Comparativa entre Métodos para Atribuição de Responsabilidades devido ao Desequilíbrio de Tensão.** Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

ARÃO, L. F. L.; FERREIRA FILHO, A. L.; MENDONÇA, M. V. B. Comparative Evaluation of Methods for Attributing Responsibilities Due To Voltage Unbalance. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 31, n. 2, p. 743–752, 2016.

<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2493445>

BHAVARAJU, V. B.; ENJETI, P. N. An active line conditioner to balance voltages in a three-phase system. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 32, n. 2, p. 287–292, 1996.

<https://doi.org/10.1109/28.491476>

BRASIL. **Ministério de Minas e Energia: Secretaria de Energia Elétrica.** Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/energia-eletrica>>. Acesso em: 23 jan. 2020.

BROADWATER, R. P. *et al.* Time varying load analysis to reduce distribution losses through reconfiguration. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 8, n. 1, p. 294–300, 1993.

<https://doi.org/10.1109/61.180349>

CAMPOS, A. *et al.* Analysis and Design of a Series Voltage Unbalance Compensator Based on a Three-Phase VSI Operating with Unbalanced Switching Functions. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 9, n. 3, p. 269–274, 1994.

<https://doi.org/10.1109/63.311259>

CHEN, J. H.; LEE, W. J.; CHEN, M. S. Using a static var compensator to balance a distribution system. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 35, n. 2, p. 298–304, 1999.

<https://doi.org/10.1109/28.753620>

CIGRE/CIRED JWG C4.109. **Review of disturbance emission assessment techniques.** 2011.

CZARNECKI, L. S. Reactive and Unbalanced Currents Compensation in Three-Phase Asymmetrical Circuits Under Nonsinusoidal Conditions. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 38, n. 3, p. 754–759, 1989.

<https://doi.org/10.1109/19.32187>

CZARNECKI, L. S.; HSU, S. M. Thyristor controlled susceptances for balancing compensators operated under nonsinusoidal conditions. **Electric Power Applications, IEE Proceedings**, v. 141, n. 4, p. 177–185, 1994.

<https://doi.org/10.1049/ip-epa:19949984>

CZARNECKI, L. S.; HSU, S. M.; CHEN, G. Adaptive Balancing Compensator. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 10, n. 3, p. 1663–1669, 1995.

<https://doi.org/10.1109/61.400954>

DAS, S.; CHATTERJEE, D.; GOSWAMI, S. K. A GSA-based modified SVC switching scheme for load balancing and source power factor improvement. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 31, n. 5, p. 2072–2082, 2016.

<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2502623>

DELL'AQUILA, A. *et al.* New power-quality assessment criteria for supply systems under unbalanced and nonsinusoidal conditions. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 19, n. 3, p. 1284–1290, jul. 2004.

<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.829928>

FERREIRA FILHO, A. L. **Análise do Comportamento do Fator de Desequilíbrio Frente a Variação da Amplitude e do Ângulo de Tensão.** Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

- FLORES, A. V. E. **Análise da Correta Modelagem da Transposição em Linhas de Transmissão do Domínio da Frequência**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.
- FORTESCUE, C. L. Method of Symmetrical Co-ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. XXXVII, n. 2, p. 1027–1140, 1918. <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1918.4765570>
- GARZON, C.; PAVAS, A. **Causality assessment for power quality stationary disturbances by means of centrality index**. 2015 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications, PEPQA 2015 - Proceedings. Bogota, Colombia: jul. 2015. <https://doi.org/10.1109/PEPQA.2015.7168227>
- GREGORY, R. C. F. *et al.* **An Experimental Evaluation of Procedures Aimed at Sharing the Voltage Imbalance Responsibility**. XIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica. São Caetano do Sul, Brasil: 2019.
- GREGORY, R. C. F.; OLIVEIRA, L. T.; OLIVEIRA, J. C. A eficácia de compensadores de desequilíbrios a componentes passivos. **Revista O Setor Elétrico**, v. 138, p. 52–60, 2017.
- GREGORY, R. C. F.; SCOTTI, T. M.; OLIVEIRA, J. C. Performance evaluation of unbalance sharing responsibility procedures. **SBSE 2018 - 7th Brazilian Electrical Systems Symposium**. Niteroi, Brasil: 2018. <https://doi.org/10.1109/SBSE.2018.8395634>
- GROTZBACH, M.; XU, J. **Noncharacteristic Line Current Harmonics in Diode Rectifier Bridges Produced by Network Asymmetries**. Fifth European Conference on Power Electronics and Applications. Brighton, UK: 1993.
- GYUGYI, L.; OTTO, R. A.; PUTMAN, T. H. Principles and applications of static, thyristor-controlled shunt compensators. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-97, n. 5, p. 1935–1945, 1978. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1978.354690>
- HANZELKA, Z.; VARETSKY, Y. **Negative-sequence active power stream as an index of unbalance source**. 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation. Lisboa, Portugal: out. 2011. <https://doi.org/10.1109/EPQU.2011.6128928>
- HERRERA, R. S.; VÁZQUEZ, J. R. Identification of unbalanced loads in electric power systems. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, v. 24, n. 9, p. 1232–1243, 1 set. 2014. <https://doi.org/10.1002/etep.1772>
- IEC/TR 61000-2-2:2002. **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-2: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems**.
- IEC 61000-2-12:2003. **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-12: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public medium-voltage power supply systems**.
- IEEE STD 1159TM. **Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**. New York, USA, 2019. <https://doi.org/10.1109/IEEEESTD.2019.8796486>
- IEEE STD 1459TM. **IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions**. New York, USA, 2010. <https://doi.org/10.1109/IEEEESTD.2010.5439063>
- IEEE STD 1547.7TM. **IEEE Guide for Conducting Distribution Impact Studies for Distributed Resource Interconnection**. New York, USA, 2013. <https://doi.org/10.1109/IEEEESTD.2014.6748837>
- JACOBINA, C. B. *et al.* Modeling and control of unbalanced three-phase systems containing PWM converters. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 37, n. 6, p. 1807–1816, 2001. <https://doi.org/10.1109/28.968195>
- JAYATUNGA, U. *et al.* Voltage unbalance emission assessment in interconnected power systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 28, n. 4, p. 2383–2393, 2013. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2274659>
- JAYATUNGA, U. *et al.* Deterministic methodologies for the quantification of voltage unbalance propagation in radial and interconnected networks. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 9, n. 11, p. 1069–1076, 2015. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.0661>

- JAYATUNGA, U.; PERERA, S.; CIUFO, P. Voltage Unbalance Emission Assessment in Radial Power Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 27, n. 3, p. 1653–1661, 2012a.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2196294>
- _____. **Voltage unbalance management in power systems based on IEC 61000-3-13:2008: Implications on the use of “kuE factor”**. 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). Hong Kong, China: 2012b.
<https://doi.org/10.1109/ICHQP.2012.6381180>
- JIA, X. *et al.* **Study on assessment method of load's disturbance property**. 3rd International Conference on Deregulation and Restructuring and Power Technologies, DRPT 2008. Nanjing, China: 2008.
<https://doi.org/10.1109/DRPT.2008.4523759>
- JOUANNE, A. VON; BANERJEE, B. (BEN). Assessment of Voltage Unbalance. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 16, n. 4, p. 782–790, 2001.
<https://doi.org/10.1109/61.956770>
- LIU, Z.; MILANOVIC, J. V. **Adequacy of the superposition method for probabilistic assessment of unbalance in distribution networks**. 2013 IEEE Grenoble Conference PowerTech. Grenoble, France: jun. 2013.
<https://doi.org/10.1109/PTC.2013.6652144>
- NASCIMENTO, C. F. *et al.* Analysis of Noncharacteristic Harmonics Generated by Voltage-Source Converters Operating Under Unbalanced Voltage. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 32, n. 2, p. 951–961, 2017.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2593684>
- NETO, A. F. T. *et al.* **A comparative evaluation of methods for analysis of propagation of unbalance in electric systems**. 2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA). Motevidéu, Uruguai: set. 2012.
<https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2012.6319083>
- ONS. **Procedimentos de Rede - Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia elétrica da Rede Básica**.
- PAVAS, A.; GARZON, C. **Causality assessment for power quality stationary disturbances**. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe. Istanbul, Turkey: jan. 2014.
<https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2014.7028978>
- PAVAS, A.; GARZÓN, C. **Application of the method of disturbances interaction for assessing origin of stationary power quality disturbances**. Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP. Belo Horizonte, Brazil: dez. 2016.
<https://doi.org/10.1109/ICHQP.2016.7783338>
- PAVAS, A.; TORRES-SANCHEZ, H.; STAUDT, V. **Statistical analysis of power quality disturbances propagation by means of the Method of Disturbances Interaction**. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe. Berlin, Germany: 2012.
<https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2012.6465817>
- PAVAS, A.; TORRES-SÁNCHEZ, H.; STAUDT, V. **Method of disturbances interaction: Novel approach to assess responsibilities for steady state power quality disturbances among customers**. ICHQP 2010 - 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Bergamo, Italy: 2010.
<https://doi.org/10.1109/ICHQP.2010.5625493>
- PINTO, P. H. L. S.; MENDONÇA, M. V. B.; MOURA, F. A. M. **Avaliação de Método para Atribuição da Responsabilidade pelo Desequilíbrio de Tensão em Sistemas com Motores Elétricos**. XII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica. Curitiba, Brasil: 2017
- REINERI, C. A. *et al.* **Revision of concepts and approaches for unbalance problems in distribution**. 2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, TDC'06. Caracas, Venezuela: 2006.
<https://doi.org/10.1109/TDCLA.2006.311575>
- SANTOS, A. C. **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.
- _____. **Compartilhamento de responsabilidades harmônicas: análises, contribuições e proposições**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

- SCHWANZ, D. *et al.* Stochastic Assessment of Voltage Unbalance Due to Single-Phase-Connected Solar Power. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 32, n. 2, p. 852–861, abr. 2017.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2579680>
- SEIPHETLHO, T. E.; RENS, A. P. J. **On the assessment of voltage unbalance.** ICHQP 2010 - 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Bergamo, Itália: 2010.
<https://doi.org/10.1109/ICHQP.2010.5625366>
- SEIPHETLHO, T.; RENS, J. **Practical evaluation of voltage unbalance at a distribution transformer based on 50 Hz negative sequence active power.** IEEE AFRICON Conference. Livingstone, Zambia: 2011.
<https://doi.org/10.1109/AFRCON.2011.6072129>
- SOUTO, O. C. N. **Modelagem e Análise de Desempenho Térmico de Motores de Indução Sob Condições Não Ideais de Alimentação.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001.
- SRINIVASAN, K. Attributing harmonics in private power production. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 34, n. 5, p. 56–61, 1998.
<https://doi.org/10.1109/28.720425>
- SRINIVASAN, K.; JUTRAS, R. Conforming and non-conforming current for attributing steady state power quality problems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 13, n. 1, p. 212–217, 1998.
<https://doi.org/10.1109/61.660880>
- 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.**
- WOOLLEY, N. C.; MILANOVIĆ, J. V. Statistical estimation of the source and level of voltage unbalance in distribution networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 27, n. 3, p. 1450–1460, 2012.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2195230>
- XU, W.; LIU, Y. A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 15, n. 2, p. 804–811, abr. 2000.
<https://doi.org/10.1109/61.853023>

APÊNDICE A

TRABALHOS RELACIONADOS À DETERMINAÇÃO DAS CONTRIBUIÇÕES SOBRE OS DESEQUILÍBRIOS

A fim de consubstanciar maiores informações a respeito do levantamento bibliográfico realizado é apresentada, na Tabela A.1, a lista das referências contendo a data de publicação, os títulos dos trabalhos e os locais nos quais estes foram veiculados.

Tabela A. 1 – Lista de referências atreladas à determinação das contribuições sobre os desequilíbrios.

Código	Título	Tipo de Publicação	Publicado em	Ano de Publicação
1	Conforming and non-conforming current for attributing steady state power quality problems	Revista	IEEE Transactions on Power Delivery	1998
2	Attributing harmonics in private power production	Revista	IEEE Transactions on Industry Applications	1998
3	New power-quality assessment criteria for supply systems under unbalanced and nonsinusoidal conditions	Revista	IEEE Transactions on Power Delivery	2004
4	Revision of Concepts and Approaches for Unbalance Problems in Distribution	Conferência	2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America	2006
5	IEC TR 61000.3.13: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-13: Limits – Assessment of emission limits for the connection of unbalanced installations to MV, HV and EHV power systems	Relatório Técnico	IEC Webstore	2008
6	Study on assessment method of load's disturbance property	Conferência	2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies	2008
7	Location of sources of voltage unbalance in an interconnected network	Conferência	2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting	2009

8	Method of Disturbances Interaction: Novel approach to assess responsibilities for steady state power quality disturbances among customers	Conferência	Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010	2010
9	On the assessment of voltage unbalance	Conferência	Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010	2010
10	Voltage unbalance emission assessment	Conferência	Proceedings of the 2010 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference	2010
11	Negative-sequence active power stream as an index of unbalance source	Conferência	11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation	2011
12	Practical evaluation of voltage unbalance at a distribution transformer based on 50 Hz negative sequence active power	Conferência	IEEE Africon '11	2011
13	Statistical estimation of the source and level of voltage unbalance in distribution networks	Revista	IEEE Transactions on Power Delivery	2012
14	A comparative evaluation of methods for analysis of propagation of unbalance in electric systems	Conferência	2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA)	2012
15	Statistical analysis of power quality disturbances propagation by means of the Method of Disturbances Interaction	Conferência	2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)	2012
16	Voltage unbalance emission assessment in radial power systems	Revista	IEEE Transactions on Power Delivery	2012
17	Voltage unbalance emission assessment in interconnected power systems	Revista	IEEE Transactions on Power Delivery	2013
18	Voltage unbalance emission assessment: Sources of contribution and their ranking	Conferência	2013 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)	2013
19	Adequacy of the superposition method for probabilistic assessment of unbalance in distribution networks	Conferência	2013 IEEE Grenoble Conference	2013
20	Avaliação comparativa entre métodos para atribuição de responsabilidades devido ao desequilíbrio de tensão	Dissertação de Mestrado	Repositório Institucional da UNB	2014
21	Identification of unbalanced loads in electric power systems	Revista	International Transactions on Electrical Energy Systems	2014
22	A review of recent investigations on voltage unbalance management: Further contributions to improvement of IEC/TR 61000-3-13:2008	Conferência	2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)	2014
23	Causality assessment for power quality stationary disturbances	Conferência	IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe	2014
24	Causality assessment for power quality stationary disturbances by means of centrality index	Conferência	2015 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)	2014
25	Probabilistic estimation of voltage unbalance in mv distribution networks with unbalanced load	Revista	IEEE Transactions on Power Delivery	2015
26	Deterministic methodologies for the quantification of voltage unbalance propagation in radial and interconnected networks	Revista	IET Generation, Transmission & Distribution	2015

27	Application of the method of disturbances interaction for assessing origin of stationary power quality disturbances	Conferência	2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)	2016
28	Comparative evaluation of methods for attributing responsibilities due to voltage unbalance	Revista	IEEE Transactions on Power Delivery	2016
29	Unbalanced source identification at the point of evaluation in the distribution power systems	Revista	International Transactions on Electrical Energy Systems	2017
30	Avaliação de método para atribuição da responsabilidade pelo desequilíbrio de tensão em sistemas com motores elétricos	Conferência	XII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica	2017
31	Unbalanced current-based tariff	Conferência	24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED)	2017
32	Stochastic assessment of voltage unbalance due to single-phase-connected solar power	Revista	IEEE Transactions on Power Delivery	2017
33*	Performance evaluation of unbalance sharing responsibility procedures	Conferência	2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)	2018
34*	Os desafios associados ao compartilhamento de responsabilidades sobre os desequilíbrios de tensão	Revista	O Setor Elétrico	2018
35	General definition of unbalanced power to calculate and assess unbalance of customer installations	Conferência	2019 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) & 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM)	2019
36*	An experimental evaluation of procedures aimed at sharing the voltage imbalance responsibility	Conferência	XIII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica	2019
37*	A practical approach for determining voltage imbalance	Revista	International Transactions on Electrical Energy Systems	2020

*Trabalhos originados da presente pesquisa.

APÊNDICE B

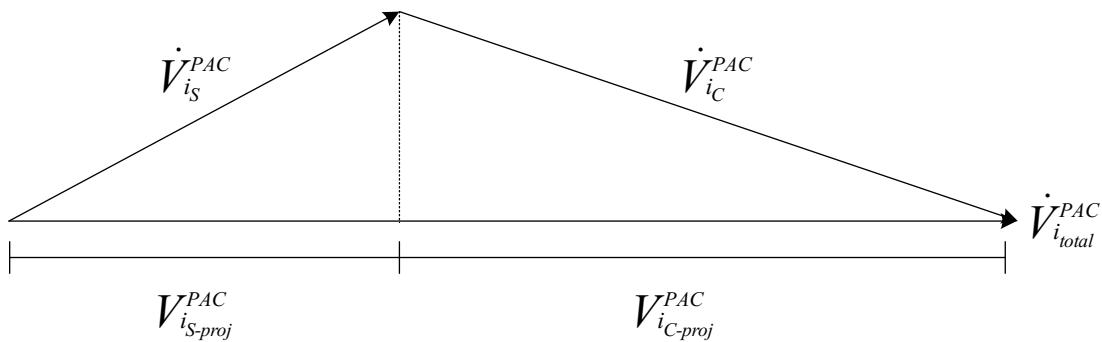
CÁLCULO DOS PERCENTUAIS DE RESPONSABILIDADE

Para que as parcelas de responsabilidade sejam atribuídas de forma proporcional às contribuições entre das partes, na literatura, são propostos procedimentos matemáticos com este intuito. Diante disso, institui-se que a abordagem empregada neste trabalho é inspirada nos desenvolvimentos enunciados em (Xu e Liu, 2000).

Em princípio, a estratégia pode ser prontamente aplicada a qualquer metodologia que forneça as contribuições individuais em termos vetoriais. Salienta-se que este procedimento pode ser empregado para qualquer componente de sequência i , respeitadas as restrições de aplicação das metodologias.

Dessarte, a estratégia essencialmente consiste em projetar as componentes vetoriais representativas das contribuições individuais de cada parte sobre o vetor total, o qual resulta da soma vetorial das contribuições individuais. Este procedimento é ilustrado a Figura B.1.

Figura B. 1 – Representação da projeção das componentes vetoriais individuais sobre o vetor total.



Fonte: Autoria própria.

Onde:

$\dot{V}_{i_S}^{PAC}$ – vetor representativo da contribuição do supridor no PAC, no domínio das componentes simétricas;

$\dot{V}_{i_C}^{PAC}$ – vetor representativo da contribuição do consumidor no PAC, no domínio das componentes simétricas;

$\dot{V}_{i_{total}}^{PAC}$ – vetor representativo da contribuição total no PAC, no domínio das componentes simétricas;

$V_{i_{S-proj}}^{PAC}$ – projeção da contribuição do supridor no PAC sobre o vetor total, no domínio das componentes simétricas;

$V_{i_{C-proj}}^{PAC}$ – projeção da contribuição do consumidor no PAC sobre o vetor total, no domínio das componentes simétricas;

Para o cálculo das parcelas de responsabilidade do supridor e consumidor, são empregadas as expressões (B.1) e (B.2), respectivamente.

$$R_{i_S}(\%) = \frac{|V_{i_{S-proj}}^{PCC}|}{|V_{i_{S-proj}}^{PCC}| + |V_{i_{C-proj}}^{PCC}|} \times 100 \quad (B.1)$$

$$R_{i_C}(\%) = \frac{|V_{i_{C-proj}}^{PCC}|}{|V_{i_{S-proj}}^{PCC}| + |V_{i_{C-proj}}^{PCC}|} \times 100 \quad (B.2)$$

A fim de consubstanciar maiores esclarecimentos a respeito da utilização desta ferramenta no processo de avaliação das metodologias para a determinação das contribuições, a Tabela B.1 apresenta a correlação entre as variáveis definidas por cada procedimento e o respectivo vetor de contribuição.

Tabela B. 1 – Correlação entre as variáveis definidas pelos métodos e as componentes vetoriais representativas.

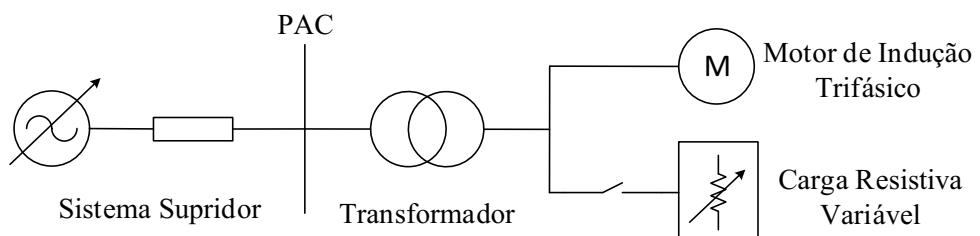
Método	$\dot{V}_{i_S}^{PAC}$	$\dot{V}_{i_C}^{PAC}$	$\dot{V}_{i_{total}}^{PAC}$
Corrente Conforme e Não Conforme	$\dot{I}_{i_{conf}}$	$\dot{I}_{i_{n-conf}}$	\dot{I}_i^{PAC}
Fluxo de Potência Trifásico	-	-	-
IEC	$\dot{F}D_{V_S}$	$\dot{F}D_{V_C}$	$\dot{F}D_{V_{total}}$
Superposição	$\dot{U}_{i_S}^{PAC}$	$\dot{U}_{i_C}^{PAC}$	\dot{U}_i^{PAC}
Mudança de Estado Controlada	\dot{I}_{2_S}	\dot{I}_{2_C}	$\dot{I}_{2_{total}}^{PAC}$

APÊNDICE C

ARRANJO ELÉTRICO UTILIZADO NOS ESTUDOS

Para a realização dos estudos, foi utilizado um arranjo elétrico hipotético nos termos definidos na Figura C.1. Este é composto de uma fonte de tensão trifásica que, ora opera com alimentação equilibrada, ora com tensões assimétricas. A fonte conecta-se a indutores que representam o nível de curto-circuito do sistema supridor. Na sequência, tem-se um transformador trifásico que interconecta os sistemas supridor e consumidor ao PAC. O consumidor, por sua vez, é constituído de um motor de indução trifásico e uma carga resistiva, variável, com chaveamento individual por fase, a qual provoca diferentes níveis de FDv no PAC. Ressalta-se, ainda, que este circuito base é empregado para a avaliação de desempenho de todos os procedimentos tratados nesta tese.

Figura C. 1 – Equivalente elétrico representativo utilizado nos estudos computacionais e laboratoriais.



Fonte: Autoria própria.

Na sequência, nas Tabelas C.1 a C.4 são fornecidos os parâmetros do sistema ilustrado na Figura C.1.

Tabela C. 1 – Sistema supridor.

Nível de curto-circuito (kVA)	Tensão nominal (V)	Frequência (Hz)	Relação X/R
50	400	50	70

Tabela C. 2 – Transformador.

Potência nominal (kVA)	Tensão nominal (V)	Resistência percentual (%)	Reatância percentual (%)	Conexão
6,3	400/400	2,0	6,0	Δ/Yt

Tabela C. 3 – Motor de indução trifásico.

Parâmetro	Magnitude
Tensão nominal (V)	400
Potência ativa (kW)	2,20
Rendimento (%)	84,50
Inércia ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	0,0082
Escorregamento (%)	0,05
Fator de potência	0,81

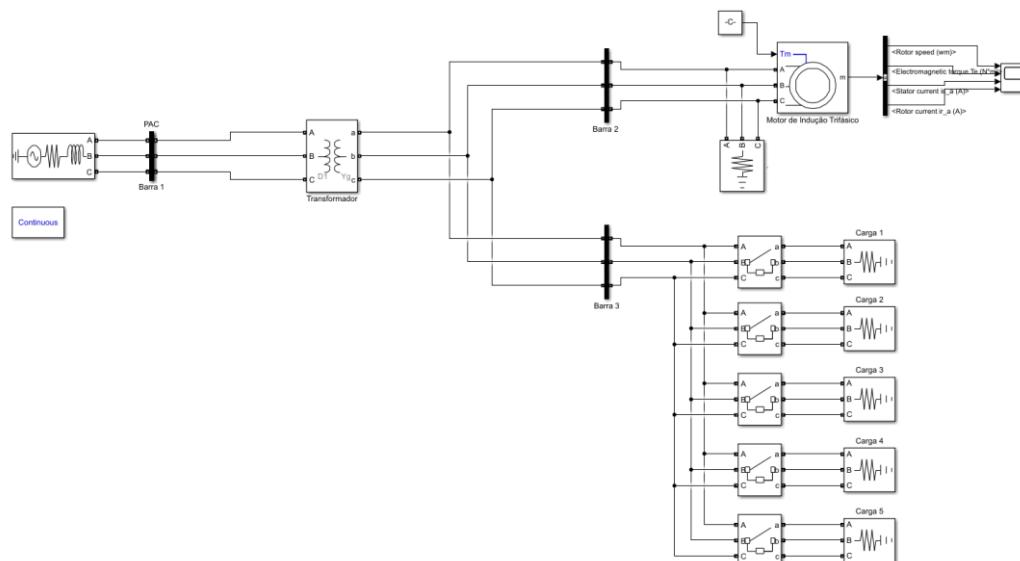
Tabela C. 4 – Carga resistiva variável (desequilibrada).

Carregamento	FDV gerado pela carga (aprox.)	Potência ativa por fase (kW)		
		A	B	C
Carga 1	0,5%	0,3	0,7	0,7
Carga 2	1,0%	0,0	0,0	0,7
Carga 3	1,5%	0,7	0,3	1,7
Carga 4	2,0%	0,0	0,0	1,7
Carga 5	2,5%	0,0	0,0	2,0

C.1 Simulações computacionais

O arranjo elétrico descrito foi implementado no programa MATLAB/Simulink® utilizando a ferramenta *SimPowerSystems*, tal como ilustra a Figura C.2.

Figura C. 2 – Equivalente elétrico implementado no programa MATLAB/Simulink®.



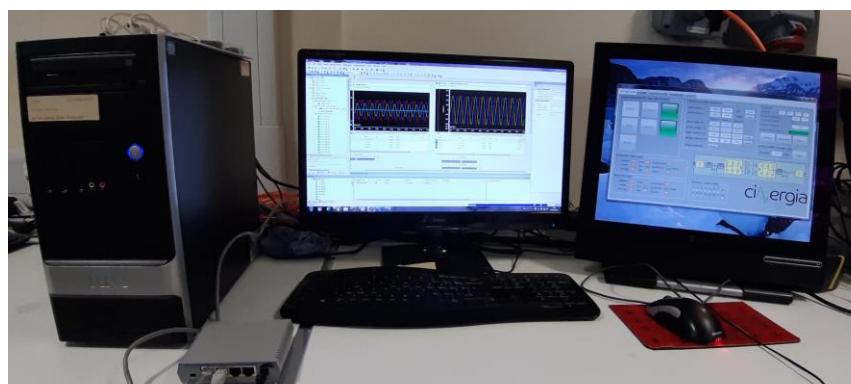
Fonte: Autoria própria.

A Barra 1 representa o próprio ponto de acoplamento comum entre o supridor e consumidor. Na Barra 2 é conectado o motor de indução trifásico equilibrado. Na Barra 3, constam as Cargas 1 a 5, as quais foram individualmente chaveadas a fim de representar a carga resistiva variável. Ressalta-se que os componentes empregados são os mesmos que se encontram disponíveis na biblioteca do programa.

C.2 Montagem laboratorial

Para as avaliações laboratoriais, foi elaborado um esquema nos termos estabelecidos na Figura C.1. O sistema de suprimento é representado por uma fonte de tensão trifásica, modelo GE-15 da CINERGIA, a qual é controlada por um *software* instalado em um microcomputador. A fim de compor um arranjo trifásico, as três saídas da fonte são conectadas em série com três indutores de núcleo de ferro. Na sequência, têm-se um transformador trifásico que delimita o ponto de acoplamento comum entre o supridor e o consumidor. Este último é representado por um motor de indução trifásico conectado em paralelo com uma carga resistiva, variável e com chaveamento independente para cada fase. As Figuras C.3 a C.6 apresentam o esquema físico elaborado.

Figura C. 3 – Esquema laboratorial: microcomputador.



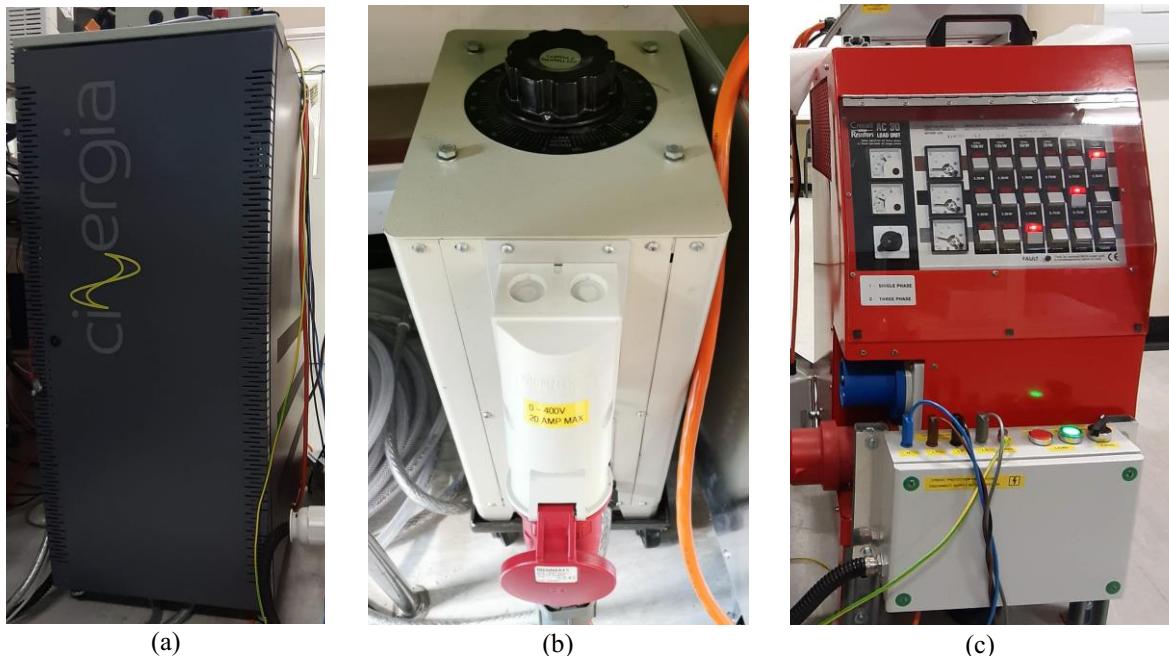
Fonte: Autoria própria.

Figura C. 4 – Esquema laboratorial: indutores.



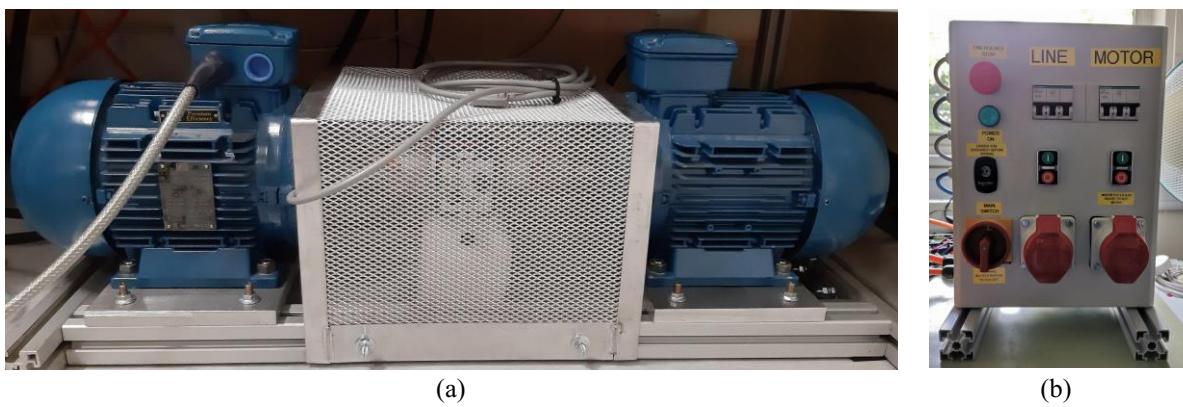
Fonte: Autoria própria.

Figura C. 5 – Esquema laboratorial: a) fonte controlada; b) transformador; c) carga resistiva.



Fonte: Autoria própria.

Figura C. 6 – Esquema laboratorial: a) motor de indução trifásico (MIT); b) painel de acionamento do MIT.



Fonte: Autoria própria.

As medições de tensão foram realizadas utilizando transdutores trifásicos integrados a uma placa de aquisição de tensão. Por outro lado, os sinais de corrente foram obtidos por meio de *clamps* de corrente do tipo AC/DC modelo FLUKE i310s. Tais componentes são ilustrados na Figura C.7 (a) e (b).

Figura C. 7 – Transdutores utilizados nas medições: a) tensão; b) corrente.



Fonte: Autoria própria.

A aquisição dos sinais foi feita utilizando o ambiente dSPACE, o qual se trata de uma ferramenta *hardware/software* com interface de comunicação integrada ao programa MATLAB/Simulink®. Nesse sentido, seis canais foram configurados para o monitoramento das tensões e correntes trifásicas no PAC. Além disso, um canal adicional foi habilitado para a medição da corrente na entrada do capacitor monofásico, o qual é empregado para a realização do procedimento enunciado na Unidade 5. A Figura C.8 apresenta a placa de aquisição dSPACE modelo CP1103.

Figura C. 8 – Placa de aquisição CP1103 – dSPACE.



Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE D

DESCRIÇÃO DOS ESTUDOS DE CASOS E VALORES DE REFERÊNCIA

D.1 Estudos de casos

Os estudos computacionais e experimentais foram subdivididos em duas partes fundamentais atreladas à existência, ou não, dos desequilíbrios pré-existentes na tensão de suprimento.

Nesse sentido, as particularidades de cada caso são apresentadas na sequência.

D.1.1 Caso 1 – desequilíbrios provocados pela instalação consumidora

A fim de avaliar a influência de desequilíbrios incrementais bem como da própria distribuição das cargas na resposta dos procedimentos, optou-se pela subdivisão deste estudo em cinco subcasos. Nesse sentido, as Cargas 1 a 5 são individualmente conectadas, caracterizando os Casos 1.1 a 1.5. A fonte de alimentação é responsável por prover tensões com características simétricas, cuja parametrização é condizente com as informações exibidas na Tabela D.1.

Tabela D. 1 – Tensões de parametrização da fonte de suprimento – Caso 1.

Fase	Tensão (V)
A	$230,94\angle 0,0^\circ$
B	$230,94\angle -120,0^\circ$
C	$230,94\angle 120,0^\circ$
FD (%)	0,0%

D.1.2 Caso 2 – desequilíbrios provocados pela instalação consumidora e fonte supridora

Com o propósito de verificar o desempenho das metodologias na presença de um conteúdo pré-existente, juntamente com os desequilíbrios provocados pelas cargas 2 e 3 – respectivos casos 1.2 e 1.3 –, também é imposto um nível de desequilíbrio de tensão, à fonte de suprimento, próximo a 1%, caracterizando os Casos 2.1 e 2.2. A escolha deste percentual se deve ao fato de que, via de regra, as redes de distribuição do Reino Unido apresentam um baixo percentual de desequilíbrio de tensão pré-existente, visto que os seus níveis de curto-círcuito são relativamente altos quando comparados aos sistemas de distribuição brasileiros. Pondera-se, ainda, que este FDv foi obtido a partir do desequilíbrio das magnitudes das tensões de fase, de acordo com a Tabela D.2.

Tabela D. 2 – Tensões de parametrização da fonte de suprimento – Caso 2.

Fase	Tensão (V)
A	230,0∠0,0°
B	227,0∠-120,0°
C	237,0∠120,0°
FD (%)	1,0%

D.1.3 Síntese dos estudos de casos

A fim de facilitar a compreensão dos detalhamentos previamente expostos, a Tabela D.3 apresenta um quadro resumo dos estudos realizados.

Tabela D. 3 – Síntese dos estudos de casos.

Caso	Subcaso	FDv imposto à fonte (aprox.)	Carga conectada	Tipo de distribuição da carga	FDv gerado pela carga (aprox.)
1	.1	0%	Carga 1	Trifásica desequilibrada	0,5%
	.2		Carga 2	Monofásica	1,0%
	.3		Carga 3	Trifásica desequilibrada	1,5%
	.4		Carga 4	Monofásica	2,0%
	.5		Carga 5	Monofásica	2,5%
2	.1	1%	Carga 2	Monofásica	1,0%
	.2		Carga 3	Trifásica desequilibrada	1,5%

D.2 Tensões e correntes de referência

Nesta seção, são apresentadas as tensões e correntes obtidas nos estudos conduzidos.

D.2.1 Simulações computacionais

As Tabela D.4 a D.7 fornecem as variáveis no PAC para as distintas condições operativas investigadas nos estudos computacionais.

Tabela D. 4 – Tensões e correntes no PAC com a carga resistiva desconectada – computacional.

Fase/Componente de sequência	Fonte equilibrada		Fonte desequilibrada	
	Tensões (V)	Correntes (A)	Tensões (V)	Correntes (A)
A	221,92∠-3,19°	4,84∠-36,38°	220,41∠-2,97°	4,72∠-40,08°
B	221,92∠-123,19°	4,84∠-156,38°	219,00∠-123,22°	4,65∠-153,29°
C	221,92∠116,81°	4,84∠83,62°	227,49∠116,67°	5,16∠84,00°
0	-	-	2,96∠103,01°	-
1	221,92∠-3,19°	4,84∠-36,38°	222,30∠-3,18°	4,84∠-36,46°
2	-	-	2,32∠-120,68°	0,32∠-149,14°
FD (%)	0,00	0,00	1,04	6,68

Tabela D. 5 – Tensões e correntes no PAC com a carga resistiva desconectada e CM conectado – computacional.

Fase/Componente de sequência	Fonte equilibrada			Fonte desequilibrada		
	Tensões PAC (V)	Correntes PAC (A)	Corrente CM (A)	Tensões PAC (V)	Correntes PAC (A)	Corrente CM (A)
A	Mag	241,50	5,91	6,82	239,85	5,53
	Ang	-3,81°	32,85°	83,92°	-3,59°	32,82°
B	Mag	221,27	4,25	-	218,35	4,03
	Ang	-122,43°	-165,67°	-	-122,61°	-162,55°
C	Mag	224,05	4,63	-	229,61	4,95
	Ang	116,69°	91,48°	-	116,56°	91,32°
0	Mag	7,28	2,27	2,27	6,70	2,26
	Ang	-6,91°	83,91°	83,92°	18,70°	84,13°
1	Mag	228,93	4,06	2,27	229,27	4,05
	Ang	-3,20°	-9,69°	83,92°	-3,23°	-9,96°
2	Mag	5,69	1,78	2,27	5,92	1,51
	Ang	-24,71°	66,13°	83,92°	-45,77°	73,45°
FD (%)	2,49	43,81	100	2,58	37,42	100

Tabela D. 6 – Tensões e correntes no PAC com a carga resistiva conectada – computacional.

Variável	Componente de seq.	Caso/Subcaso						
		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2
Tensão (V)	0 Mag	-	-	-	-	-	2,96	2,96
	0 Ang	-	-	-	-	-	103,01°	103,01°
	1 Mag	220,78	221,46	219,77	220,51	220,16	221,82	220,11
	1 Ang	-4,99°	-3,93°	-6,01°	-4,95°	-5,25°	-3,92°	-6,00°
	2 Mag	1,12	2,00	3,39	4,74	5,53	3,58	5,04
	2 Ang	109,22°	171,35°	-177,54°	-71,85°	167,27°	-152,14°	-155,82°
Corrente (A)	FD (%)	0,51	0,90	1,54	2,15	2,51	1,61	2,29
	0 Mag	-	-	-	-	-	-	-
	0 Ang	-	-	-	-	-	-	-
	1 Mag	6,91	5,68	8,17	6,91	7,28	5,68	8,17
	1 Ang	-29,00°	-32,58°	-27,46°	-29,78°	-29,33°	-32,69°	-27,57°
	2 Mag	0,35	0,62	1,06	1,48	1,72	0,87	1,25
	2 Ang	-159,78°	-97,87°	-86,86°	18,97°	-101,96°	-115,11°	-101,08°
	FD (%)	5,08	10,99	12,97	21,44	23,76	15,28	15,32

Tabela D. 7 – Tensões e correntes no PAC com a carga resistiva e CM conectados – computacional.

Variável	Componente de seq.	Caso/Subcaso						
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.2	1.3
Tensão (V)	0 Mag	7,22	7,20	7,09	7,07	7,03	6,71	6,49
	0 Ang	-8,43°	-7,64°	-9,99°	-8,60°	-8,87°	17,01°	15,13°
	1 Mag	227,77	228,41	226,57	227,36	226,97	228,72	226,86
	1 Ang	-5,04°	-3,97°	-6,13°	-5,03°	-5,34°	-3,96°	-6,12°
	2 Mag	4,81	3,67	3,03	1,48	1,45	4,43	4,65
	2 Ang	-17,58°	-35,19°	-65,68°	-87,31°	-122,00°	-66,25°	-89,75°
Corrente (A)	FD (%)	2,11	1,61	1,34	0,65	0,64	1,94	2,05
	0 Mag	2,26	2,25	2,22	2,21	2,20	2,23	2,20
	0 Ang	82,33°	83,18°	80,84°	82,22°	81,95°	83,39°	81,05°
	1 Mag	6,38	5,03	7,77	6,39	6,78	5,03	7,76
	1 Ang	-10,64°	-10,20°	-12,37°	-11,79°	-12,38°	-10,50°	-12,61°
	2 Mag	1,50	1,15	0,95	0,46	0,45	0,85	0,59
Corrente (A)	2 Ang	73,38°	55,62°	25,21°	3,46°	-31,25°	65,31°	22,16°
	FD (%)	23,49	22,82	12,19	7,23	6,68	16,87	7,60
	0 Mag	2,26	2,25	2,22	2,21	2,20	2,23	2,20
Corrente (A)	1 Ang	82,34°	83,20°	80,85°	82,24°	81,97°	83,14°	81,06°
	2 FD (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

D.2.2 Medições laboratoriais

As Tabela D.8 e D.11 fornecem as variáveis no PAC para as distintas condições operativas investigadas.

Tabela D. 8 – Tensões e correntes no PAC com a carga resistiva desconectada – laboratorial.

Fase/Componente de sequência	Fonte equilibrada		Fonte desequilibrada	
	Tensões (V)	Correntes (A)	Tensões (V)	Correntes (A)
A	229,69∠110,57°	2,75∠35,65°	228,75∠1,64°	2,73∠-76,62°
B	228,80∠-9,35°	2,67∠-85,73°	225,20∠-118,58°	2,59∠167,26°
C	230,11∠-129,50°	2,67∠156,34°	235,99∠120,25°	2,84∠48,01°
0	0,44∠-166,29°	-	3,55∠98,24°	-
1	229,53∠110,57°	2,70∠35,42°	229,98∠1,43°	2,72∠-73,78°
2	0,41∠7,08°	0,06∠43,31°	2,83∠-105,23°	0,14∠-156,74°
FD (%)	0,18	2,08	1,23	5,21

Tabela D. 9 – Tensões e correntes no PAC com a carga resistiva desconectada e CM conectado – laboratorial.

Fase/Componente de sequência	Fonte equilibrada			Fonte desequilibrada		
	Tensões PAC (V)	Correntes PAC (A)	Corrente CM (A)	Tensões PAC (V)	Correntes PAC (A)	Corrente CM (A)
A	Mag	251,49	3,56	6,76	250,79	3,53
	Ang	-80,40°	0,16°	10,17°	86,68°	167,17°
B	Mag	226,46	2,49	-	225,73	2,49
	Ang	161,13°	77,97°	-	-31,71°	-114,66°
C	Mag	236,44	2,90	-	235,57	2,92
	Ang	44,34°	-25,84°	-	-152,56°	141,51°
0	Mag	7,69	2,26	2,25	7,78	2,26
	Ang	-69,97°	10,02°	10,17°	96,16°	177,17°
1	Mag	238,12	0,89	2,25	237,35	0,91
	Ang	-79,67°	-116,97°	10,17°	87,44°	49,91°
2	Mag	7,31	1,78	2,25	7,30	1,77
	Ang	-117,48°	13,38°	10,17°	49,25°	-179,26°
FD (%)	3,07	199,94	100	3,08	195,00	100

Tabela D. 10 – Tensões e correntes no PAC com a carga resistiva conectada – laboratorial.

Variável	Componente de sequência	Caso/Subcaso						
		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2
Tensão (V)	0	Mag	0,48	0,55	0,92	1,23	1,26	3,55
		Ang	30,85°	3,21°	27,79°	-176,02°	25,84°	-49,59°
	1	Mag	228,74	229,06	228,35	227,91	228,69	230,42
		Ang	-46,76°	-51,27°	-37,40°	136,33°	-23,37°	-145,30°
	2	Mag	1,19	2,89	4,71	6,58	7,67	4,94
		Ang	113,90°	156,88°	-178,96°	-20,85°	-179,90°	84,00°
	FD (%)	0,52	1,27	2,06	2,88	3,35	2,15	3,02
Corrente (A)	0	Mag	-	-	0,01	0,01	0,01	0,01
		Ang	-	-	44,96°	-108,33°	64,83°	-119,61°
	1	Mag	3,90	3,02	5,06	3,97	4,30	3,05
		Ang	-85,78°	-108,53°	-65,62°	96,97°	-59,19°	157,47°
	2	Mag	0,43	0,82	1,46	1,95	2,33	0,78
		Ang	-159,11°	-109,03°	-83,10°	78,22°	-82,01°	146,92°
	FD (%)	11,20	27,07	28,96	49,25	54,20	25,42	27,27

Tabela D. 11 – Tensões e correntes no PAC com a carga resistiva e CM conectados – laboratorial.

APÊNDICE E

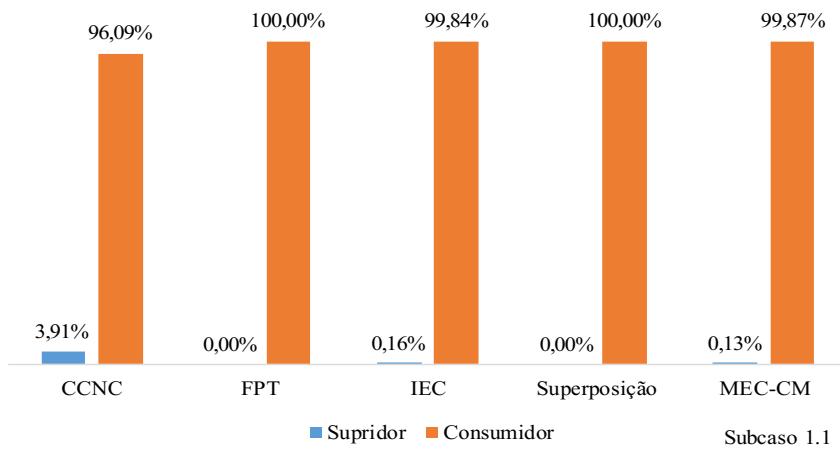
COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DAS METODOLOGIAS

Este apêndice é meramente dedicado à apresentação comparativa dos resultados fornecidos pelas metodologias avaliadas neste trabalho.

E.1 Resultados computacionais

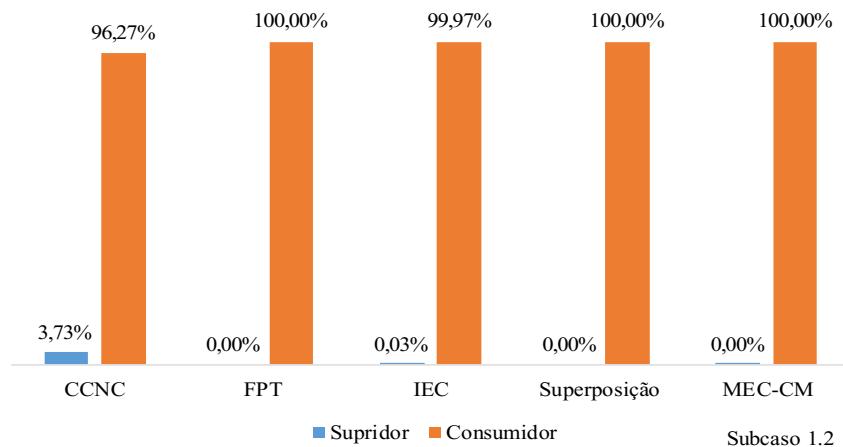
As Figuras E.5 a E.7 apresentam os gráficos comparativos contendo os resultados das metodologias para cada Caso/Subcaso avaliado.

Figura E. 1 – Comparação entre os resultados para o Subcaso 1.1 – computacional.



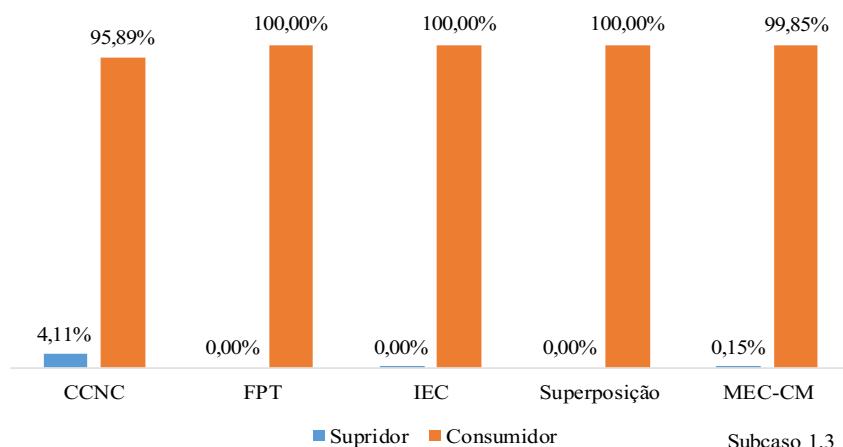
Fonte: Autoria própria.

Figura E. 2 – Comparação entre os resultados para o Subcaso 1.2 – computacional.



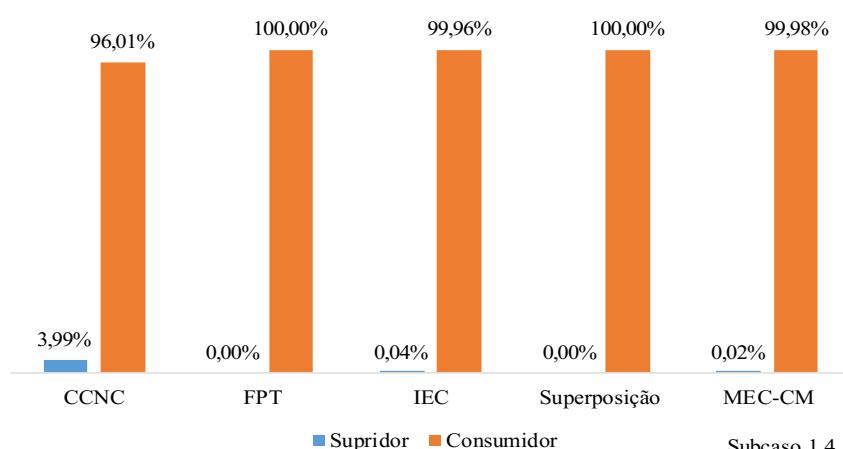
Fonte: Autoria própria.

Figura E. 3 – Comparação entre os resultados para o Subcaso 1.3 – computacional.



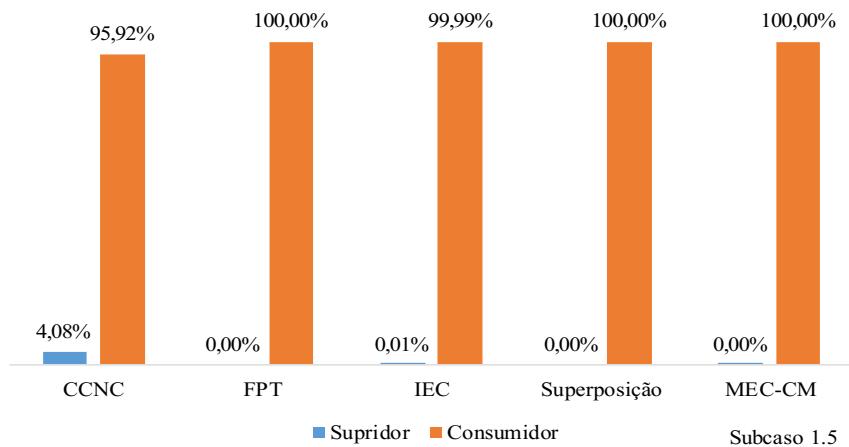
Fonte: Autoria própria.

Figura E. 4 – Comparação entre os resultados para o Subcaso 1.4 – computacional.



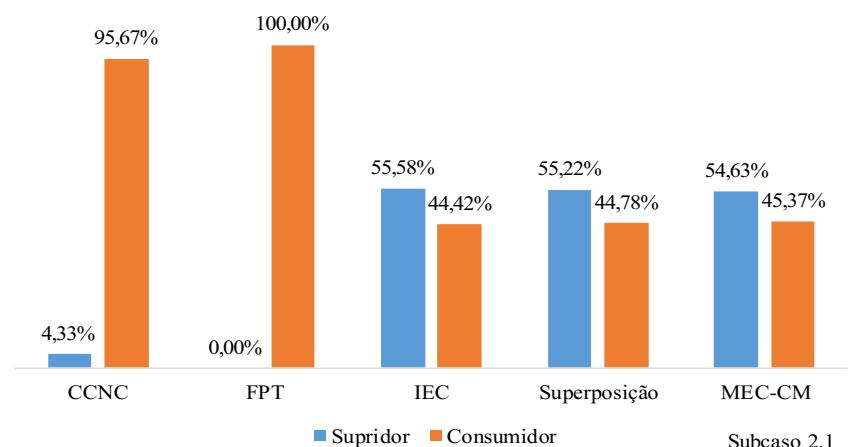
Fonte: Autoria própria.

Figura E. 5 – Comparação entre os resultados para o Subcaso 1.5 – computacional.



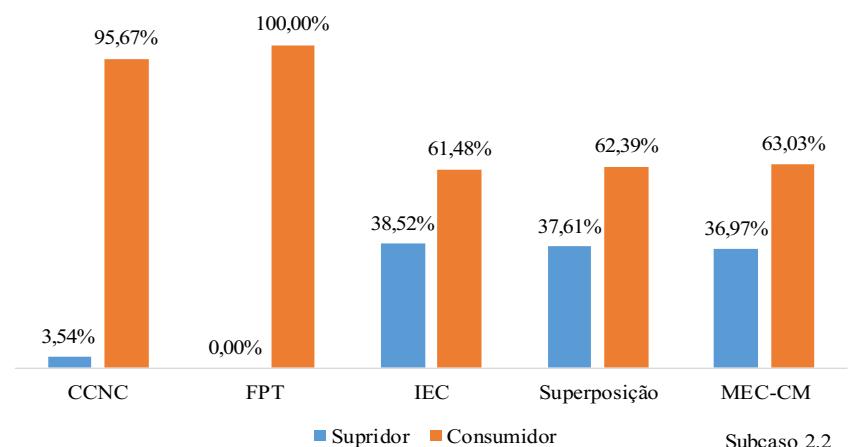
Fonte: Autoria própria.

Figura E. 6 – Comparação entre os resultados para o Subcaso 2.1 – computacional.



Fonte: Autoria própria.

Figura E. 7 – Comparação entre os resultados para o Subcaso 2.2 – computacional.

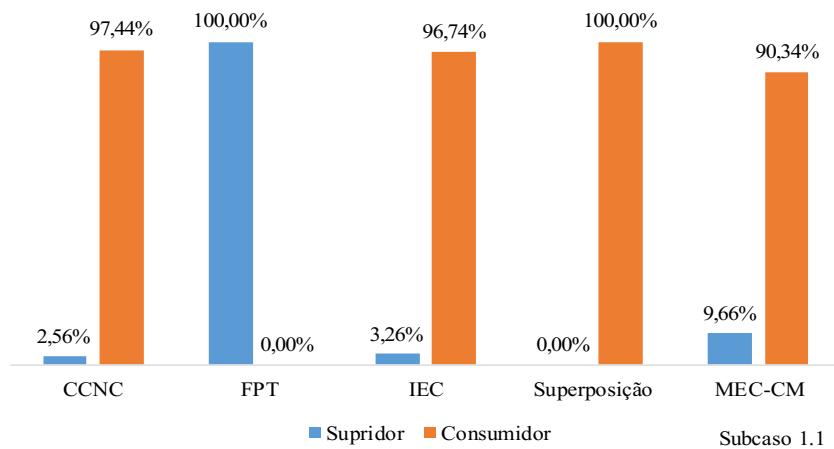


Fonte: Autoria própria.

E.2 Resultados laboratoriais

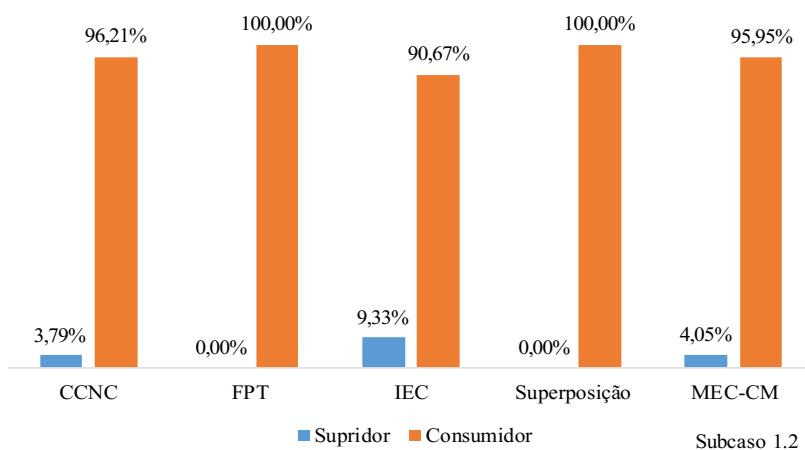
As Figuras E.8 a E.14 apresentam os resultados laboratoriais dos métodos para os casos investigados.

Figura E. 8 – Comparaçāo entre os resultados para o Subcaso 1.1 – laboratorial.



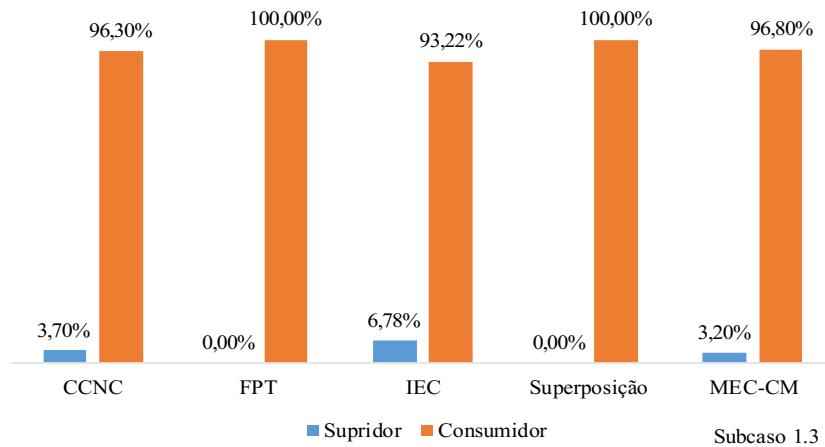
Fonte: Autoria própria.

Figura E. 9 – Comparaçāo entre os resultados para o Subcaso 1.2 – laboratorial.



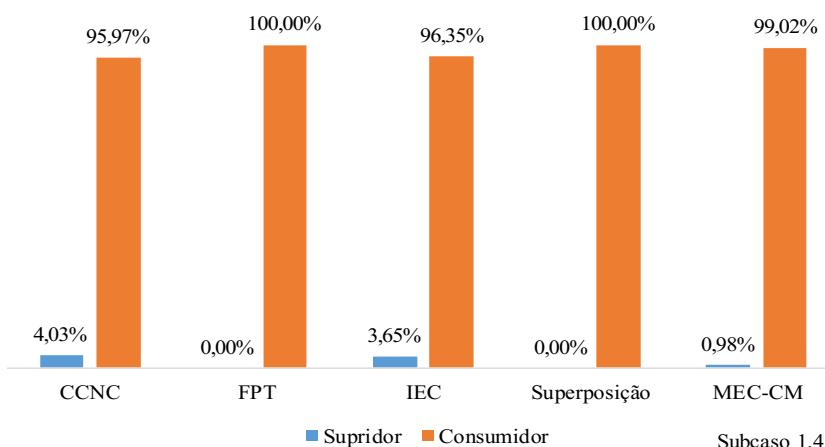
Fonte: Autoria própria.

Figura E. 10 – Comparaçao entre os resultados para o Subcaso 1.3 – laboratorial.



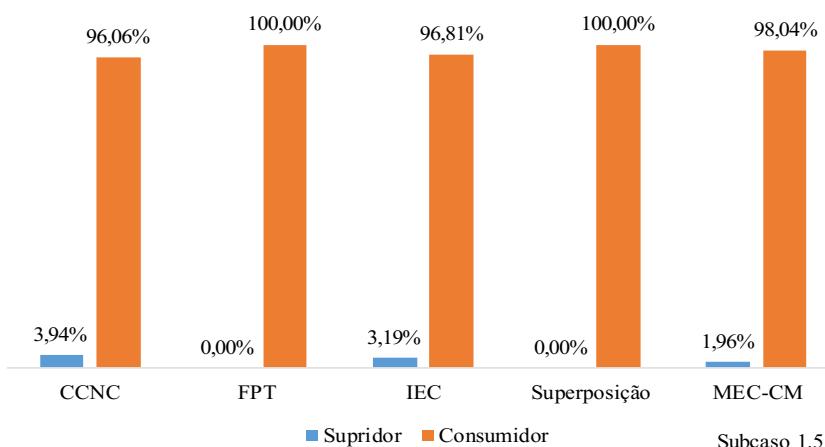
Fonte: Autoria própria.

Figura E. 11 – Comparaçao entre os resultados para o Subcaso 1.4 – laboratorial.



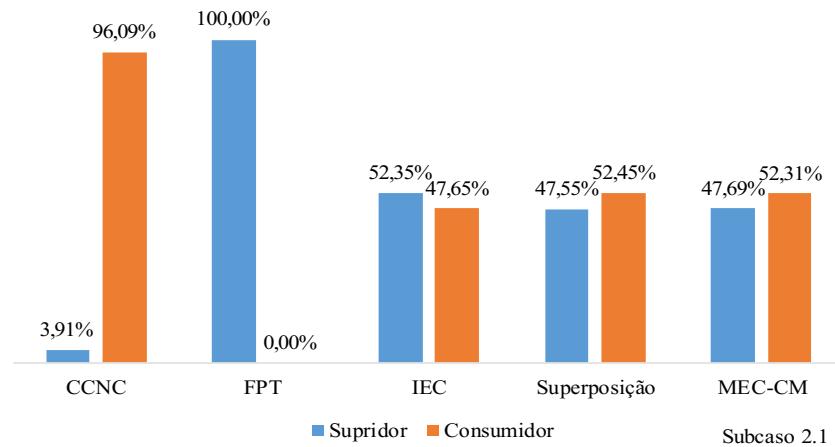
Fonte: Autoria própria.

Figura E. 12 – Comparaçao entre os resultados para o Subcaso 1.5 – laboratorial.



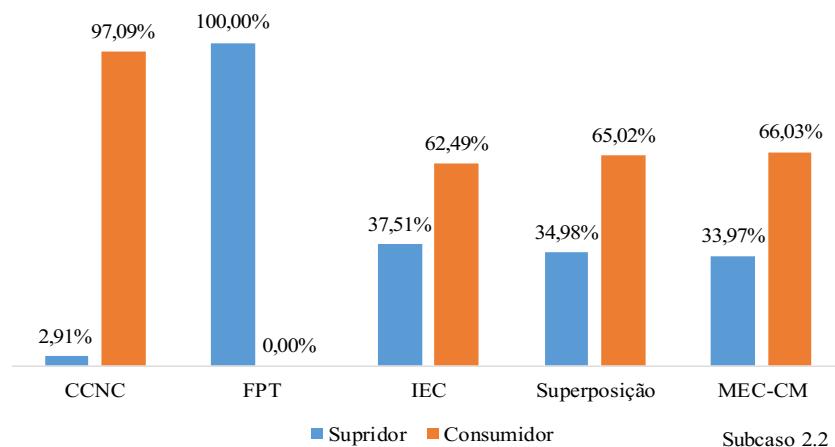
Fonte: Autoria própria.

Figura E. 13 – Comparaçāo entre os resultados para o Subcaso 2.1 – laboratorial.



Fonte: Autoria própria.

Figura E. 14 – Comparaçāo entre os resultados para o Subcaso 2.2 – laboratorial.



Fonte: Autoria própria.