

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS PARA
ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES DEVIDO AO
DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO**

LUÍS FERNANDO LACERDA ARÃO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS PARA
ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES DEVIDO AO
DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO**

LUÍS FERNANDO LACERDA ARÃO

ORIENTADOR: ANÉSIO DE LELES FERREIRA FILHO

COORIENTADOR: MARCUS VINÍCIUS BORGES MENDONÇA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: PPGEE.DM – 557/14

BRASÍLIA/DF: MARÇO – 2014

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS PARA
ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES DEVIDO AO
DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

LUÍS FERNANDO LACERDA ARÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

Anésio de Leles Ferreira Filho, Dr. (ENE-UnB)
(Orientador)

Prof. Marcus Vinícius Borges Mendonça, Dr. (UFTM)
(Co-orientador)

Prof. José Carlos de Oliveira, PhD (UFU)
(Examinador Externo)

Prof. Ivan Marques de Toledo Camargo, Dr. (ENE-UnB)
(Examinador Interno)

BRASÍLIA/DF, 25 DE MARÇO DE 2014.

FICHA CATALOGRÁFICA

ARÃO, LUIS FERNANDO LACERDA

Avaliação Comparativa entre Métodos para Atribuição de Responsabilidades Devido ao Desequilíbrio de Tensão [Distrito Federal] 2014.

xvii, 111p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Qualidade da Energia Elétrica

2. Desequilíbrio de Tensão

3. Compartilhamento de Responsabilidades

4. Origem do Desequilíbrio

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARÃO, L. F. L. (2014). Avaliação Comparativa entre Métodos para Atribuição de Responsabilidades Devido ao Desequilíbrio de Tensão. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEE.DM-557/14, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 111p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Luís Fernando Lacerda Arão.

TÍTULO: Avaliação Comparativa entre Métodos para Atribuição de Responsabilidades Devido ao Desequilíbrio de Tensão.

GRAU: Mestre

ANO: 2014

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Luís Fernando Lacerda Arão
SQS 106 C 105, Asa Sul.
70345-30 Brasília – DF – Brasil.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Meishu-Sama pela permissão de poder elaborar este trabalho.

Agradeço a meus pais, minha esposa e minha filha pelo apoio.

Agradeço ao professor Anésio e ao professor Marcus pelas orientações recebidas.

Agradeço a todos que de alguma forma colaboraram para este trabalho.

Dedico este trabalho à Kokoro e à Kaori.

RESUMO

AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS PARA ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES DEVIDO AO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Autor: Luís Fernando Lacerda Arão

Orientador: Anésio de Leles Ferreira Filho

Coorientador: Marcus Vinícius Borges Mendonça

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, março de 2014

No que diz respeito ao desequilíbrio de tensão, nota-se na literatura atinente, uma concentração de estudos, por parte dos pesquisadores, voltados à identificação de seus efeitos e no desenvolvimento de novas metodologias de quantificação. Já por parte das agências reguladoras e grupos de trabalho, há um interesse na elaboração de normas regulamentadoras e recomendações nacionais e internacionais, que estabelecem limites aceitáveis de desequilíbrio visando proteger os consumidores do caráter nocivo desse distúrbio. Entretanto, nenhum desses documentos entra no mérito da origem do desequilíbrio, que é assunto de interesse de agências reguladoras, concessionárias de energia e consumidores. Assim, uma vez identificada uma infração dos limites firmados e estabelecida a necessidade da implantação de uma sistemática de atenuação dos efeitos, emerge a questão da responsabilidade financeira vinculada ao processo a ser implementado, além da questão da aplicação de penalizações proporcionais aos limites transgredidos. Neste ínterim está situado o tema atribuição/compartilhamento de responsabilidades devido à presença de desequilíbrio de tensão, que é o foco desta dissertação. Considerando-se os aspectos ora mencionados, surgiu a ideia de desenvolvimento deste trabalho que objetiva apresentar os resultados de uma análise comparativa entre três métodos voltados à atribuição de responsabilidades do desequilíbrio de tensão na rede elétrica, a saber, os métodos da IEC, do fluxo de potência trifásico e da corrente conforme e não conforme. Para isso, foram efetuadas simulações computacionais e ensaios laboratoriais com base no emprego de um sistema composto por uma linha de transmissão nem sempre transposta e duas cargas nem sempre equilibradas conectadas a um barramento comum. Os casos selecionados para este estudo permitem a identificação das principais vantagens e limitações de cada método em avaliação.

ABSTRACT

A COMPARATIVE EVALUATION OF METHODS FOR ATTRIBUTING RESPONSABILITY DUE TO VOLTAGE UNBALANCE

Author: Luís Fernando Lacerda Arão

Advisor: Anésio de Leles Ferreira Filho

Co-advisor: Marcus Vinícius Borges Mendonça

Electrical Engineering Postgraduate Program

Brasília, March 2014

Regarding voltage unbalance, it can be noticed at the related bibliography, a study convergence, by part of researchers, which aims the identification of its effects and the development of new quantification methodologies. On the side of regulatory agencies and working groups, there is an interest to work out regulations and national and international recommendations, which establish acceptable unbalance limits aiming at the protection of customers that are threatened by this harmful disturb. However, none of these documents discusses about the unbalance origin, which is a stake of regulatory agencies, utilities and customers. Therefore, once identified a set limit transgression and established the systematics that allows the effects mitigation, raises the financial responsibility question linked to the processes to be implemented, and yet the proportional penalties imposition question. In the meantime lies the topic: responsibilities attribution/sharing due to voltage unbalance presence, which is the focus of this dissertation. Taking into account the mentioned aspects, arises the development idea of this work, which aims to present the results of a comparative analysis among three methods that are able to attribute responsibilities due to voltage unbalance on network. The three methods are: IEC, three-phase power flow, and conforming and non-conforming current. To accomplish that, computational simulations and laboratorial experiments were performed based on the use of a system composed by a not always transposed transmission line and two not always balanced loads connected to a common bus bar. The selected cases for this study allow the identification of the main advantages and limitations of each method in evaluation.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 - ESTADO DA ARTE	1
1.3 - OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	4
1.4 - CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO	4
1.5 - ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	5
2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	6
2.2 - DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	6
2.2.1 - Definição de desequilíbrio de tensão	6
2.2.2 - Causas do desequilíbrio de tensão	7
2.2.3 - Efeitos do desequilíbrio de tensão	7
2.2.4 - Métodos de cálculo do desequilíbrio de tensão	8
2.2.4.1 - Método CIGRÉ	8
2.2.4.2 - Método NEMA e ANSI	9
2.2.4.3 - Método IEEE	9
2.2.4.4 - Método das Componentes Simétricas	9
2.2.5 - Normas sobre desequilíbrio de tensão	11
2.2.5.1 - PRODIST	11
2.2.5.2 - Procedimentos de Rede	11
2.2.5.3 - IEEE 1159-2009	11
2.2.5.4 - IEC 61000-4-30 e IEC 1000-2-2	11
2.2.5.5 - ANSI	11
2.3 - MÉTODOS DE ANÁLISE DA ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES DEVIDO AO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	12
2.3.1 - Método da IEC	12
2.3.2 - Método do fluxo de potência trifásico	14
2.3.3 - Método da corrente conforme e não conforme	15
2.4 - POSSIBILIDADES DE ADEQUAÇÃO DE OUTROS ESTUDOS	17
2.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	19
3 - SISTEMA AVALIADO E INFRAESTRUTURA LABORATORIAL	20

3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	20
3.2 - PROCEDIMENTOS PARA AS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E OS ENSAIOS LABORATORIAIS	20
3.2.1 - Configurações dos sistemas	21
3.2.1.1 - Sistema computacional.....	21
3.2.1.2 - Sistema laboratorial	23
3.3 - APRESENTAÇÃO DOS PRINCIPAIS CASOS	25
3.3.1 - Casos computacionais	25
3.3.2 - Casos laboratoriais	26
3.4 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA A VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL	27
3.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	31
4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS COMPUTACIONAIS E LABORATORIAIS ...	32
4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	32
4.2 - ANÁLISE DOS CASOS COMPUTACIONAIS	32
4.2.1 - Caso 1 – Cargas equilibradas	32
4.2.2 - Caso 2 – Cargas com o mesmo desequilíbrio	34
4.2.3 - Caso 3 – Carga 1 equilibrada e carga 2 com variações incrementais....	35
4.2.4 - Caso 4 – Carga 1 com variações incrementais e carga 2 equilibrada....	38
4.2.5 - Caso 5 – Carga 1 com desequilíbrio fixo e carga 2 com variações incrementais	41
4.2.6 - Caso 6 – Carga 1 com variações incrementais e carga 2 com desequilíbrio fixo.....	46
4.3 - ANÁLISE DOS CASOS LABORATORIAIS.....	49
4.3.1 - Caso 1 – Cargas com desequilíbrios parecidos	49
4.3.2 - Caso 2 – Carga 1 com incremento no módulo da fase A e carga 2 aproximadamente equilibrada.....	51
4.3.3 - Caso 3 – Carga 1 com desequilíbrio fixo e carga 2 com incremento no módulo da fase A.....	53
4.4 - SÍNTESE DOS PRINCIPAIS RESULTADOS.....	55
4.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
5 - CONCLUSÕES	60

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
APÊNDICES	68
A - ADEQUAÇÃO DO SISTEMA DE 4 BARRAS DO IEEE AO LABORATÓRIO	69
B - RESULTADOS COMPUTACIONAIS DOS OUTROS CASOS	72
C - RESULTADOS LABORATORIAIS DOS OUTROS CASOS	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Impedâncias da carga equilibrada.	22
Tabela 3.2 - Impedâncias da carga desequilibrada com incremento de 10% no módulo da carga da fase A e decréscimo de 10% no módulo da fase C.	22
Tabela 3.3 - Impedâncias da carga 2 dos casos 4 e 2.	23
Tabela 3.4 - Impedâncias da carga 1 dos casos 1 e 3.	24
Tabela 3.5 - Impedâncias da carga 2 dos casos 1 e 6.	24
Tabela 3.6 - Impedâncias da carga 2 do caso 5.	24
Tabela 3.7 - Impedâncias da carga 1 do caso 2.	24
Tabela 3.8 - Impedâncias da carga 2 do caso 3.	25
Tabela 3.9 - Especificação dos casos computacionais.....	26
Tabela 3.10 - Especificação dos casos laboratoriais.....	27
Tabela 4.1 - Resultados do método da IEC.	32
Tabela 4.2 - Resultados do método do fluxo de potência trifásico.....	33
Tabela 4.3 - Resultados do método da corrente conforme e não conforme.	33
Tabela 4.4 - Resultados do método da IEC.	34
Tabela 4.5 - Resultados do método do fluxo de potência trifásico.....	34
Tabela 4.6 - Resultados do método da corrente conforme e não conforme.	34
Tabela 4.7 - Resultados do método da IEC.	50
Tabela 4.8 - Resultados do método do fluxo de potência trifásico.....	50
Tabela 4.9 - Resultados do método da corrente conforme e não conforme.	50
Tabela 4.10 - Resultados do método da IEC.	52
Tabela 4.11 - Resultados do método do fluxo de potência trifásico.....	52
Tabela 4.12 - Resultados do método da corrente conforme e não conforme.	52
Tabela 4.13 - Resultados do método da IEC.	54
Tabela 4.14 - Resultados do método do fluxo de potência trifásico.....	54
Tabela 4.15 - Resultados do método da corrente conforme e não conforme.	54
Tabela 4.16 - Resultados da comparação entre os métodos – simulações computacionais.	56
Tabela 4.17 - Resultados da comparação entre os métodos – ensaios laboratoriais.....	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação vetorial: (a) componentes do desequilíbrio no sistema; (b) projeção do desequilíbrio.	13
Figura 3.1 - Sistema utilizado nas simulações computacionais e laboratoriais.	21
Figura 3.2 - Esquema de conexão para a realização dos experimentos.	28
Figura 3.3 - Fonte trifásica programável e microcomputador de controle.	29
Figura 3.4 - Sistema elétrico.	30
Figura 4.1 - Resultados do método da IEC.	36
Figura 4.2 - Resultados do método do fluxo de potência trifásico.	36
Figura 4.3 - Resultados do método da corrente conforme e não conforme.	37
Figura 4.4 - Resultados do método da IEC.	39
Figura 4.5 - Resultados do método do fluxo de potência trifásico.	39
Figura 4.6 - Resultados do método da corrente conforme e não conforme.	40
Figura 4.7 - Resultados do método da IEC.	42
Figura 4.8 - Resultados do método do fluxo de potência trifásico.	43
Figura 4.9 - Resultados do método da corrente conforme e não conforme.	43
Figura 4.10 - Resultados do método da IEC.	46
Figura 4.11 - Resultados do método do fluxo de potência trifásico.	47
Figura 4.12 - Resultados do método da corrente conforme e não conforme.	47

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANSI – *American National Standards Institute*

CIGRÉ – *Conseil Internationale des Grands Réseaux Électriques*

CVUF – *Complex Voltage Unbalance Factor*

IEC – *International Electrotechnical Commission*

IEEE – *Institute of Electrical and Electronic Engineers*

IUF – *Current Unbalance Factor* (Fator de Desequilíbrio de Corrente)

LVUR – *Line Voltage Unbalanced Rate*

NEMA – *National Electrical Manufacturers Association*

ONS – Operador Nacional do Sistema

PAC – Ponto de Acoplamento Comum

POC – Ponto de Conexão

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

QEE – Qualidade da Energia Elétrica

RMS – *Root Mean Square* (Valor Eficaz)

VUF – *Voltage Unbalance Factor* (Fator de Desequilíbrio de Tensão) definido pelo Método das Componentes Simétricas

VUF_1 – *Voltage Unbalance Factor* definido pelo Método CIGRÉ

VUF_2 – *Voltage Unbalance Factor* definido pelo Método NEMA

α – Ângulo que permite a projeção do módulo do $\overline{VUF}_{pré}$ sobre módulo do $\overline{VUF}_{pós}$

β – Ângulo que permite a projeção do módulo do \overline{VUF}_{carga2} sobre módulo do $\overline{VUF}_{pós}$

β_1 – Operador matemático do Método CIGRÉ

γ – Ângulo que permite a projeção do módulo da $\bar{I}_{ncn\ carga1\ pós}$ sobre módulo da $\bar{I}_{ncn\ pós}$

δ – Ângulo que permite a projeção do módulo da $\bar{I}_{ncn\ carga2\ pós}$ sobre módulo da $\bar{I}_{ncn\ pós}$

$\Delta V_{linha,max}$ – Máxima diferença entre as tensões medidas e a média das tensões de linha ($V_{linha,médio}$)

θ_u – Ângulo de CVUF

θ_z – Ângulo de fase de sequência zero

θ_p – Ângulo de fase de sequência positiva

θ_n – Ângulo de fase de sequência negativa

a – Operador de *Fortescue*

\bar{I}_z – Fator da corrente de sequência zero

\bar{I}_p – Fator da corrente de sequência positiva

\bar{I}_n – Fator da corrente de sequência negativa

I_z – Módulo da corrente de sequência zero

I_p – Módulo da corrente de sequência positiva

I_n – Módulo da corrente de sequência negativa

\bar{I}_{cz} – Fator da corrente conforme de sequência zero

\bar{I}_{cp} – Fator da corrente conforme de sequência positiva

\bar{I}_{cn} – Fator da corrente conforme de sequência negativa

\bar{I}_{ncz} – Fator da corrente não conforme de sequência zero

\bar{I}_{ncp} – Fator da corrente não conforme de sequência positiva

\bar{I}_{ncn} – Fator da corrente não conforme de sequência negativa

$\bar{I}_{ncn\ carga1\ pós}$ – Fator da corrente não conforme de sequência negativa da carga 1 do sistema pós-conexão

$\bar{I}_{ncn\ carga2\ pós}$ – Fator da corrente não conforme de sequência negativa da carga 2 do sistema pós-conexão

$I_{ncn\ carga1\ pós}$ – Módulo da corrente não conforme de sequência negativa da carga 1 do sistema pós-conexão

$I_{ncn\ carga2\ pós}$ – Módulo da corrente não conforme de sequência negativa da carga 2 do sistema pós-conexão

$\bar{I}_{ncn\ pós}$ – Fator da corrente não conforme de sequência negativa do sistema pós-conexão

$I_{ncn\ pós}$ – Módulo da corrente não conforme de sequência negativa do sistema pós-conexão

$I_{ncn\ pré}$ – Módulo da corrente não conforme de sequência negativa do sistema pré-conexão

k_u – Módulo de CVUF

$pcI_{ncn\ carga1\ pós}$ – porcentagem da projeção da corrente não conforme de sequência negativa da carga 1 ($|\bar{I}_{ncn\ carga1\ pós}|$) sobre a corrente não conforme de sequência negativa da carga total ($|\bar{I}_{ncn\ pós}|$)

$pcI_{ncn\ carga2\ pós}$ – porcentagem da projeção da corrente não conforme de sequência negativa da carga 2 ($|\bar{I}_{ncn\ carga2\ pós}|$) sobre a corrente não conforme de sequência negativa da carga total ($|\bar{I}_{ncn\ pós}|$)

$pcP_{n\ carga1\ pós}$ – porcentagem da projeção da potência ativa de sequência negativa da carga 1 ($P_{n\ carga1\ pós}$) sobre a potência ativa de sequência negativa da carga total ($P_{n\ pós}$)

$pcP_{n\ carga2\ pós}$ – porcentagem da projeção da potência ativa de sequência negativa da carga 2 ($P_{n\ carga2\ pós}$) sobre a potência ativa de sequência negativa da carga total ($P_{n\ pós}$)

$pcVUF_{pré}$ – porcentagem da projeção do desequilíbrio da carga 1 ($|\overline{VUF}_{pré}|$) sobre o desequilíbrio da carga total ($|\overline{VUF}_{pós}|$)

$pcVUF_{carga2}$ – porcentagem da projeção do desequilíbrio da carga 2 ($|\overline{VUF}_{carga2}|$) sobre o desequilíbrio da carga total ($|\overline{VUF}_{pós}|$)

P – Potência ativa total

P_z – Potência ativa de sequência zero

P_p – Potência ativa de sequência positiva

P_n – Potência ativa de sequência negativa

$P_{n\ carga1\ pós}$ – Potência ativa de sequência negativa da carga 1 do sistema pós-conexão

$P_{n\ carga2\ pós}$ – Potência ativa de sequência negativa da carga 2 do sistema pós-conexão

$P_{n\ pós}$ – Potência ativa de sequência negativa do sistema pós-conexão

$P_{n\ pré}$ – Potência ativa de sequência negativa do sistema pré-conexão

R – Resistência

RL – Carga composta por resistor e indutor

\bar{V}_A – Fasor da tensão da fase A

\bar{V}_B – Fasor da tensão da fase B

\bar{V}_C – Fasor da tensão da fase C

V_A – Módulo da tensão da fase A

V_B – Módulo da tensão da fase B

V_C – Módulo da tensão da fase C

V_{ab} – Módulo da tensão trifásica entre as fases A e B

V_{bc} – Módulo da tensão trifásica entre as fases B e C

V_{ca} – Módulo da tensão trifásica entre as fases C e A

$V_{linha,médio}$ – Média das tensões de linha

\bar{V}_z – Fator da tensão de sequência zero

\bar{V}_p – Fator da tensão de sequência positiva

\bar{V}_n – Fator da tensão de sequência negativa

$\bar{V}_{n,i}$ – Fator da tensão de sequência negativa relativo à instalação (carga) conectada

V_z – Módulo da tensão de sequência zero

V_p – Módulo da tensão de sequência positiva

V_n – Módulo da tensão de sequência negativa

\overline{VUF}_{carga2} – Fator do desequilíbrio de tensão da carga 2 (conectada posteriormente)

$\overline{VUF}_{pós}$ – Fator do desequilíbrio de tensão do sistema pós-conexão

$\overline{VUF}_{pré}$ – Fator do desequilíbrio de tensão do sistema pré-conexão

VUF_{carga2} – Fator de desequilíbrio de tensão da carga 2 (conectada posteriormente)

$VUF_{pós}$ – Fator de desequilíbrio de tensão do sistema pós-conexão

$VUF_{pré}$ – Fator de desequilíbrio de tensão do sistema pré-conexão

X – Reatância

\bar{Z}_A – Impedância complexa da fase A

\bar{Z}_B – Impedância complexa da fase B

\bar{Z}_C – Impedância complexa da fase C

Z_A – Módulo da impedância complexa da fase A

Z_B – Módulo da impedância complexa da fase B

Z_C – Módulo da impedância complexa da fase C

$\bar{Z}_{abc}_{carga_{comp}}$ – Impedância complexa padrão de cada carga RL trifásica usada nas simulações computacionais

$Zabc_{linha_{comp}}$ – Matrix de impedância da linha trifásica usada nas simulações computacionais

$Zabc_{linha_{lab}}$ – Matrix de impedância da linha trifásica usada nos ensaios laboratoriais

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O termo Qualidade da Energia Elétrica (QEE) está vinculado a um conjunto de fatores capazes de afetar e(ou) comprometer o suprimento elétrico oferecido aos consumidores. A ocorrência dessas anomalias pode ser de natureza local – quando a perturbação ocorre dentro da instalação do consumidor – ou de natureza externa ou remota. Nos últimos anos, várias pesquisas vêm sendo conduzidas com o intuito de conhecer, assegurar ou mesmo melhorar os padrões de qualidade requeridos ao bom funcionamento dos sistemas elétricos. Esses fatos contribuem para a destacada importância com a qual o assunto em questão tem sido discutido, não apenas pelas instituições de pesquisa e concessionárias de energia, mas também pelos consumidores finais (industriais, comerciais e residenciais) (Souto, 2001).

Dos problemas associados a uma rede cuja alimentação possui qualidade comprometida, pode-se citar o desequilíbrio de tensão. Esse fenômeno ocorre quando em sistemas trifásicos as tensões nas três fases não possuem a mesma amplitude (valor eficaz) e(ou) não estão defasadas entre si de 120° elétricos.

Hoje, sabe-se que a presença de altos níveis de desequilíbrio provoca, dentre outros problemas, perdas excessivas, sobreaquecimento, solicitação do isolamento e redução da vida útil de motores e transformadores, e o acionamento indevido dos seus sistemas de proteção, levando à parada dos processos de produção. Ademais, sob tais condições, pode ocorrer a circulação de correntes harmônicas não características, tornando ainda mais árdua a tentativa de mitigação dos seus efeitos (Ferreira Filho, 2008).

Atualmente, diversos especialistas vêm desenvolvendo estudos vinculados ao tema desequilíbrio de tensão. Dessas pesquisas, muitas são destinadas à determinação de índices de quantificação do desequilíbrio, que expressem adequadamente os possíveis efeitos causados por uma rede com tensões desequilibradas. Em outra frente de trabalho, pode-se afirmar que inúmeros trabalhos investigam as alterações causadas no comportamento de equipamentos submetidos a uma alimentação não equilibrada (Dugan *et al.*, 2003). Entretanto, ainda é incipiente o número de investigações que apresentam informações a respeito da identificação da origem do desequilíbrio e de como ele se propaga no sistema elétrico.

Nesse contexto, diante do crescente interesse em se conhecer quem – entre concessionária e consumidor – é o principal responsável pelo desequilíbrio de tensão em um determinado barramento, e em que direção esse fenômeno se propaga, propõe-se, no presente trabalho, uma avaliação comparativa entre alguns métodos dedicados a estas ações.

1.2 – ESTADO DA ARTE

Conforme mencionado anteriormente, o tema compartilhamento de responsabilidades e identificação da origem do desequilíbrio de tensão possui um número incipiente de trabalhos na literatura atinente. A leitura das bibliografias identificadas sobre este assunto

conduz à conclusão de que apenas as referências Seiphetlho & Rens (2010), Seiphetlho & Rens (2011) e Hanzelka & Varetsky (2011) tratam especificamente desses tópicos. A seguir, serão expostos os principais resultados desta leitura.

A referência IEC/TR 61000-3-13 (2008) indica uma maneira de identificar o desequilíbrio de uma instalação recém conectada a um sistema. Os autores desse relatório técnico fizeram uso de um sistema linear simples com o propósito de atestar essa metodologia.

Em CIGRÉ-CIRED (2011), é apresentado um método derivado do método da IEC, que sugere uma forma de atribuir a parcela de responsabilidade da linha e da carga para o desequilíbrio total. Os autores desse grupo de trabalho utilizaram um sistema radial complexo com o objetivo de justificar a parte matemática e a fundamentação teórica do método.

A referência Seiphetlho & Rens (2010) propõe um método baseado no fluxo de energia ativa e reativa das componentes de sequência na frequência fundamental. Segundo o autor, tal método é capaz de identificar a contribuição do desequilíbrio de tensão proveniente de uma única carga ou fonte em um ponto de acoplamento comum (PAC). Ele concluiu, com base num sistema radial simples, que a propagação do desequilíbrio de tensão está relacionada com a direção da potência ativa de sequência negativa. Ao aplicar o método do fluxo de potência trifásico no mencionado sistema, comprovou-se que o método não serve para imputar a responsabilidade entre o supridor e o consumidor, mas somente para detectar a fonte preponderante de desequilíbrio.

No trabalho apresentado em Hanzelka & Varetsky (2011), o autor sugere que o sinal da potência ativa de sequência negativa pode ser aceito como um índice para a identificação da fonte do desequilíbrio de um sistema. Inicialmente, ele efetuou medições somente em uma carga nem sempre equilibrada que pertence a um sistema simples, composto por uma fonte nem sempre ideal e uma linha nem sempre transposta. Em seguida, ele fez medições em um barramento e também em uma das cargas que constituem um sistema de distribuição. Este sistema é composto por uma fonte ideal ligada ao mencionado barramento, de onde derivam dois diferentes circuitos, que são formados por uma linha, um transformador e uma carga. Com isso, o autor concluiu que o sinal positivo da potência ativa de sequência negativa indica – no ponto de medição – o sistema como a fonte de assimetria. Já o sinal negativo dessa potência aponta a carga como a fonte de assimetria.

A referência Seiphetlho & Rens (2011) investiga a medição e a propagação do desequilíbrio de tensão em um transformador de distribuição com o objetivo de se analisar o quanto de desequilíbrio é atribuído – em uma interconexão – à carga e à concessionária. O autor apurou a afinidade existente entre o fator de desequilíbrio de tensão (VUF) e o fator de desequilíbrio de corrente (IUF), com relação à direção da potência ativa de sequência negativa. Ele comprovou que o método do fluxo de potência trifásico apresenta uma certa fragilidade, pois foi demonstrado que não há um relacionamento claro entre a direção da potência ativa de sequência negativa e a magnitude do VUF e do IUF. Além disso, constatou-se que pelo fato de um sistema elétrico real conter mais variáveis desconhecidas do que conhecidas, a direção da potência ativa de sequência negativa não

será sempre igual à fonte dominante de desequilíbrio. O autor concluiu também que um sistema elétrico que possui duas fontes de desequilíbrio (uma a montante e outra a jusante), necessita de medições em ambas as barras se a análise na interconexão investigada for baseada na direção da potência ativa de sequência negativa.

A referência Srinivasan & Jutras (1998) apresenta um conceito que possibilita dividir a responsabilidade entre a concessionária e o consumidor quando há no sistema elétrico, flutuações RMS (de valor eficaz), distorções harmônicas ou desequilíbrio trifásico. Ele é fundamentado no método da corrente conforme e não conforme. O autor comprovou a aplicabilidade desse método para os três distúrbios citados ao utilizá-lo em algumas simulações computacionais.

Woolley & Milanovic (2010) apresentou um estudo em fase inicial de desenvolvimento que estima o fator de desequilíbrio de tensão em qualquer barra de uma rede utilizando o cálculo de estado do sistema de distribuição. De acordo com o autor, essa metodologia também é capaz de conduzir à identificação das fontes do desequilíbrio de tensão dentro da rede. Entretanto, a pesquisa bibliográfica revelou que, até o momento, não há estudos de casos, aplicações da metodologia, nem conclusões relacionadas à aplicação deste novo fator de desequilíbrio.

Em Liu & Milanovic (2012), é proposto um método para a estimação estatística (probabilística) da propagação do desequilíbrio em redes de distribuição que possuem cargas assimétricas. O fluxo de carga do método de Newton-Rapson trifásico é empregado para se obter em tempo real parâmetros do fluxo de carga e das componentes simétricas significativas que possibilitam a dedução do nível do desequilíbrio de tensão. Utilizando-se cargas assimétricas especificadas e cargas assimétricas normalmente distribuídas, indica-se uma possível faixa do nível do desequilíbrio de tensão em uma barra selecionada de uma rede elétrica simples. O autor concluiu que: (a) a utilização das componentes simétricas e do fluxo de cargas trifásicas facilitam os estudos de propagação do desequilíbrio de tensão em sistemas elétricos; e (b) com o uso da abordagem probabilística para modelar incertezas do VUF na sua origem, podem ser obtidos resultados mais realistas sobre o nível de desequilíbrio ao longo da rede.

Em Chindris *et al.* (2007) é apresentada uma análise da influência dos tipos de conexão e dos núcleos magnéticos na propagação de desequilíbrio de tensão através dos transformadores. O autor depreendeu que existem transformadores através dos quais o desequilíbrio se propaga sem alteração, e que também há transformadores que reduzem o fator de desequilíbrio.

Kolagar *et al.* (2012) mostra que o tipo de conexão do transformador trifásico pode influenciar a propagação do desequilíbrio em redes de distribuição. O autor demonstrou que, na presença de cargas desequilibradas, conexões estrela/estrela e delta/estrela (com o fio do neutro no secundário) têm a maior propagação de desequilíbrio de tensão e de corrente. Além disso, o autor comprovou que em transformadores elevadores, aumentando-se a tensão de linha no secundário sem carga, o valor do VUF cresce no início (até aproximadamente um quarto da tensão de linha final) e depois decresce; e nos

transformadores abaixadores, aumentando-se a tensão de linha no secundário sem carga, o valor do VUF diminui uniformemente.

Diante da exposição destes trabalhos e das análises efetuadas, verifica-se que os estudos realizados carecem de uma detalhada avaliação de desempenho entre os métodos utilizados para identificar a parcela de responsabilidade de cada carga ou a instalação que mais contribui para o desequilíbrio de tensão provocado em um barramento.

1.3 – OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Nos diversos estudos consultados, identificam-se seis diferentes métodos para a atribuição das responsabilidades do desequilíbrio de tensão, a saber, os métodos da IEC, do CIGRÉ, do fluxo de potência trifásico, da corrente conforme e não conforme, do cálculo de estado do sistema, e da estimação estatística da propagação do desequilíbrio. Observa-se que os dois últimos métodos citados não foram utilizados com o objetivo de atribuir responsabilidades. Eles foram apenas citados pelos seus autores como sendo capazes de realizar tal fato. Assim, nesta dissertação, são selecionados para investigações mais detalhadas os métodos da IEC, do fluxo de potência trifásico, e da corrente conforme e não conforme, que já foram utilizados em outras pesquisas com propósito de atribuir responsabilidades, muito embora as eficácias desses métodos não tenham sido conclusivas.

Portanto, com base nos aspectos ora mencionados, nasceu a ideia de desenvolvimento deste trabalho que objetiva, em linhas gerais, apresentar os resultados de uma análise comparativa entre os métodos da IEC, do fluxo de potência trifásico, e da corrente conforme e não conforme voltados à atribuição de responsabilidades do desequilíbrio de tensão na rede elétrica. São metas deste estudo:

- Desenvolver códigos computacionais que viabilizam a aplicação dos mencionados métodos.
- Elaborar casos que possibilitam a avaliação em detalhes dos métodos em estudo, com base em simulações computacionais e ensaios laboratoriais. Para isso, serão empregados sistemas elétricos que possuem mais de uma carga nem sempre equilibrada.
- Apresentar os resultados da avaliação comparativa entre os três métodos selecionados para este trabalho para a atribuição de responsabilidades em sistemas com mais de uma fonte de desequilíbrio.
- Identificar o método que apresenta o melhor desempenho quando da atribuição da parcela de responsabilidade devido ao desequilíbrio de tensão.

1.4 – CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

Como principais contribuições, podem-se destacar:

- Avaliação do desempenho dos três principais métodos hoje disponíveis na literatura atinente, que buscam imputar a responsabilidade aos diversos componentes do sistema elétrico decorrente da presença do desequilíbrio de tensão.

- Identificação do método que melhor atribui a parcela de responsabilidade devido ao desequilíbrio de tensão, com base em simulações computacionais e em ensaios laboratoriais.

1.5 – ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A composição do presente trabalho é descrita a seguir.

No Capítulo 2, apresenta-se um resumo dos principais fundamentos associados ao desequilíbrio de tensão, evidenciando-se com maior propriedade sua conceituação, suas causas e seus efeitos no comportamento de diferentes equipamentos que compõem o sistema elétrico. Exibem-se também os cálculos envolvidos na quantificação desse fenômeno e algumas normas regulamentadoras sobre o desequilíbrio de tensão. Em seguida, caracterizam-se os métodos que possibilitam a atribuição/compartilhamento de responsabilidades devido à presença de desequilíbrio de tensão. Por fim, mencionam-se estudos referentes à atribuição de responsabilidades sobre as distorções harmônicas, visando uma adaptação ao caso do desequilíbrio de tensão.

No Capítulo 3, expõem-se os materiais e métodos adotados para se concretizar os objetivos desta dissertação. As ações e os materiais que viabilizam a obtenção dos resultados computacionais e laboratoriais são também listados e justificados.

No Capítulo 4, apresentam-se os resultados de 6 simulações computacionais e de 3 ensaios laboratoriais selecionadas para a avaliação dos métodos de compartilhamento/atribuição de responsabilidades devido à presença do desequilíbrio de tensão. Após as análises desses casos (simulações), evidenciam-se as limitações da utilização dos métodos.

No Capítulo 5, expõem-se as conclusões gerais da dissertação. Ademais, com base nas análises até então efetuadas, elaboram-se sugestões para trabalhos futuros que proverão a continuidade a esta pesquisa.

2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, são apresentados os principais tópicos relacionados ao termo desequilíbrio de tensão, quais sejam: sua conceituação, suas causas, seus efeitos nos equipamentos da rede elétrica, os métodos de cálculo para sua quantificação, e as normas regulamentadoras que versam sobre seus limites.

Também são descritos os métodos da IEC, do fluxo de potência trifásico e da corrente conforme e não conforme que permitem a atribuição (ou o compartilhamento) de responsabilidades devido à presença de desequilíbrio de tensão. De maneira a complementar esses métodos, é sugerido um procedimento capaz de atribuir um valor percentual as parcelas de responsabilidades.

São ainda mencionados estudos referentes à atribuição de responsabilidades sobre as distorções harmônicas, visando uma adaptação deste estudo ao caso do desequilíbrio de tensão.

2.2 – DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Neste item, apresentam-se os conceitos, as causas, os efeitos, os métodos de cálculo e as normas voltadas para o desequilíbrio de tensão, além de outras discussões a cerca desse tema.

2.2.1 – Definição de desequilíbrio de tensão

Em um sistema trifásico ideal, as tensões nas três fases possuem a mesma amplitude e estão defasadas entre si de 120° elétricos. Dessa forma, um sistema equilibrado, com sequência de fases direta (sequência ABC), é representado conforme as equações (2.1) a (2.3).

$$\bar{V}_A = V_A \angle 0^\circ \quad (2.1)$$

$$\bar{V}_B = V_B \angle -120^\circ \quad (2.2)$$

$$\bar{V}_C = V_C \angle 120^\circ \quad (2.3)$$

Onde:

- \bar{V}_A , \bar{V}_B e \bar{V}_C são os fasores de tensão das fases A, B e C, respectivamente;
- V_A , V_B e V_C são os módulos das tensões das fases A, B e C, respectivamente.

Assim, o desequilíbrio de tensão em um sistema elétrico trifásico ocorre quando as fases apresentam tensões com módulos diferentes entre si, ou defasagem angular entre as fases diferentes de 120° ou, ainda, as duas condições simultaneamente.

2.2.2 – Causas do desequilíbrio de tensão

O desequilíbrio de tensão possui basicamente dois tipos de origem, a saber: (a) uma relacionada à estrutura da rede elétrica; e (b) outra relacionada à carga (Matos, 2012).

O primeiro tipo de desequilíbrio origina-se da assimetria da rede elétrica no nível de transmissão e de distribuição. Em decorrência da pequena variação dos parâmetros da rede elétrica, esse tipo de causa é praticamente constante. Podem-se listar as seguintes causas desse padrão:

- Linhas de distribuição extensas, essencialmente na distribuição rural;
- Impedâncias assimétricas de transformadores e de linhas de transmissão;
- Transposição incompleta de linhas de transmissão;
- Bancos de capacitores deteriorados e(ou) fusíveis de proteção rompidos;
- Presença de interrupções, afundamentos, subtensões, sobretensões, transitórios, etc.

O outro perfil de desequilíbrio relaciona-se a natureza da carga, e, portanto, depende das características operacionais do próprio consumidor. Esse tipo de causa corresponde aos maiores responsáveis pelo comprometimento da rede elétrica em função do desequilíbrio de tensão. Podem-se elencar as seguintes causas desse gênero:

- Distribuição irregular de cargas monofásicas entre as fases. Ademais, deve-se considerar a dinâmica no processo de conexão e o desligamento de elementos na rede;
- Numerosos conjuntos de usuários urbanos, com extenso volume de cargas monofásicas;
- Motores elétricos com impedâncias desequilibradas;
- Emprego de controladores de velocidade da carga;
- Níveis divergentes de distorção harmônica nas fases do sistema elétrico;
- Variação nos ciclos de demanda de cada fase;
- Cargas não lineares;
- Fornos a arco;
- Fraudes, etc.

2.2.3 – Efeitos do desequilíbrio de tensão

A presença de tensões desequilibradas nas redes elétricas é um dos mais habituais itens de comprometimento do suprimento elétrico. Seus efeitos nos diversos equipamentos elétricos são considerados nocivos, uma vez que, um pequeno desequilíbrio nas tensões de alimentação resulta num elevado nível de desequilíbrio nas correntes absorvidas e, conseqüentemente, ocasiona o sobreaquecimento (Ferreira Filho, 2008).

Os efeitos mais frequentemente observados em equipamentos do sistema elétrico submetido a desequilíbrio de tensão são:

- Surgimento de correntes de sequência negativa, as quais são as principais causadoras de conjugados amortecedores e sobreaquecimento adicional nas máquinas rotativas em corrente alternada síncronas e assíncronas;
- Sobreaquecimento nos condutores acarretando uma maior solitação do isolante, o que implica na diminuição da vida útil e no aumento das perdas;
- Mau funcionamento, sobreaquecimentos e falhas dos dispositivos de proteção com redução da vida útil;
- Manifestação de harmônicas não características devido a disparos desiguais nos dispositivos eletrônicos que fazem o acionamento e controle de equipamentos e cargas;
- Desbalanço das correntes absorvidas pelos motores de indução e cabos isolados ocasionando sobreaquecimento e diminuição da vida útil.

2.2.4 – Métodos de cálculo do desequilíbrio de tensão

Na literatura atinente, existem diversas metodologias para a obtenção do fator de desequilíbrio de tensão. Os índices definidos por essas metodologias objetivam traduzir o desequilíbrio de tensão ao qual a rede elétrica é submetida, de forma a permitir a análise do fenômeno. Alguns desses métodos envolvem os módulos e os ângulos das tensões para a determinação do índice. Todavia, em virtude de alguns medidores não serem capazes de medir o defasamento angular das tensões, também existem métodos que consideram apenas os módulos das tensões em seus cálculos.

Descrevem-se a seguir as etapas para determinação dos índices de desequilíbrios de cada um dos principais métodos utilizados atualmente.

2.2.4.1 – Método CIGRÉ

O método CIGRÉ, proposto pelo *Conseil International des Grands Réseaux Electriques* (CIGRÉ), é empregado nos casos em que os aparelhos de medição realizam leituras apenas dos módulos das tensões (tensão eficaz). O índice desse método é intitulado *Voltage Unbalance Factor* (VUF_1) e é definido conforme as equações (2.4) e (2.5) (ANEEL, 2000).

$$VUF_1 \% = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta_1}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta_1}}} \cdot 100 \quad (2.4)$$

$$\beta_1 = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2} \quad (2.5)$$

Onde:

- V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} são os módulos das tensões trifásicas.

Como o método CIGRÉ considera apenas os módulos das tensões medidas, o resultado obtido é um valor escalar. Ressalta-se que as equações (2.4) e (2.5) são válidas apenas para tensões de linha e se a componente de sequência zero do sistema for nula (IEEE 1159,

2009). Ressalta-se que o método CIGRÉ é considerado equivalente ao método das componentes simétricas, pois ambos retornam o mesmo valor de VUF.

2.2.4.2 – Método NEMA e ANSI

Segundo a *American National Standards Institute* (ANSI) e a *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA), VUF_2 – também chamado de *Line Voltage Unbalanced Rate* (LVUR) – é definido conforme a equação (2.6) (Oliveira, 2012).

$$VUF_2\% = \frac{\Delta V_{linha,max}}{V_{linha,médio}} \cdot 100 \quad (2.6)$$

Onde:

- $\Delta V_{linha,max}$ é a máxima diferença entre as tensões medidas e $V_{linha,médio}$;
- $V_{linha,médio}$ é a média das tensões de linha.

Ressalta-se que nesse método aplicam-se apenas as tensões de linha. Segundo IEEE 1159 (2009), os resultados dessa definição se aproximam daqueles fornecidos pelo método das componentes simétricas se este utilizar tensões de linha, se o conteúdo harmônico do sinal for baixo e se a componente de sequência zero for pequena.

2.2.4.3 – Método IEEE

Nos últimos anos, o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) tem publicado diferentes trabalhos e normas sobre o desequilíbrio de tensão. Consequentemente, o método de cálculo considerado por essa instituição sofreu modificações nesse período. Atualmente, o IEEE recomenda o método das componentes simétricas para o cálculo do VUF, sugerindo como alternativa o método CIGRÉ (IEEE 1159, 2009).

2.2.4.4 – Método das Componentes Simétricas

O método das Componentes Simétricas (Fortescue, 1918) baseia-se na decomposição do sistema trifásico desequilibrado em três sistemas simétricos e equilibrados, sendo eles:

- Um sistema de fasores na mesma sequência de fases do sistema desequilibrado original, denominado sistema de sequência positiva (ou sistema de sequência direta);
- Um sistema de fasores na sequência de fases inversa ao sistema de fases do sistema desequilibrado original, denominado sistema de sequência negativa (ou sistema de sequência inversa);
- Um sistema de fasores paralelos, denominado sistema de sequência zero.

Analiticamente, definem-se as componentes simétricas por meio da Matriz de Fortescue, apresentada na equação (2.7).

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_A \\ \bar{V}_B \\ \bar{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_z \\ \bar{V}_p \\ \bar{V}_n \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Onde:

- a é o operador rotacional, cujo módulo é 1 e o ângulo 120° ;
- \bar{V}_z , \bar{V}_p e \bar{V}_n são os fasores de tensão das sequências zero, positiva e negativa, respectivamente.

Esse método pode ser aplicado tanto para tensões de linha quanto para tensões de fase, e seu índice é definido pela razão entre os módulos das tensões de sequência negativa e positiva, conforme as equações (2.8), (2.9) e (2.10), respectivamente.

$$VUF\% = \frac{V_n}{V_p} \cdot 100 \quad (2.8)$$

$$\bar{V}_n = \frac{1}{3}(\bar{V}_A + a^2\bar{V}_B + a\bar{V}_C) \quad (2.9)$$

$$\bar{V}_p = \frac{1}{3}(\bar{V}_A + a\bar{V}_B + a^2\bar{V}_C) \quad (2.10)$$

Onde:

- V_n é o módulo da tensão de sequência negativa;
- V_p é o módulo da tensão de sequência positiva.

Segundo ANEEL (2000), dos métodos de quantificação, o índice VUF é o que melhor representa o grau de desequilíbrio em virtude da abordagem simultânea das amplitudes e dos ângulos das tensões. Destaca-se que a razão entre os fasores de componente negativa e positiva resulta em um índice complexo – *Complex Voltage Unbalance Factor (CVUF)* –, descrito consoante (2.11).

$$CVUF\% = \frac{\bar{V}_n}{\bar{V}_p} \cdot 100 = k_u \angle \theta_u \quad (2.11)$$

Onde:

- k_u é o parâmetro que descreve o módulo de CVUF (nota-se que $k_u = VUF\%$);
- θ_u é o parâmetro que descreve o ângulo de CVUF.

O ângulo desse fator complexo, embora não seja citado nas normas e recomendações que versam sobre o desequilíbrio, tem sido objeto de algumas investigações para avaliação da sua aplicabilidade nas metodologias de quantificação do referido fenômeno (Ferreira Filho, 2008). Ressalta-se que o índice CVUF pode ser empregado para tensões de linha e de fase. Entretanto, para tensões de fase, o índice está adiantado em 60° com relação ao fasor de CVUF de linha (Almeida, 2013).

2.2.5 – Normas sobre desequilíbrio de tensão

Neste item, são descritas as principais normas nacionais e internacionais que discorrem sobre a quantificação do desequilíbrio de tensão.

2.2.5.1 – PRODIST

O Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (ANEEL PRODIST, 2012), elaborado pela ANEEL, define o fator de desequilíbrio conforme o método das componentes simétricas ou o método CIGRÉ. Segundo esse documento, para eliminar os possíveis efeitos das componentes de sequência zero, é necessário realizar medições considerando as tensões de linha. Ademais, essa norma estabelece que o valor de VUF nos barramentos do sistema de distribuição, com exceção da baixa tensão, deve ser igual ou inferior a 2%.

2.2.5.2 – Procedimentos de Rede

Os Procedimentos de Rede (ONS 2.8, 2011), elaborados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), estabelecem o cálculo de VUF por meio do método das componentes simétricas. De acordo com esse documento, o limite global nos barramentos da rede básica e nos transformadores de fronteira é de 2%, enquanto o limite individual nos pontos de conexão à rede básica ou aos barramentos dos transformadores de fronteira é de 1,5%.

2.2.5.3 – IEEE 1159-2009

Segundo a norma IEEE 1159 (2009), o fator de desequilíbrio deve ser calculado baseado no método das componentes simétricas ou no método CIGRÉ. O limite aceito para o índice de desequilíbrio é de 2%, sendo desejável um valor menor que 1%.

2.2.5.4 – IEC 61000-4-30 e IEC 1000-2-2

A *International Electrotechnical Commission* (IEC) é uma instituição de renome na preparação e publicação de normas internacionais para as tecnologias elétricas e eletrônicas. Baseado na norma IEC (2008), deve-se priorizar o emprego dos métodos de cálculo das componentes simétricas ou do método CIGRÉ. Recomenda-se que em sistemas de baixa tensão o VUF não ultrapasse o limite de 2% (IEC, 1990). Em alguns casos, valores elevados podem ocorrer durante períodos limitados, por exemplo, durante um curto-circuito.

2.2.5.5 – ANSI

Segundo a norma ANSI (1995), recomenda-se que os sistemas elétricos sejam projetados e operados de modo a limitar o máximo desequilíbrio de tensão em 3%, sob condições a vazio.

2.3 – MÉTODOS DE ANÁLISE DA ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES DEVIDO AO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

A seguir, são apresentados os três métodos empregados neste trabalho para as análises da atribuição de responsabilidades devido ao desequilíbrio de tensão, a saber, o método da IEC, o método do fluxo de potência trifásico, e o método da corrente conforme e não conforme.

2.3.1 – Método da IEC

O método da IEC (IEC/TR 61000-3-13, 2008) possibilita identificar o nível de emissão de desequilíbrio de uma instalação caso seja possível medir o desequilíbrio do sistema antes e depois da conexão dessa instalação.

De acordo com o mencionado método, o nível de emissão de desequilíbrio em um determinado ponto do sistema elétrico é dado pela equação (2.12) (CIGRÉ-CIRED, 2011).

$$|\overline{VUF}_{carga2}| = |\overline{VUF}_{pós} - \overline{VUF}_{pré}| \quad (2.12)$$

As equações (2.13) a (2.15) detalham as variáveis da equação (2.12).

$$\overline{VUF}_{carga2} = \frac{\overline{V}_{n,i}}{\overline{V}_p} \quad (2.13)$$

$$\overline{VUF}_{pós} = \frac{\overline{V}_n}{\overline{V}_p} (\text{pós} - \text{conexão}) \quad (2.14)$$

$$\overline{VUF}_{pré} = \frac{\overline{V}_n}{\overline{V}_p} (\text{pré} - \text{conexão}) \quad (2.15)$$

Onde:

- $\overline{V}_{n,i}$ é o fasor da tensão de sequência negativa relativo à instalação (carga) conectada;
- \overline{VUF}_{carga2} é o fasor do desequilíbrio de tensão da carga 2 (que é conectada posteriormente);
- $\overline{VUF}_{pós}$ é o fasor do desequilíbrio de tensão do sistema pós-conexão;
- $\overline{VUF}_{pré}$ é o fasor do desequilíbrio de tensão do sistema pré-conexão.

É importante observar que os ângulos de fase podem influenciar no cálculo do \overline{VUF}_{carga2} .

Para a identificação das parcelas de responsabilidade das cargas relativas ao desequilíbrio de tensão, pioneiramente, está sendo proposto neste trabalho em complementação ao método da IEC, o emprego das projeções dos vetores $\overline{VUF}_{pré}$ e \overline{VUF}_{carga2} sobre $\overline{VUF}_{pós}$, de acordo com as equações (2.16) e (2.17).

$$pc\overline{VUF}_{pré} = \frac{|\overline{VUF}_{pré}| \cos \alpha}{|\overline{VUF}_{pós}|} \quad (2.16)$$

$$pcVUF_{carga2} = \frac{|\overline{VUF}_{carga2}| \cos \beta}{|\overline{VUF}_{pós}|} \quad (2.17)$$

Onde:

- $pcVUF_{pré}$ e $pcVUF_{carga2}$ representam, respectivamente, a porcentagem da projeção do desequilíbrio das cargas 1 e 2 ($|\overline{VUF}_{pré}|$ e $|\overline{VUF}_{carga2}|$) sobre o desequilíbrio da carga total ($|\overline{VUF}_{pós}|$);
- α e β são os ângulos que permitem essas projeções.

A Figura 2.1 ilustra os vetores pré e pós-conexão e o vetor referente à contribuição da carga em avaliação para o desequilíbrio medido (IEC/TR 61000-3-13, 2008). Além disso, essa figura estampa a projeção do desequilíbrio das cargas 1 e 2 sobre o desequilíbrio da carga total.

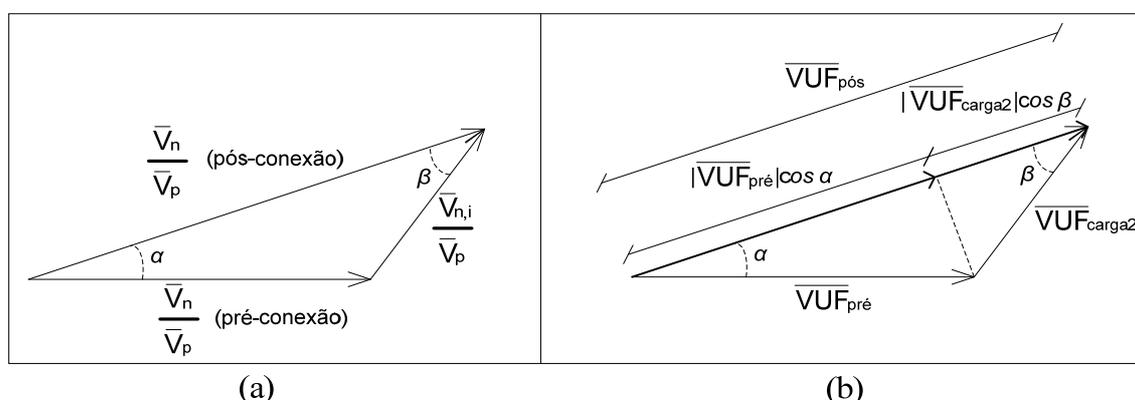


Figura 2.1 – Representação vetorial: (a) componentes do desequilíbrio no sistema; (b) projeção do desequilíbrio.

Observações a respeito deste método que foram publicadas em CIGRÉ-CIRED (2011):

- O desequilíbrio de tensão no ponto de conexão (POC) pode diminuir uma vez que uma carga é conectada. Isso é particularmente verdade quando máquinas de rotação trifásicas são usadas como cargas que agem para compensar o desequilíbrio de tensão no POC drenando correntes desequilibradas.
- Mesmo uma carga perfeitamente balanceada, quando suprida por uma linha não transposta, pode causar um desequilíbrio de tensão no POC. Como a emissão do desequilíbrio de tensão é causada por uma linha, esse (desequilíbrio) não deveria ser considerado como parte da emissão da carga.
- O documento IEC/TR 61000-3-13 (2008) refere-se a uma instalação desequilibrada como uma instalação trifásica completa – i.e. que inclui partes equilibradas e desequilibradas – causando desequilíbrio de tensão. Conexões de instalações monofásicas e bifásicas não são especificamente tratadas e a distribuição dessas cargas (instalações) uniformemente pelas três fases é considerada uma responsabilidade do operador do sistema.

2.3.2 – Método do fluxo de potência trifásico

Neste método, inicialmente, executa-se o fluxo de potência trifásico do sistema em estudo com base, em geral, no emprego do método de Newton-Raphson ou do método de Gauss-Seidel (Glover et al., 2007). Com isso, os resultados das tensões obtidas pelo fluxo de potência trifásico são decompostos em componentes simétricas (Fortescue, 1918). De posse dos valores desta decomposição, executam-se os fluxos de potência de sequência zero, positiva e negativa (IEEE 1459, 2010).

As equações do fluxo de potência ativa são dadas por (2.18) a (2.21).

$$P_z = 3V_z I_z \cos \theta_z \quad (2.18)$$

$$P_p = 3V_p I_p \cos \theta_p \quad (2.19)$$

$$P_n = 3V_n I_n \cos \theta_n \quad (2.20)$$

$$P = P_z + P_p + P_n \quad (2.21)$$

Onde:

- P_z , P_p e P_n são as potências ativas de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente;
- V_z é o módulo da tensão de sequência zero;
- I_z , I_p e I_n são os módulos das correntes de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente;
- θ_z , θ_p e θ_n são os ângulos de fase de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente;
- P é a potência ativa total.

Como a tensão de sequência negativa se propaga em sistemas de potência de forma similar à tensão de sequência positiva, é possível associá-la ao desequilíbrio de tensão (CIGRÉ-CIRED, 2011). Este aspecto tem sido explorado para a avaliação da atribuição de responsabilidades do desequilíbrio, como apontado em Seiphetlho & Rens (2010), Seiphetlho & Rens (2011) e Hanzelka & Varetsky (2011).

A análise feita em (Seiphetlho & Rens, 2010) toma o fluxo de potência ativa de sequência negativa como parâmetro base. Na verdade, o autor propõe uma análise do compartilhamento/atribuição de responsabilidades calcada na avaliação desta grandeza na própria carga. Quando ela for negativa, assume-se que a carga está fornecendo potência ativa de sequência negativa para o sistema, e conseqüentemente conclui-se que o desequilíbrio é proveniente da carga (se propaga da carga para a fonte). O contrário, ou seja, quando a potência ativa de sequência negativa é positiva, o desequilíbrio é decorrente do sistema.

Para um sistema composto por duas cargas, assim como foi feito no método da IEC para a identificação das parcelas de responsabilidade das cargas relativas ao desequilíbrio de tensão, está sendo proposto neste trabalho, o emprego das equações (2.22) e (2.23).

$$pCP_n \text{ carga1 pós} = \frac{P_n \text{ carga1 pós}}{P_n \text{ pós}} \quad (2.22)$$

$$pcP_{n\text{ carga}2\text{ pós}} = \frac{P_{n\text{ carga}2\text{ pós}}}{P_{n\text{ pós}}} \quad (2.23)$$

Onde:

- $P_{n\text{ carga}1\text{ pós}}$ é a potência ativa de sequência negativa da carga 1 do sistema pós-conexão;
- $P_{n\text{ carga}2\text{ pós}}$ é a potência ativa de sequência negativa da carga 2 do sistema pós-conexão;
- $P_{n\text{ pós}}$ é a potência ativa de sequência negativa do sistema pós-conexão;
- $pcP_{n\text{ carga}1\text{ pós}}$ e $pcP_{n\text{ carga}2\text{ pós}}$ representam, respectivamente, a porcentagem da projeção da potência ativa de sequência negativa das cargas 1 e 2 ($P_{n\text{ carga}1\text{ pós}}$ e $P_{n\text{ carga}2\text{ pós}}$) sobre a potência ativa de sequência negativa da carga total ($P_{n\text{ pós}}$).

De acordo com o presente método, o sinal da potência ativa de sequência negativa está relacionado à origem do desequilíbrio, por conseguinte, a projeção da potência ativa de sequência negativa da carga 1 está associada à contribuição do desequilíbrio proveniente da carga 1. De forma análoga, essa explicação se aplica a carga 2.

2.3.3 – Método da corrente conforme e não conforme

A definição de correntes conforme e não conforme para a análise de diferentes fenômenos da qualidade de energia em regime permanente é apresentada em Srinivasan & Jutras (1998). Esse trabalho assume como hipótese que a corrente total demandada pela carga é a soma de duas correntes teóricas. A parcela da corrente que possui os mesmos padrões gráficos que a tensão é definida como corrente conforme. A corrente conforme é responsável por 100% da potência de sequência positiva na frequência fundamental. A diferença entre as correntes total e conforme é caracterizada como corrente não conforme. Com isso, define-se que a corrente conforme está associada aos distúrbios da fonte supridora, e a corrente não conforme está vinculada à natureza da carga.

Por definição, apenas a fonte de tensão pode gerar distúrbios na componente de sequência positiva na frequência fundamental. Logo, a componente de sequência positiva na frequência fundamental da corrente não conforme é zero.

Se a carga alterar, de alguma maneira, as formas de onda das tensões observadas para cada uma das fases da alimentação, ela irá drenar corrente conforme e não conforme. Se a impedância da carga estiver equilibrada, ela drenará apenas corrente conforme.

A corrente conforme de sequência positiva (\bar{I}_{cp}) é igual à corrente de sequência positiva (\bar{I}_p), e as correntes conforme de sequência negativa (\bar{I}_{cn}) e zero (\bar{I}_{cz}) são diretamente proporcionais às suas respectivas tensões (\bar{V}_n e \bar{V}_z), e inversamente proporcionais à tensão de sequência positiva (\bar{V}_p), como apontado nas equações (2.24) a (2.26).

$$\bar{I}_{cp} = \bar{I}_p \quad (2.24)$$

$$\bar{I}_{cn} = \bar{I}_p \frac{\bar{V}_n}{\bar{V}_p} \quad (2.25)$$

$$\bar{I}_{cz} = \bar{I}_p \frac{\bar{V}_z}{\bar{V}_p} \quad (2.26)$$

As correntes não conforme positiva (\bar{I}_{ncp}), negativa (\bar{I}_{ncn}) e zero (\bar{I}_{ncz}) são iguais às diferenças entre as correntes de sequência e suas correspondentes correntes conforme de sequência, como indicado nas equações (2.27) a (2.29).

$$\bar{I}_{ncp} = 0 \quad (2.27)$$

$$\bar{I}_{ncn} = \bar{I}_n - \bar{I}_{cn} \quad (2.28)$$

$$\bar{I}_{ncz} = \bar{I}_z - \bar{I}_{cz} \quad (2.29)$$

Observa-se que se houver desequilíbrio no sistema (fonte supridora e(ou) carga), a componente de sequência negativa estará circulando, portanto o índice do desequilíbrio dado pelo método das componentes simétricas estará presente na \bar{I}_{cn} e(ou) na \bar{I}_{ncn} .

Ressalta-se que este método é aplicável apenas a cargas estáticas, pois em cargas não estáticas – tais como motores de indução, máquinas síncronas, etc – a atribuição de responsabilidades apontada pelo método pode ser incoerente, devido ao fato das impedâncias das sequências positivas e negativas serem completamente diferentes.

Neste trabalho, assim como nos dois outros métodos já apresentados, propõe-se para a identificação das parcelas de responsabilidade das cargas relativas ao desequilíbrio de tensão, as equações (2.30) e (2.31).

$$pCI_{ncn \text{ carga1 pós}} = \frac{|\bar{I}_{ncn \text{ carga1 pós}}| \cos \gamma}{|\bar{I}_{ncn \text{ pós}}|} \quad (2.30)$$

$$pCI_{ncn \text{ carga2 pós}} = \frac{|\bar{I}_{ncn \text{ carga2 pós}}| \cos \delta}{|\bar{I}_{ncn \text{ pós}}|} \quad (2.31)$$

Onde:

- $\bar{I}_{ncn \text{ carga1 pós}}$ é o fasor da corrente não conforme de sequência negativa da carga 1 do sistema pós-conexão;
- $\bar{I}_{ncn \text{ carga2 pós}}$ é o fasor da corrente não conforme de sequência negativa da carga 2 do sistema pós-conexão;
- $\bar{I}_{ncn \text{ pós}}$ é o fasor da corrente não conforme de sequência negativa do sistema pós-conexão;
- $pCI_{ncn \text{ carga1 pós}}$ e $pCI_{ncn \text{ carga2 pós}}$ representam, respectivamente, a porcentagem da projeção da corrente não conforme de sequência negativa das cargas 1 e 2 ($|\bar{I}_{ncn \text{ carga1 pós}}|$ e $|\bar{I}_{ncn \text{ carga2 pós}}|$) sobre a corrente não conforme de sequência negativa da carga total ($|\bar{I}_{ncn \text{ pós}}|$);
- γ e δ são os ângulos que permitem essas projeções.

De acordo com o presente método, a presença de corrente conforme e não conforme de sequência negativa está relacionada à origem do desequilíbrio, portanto, a projeção da corrente não conforme de sequência negativa da carga 1 está associada à contribuição do desequilíbrio proveniente da carga 1. Da mesma forma, essa explicação se aplica a carga 2.

2.4 – POSSIBILIDADES DE ADEQUAÇÃO DE OUTROS ESTUDOS

Neste trabalho, tentam-se adaptar os métodos de compartilhamento/atribuição de responsabilidades sobre distorções harmônicas para os desequilíbrios de tensão, com base nos seguintes estudos: Santos (2007), Santos (2011), Silva (2007) e Costa (2009). Os métodos pesquisados são: (a) fluxo da potência harmônica; (b) separação da contribuição do consumidor e da concessionária pelo método da superposição; (c) método da superposição modificado (com aplicação de filtro harmônico); e (d) corrente conforme e não conforme.

(a) Fluxo da potência harmônica.

O método do fluxo da potência harmônica é aplicável às componentes harmônicas individuais. Como utiliza-se apenas a frequência fundamental no cálculo do desequilíbrio de tensão, este método não é aplicável neste trabalho. Apesar disso, ele possui certa semelhança com o método do fluxo de potência trifásico.

Existem trabalhos na literatura como Tanaka & Akagi (1995), Xu *et al.* (2003), Santos (2007), Santos (2011) e Silva (2007) que são desfavoráveis à utilização do método do fluxo da potência harmônica quando aplicado a atribuição da responsabilidade sobre as distorções harmônicas (encontradas no ponto de acoplamento comum – PAC). Nesses trabalhos foi evidenciado que: (a) o método em si apresenta inconsistências; e (b) há dificuldades de implementação prática.

Em Santos (2007), esclareceu-se ainda que apesar desse método não se aplicar à questão da separação das parcelas de responsabilidades entre o consumidor e o supridor, ele conduz a resultados que permitem avaliar a origem dominante das distorções harmônicas. Também foram apontadas várias críticas com relação à sua aplicação prática.

De maneira similar, o estudo de Silva (2007) aponta que essa metodologia não separa as parcelas de responsabilidade, indicando apenas o sentido do fluxo da potência harmônica ativa.

A referência Santos (2011) chegou à conclusão que o método não possui a necessária confiabilidade para a determinação da fonte predominante das distorções harmônicas, isto é, se a maior contribuição é advinda do supridor ou do consumidor. A mesma referência concluiu que existem alguns desafios para que sejam estabelecidos procedimentos que conduzam a uma adequada identificação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas.

Não obstante às observações anteriores, Santos (2007) e Silva (2007) indicam que ainda existem trabalhos que têm por meta resgatar a metodologia da potência harmônica (Leiria

et al., 2003). Em sua maioria, os artigos relacionados a este tema geralmente propõem procedimentos alternativos que sugerem o cálculo instantâneo da potência ativa (Tanaka & Akagi, 1995). Ainda em Li *et al.* (2004) é sugerida a substituição dos cálculos das potências ativas pelas potências reativas.

(b) Separação da contribuição do consumidor e da concessionária pelo método da superposição.

O método da superposição determina que havendo duas ou mais fontes que contribuem para uma dada corrente ou tensão num ponto da rede elétrica, esta pode ser partilhada entre as suas fontes de origem. Para a distorção harmônica, têm-se no mínimo duas fontes de distúrbios na representação do sistema para cada componente harmônica, e para o desequilíbrio, tem-se uma fonte de distúrbio na componente fundamental. Portanto, essa técnica foi descartada para utilização nesta pesquisa.

(c) Método da superposição modificado (com aplicação de filtro harmônico).

O método da superposição modificado consiste na inserção de uma impedância harmônica no PAC, produzindo, deste modo, um procedimento diferenciado em relação ao estabelecido pelo método original. Dessa forma, esse método também não será utilizado nesta dissertação.

(d) Corrente conforme e não conforme.

De acordo com Srinivasan & Jutras (1998), o método da corrente conforme e não conforme pode ser utilizado para identificar a fonte de deterioração da qualidade, e ainda, atribuir a responsabilidade ao consumidor ou à concessionária. Esse método pode ser utilizado em distúrbios de qualidade tais como: harmônicas, desequilíbrios e flutuação de tensão/corrente.

Conforme apresentado em Silva (2007) e Santos (2007), o método da corrente conforme e não conforme utilizado para atribuição de responsabilidades sobre as distorções harmônicas se mostra frágil quando se estabelece que, para qualquer frequência, a correlação entre as denominadas grandezas harmônicas conformes é definida através de uma grandeza complexa constante. Sabe-se que essa hipótese é inconsistente com os fundamentos que regem o funcionamento dos circuitos elétricos em seus princípios. Em Santos (2007), constatou-se ainda que a atribuição de responsabilidades é efetuada de forma imprópria. Mesmo assim, apesar dos grandes erros numéricos, o método foi coerente quando da identificação da maior parcela de responsabilidade.

Portanto, com base nas pesquisas de compartilhamento/atribuição de responsabilidades sobre distorções harmônicas, nenhum método permite sua adaptação para o estudo de responsabilidades e identificação da origem do desequilíbrio de tensão. Entretanto, salienta-se que o método da corrente conforme e não conforme é capaz de atribuir a responsabilidade sobre desequilíbrios de acordo com metodologia própria indicada em Srinivasan & Jutras (1998). Nota-se que nessa conjuntura, não há o empecilho

supramencionado em (d) – mesma impedância para todas as frequências sob avaliação – visto que o sistema trabalha exclusivamente na frequência fundamental.

2.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou os principais tópicos relacionados ao termo desequilíbrio de tensão, como sua conceituação, suas causas e seus efeitos nos equipamentos da rede elétrica. Foram ainda expostos os métodos de cálculo para sua quantificação e as normas regulamentadoras que versam sobre seus limites.

Também foram exibidos os métodos da IEC, do fluxo de potência trifásico e da corrente conforme e não conforme que têm por objetivo atribuir/compartilhar a responsabilidade devido ao desequilíbrio de tensão. De modo a contribuir com esses métodos, foi proposta a atribuição de valores percentuais às parcelas de responsabilidades, por meio da projeção dos vetores das cargas 1 e 2 no vetor resultante da carga total. As configurações dessas cargas e também do sistema serão descritas no Capítulo 3.

Por fim, foi elaborada uma revisão bibliográfica com estudos relacionados à atribuição de responsabilidades sobre as distorções harmônicas, objetivando uma adaptação ao caso do desequilíbrio de tensão. Constatou-se que nenhum desses métodos é plausível de ser adaptado para o estudo de responsabilidades e identificação da origem do desequilíbrio de tensão. Salientou-se que o método da corrente conforme e não conforme possui uma abordagem específica para a atribuição de responsabilidade causada pelo desequilíbrio de tensão.

3 – SISTEMA AVALIADO E INFRAESTRUTURA LABORATORIAL

3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, são apresentados os procedimentos necessários para se executar as simulações computacionais e os ensaios laboratoriais, que têm por finalidade a realização do objetivo principal desta dissertação.

Também são especificados os principais casos computacionais e laboratoriais que são analisados pormenorizadamente no capítulo seguinte, a saber, de resultados.

São ainda exibidos e identificados os equipamentos utilizados para a validação experimental; e ao fim, é exposto um roteiro de testes laboratoriais que possibilita, de forma adequada, a aquisição de tensões e correntes nos pontos de interesse.

3.2 – PROCEDIMENTOS PARA AS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E OS ENSAIOS LABORATORIAS

Esta seção apresenta os procedimentos adotados para o desenvolvimento do sistema que possibilita a avaliação comparativa entre os métodos para a atribuição de responsabilidades devido ao desequilíbrio de tensão.

Para a montagem dos cenários empregados nas simulações computacionais e nos ensaios laboratoriais, alguns aspectos foram considerados, a saber:

- Ao se avaliar o módulo e a fase das tensões de um gerador em uma usina de geração de energia elétrica brasileira, nota-se que o sistema é equilibrado, ou seja, praticamente não há desequilíbrio de tensão, nem assimetria de tensão na saída da geração;
- De acordo com o ONS 2.8 (2011), P95% é o indicador que deve ser calculado e comparado com o limite imposto para a rede básica. Para a sua obtenção, deve-se efetuar os seguintes passos: i) determina-se o valor que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 1 dia (24 horas), considerando-se os valores dos indicadores integralizados em intervalos de 10 (dez) minutos, ao longo de 7 (sete) dias consecutivos; e ii) o P95% que deverá ser comparado com o limite dos procedimentos de rede corresponderá ao maior entre os sete valores obtidos anteriormente, em base diária;
- No Brasil, o limite global nos barramentos da rede básica e nos barramentos dos transformadores de fronteira é igual a 2%. O limite individual nos pontos de conexão à rede básica ou aos barramentos dos transformadores de fronteira é igual a 1,5%;
- Quanto à rede de distribuição, para atender ao que está estabelecido no PRODIST (2012), o valor de referência do VUF deve ser igual ou inferior a 2%.

Com base nessas asserções, utilizam-se para se realizar as simulações computacionais contidas neste trabalho, as representações matemáticas de uma fonte trifásica ideal e de

uma linha de transmissão com transposição de fases. Já para os ensaios laboratoriais, devido às limitações dos instrumentos do laboratório, são empregadas uma fonte muito próxima da ideal e uma linha de transmissão com um ligeiro desequilíbrio. Para cada caso analisado, as principais variações do sistema ocorrem nas impedâncias das cargas trifásicas. Os valores utilizados tanto nas simulações computacionais como em laboratório, serão apresentados na seção exibida a seguir.

3.2.1 – Configurações dos sistemas

A Figura 3.1 apresenta o sistema empregado neste trabalho nas simulações computacionais e nos ensaios laboratoriais. Ele foi formulado com base no sistema de 4 barras do IEEE adaptado para este estudo. No Apêndice A, encontra-se em detalhes a descrição deste processo de adaptação.

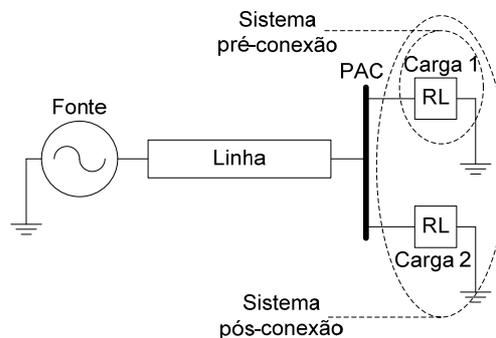


Figura 3.1 – Sistema utilizado nas simulações computacionais e laboratoriais.

Nas simulações, têm-se os sistemas pré-conexão e pós-conexão. O primeiro é representado pela carga 1, e o segundo é representado pelas cargas 1 e 2.

Nas configurações específicas dos elementos que constituem os sistemas computacional e laboratorial estão descritas nos subtópicos 3.2.1.1 e 3.2.1.2, respectivamente.

3.2.1.1 – Sistema computacional

Para se realizar o estudo comparativo entre os métodos para a avaliação da atribuição de responsabilidades do desequilíbrio, as simulações computacionais são efetuadas no software MATLAB®.

A formulação matemática utilizada no MATLAB® baseia-se em equações de circuitos trifásicos, nas normas IEEE 1459 (2010) e IEC/TR 61000-3-13 (2008), no documento do grupo CIGRÉ-CIRED (2011), e no artigo de Srinivasan & Jutras (1998).

Os dados de entrada dos métodos são de fato os valores das tensões e das correntes do PAC e de cada carga. Eles possibilitam a aplicação dos métodos de avaliação do compartilhamento de responsabilidades e de identificação da origem do desequilíbrio de tensão.

As configurações dos elementos presentes na Figura 3.1 referentes ao sistema computacional são:

- Fonte trifásica e ideal com tensão de linha igual a 380 V. Logo, os valores dessa fonte apresentam tensão de fase aproximadamente igual a 220 V (sequência de fases direta);
- Impedância da linha de transmissão ($Z_{abc_{linha_{comp}}}$) dada conforme a equação (3.1). A linha é transposta para todo conjunto de casos investigados;
- Impedância padrão de cada carga RL ($\bar{Z}_{abc_{carga_{comp}}}$) dada de acordo com equação (3.2).

$$Z_{abc_{linha_{comp}}} = \begin{bmatrix} 13,2571 + j36,4930 & 0 & 0 \\ 0 & 13,2571 + j36,4930 & 0 \\ 0 & 0 & 13,2571 + j36,4930 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\bar{Z}_{abc_{carga_{comp}}} = 144,4000 \angle 25,8419^\circ = 129,9600 + j62,9425 \Omega \quad (3.2)$$

Nas simulações computacionais, como hipótese simplificadora, as impedâncias próprias foram consideradas constantes, e as impedâncias mútuas foram declaradas nulas.

As duas cargas trifásicas RL são constituídas por 3 impedâncias monofásicas (\bar{Z}_A , \bar{Z}_B e \bar{Z}_C) que estão conectadas ao PAC. Os valores dessas impedâncias estão expostos nas Tabelas 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1 – Impedâncias da carga equilibrada.

\bar{Z}_A		\bar{Z}_B		\bar{Z}_C	
Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo
144,4000	25,8419	144,4000	25,8419	144,4000	25,8419
R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]
129,9600	62,9425	129,9600	62,9425	129,9600	62,9425

Tabela 3.2 – Impedâncias da carga desequilibrada com incremento de 10% no módulo da carga da fase A e decréscimo de 10% no módulo da fase C.

\bar{Z}_A		\bar{Z}_B		\bar{Z}_C	
Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo
158,8400	25,8419	144,4000	25,8419	129,9600	25,8419
R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]
142,9560	69,2368	129,9600	62,9425	116,9640	56,6483

Os casos computacionais que são analisados no Capítulo 4 utilizam as configurações de carga das Tabelas 3.1 e 3.2. Porém, existem outras configurações de cargas que se prestaram para consolidar as conclusões obtidas neste trabalho. Elas são apresentadas no Apêndice B, juntamente com as análises dos casos computacionais pertinentes a essas cargas.

3.2.1.2 – Sistema laboratorial

As configurações dos elementos presentes na Figura 3.1 referentes ao sistema laboratorial são:

- Fonte trifásica com tensão de linha igual a 380 V e tensão de fase próxima a 220 V (sequência de fases direta);
- Impedância da linha ($Z_{abc_{linha_{lab}}}$) dada conforme a equação (3.3), que mostra que essa linha apresenta um ligeiro desequilíbrio para todo conjunto de casos investigados;
- Ausência de impedância padrão de carga RL.

$$Z_{abc_{linha_{lab}}} = \begin{bmatrix} 17,2837 + j39,1082 & 0 & 0 \\ 0 & 17,8979 + j39,2484 & 0 \\ 0 & 0 & 17,2071 + j37,1013 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Nos ensaios laboratoriais, as impedâncias próprias apresentaram um leve desequilíbrio quando comparadas entre si, e as impedâncias mútuas foram declaradas nulas.

As duas cargas trifásicas RL são constituídas por 3 impedâncias monofásicas (\bar{Z}_A , \bar{Z}_B e \bar{Z}_C) que estão conectadas ao PAC. Os valores das impedâncias dessas cargas – que são diferentes dos valores dos estudos computacionais – estão expostos nas Tabelas 3.3 a 3.8.

Tabela 3.3 – Impedâncias da carga 2 dos casos 4 e 2.

\bar{Z}_A		\bar{Z}_B		\bar{Z}_C	
Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo
211,2560	20,0260	211,3792	20,0207	210,5655	20,1043
R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]
198,4829	72,3438	198,6053	72,3677	197,7354	72,3778

Tabela 3.4 – Impedâncias da carga 1 dos casos 1 e 3.

\bar{Z}_A		\bar{Z}_B		\bar{Z}_C	
Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo
163,6595	25,0672	170,7639	42,1050	216,5684	23,1810
R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]
148,2447	69,3394	126,6927	114,4957	199,0839	85,2494

Tabela 3.5 – Impedâncias da carga 2 dos casos 1 e 6.

\bar{Z}_A		\bar{Z}_B		\bar{Z}_C	
Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo
164,8338	25,8186	170,4756	42,1004	216,9393	23,8432
R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]
148,3797	71,7890	126,4881	114,2922	198,4247	87,6943

Tabela 3.6 – Impedâncias da carga 2 do caso 5.

\bar{Z}_A		\bar{Z}_B		\bar{Z}_C	
Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo
312,3057	20,2094	211,3792	20,0207	210,5655	20,1043
R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]
293,0791	107,8866	198,6053	72,3677	197,7354	72,3778

Tabela 3.7 – Impedâncias da carga 1 do caso 2.

\bar{Z}_A		\bar{Z}_B		\bar{Z}_C	
Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo
248,6895	40,8710	168,6833	41,0090	167,9664	41,0496
R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]
188,0552	162,7320	127,2895	110,6862	126,6704	110,3056

Tabela 3.8 – Impedâncias da carga 2 do caso 3.

\bar{Z}_A		\bar{Z}_B		\bar{Z}_C	
Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo
287,1125	25,7338	170,4756	42,1004	216,9393	23,8432
R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]
258,6370	124,6615	126,4881	114,2922	198,4247	87,6943

Os casos laboratoriais que são analisados no Capítulo 4 utilizam as configurações de carga das Tabelas 3.3 a 3.8. Porém, existem outras configurações de cargas que se prestaram para consolidar as conclusões obtidas neste trabalho. Elas são apresentadas no Apêndice C, juntamente com as análises dos casos laboratoriais pertinentes a essas cargas. As principais observações decorrentes destes casos são também consideradas nas conclusões deste trabalho.

3.3 – APRESENTAÇÃO DOS PRINCIPAIS CASOS

Neste tópico, as especificações dos principais casos computacionais e laboratoriais são exibidos.

Na medida em que a quantidade de casos aumenta, a ideia é fazer com que a configuração das cargas se torne mais complexa objetivando a análise comportamental dos métodos. Portanto, a lógica para a caracterização dos casos obedece a seguinte configuração de cargas: (a) ambas as cargas equilibradas; (b) ambas as cargas com o mesmo desequilíbrio; (c) uma carga equilibrada e a outra com variações incrementais; e (d) uma carga com desequilíbrio fixo e a outra com variações incrementais.

Há de se ressaltar que as cargas (logo os casos) apresentam características distintas entre os ensaios experimentais e as simulações computacionais.

3.3.1 – Casos computacionais

São expostos na Tabela 3.9, os 6 casos computacionais que contemplam os resultados presentes no cerne desta dissertação.

Tabela 3.9 – Especificação dos casos computacionais.

Casos	Configuração das cargas	Descrição
1	Cargas 1 e 2 equilibradas.	Para os sistemas pré e pós-conexão, a Tabela 3.1 fornece as impedâncias da carga equilibrada.
2	Cargas 1 e 2 desequilibradas com incremento de 10% no módulo da fase A e decréscimo de 10% no módulo da fase C.	Para os sistemas pré e pós-conexão, a Tabela 3.2 fornece as impedâncias da carga desequilibrada.
3	Carga 1 equilibrada e carga 2 desequilibrada com incremento de 0 a 100% no módulo da fase A.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela 3.1 fornece as impedâncias da carga equilibrada. Já para o sistema pós-conexão, as impedâncias da carga variam com incremento de 0 a 100% no módulo da fase A, partindo da configuração equilibrada.
4	Carga 1 desequilibrada com incremento de 0 a 100% no módulo da fase A e carga 2 equilibrada.	Para o sistema pré-conexão, as impedâncias da carga variam com incremento de 0 a 100% no módulo da fase A, partindo da configuração equilibrada. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela 3.1 fornece as impedâncias da carga equilibrada.
5	Carga 1 desequilibrada com incremento de 10% no módulo da fase A e decréscimo de 10% no módulo da fase C, e carga 2 desequilibrada com incremento de 0 a 100% no módulo da fase A.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela 3.2 fornece as impedâncias da carga desequilibrada. Já para o sistema pós-conexão, as impedâncias da carga variam com incremento de 0 a 100% no módulo da fase A, partindo da configuração equilibrada.
6	Carga 1 desequilibrada com incremento de 0 a 100% no módulo da fase A, e carga 2 desequilibrada com incremento de 10% no módulo da fase A e decréscimo de 10% no módulo da fase C.	Para o sistema pré-conexão, as impedâncias da carga variam com incremento de 0 a 100% no módulo da fase A, partindo da configuração equilibrada. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela 3.2 fornece as impedâncias da carga desequilibrada.

3.3.2 – Casos laboratoriais

São exibidos na Tabela 3.10, os 3 casos laboratoriais que contemplam os resultados presentes neste trabalho.

Tabela 3.10 – Especificação dos casos laboratoriais.

Casos	Configuração das cargas	Descrição
1	Cargas 1 e 2 com desequilíbrios semelhantes entre elas.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela 3.4 fornece as impedâncias da carga 1. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela 3.5 fornece as impedâncias da carga 2.
2	Carga 1 desequilibrada com incremento de aproximadamente 48% na impedância da fase A (em relação a carga 1 do caso 4) e carga 2 aproximadamente equilibrada (com a mesma configuração da carga 2 do caso 4).	Para o sistema pré-conexão, a Tabela 3.7 fornece as impedâncias da carga 1. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela 3.3 fornece as impedâncias da carga 2.
3	Carga 1 desequilibrada (com a mesma configuração da carga 1 do caso 1) e carga 2 desequilibrada com incremento de aproximadamente 74% na impedância da fase A (em relação a carga 2 do caso 1).	Para o sistema pré-conexão, a Tabela 3.4 fornece as impedâncias da carga 1. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela 3.8 fornece as impedâncias da carga 2.

3.4 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA A VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

A análise experimental desempenha um papel importante em qualquer estudo de engenharia que se faça, haja vista a possibilidade de comprovação de suposições teóricas por meio do desenvolvimento de ensaios reais em laboratório.

Dessa forma, a execução dos experimentos propostos neste trabalho objetiva avaliar, no PAC e em cada carga, os métodos de compartilhamento de responsabilidades e de identificação da origem do desequilíbrio de tensão. Sendo assim, nesta seção, descrevem-se todas as informações necessárias para o entendimento de como os ensaios laboratoriais serão efetuados.

A Figura 3.2 exibe, de forma esquemática, o arranjo experimental empregado nos ensaios práticos. Nessa figura, observam-se os equipamentos utilizados e as conexões entre a fonte, a linha e as cargas.

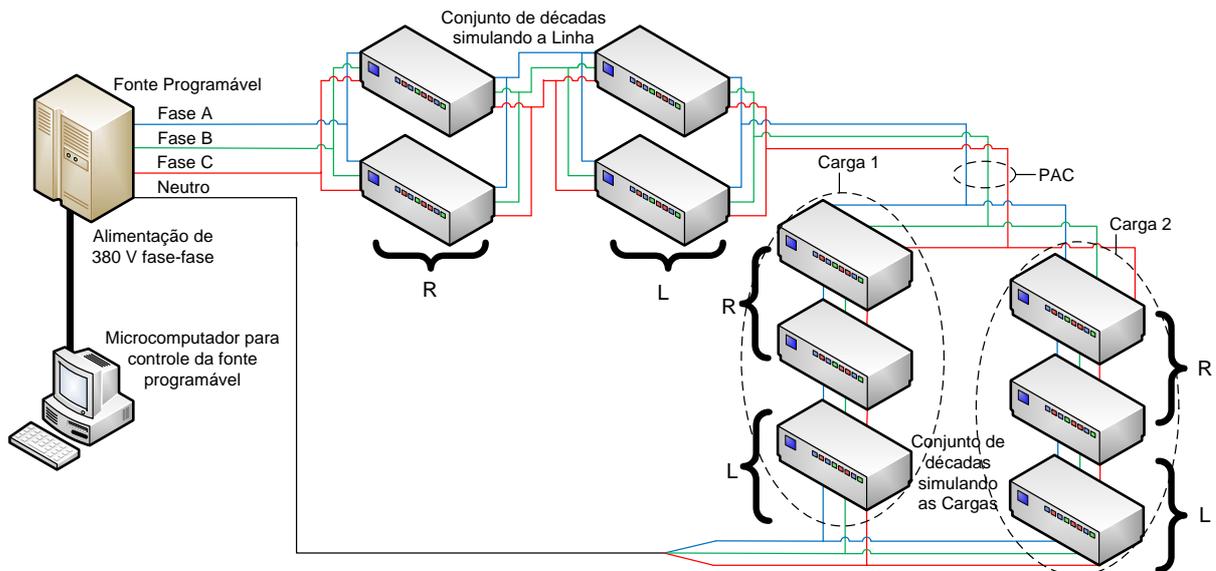


Figura 3.2 – Esquema de conexão para a realização dos experimentos.

Os equipamentos utilizados para a validação experimental são:

- 6 décadas resistivas – para compor a impedância da linha e das cargas;
- 6 décadas indutivas – para compor a impedância da linha e das cargas;
- Cabos – para fazer a interligação entre fonte, linha e cargas;
- 3 medidores de energia (modelos ION 7600 e ION 8600) – para fazer as medições de tensão e corrente no PAC e em cada carga;
- Fonte programável – alimenta o sistema por meio de um sinal de tensão controlável;
- Microcomputador – para o controle da fonte programável, o armazenamento e o processamento dos sinais derivados do sistema de medição da mesma.

A Figura 3.3 exibe uma foto da fonte trifásica programável utilizada e do microcomputador para o controle da mesma, indicados pelos números 1 e 2, respectivamente.



Figura 3.3 – Fonte trifásica programável e microcomputador de controle.

A Figura 3.4 apresenta uma foto de todos os componentes físicos que perfazem o sistema elétrico. O conjunto de décadas que simula a linha, o grupo de décadas que simula a carga 1, o agrupamento de décadas que simula a carga 2, os 3 medidores de energia, e a saída da fonte trifásica são apontados pelos números 3, 4, 5, 6 e 7, respectivamente.

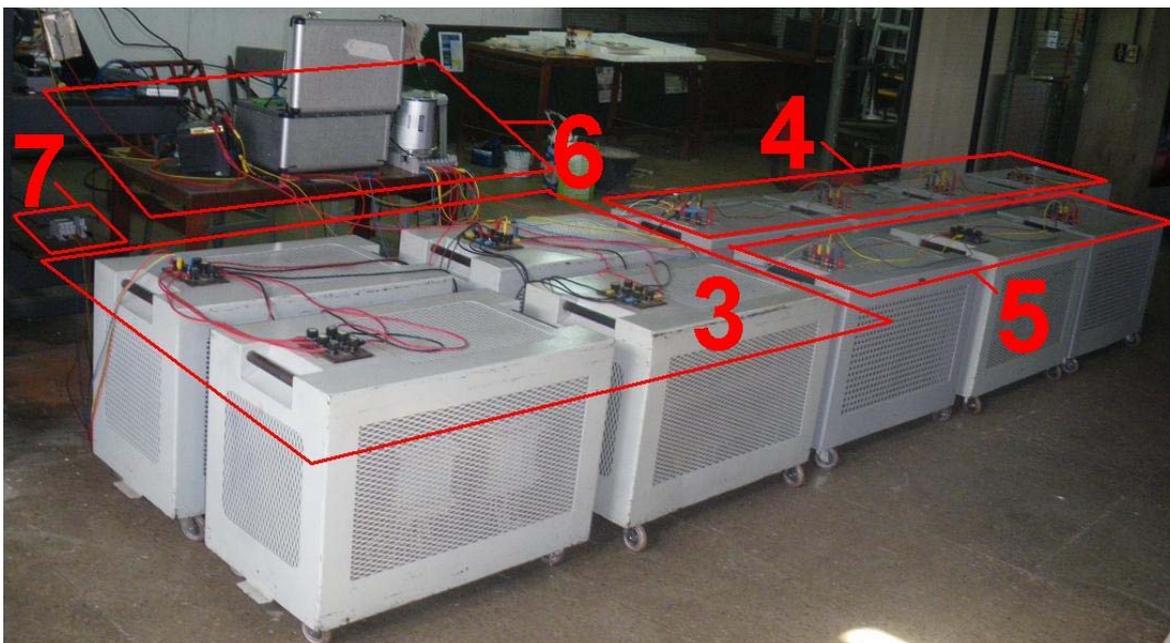


Figura 3.4 – Sistema elétrico.

Os testes laboratoriais foram realizados obedecendo-se as seguintes etapas:

1. Configuração do programa computacional, por intermédio do microcomputador, que permite que a fonte trifásica gere uma tensão de fase equilibrada de aproximadamente 220 V e com sequência de fases direta (sequência ABC).
2. Montagem e configuração do conjunto de décadas que simula a linha por meio da interligação em série de duas décadas resistivas associadas em paralelo com duas décadas indutivas associadas em paralelo.
3. Montagem e configuração do grupo de décadas que emula as cargas por meio da ligação em série de duas décadas resistivas associadas em série com uma ou duas décadas indutivas (dependendo da configuração da carga) associadas em série.
4. Conexão (por meio de cabos) entre a fonte trifásica programável e os conjuntos de décadas que simulam a linha e as cargas, de acordo com a Figura 3.2.
5. Inserção de um medidor de energia no PAC (representado pelo círculo tracejado da Figura 3.2) e em cada carga (identificadas por um círculo tracejado na Figura 3.2) para se obter os valores das tensões e correntes.

Ressalta-se que a aquisição de tensões e correntes no PAC e em cada carga, possibilita, consequentemente, a aplicação dos métodos.

No início da execução deste trabalho, pensou-se na possibilidade de se efetuar os ensaios laboratoriais com os mesmos parâmetros dos 6 casos das simulações computacionais. Entretanto, devido às limitações do laboratório, optou-se pela execução dos ensaios laboratoriais de alguns casos que possuem alguma semelhança com os casos das simulações computacionais. Ressalta-se que esses casos laboratoriais são suficientes para a obtenção de resultados que permitem a avaliação comparativa entre os métodos.

3.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram descritos os procedimentos e materiais necessários para se realizar as simulações computacionais e os ensaios laboratoriais, que têm por meta a concretização dos objetivos deste trabalho.

Sendo assim, caracterizaram-se 6 casos computacionais, e 3 casos laboratoriais, que são analisados no Capítulo 4.

Por fim, foram apresentados e identificados os equipamentos empregados, bem como o roteiro usado para a validação experimental.

4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS COMPUTACIONAIS E LABORATORIAIS

4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, são apresentados os resultados de algumas simulações computacionais e de ensaios laboratoriais selecionados para a avaliação dos métodos de compartilhamento/atribuição de responsabilidades devido à presença do desequilíbrio de tensão.

Inicialmente, são aqui ilustrados em detalhes, os resultados de 6 dos 33 casos computacionais estudados nesta dissertação, e também 3 de um total de 8 casos laboratoriais. Esses casos selecionados são aqueles que demonstram os principais aspectos da avaliação comparativa entre os métodos.

Ressalta-se mais uma vez que, à medida que o número de casos aumenta a configuração das cargas torna-se mais complexa com a finalidade de se estudar o comportamento dos métodos.

Em todos esses casos, são aplicados os métodos da IEC, do fluxo de potência trifásico e da corrente conforme e não conforme.

Em seguida, os resultados de cada caso são analisados de forma a se evidenciar as limitações vinculadas a cada método. Os principais aspectos observados estão sintetizados em um tópico ao final do capítulo.

4.2 – ANÁLISE DOS CASOS COMPUTACIONAIS

A seguir, são exibidos os 6 casos computacionais selecionados e seus principais resultados.

4.2.1 – Caso 1 – Cargas equilibradas

Este caso possui as duas cargas equilibradas e a linha de transmissão completamente transposta. As Tabelas 4.1 a 4.3 expõem os resultados dos métodos da IEC, do fluxo de potência trifásico, e da corrente conforme e não conforme, respectivamente.

Tabela 4.1 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
0 < 0	0 < 0	0 < 0
$pcVUF_{pré}$		0
$pcVUF_{carga2}$		0

Tabela 4.2 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n \text{ pré}$	$P_n \text{ carga1 pós}$	$P_n \text{ carga2 pós}$	$P_n \text{ pós}$
0	0	0	0
$pcP_n \text{ carga1 pós}$			0
$pcP_n \text{ carga2 pós}$			0

Tabela 4.3 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn \text{ pré}}$	$\bar{I}_{ncn \text{ carga1 pós}}$	$\bar{I}_{ncn \text{ carga2 pós}}$	$\bar{I}_{ncn \text{ pós}}$
$0 \angle 0$	$0 \angle 0$	$0 \angle 0$	$0 \angle 0$
$pcI_{ncn \text{ carga1 pós}}$	0		
$pcI_{ncn \text{ carga2 pós}}$	0		

Onde:

- $P_n \text{ pré}$ é a potência ativa de sequência negativa do sistema pré-conexão; e
- $\bar{I}_{ncn \text{ pré}}$ é o fasor da corrente não conforme de sequência negativa do sistema pré-conexão.

Da aplicação do método da IEC, observou-se que o $VUF_{\text{pré}}$, o $VUF_{\text{pós}}$ e o VUF_{carga2} são iguais a 0. Esses resultados mostram-se satisfatórios, já que inicialmente o sistema encontrava-se balanceado e, após a conexão à instalação de uma nova carga equilibrada, obteve-se um valor nulo tanto para o desequilíbrio do sistema pós-conexão, quanto para o desequilíbrio da carga recém-inserida.

Da utilização do método do fluxo de potência trifásico, verificou-se nos sistemas pré e pós-conexão, que a potência ativa de sequência negativa, que possui relação direta com a presença do desequilíbrio, é igual a 0. O valor obtido indica que não há consumo nem geração dessa potência na carga, confirmando o resultado esperado, uma vez que não há desequilíbrio no sistema.

Do emprego do método das correntes conformes e não conformes, notou-se que todas as correntes não conformes são iguais a 0, o que ratifica a não existência de desequilíbrio na carga. A corrente conforme de sequência negativa também é nula, já que o sistema está equilibrado.

Como esperado para o sistema equilibrado, os resultados dos três métodos estão coerentes entre si. Essa conformidade também se fez presente nas parcelas de responsabilidade das cargas, que exibem valores nulos, em qualquer um dos métodos.

4.2.2 – Caso 2 – Cargas com o mesmo desequilíbrio

Este caso visa analisar os efeitos dos métodos para a situação em que se tem a carga 1 com desequilíbrio igual ao desequilíbrio da carga 2. As Tabelas 4.4 a 4.6 expõem os resultados dos métodos da IEC, do fluxo de potência trifásico, e da corrente conforme e não conforme, respectivamente.

Tabela 4.4 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
1,3066 \angle 67,8574	2,2003 \angle 61,1378	0,9155 \angle 51,5241
$pcVUF_{pré}$		59%
$pcVUF_{carga2}$		41%

Tabela 4.5 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n pré$	$P_n carga1 pós$	$P_n carga2 pós$	$P_n pós$
-0,1484	-0,1487	-0,1487	-0,2974
$pcP_n carga1 pós$			50%
$pcP_n carga2 pós$			50%

Tabela 4.6 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn pré}$	$\bar{I}_{ncn carga1 pós}$	$\bar{I}_{ncn carga2 pós}$	$\bar{I}_{ncn pós}$
0,0738 \angle 177,8224	0,0622 \angle 171,1028	0,0622 \angle 171,1028	0,1243 \angle 171,1028
$pcI_{ncn carga1 pós}$	50%		
$pcI_{ncn carga2 pós}$	50%		

Da Tabela 4.4, os resultados do método da IEC apontam um $VUF_{pré}$ de 1,3066%. Após a conexão da segunda carga, igualmente desbalanceada, o $VUF_{pós}$ passa a ser 2,2003%, que é aproximadamente 1,68 vezes o $VUF_{pré}$. Isso indica que quando a carga 2 foi conectada, o

sistema ficou mais desequilibrado. O VUF_{carga2} é igual a 0,9155%. Percebe-se que esse valor é menor que o $VUF_{pré}$, caracterizando uma imprecisão. Essa falha ocorre devido a formulação matemática do método, pois o VUF_{carga2} é calculado com base no módulo da diferença de dois vetores que não estão na mesma direção, na maioria das vezes. Analisando-se, pormenorizadamente, pode-se dizer que o fato do $VUF_{pré}$ ser 1,43 vezes maior do que o VUF_{carga2} , indica que a carga 1 é a fonte de desequilíbrio dominante sobre a carga 2. Isso pode ser ainda observado nos resultados das parcelas de responsabilidades. Enquanto a parcela de responsabilidade da carga 1 é igual a 59%, a da carga 2 é igual a 41%.

Com relação ao método do fluxo da potência trifásica, nota-se na Tabela 4.5 para o sistema pré-conexão, uma potência de sequência negativa igual a -0,1484 W, demonstrando que a carga 1 está desequilibrada. Após a conexão da carga 2, o método indica que as duas cargas estão fornecendo a mesma potência de sequência negativa iguais a -0,1487 W. Como esses valores possuem sinais negativos, o sentido dessas potências é das cargas para o sistema, o que sinaliza que o desequilíbrio é proveniente destas duas cargas. O fato das parcelas de responsabilidade das cargas 1 e 2 serem iguais a 50% confirma o desequilíbrio idêntico entre elas. Após a conexão da carga 2, percebe-se que o sistema fica mais desequilibrado, pois a $P_n pós$ é maior em módulo que a $P_n pré$.

O método das correntes conforme e não conforme indica que a carga 1 está desequilibrada ao apresentar um valor diferente de 0 para a corrente não conforme de sequência negativa do sistema pré-conexão, como pode ser observado na Tabela 4.6. Ainda da Tabela 4.6, nota-se que as cargas 1 e 2 do sistema pós-conexão possuem valores iguais de correntes não conforme, conseqüentemente, as parcelas de responsabilidade das cargas 1 e 2 exibem o mesmo valor (50%), indicando que os desequilíbrios provenientes de cada carga são iguais. A $I_{ncn pós}$ é maior que a $I_{ncn pré}$, sinalizando que o desequilíbrio total no sistema pós-conexão é maior do que no sistema pré-conexão. Conclui-se com isso que, com relação à fonte predominante de desequilíbrio, este método está de acordo com o resultado oriundo do método do fluxo de potência trifásico, e em desacordo com o método da IEC.

4.2.3 – Caso 3 – Carga 1 equilibrada e carga 2 com variações incrementais

Este caso mostra a evolução dos efeitos dos incrementos no módulo da impedância da carga da fase A sobre os métodos, quando a carga 1 está equilibrada e a carga 2 é desequilibrada com incremento de 0 a 100% no módulo da fase A. Os resultados dos métodos da IEC, do fluxo de potência trifásico, e da corrente conforme e não conforme, respectivamente, estão expostos nas Figuras 4.1 a 4.3. Os números em cinza presentes em cada gráfico representam as parcelas de responsabilidade das cargas relativas ao desequilíbrio de tensão. Ressalta-se que o eixo das ordenadas corta o eixo das abscissas em 144,4 Ω , valor em que Z_A não recebe nenhum incremento.

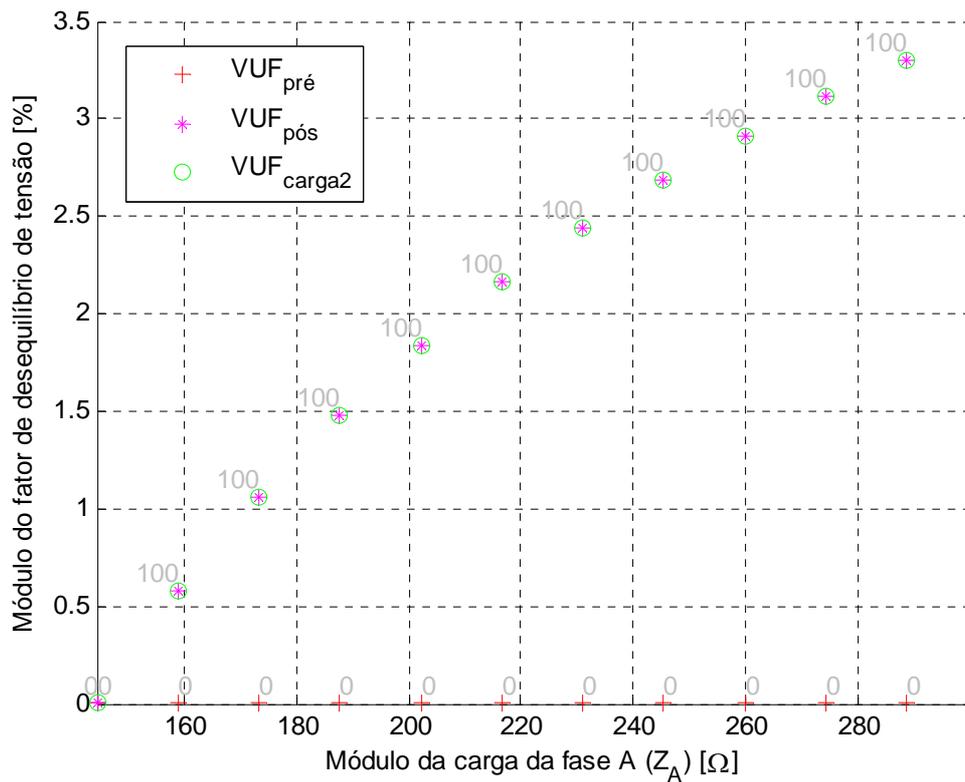


Figura 4.1 – Resultados do método da IEC.

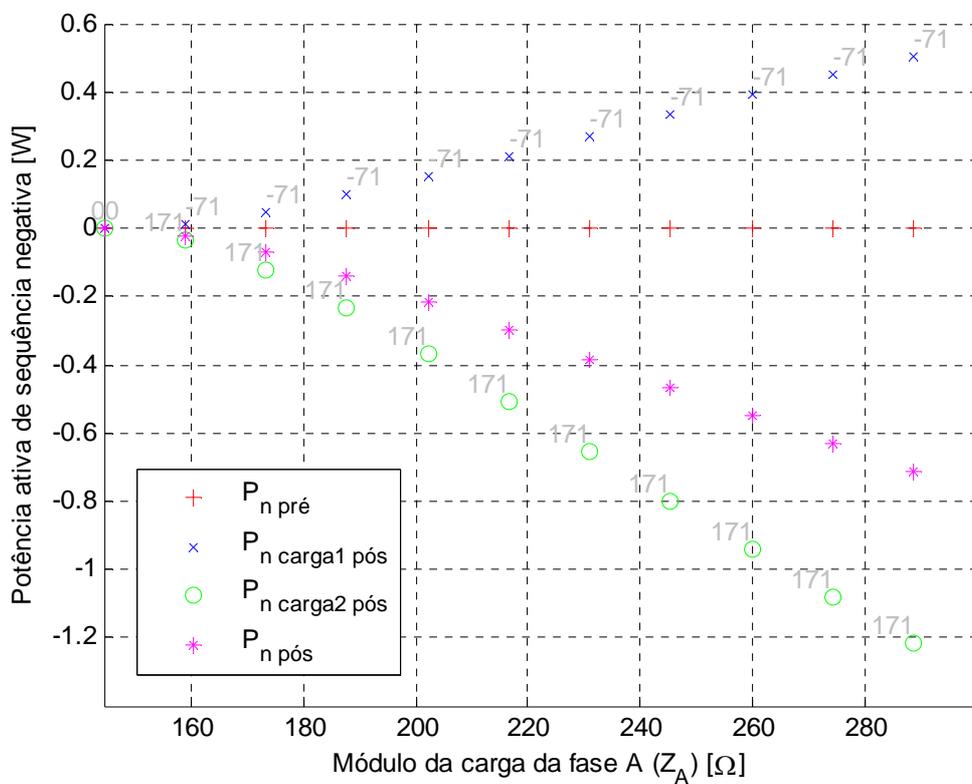


Figura 4.2 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

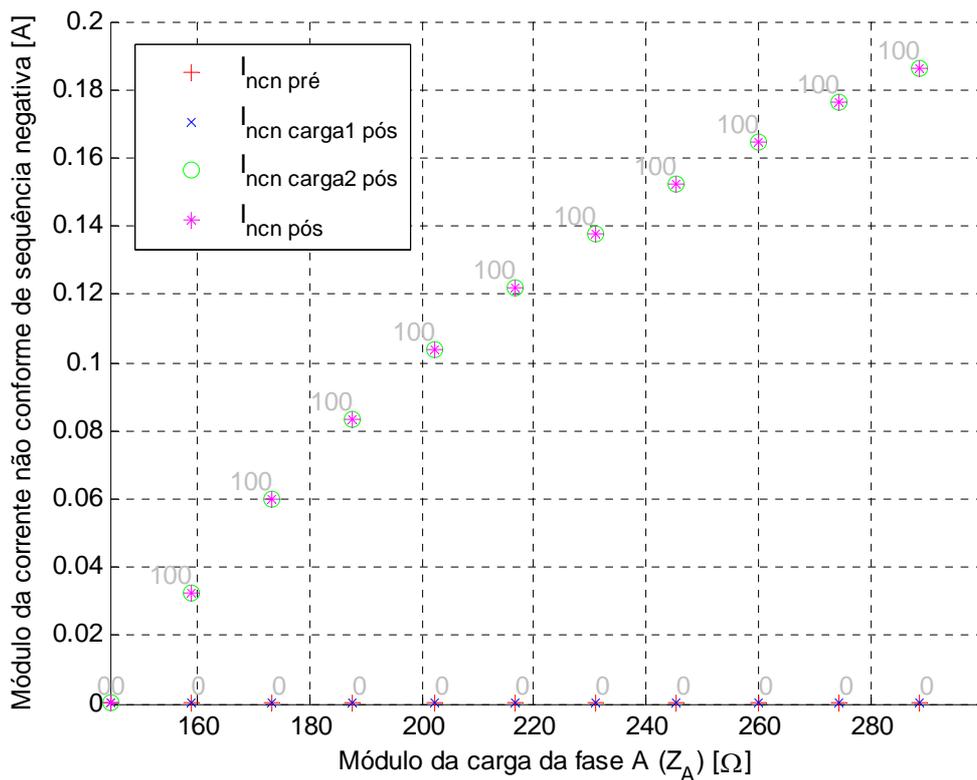


Figura 4.3 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Da Figura 4.1, observa-se que o $VUF_{pós}$ e o VUF_{carga2} aumentam com a mesma magnitude, à medida que o módulo da fase A da impedância da carga 2 é incrementado. Já o $VUF_{pré}$ é constante e igual a 0, confirmando que a carga 1 está equilibrada. O VUF_{carga2} supera o $VUF_{pré}$ em todos os pontos, exceto no ponto em que a carga 2 está equilibrada ($Z_A = 144,4 \Omega$). Percebe-se também que a parcela de responsabilidade da carga 1 é constante e igual a 0, enquanto a da carga 2 é constante e igual a 100%, exceto em $Z_A = 144,4 \Omega$. Confirma-se com isso que a carga 2 é a fonte predominante de desequilíbrio sobre a carga 1.

Da Figura 4.2, pode-se observar que com o incremento no módulo da impedância da fase A da carga 2, a $P_{n\ pós}$ aumenta em módulo em relação à $P_{n\ pré}$, que é constante e igual a 0. Em todos os valores analisados, exceto em $Z_A = 144,4 \Omega$, a $P_{n\ carga2\ pós}$ se mantém negativa, evidenciando que há o fornecimento desta potência ao resto do sistema. Já a $P_{n\ carga1\ pós}$ se mantém positiva para todos os pontos analisados, indicando que essa carga está consumindo parte da potência ativa de sequência negativa gerada pela carga 2, fato que justifica a diferença entre as potências da carga 2 e do sistema pós-conexão. Tanto com base no método do fluxo de potência trifásico, quanto com relação ao método da IEC, percebe-se que a carga 2 é a fonte de desequilíbrio dominante em todos os pontos, exceto naquele em que o sistema está equilibrado.

A menos do ponto onde não existe qualquer incremento, a parcela de responsabilidade da carga 1 é constante e igual a -71%, e a parcela de responsabilidade da carga 2 é fixa e

equivalente a 171%. Isso indica que: (a) a carga 1 absorve uma parcela do desequilíbrio do sistema, o que também pode ser comprovado pelo fato da $P_{n\ carga1\ pós}$ ser positiva; e (b) a carga 2 é a fonte dominante de desequilíbrio, o que ainda pode ser ratificado em decorrência de $P_{n\ carga2\ pós}$ ser negativa. Assim, nota-se que a carga que ficou com o percentual positivo é inteiramente responsável pelo desequilíbrio, pois a parcela de responsabilidade com o valor negativo denota que está havendo absorção do desequilíbrio pela outra carga.

Tanto para o método da IEC quanto para o método do fluxo de potência trifásico, nota-se que quando se incrementa o módulo da fase A da carga 2, ela contribui de forma a aumentar o desequilíbrio total do sistema, pois o $VUF_{pós}$ e a $P_{n\ pós}$ são maiores em módulo que o $VUF_{pré}$ e a $P_{n\ pré}$, respectivamente.

Na Figura 4.3, verifica-se que a $I_{ncn\ pré}$ é constante e igual a 0 A, pois a carga 1 está equilibrada. Já no sistema pós-conexão, à medida que o módulo da fase A da carga 2 é incrementado, observam-se aumentos de mesma magnitude nos valores das correntes $I_{ncn\ carga2\ pós}$ e $I_{ncn\ pós}$, enquanto a $I_{ncn\ carga1\ pós}$ permanece igual a 0. Esses fatos culminam na interpretação de que a carga 1 está equilibrada e o desequilíbrio na carga 2 é crescente e dependente do incremento na impedância da fase A.

Observa-se ainda que a parcela de responsabilidade da carga 1 é constante e igual a 0%, e que a parcela de responsabilidade da carga 2 é fixa e equivalente a 100%, exceto no ponto em que o sistema está equilibrado. Certifica-se com isso que a carga 2 é a fonte preponderante de desequilíbrio do sistema. Por fim, com o incremento no módulo da fase A da carga 2, nota-se que a $I_{ncn\ pós}$ aumenta em relação à $I_{ncn\ pré}$, o que legitima a avaliação do desequilíbrio global do sistema pelos outros dois métodos.

Nota-se também que a $I_{ncn\ carga2\ pós}$ supera a $I_{ncn\ carga1\ pós}$ em todos os pontos, exceto quando $Z_A = 144,4\ \Omega$. Isso demonstra coerência entre os métodos da corrente conforme e não conforme, da IEC e do fluxo de potência trifásico com relação à fonte dominante do desequilíbrio. Essa coesão também pode ser notada em relação à atribuição de responsabilidades das cargas, pois em todos os pontos, salvo em $Z_A = 144,4\ \Omega$, a parcela de responsabilidade da carga 2 é maior que a da carga 1. Ainda, quando o módulo da fase A da carga 2 é aumentado, as parcelas de responsabilidade das cargas não são alteradas em nenhum ponto. Entretanto a magnitude do desequilíbrio é modificada.

4.2.4 – Caso 4 – Carga 1 com variações incrementais e carga 2 equilibrada

Este caso mostra os efeitos sobre os resultados dos métodos da IEC, do fluxo de potência trifásico, e da corrente conforme e não conforme, decorrentes dos incrementos de 0 a 100% no módulo da fase A da impedância da carga 1, quando a carga 2 está equilibrada. Os resultados dos mencionados métodos estão expostos, respectivamente, nas Figuras 4.4 a 4.6.

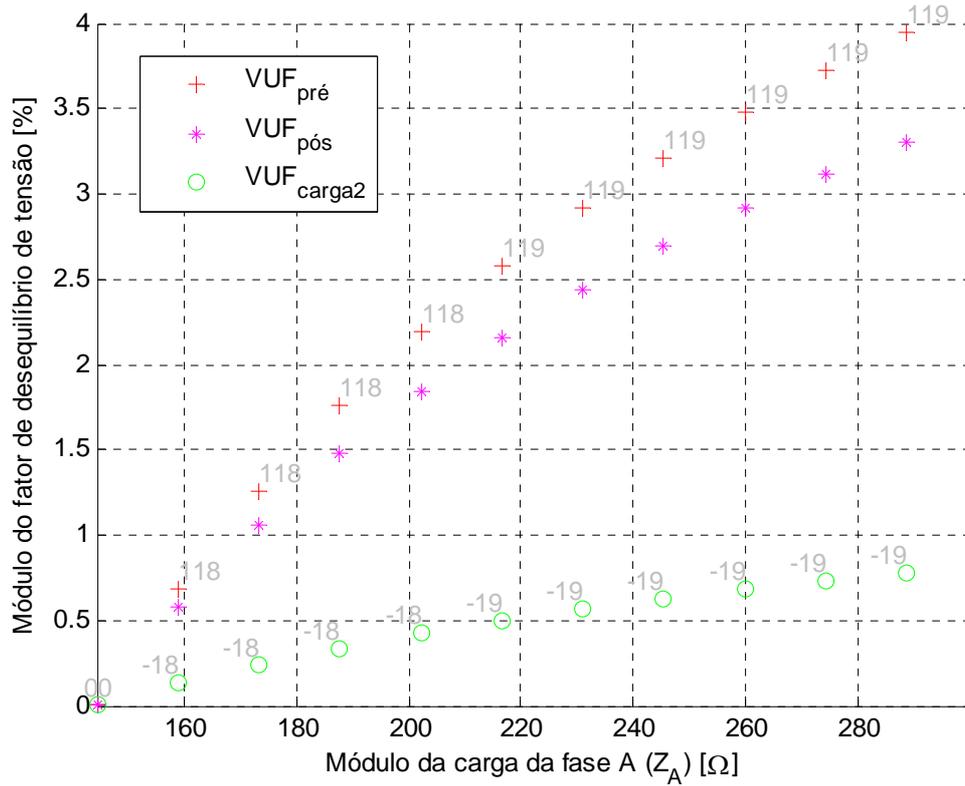


Figura 4.4 – Resultados do método da IEC.

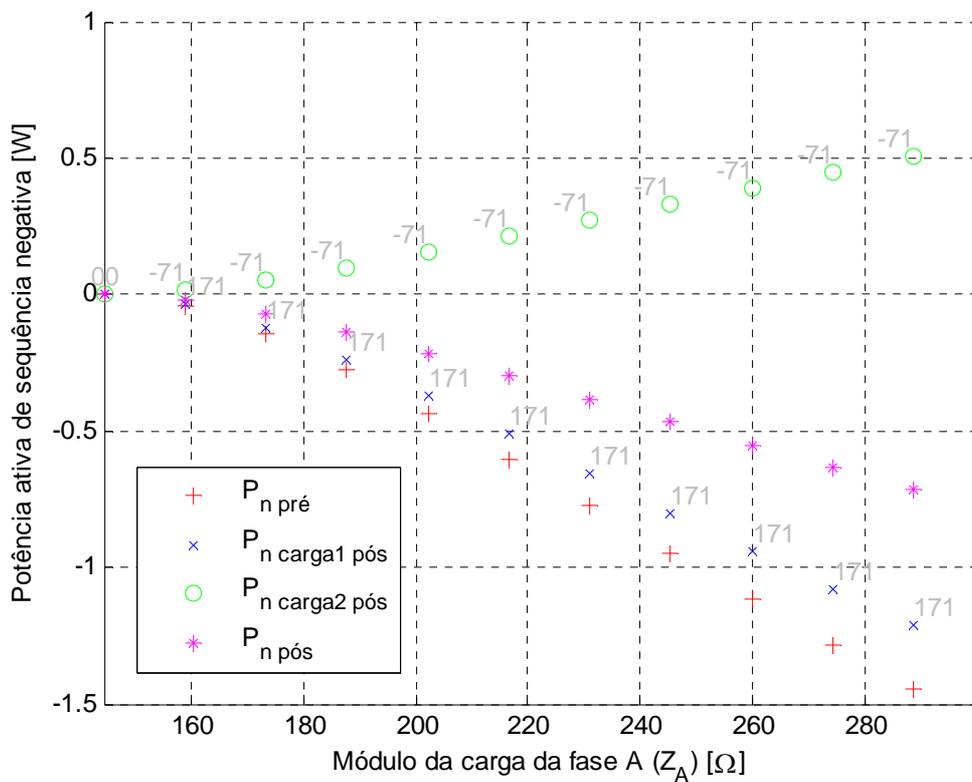


Figura 4.5 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

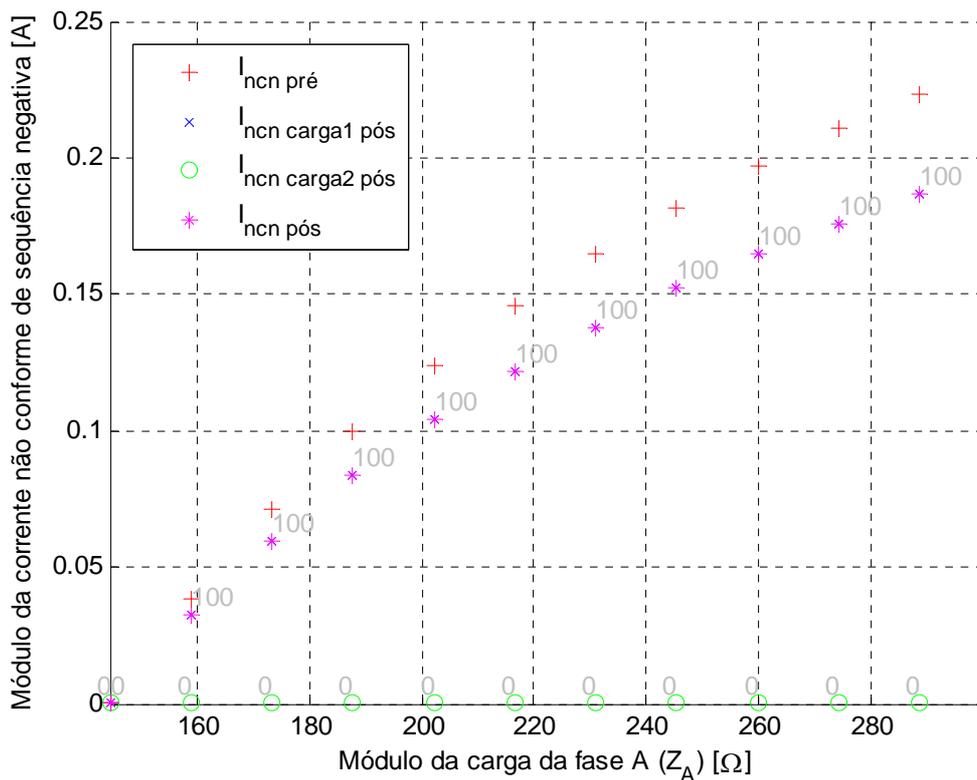


Figura 4.6 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Da Figura 4.4 observa-se que, exceto no ponto em que a carga 1 está equilibrada ($Z_A = 144,4 \Omega$), o $VUF_{pré}$ é superior ao $VUF_{pós}$ em todos pontos do gráfico. Estes dois índices aumentam à medida que o módulo da fase A da impedância da carga 1 é incrementado. O $VUF_{pré}$ também é superior ao VUF_{carga2} em todos pontos, menos no ponto em que o sistema está equilibrado. Nota-se que quando se insere a carga 2 equilibrada, ela contribui de forma a diminuir o desequilíbrio total do sistema, visto que o $VUF_{pós}$ é sempre menor que o $VUF_{pré}$. Quanto mais desequilibrada se torna a carga 1, maior é o valor do VUF_{carga2} no sistema pós-conexão. Esse fato representa uma inexatidão do método decorrente de sua formulação matemática. Como a carga 2 está equilibrada, o VUF_{carga2} deveria ser sempre constante e igual a 0, independentemente da variação da carga 1. Exceto em $Z_A = 144,4 \Omega$, percebe-se que a parcela de responsabilidade da carga 1 varia entre 118% e 119%, e que a parcela de responsabilidade da carga 2 alterna entre -18% e -19%. Isso indica que a carga 1 é a fonte predominante de desequilíbrio, e que a carga 2 consome parte do desequilíbrio do sistema, o que pode ser corroborado pelo fato do $VUF_{pós}$ ser inferior ao $VUF_{pré}$.

Da Figura 4.5, verifica-se que para o aumento no módulo da fase A da carga 1, a $P_{n\ pré}$ é superior em módulo a $P_{n\ pós}$, exceto em $Z_A = 144,4 \Omega$. O mesmo ocorreu quando da aplicação do método da IEC. Na medida em que há o incremento no módulo da fase A da carga 1, a $P_{n\ carga1\ pós}$ se mantém negativa, evidenciando que há o fornecimento desta potência ao resto do sistema. Já a $P_{n\ carga2\ pós}$ permanece positiva, indicando que essa

carga está consumindo parte da potência ativa de sequência negativa gerada pela carga 1, fato que justifica a diferença entre as potências da carga 1 e do sistema pós-conexão. Tanto para o método do fluxo de potência trifásico, quanto para o método da IEC, percebe-se que a carga 1 é a fonte de desequilíbrio dominante. Portanto, os resultados dos valores das potências ativas de sequência negativa das cargas 1 e 2 estão coerentes com os respectivos resultados encontrados com o emprego do método da IEC.

Salvo o ponto em que não existe qualquer incremento, a parcela de responsabilidade da carga 2 é constante e igual a -71%, e a parcela de responsabilidade da carga 1 é fixa e equivalente a 171%. Isso indica que: (a) a carga 2 absorve uma parcela do desequilíbrio do sistema, o que também pode ser comprovado pelo fato da $P_{n\text{ carga}2\text{ pós}}$ ser positiva; e (b) a carga 1 é a fonte dominante de desequilíbrio, o que ainda pode ser ratificado considerando-se que $P_{n\text{ carga}1\text{ pós}}$ é sempre negativa. Desta forma, observa-se que a carga que ficou com o percentual positivo é totalmente responsável pelo desequilíbrio, pois a parcela de responsabilidade com o valor negativo representa que está havendo absorção do desequilíbrio pela outra carga.

Na Figura 4.6, nota-se que a $I_{ncn\text{ pré}}$ é crescente. À medida que o módulo da fase A da carga 1 é incrementado, observa-se que as correntes $I_{ncn\text{ carga}1\text{ pós}}$ e $I_{ncn\text{ pós}}$ crescem com a mesma magnitude, enquanto que a $I_{ncn\text{ carga}2\text{ pós}}$ permanece constante e igual a 0. Esse comportamento permite concluir que a carga 2 encontra-se equilibrada e a carga 1 possui um desequilíbrio crescente e dependente do incremento na impedância da fase A.

Observa-se ainda que a parcela de responsabilidade da carga 2 é constante e igual a 0%, e que a parcela de responsabilidade da carga 1 é fixa e equivalente a 100%, exceto no ponto em que o sistema está equilibrado. Certifica-se com isso que a carga 1 é a fonte preponderante de desequilíbrio do sistema. Por fim, com o incremento no módulo da fase A da carga 1, nota-se que a $I_{ncn\text{ pré}}$ aumenta em relação à $I_{ncn\text{ pós}}$, o que legitima a avaliação do desequilíbrio global do sistema pelos outros dois métodos.

Nota-se também que a $I_{ncn\text{ carga}1\text{ pós}}$ supera a $I_{ncn\text{ carga}2\text{ pós}}$ em todos os pontos, exceto quando $Z_A = 144,4 \Omega$. Isso demonstra coerência entre os métodos da corrente conforme e não conforme, da IEC e do fluxo de potência trifásico com relação à fonte dominante do desequilíbrio. Essa coesão também pode ser notada em relação à atribuição de responsabilidades das cargas, pois em todos os pontos, salvo em $Z_A = 144,4 \Omega$, a parcela de responsabilidade da carga 1 é maior que a da carga 2. Ainda, quando o módulo da fase A da carga 1 é aumentado, as parcelas de responsabilidade das cargas não são alteradas em praticamente nenhum ponto. Entretanto a magnitude do desequilíbrio é modificada.

4.2.5 – Caso 5 – Carga 1 com desequilíbrio fixo e carga 2 com variações incrementais

Este caso mostra a evolução dos efeitos dos incrementos no módulo da impedância da carga da fase A sobre os métodos, quando a carga 1 possui desequilíbrio constante e a carga 2 é desequilibrada com incremento de 0 a 100% no módulo da fase A. Os resultados

dos métodos da IEC, do fluxo de potência trifásico, e da corrente conforme e não conforme, respectivamente, estão expostos nas Figuras 4.7 a 4.9.

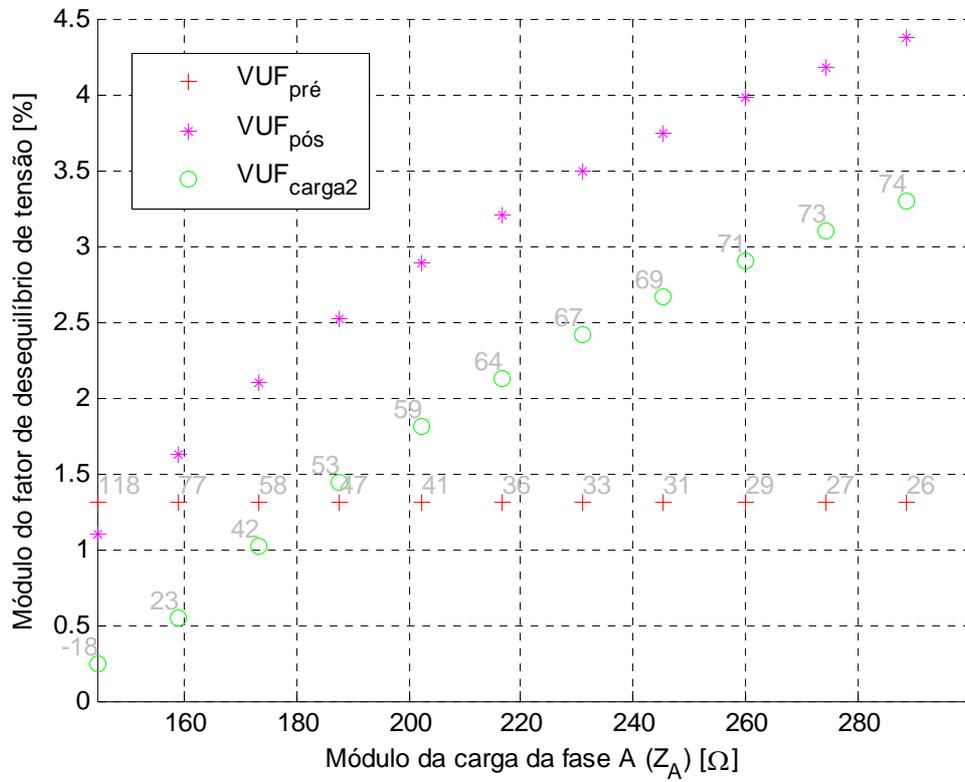


Figura 4.7 – Resultados do método da IEC.

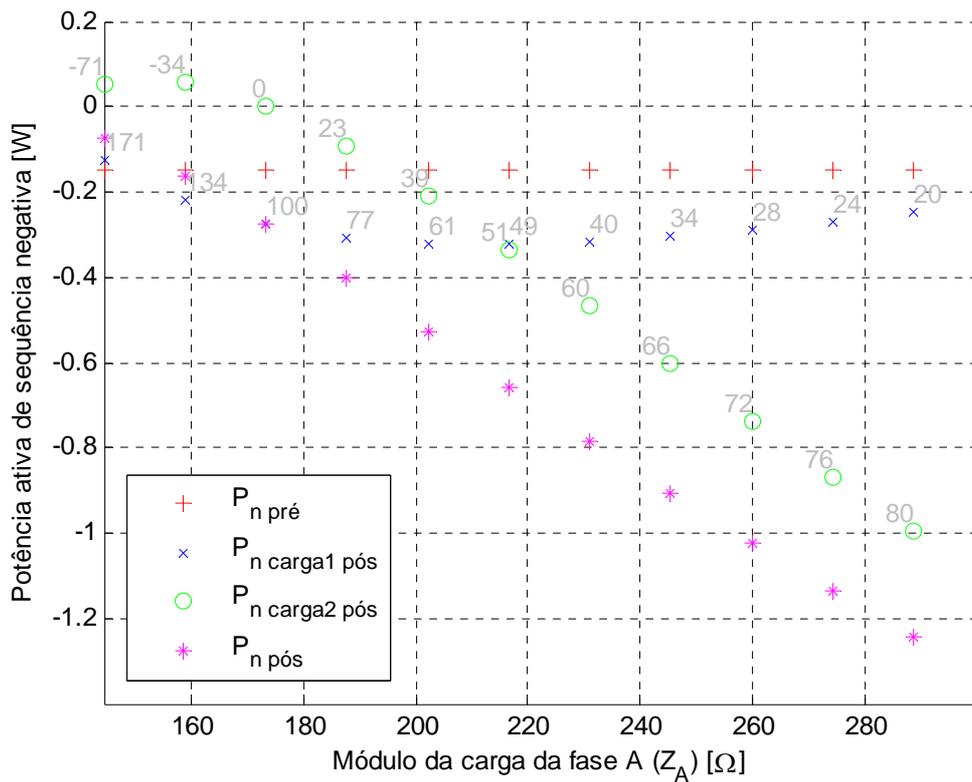


Figura 4.8 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

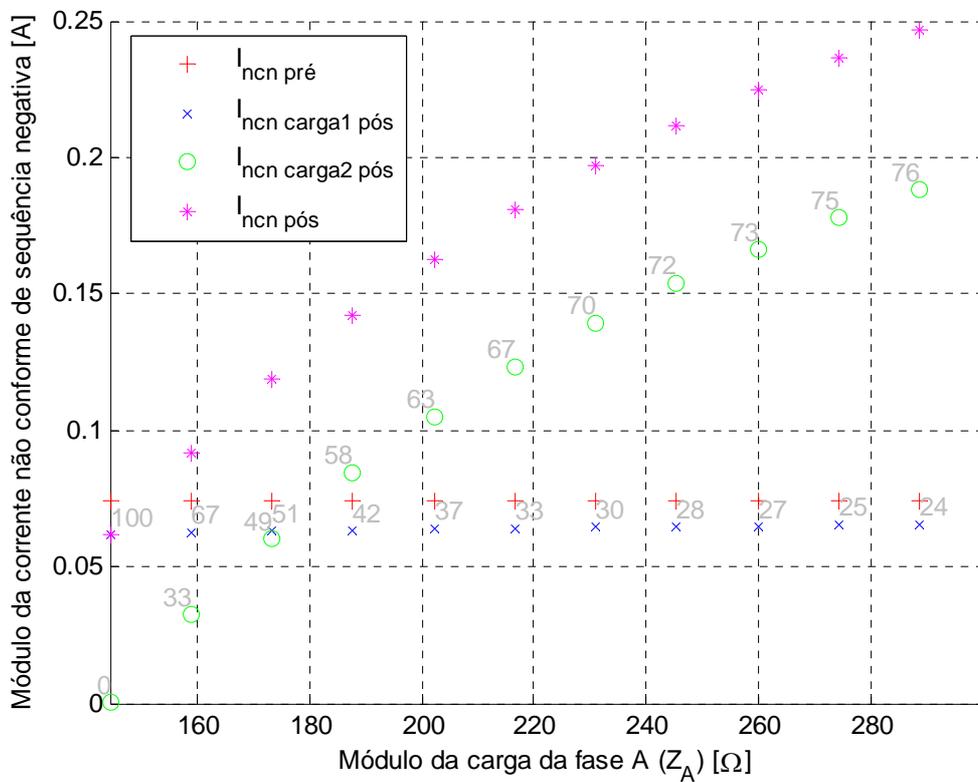


Figura 4.9 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Da Figura 4.7, observa-se que o $VUF_{pós}$ e o VUF_{carga2} aumentam à medida que o módulo da fase A da impedância da carga 2 é incrementado. Já o $VUF_{pré}$ é constante e igual a 1,3066%, pois os parâmetros iniciais da simulação não foram modificados. O VUF_{carga2} supera o $VUF_{pré}$ antes do 3º incremento, quando o valor da carga 2 é aproximadamente igual a 183 Ω . Para o primeiro ponto da simulação ($Z_A = 144,4 \Omega$), que conta com a presença no sistema da carga 1 desequilibrada e da carga 2 equilibrada, o VUF_{carga2} é igual a 0,25%, quando ele deveria ser 0. Isso é resultado de uma inexatidão do método decorrente de sua formulação matemática. Na medida em que a carga 2 é desequilibrada, o VUF_{carga2} apresenta uma incoerência oriunda do fato do valor inicial ser igual a 0,25%. Com relação à análise das parcelas de responsabilidade, nota-se para a condição inicial onde não há contribuição da carga 2, parcelas iguais a 118% para a carga 1 e -18% para a carga 2. Isso significa que a carga 1 é a fonte de desequilíbrio predominante, e que a carga 2 consome parte do desequilíbrio do sistema. Isso é corroborado pelo fato do $VUF_{pós}$ ser inferior ao $VUF_{pré}$ neste ponto. Percebe-se também que a parcela de responsabilidade da carga 1 é decrescente, enquanto a da carga 2 é crescente. Confirma-se com isso que a carga 2 torna-se a fonte predominante de desequilíbrio sobre a carga 1 pouco antes do 3º incremento.

Da Figura 4.8, pode-se observar que com o incremento no módulo da impedância da fase A da carga 2, a $P_{n\ pós}$ aumenta em módulo em relação à $P_{n\ pré}$, e a $P_{n\ carga1\ pós}$ se mantém negativa em todos os valores analisados. A $P_{n\ carga2\ pós}$ inicia-se com um valor positivo igual a 0,0525 W, e torna-se 0 no 2º incremento ($Z_A = 173,28 \Omega$). Com base no método do fluxo de potência trifásico, percebe-se que a carga 1 é a fonte de desequilíbrio dominante até o 5º incremento ($Z_A = 216,6 \Omega$). Porém, pelo método da IEC, a carga 1 é a fonte de desequilíbrio preponderante até pouco mais do 2º incremento ($Z_A \cong 183 \Omega$).

Com relação ao método do fluxo de potência trifásico, observa-se ainda que só é possível identificar que ambas as cargas estão desequilibrando o sistema logo após o 2º incremento ($Z_A = 173,28 \Omega$). Na verdade, somente após o 2º incremento, tanto a $P_{n\ carga1\ pós}$ e a $P_{n\ carga2\ pós}$ são negativas. Esse acontecimento aponta uma falha do método, pois a menos da primeira condição simulada ($Z_A = 144,4 \Omega$) em que a carga 2 está equilibrada, as duas cargas encontram-se desequilibradas.

No ponto em que a carga 2 está equilibrada e no 1º incremento, a parcela de responsabilidade da carga 2 varia entre -71% e -34%, e a parcela de responsabilidade da carga 1 alterna-se entre 171% e 134%. Isso indica que (a) a carga 2 absorve uma parcela do desequilíbrio do sistema, o que também pode ser comprovado pelo fato da $P_{n\ carga2\ pós}$ ser positiva, e (b) a carga 1 é a fonte dominante de desequilíbrio, o que ainda pode ser ratificado em decorrência de $P_{n\ carga1\ pós}$ ser negativa. Dessarte, nota-se que a carga que ficou com o percentual positivo é completamente responsável pelo desequilíbrio, pois a parcela de responsabilidade com o valor negativo evidencia que está havendo absorção do desequilíbrio pela outra carga.

Da Figura 4.8, é possível observar também que a parcela de responsabilidade da carga 2 é crescente, e que a parcela de responsabilidade da carga 1 é decrescente.

Analisando-se o ponto em que não há qualquer incremento ($Z_A = 144,4 \Omega$), pode-se concluir que, tanto para o método da IEC quanto para o método do fluxo de potência trifásico, quando se insere a carga 2 (inicialmente equilibrada), ela contribui de forma a diminuir o desequilíbrio total do sistema, pois o $VUF_{pós}$ e a $P_{n\ pós}$ são menores em módulo que o $VUF_{pré}$ e a $P_{n\ pré}$, respectivamente.

Na Figura 4.9, nota-se que a $I_{ncn\ pré}$ é constante e igual a 0,0738 A, pois a carga 1 possui desequilíbrio fixo. Já no sistema pós-conexão, à medida que o módulo da fase A da carga 2 é incrementado, observam-se aumentos nos valores das correntes $I_{ncn\ carga2\ pós}$ e $I_{ncn\ pós}$. Esses acréscimos culminam na interpretação de que o desequilíbrio na carga 1 é constante e o desequilíbrio na carga 2 é crescente e dependente do incremento na impedância da fase A.

Observa-se ainda que a parcela de responsabilidade da carga 1 é decrescente, e que a parcela de responsabilidade da carga 2 é crescente. Certifica-se com isso que a carga 2 torna-se a fonte preponderante de desequilíbrio do sistema quando $Z_A \cong 175 \Omega$. Por fim, com o incremento no módulo da fase A da carga 2, nota-se que a $I_{ncn\ pós}$ aumenta em relação à $I_{ncn\ pré}$, o que legitima a avaliação do desequilíbrio global do sistema pelos outros dois métodos.

Nota-se também que o ponto no qual $I_{ncn\ carga2\ pós}$ supera $I_{ncn\ carga1\ pós}$ ($Z_A \cong 175 \Omega$) é relativamente próximo do ponto no qual VUF_{carga2} supera $VUF_{pré}$ ($Z_A \cong 183 \Omega$). Isso demonstra coerência entre os métodos da corrente conforme e não conforme e da IEC com relação à fonte dominante do desequilíbrio, e contraria o método do fluxo de potência trifásico, que indica que a carga 2 é a fonte de desequilíbrio predominante sobre a carga 1 a partir do 5º incremento ($Z_A = 216,6 \Omega$).

Uma comparação entre os três métodos permite concluir que o método da corrente conforme e não conforme é o mais preciso, pois a $I_{ncn\ carga2\ pós}$ começa com o valor adequado, ou seja, inicia-se valendo 0 no ponto em que a carga 2 está equilibrada ($Z_A = 144,4 \Omega$), e a partir daí cresce à medida que a carga 2 é incrementada. Além disso, a $I_{ncn\ carga1\ pós}$ mantém-se praticamente constante evidenciando que o desequilíbrio causado pela carga 1 é fixo.

Por fim, ao analisar cada método individualmente, nota-se que houve coerência com relação à atribuição de responsabilidades das cargas, pois o valor da parcela de responsabilidade da carga 2 tornou-se superior ao valor da parcela de responsabilidade da carga 1 nos mesmos pontos do gráfico em que a grandeza elétrica relativa a carga 2 superou a grandeza elétrica referente a carga 1.

4.2.6 – Caso 6 – Carga 1 com variações incrementais e carga 2 com desequilíbrio fixo

Este item apresenta os resultados decorrentes dos incrementos de 0 a 100% no módulo da fase A da impedância da carga 1, quando a carga 2 possui desequilíbrio constante. Os resultados dos mencionados métodos estão expostos, respectivamente, nas Figuras 4.10 a 4.12.

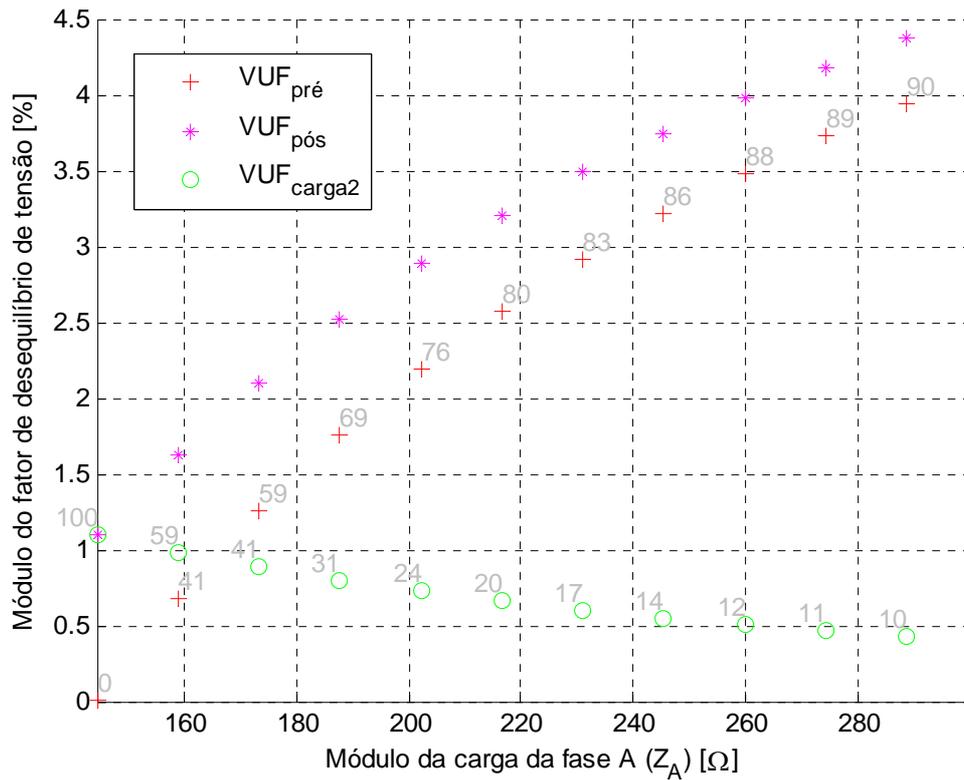


Figura 4.10 – Resultados do método da IEC.

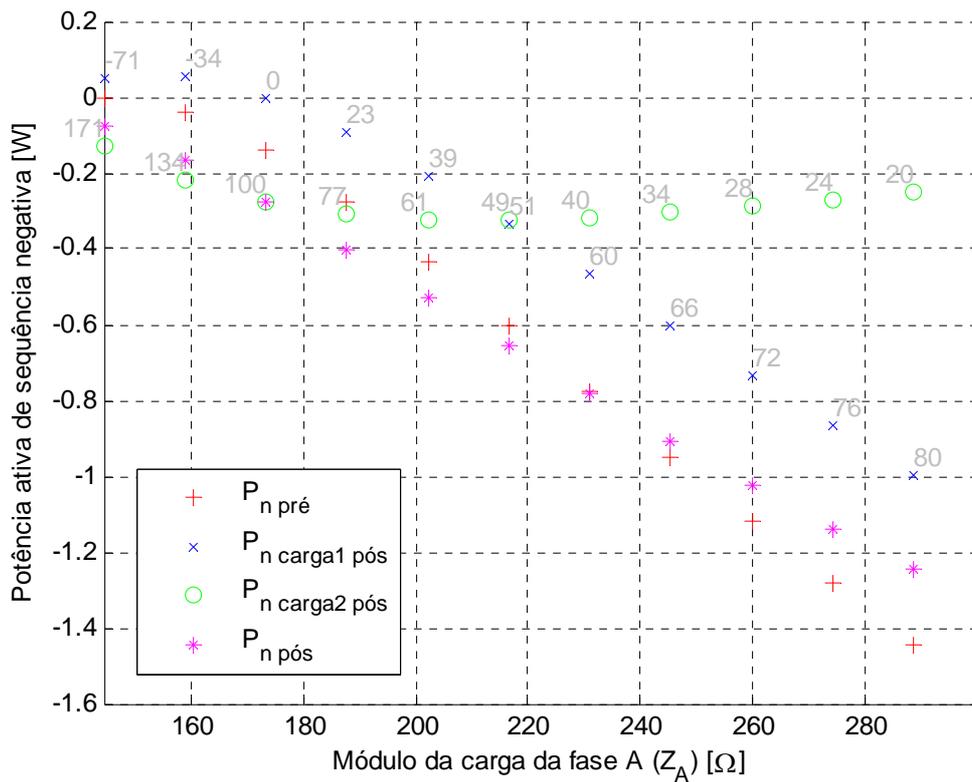


Figura 4.11 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

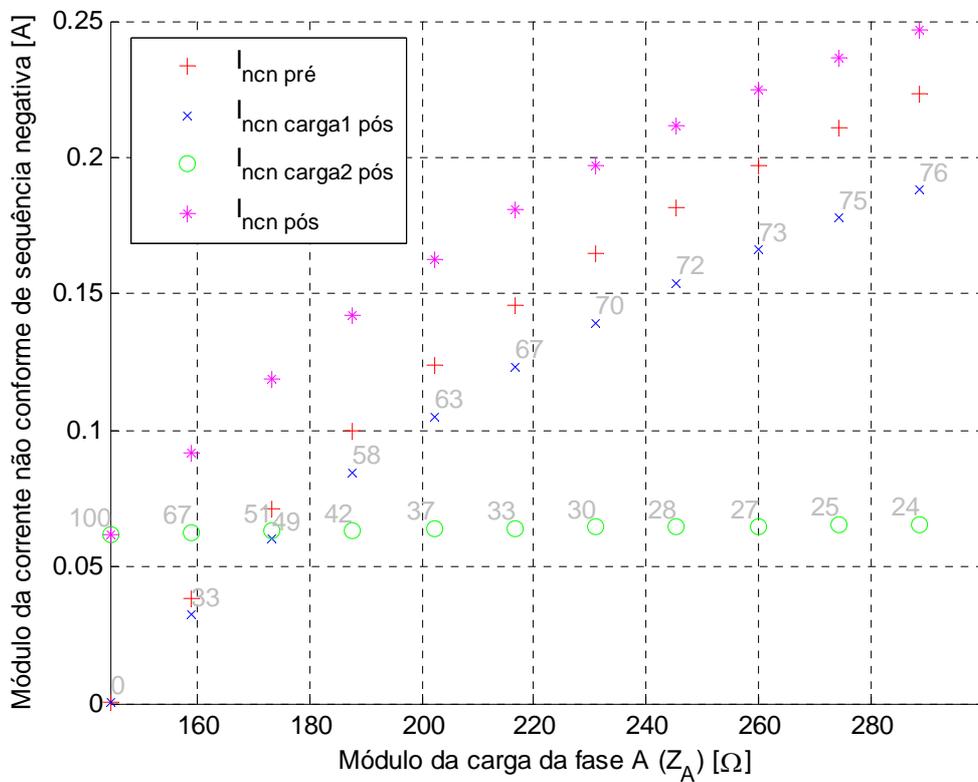


Figura 4.12 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Da Figura 4.10, observa-se que o $VUF_{pós}$ é superior ao $VUF_{pré}$ em todos pontos do gráfico. Estes dois índices aumentam à medida que o módulo da fase A da impedância da carga 1 é incrementado. O VUF_{carga2} é superior ao $VUF_{pré}$ até pouco depois do 1º incremento ($Z_A \cong 165 \Omega$). Quanto mais desequilibrada se torna a carga 1, menor é o valor do VUF_{carga2} no sistema pós-conexão. Esse fato representa uma inexatidão do método decorrente de sua formulação matemática. Como a carga 2 possui desequilíbrio fixo, o VUF_{carga2} deveria ser sempre constante, independentemente da variação da carga 1. Percebe-se também que a parcela de responsabilidade da carga 1 é crescente, e a parcela de responsabilidade da carga 2 é decrescente. Confirma-se com isso que a carga 2 é a fonte predominante de desequilíbrio até pouco mais do 1º incremento.

Da Figura 4.11, verifica-se que mesmo com o aumento no módulo da fase A da carga 1, a $P_n\ pós$ é superior em módulo a $P_n\ pré$ até o 6º incremento ($Z_A = 231 \Omega$). Pelo método da IEC, constatou-se que o $VUF_{pós}$ é superior ao $VUF_{pré}$ para todas as condições em avaliação. Na medida em que há o incremento no módulo da fase A da carga 1, a $P_n\ carga2\ pós$ se mantém negativa. Já a $P_n\ carga1\ pós$ inicia-se com um valor positivo, aumenta no 1º incremento ($Z_A = 158,8 \Omega$), e torna-se 0 no 2º incremento ($Z_A = 173,28 \Omega$), de forma que a partir desse valor, ela passa a ser negativa. Para o método do fluxo de potência trifásico, percebe-se que a carga 2 é a fonte de desequilíbrio dominante até o 5º incremento ($Z_A = 216,6 \Omega$), enquanto que no método da IEC, a carga 2 é a fonte de desequilíbrio preponderante até pouco mais do 1º incremento ($Z_A \cong 165 \Omega$). Portanto, os resultados dos valores das potências ativas de sequência negativa das cargas 1 e 2 não estão coerentes com os respectivos resultados encontrados com o emprego do método da IEC.

Com relação ao método do fluxo de potência trifásico, observa-se ainda no sistema pós-conexão, que só é possível identificar que ambas as cargas estão desequilibrando o sistema, logo após o 2º incremento ($Z_A = 173,28 \Omega$). Na verdade, somente após o 2º incremento, tanto a $P_n\ carga1\ pós$ e a $P_n\ carga2\ pós$ são negativas. Esse acontecimento aponta uma falha do método, uma vez que, com exceção da primeira condição analisada em que a carga 1 está equilibrada, as duas cargas encontram-se desequilibradas.

No ponto em que a carga 1 está equilibrada e no 1º incremento, a parcela de responsabilidade da carga 1 varia entre -71% e -34%, e a parcela de responsabilidade da carga 2 alterna-se entre 171% e 134%. Isso indica que (a) a carga 1 absorve uma parcela do desequilíbrio do sistema, o que também pode ser comprovado pelo fato da $P_n\ carga1\ pós$ ser positiva, e (b) a carga 2 é a fonte dominante de desequilíbrio, o que ainda pode ser ratificado em decorrência de $P_n\ carga2\ pós$ ser negativa. Desta maneira, observa-se que a carga que ficou com o percentual positivo é totalmente responsável pelo desequilíbrio, pois a parcela de responsabilidade com o valor negativo demonstra que está havendo absorção do desequilíbrio pela outra carga.

Da Figura 4.11, é possível observar também que a parcela de responsabilidade da carga 1 é crescente, e que a parcela de responsabilidade da carga 2 é decrescente.

Na Figura 4.12, nota-se que a $I_{ncn\ pré}$ é crescente. À medida que o módulo da fase A da carga 1 é incrementado, observa-se que as correntes $I_{ncn\ carga1\ pós}$ e a $I_{ncn\ pós}$ crescem, enquanto que a $I_{ncn\ carga2\ pós}$ permanece praticamente constante. Esse comportamento pode ser interpretado como desequilíbrio constante na carga 2 e desequilíbrio crescente e dependente do incremento na impedância da fase A na carga 1.

Observa-se ainda que a parcela de responsabilidade da carga 2 é decrescente, e que a parcela de responsabilidade da carga 1 é crescente. Certifica-se com isso que a carga 1 torna-se a fonte preponderante de desequilíbrio do sistema quando $Z_A \cong 175 \Omega$. Por fim, com o incremento no módulo da fase A da carga 1, nota-se que a $I_{ncn\ pós}$ aumenta em relação à $I_{ncn\ pré}$, o que legitima a avaliação do desequilíbrio global do sistema apenas pelo método da IEC.

Nota-se também que o ponto no qual $I_{ncn\ carga1\ pós}$ supera $I_{ncn\ carga2\ pós}$ ($Z_A \cong 175 \Omega$) é relativamente próximo do ponto no qual $VUF_{pré}$ supera VUF_{carga2} ($Z_A \cong 165 \Omega$). Isso demonstra coerência entre os métodos da corrente conforme e não conforme e da IEC com relação à fonte dominante do desequilíbrio, e contraria o método do fluxo de potência trifásico, que indica que a carga 1 é a fonte de desequilíbrio predominante sobre a carga 2, a partir do 5º incremento ($Z_A = 216,6 \Omega$).

Uma comparação entre os três métodos permite concluir que o método da corrente conforme e não conforme é o mais preciso, pois a $I_{ncn\ carga1\ pós}$ inicia-se com o valor adequado, ou seja, igual a 0 ($Z_A = 144,4 \Omega$), e a partir daí ela cresce à medida que a carga 1 é incrementada. Além disso, a $I_{ncn\ carga2\ pós}$ mantém-se praticamente constante evidenciando que o desequilíbrio causado pela carga 2 é fixo.

Por fim, ao analisar cada método individualmente, nota-se que houve coerência com relação à atribuição de responsabilidades das cargas, pois o valor da parcela de responsabilidade da carga 1 tornou-se superior ao valor da parcela de responsabilidade da carga 2 nos mesmos pontos do gráfico em que a grandeza elétrica relativa a carga 1 superou a grandeza elétrica referente a carga 2.

4.3 – ANÁLISE DOS CASOS LABORATORIAIS

A seguir, são exibidos os 3 casos laboratoriais selecionados e seus principais resultados.

4.3.1 – Caso 1 – Cargas com desequilíbrios parecidos

Este caso visa analisar os efeitos dos métodos para a situação em que se tem a carga 1 com desequilíbrio semelhante ao desequilíbrio da carga 2. As Tabelas 4.7, 4.8 e 4.9 expõem os resultados dos métodos da IEC, do fluxo de potência trifásico, e da corrente conforme e não conforme, respectivamente.

Tabela 4.7 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
4,2660∠ – 107,9154	6,9283∠ – 112,8359	2,7029∠ – 120,6162
$pcVUF_{pré}$		61,3464%
$pcVUF_{carga2}$		38,6536%

Tabela 4.8 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n pré$	$P_n carga1 pós$	$P_n carga2 pós$	$P_n pós$
-0,9929	-0,9270	-0,8798	-1,8068
$pcP_n carga1 pós$			51,3081%
$pcP_n carga2 pós$			48,6919%

Tabela 4.9 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn pré}$	$\bar{I}_{ncn carga1 pós}$	$\bar{I}_{ncn carga2 pós}$	$\bar{I}_{ncn pós}$
0,1888∠0,9151	0,1607∠ – 3,5825	0,1557∠ – 3,2956	0,3164∠ – 3,4413
$pci_{ncn carga1 pós}$	50,7916%		
$pci_{ncn carga2 pós}$	49,2084%		

Os resultados do método da IEC evidenciam um $\overline{VUF}_{pré}$ de 4,2660%, conforme Tabela 4.7. Depois da conexão da segunda carga, similarmente desbalanceada, o $\overline{VUF}_{pós}$ passa a ser 6,9283%, que é aproximadamente 1,62 vezes o $\overline{VUF}_{pré}$, denotando que quando a carga 2 foi conectada, o sistema ficou mais desequilibrado. O \overline{VUF}_{carga2} vale 2,7029%. Nota-se que esse valor é menor que o $\overline{VUF}_{pré}$, caracterizando uma imprecisão. Esse erro acontece pelo fato da carga 2 não ser exatamente igual à carga 1, e também pelo fato da linha estar levemente desequilibrada. Essa falha também ocorre devido à formulação matemática do método, pois o \overline{VUF}_{carga2} é calculado com base no módulo da diferença de dois vetores que não estão na mesma direção, na maioria das vezes. Pode-se dizer que o fato do $\overline{VUF}_{pré}$ ser 1,58 vezes maior do que o \overline{VUF}_{carga2} , indica que a carga 1 é a fonte de desequilíbrio dominante sobre a carga 2. Isso pode ser ainda observado nos resultados das parcelas de

responsabilidades. Ao passo que a parcela de responsabilidade da carga 1 é igual a 61,3464%, a da carga 2 é igual a 38,6536%.

Nota-se na Tabela 4.8 para o sistema pré-conexão, com relação ao método do fluxo da potência trifásica, uma potência de sequência negativa igual a -0,9929 W, comprovando que a carga 1 está desequilibrada. Após a conexão da carga 2, o método mostra que as duas cargas estão fornecendo potência de sequência negativa igual a -0,9270 W para a carga 1, e -0,8798 W para carga 2. Como esses valores possuem sinais negativos, o sentido dessas potências é das cargas para o sistema, o que sinaliza que o desequilíbrio é proveniente destas duas cargas. O fato da parcela de responsabilidade da carga 1 ser igual a 51,3081% e da carga 2 ser igual a 48,6919% certifica que o desequilíbrio entre elas é similar, apesar da carga 1 ser a fonte predominante de desequilíbrio. Depois da conexão da carga 2, percebe-se que o sistema fica mais desequilibrado, pois a $P_{n\ pós}$ é maior em módulo que a $P_{n\ pré}$.

Na Tabela 4.9, observa-se que o método das correntes conforme e não conforme aponta que a carga 1 está desequilibrada ao apresentar um valor diferente de 0 para a corrente não conforme de sequência negativa do sistema pré-conexão. Ainda da Tabela 4.9, nota-se no sistema pós-conexão, que a carga 1 possui um valor de corrente não conforme pouco maior que o valor da carga 2, demonstrando que os desequilíbrios derivados de cada carga são próximos entre si. As parcelas de responsabilidade exibem 50,7916% para a carga 1 e 49,2084% para a carga 2, assinalando que apesar da semelhança, a carga 1 é a fonte dominante de desequilíbrio. A $I_{ncn\ pós}$ é maior que a $I_{ncn\ pré}$, evidenciando que o desequilíbrio total no sistema pós-conexão é maior do que no sistema pré-conexão. Conclui-se com isso, que com relação à fonte predominante de desequilíbrio, este método está de acordo com o resultado oriundo do método do fluxo de potência trifásico, e também com o resultado proveniente do método da IEC.

Todos os resultados dessa análise são coerentes com os resultados da análise computacional do caso 2.

4.3.2 – Caso 2 – Carga 1 com incremento no módulo da fase A e carga 2 aproximadamente equilibrada

Este caso apresenta os resultados dos métodos da IEC, do fluxo de potência trifásico, e da corrente conforme e não conforme, decorrente do incremento de aproximadamente 48% no módulo da fase A da impedância da carga 1, quando a carga 2 está aproximadamente equilibrada. Os resultados dos mencionados métodos estão expostos, respectivamente, nas Tabelas 4.10, 4.11 e 4.12.

Tabela 4.10 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
2,2503∠1,5930	2,1861∠ – 11,6590	0,5159∠ – 102,1309
$pcVUF_{pré}$		100,1944%
$pcVUF_{carga2}$		-0,1944%

Tabela 4.11 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n pré$	$P_n carga1 pós$	$P_n carga2 pós$	$P_n pós$
-0,8857	-0,8221	0,1576	-0,6645
$pcP_n carga1 pós$			123,7256%
$pcP_n carga2 pós$			-23,7256%

Tabela 4.12 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn pré}$	$\bar{I}_{ncn carga1 pós}$	$\bar{I}_{ncn carga2 pós}$	$\bar{I}_{ncn pós}$
0,1189∠135,5938	0,1049∠129,9219	0,0009∠ – 164,4212	0,1053∠130,3916
$pcI_{ncn carga1 pós}$	99,6224%		
$pcI_{ncn carga2 pós}$	0,3776%		

Da Tabela 4.10, verifica-se que os resultados do método da IEC apontam um $VUF_{pré}$ de 2,2503%. Após a conexão da segunda carga, aproximadamente equilibrada, o $VUF_{pós}$ passa a ser 2,1861%, que é menor que o valor do $VUF_{pré}$. Isso indica que quando a carga 2 foi conectada, o sistema ficou menos desequilibrado. O VUF_{carga2} é igual a 0,5159%. Percebe-se que esse valor é menor que o $VUF_{pré}$, caracterizando que o desequilíbrio causado por essa carga é menor que aquele causado pela primeira carga. Pode-se concluir que o fato do $VUF_{pré}$ ser 4,36 vezes maior do que o VUF_{carga2} , indica que a carga 1 é a fonte dominante de desequilíbrio. Isso pode ser ainda observado nos resultados das parcelas de responsabilidades. Enquanto a parcela de responsabilidade da carga 1 é igual a 100,1944%, a da carga 2 é igual a -0,1944%, apontando também que a carga 2 consome parte do desequilíbrio do sistema, o que pode ser corroborado pelo fato do $VUF_{pós}$ ser inferior ao $VUF_{pré}$. O valor do VUF_{carga2} deveria ser mais próximo de zero. Isso não

ocorre porque há uma imprecisão do método causada por sua formulação matemática. Além disso, a carga 2 e a linha estão levemente desequilibradas.

Com relação ao método do fluxo da potência trifásica, nota-se na Tabela 4.11 para o sistema pré-conexão, uma potência de sequência negativa igual a $-0,8857$ W, demonstrando que a carga 1 está desequilibrada. No sistema pós-conexão, o método indica que a carga 1 é a fonte de desequilíbrio para o sistema, e que a carga 2 está absorvendo uma fração do desequilíbrio do sistema, pois a potência de sequência negativa é igual a $-0,8221$ W para a carga 1, e $0,1576$ W para a carga 2. O fato da parcela de responsabilidade da carga 1 ser $123,7256\%$ e da carga 2 ser $-23,7256\%$ confirma que a carga 1 é a fonte preponderante de desequilíbrio, e que a carga 2 absorve uma fração do desequilíbrio. Observa-se que a carga que ficou com o percentual positivo é totalmente responsável pelo desequilíbrio, pois a parcela de responsabilidade com o valor negativo representa que está havendo absorção do desequilíbrio pela outra carga. Após a conexão da carga 2, percebe-se que o sistema fica menos desequilibrado, pois a $P_{n\ pós}$ é menor em módulo que a $P_{n\ pré}$.

O método das correntes conforme e não conforme indica que a carga 1 está desequilibrada ao apresentar um valor diferente de 0 para a corrente não conforme de sequência negativa do sistema pré-conexão, como pode ser observado na Tabela 4.12. Nota-se ainda que no sistema pós-conexão, a carga 1 possui um valor de corrente não conforme bem maior que o valor da carga 2, demonstrando que os desequilíbrios derivados de cada carga são muito diferentes entre si. As parcelas de responsabilidade exibem $99,6224\%$ para a carga 1 e $0,3776\%$ para a carga 2, indicando que a carga 1 é a fonte predominante de desequilíbrio. A $I_{ncn\ pós}$ é menor que a $I_{ncn\ pré}$ sinalizando que o desequilíbrio total no sistema pós-conexão é menor do que no sistema pré-conexão. Conclui-se com isso, que com relação à fonte predominante de desequilíbrio, este método está de acordo com o resultado oriundo do método do fluxo de potência trifásico, e também com o resultado proveniente do método da IEC.

Todos os resultados dessa análise são coerentes com os resultados da análise computacional do caso 4, quando toma-se para análise os valores obtidos no 5º incremento (que possui 50% de aumento no módulo da fase A da impedância da carga 1).

4.3.3 – Caso 3 – Carga 1 com desequilíbrio fixo e carga 2 com incremento no módulo da fase A

Este caso mostra o efeito do incremento no módulo da impedância da carga da fase A sobre os métodos, quando a carga 1 possui desequilíbrio constante e a carga 2 é desequilibrada com incremento de aproximadamente 74% no módulo da fase A. Os resultados dos métodos da IEC, do fluxo de potência trifásico, e da corrente conforme e não conforme, respectivamente, estão expostos nas Tabelas 4.13, 4.14 e 4.15.

Tabela 4.13 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$VUF_{pré}$	$VUF_{pós}$	VUF_{carga2}
4,2660∠ – 107,9154	5,1104∠ – 93,4557	1,4471∠ – 46,0565
$pcVUF_{pré}$		80,8325%
$pcVUF_{carga2}$		19,1675%

Tabela 4.14 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n pré$	$P_n carga1 pós$	$P_n carga2 pós$	$P_n pós$
-0,9929	0,2299	-1,1975	-0,9677
$pcP_n carga1 pós$			-23,7552%
$pcP_n carga2 pós$			123,7552%

Tabela 4.15 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn pré}$	$\bar{I}_{ncn carga1 pós}$	$\bar{I}_{ncn carga2 pós}$	$\bar{I}_{ncn pós}$
0,1888∠0,9151	0,1637∠ – 2,9084	0,0842∠60,5374	0,2149∠17,6048
$pcI_{ncn carga1 pós}$	71,3179%		
$pcI_{ncn carga2 pós}$	28,6821%		

Os resultados do método da IEC evidenciam um $VUF_{pré}$ de 4,2660%, conforme Tabela 4.13. Depois da conexão da segunda carga, com incremento de aproximadamente 74% no módulo da fase A em relação à carga 2 do caso 2, o $VUF_{pós}$ passa a ser 5,1104%, que é aproximadamente 1,20 vezes o $VUF_{pré}$, denotando que quando a carga 2 foi conectada, o sistema ficou mais desequilibrado. O VUF_{carga2} vale 1,4471%. Nota-se que esse valor é menor que o $VUF_{pré}$, caracterizando que o desequilíbrio causado por essa carga é menor que o causado pela primeira carga. O fato do $VUF_{pré}$ ser 2,95 vezes maior do que o VUF_{carga2} indica que a carga 1 é a fonte prevalecente de desequilíbrio. Isso pode ser ainda observado nos resultados das parcelas de responsabilidades. Ao passo que a parcela de responsabilidade da carga 1 é igual a 80,8325%, a da carga 2 é igual a 19,1675%.

Nota-se na Tabela 4.14 para o sistema pré-conexão, com relação ao método do fluxo da potência trifásica, uma potência de sequência negativa igual a -0,9929 W, comprovando

que a carga 1 está desequilibrada. No sistema pós-conexão, o método mostra que a carga 1 está absorvendo uma fração do desequilíbrio do sistema, e que a carga 2 é a fonte de desequilíbrio para o sistema, pois a potência de sequência negativa é igual a 0,2299 W para a carga 1, e -1,1975 W para a carga 2. O fato da parcela de responsabilidade da carga 1 ser -23,7552% e da carga 2 ser 123,7552% certifica que a carga 1 absorve uma fração do desequilíbrio, e que a carga 2 é a fonte de desequilíbrio preponderante. Nota-se que a carga que ficou com o percentual positivo é completamente responsável pelo desequilíbrio, pois a parcela de responsabilidade com o valor negativo evidencia que está havendo absorção do desequilíbrio pela outra carga. Depois da conexão da carga 2, percebe-se que o sistema fica um pouco menos desequilibrado, pois a $P_{n\ pós}$ é um pouco menor em módulo que a $P_{n\ pré}$.

O método das correntes conforme e não conforme aponta que a carga 1 está desequilibrada ao apresentar um valor diferente de 0 para a corrente não conforme de sequência negativa do sistema pré-conexão, como pode ser observado na Tabela 4.15. No sistema pós-conexão, observa-se que a carga 1 possui um valor de corrente não conforme maior que o valor da carga 2, demonstrando que os desequilíbrios derivados de cada carga são diferentes entre si. As parcelas de responsabilidade exibem 71,3179% para a carga 1 e 28,6821% para a carga 2, assinalando que a carga 1 é a fonte dominante de desequilíbrio. A $I_{ncn\ pós}$ é maior que a $I_{ncn\ pré}$, evidenciando que o desequilíbrio total no sistema pós-conexão é maior do que no sistema pré-conexão. Conclui-se com isso que com relação à fonte predominante de desequilíbrio, este método está de acordo apenas com o resultado oriundo do método da IEC. Para os dois métodos concordantes, ressalta-se que o fato do módulo da impedância da fase A da carga 2 ter sido incrementado, não necessariamente tornou essa carga mais desequilibrada.

Os resultados dessa análise são coerentes com os resultados gerais do caso 6 da análise computacional.

4.4 – SÍNTESE DOS PRINCIPAIS RESULTADOS

Exibe-se aqui uma síntese dos principais resultados obtidos com base nas simulações computacionais e nos ensaios laboratoriais.

A Tabela 4.16 apresenta uma comparação entre os casos analisados das simulações computacionais indicando a concordância ou a discordância entre os métodos em relação à atribuição de responsabilidades.

Tabela 4.16 – Resultados da comparação entre os métodos – simulações computacionais.

Casos	IEC	Fluxo de potência trifásico	Corrente conforme e não conforme
1	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos
2	Não concorda com os demais métodos	Não concorda com o método da IEC Concorda com o método da corrente conforme e não conforme	Não concorda com o método da IEC Concorda com o método do fluxo de potência trifásico
3	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos
4	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos
5	Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico Concorda com o método da corrente conforme e não conforme	Não concorda com os demais métodos	Concorda com o método da IEC Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico
6	Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico Concorda com o método da corrente conforme e não conforme	Não concorda com os demais métodos	Concorda com o método da IEC Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico

Os demais casos das simulações computacionais que são analisados no Apêndice B apresentam efeitos similares em relação aos resultados dos casos estudados neste capítulo.

A Tabela 4.17 expõe uma comparação entre os casos analisados dos ensaios laboratoriais apontando a concordância ou a discordância entre os métodos em relação ao compartilhamento de responsabilidades.

Tabela 4.17 – Resultados da comparação entre os métodos – ensaios laboratoriais.

Casos	IEC	Fluxo de potência trifásico	Corrente conforme e não conforme
1	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos
2	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos
3	Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico Concorda com o método da corrente conforme e não conforme	Não concorda com os demais métodos	Concorda com o método da IEC Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico

Os outros casos dos ensaios laboratoriais que são analisados no Apêndice C evidenciam efeitos semelhantes em relação aos resultados dos casos avaliados neste capítulo.

Os principais resultados obtidos para as simulações computacionais são:

1. No sistema pré-conexão, os 3 métodos apresentaram resultados consistentes para todos os casos, ou seja, considerando-se apenas uma carga conectada a uma linha transposta, todos os métodos indicaram eficientemente que a carga estava equilibrada ou desequilibrada.
2. O método da IEC apresentou inconsistências nos casos 2, 4, 5 e 6. São elas: (a) o VUF_{carga2} é diferente do $VUF_{pré}$ para desequilíbrios iguais entre as cargas; (b) o VUF_{carga2} não se manteve fixo e igual a 0 para a configuração equilibrada da carga 2; (c) o VUF_{carga2} não começou em 0 no ponto em que a carga 2 ainda não havia sido incrementada; e (d) o VUF_{carga2} não se manteve constante quando a carga 2 possuía desequilíbrio fixo. As justificativas para essas inconsistências encontram-se na formulação matemática destinada ao cálculo do VUF_{carga2} . Este índice é calculado com base no módulo da diferença de dois vetores que não estão, na maioria das vezes, na mesma direção.
3. O método do fluxo de potência trifásico demonstrou imprecisão nos casos 5 e 6. Nesses casos, o mencionado método não conseguiu identificar que ambas as cargas estavam desequilibrando o sistema em quase todos os pontos.
4. No sistema pós-conexão, dentre os 3 métodos estudados, concluiu-se que o método da corrente conforme e não conforme foi o mais preciso para utilização com cargas estáticas, pois (a) a corrente não conforme de sequência negativa de uma das cargas sempre começava valendo 0 no ponto em que não havia nenhum incremento nessa carga, e a partir daí, ela crescia à medida que essa carga era incrementada; e (b) a corrente não conforme de sequência negativa da outra carga sempre mantinha-se

constante evidenciando que essa carga apresentava desequilíbrio fixo, ou que essa carga estava equilibrada.

5. As parcelas de responsabilidade das cargas relativas ao desequilíbrio de tensão evidenciaram resultados coerentes para os casos 1, 3 e 4. No caso 2, as parcelas de responsabilidade das cargas do método da IEC – devido a uma imprecisão desse método – mostraram-se divergentes quando comparadas às parcelas de responsabilidade das cargas dos outros dois métodos, que eram idênticas entre si. Além disso, o método da IEC não apresentou resultados conforme o esperado, ou seja, uma atribuição de responsabilidades igual para as duas cargas. Nos casos 5 e 6, as parcelas de responsabilidade das cargas dos métodos da IEC e da corrente conforme e não conforme foram mais uniformes entre si, quando equiparadas às parcelas de responsabilidade das cargas do método do fluxo de potência trifásico.
6. Ainda com relação à atribuição de responsabilidades, os métodos da IEC e do fluxo de potência trifásico apresentaram – em alguns casos – valores percentuais de uma carga superiores a 100% e da outra carga inferiores a 0%. Isso indica que a carga que ficou com o percentual positivo é inteiramente responsável pelo desequilíbrio, e que a carga do percentual negativo absorve uma parcela desse desequilíbrio. Essa é a única situação em que a projeção não indica diretamente o percentual de responsabilidades.

Com relação aos resultados laboratoriais, praticamente todos os casos apresentaram resultados coerentes com os resultados computacionais. Portanto, foram apontados os mesmos tipos de características quando os métodos foram comparados entre si.

Por fim, destaca-se que outra desvantagem da aplicação do método da IEC é a exigência de uma análise do sistema pré-conexão e pós-conexão, o que pode vir a ser uma tarefa difícil em sistemas reais. Tal fato pode limitar o método para avaliar somente cargas a serem conectadas ao sistema, pois no caso de já estar estabelecida a conexão da carga de interesse, seria necessário o desligamento desta, o que não é desejável. Outro fator limitador é a necessidade de se conhecer as impedâncias da linha de transmissão para se obter um cálculo mais preciso.

4.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram apresentados os resultados das principais simulações selecionadas para a avaliação dos métodos de compartilhamento/atribuição de responsabilidades devido ao desequilíbrio de tensão.

Foram analisados em detalhes 6 casos oriundos de simulações computacionais e 3 casos decorrentes de ensaios laboratoriais.

Notou-se que em alguns casos houve coerências entre os três métodos e em outros casos houve conformidades só entre dois métodos, a saber, (a) método do fluxo de potência trifásico e método da corrente conforme e não conforme e (b) método da IEC e método da corrente conforme e não conforme. Constatou-se ainda que o método da corrente conforme e não conforme é o mais adequado dentre os três métodos.

Por fim, foram sintetizados em um tópico ao final das análises os principais aspectos observados em relação à comparação entre os métodos. Os resultados mais expressivos dessas análises serão também expostos no capítulo de conclusões.

5 – CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta uma síntese das principais constatações detectadas com a execução deste trabalho. Além disso, destacam-se as maiores contribuições a respeito dos estudos aqui realizados e elaboram-se propostas de trabalhos futuros que proporcionarão continuidade a esta pesquisa.

O Capítulo 1 buscou apresentar, de forma sucinta, a importância do desenvolvimento de estudos direcionados a atribuição de responsabilidades devido ao desequilíbrio de tensão. Para tanto, foram apresentados – no estado da arte – estudos vinculados ao tema central desta dissertação, bem como seus objetivos e contribuições. Assim, os resultados encontrados por alguns autores foram discutidos, apontando-se os aspectos mais expressivos de cada trabalho investigado. Alguns dos métodos indicados em determinadas referências demonstraram imprecisões quando utilizados para atribuir/identificar responsabilidades.

O Capítulo 2 explorou os principais conceitos relacionados com o desequilíbrio de tensão. Desta forma, destacaram-se sua definição, suas causas e seus efeitos sobre equipamentos como transformadores, motores de indução, cabos e conversores. Ressaltaram-se ainda alguns métodos de cálculo – a saber: CIGRÉ, NEMA, ANSI, IEEE e componentes simétricas – e alguns documentos e normas, como a IEC 61000-4-30, a IEEE 1159-2009 e o PRODIST da ANEEL. De todo o exposto, o método das componentes simétricas foi tido pela maioria dos documentos e normas como o mais adequado. Ele permite o emprego tanto de tensões de linha como de tensões de fase. Observou-se também que, predominantemente, o limite desejável para o índice de quantificação (VUF) é de 2%.

Ainda no Capítulo 2, os três métodos – quais sejam: método da IEC, método do fluxo de potência trifásico e método da corrente conforme e não conforme – foram apresentados como capazes de atribuir a parcela de responsabilidades à concessionária ou ao consumidor devido à presença de desequilíbrio de tensão no sistema elétrico. Para a identificação das parcelas de responsabilidade das cargas relativas ao desequilíbrio de tensão, foi proposto, pioneiramente, neste capítulo em complementação aos três métodos, o emprego das projeções dos vetores das cargas 1 e 2 no vetor resultante do sistema pós-conexão. Ao fim desse capítulo, foi exibida uma investigação que tentou, sem sucesso, adaptar os métodos de compartilhamento/atribuição de responsabilidades sobre distorções harmônicas para os desequilíbrios de tensão. Destacou-se que o método da corrente conforme e não conforme possui uma metodologia própria para atribuir responsabilidades sobre desequilíbrios.

O Capítulo 3 expôs os procedimentos adotados para o desenvolvimento do sistema – utilizado nas simulações computacionais e nos ensaios laboratoriais – que possibilita a avaliação comparativa entre os métodos para a atribuição de responsabilidades devido ao desequilíbrio de tensão.

No Capítulo 4, os três métodos foram empregados na análise da atribuição de responsabilidades do desequilíbrio de tensão. Eles foram aplicados em algumas simulações computacionais e ensaios laboratoriais estrategicamente selecionados com o intuito de se

identificar com base em seus resultados, as limitações e as vantagens de cada método. Concluiu-se que praticamente todos os casos dos resultados laboratoriais apresentaram resultados coerentes com os resultados computacionais. Portanto as principais conclusões referentes às simulações computacionais (que são as conclusões gerais desta dissertação) estão expostas a seguir.

No sistema pré-conexão – composto por uma fonte, uma linha e uma carga conectada ao PAC – os métodos apontaram apropriadamente que a carga estava equilibrada ou desequilibrada.

O método da IEC mostrou-se incoerente nos casos 2, 4, 5 e 6, pois o VUF_{carga2} apresentou valores inesperados que foram causados pela formulação matemática designada para o cálculo deste índice.

Em relação ao método do fluxo de potência trifásico, os casos 5 e 6 apresentaram incongruências – em alguns pontos das figuras – devido ao fato do método não ter identificado que as duas cargas desequilibradas estavam desequilibrando o sistema.

Já o método da corrente conforme e não conforme foi o mais preciso dentre os três métodos utilizados, pois ele foi o único método que não apresentou inconsistências em todos os casos avaliados. Nos 4 casos de variações incrementais da carga, esse método indicou que a corrente não conforme de sequência negativa de uma das cargas sempre começava valendo 0 no ponto em que não havia nenhum incremento nessa carga, e a partir daí crescia à medida que essa carga era incrementada. Além disso, a corrente não conforme de sequência negativa da outra carga sempre mantinha-se constante evidenciando que essa carga apresentava desequilíbrio fixo, ou que essa carga estava equilibrada. Destacou-se que a aplicação desse método é útil apenas com cargas estáticas.

As parcelas de responsabilidade das cargas prestaram-se como ferramentas úteis, pois permitiram realizar a divisão de responsabilidades entre as cargas em todos os métodos avaliados. Estas parcelas indicaram resultados coesos para os três métodos nos casos 1, 3 e 4. No caso 2, devido a já mencionada imprecisão do método da IEC, apenas as parcelas de responsabilidade desse método evidenciaram valores diferentes dos valores que eram esperados. Nos casos 5 e 6, somente as parcelas de responsabilidade das cargas dos métodos da IEC e da corrente conforme e não conforme foram concordantes entre si.

Por fim, em alguns casos, os métodos da IEC e do fluxo de potência trifásico, apontaram valores percentuais de responsabilidades superiores a 100% para uma carga, e inferiores a 0% para a outra carga. Concluiu-se desse fato que a carga do percentual positivo era inteiramente responsável pelo desequilíbrio, e que a carga do percentual negativo absorvia uma parcela desse desequilíbrio.

Com relação à questão da aplicabilidade dos métodos em sistemas reais, extraem-se duas conclusões:

1. Uma desvantagem da aplicação do método da IEC é a exigência de uma análise do sistema pré-conexão e pós-conexão, o que pode vir a ser uma tarefa difícil em

sistemas reais. Tal fato pode limitar o método para avaliar somente cargas a serem conectadas ao sistema, pois no caso de já estar estabelecida a conexão da carga de interesse, seria necessário o desligamento desta, o que não é desejável. Outro fator limitador é a necessidade de se conhecer as impedâncias da linha de transmissão para obter-se um cálculo mais preciso.

2. Caso um medidor, com capacidade de mensurar a tensão, a corrente e seus respectivos ângulos, seja instalado em um barramento ou em uma carga de interesse, todos os métodos utilizados nesta dissertação podem ser aplicados em um sistema real. Entretanto, a infraestrutura envolvida por trás da instalação desses medidores – como a aquisição e configuração dos medidores, transformadores de corrente, transformadores de potencial, painéis de medição, equipamentos de telecomunicação, etc – é uma das dificuldades da aplicabilidade desses métodos.

Finalmente, recomenda-se que os seguintes temas sejam contemplados em trabalhos futuros:

a) Com relação à complexidade dos sistemas avaliados:

- Checar o comportamento dos métodos em algumas simulações onde o VUF da linha é semelhante aos níveis de desequilíbrio encontrados nas linhas de transmissões do Brasil.
- Avaliar o desempenho dos métodos em um sistema constituído por fonte nem sempre ideal, linha nem sempre transposta (com as impedâncias mútuas incluídas) e cargas nem sempre equilibradas conectadas ao PAC.
- Analisar outros barramentos diferentes do PAC com o objetivo de examinar como o desequilíbrio se manifesta por lá, e ainda como se dá a questão da propagação do desequilíbrio.
- Inserir uma terceira carga no PAC ou em outro barramento e verificar se a análise feita pelos métodos apresentados ainda seriam úteis.
- Fazer outros tipos de variações incrementais na impedância da carga e observar os resultados dos métodos.
- Investigar o funcionamento dos métodos utilizando diferentes modelos de carga, ou seja, não considerar apenas cargas estáticas.

b) Com relação aos métodos para atribuição de responsabilidades:

Em relação ao método da IEC, recomenda-se construir uma tabela com os resultados da aplicação dele para várias cargas sendo conectadas uma a uma no PAC, com o objetivo de se investigar como o erro causado pela formulação matemática desse método se comporta.

Já com relação ao método do fluxo de potência trifásico, sugere-se uma avaliação da sensibilidade da potência ativa de sequência negativa em conjunto com o VUF, pois ainda não existe uma forma de se relacionar matematicamente essa potência com um indicador de desequilíbrio. Alguns tópicos dessa avaliação podem incluir:

- Investigação da sensibilidade da potência ativa de sequência negativa e do VUF em relação à variação da impedância de uma carga conectada em um barramento qualquer.
- Identificação de qual deve ser o valor da impedância de uma carga conectada a um barramento qualquer para que o VUF dessa barra alcance um valor pré-determinado.
- Verificação de como se deve variar a impedância de uma carga conectada a um barramento qualquer para que a potência ativa de sequência negativa dessa barra deixe de ser negativa e passe a ser nula ou positiva, ou o contrário.

Por último, é de fundamental importância que também sejam feitas maiores investigações no método da corrente conforme e não conforme visando identificar possíveis incoerências.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, M. L. S. (2013). *Avaliação da Temperatura do Motor de Indução Trifásico submetido a Desequilíbrios de Tensão*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEE.DM - 515/2013, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 137p.
- ANEEL. (2000). *Contribuição para a Normalização da Qualidade da Energia Elétrica – Harmônicos e Desequilíbrios nas Redes Elétricas*. Relatório Parcial 2 – Estado da Arte, Universidade Federal de Uberlândia. [S.l.].
- ANEEL PRODIST. (2012). *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8, Revisão 4 – Qualidade da Energia Elétrica*. Brasília.
- ANSI. (1995). *American National Standard for Electric Power Systems and Equipment, Voltage Ratings (60 Hz)*. [S.l.].
- Chindris, M., Cziker, A., Miron, A., Balan, H., Iacob, A., Sudria, A. (2007). *Propagation of unbalance in electric power systems*. In: 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU 2007).
- CIGRÉ-CIRED. (2011). Working Group C4.109, *Review of Emission Assessment Techniques*.
- Costa, F. H. (2009). *Uma contribuição à avaliação de desempenho dos principais métodos para a modelagem de cargas nos estudos do compartilhamento das responsabilidades sobre distorções harmônicas*. 2009. 84 f. Dissertação (Mestrado) – UFU, Uberlândia, 2009.
- Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S., Beaty, H. W. (2003). *Electrical Power Systems Quality*. 2ª ed., New York: McGraw-Hill.

- Ferreira Filho, A. L. (2008). *Análise do comportamento do fator de desequilíbrio frente à variação da amplitude e do ângulo da tensão*. 2008. 112 p. Tese de doutorado em engenharia elétrica (Doutorado) – UnB, Brasília.
- Fortescue, C. L. (1918). *Method of Symmetrical Co-ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks*. Trans. AIEE, vol. 37, no. 2, pp. 1027-1140.
- Glover, J. D., Sarma, M. S., Overbye, T. (2007). *Power Systems Analysis and Design*. 4th edition, Ed. Wadsworth Pub Co.
- Hanzelka, Z., Varetsky, Y. (2011). *Negative-sequence active power stream as an index of unbalance source*. In: 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU 2011).
- IEC. (1990). *Electromagnetic Compatibility (EMC) – part 2: environment. section 2: Compatibility levels for low frequency conducted disturbances and signalling in public low voltage power supply systems*. [S.l.].
- IEC. (2008). *IEC 61000-4-30: testing and measurement techniques, power quality measurement methods*. [S.l.].
- IEC/TR 61000-3-13. (2008). *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-13: Limits – Assessment of emission limits for the connection of unbalanced installations to MV, HV and EHV power systems*.
- IEEE 4 Node (2006). *IEEE 4 Node Test Feeder*.
- IEEE 1159. (2009). *IEEE 1159-2009: recommended practice for monitoring electric power quality*. [S.l.].
- IEEE 1459. (2010). *Std. 1459-2010 – IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions*. New York.

- Kolagar, A.D., Hamedani, P., Shoulaie, A. (2012). *The effects of transformer connection type on voltage and current unbalance propagation*. In: Power Electronics and Drive Systems Technology (PEDSTC), 2012 3rd.
- Leiria, A., Morched, A., De Barros, M. T. C. (2003). *Identification of harmonic content and their origin in power networks*. IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, Vol. 2, Bologna, Italy, June 23-26.
- Li, C., Xu, W., Tayjasant, T. (2004). *A "critical impedance"-based method for identifying harmonic sources*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 2, pp 671-678, April.
- Liu, Z., Milanovic, J. V. (2012). *Probabilistic Estimation of Propagation of Unbalance in Distribution Network with Asymmetrical Loads*. In: 8th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MEDPOWER 2012).
- Matos, J. M. (2012). *Avaliação dos Efeitos do Desequilíbrio de Tensão Sobre os Motores de Indução Trifásicos*. Trabalho de Graduação, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, pp. 79.
- Oliveira, J. P. J. (2012). *Um estudo da Influência do Intervalo de Agregação nos Métodos do Desequilíbrio de Tensão*. Trabalho de Graduação, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, pp. 48.
- ONS 2.8. (2011). *Procedimentos de rede: Submódulo 2.8 – Gerenciamento dos Indicadores de Desempenho da Rede Básica e dos Barramentos dos Transformadores de Fronteira, e de seus Componentes*. Revisão 2.0. Rio de Janeiro.
- Santos, Ivan N. (2007). *Uma contribuição à avaliação de desempenho dos principais métodos para atribuição de responsabilidades sobre as distorções harmônicas*. 2007. 81 f. Dissertação (Mestrado) – UFU, Uberlândia.

- Santos, Ivan N. (2011). *Método da superposição modificado como uma nova proposta de atribuição de responsabilidades sobre distorções harmônicas*. 2011. 159 f. Tese (Doutorado) – UFU, Uberlândia.
- Seiphethlo, T. E., Rens, A. P. J. (2010). *On the Assessment of Voltage Unbalance*. In: 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Italy.
- Seiphethlo, T. E., Rens, A. P. J. (2011). *Practical Evaluation of Voltage Unbalance at a Distribution Transformer Based on 50 Hz Negative Sequence Active Power*. In: IEEE Africon 2011, Zambia.
- Silva, Sérgio F. P. (2007). *Uma proposta para o compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas*. 2007. 179 f. Tese (Doutorado) – UFU, Uberlândia.
- Srinivasan, K., Jutras, R. (1998). *Conforming and non-conforming current for attributing steady state power quality problems*. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 13, n. 1, p. 212-217.
- Souto, O. C. N. (2001). *Modelagem e Análise do Desempenho Térmico de Motores de indução sob Condições não Ideais de Alimentação*. 2001. 323 f. Tese (Doutorado) – UFU, Uberlândia.
- Tanaka, T., Akagi, H. (1995). *A new method for harmonic power detection based on the instantaneous active power in three-phase circuits*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 4, pp 1737-1742, October.
- Woolley, N. C., Milanović, J. V. (2010). *Estimating the Voltage Unbalance Factor using distribution system state estimation*. In: Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010 IEEE PES.
- Xu, W., Liu, X., Liu, Y. (2003). *An investigation on the validity of power-direction method for harmonic source determination*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 1, pp 214-219, January.

APÊNDICES

A – ADEQUAÇÃO DO SISTEMA DE 4 BARRAS DO IEEE AO LABORATÓRIO

Com o objetivo de se executar em laboratório parte das simulações computacionais propostas neste trabalho, o sistema de 4 barras do IEEE (IEEE 4 Node, 2006) da Figura A.1 foi adaptado para o laboratório.

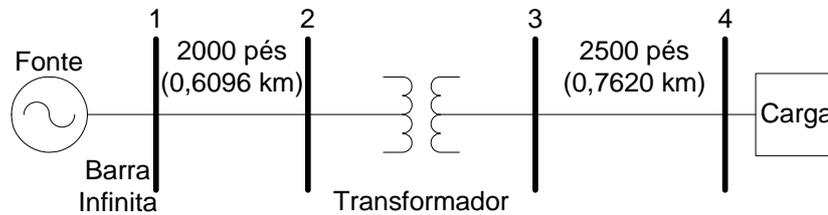


Figura A.1 – Alimentador de 4 barras do IEEE.

Nesse sistema original, há uma fonte de 12,47 kV (tensão fase-fase) e um transformador trifásico com 6 MVA que possui uma relação de transformação de 12,47 kV/4,16 kV (estrela aterrada - estrela aterrada).

As impedâncias das linhas de quatro condutores (entre as barras 1 e 2 e entre as barras 3 e 4), dadas em Ω /milha, são apontadas na equação (A.1):

$$\mathbf{z}_{y_{org}} = \begin{bmatrix} 0,4576 + j1,0780 & 0,1559 + j0,5017 & 0,1535 + j0,3849 \\ 0,1559 + j0,5017 & 0,4666 + j1,0482 & 0,1580 + j0,4236 \\ 0,1535 + j0,3849 & 0,1580 + j0,4236 & 0,4615 + j1,0651 \end{bmatrix} \quad (A.1)$$

Observação: a nomenclatura das equações (A.1) a (A.11) são empregadas apenas para um melhor entendimento do processo de adaptação do sistema de 4 barras do IEEE ao laboratório. De fato, essas equações não são utilizadas na simulação computacional, nem no experimento laboratorial.

Para a execução da simulação laboratorial, foi utilizada a impedância da linha de quatro condutores do sistema de 4 barras do IEEE refletida em uma tensão de 380 V. Devido às limitações do laboratório, só foi possível simular as impedâncias próprias. Portanto, todas as impedâncias mútuas foram declaradas nulas. Ainda como hipótese simplificadora, as impedâncias próprias foram consideradas constantes. De fato, conforme (A.1), as impedâncias próprias são praticamente iguais.

As impedâncias das linhas são dadas pela equação (A.2):

$$\mathbf{z}_y = \begin{bmatrix} 0,4576 + j1,078 & 0 & 0 \\ 0 & 0,4576 + j1,078 & 0 \\ 0 & 0 & 0,4576 + j1,078 \end{bmatrix} \quad (A.2)$$

De acordo com a Figura A.1, a distância entre as barras 1 e 2 é equivalente a 2000 pés (0,3788 milha ou 0,6096 km), e a distância entre as barras 3 e 4 é igual a 2500 pés (0,4735

milha ou 0,7620 km). Dessa forma, multiplicando a equação (A.2) pelas respectivas distâncias, obtêm-se as equações (A.3) e (A.4):

$$\begin{aligned} \mathbf{zy}_{1-2} &= 0,3788 * \mathbf{zy} = \\ &= \begin{bmatrix} 0,1733 + j0,4083 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1733 + j0,4083 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1733 + j0,4083 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

$$\begin{aligned} \mathbf{zy}_{3-4} &= 0,4735 * \mathbf{zy} = \\ &= \begin{bmatrix} 0,2167 + j0,5104 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2167 + j0,5104 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2167 + j0,5104 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Os dados do transformador da Figura A.1 são:

- Sbase=6 MVA
- Vbase=12,47 kV(estrela aterrada)/4,16 kV(estrela aterrada)
- R=1%
- X=6%

A resistência equivalente e a reatância de dispersão equivalente desse transformador são refletidas para o lado de baixa. Assim, com base no cálculo da impedância de base da equação (A.5), obtêm-se as equações (A.6) e (A.7):

$$Z_{base_{baixa}} = \frac{4160^2}{6 \cdot 10^6} = 2,8843 \Omega \quad (\text{A.5})$$

$$R(\Omega_{baixa}) = 0,01 * 2,8843 \Omega = 0,0288 \Omega \quad (\text{A.6})$$

$$X(\Omega_{baixa}) = 0,06 * 2,8843 \Omega = 0,1731 \Omega \quad (\text{A.7})$$

Refletindo a impedância da linha entre as barras 1 e 2 para o lado de baixa, tem-se a equação (A.8):

$$\begin{aligned} \mathbf{zy}_{1-2baixa} &= \mathbf{zy}_{1-2} * \left(\frac{4160}{12470} \right)^2 = \\ &= \begin{bmatrix} 0,0193 + j0,0454 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0193 + j0,0454 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0193 + j0,0454 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

Por fim, refletindo a composição do sistema ($\mathbf{zy}_{1-2baixa} + [R(\Omega_{baixa}) + j \cdot X(\Omega_{baixa})]$ matriz diagonal 3x3 + \mathbf{zy}_{3-4}) de uma tensão de 4160 V para 380 V, por meio de um transformador ideal, tem-se a equação (A.9):

$$\begin{aligned} \mathbf{zy}_{ref} &= (\mathbf{zy}_{1-2baixa} + [R(\Omega_{baixa}) + j \cdot X(\Omega_{baixa})]$$
matriz diagonal 3x3 + $\mathbf{zy}_{3-4}) * \left(\frac{380}{4160} \right)^2 = \\ &= \begin{bmatrix} 0,0022 + j0,0061 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0022 + j0,0061 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0022 + j0,0061 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.9})$

Originalmente, há uma carga equilibrada trifásica conectada ao nó 4 do sistema de 4 barras do IEEE com potência de 1,8 MW e fator de potência de 0,9 atrasado por fase (monofásico). Considera-se que a tensão de linha na barra 4 é a mesma da barra 3, ou seja, 4160 V (e a tensão de fase igual a 2401,8 V). Com essas informações pode-se calcular a impedância da carga por meio da aplicação de princípios tradicionais da análise de circuitos. Assim, tem-se a impedância da carga dada pela equação (A.10):

$$\bar{Z}_{carga} = 2,8843 \angle 25,8419^\circ = 2,5958 + j1,2572 \Omega \quad (\text{A.10})$$

Refletindo também essa impedância da carga de uma tensão de 4160 V para 380 V, por meio de um transformador ideal, tem-se a equação (A.11):

$$\bar{Z}_{ref} = \bar{Z}_{carga} * \left(\frac{380}{4160}\right)^2 = 0,0241 \angle 25,8419^\circ = 0,0217 + j0,0105 \Omega \quad (\text{A.11})$$

Como a impedância da linha (A.9) e da carga (A.11) refletida para a tensão de 380 V apresentam valores de resistência e reatância muito baixos, é preciso multiplicá-los por um fator (6000) de forma que seja possível fazer a simulação no laboratório. Assim, obtêm-se as equações (A.12) e (A.13):

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{abc_{linha}} &= \mathbf{z}_{y_{ref}} * 6000 = \\ &= \begin{bmatrix} 13,2571 + j36,4930 & 0 & 0 \\ 0 & 13,2571 + j36,4930 & 0 \\ 0 & 0 & 13,2571 + j36,4930 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

$$\bar{\mathbf{Z}}_{abc_{carga}} = \bar{\mathbf{Z}}_{ref} * 6000 = 144,4000 \angle 25,8419^\circ = 129,9600 + j62,9425 \Omega \quad (\text{A.13})$$

Nota-se que a relação de grandeza entre $\bar{\mathbf{Z}}_{ref}$ e $\mathbf{z}_{y_{ref}}$ (que é de 3,7191) foi mantida.

B – RESULTADOS COMPUTACIONAIS DOS OUTROS CASOS

Neste apêndice são apresentados as configurações das cargas e os resultados das outras simulações computacionais selecionadas para a avaliação dos métodos de compartilhamento/atribuição de responsabilidades devido à presença do desequilíbrio de tensão.

Os valores das impedâncias (\bar{Z}_A , \bar{Z}_B e \bar{Z}_C) das outras cargas trifásicas computacionais estão expostos nas Tabelas B.1 a B.3.

Tabela B.1 – Impedâncias da carga desequilibrada com incremento de 10% no módulo da carga da fase A.

\bar{Z}_A		\bar{Z}_B		\bar{Z}_C	
Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo
158,8400	25,8419	144,4000	25,8419	144,4000	25,8419
R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]
142,9560	69,2368	129,9600	62,9425	129,9600	62,9425

Tabela B.2 – Impedâncias da carga desequilibrada com incremento de 10% no ângulo da carga da fase A.

\bar{Z}_A		\bar{Z}_B		\bar{Z}_C	
Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo
144,4000	28,4261	144,4000	25,8419	144,4000	25,8419
R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]
126,9899	68,7380	129,9600	62,9425	129,9600	62,9425

Tabela B.3 – Impedâncias da carga desequilibrada com incremento de 10% no ângulo da carga da fase A e decréscimo de 10% no ângulo da fase C.

\bar{Z}_A		\bar{Z}_B		\bar{Z}_C	
Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo
144,4000	28,4261	144,4000	25,8419	144,4000	23,2577
R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]
126,9899	68,7380	129,9600	62,9425	132,6657	57,0189

Como os 6 primeiros casos computacionais foram detalhados no Capítulo 4, a Tabela B.4 expõe os 27 casos restantes de um total de 33 casos computacionais, que foram estudados para a elaboração desta dissertação.

Tabela B.4 – Especificação dos outros casos computacionais.

Casos	Configuração das cargas	Descrição
7	Carga 1 equilibrada e carga 2 desequilibrada com incremento de 10% no módulo da fase A.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela 3.1 fornece as impedâncias da carga equilibrada. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela B.1 fornece as impedâncias da carga desequilibrada.
8	Carga 1 equilibrada e carga 2 desequilibrada com incremento de 10% no ângulo da fase A.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela 3.1 fornece as impedâncias da carga equilibrada. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela B.2 fornece as impedâncias da carga desequilibrada.
9	Carga 1 equilibrada e carga 2 desequilibrada com incremento de 10% no módulo da fase A e decréscimo de 10% no módulo da fase C.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela 3.1 fornece as impedâncias da carga equilibrada. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela 3.2 fornece as impedâncias da carga desequilibrada.
10	Carga 1 equilibrada e carga 2 desequilibrada com incremento de 10% no ângulo da fase A e decréscimo de 10% no ângulo da fase C.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela 3.1 fornece as impedâncias da carga equilibrada. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela B.3 fornece as impedâncias da carga desequilibrada.
11	Carga 1 desequilibrada com incremento de 10% no módulo da fase A e carga 2 equilibrada.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela B.1 fornece as impedâncias da carga desequilibrada. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela 3.1 fornece as impedâncias da carga equilibrada.
12	Carga 1 desequilibrada com incremento de 10% no ângulo da fase A e carga 2 equilibrada.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela B.2 fornece as impedâncias da carga desequilibrada. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela 3.1 fornece as impedâncias da carga equilibrada.

Casos	Configuração das cargas	Detalhamento
13	Carga 1 desequilibrada com incremento de 10% no módulo da fase A e decréscimo de 10% no módulo da fase C e carga 2 equilibrada.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela 3.2 fornece as impedâncias da carga desequilibrada. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela 3.1 fornece as impedâncias da carga equilibrada.
14	Carga 1 desequilibrada com incremento de 10% no ângulo da fase A e decréscimo de 10% no ângulo da fase C e carga 2 equilibrada.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela B.3 fornece as impedâncias da carga desequilibrada. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela 3.1 fornece as impedâncias da carga equilibrada.
15	Carga 1 e carga 2 desequilibradas com incremento de 10% no módulo da fase A.	Para os sistemas pré e pós-conexão, a Tabela B.1 fornece as impedâncias da carga desequilibrada.
16	Carga 1 desequilibrada com incremento de 10% no módulo da fase A e carga 2 desequilibrada com incremento de 10% no ângulo da fase A.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela B.1 fornece as impedâncias da carga desequilibrada. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela B.2 fornece as impedâncias da carga desequilibrada.
17	Carga 1 desequilibrada com incremento de 10% no módulo da fase A e carga 2 desequilibrada com incremento de 10% no módulo da fase A e decréscimo de 10% no módulo da fase C.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela B.1 fornece as impedâncias da carga desequilibrada. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela 3.2 fornece as impedâncias da carga desequilibrada.
18	Carga 1 desequilibrada com incremento de 10% no módulo da fase A e carga 2 desequilibrada com incremento de 10% no ângulo da fase A e decréscimo de 10% no ângulo da fase C.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela B.1 fornece as impedâncias da carga desequilibrada. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela B.3 fornece as impedâncias da carga desequilibrada.
19	Carga 1 desequilibrada com incremento de 10% no ângulo da fase A e carga 2 desequilibrada com incremento de 10% no módulo da fase A.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela B.2 fornece as impedâncias da carga desequilibrada. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela B.1 fornece as impedâncias da carga desequilibrada.
20	Carga 1 e carga 2 desequilibradas com incremento de 10% no ângulo da fase A.	Para os sistemas pré e pós-conexão, a Tabela B.2 fornece as impedâncias da carga desequilibrada.
21	Carga 1 desequilibrada com incremento de 10% no ângulo da fase A e carga 2 desequilibrada com incremento de 10% no módulo da fase A e decréscimo de 10% no módulo da fase C.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela B.2 fornece as impedâncias da carga desequilibrada. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela 3.2 fornece as impedâncias da carga desequilibrada.
22	Carga 1 desequilibrada com incremento de 10% no ângulo da fase A e carga 2 desequilibrada com incremento de 10% no ângulo da fase A e decréscimo de 10% no ângulo da fase C.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela B.2 fornece as impedâncias da carga desequilibrada. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela B.3 fornece as impedâncias da carga desequilibrada.

Casos	Configuração das cargas	Detalhamento
23	Carga 1 desequilibrada com incremento de 10% no módulo da fase A e decréscimo de 10% no módulo da fase C e carga 2 desequilibrada com incremento de 10% no módulo da fase A.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela 3.2 fornece as impedâncias da carga desequilibrada. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela B.1 fornece as impedâncias da carga desequilibrada.
24	Carga 1 desequilibrada com incremento de 10% no módulo da fase A e decréscimo de 10% no módulo da fase C e carga 2 desequilibrada com incremento de 10% no ângulo da fase A.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela 3.2 fornece as impedâncias da carga desequilibrada. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela B.2 fornece as impedâncias da carga desequilibrada.
25	Carga 1 desequilibrada com incremento de 10% no módulo da fase A e decréscimo de 10% no módulo da fase C e carga 2 desequilibrada com incremento de 10% no ângulo da fase A e decréscimo de 10% no ângulo da fase C.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela 3.2 fornece as impedâncias da carga desequilibrada. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela B.3 fornece as impedâncias da carga desequilibrada.
26	Carga 1 desequilibrada com incremento de 10% no ângulo da fase A e decréscimo de 10% no ângulo da fase C e carga 2 desequilibrada com incremento de 10% no módulo da fase A.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela B.3 fornece as impedâncias da carga desequilibrada. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela B.1 fornece as impedâncias da carga desequilibrada.
27	Carga 1 desequilibrada com incremento de 10% no ângulo da fase A e decréscimo de 10% no ângulo da fase C e carga 2 desequilibrada com incremento de 10% no ângulo da fase A.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela B.3 fornece as impedâncias da carga desequilibrada. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela B.2 fornece as impedâncias da carga desequilibrada.
28	Carga 1 desequilibrada com incremento de 10% no ângulo da fase A e decréscimo de 10% no ângulo da fase C e carga 2 desequilibrada com incremento de 10% no módulo da fase A e decréscimo de 10% no módulo da fase C.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela B.3 fornece as impedâncias da carga desequilibrada. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela 3.2 fornece as impedâncias da carga desequilibrada.
29	Cargas 1 e 2 desequilibradas com incremento de 10% no ângulo da fase A e decréscimo de 10% no ângulo da fase C.	Para os sistemas pré e pós-conexão, a Tabela B.3 fornece as impedâncias da carga desequilibrada.
30	Carga 1 equilibrada e carga 2 desequilibrada variando de -90° a $+90^\circ$ no ângulo da carga da fase A.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela 3.1 fornece as impedâncias da carga equilibrada. Já para o sistema pós-conexão, as impedâncias da carga variam de -90° a $+90^\circ$ no ângulo da carga da fase A.

Casos	Configuração das cargas	Detalhamento
31	Carga 1 desequilibrada com incremento de 10% no módulo da fase A e decréscimo de 10% no módulo da fase C, e carga 2 desequilibrada variando de -90° a $+90^\circ$ no ângulo da carga da fase A.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela 3.2 fornece as impedâncias da carga desequilibrada. Já para o sistema pós-conexão, as impedâncias da carga variam de -90° a $+90^\circ$ no ângulo da carga da fase A.
32	Carga 1 desequilibrada variando de -90° a $+90^\circ$ no ângulo da carga da fase A e carga 2 equilibrada.	Para o sistema pré-conexão, as impedâncias da carga variam de -90° a $+90^\circ$ no ângulo da carga da fase A. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela 3.1 fornece as impedâncias da carga equilibrada.
33	Carga 1 desequilibrada variando de -90° a $+90^\circ$ no ângulo da carga da fase A, e carga 2 desequilibrada com incremento de 10% no módulo da fase A e decréscimo de 10% no módulo da fase C.	Para o sistema pré-conexão, as impedâncias da carga variam de -90° a $+90^\circ$ no ângulo da carga da fase A. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela 3.2 fornece as impedâncias da carga desequilibrada.

A seguir, são exibidos os resultados desses 27 casos computacionais.

Caso 7

Tabela B.5 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
0 \angle 0	0,5733 \angle 29,3734	0,5733 \angle 29,3734
$pcVUF_{pré}$		0
$pcVUF_{carga2}$		100%

Tabela B.6 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n pré$	$P_n carga1 pós$	$P_n carga2 pós$	$P_n pós$
0	0,0145	-0,0350	-0,0205
$pcP_n carga1 pós$			-70,8729%
$pcP_n carga2 pós$			170,8729%

Tabela B.7 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn\ pré}$	$\bar{I}_{ncn\ carga1\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ carga2\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ pós}$
0∠0	0∠0	0,0324∠139,3384	0,0324∠139,3384
$pcI_{ncn\ carga1\ pós}$	0		
$pcI_{ncn\ carga2\ pós}$	100%		

Caso 8

Tabela B.8 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
0∠0	0,2809∠118,0470	0,2809∠118,0470
$pcVUF_{pré}$		0
$pcVUF_{carga2}$		100%

Tabela B.9 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n\ pré$	$P_n\ carga1\ pós$	$P_n\ carga2\ pós$	$P_n\ pós$
0	0,0034	-0,0083	-0,0048
$pcP_n\ carga1\ pós$			-70,8729%
$pcP_n\ carga2\ pós$			170,8729%

Tabela B.10 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn\ pré}$	$\bar{I}_{ncn\ carga1\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ carga2\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ pós}$
0∠0	0∠0	0,0159∠ - 131,9880	0,0159∠ - 131,9880
$pcI_{ncn\ carga1\ pós}$	0		
$pcI_{ncn\ carga2\ pós}$	100%		

Caso 9

Tabela B.11 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
0∠0	1,0971∠61,7397	1,0971∠61,7397
$pcVUF_{pré}$		0
$pcVUF_{carga2}$		100%

Tabela B.12 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_{n\ pré}$	$P_{n\ carga1\ pós}$	$P_{n\ carga2\ pós}$	$P_{n\ pós}$
0	0,0525	-0,1265	-0,0740
$pcP_{n\ carga1\ pós}$			-70,8729%
$pcP_{n\ carga2\ pós}$			170,8729%

Tabela B.13 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn\ pré}$	$\bar{I}_{ncn\ carga1\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ carga2\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ pós}$
0∠0	0∠0	0,0620∠171,7047	0,0620∠171,7047
$pcI_{ncn\ carga1\ pós}$	0		
$pcI_{ncn\ carga2\ pós}$	100%		

Caso 10

Tabela B.14 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
0 < 0	0,4835 < 149,1972	0,4835 < 149,1972
$pcVUF_{pré}$		0
$pcVUF_{carga2}$		100%

Tabela B.15 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
P_n pré	P_n carga1 pós	P_n carga2 pós	P_n pós
0	0,0102	-0,0246	-0,0144
pcP_n carga1 pós			-70,8729%
pcP_n carga2 pós			170,8729%

Tabela B.16 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
\bar{I}_{ncn} pré	\bar{I}_{ncn} carga1 pós	\bar{I}_{ncn} carga2 pós	\bar{I}_{ncn} pós
0 < 0	0 < 0	0,0273 < - 100,8378	0,0273 < - 100,8378
pcI_{ncn} carga1 pós	0		
pcI_{ncn} carga2 pós	100%		

Caso 11

Tabela B.17 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
0,6823 < 35,7142	0,5733 < 29,3734	0,1291 < - 114,9124
$pcVUF_{pré}$		118,2820%
$pcVUF_{carga2}$		-18,2820%

Tabela B.18 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n \text{ pré}$	$P_n \text{ carga1 pós}$	$P_n \text{ carga2 pós}$	$P_n \text{ pós}$
-0,0410	-0,0350	0,0145	-0,0205
$pcP_n \text{ carga1 pós}$			170,8729%
$pcP_n \text{ carga2 pós}$			-70,8729%

Tabela B.19 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn} \text{ pré}$	$\bar{I}_{ncn} \text{ carga1 pós}$	$\bar{I}_{ncn} \text{ carga2 pós}$	$\bar{I}_{ncn} \text{ pós}$
0,0386∠145,6792	0,0324∠139,3384	0∠0	0,0324∠139,3384
$pcI_{ncn} \text{ carga1 pós}$	100%		
$pcI_{ncn} \text{ carga2 pós}$	0		

Caso 12

Tabela B.20 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{\text{pré}}$	$\overline{VUF}_{\text{pós}}$	$\overline{VUF}_{\text{carga2}}$
0,3335∠124,2877	0,2809∠118,0470	0,0623∠ - 26,3732
$pcVUF_{\text{pré}}$		118,0437%
$pcVUF_{\text{carga2}}$		-18,0437%

Tabela B.21 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n \text{ pré}$	$P_n \text{ carga1 pós}$	$P_n \text{ carga2 pós}$	$P_n \text{ pós}$
-0,0097	-0,0083	0,0034	-0,0048
$pcP_n \text{ carga1 pós}$			170,8729%
$pcP_n \text{ carga2 pós}$			-70,8729%

Tabela B.22 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn\ pré}$	$\bar{I}_{ncn\ carga1\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ carga2\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ pós}$
0,0188∠ - 125,7473	0,0159∠ - 131,9880	0∠0	0,0159∠ - 131,9880
$pcI_{ncn\ carga1\ pós}$	100%		
$pcI_{ncn\ carga2\ pós}$	0		

Caso 13

Tabela B.23 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
1,3066∠67,8574	1,0971∠61,7397	0,2454∠ - 83,6941
$pcVUF_{pré}$		118,4223%
$pcVUF_{carga2}$		-18,4223%

Tabela B.24 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n\ pré$	$P_n\ carga1\ pós$	$P_n\ carga2\ pós$	$P_n\ pós$
-0,1484	-0,1265	0,0525	-0,0740
$pcP_n\ carga1\ pós$			170,8729%
$pcP_n\ carga2\ pós$			-70,8729%

Tabela B.25 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn\ pré}$	$\bar{I}_{ncn\ carga1\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ carga2\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ pós}$
0,0738∠177,8224	0,0620∠171,7047	0∠0	0,0620∠171,7047
$pcI_{ncn\ carga1\ pós}$	100%		
$pcI_{ncn\ carga2\ pós}$	0		

Caso 14

Tabela B.26 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
0,5750∠155,4644	0,4835∠149,1972	0,1082∠4,6586
$pcVUF_{pré}$		118,2292%
$pcVUF_{carga2}$		-18,2292%

Tabela B.27 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n pré$	$P_n carga1 pós$	$P_n carga2 pós$	$P_n pós$
-0,0288	-0,0246	0,0102	-0,0144
$pcP_n carga1 pós$			170,8729%
$pcP_n carga2 pós$			-70,8729%

Tabela B.28 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn pré}$	$\bar{I}_{ncn carga1 pós}$	$\bar{I}_{ncn carga2 pós}$	$\bar{I}_{ncn pós}$
0,0325∠ - 94,5706	0,0273∠ - 100,8378	0∠0	0,0273∠ - 100,8378
$pcI_{ncn carga1 pós}$	100%		
$pcI_{ncn carga2 pós}$	0		

Caso 15

Tabela B.29 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
0,6823∠35,7142	1,1582∠29,6989	0,4849∠21,2200
$pcVUF_{pré}$		58,5870%
$pcVUF_{carga2}$		41,4130%

Tabela B.30 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n \text{ pré}$	$P_n \text{ carga1 pós}$	$P_n \text{ carga2 pós}$	$P_n \text{ pós}$
-0,0410	-0,0422	-0,0422	-0,0844
$pcP_n \text{ carga1 pós}$			50%
$pcP_n \text{ carga2 pós}$			50%

Tabela B.31 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn} \text{ pré}$	$\bar{I}_{ncn} \text{ carga1 pós}$	$\bar{I}_{ncn} \text{ carga2 pós}$	$\bar{I}_{ncn} \text{ pós}$
0,0386∠145,6792	0,0327∠139,6639	0,0327∠139,6639	0,0654∠139,6639
$pcI_{ncn} \text{ carga1 pós}$	50%		
$pcI_{ncn} \text{ carga2 pós}$	50%		

Caso 16

Tabela B.32 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{\text{pré}}$	$\overline{VUF}_{\text{pós}}$	$\overline{VUF}_{\text{carga2}}$
0,6823∠35,7142	0,6440∠55,7869	0,2342∠145,0248
$pcVUF_{\text{pré}}$		99,5162%
$pcVUF_{\text{carga2}}$		0,4838%

Tabela B.33 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n \text{ pré}$	$P_n \text{ carga1 pós}$	$P_n \text{ carga2 pós}$	$P_n \text{ pós}$
-0,0410	0,0033	-0,0290	-0,0257
$pcP_n \text{ carga1 pós}$			-12,6311%
$pcP_n \text{ carga2 pós}$			112,6311%

Tabela B.34 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn\ pré}$	$\bar{I}_{ncn\ carga1\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ carga2\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ pós}$
0,0386∠145,6792	0,0323∠139,6251	0,0160∠ – 131,6669	0,0364∠165,7519
$pcI_{ncn\ carga1\ pós}$	79,7167%		
$pcI_{ncn\ carga2\ pós}$	20,2833%		

Caso 17

Tabela B.35 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
0,6823∠35,7142	1,6264∠50,7097	0,9833∠61,0528
$pcVUF_{pré}$		40,5238%
$pcVUF_{carga2}$		59,4762%

Tabela B.36 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n\ pré$	$P_n\ carga1\ pós$	$P_n\ carga2\ pós$	$P_n\ pós$
-0,0410	0,0555	-0,2199	-0,1644
$pcP_n\ carga1\ pós$			-33,7403%
$pcP_n\ carga2\ pós$			133,7403%

Tabela B.37 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn\ pré}$	$\bar{I}_{ncn\ carga1\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ carga2\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ pós}$
0,0386∠145,6792	0,0327∠139,2673	0,0626∠171,6734	0,0919∠160,6747
$pcI_{ncn\ carga1\ pós}$	33,1440%		
$pcI_{ncn\ carga2\ pós}$	66,8560%		

Caso 18

Tabela B.38 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
0,6823∠35,7142	0,5397∠81,5928	0,4941∠164,0744
$pcVUF_{pré}$		88,0213%
$pcVUF_{carga2}$		11,9787%

Tabela B.39 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n\ pré$	$P_n\ carga1\ pós$	$P_n\ carga2\ pós$	$P_n\ pós$
-0,0410	0,0360	-0,0541	-0,0181
$pcP_n\ carga1\ pós$			-198,6042%
$pcP_n\ carga2\ pós$			298,6042%

Tabela B.40 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn}\ pré$	$\bar{I}_{ncn}\ carga1\ pós$	$\bar{I}_{ncn}\ carga2\ pós$	$\bar{I}_{ncn}\ pós$
0,0386∠145,6792	0,0324∠139,6253	0,0276∠ - 100,8454	0,0305∠ - 168,4422
$pcI_{ncn}\ carga1\ pós$	65,5154%		
$pcI_{ncn}\ carga2\ pós$	34,4846%		

Caso 19

Tabela B.41 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
0,3335∠124,2877	0,6440∠55,7869	0,6071∠25,0452
$pcVUF_{pré}$		18,9802%
$pcVUF_{carga2}$		81,0198%

Tabela B.42 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n \text{ pré}$	$P_n \text{ carga1 pós}$	$P_n \text{ carga2 pós}$	$P_n \text{ pós}$
-0,0097	-0,0290	0,0033	-0,0257
$pcP_n \text{ carga1 pós}$			112,6311%
$pcP_n \text{ carga2 pós}$			-12,6311%

Tabela B.43 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn} \text{ pré}$	$\bar{I}_{ncn} \text{ carga1 pós}$	$\bar{I}_{ncn} \text{ carga2 pós}$	$\bar{I}_{ncn} \text{ pós}$
0,0188∠ - 125,7473	0,0160∠ - 131,6669	0,0323∠139,6251	0,0364∠165,7519
$pci_{ncn} \text{ carga1 pós}$	20,2833%		
$pci_{ncn} \text{ carga2 pós}$	79,7167%		

Caso 20

Tabela B.44 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
0,3335∠124,2877	0,5602∠118,3303	0,2311∠109,7170
$pcVUF_{pré}$		59,2097%
$pcVUF_{carga2}$		40,7903%

Tabela B.45 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n \text{ pré}$	$P_n \text{ carga1 pós}$	$P_n \text{ carga2 pós}$	$P_n \text{ pós}$
-0,0097	-0,0096	-0,0096	-0,0192
$pcP_n \text{ carga1 pós}$			50%
$pcP_n \text{ carga2 pós}$			50%

Tabela B.46 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn\ pré}$	$\bar{I}_{ncn\ carga1\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ carga2\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ pós}$
0,0188∠ – 125,7473	0,0158∠ – 131,7047	0,0158∠ – 131,7047	0,0317∠ – 131,7047
$pcI_{ncn\ carga1\ pós}$	50%		
$pcI_{ncn\ carga2\ pós}$	50%		

Caso 21

Tabela B.47 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
0,3335∠124,2877	1,2781∠72,6071	1,1028∠58,8810
$pcVUF_{pré}$		16,1803%
$pcVUF_{carga2}$		83,8197%

Tabela B.48 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n\ pré$	$P_n\ carga1\ pós$	$P_n\ carga2\ pós$	$P_n\ pós$
-0,0097	-0,0219	-0,0783	-0,1002
$pcP_n\ carga1\ pós$			21,8467%
$pcP_n\ carga2\ pós$			78,1533%

Tabela B.49 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn\ pré}$	$\bar{I}_{ncn\ carga1\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ carga2\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ pós}$
0,0188∠ – 125,7473	0,0160∠ – 132,0622	0,0620∠171,9756	0,0722∠ – 177,4279
$pcI_{ncn\ carga1\ pós}$	15,5911%		
$pcI_{ncn\ carga2\ pós}$	84,4089%		

Caso 22

Tabela B.50 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
0,3335∠124,2877	0,7384∠138,1296	0,4222∠149,0240
$pcVUF_{pré}$		43,8555%
$pcVUF_{carga2}$		56,1445%

Tabela B.51 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n\ pré$	$P_n\ carga1\ pós$	$P_n\ carga2\ pós$	$P_n\ pós$
-0,0097	0,0095	-0,0431	-0,0335
$pcP_n\ carga1\ pós$			-28,4609%
$pcP_n\ carga2\ pós$			128,4609%

Tabela B.52 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn}\ pré$	$\bar{I}_{ncn}\ carga1\ pós$	$\bar{I}_{ncn}\ carga2\ pós$	$\bar{I}_{ncn}\ pós$
0,0188∠ - 125,7473	0,0159∠ - 131,7037	0,0273∠ - 100,5572	0,0417∠ - 111,9054
$pcI_{ncn}\ carga1\ pós$	35,7944%		
$pcI_{ncn}\ carga2\ pós$	64,2056%		

Caso 23

Tabela B.53 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
1,3066∠67,8574	1,6264∠50,7097	0,5396∠5,1547
$pcVUF_{pré}$		76,7676%
$pcVUF_{carga2}$		23,2324%

Tabela B.54 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n \text{ pré}$	$P_n \text{ carga1 pós}$	$P_n \text{ carga2 pós}$	$P_n \text{ pós}$
-0,1484	-0,2199	0,0555	-0,1644
$pcP_n \text{ carga1 pós}$			133,7403%
$pcP_n \text{ carga2 pós}$			-33,7403%

Tabela B.55 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn \text{ pré}}$	$\bar{I}_{ncn \text{ carga1 pós}}$	$\bar{I}_{ncn \text{ carga2 pós}}$	$\bar{I}_{ncn \text{ pós}}$
0,0738∠177,8224	0,0626∠171,6734	0,0327∠139,2673	0,0919∠160,6747
$pcI_{ncn \text{ carga1 pós}}$	66,8560%		
$pcI_{ncn \text{ carga2 pós}}$	33,1440%		

Caso 24

Tabela B.56 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{\text{pré}}$	$\overline{VUF}_{\text{pós}}$	$\overline{VUF}_{\text{carga2}}$
1,3066∠67,8574	1,2781∠72,6071	0,1108∠175,1576
$pcVUF_{\text{pré}}$		101,8846%
$pcVUF_{\text{carga2}}$		-1,8846%

Tabela B.57 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n \text{ pré}$	$P_n \text{ carga1 pós}$	$P_n \text{ carga2 pós}$	$P_n \text{ pós}$
-0,1484	-0,0783	-0,0219	-0,1002
$pcP_n \text{ carga1 pós}$			78,1533%
$pcP_n \text{ carga2 pós}$			21,8467%

Tabela B.58 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn\ pré}$	$\bar{I}_{ncn\ carga1\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ carga2\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ pós}$
0,0738∠177,8224	0,0620∠171,9756	0,0160∠ – 132,0622	0,0722∠ – 177,4279
$pcI_{ncn\ carga1\ pós}$	84,4089%		
$pcI_{ncn\ carga2\ pós}$	15,5911%		

Caso 25

Tabela B.59 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
1,3066∠67,8574	1,2292∠85,0682	0,3871∠177,8778
$pcVUF_{pré}$		101,5436%
$pcVUF_{carga2}$		-1,5436%

Tabela B.60 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n\ pré$	$P_n\ carga1\ pós$	$P_n\ carga2\ pós$	$P_n\ pós$
-0,1484	-0,0061	-0,0868	-0,0929
$pcP_n\ carga1\ pós$			6,5931%
$pcP_n\ carga2\ pós$			93,4069%

Tabela B.61 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn\ pré}$	$\bar{I}_{ncn\ carga1\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ carga2\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ pós}$
0,0738∠177,8224	0,0623∠171,8199	0,0274∠ – 101,4387	0,0695∠ – 164,9668
$pcI_{ncn\ carga1\ pós}$	82,4017%		
$pcI_{ncn\ carga2\ pós}$	17,5983%		

Caso 26

Tabela B.62 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
0,5750∠155,4644	0,5397∠81,5928	0,6704∠26,1122
$pcVUF_{pré}$		29,5993%
$pcVUF_{carga2}$		70,4007%

Tabela B.63 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n\ pré$	$P_n\ carga1\ pós$	$P_n\ carga2\ pós$	$P_n\ pós$
-0,0288	-0,0541	0,0360	-0,0181
$pcP_n\ carga1\ pós$			298,6042%
$pcP_n\ carga2\ pós$			-198,6042%

Tabela B.64 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn}\ pré$	$\bar{I}_{ncn}\ carga1\ pós$	$\bar{I}_{ncn}\ carga2\ pós$	$\bar{I}_{ncn}\ pós$
0,0325∠ – 94,5706	0,0276∠ – 100,8454	0,0324∠139,6253	0,0305∠ – 168,4422
$pcI_{ncn}\ carga1\ pós$	34,4846%		
$pcI_{ncn}\ carga2\ pós$	65,5154%		

Caso 27

Tabela B.65 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
0,5750∠155,4644	0,7384∠138,1296	0,2555∠96,0118
$pcVUF_{pré}$		74,3370%
$pcVUF_{carga2}$		25,6630%

Tabela B.66 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
P_n pré	P_n carga1 pós	P_n carga2 pós	P_n pós
-0,0288	-0,0431	0,0095	-0,0335
pcP_n carga1 pós			128,4609%
pcP_n carga2 pós			-28,4609%

Tabela B.67 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
\bar{I}_{ncn} pré	\bar{I}_{ncn} carga1 pós	\bar{I}_{ncn} carga2 pós	\bar{I}_{ncn} pós
0,0325∠ - 94,5706	0,0273∠ - 100,5572	0,0159∠ - 131,7037	0,0417∠ - 111,9054
pcI_{ncn} carga1 pós	64,2056%		
pcI_{ncn} carga2 pós	35,7944%		

Caso 28

Tabela B.68 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
0,5750∠155,4644	1,2292∠85,0682	1,1693∠57,4696
$pcVUF_{pré}$		15,6960%
$pcVUF_{carga2}$		84,3040%

Tabela B.69 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
P_n pré	P_n carga1 pós	P_n carga2 pós	P_n pós
-0,0288	-0,0868	-0,0061	-0,0929
pcP_n carga1 pós			93,4069%
pcP_n carga2 pós			6,5931%

Tabela B.70 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn\ pré}$	$\bar{I}_{ncn\ carga1\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ carga2\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ pós}$
0,0325∠ - 94,5706	0,0274∠ - 101,4387	0,0623∠171,8199	0,0695∠ - 164,9668
$pcI_{ncn\ carga1\ pós}$	17,5983%		
$pcI_{ncn\ carga2\ pós}$	82,4017%		

Caso 29

Tabela B.71 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
0,5750∠155,4644	0,9713∠149,3365	0,4042∠140,6019
$pcVUF_{pré}$		58,8655%
$pcVUF_{carga2}$		41,1345%

Tabela B.72 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n\ pré$	$P_n\ carga1\ pós$	$P_n\ carga2\ pós$	$P_n\ pós$
-0,0288	-0,0291	-0,0291	-0,0582
$pcP_n\ carga1\ pós$			50%
$pcP_n\ carga2\ pós$			50%

Tabela B.73 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn\ pré}$	$\bar{I}_{ncn\ carga1\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ carga2\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ pós}$
0,0325∠ - 94,5706	0,0274∠ - 100,6985	0,0274∠ - 100,6985	0,0549∠ - 100,6985
$pcI_{ncn\ carga1\ pós}$	50%		
$pcI_{ncn\ carga2\ pós}$	50%		

Caso 30

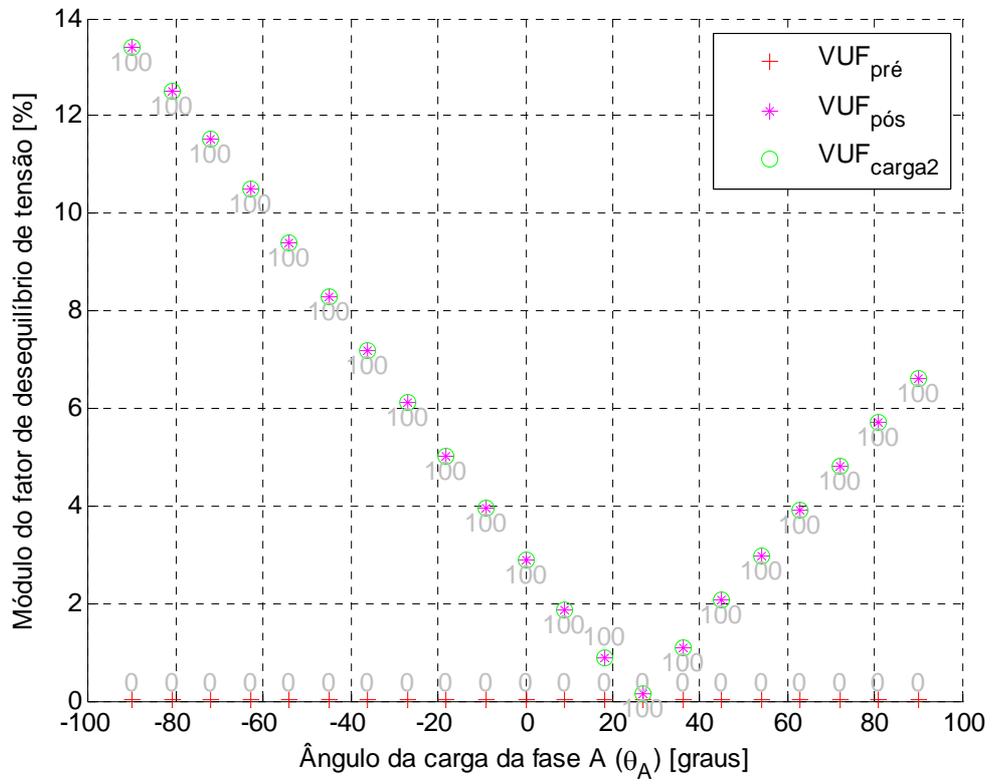


Figura B.1 – Resultados do método da IEC.

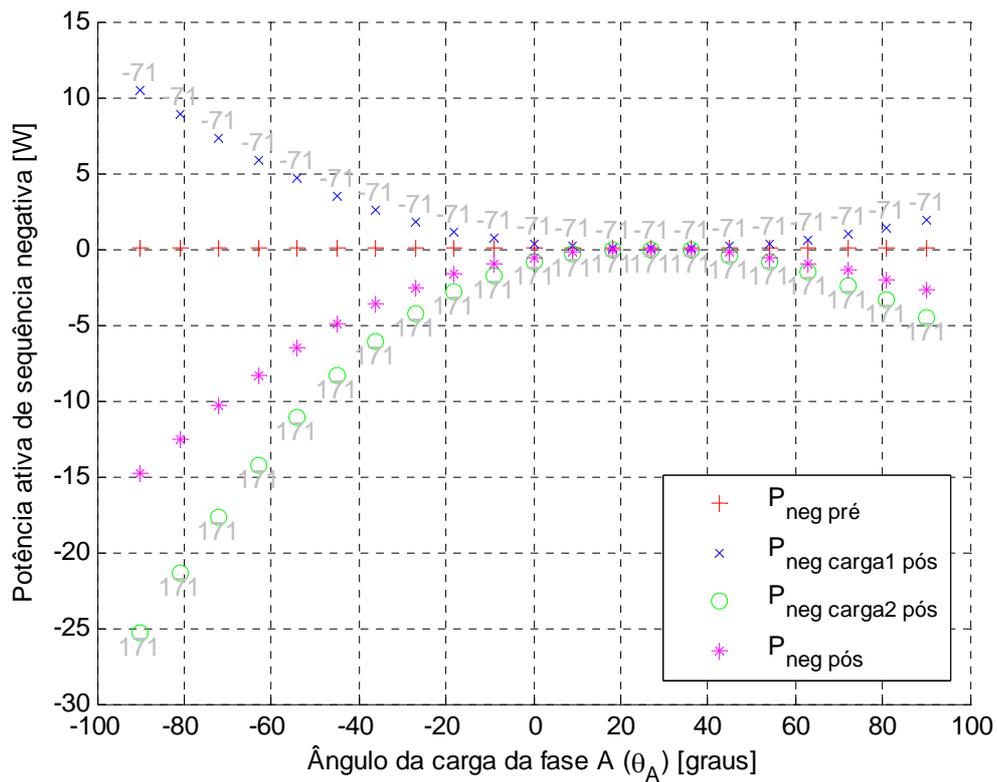


Figura B.2 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

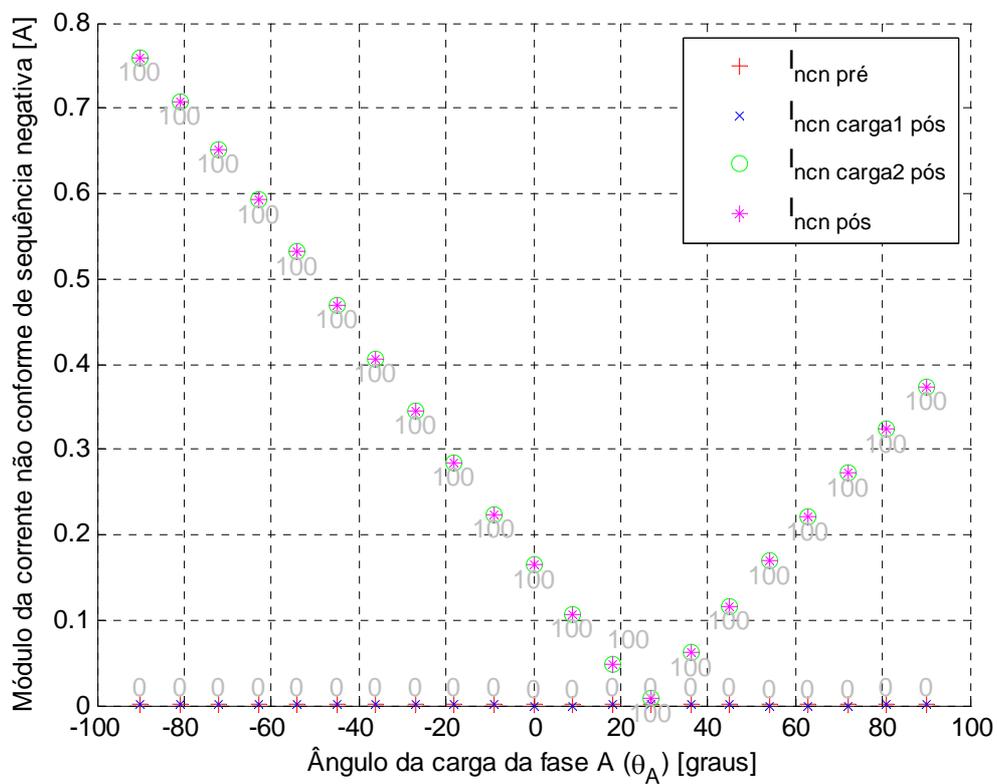


Figura B.3 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Caso 31

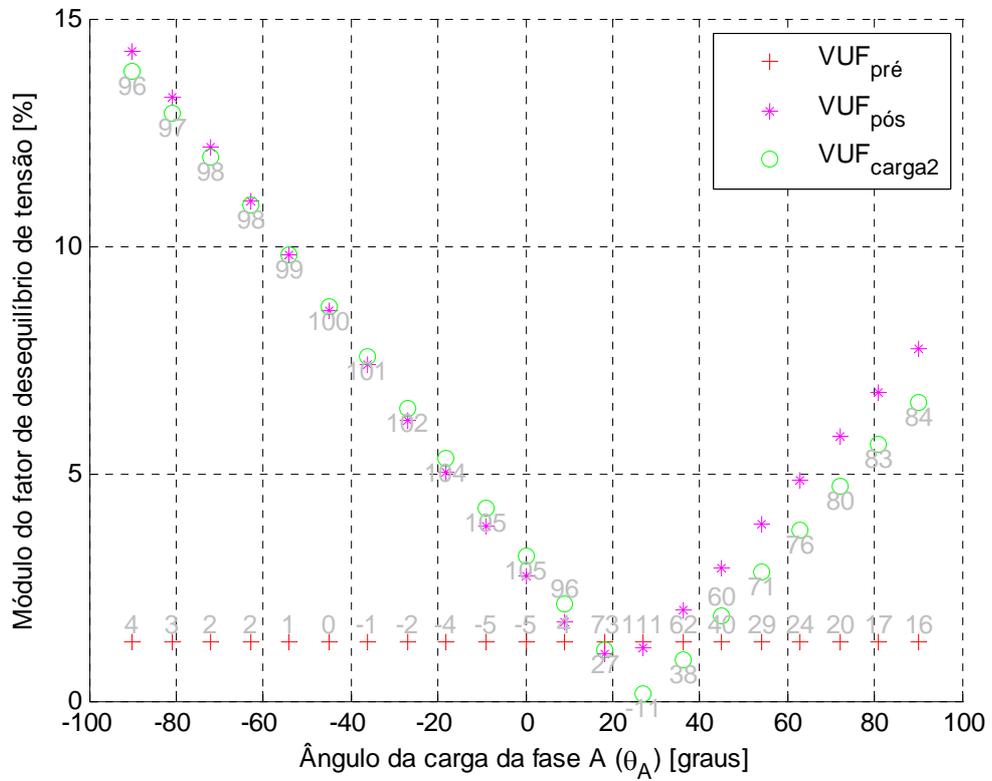


Figura B.4 – Resultados do método da IEC.

Caso 32

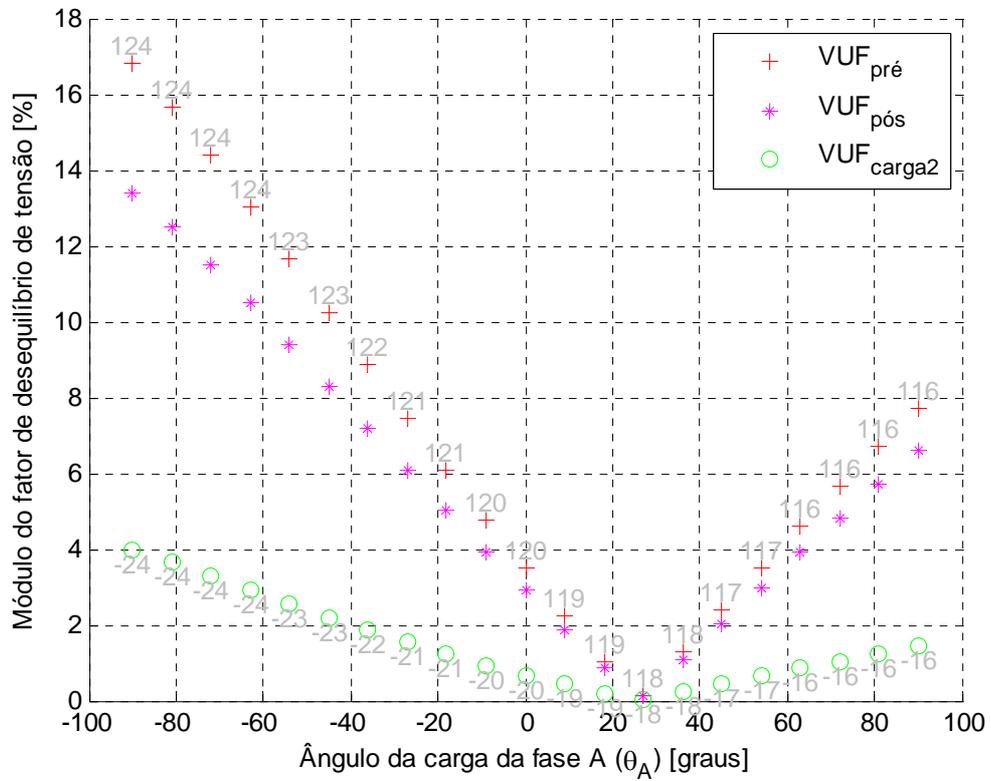


Figura B.7 – Resultados do método da IEC.

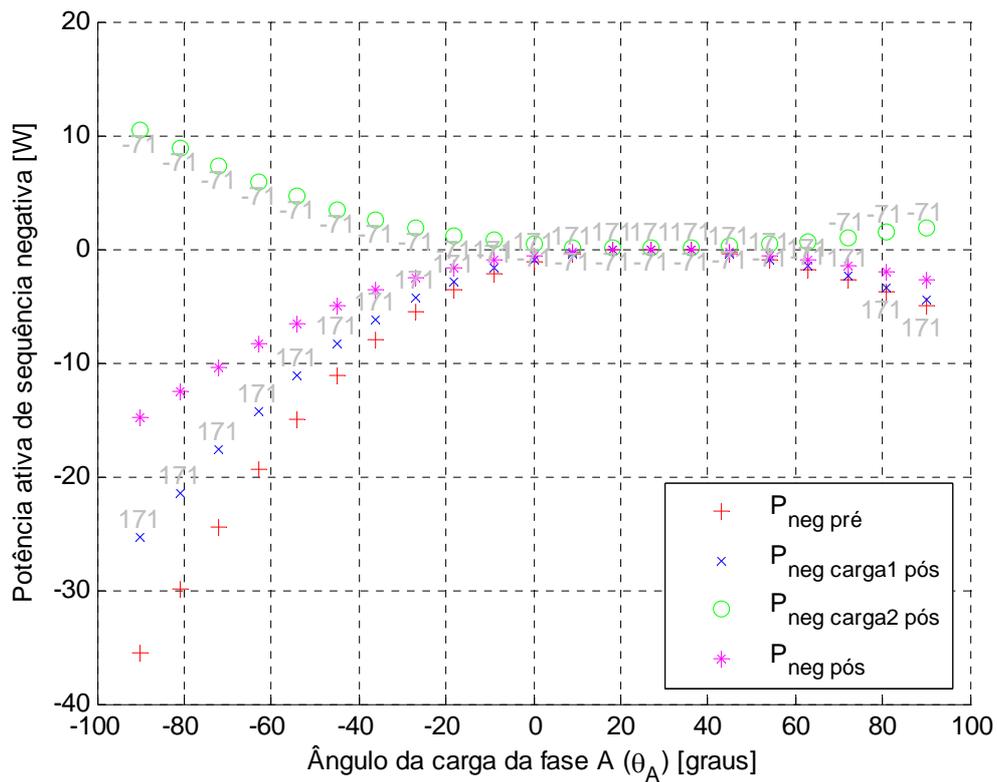


Figura B.8 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

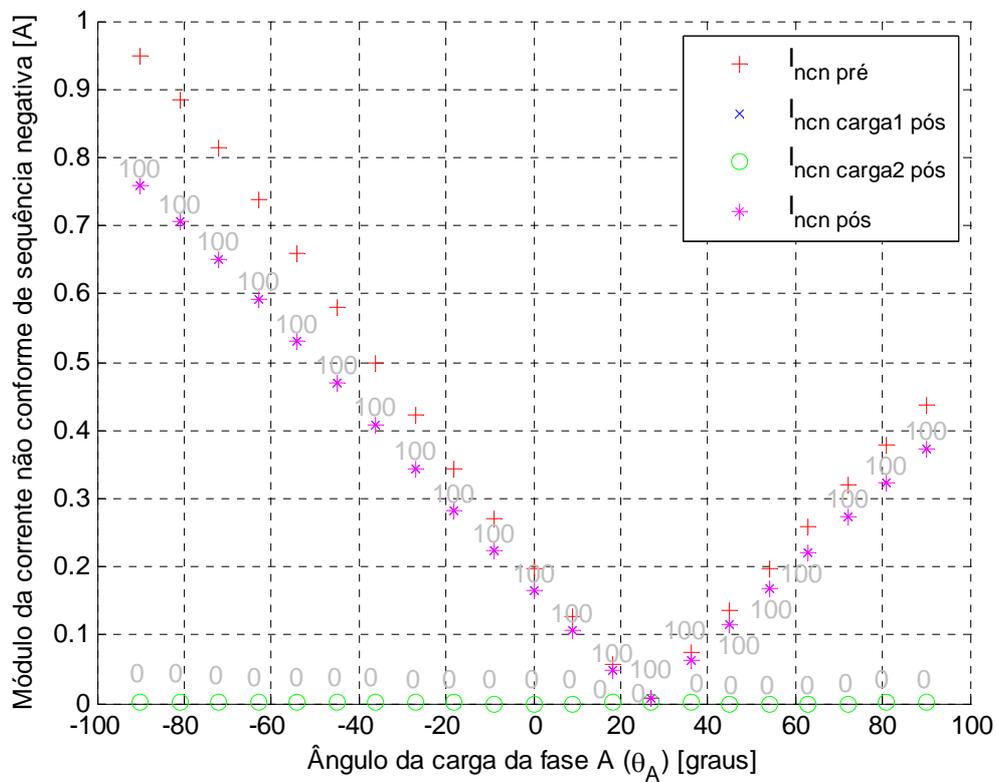


Figura B.9 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Caso 33

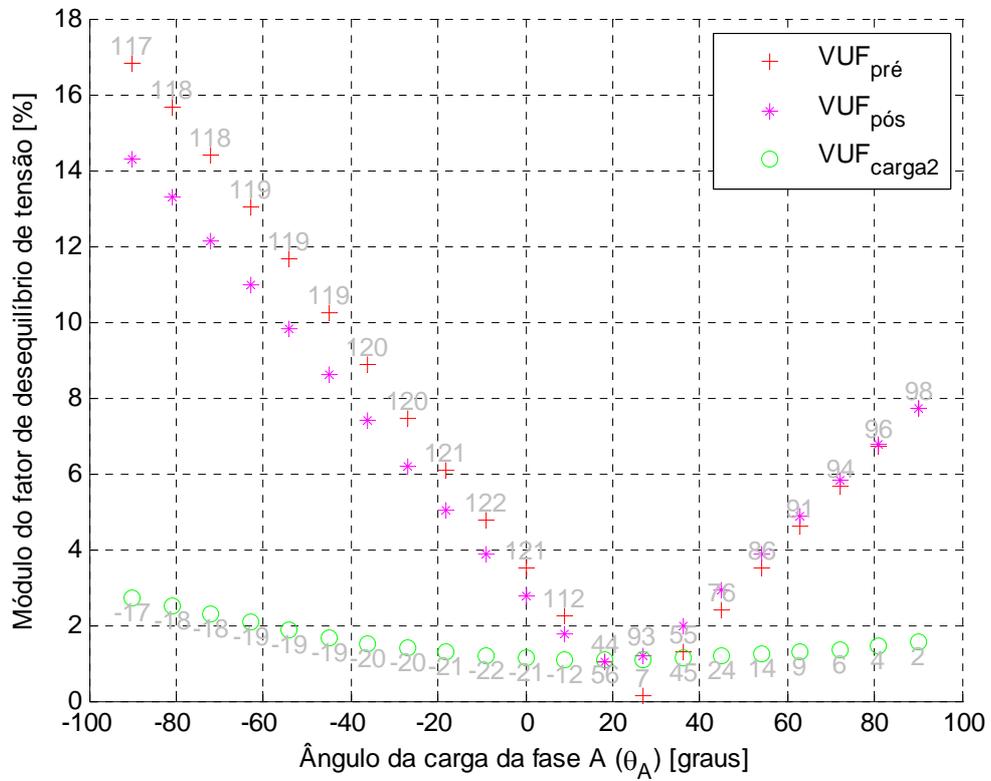


Figura B.10 – Resultados do método da IEC.

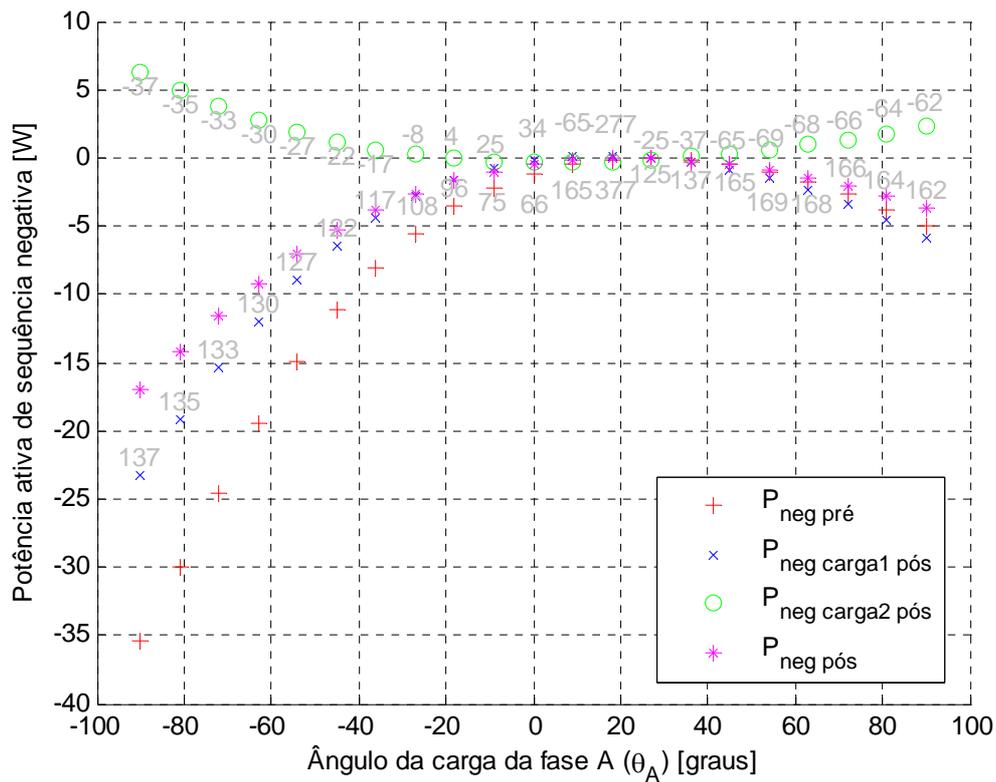


Figura B.11 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

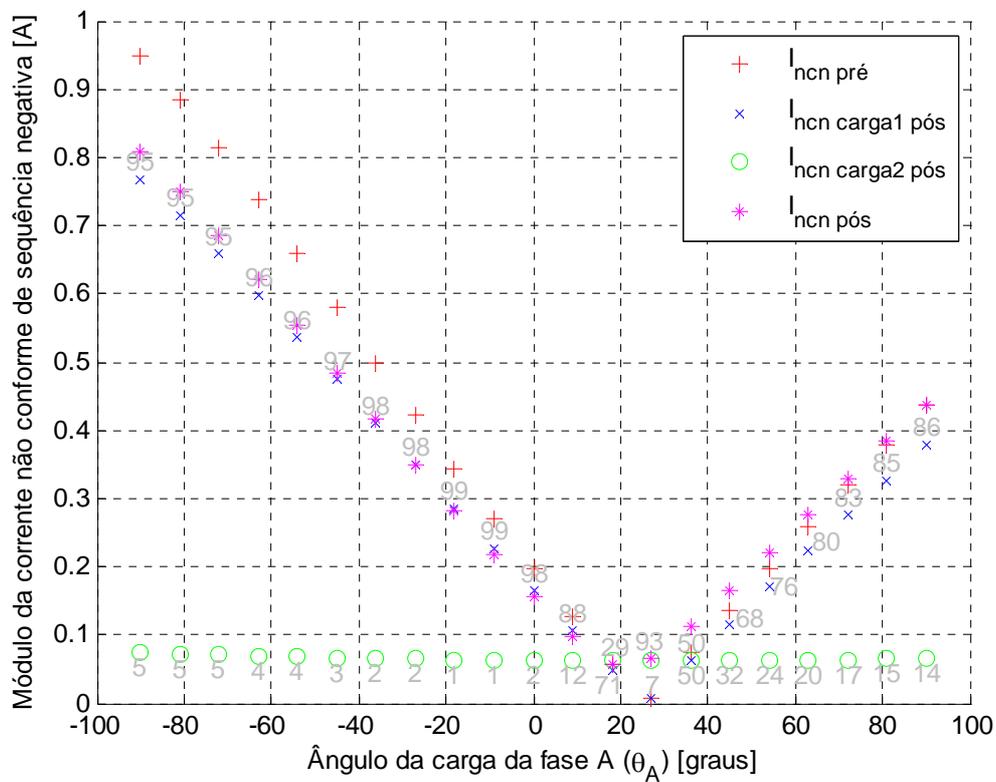


Figura B.12 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

A Tabela B.74 apresenta uma comparação entre os casos analisados das outras simulações computacionais indicando a concordância ou a discordância entre os métodos em relação à atribuição de responsabilidades.

Tabela B.74 – Resultados da comparação entre os métodos – outras simulações computacionais.

Casos	IEC	Fluxo de potência trifásico	Corrente conforme e não conforme
7	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos
8	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos
9	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos
10	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos
11	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos
12	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos
13	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos
14	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos
15	Não concorda com os demais métodos	Não concorda com o método da IEC Concorda com o método da corrente conforme e não conforme	Não concorda com o método da IEC Concorda com o método do fluxo de potência trifásico
16	Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico Concorda com o método da corrente conforme e não conforme	Não concorda com os demais métodos	Concorda com o método da IEC Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico
17	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos

Casos	IEC	Fluxo de potência trifásico	Corrente conforme e não conforme
18	Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico Concorda com o método da corrente conforme e não conforme	Não concorda com os demais métodos	Concorda com o método da IEC Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico
19	Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico Concorda com o método da corrente conforme e não conforme	Não concorda com os demais métodos	Concorda com o método da IEC Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico
20	Não concorda com os demais métodos	Não concorda com o método da IEC Concorda com o método da corrente conforme e não conforme	Não concorda com o método da IEC Concorda com o método do fluxo de potência trifásico
21	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos
22	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos
23	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos
24	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos
25	Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico Concorda com o método da corrente conforme e não conforme	Não concorda com os demais métodos	Concorda com o método da IEC Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico

Casos	IEC	Fluxo de potência trifásico	Corrente conforme e não conforme
26	Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico Concorda com o método da corrente conforme e não conforme	Não concorda com os demais métodos	Concorda com o método da IEC Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico
27	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos
28	Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico Concorda com o método da corrente conforme e não conforme	Não concorda com os demais métodos	Concorda com o método da IEC Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico
29	Não concorda com os demais métodos	Não concorda com o método da IEC Concorda com o método da corrente conforme e não conforme	Não concorda com o método da IEC Concorda com o método do fluxo de potência trifásico
30	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos
31	Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico Concorda com o método da corrente conforme e não conforme	Não concorda com os demais métodos	Concorda com o método da IEC Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico
32	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos
33	Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico Concorda com o método da corrente conforme e não conforme	Não concorda com os demais métodos	Concorda com o método da IEC Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico

C – RESULTADOS LABORATORIAIS DOS OUTROS CASOS

Neste apêndice são apresentadas as configurações das cargas e os resultados dos outros ensaios laboratoriais selecionados para a avaliação dos métodos de compartilhamento/atribuição de responsabilidades devido à presença do desequilíbrio de tensão.

Os valores das impedâncias (\bar{Z}_A , \bar{Z}_B e \bar{Z}_C) das outras cargas trifásicas laboratoriais estão expostos nas Tabelas C.1 e C.2.

Tabela C.1 – Impedâncias da carga 1 dos casos 4 e 5.

\bar{Z}_A		\bar{Z}_B		\bar{Z}_C	
Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo
168,4403	40,8830	168,6833	41,0090	167,9664	41,0496
R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]
127,3489	110,2470	127,2895	110,6862	126,6704	110,3056

Tabela C.2 – Impedâncias da carga 1 do caso 6.

\bar{Z}_A		\bar{Z}_B		\bar{Z}_C	
Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo	Módulo [Ω]	Ângulo
284,6169	25,0493	170,7639	42,1050	216,5684	23,1810
R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	X [Ω]
257,8470	120,5060	126,6927	114,4957	199,0839	85,2494

Como os 3 primeiros casos laboratoriais foram detalhados no Capítulo 4, a Tabela C.3 expõe os 5 casos restantes de um total de 8 casos laboratoriais, que foram estudados para a elaboração desta dissertação.

Tabela C.3 – Especificação dos outros casos laboratoriais.

Casos	Configuração das cargas	Descrição
4	Cargas 1 e 2 pouco desequilibradas.	Para o sistema pré-conexão, a Tabela C.1 fornece as impedâncias da carga 1. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela 3.3 fornece as impedâncias da carga 2.
5	Carga 1 aproximadamente equilibrada (com a mesma configuração da carga 1 do caso 4) e carga 2 desequilibrada com incremento de aproximadamente 48% na impedância da fase A (em relação a carga 2 do caso 4).	Para o sistema pré-conexão, a Tabela C.1 fornece as impedâncias da carga 1. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela 3.6 fornece as impedâncias da carga 2.
6	Carga 1 desequilibrada com incremento de aproximadamente 74% na impedância da fase A (em relação a carga 1 do caso 1) e carga 2 desequilibrada (com a mesma configuração da carga 2 do caso 1).	Para o sistema pré-conexão, a Tabela C.2 fornece as impedâncias da carga 1. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela 3.5 fornece as impedâncias da carga 2.
7	Carga 1 desequilibrada (com a mesma configuração da carga 1 do caso 1) e carga 2 desequilibrada com incremento de aproximadamente 48% na impedância fase A (em relação a carga 2 do caso 4).	Para o sistema pré-conexão, a Tabela 3.4 fornece as impedâncias da carga 1. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela 3.6 fornece as impedâncias da carga 2.
8	Carga 1 desequilibrada com incremento de aproximadamente 48% na impedância da fase A (em relação a carga 1 do caso 4) e carga 2 desequilibrada (com a mesma configuração da carga 2 do caso 1).	Para o sistema pré-conexão, a Tabela 3.7 fornece as impedâncias da carga 1. Já para o sistema pós-conexão, a Tabela 3.5 fornece as impedâncias da carga 2.

A seguir, são exibidos os resultados desses 5 casos experimentais.

Caso 4

Tabela C.4 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
0,7685∠ – 82,5192	0,9914∠ – 79,3791	0,2279∠ – 68,7361
$pcVUF_{pré}$		77,4031%
$pcVUF_{carga2}$		22,5969%

Tabela C.5 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n \text{ pré}$	$P_n \text{ carga1 pós}$	$P_n \text{ carga2 pós}$	$P_n \text{ pós}$
0,0249	0,0326	0,0339	0,0665
$pcP_n \text{ carga1 pós}$			48,9685%
$pcP_n \text{ carga2 pós}$			51,0315%

Tabela C.6 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn} \text{ pré}$	$\bar{I}_{ncn} \text{ carga1 pós}$	$\bar{I}_{ncn} \text{ carga2 pós}$	$\bar{I}_{ncn} \text{ pós}$
0,0006∠176,2364	0,0005∠170,9910	0,0009∠-163,6606	0,0014∠-172,9003
$pcI_{ncn} \text{ carga1 pós}$	36,0321%		
$pcI_{ncn} \text{ carga2 pós}$	63,9679%		

Caso 5

Tabela C.7 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{\text{pré}}$	$\overline{VUF}_{\text{pós}}$	$\overline{VUF}_{\text{carga2}}$
0,7685∠-82,5192	1,4622∠-0,4486	1,5552∠28,8543
$pcVUF_{\text{pré}}$		7,2504%
$pcVUF_{\text{carga2}}$		92,7496%

Tabela C.8 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n \text{ pré}$	$P_n \text{ carga1 pós}$	$P_n \text{ carga2 pós}$	$P_n \text{ pós}$
0,0249	0,0698	-0,4888	-0,4190
$pcP_n \text{ carga1 pós}$			-16,6595%
$pcP_n \text{ carga2 pós}$			116,6595%

Tabela C.9 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn\ pré}$	$\bar{I}_{ncn\ carga1\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ carga2\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ pós}$
0,0006∠176,2364	0,0005∠168,2760	0,0831∠151,9505	0,0836∠152,0562
$pci_{ncn\ carga1\ pós}$	0,6302%		
$pci_{ncn\ carga2\ pós}$	99,3698%		

Caso 6

Tabela C.10 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
2,5734∠ - 58,7490	5,0678∠ - 93,5838	3,3009∠ - 120,0277
$pcVUF_{pré}$		41,6800%
$pcVUF_{carga2}$		58,3200%

Tabela C.11 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n\ pré$	$P_n\ carga1\ pós$	$P_n\ carga2\ pós$	$P_n\ pós$
-0,5708	-1,1533	0,2110	-0,9423
$pcP_n\ carga1\ pós$			122,3973%
$pcP_n\ carga2\ pós$			-22,3973%

Tabela C.12 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn\ pré}$	$\bar{I}_{ncn\ carga1\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ carga2\ pós}$	$\bar{I}_{ncn\ pós}$
0,0985∠62,5124	0,0839∠57,8037	0,1585∠ - 2,6360	0,2128∠17,4124
$pci_{ncn\ carga1\ pós}$	30,0171%		
$pci_{ncn\ carga2\ pós}$	69,9829%		

Caso 7

Tabela C.13 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
4,2660∠ - 107,9154	2,8398∠ - 89,6354	1,8047∠42,5090
$pcVUF_{pré}$		142,6417%
$pcVUF_{carga2}$		-42,6417%

Tabela C.14 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n pré$	$P_n carga1 pós$	$P_n carga2 pós$	$P_n pós$
-0,9929	0,0414	-0,1303	-0,0889
$pcP_n carga1 pós$			-46,5017%
$pcP_n carga2 pós$			146,5017%

Tabela C.15 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn pré}$	$\bar{I}_{ncn carga1 pós}$	$\bar{I}_{ncn carga2 pós}$	$\bar{I}_{ncn pós}$
0,1888∠0,9151	0,1682∠ - 3,9431	0,0857∠150,6264	0,0980∠18,1182
$pci_{ncn carga1 pós}$	159,1010%		
$pci_{ncn carga2 pós}$	-59,1010%		

Caso 8

Tabela C.16 – Resultados do método da IEC.

Fatores de desequilíbrio de tensão [%]		
$\overline{VUF}_{pré}$	$\overline{VUF}_{pós}$	\overline{VUF}_{carga2}
2,2503∠1,5930	3,2254∠ - 77,1576	3,5546∠ - 115,5397
$pcVUF_{pré}$		13,6105%
$pcVUF_{carga2}$		86,3895%

Tabela C.17 – Resultados do método do fluxo de potência trifásico.

Potências ativas de sequência negativa [W]			
$P_n \text{ pré}$	$P_n \text{ carga1 pós}$	$P_n \text{ carga2 pós}$	$P_n \text{ pós}$
-0,8857	-0,9240	0,5842	-0,3398
$pcP_n \text{ carga1 pós}$			271,9252%
$pcP_n \text{ carga2 pós}$			-171,9252%

Tabela C.18 – Resultados do método da corrente conforme e não conforme.

Correntes não conformes [A]			
$\bar{I}_{ncn} \text{ pré}$	$\bar{I}_{ncn} \text{ carga1 pós}$	$\bar{I}_{ncn} \text{ carga2 pós}$	$\bar{I}_{ncn} \text{ pós}$
0,1189∠135,5938	0,1018∠130,9668	0,1546∠ - 1,5657	0,1139∠39,6117
$pcI_{ncn} \text{ carga1 pós}$	-2,1129%		
$pcI_{ncn} \text{ carga2 pós}$	102,1129%		

A Tabela C.19 expõe uma comparação entre os casos analisados dos outros ensaios laboratoriais apontando a concordância ou a discordância entre os métodos em relação ao compartilhamento de responsabilidades.

Tabela C.19 – Resultados da comparação entre os métodos – outros ensaios laboratoriais.

Casos	IEC	Fluxo de potência trifásico	Corrente conforme e não conforme
4	Não concorda com os demais métodos	Não concorda com o método da IEC Concorda com o método da corrente conforme e não conforme	Não concorda com o método da IEC Concorda com o método do fluxo de potência trifásico
5	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos	Concorda com os demais métodos
6	Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico Concorda com o método da corrente conforme e não conforme	Não concorda com os demais métodos	Concorda com o método da IEC Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico
7	Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico Concorda com o método da corrente conforme e não conforme	Não concorda com os demais métodos	Concorda com o método da IEC Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico
8	Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico Concorda com o método da corrente conforme e não conforme	Não concorda com os demais métodos	Concorda com o método da IEC Não concorda com o método do fluxo de potência trifásico