

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**



**AVALIAÇÃO DAS METODOLOGIAS PARA A ATRIBUIÇÃO DAS PARCELAS
DE RESPONSABILIDADE SOBRE OS DESEQUILÍBRIOS**

THAÍS MATOS SCOTTI

**UBERLÂNDIA – MG
DEZEMBRO/2017**

THAÍS MATOS SCOTTI

**AVALIAÇÃO DAS METODOLOGIAS PARA A ATRIBUIÇÃO DAS PARCELAS
DE RESPONSABILIDADE SOBRE OS DESEQUILÍBRIOS**

Trabalho apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheira Eletricista.

UBERLÂNDIA – MG
DEZEMBRO/2017

THAÍS MATOS SCOTTI

**AVALIAÇÃO DAS METODOLOGIAS PARA A ATRIBUIÇÃO DAS PARCELAS DE
RESPONSABILIDADES SOBRE OS DESEQUILÍBRIOS**

Trabalho apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheira Eletricista.

Prof. José Carlos de Oliveira, Ph.D.

Orientador

Prof. Carlos Eduardo Tavares, Dr.

Coordenador do programa de graduação em
Engenharia Elétrica da UFU

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ser a força que me move, me inspira e me motiva em todos os momentos.

Agradeço ao meu professor orientador, José Carlos de Oliveira, pela oportunidade ímpar de conviver com um dos maiores exemplos de competência, humildade e profissionalismo que já conheci.

Agradeço a Raquel Filiagi, minha coorientadora, pela imensa disposição em me ajudar, pela paciência, por todos os ensinamentos e por avivar em mim o interesse pela área da Qualidade da Energia.

Expresso minha sincera gratidão aos meus pais e irmão, por todo incentivo, carinho e dedicação a mim devotadas, sem os quais jamais alcançaria qualquer um dos meus objetivos.

Estendo meus agradecimentos aos meus colegas de faculdade que me acompanharam até aqui e aos professores que contribuíram para o meu crescimento e aprendizado.

RESUMO

Um sistema elétrico trifásico ideal deve ser provido de tensões senoidais de mesma magnitude em todas as fases e defasadas de 120° entre si. Entretanto, em instalações reais, as tensões e correntes podem apresentar comportamento dissemelhante em cada fase, caracterizando um desequilíbrio. Tais fenômenos podem ocorrer pelas mais variadas razões, as quais estão intimamente ligadas aos desbalanceamentos provenientes dos agentes supridores e consumidores. Diante deste panorama, junto ao ponto de acoplamento entre estes dois agentes, surge a questão da atribuição ou do compartilhamento de responsabilidade sobre o fenômeno em pauta, que se apresenta inserido no contexto dos indicadores da qualidade da energia. Para a solução deste questionamento, a literatura atinente expõe diversas metodologias atreladas à matéria, as quais ainda se apresentam como tema merecedores de investigações até sua consolidação e utilização. Dessarte, este trabalho encontra-se focado na avaliação da eficácia dos principais procedimentos existentes para fins do compartilhamento de responsabilidades sobre os indicadores de conformidade dos desequilíbrios, objetivando, sobretudo, a determinação de um processo confiável aos propósitos das diretrizes normativas em prática no país.

Palavras-chave: atribuição de responsabilidades, desequilíbrios de tensão e corrente, método da superposição, qualidade da energia.

ABSTRACT

An ideal three-phase electrical system is expected to show sine-wave voltages with the same magnitude and 120° phase shifted from each other. However, in practice, the voltages and currents may present dissimilar behavior characterizing the so-called electrical system imbalance. Such phenomenon may occur due to a variety of non-ideal operational conditions found in both utilities and consumers. Given this scenario, at the point of common coupling between these two agents, the subject of sharing the responsibility of a given degree of imbalance emerges as a relevant topic within the context of the power quality indicators. Aiming at providing means to find the contribution from the mentioned agents, the literature presents a few methodologies to fulfil these needs. Although the recognition of published approaches on this subject, it must be stressed that, up to this moment, an acceptable methodology has not been proposed. Faced with this situation, this work is focused on the evaluation of the effectiveness of the procedures for the sharing of responsibilities on the imbalance.

Keywords: responsibility attribution, voltage and current unbalance, superposition principle, power quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagramas fasoriais das componentes de sequências positiva (a), negativa (b) e zero (c).....	16
Figura 2.2. Análise comparativa entre as metodologias para o cálculo do fator de desequilíbrio para diferentes percentuais impostos.....	19
Figura 3.1. Fasores individuais e as suas respectivas projeções sobre o fasor total visando a atribuição das parcelas de responsabilidades – Método IEC	22
Figura 3.2. Composição simplificada de um sistema segundo o método da Corrente Conforme e Não Conforme.....	25
Figura 3.3. Fasores individuais e as suas respectivas projeções sobre o fasor total visando a atribuição das parcelas de responsabilidades – Método da Corrente Conforme e Não Conforme.....	26
Figura 3.4. Circuito equivalente de Norton de sequência negativa.	27
Figura 3.5. Circuito equivalente de Norton considerando as contribuições individuais do (a) supridor e (b) consumidor.....	27
Figura 3.6. Fasores individuais e as suas respectivas projeções sobre o fasor total visando a atribuição das parcelas de responsabilidades – Método da Superposição de Corrente.....	29
Figura 3.7. Fasores individuais e as suas respectivas projeções sobre o fasor total visando a atribuição das parcelas de responsabilidades – Método da Superposição de Tensão.....	30
Figura 4.1. Complexo elétrico implementado no MATLAB – Simulink.	32
Figura 4.2. Atribuição das parcelas de responsabilidade sobre os desequilíbrios – Caso 1	37
Figura 4.3. Atribuição das parcelas de responsabilidade sobre os desequilíbrios – Caso 2	38
Figura 4.4. Atribuição das parcelas de responsabilidade sobre os desequilíbrios – Caso 3	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Parâmetros do Sistema Supridor	32
Tabela 4.2. Parâmetros dos Cabos.....	32
Tabela 4.3. Parâmetros do Capacitor.....	33
Tabela 4.4. Parâmetros dos Transformadores	33
Tabela 4.5. Parâmetros das Cargas Lineares	33
Tabela 4.6. Parâmetros do Motor de Indução	33
Tabela 4.7. Tensões Impostas pelo Supridor.....	35
Tabela 4.8. Tensões e correntes no PAC antes e após a conexão da unidade consumidora - Caso 1.....	35
Tabela 4.9. Tensões e correntes no PAC antes e após a conexão da unidade consumidora - Caso 2.....	36
Tabela 4.10. Tensões e correntes no PAC antes e após a conexão da unidade consumidora – Caso 3.....	36

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIações

$\dot{V}_a$	– Fasor da tensão da fase A
V_a	– Módulo da tensão da fase A
$\dot{V}_b$	– Fasor da tensão da fase B
V_b	– Módulo da tensão da fase B
$\dot{V}_c$	– Fasor da tensão da fase C
V_c	– Módulo da tensão da fase C
$\dot{V}_0$	– Fasor da tensão de sequência zero
$\dot{V}_1$	– Fasor da tensão de sequência positiva
$\dot{V}_2$	– Fasor da tensão de sequência negativa
a	– Operador de Fortescue
FD%	– Fator de Desequilíbrio
V_1	– Módulo da tensão de sequência positiva
V_2	– Módulo da tensão de sequência negativa
β	– Operador matemático do Método CIGRÉ
V_{ab}	– Módulo da tensão trifásica fase-fase entre as fases A e B
V_{bc}	– Módulo da tensão trifásica fase-fase entre as fases B e C
V_{ca}	– Módulo da tensão trifásica entre as fases C e A
V_{med}	– Média das Tensões de Linha
$\Delta V_{m\acute{a}x}$	– Máxima diferença entre as tensões medidas e a média das tensões de linha
$\dot{F}D_{supr}$	– Fasor do fator de desequilíbrio de tensão do supridor
$\dot{F}D_{cons}$	– Fasor do fator de desequilíbrio de tensão do consumidor
$\dot{F}D_{pr\acute{e}}$	– Fasor do fator de desequilíbrio de tensão do sistema pré-conexão
$\dot{F}D_{p\acute{o}s}$	– Fasor do fator de desequilíbrio de tensão do sistema pós-conexão
$\dot{F}D_{total}$	– Fasor do fator de desequilíbrio de tensão total do sistema
FD_{supr_proj}	– Projeção de $\dot{F}D_{supr}$ sobre $\dot{F}D_{total}$
FD_{cons_proj}	– Projeção de $\dot{F}D_{cons}$ sobre $\dot{F}D_{total}$
P_0	– Potência ativa de sequência zero
P_1	– Potência ativa de sequência positiva
P_2	– Potência ativa de sequência negativa
P_T	– Potência ativa total

V_2 – Módulo da tensão de sequência negativa

I_0 – Módulo da corrente de sequência zero

I_1 – Módulo da corrente de sequência positiva

I_2 – Módulo da corrente de sequência negativa

θ_0 – Ângulo de fase entre a tensão e a corrente de sequência zero

θ_1 – Ângulo de fase entre a tensão e a corrente de sequência positiva

θ_2 – Ângulo de fase entre a tensão e a corrente de sequência negativa

$\dot{I}_2$ – Fasor da corrente de sequência negativa no PAC

$\dot{I}_{2_conf}$ – Fasor da corrente conforme de sequência negativa

$\dot{I}_{2_n_conf}$ – Fasor da corrente não conforme de sequência negativa

$\dot{I}_{1_conf}$ – Fasor da corrente conforme de sequência positiva

$\dot{I}_1$ – Fasor da corrente de sequência positiva no PAC

$I_{2_conf_proj}$ – Projeção de $\dot{I}_{2_conf}$ sobre $\dot{I}_2$

$I_{2_n_conf_proj}$ – Projeção de $\dot{I}_{2_n_conf}$ sobre $\dot{I}_2$

$\dot{I}_{2S}$ – Fonte representativa de corrente de sequência negativa das cargas conectadas ao sistema supridor

$\dot{I}_{2C}$ – Fonte representativa de corrente de sequência negativa das cargas conectadas à unidade consumidora

$\dot{Z}_{2S}$ – Impedância do sistema supridor vista a partir do PAC

$\dot{Z}_{2C}$ – Impedância do sistema consumidor vista a partir do PAC

$\dot{I}_2^{PAC}$ – Fasor de corrente de sequência negativa no PAC no método da Superposição

$\dot{V}_2^{PAC}$ – Fasor de tensão de sequência negativa no PAC no método da Superposição

$\dot{I}_{2S}^{PAC}$ – Fasor de corrente de sequência negativa atribuída ao supridor no PAC

$\dot{I}_{2C}^{PAC}$ – Fasor de corrente de sequência negativa atribuída ao consumidor no PAC

$\dot{V}_{2S}^{PAC}$ – Fasor de tensão de sequência negativa atribuída ao supridor no PAC

$\dot{V}_{2C}^{PAC}$ – Fasor de tensão de sequência negativa atribuída ao consumidor no PAC

$I_{2S_proj}^{PAC}$ – Projeção de $\dot{I}_{2S}^{PAC}$ sobre $\dot{I}_2^{PAC}$

$I_{2C_proj}^{PAC}$ – Projeção de $\dot{I}_{2C}^{PAC}$ sobre $\dot{I}_2^{PAC}$

$V_{2S_proj}^{PAC}$ – Projeção de $\dot{V}_{2S}^{PAC}$ sobre $\dot{V}_2^{PAC}$

$V_{2C_proj}^{PAC}$ – Projeção de $\dot{V}_{2C}^{PAC}$ sobre $\dot{V}_2^{PAC}$

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANSI – *American National Standards Institute*

CIGRÉ – *Congress Internationale des Grand Réseaux Électriques a Haute Tension*

IEC – *International Electrotechnical Commission*

IEEE – *Institute of Electrical and Electronic Engineers*

LVUR – *Line Voltage Unbalanced Rate*

NEMA – *National Electrical Manufacturers Association*

PAC – Ponto de Acoplamento Comum

ONS – Operador Nacional do Sistema

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

UFU – Universidade Federal de Uberlândia

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	13
INTRODUÇÃO.....	13
CAPÍTULO II	15
FUNDAMENTOS SOBRE OS DESEQUILÍBRIOS.....	15
2.1 METODOLOGIAS PARA O CÁLCULO DOS DESEQUILÍBRIOS.....	15
2.1.1 COMPONENTES SIMÉTRICAS (V_2/V_1)	15
2.1.2 CIGRÉ	17
2.1.3 ANSI/NEMA.....	18
2.2 REGULAMENTAÇÕES APLICÁVEIS.....	19
2.2.1 PRODIST	19
2.2.2 PROCEDIMENTOS DE REDE	20
2.2.3 IEEE STD. 1159	20
2.2.4 ANSI.....	20
CAPÍTULO III	21
ESTRATÉGIAS PARA ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES SOBRE OS	
DESEQUILÍBRIOS.....	21
3.1 MÉTODO IEC	21
3.2 MÉTODO DO FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICO.....	23
3.3 MÉTODO DA CORRENTE CONFORME E NÃO CONFORME	24
3.4 MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO.....	27
CAPÍTULO IV	31
ANÁLISE DE DESEMPENHO DAS METODOLOGIAS.....	31
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO UTILIZADO	31
4.2 ESTUDOS DE CASOS	34
4.2.1 CASO 1 – FONTE DE SUPRIMENTO DESEQUILIBRADA.....	34
4.2.2 CASO 2 – UNIDADE CONSUMIDORA DESEQUILIBRADA.....	35
4.2.3 CASO 3 – FONTE DE SUPRIMENTO E UNIDADE CONSUMIDORA	
DESEQUILIBRADAS.....	36
4.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO DAS METODOLOGIAS	37
4.3.1 CASO 1 – FONTE DE SUPRIMENTO DESEQUILIBRADA.....	37
4.3.2 CASO 2 – UNIDADE CONSUMIDORA DESEQUILIBRADA.....	37

4.3.3 CASO 3 – FONTE DE SUPRIMENTO E UNIDADE CONSUMIDORA DESEQUILIBRADAS.....	38
CAPÍTULO V.....	40
CONCLUSÕES.....	40

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Como se sabe, um sistema trifásico equilibrado é constituído por tensões nas três fases que se mostram com os mesmos módulos e estão defasadas entre si de 120° elétricos. Assim, em um sistema equilibrado, com sequência de fases direta (ABC), a tensão na fase B estará atrasada de 120° da tensão na fase A e a tensão em C estará atrasada de 240° da tensão em A [1].

Todavia, para as condições reais de operação, tal hipótese raramente existe e, nestas circunstâncias, desequilíbrios se fazem corriqueiramente presentes num sistema trifásico. Em outras palavras, as tensões ou correntes são comumente desbalanceadas, isto é, com magnitudes distintas entre as fases e/ou defasamento angular diferente de 120° [1], [2]. Tal fenómeno tem como possíveis causas a presença de assimetrias nas impedâncias das linhas de transmissão devido à transposição incompleta, desbalanceamento nas impedâncias dos enrolamentos de transformadores, banco de capacitores defeituosos e operação de fornos a arco [3]. Adicionalmente, ressalta-se que com o advento da geração distribuída, estimulada no Brasil através de incentivos fiscais e de crédito, os níveis de desequilíbrio tendem a aumentar substancialmente, haja vista a disseminação de unidades que operam de forma monofásica ou bifásica, a exemplo dos complexos fotovoltaicos [2], [4]. Tais situações práticas, somadas ao grande número de cargas desequilibradas frequentemente encontradas nas instalações consumidoras residenciais, comerciais e industriais, podem causar transtornos diversos tanto aos grupos de consumidores como às concessionárias de energia.

De fato, os desequilíbrios podem provocar sobreaquecimentos, perdas ativas acentuadas, maiores solicitações de isolamento, diminuição da vida útil de máquinas rotativas e transformadores, bem como a atuação indevida dos sistemas de proteção, atrasando processos de produção [5]. Além desses efeitos, é sabido que cargas não lineares alimentadas por tensões desbalanceadas podem gerar harmônicos não característicos, o que impacta no desempenho de dispositivos de medição e mitigação do distúrbio [6]. Por conseguinte, entende-se a necessidade de regulamentações ou documentos orientativos que determinem limites e imponham sanções aplicáveis aos

devidos responsáveis nos casos em que os valores de referência não forem obedecidos, conforme prática mundial e no Brasil.

As regulamentações nacionais que versam sobre o tema, como os Procedimentos de Distribuição (PRODIST) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e os Procedimentos de Rede, do Operador Nacional do Sistema (ONS), possuem recomendações para a quantificação do fator de desequilíbrio de tensão, bem como valores limites aos quais esses fatores devem restringir-se. Para atender tais limites, inúmeras estratégias podem ser encontradas na literatura. No que concerne às técnicas utilizadas pelas concessionárias de energia, tem-se a possibilidade de redistribuir as cargas de forma simétrica e, a nível de transmissão, a aplicação das técnicas baseadas na transposição de condutores [2]. Por outro lado, para se atenuar os desbalanceamentos provenientes das cargas, é comum o uso de compensadores passivos e ativos [7].

De um modo geral, as soluções mitigadoras dos fenômenos ora tratados podem envolver expressivos custos financeiros e, considerando que os níveis de desequilíbrio se apresentam como uma composição de efeitos dos supridores e consumidores, torna-se imprescindível o estabelecimento de meios que permitam quantificar as parcelas de responsabilidade sobre eventuais violações dos limites pré-estabelecidos para os desequilíbrios presentes no ponto de acoplamento comum (PAC). Este procedimento irá, certamente, colaborar com uma solução equânime no que tange aos investimentos necessários à compatibilização dos níveis de desequilíbrios existentes e evitar quaisquer conflitos entre as partes.

À luz do exposto e em consonância com os objetivos já apresentados, o presente trabalho pretende avaliar o desempenho das principais metodologias para a atribuição das parcelas de responsabilidades sobre os desequilíbrios de tensão e corrente identificados no PAC e, ainda, explorar as potencialidades do uso de uma estratégia inovadora neste contexto, o “Método da Superposição”, a qual se apresenta como cerne de trabalhos de pesquisa em desenvolvimento na Universidade Federal de Uberlândia (UFU) [8].

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS SOBRE OS DESEQUILÍBRIOS

2.1 METODOLOGIAS PARA O CÁLCULO DOS DESEQUILÍBRIOS

Em ambientes práticos, um perfeito balanceamento entre as tensões raramente ocorre, haja vista as irregularidades na transposição das linhas de transmissão, assimetrias nas impedâncias dos enrolamentos dos transformadores e disparidades na distribuição das cargas, conforme mencionado previamente [9]. Anormalidades presentes no sistema também podem provocar desequilíbrios, tais como falhas de isolamento de equipamentos, aberturas de condutores e/ou a abertura de fusíveis em uma fase de um banco de capacitores. Dentre os efeitos resultantes do mencionado distúrbio, destaca-se a operação inadequada dos equipamentos, especialmente de máquinas rotativas, uma vez que estas possuem baixa impedância de sequência negativa, o que permite a circulação de correntes de elevada magnitude por seus enrolamentos. Por consequência, tais correntes são capazes de provocar a elevação de temperatura dos enrolamentos, redução do rendimento e da vida útil das máquinas, além de reduzir o conjugado disponível para a carga devido à existência de campo magnético girante em sentido contrário à rotação natural do motor. Portanto, é cónito que tais efeitos refletem nos custos operacionais das concessionárias de energia e consumidores, podendo acarretar em prejuízos financeiros ocasionados pelo aumento das perdas, atuação indevida dos sistemas de proteção e danos aos equipamentos [10].

Com o propósito de quantificar os percentuais de desequilíbrios presentes na rede, são relatados, na literatura, diversos trabalhos atrelados às metodologias para a definição dos indicadores numéricos que expressem a intensidade do fenômeno através de cálculos relativamente simples. Neste contexto, na sequência são sintetizadas as principais estratégias difundidas na atualidade.

2.1.1 COMPONENTES SIMÉTRICAS (V_2/V_1)

O método das Componentes Simétricas [11] tornou-se uma das ferramentas mais utilizadas para a análise de redes trifásicas desequilibradas. Esse procedimento estabelece que um sistema trifásico desequilibrado pode ter seus fasores

correlacionados decompostos em três sistemas equilibrados, os quais são fragmentados em: componentes de sequência positiva (compostas por três fasores de mesmo módulo, defasagem de 120° entre si e mesma sequência de fase dos fasores originais); componentes de sequência negativa (formadas por três fasores de mesmo módulo, com defasagem de 120° entre si e sequência de fase contrária aos fasores originais); componentes de sequência zero (constituídas por três fasores de mesmo módulo e em fase entre si), como mostra a Figura 2.1 (a), (b) e (c), respectivamente.

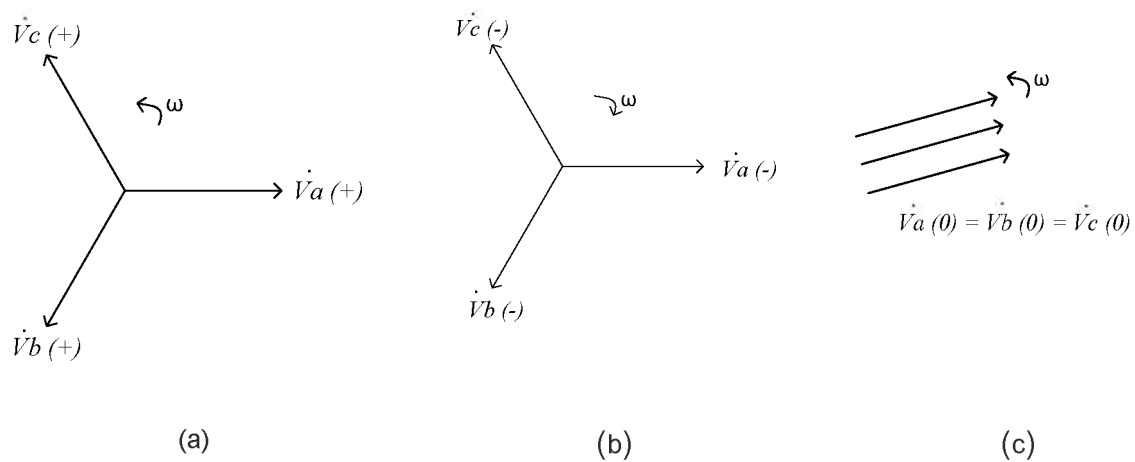


Figura 2.1 Diagramas fasoriais das componentes de sequências positiva (a), negativa (b) e zero (c)

De fato, as componentes simétricas podem ser representadas pela Matriz de Fortescue [11], que é válida tanto para as tensões e correntes de fase quanto para as de linha, em consonância com (2.1).

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

Onde:

$\dot{V}_0$, $\dot{V}_1$ e $\dot{V}_2$ – fasores de tensão de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente;

a – operador cuja rotação é equivalente a $1 \angle 120^\circ$.

Uma forma alternativa à equação (2.1), entretanto, explicitando-se as tensões de sequência positiva, negativa e zero, é apresentada em (2.2).

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

Sendo assim, o fator de desequilíbrio é calculado com base na relação entre a componente de tensão de sequência negativa e positiva, tal como exposto em (2.3).

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

Onde:

V_1 e V_2 – módulo das tensões de sequência positiva e negativa, respectivamente;

2.1.2 CIGRÉ

Para representar o fator de desequilíbrio, o CIGRÉ (*Congress Internationale des Grand Réseaux Électriques a Haute Tension*) utiliza uma grandeza percentual que correlaciona as tensões de linha [10], tal como apresentado em (2.4) e (2.5).

$$FD\% = 100 \times \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (2.4)$$

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

Onde:

V_{ab} , V_{bc} , e V_{ca} – módulo das tensões eficazes entre as fases AB, BC e CA, respectivamente.

Ressalta-se que as equações (2.4) e (2.5) são válidas apenas quando empregadas às tensões fase-fase e para as condições em que a componente de sequência zero é nula. Uma vez que o método das Componentes Simétricas e o método CIGRÉ retornam o mesmo valor percentual de desequilíbrio, vale salientar que ambos os métodos são considerados equivalentes [1].

2.1.3 ANSI/NEMA

Segundo a *American National Standards Institute* (ANSI) e a *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA), o fator de desequilíbrio, também denominado por *Line Voltage Unbalanced Rate* (LVUR), pode ser definido tal como exposto em (2.6), tomando-se como referência as tensões de linha [10].

$$FD\% = \frac{\Delta V_{m\acute{a}x}}{V_{med}} \times 100 \quad (2.6)$$

Onde:

V_{med} – média das tensões de linha;

$\Delta V_{m\acute{a}x}$ – máximo desvio entre as tensões de linha medidas e a média das tensões (V_{med}).

Ressalta-se que, uma vez que o conteúdo harmônico do sinal seja relativamente baixo e a componente de sequência zero seja irrelevante, o resultado do Método ANSI/NEMA retorna um valor próximo ao fornecido pelo Método das Componentes Simétricas e, consequentemente, pelo Método CIGRÉ [12].

Isto posto, a Figura 2.2 apresenta um gráfico comparativo com o objetivo de ilustrar as formulações supracitadas para o cálculo dos indicadores de desequilíbrio de tensão, considerando distintos percentuais de desequilíbrios impostos [2].

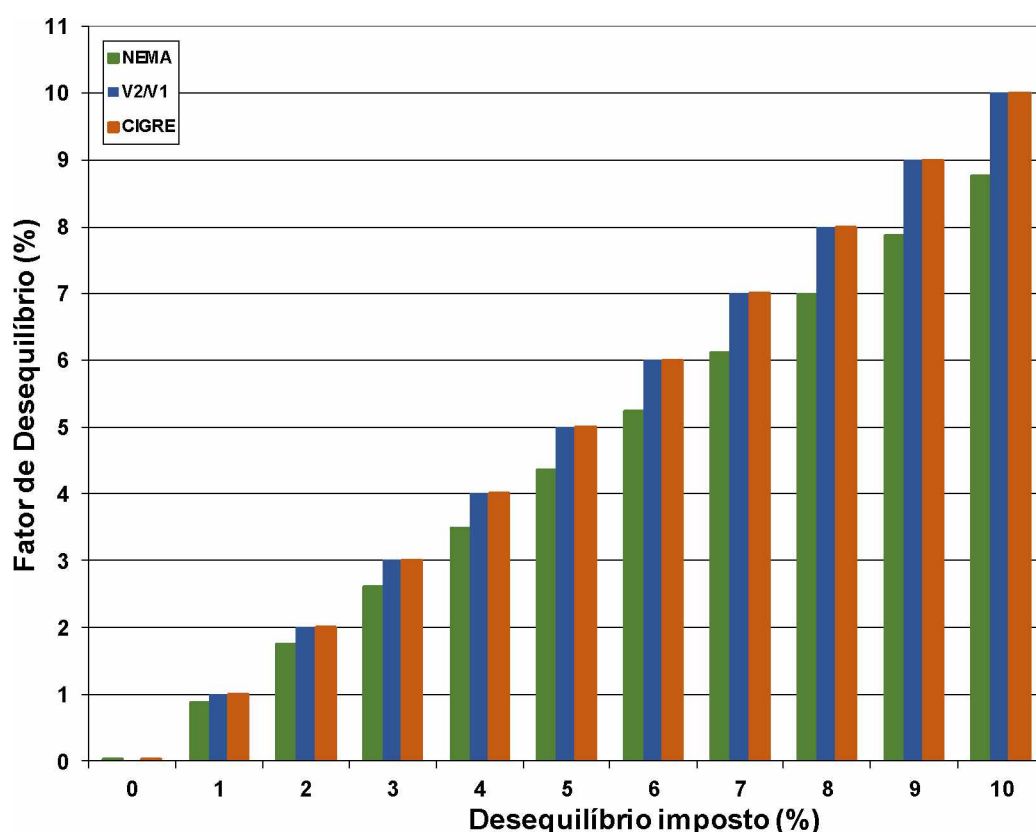


Figura 2.2. Análise comparativa entre as metodologias para o cálculo do fator de desequilíbrio para diferentes percentuais impostos.

2.2 REGULAMENTAÇÕES APLICÁVEIS

Tendo em vista os efeitos causados pelos desequilíbrios de tensão e corrente no sistema elétrico, orientações nacionais e internacionais, majoritariamente fundamentadas nas metodologias apresentadas na seção precedente, existem com a finalidade de oferecer um valor de referência para os indicadores de desequilíbrio de forma a garantir um padrão desejável para os suprimentos elétricos. Isto posto, na sequência são sintetizadas as principais regulamentações vigentes [13].

2.2.1 PRODIST

O módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), define o fator de desequilíbrio com base no Método das Componentes Simétricas ou no Método CIGRÉ. Esse documento determina que os percentuais de desequilíbrios

de tensão devem ser limitados a 3% em complexos inferiores a 1kV e 2% para sistemas de 1kV a 230 kV [14].

2.2.2 PROCEDIMENTOS DE REDE

Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em conformidade com os Procedimentos de Rede, o fator de desequilíbrio deve ser aplicado em consonância com o Método das Componentes Simétricas. Esse documento estabelece que os desequilíbrios de tensão, no ponto de acoplamento comum, devem ser inferiores a 2%, considerando os limites globais, e 1,5%, para os limites individuais [15].

2.2.3 IEEE STD. 1159

A norma IEEE 1159 (2009) estipula que o fator de desequilíbrio deve ser calculado com base no Método das Componentes Simétricas ou no Método CIGRÉ. O fator de desequilíbrio deve ser limitado em 2%, sendo desejável um valor inferior a 1% [12].

2.2.4 ANSI

De acordo com o *American National Standards Institute* (ANSI), o fator de desequilíbrio deve ser calculado com base no Método ANSI/NEMA e o limite que a norma estabelece é de 3% sob condições a vazio [16].

CAPÍTULO III

ESTRATÉGIAS PARA ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES SOBRE OS DESEQUILÍBRIOS

Muito embora o reconhecimento de inúmeras estratégias atreladas à atribuição de responsabilidades entre consumidores e supridores no tocante aos desequilíbrios, o assunto ainda carece de maiores investigações, visto que tais metodologias possuem limitações que dificultam as suas aplicações práticas. Vale destacar que trabalhos prévios se embasam em estudos sobre os métodos de atribuição de responsabilidades sobre as distorções harmônicas, visando uma possível adaptação à temática dos desequilíbrios de tensão. Entretanto, ainda que o referencial teórico contribua com o estado da arte sobre o tema, ressalta-se que não há referências alusivas a uma metodologia sólida para este propósito, sobretudo, quando da sua aplicação em ambientes práticos [1] .

A luz dessas constatações, são sintetizados, subsequentemente, os principais métodos discutidos na literatura para os fins aqui postos, a saber: Método IEC; Método do Fluxo de Potência Trifásico; Método da Corrente Conforme e Não Conforme e Método da Superposição. É importante mencionar que as estratégias para a atribuição de responsabilidades sobre os desequilíbrios são, majoritariamente, embasadas no método das Componentes Simétricas, haja vista a possibilidade de separação dos efeitos das componentes fasoriais de sequência negativa presentes num dado ponto de acoplamento entre o supridor e o consumidor.

3.1 MÉTODO IEC

O método IEC é passível de aplicação caso tenha-se a possibilidade de medição das tensões antes e após a conexão de uma unidade consumidora e, dessa forma, identificar os percentuais de desequilíbrio de tensão no ponto de acoplamento em ambas situações [17], [18]. De acordo com a mencionada metodologia, a parcela de responsabilidade do supridor ($\dot{F}D_{supr}$) está relacionada ao percentual de desequilíbrio obtido antes da inserção da unidade consumidora, enquanto a incumbência do consumidor ($\dot{F}D_{cons}$) é atrelada à diferença entre os indicadores nas

condições operativas pós-conexão e pré-conexão, respectivamente, em conformidade com as expressões (3.1), (3.2) e (3.3).

$$\dot{F}D_{total} = \dot{F}D_{pós} \quad (3.1)$$

$$\dot{F}D_{supr} = \dot{F}D_{pré} \quad (3.2)$$

$$\dot{F}D_{cons} = \dot{F}D_{pós} - \dot{F}D_{pré} \quad (3.3)$$

Onde:

$\dot{F}D_{pré}$ – Fator de Desequilíbrio estimado a partir da relação fasorial entre as tensões de sequência negativa e positiva $\left(\frac{\dot{V}_{2_pré}}{\dot{V}_{1_pré}}\right)$ obtidas no ponto de acoplamento antes da conexão da unidade consumidora;

$\dot{F}D_{pós}$ – Fator de Desequilíbrio estimado a partir da relação fasorial entre as tensões de sequência negativa e positiva $\left(\frac{\dot{V}_{2_pós}}{\dot{V}_{1_pós}}\right)$ obtidas no ponto de acoplamento após a conexão da unidade consumidora;

Para a atribuição das parcelas de responsabilidade, são feitas as projeções dos fasores representativos das contribuições do supridor ($\dot{F}D_{supr}$) e consumidor ($\dot{F}D_{cons}$) sobre o fasor total ($\dot{F}D_{total}$), de acordo com a Figura 3.1. [1].

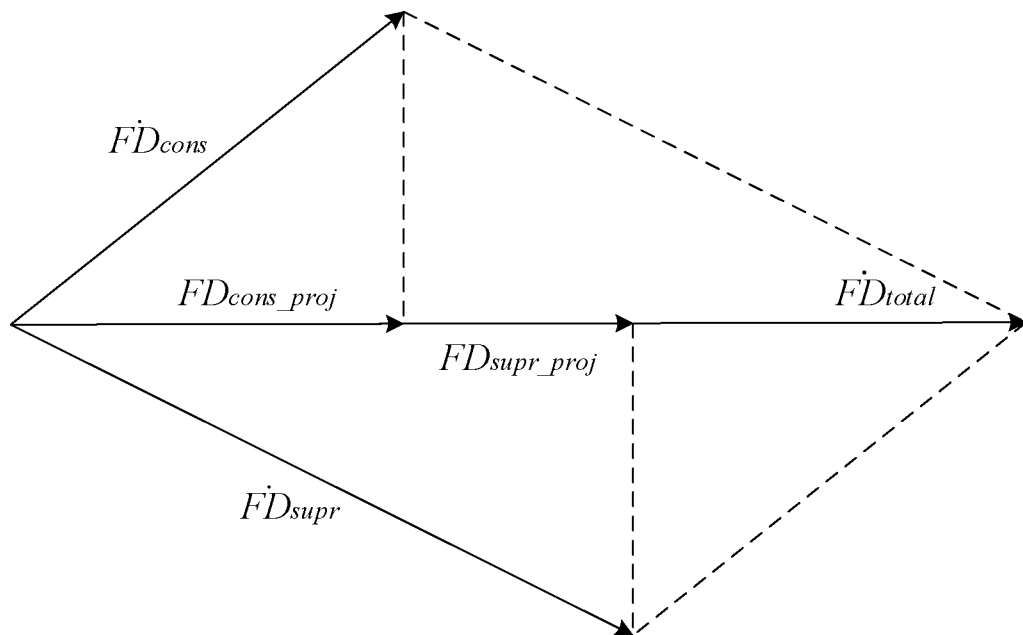


Figura 3.1 Fasores individuais e as suas respectivas projeções sobre o fasor total visando a atribuição das parcelas de responsabilidades – Método IEC

Onde:

FD_{supr_proj} e FD_{cons_proj} – projeções dos fasores que definem as parcelas de contribuição do supridor e consumidor, respectivamente.

3.2 MÉTODO DO FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICO

O método do Fluxo de Potência Trifásico é baseado na identificação da direcionalidade do fluxo de potência de sequência negativa para a definição da fonte predominante dos desequilíbrios. Para tanto, os valores das tensões e correntes, medidas no ponto de acoplamento, são decompostas aplicando-se o método das Componentes Simétricas, cujas equações resultantes encontram-se expostas de (3.4) a (3.7) [1], [17].

$$P_0 = 3V_0I_0\cos\theta_0 \quad (3.4)$$

$$P_1 = 3V_1I_1\cos\theta_1 \quad (3.5)$$

$$P_2 = 3V_2I_2\cos\theta_2 \quad (3.6)$$

$$P_T = P_0 + P_1 + P_2 \quad (3.7)$$

Onde:

P_0 , P_1 , P_2 e P_T – potências ativas trifásicas de sequência zero, positiva, negativa e total, respectivamente;

I_0 , I_1 e I_2 – magnitudes das correntes de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente, obtidas no PAC;

V_0 , V_1 e V_2 – magnitudes das tensões de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente, obtidas no PAC;

θ_0 , θ_1 e θ_2 – ângulos de fase de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente.

Assim sendo, quando o fluxo de potência de sequência negativa resulta em um valor positivo, isto é, concordante com o sentido da potência ativa de sequência positiva, assume-se que a contribuição do supridor é predominante. Por outro lado, se o fluxo de potência de sequência negativa apresentar um valor negativo, o consumidor é responsabilizado pela contribuição majoritária dos desequilíbrios [1], [18]. Isto posto, cabe ressaltar que a presente metodologia não permite o compartilhamento

propriamente dito, mas tão apenas indica o sentido preponderante do fluxo de potência de sequência negativa.

3.3 MÉTODO DA CORRENTE CONFORME E NÃO CONFORME

O método da Corrente Conforme e Não Conforme [19] faz uso da hipótese de que a corrente total de sequência negativa pode ser fragmentada em duas partes no ponto de acoplamento. A parcela de corrente que flui pelas cargas que não contribuem para o aumento dos desequilíbrios é definida como conforme. Em contrapartida, a fração de corrente resultante responsável pelo suprimento das cargas que produzem desequilíbrios adicionais àqueles originalmente presentes na tensão de suprimento é denominada por não conforme [18], [20]. Portanto pode-se considerar que as instalações consumidoras são formadas por elementos que podem ser divididos em dois grupos [20], a saber: a parcela da carga que irá drenar corrente conforme (grupo 1) e a parcela da carga que irá drenar corrente não conforme (grupo 2). Se a impedância da carga estiver equilibrada, ela drenará apenas corrente conforme [1].

Partindo desses conceitos, a Figura 3.2 exibe um circuito simplificado composto por uma fonte de suprimento em série com uma impedância, a qual define o nível de curto-circuito da rede, bem como uma unidade consumidora contendo elementos representativos dos grupos 1 e 2.

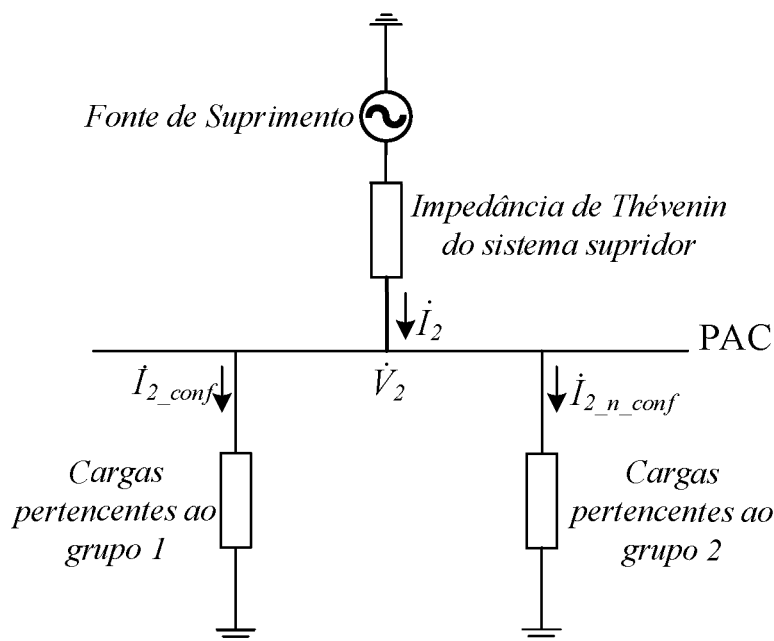


Figura 3.2. Composição simplificada de um sistema segundo o método da Corrente Conforme e Não Conforme

Analizando a Figura 3.2 conclui-se que a soma das parcelas conforme ($\dot{I}_{2_conf}$) e não conforme ($\dot{I}_{2_n_conf}$) resulta na corrente de sequência negativa total no PAC ($\dot{I}_2$), como indica a equação (3.8).

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{2_conf} + \dot{I}_{2_n_conf} \quad (3.8)$$

A corrente conforme de sequência positiva ($\dot{I}_{1_conf}$) é igual à corrente de sequência positiva total ($\dot{I}_1$), uma vez que as cargas do grupo 2 não geram potência ativa de sequência positiva. Portanto, a corrente não conforme de sequência positiva é sempre nula. Essas relações são retratadas pelas equações (3.9) e (3.10).

$$\dot{I}_{1_conf} = \dot{I}_1 \quad (3.9)$$

$$\dot{I}_{1_n_conf} = 0 \quad (3.10)$$

A corrente conforme de sequência negativa ($\dot{I}_{2_conf}$) é diretamente proporcional à sua respectiva tensão ($\dot{V}_2$), e inversamente proporcional à tensão de sequência positiva ($\dot{V}_1$), como mostra a equação (3.11).

$$\dot{I}_{2_conf} = \frac{\dot{I}_1}{\dot{V}_1} \times \dot{V}_2 \quad (3.11)$$

A corrente não conforme de sequência negativa ($\dot{I}_{2_n_conf}$) é igual à diferença entre a corrente de mesma sequência ($\dot{I}_2$) e sua correspondente corrente conforme, de acordo com (3.12).

$$\dot{I}_{2_n_conf} = \dot{I}_2 - \dot{I}_{2_conf} \quad (3.12)$$

Dessa forma, infere-se que a corrente conforme de sequência negativa ($\dot{I}_{2_conf}$) está intimamente ligada aos distúrbios da fonte supridora, enquanto a corrente não conforme ($\dot{I}_{2_n_conf}$) de mesma sequência, está associada ao consumidor e, como previamente mencionado, somadas constituem a corrente total de sequência negativa no PAC ($\dot{I}_2$).

Para a atribuição das parcelas de responsabilidade, faz-se o uso, mais uma vez, das projeções dos fasores individuais do supridor ($\dot{I}_{2_conf}$) e consumidor ($\dot{I}_{2_n_conf}$) sobre o fasor de corrente total ($\dot{I}_2$), em conformidade com a Figura 3.3.

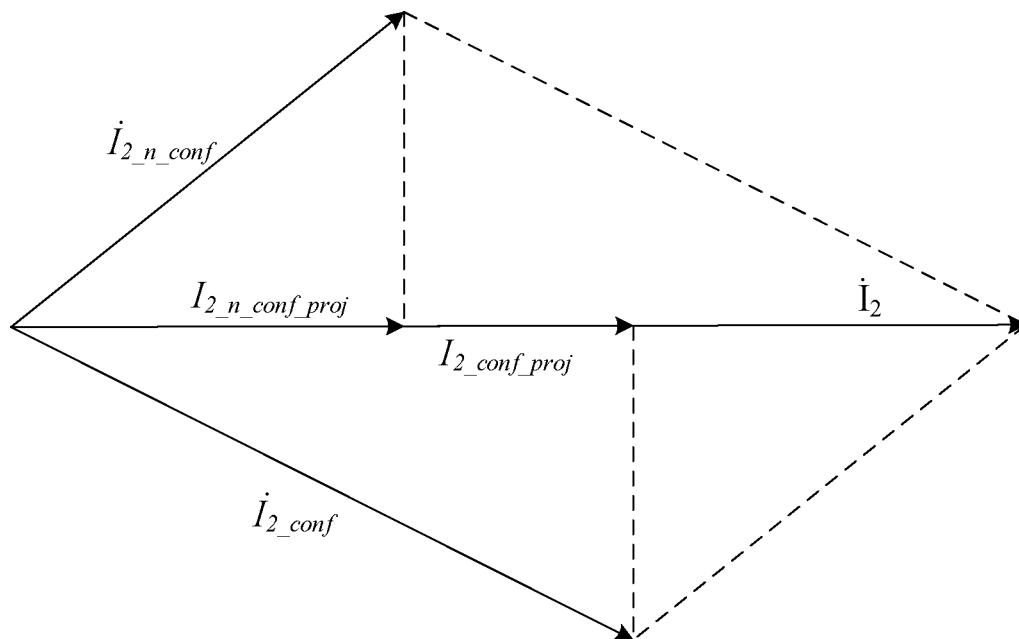


Figura 3.3. Fasores individuais e as suas respectivas projeções sobre o fasor total visando a atribuição das parcelas de responsabilidades – Método da Corrente Conforme e Não Conforme

Onde:

$I_{2_conf_proj}$ e $I_{2_n_conf_proj}$ – projeções dos fasores que definem as parcelas de contribuição do supridor e consumidor, respectivamente.

Vale salientar que o método ora tratado tem como premissa que o valor das impedâncias de sequência positiva e negativa são equivalentes e invariáveis. De fato, em se tratando de sistemas compostos por cargas predominantemente caracterizadas por impedância constante, tal alegação, evidentemente, não depreciará o desempenho da mencionada estratégia. Entretanto, uma vez que as cargas presentes

nas instalações reais podem apresentar valores de impedância de sequência positiva e negativa distintos, a exemplo dos motores elétricos, é provável que a metodologia forneça resultados substancialmente discrepantes dos esperados [17].

3.4 MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO

O presente método [21] é embasado na análise do circuito equivalente de Norton e na aplicação do clássico princípio da superposição de efeitos. Dessa forma, para se obter as contribuições do supridor e consumidor, no ponto de acoplamento comum, basta aplicar os conceitos básicos de circuitos elétricos ao arranjo de sequência negativa, em conformidade com a Figura 3.4 e Figura 3.5 (a) e (b).

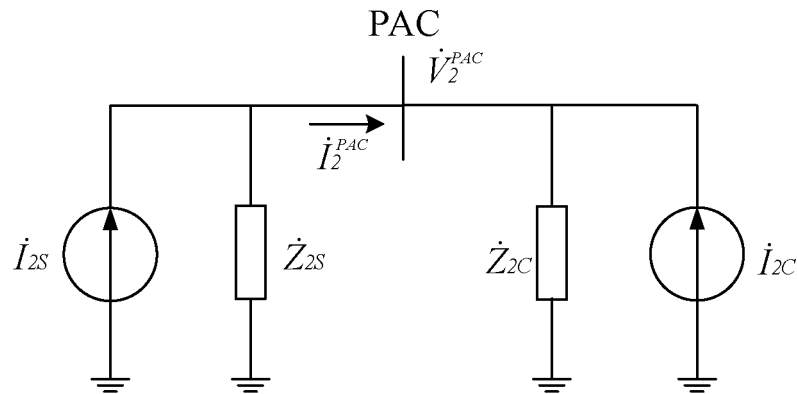


Figura 3.4. Circuito equivalente de Norton de sequência negativa.

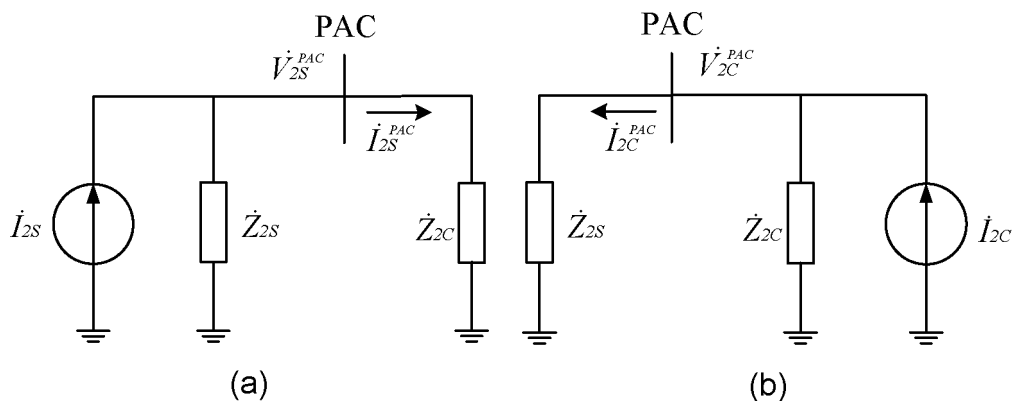


Figura 3.5. Circuito equivalente de Norton considerando as contribuições individuais do (a) supridor e (b) consumidor.

Onde:

$\dot{I}_{2S}$ e $\dot{I}_{2C}$ – fontes de corrente de sequência negativa representativas das cargas desequilibradas conectadas ao supridor e consumidor, respectivamente.

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

$\dot{i}_2^{PAC}$ e $\dot{V}_2^{PAC}$ – corrente e tensão de sequência negativa, respectivamente, obtidos no ponto de acoplamento comum;

$\dot{i}_{2S}^{PAC}$ e $\dot{i}_{2C}^{PAC}$ – correntes de sequência negativa no PAC atribuídas ao supridor e consumidor, respectivamente.

$\dot{V}_{2S}^{PAC}$ e $\dot{V}_{2C}^{PAC}$ – tensões de sequência negativa no PAC atribuídas ao supridor e consumidor, respectivamente.

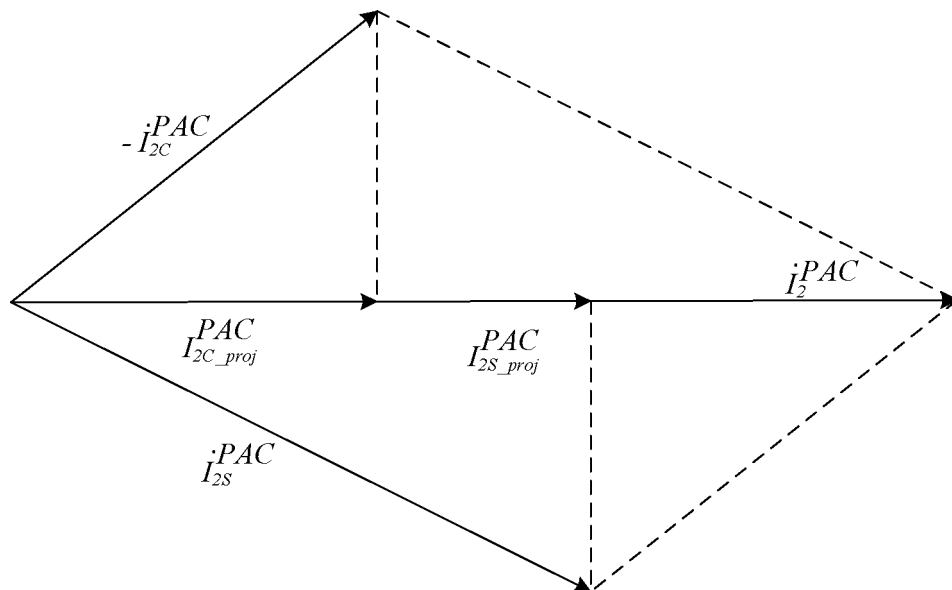
Dessarte, embasando-se nas Figura 3.4 e Figura 3.5, é possível inferir as equações para as correntes do supridor ($\dot{i}_{2S}^{PAC}$), consumidor ($\dot{i}_{2C}^{PAC}$) e total ($\dot{i}_2^{PAC}$), no PAC, tal como enunciado em (3.13), (3.14) e (3.15).

$$\dot{i}_2^{PAC} = \dot{i}_{2S}^{PAC} - \dot{i}_{2C}^{PAC} \quad (3.13)$$

$$\dot{i}_{2S}^{PAC} = \frac{\dot{V}_2^{PAC} + (\dot{Z}_{2S} \times \dot{i}_2^{PAC})}{\dot{Z}_{2S} + \dot{Z}_{2C}} \quad (3.14)$$

$$\dot{i}_{2C}^{PAC} = \frac{\dot{V}_2^{PAC} - (\dot{Z}_{2C} \times \dot{i}_2^{PAC})}{\dot{Z}_{2S} + \dot{Z}_{2C}} \quad (3.15)$$

Deste modo, com o propósito de atribuir os percentuais de responsabilidade sobre os desequilíbrios de corrente, definem-se as projeções das contribuições da



fonte de suprimento (i_{2S}^{PAC}) e da unidade consumidora ($-i_{2C}^{PAC}$) sobre o total (i_2^{PAC}), em consonância com a Figura 3.6.

Figura 3.6. Fasores individuais e as suas respectivas projeções sobre o fasor total visando a atribuição das parcelas de responsabilidades – Método da Superposição de Corrente

Onde:

$i_{2S_proj}^{PAC}, i_{2C_proj}^{PAC}$ – projeções dos fasores que definem as parcelas de contribuição do supridor e consumidor, respectivamente.

Similarmente, as contribuições de tensão de sequência negativa no PAC, tanto do supridor ($\dot{V}_{2S}^{PAC}$), quanto do consumidor ($\dot{V}_{2C}^{PAC}$), podem ser calculadas a partir de (3.16), (3.17) e (3.18).

$$\dot{V}_2^{PAC} = \dot{V}_{2S}^{PAC} + \dot{V}_{2C}^{PAC} \quad (3.16)$$

$$\dot{V}_{2S}^{PAC} = \dot{Z}_{2C} \times i_{2S}^{PAC} \quad (3.17)$$

$$\dot{V}_{2C}^{PAC} = \dot{Z}_{2S} \times i_{2C}^{PAC} \quad (3.18)$$

Finalmente, calculam-se as projeções das parcelas de contribuição da concessionária ($\dot{V}_{2S}^{PAC}$) e da carga ($\dot{V}_{2C}^{PAC}$) sobre o fasor integral ($\dot{V}_2^{PAC}$), de acordo com a Figura 3.7.

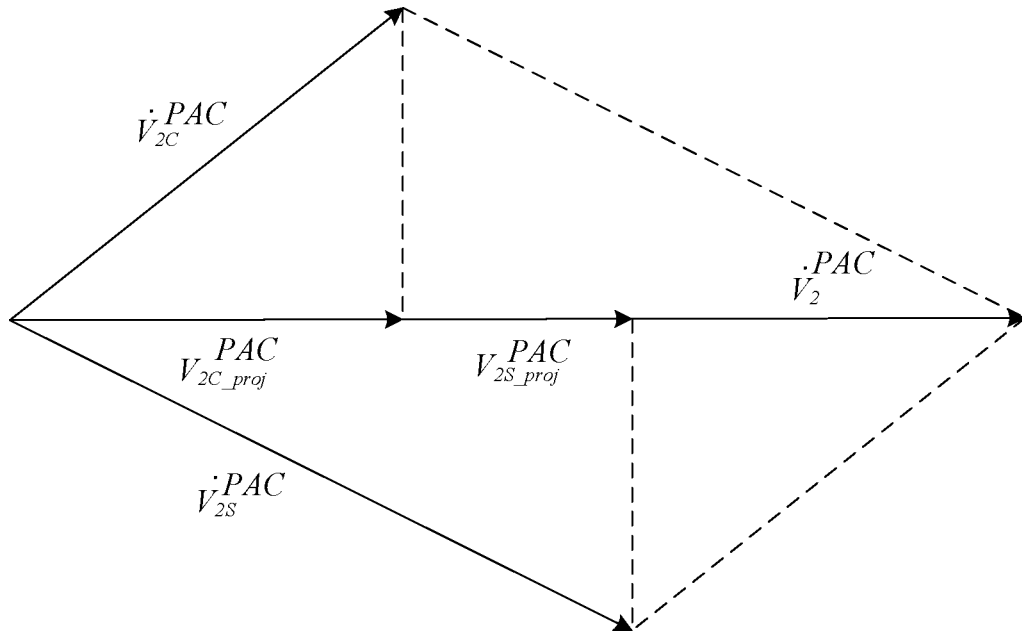


Figura 3.7. Fasores individuais e as suas respectivas projeções sobre o fasor total visando a atribuição das parcelas de responsabilidades – Método da Superposição de Tensão

Onde:

V_{2S}^{PAC} , V_{2C}^{PAC} – projeções dos fasores que definem as parcelas de contribuição do supridor e consumidor, respectivamente.

Vale salientar que muito embora se reconheça a sólida consistência da proposta aqui focada, a sua aplicação prática não se trata de um tema trivial, visto que existem dificuldades ao se obter os reais valores das impedâncias de sequência negativa do supridor e, sobretudo, do consumidor [20].

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DE DESEMPENHO DAS METODOLOGIAS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO UTILIZADO

Com o propósito de explorar os resultados atrelados à avaliação computacional de desempenho de cada um dos métodos aplicados à temática aqui evidenciada, é exibido, na sequência, o sistema elétrico teste implementado no programa MATLAB – Simulink, o qual se apresenta com topologia consonante às instalações reais.

Muito embora seu caráter hipotético, o supridor é modelado por meio de uma fonte de tensão, em 34,5 kV, em série com uma impedância equivalente, a qual representa o nível de curto-circuito do sistema. A unidade consumidora é constituída por cargas estáticas e motrizes, além de um banco de capacitores para a correção do fator de potência. Para as condições nas quais considerou-se a manifestação de carregamentos desequilibrados, ressalta-se que foram utilizadas cargas com características de impedância constante. A Figura 4.1 apresenta o complexo elétrico implementado na plataforma Simulink.

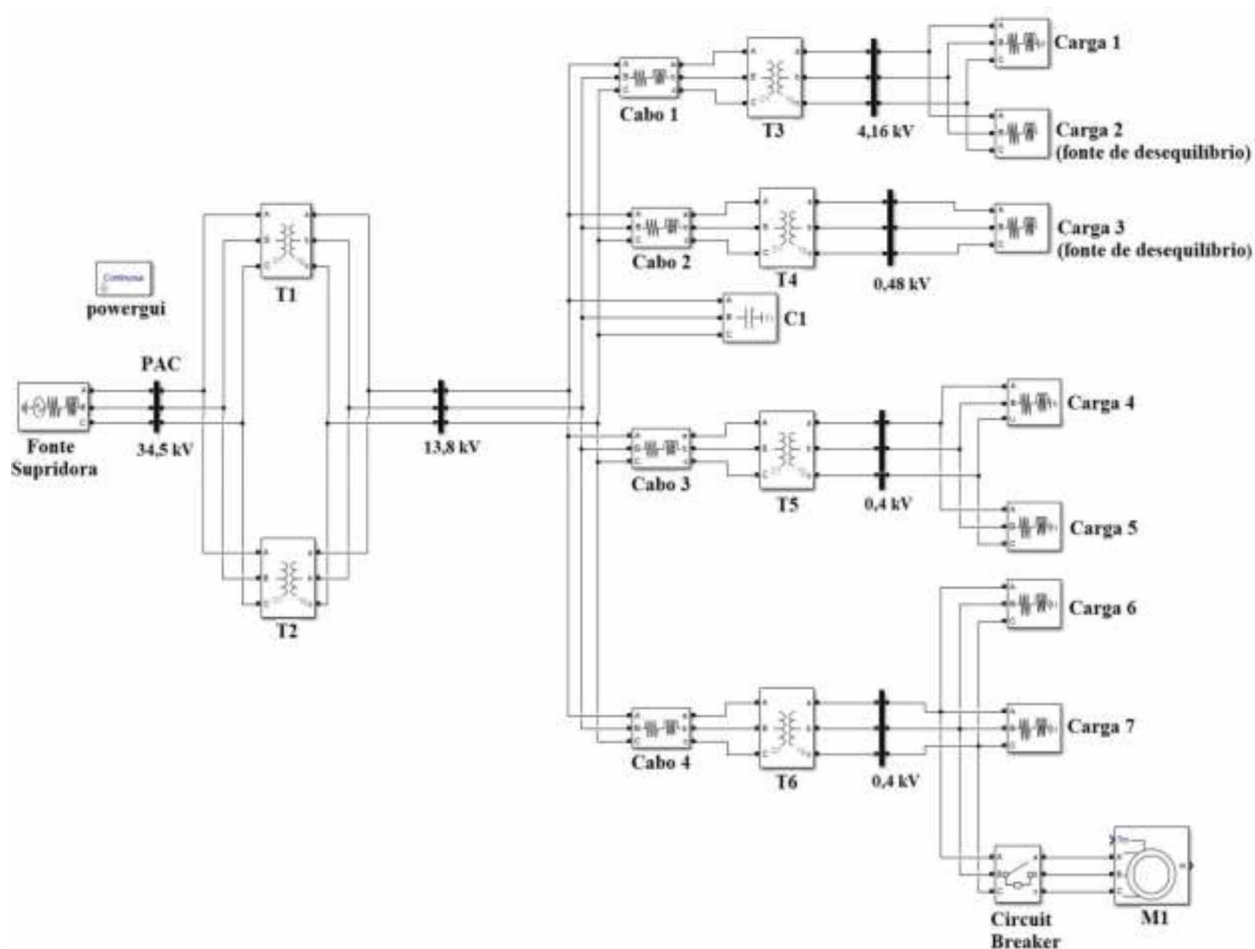


Figura 4.1. Complexo elétrico implementado no MATLAB – Simulink.

As informações utilizadas na parametrização do circuito supracitado são apresentadas da Tabela 4.1 a Tabela 4.6.

Tabela 4.1 Parâmetros do Sistema Supridor

Potência de Curto-circuito [MVA]	Tensão Nominal [kV]	Frequência [Hz]
100	34,5	60

Tabela 4.2. Parâmetros dos Cabos

Cabo	Comprimento [km]	Bitola [mm ²]	Corrente Nominal [A]	Resistência [Ω/km]	Reatância [Ω/km]
Cabo 1	1,5	25	129	0,971	0,158
Cabo 2	1,0	25	129	0,971	0,158
Cabo 3	2,0	25	129	0,971	0,158
Cabo 4	0,8	25	129	0,971	0,158

Tabela 4.3. Parâmetros do Capacitor

Banco de Capacitores	Potência Reativa (Q) [MVar]	Tensão Nominal [kV]
C1	1,5	13,8

Tabela 4.4. Parâmetros dos Transformadores

Transformadores	Potência Nominal [MVA]	Tensão Primária [kV]	Tensão Secundária [kV]	Resistência [%]	Reatância [%]
T1	7,5	34,5	13,8	1	6
T2	7,5	34,5	13,8	1	6
T3	3	13,8	4,16	1,5	7
T4	3	13,8	0,48	1,5	7
T5	2	13,8	0,44	1,5	7
T6	2	13,8	0,44	1,5	7

Tabela 4.5. Parâmetros das Cargas Lineares

Carga	Tensão [kV]	Potência Nominal [kVA]	Fator de Potência
Carga 1	4,16	604,7	0,85
Carga 2	4,16	1309,4	0,85
Carga 3	0,48	2111,5	0,99
Carga 4	0,44	861,1	0,98
Carga 5	0,44	611,2	0,85
Carga 6	0,44	836,3	0,90
Carga 7	0,44	253,5	0,85

Tabela 4.6. Parâmetros do Motor de Indução

Motor	Potência [HP]	Tensão Nominal [kV]	Rendimento [%]	Inércia [kg.m²]	Fator de Potência	Escorregamento [%]
M1	150	0,44	96	1,6204	0,88	0,56

Uma vez conhecidos os parâmetros do sistema, é possível calcular as impedâncias equivalentes do supridor e consumidor. Isto, como já ressaltado, é imperativo para a aplicação do Método da Superposição.

4.2 ESTUDOS DE CASOS

Os estudos computacionais contemplaram três condições operativas, das quais foram auferidas as informações relativas às tensões e correntes de sequência positiva e negativa no PAC, visando aos processos de atribuição das responsabilidades sobre os desequilíbrios.

Vale salientar que o método do Fluxo de Potência Trifásico, como mencionado previamente, restringe-se à detecção da fonte preponderante do desequilíbrio, não quantificando a parcela de responsabilidade de cada agente [1]. Entretanto, para fins comparativos, tais resultados serão apresentados em termos percentuais (0% ou 100%).

No que tange ao método IEC, os valores de tensão e corrente no PAC foram obtidos antes e após a conexão do complexo industrial, em conformidade com o tópico precedente.

Por fim, ressalta-se que os trabalhos investigativos foram conduzidos para 3 situações distintas, cada qual associada com uma condição operativa própria, como destacado na sequência.

4.2.1 CASO 1 – FONTE DE SUPRIMENTO DESEQUILIBRADA

Neste caso a unidade consumidora encontra-se balanceada, enquanto a fonte de suprimento impõe um desequilíbrio de tensão próximo a 2%, o que provoca um desbalanceamento de corrente de 1,96% no ponto de acoplamento. Ressalta-se que para esta condição as Cargas 2 e 3 encontram-se desconectadas, visto que as mesmas são responsáveis pela injeção das correntes de sequência negativa manifestadas nos casos 2 e 3. Os valores das tensões impostas pela fonte de suprimento encontram-se expostas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7. Tensões Impostas pelo Supridor

Fases	Tensão [kV]
A	$20,32\angle 0^\circ$
B	$19,72\angle -121^\circ$
C	$19,72\angle 121^\circ$

A Tabela 4.8 apresenta os valores das tensões e correntes de sequência positiva e negativa, no PAC, nos períodos pré e pós conexão da unidade consumidora.

Tabela 4.8. Tensões e correntes no PAC antes e após a conexão da unidade consumidora - Caso 1

Período	Parâmetro	Valor
Pré-conexão	$\dot{V}_1$	$19910,00\angle -0,01^\circ \text{ V}$
	$\dot{V}_2$	$397,73\angle -0,66^\circ \text{ V}$
Pós-conexão	$\dot{V}_1$	$19792,77\angle -0,96^\circ \text{ V}$
	$\dot{V}_2$	$393,86\angle -1,02^\circ \text{ V}$
	$\dot{I}_1$	$29,44\angle -12,52^\circ \text{ A}$
	$\dot{I}_2$	$0,58\angle -28,54^\circ \text{ A}$

Em consonância com as condições operacionais estabelecidas, a responsabilidade sobre os desequilíbrios é puramente atribuída ao sistema de suprimento.

4.2.2 CASO 2 – UNIDADE CONSUMIDORA DESEQUILIBRADA

No presente estudo, as cargas 2 e 3 são conectadas entre as fases A e B da indústria, estabelecendo um desequilíbrio de corrente de 50,96% e tensão em torno de 1,52% no ponto de acoplamento, enquanto a fonte é responsável pelo suprimento de tensões com características simétricas. As informações relacionadas às cargas 2 e 3 encontram-se expostas na Tabela 4.5, previamente exposta.

Os valores das tensões e correntes medidas no ponto de acoplamento, antes e após a conexão do complexo industrial, são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9. Tensões e correntes no PAC antes e após a conexão da unidade consumidora - Caso 2

Período	Parâmetro	Valor
Pré-conexão	$\dot{V}_1$	19910,00 $\angle$ -0,01° V
	$\dot{V}_2$	0,59 $\angle$ -86,21° V
Pós-conexão	$\dot{V}_1$	19504,31 $\angle$ -1,20° V
	$\dot{V}_2$	296,89 $\angle$ 15,13° V
	$\dot{I}_1$	48,50 $\angle$ -37,21° A
	$\dot{I}_2$	24,72 $\angle$ 113,48° A

Salienta-se que para a presente condição operativa, o consumidor é responsável pela totalidade dos desequilíbrios manifestados no ponto de conexão.

4.2.3 CASO 3 – FONTE DE SUPRIMENTO E UNIDADE CONSUMIDORA DESEQUILIBRADAS

No terceiro caso, as condições operativas exploradas no Caso 1 e Caso 2 são conciliadas, portanto, tanto o supridor quanto a carga são responsáveis por 3,48% e 49,46% de desequilíbrio de tensão e corrente, respectivamente, manifestados no PAC. A Tabela 4.10 apresenta os valores das tensões e correntes de sequência positiva e negativa obtidas no barramento de conexão.

Tabela 4.10. Tensões e correntes no PAC antes e após a conexão da unidade consumidora – Caso 3

Período	Parâmetro	Valor
Pré-conexão	$\dot{V}_1$	19910,00 $\angle$ -0,01° V
	$\dot{V}_2$	397,73 $\angle$ -0,66° V
Pós-conexão	$\dot{V}_1$	19514,27 $\angle$ -1,20° V
	$\dot{V}_2$	678,45 $\angle$ 6,02° V
	$\dot{I}_1$	48,07 $\angle$ -36,92° A
	$\dot{I}_2$	23,78 $\angle$ 112,62° A

Na presente condição operativa, espera-se que a contribuição majoritária de tensão seja oriunda da concessionária, visto que os percentuais de desequilíbrio de tensão manifestados no Caso 2 são inferiores aos apresentados no Caso 1.

4.3 DESEMPENHO DAS METODOLOGIAS

4.3.1 CASO 1 – FONTE DE SUPRIMENTO DESEQUILIBRADA

A Figura 4.2 ilustra os resultados auferidos no que tange ao desempenho das metodologias para o compartilhamento sobre os desequilíbrios.

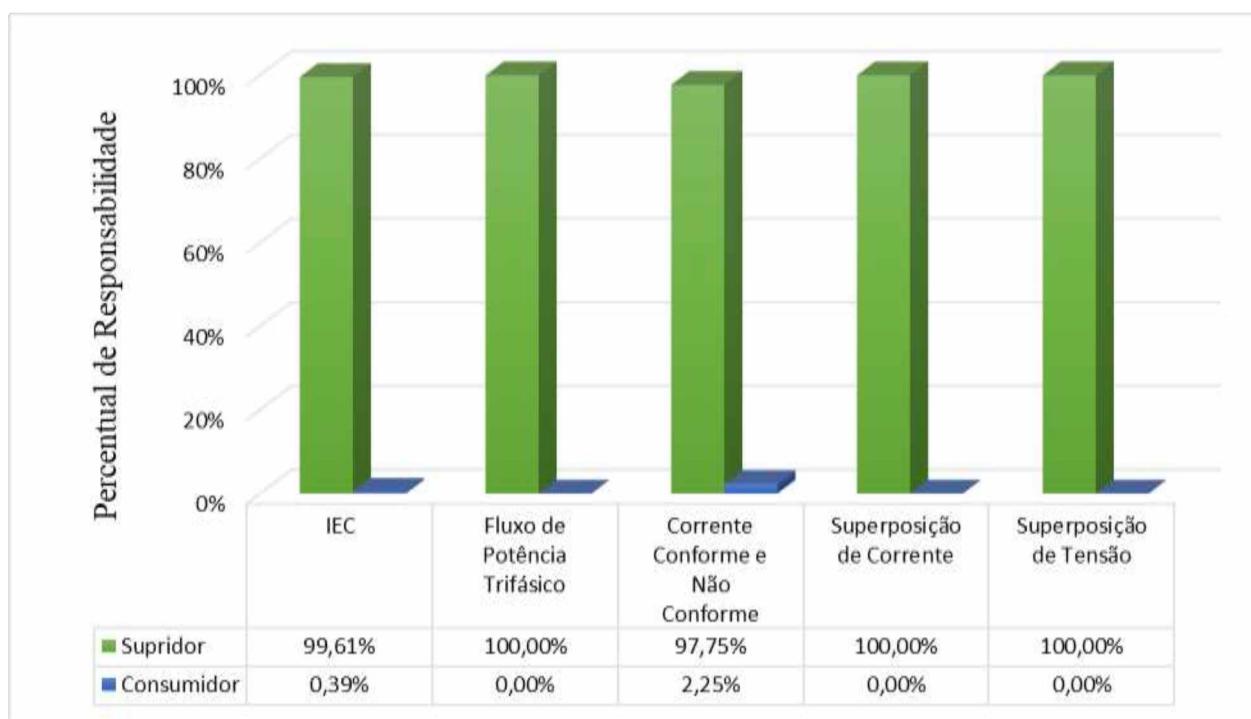


Figura 4.2. Atribuição das parcelas de responsabilidade sobre os desequilíbrios – Caso 1

Neste estudo, é fato que a reponsabilidade sobre os desequilíbrios é puramente atribuída ao sistema supridor, visto que as cargas oriundas do complexo industrial se encontram balanceadas. Sendo assim, analisando a Figura 4.2 é possível inferir que, de modo geral, as metodologias apresentaram uma resposta satisfatória para os fins aqui postos, muito embora o Método da Corrente Conforme e Não Conforme tenha incumbido um percentual de 2,25% ao consumidor de forma equivocada.

4.3.2 CASO 2 – UNIDADE CONSUMIDORA DESEQUILIBRADA

Para o segundo caso, a Figura 4.3 apresenta os resultados obtidos no tocante ao desempenho das metodologias exploradas.

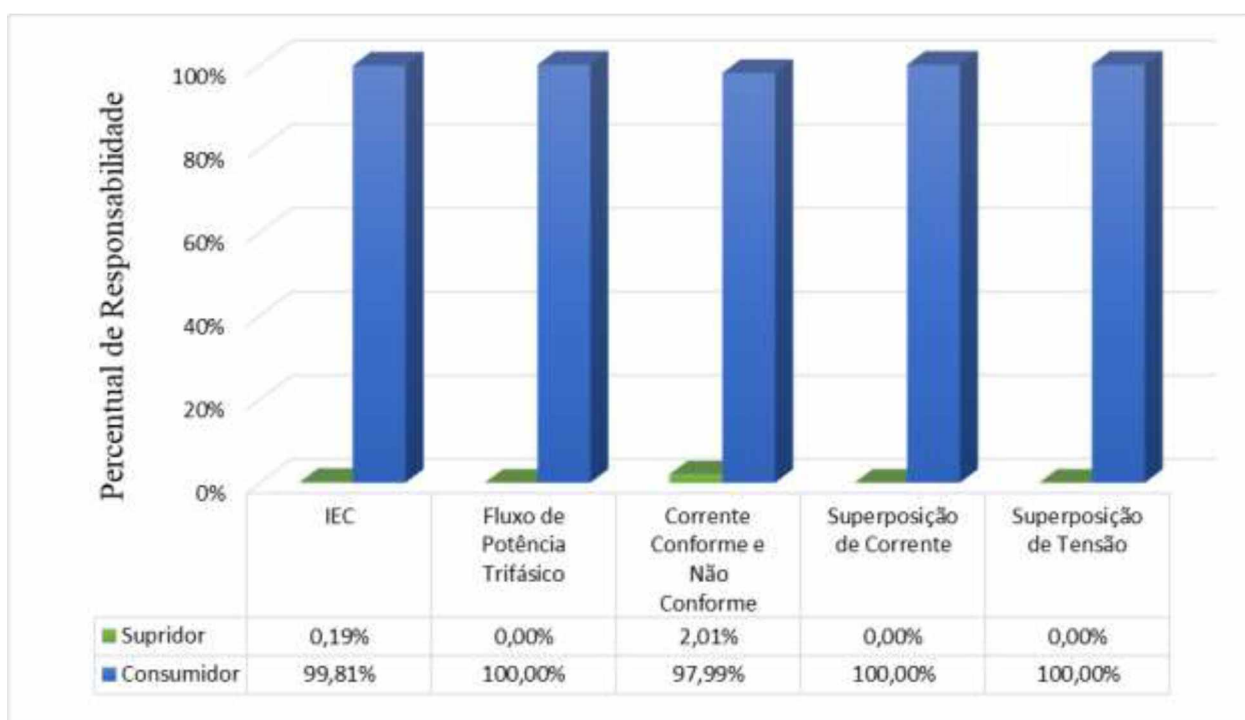


Figura 4.3. Atribuição das parcelas de responsabilidade sobre os desequilíbrios – Caso 2

Observando a Figura 4.3, fica evidenciado que a atribuição da parcela majoritária à unidade consumidora está em consonância com a realidade física esperada. De fato, o método da Corrente Conforme e Não Conforme atribuiu, de forma indevida, um percentual próximo a 2% ao supridor, o que na prática esperar-se-ia um valor nulo. Ainda assim, foram evidenciados resultados satisfatórios para esta condição operativa.

4.3.3 CASO 3 – FONTE DE SUPRIMENTO E UNIDADE CONSUMIDORA DESEQUILIBRADAS

A presente situação de operação conduziu às implicações manifestadas na Figura 4.4.

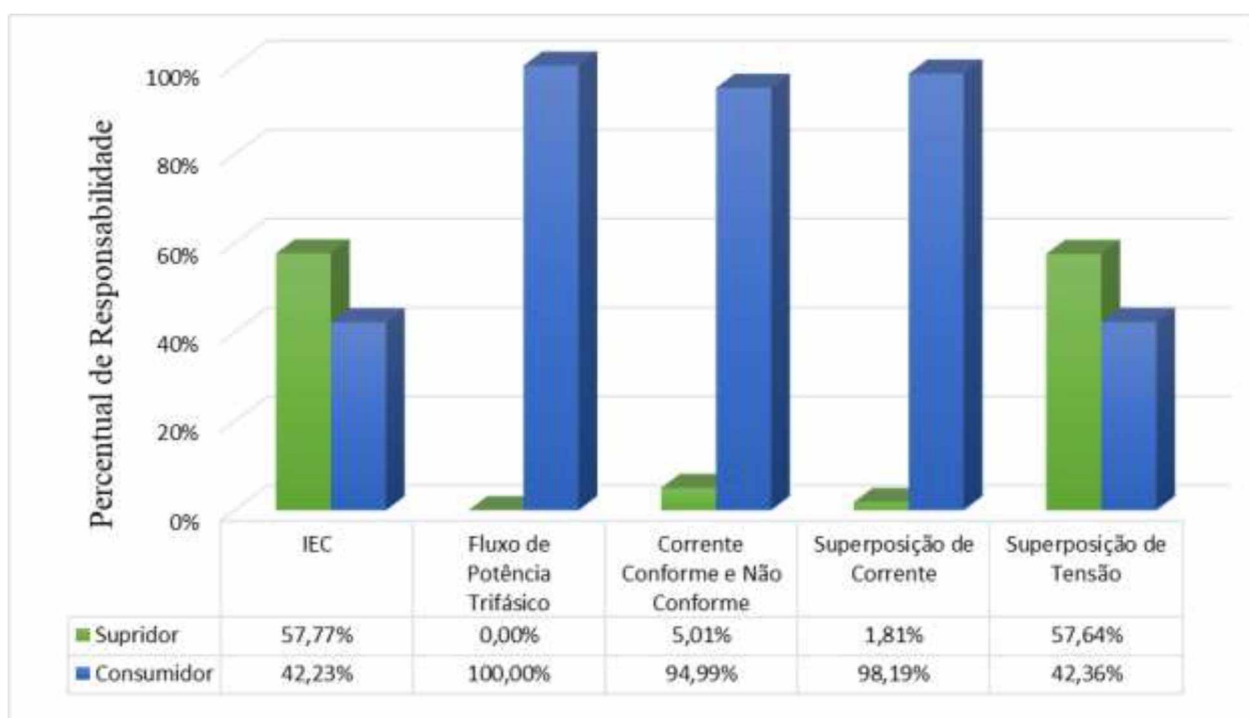


Figura 4.4. Atribuição das parcelas de responsabilidade sobre os desequilíbrios – Caso 3

De posse das informações supramencionadas, evidencia-se que o processo do compartilhamento indicou que os indicadores percentuais correspondentes aos métodos baseados na contribuição das correntes atribuíram ao consumidor a maior parte da responsabilidade sobre os desequilíbrios. Por outro lado, as metodologias que se embasaram na análise da contribuição de tensão incumbiram a maior parcela de responsabilidade ao supridor. Sendo assim, visto que as regulamentações nacionais estabelecem limites para os indicadores de tensão, é possível inferir que apenas o método IEC e o da Superposição de Tensão são capazes de atribuir, satisfatoriamente, os percentuais de responsabilidade sobre os desequilíbrios. Salienta-se que nas situações em que não existe a possibilidade de medições antes da inserção de uma unidade consumidora, o método IEC se torna inviável. Por outro lado, tendo em mente que o método da Superposição de Tensão requer o conhecimento de parâmetros que não são facilmente encontrados na prática, vale destacar que a problemática atrelada à atribuição das responsabilidades sobre os desequilíbrios ainda carece de maiores investigações.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

O primeiro capítulo deste trabalho procurou apresentar os fundamentos da teoria aplicável a grandezas desequilibradas nas redes elétricas visando, ainda, justificar a importância do desenvolvimento de estudos direcionados à atribuição de responsabilidades envolvendo esse fenômeno. Com este propósito foi feita a contextualização do tema através de uma sucinta apresentação da conceituação, causas, efeitos, métodos de cálculo para a quantificação, soluções mitigadoras e normas regulamentadoras que versam sobre os desequilíbrios. Por fim, foram explicitados os fundamentos das principais metodologias encontradas na literatura que tratam do compartilhamento de responsabilidades sobre os desequilíbrios, e de modo a contribuir com elas, propor o uso do método da Superposição, que até então não havia sido utilizado para a finalidade aqui posta.

O segundo capítulo buscou abordar, de forma mais detalhada, os conceitos fundamentais relacionados aos desequilíbrios de tensão e corrente, expondo os principais métodos de quantificação do fator de desequilíbrio bem como a apresentação das regulamentações vigentes, cujo objetivo é oferecer orientações e valores de referência para os desequilíbrios de tensão.

No terceiro capítulo foram apresentadas as principais estratégias para a atribuição das responsabilidades sobre os desequilíbrios, quais sejam: método IEC, método do Fluxo de Potência Trifásico, método da Corrente Conforme e Não Conforme, e por fim, o método da Superposição, cuja utilização para os propósitos aqui postos se mostrou pioneira. O desígnio explorado nesta etapa, embasou-se na definição das possibilidades de aplicações e limitações intrínsecas à cada metodologia, as quais puderam ser ratificadas no capítulo subsequente.

No quarto capítulo, foi realizada a implementação computacional de um arranjo elétrico de teste na plataforma Simulink, bem como a apresentação dos estudos de desempenho das metodologias considerando três condições operativas atreladas às fontes de desequilíbrio impostas. Por conseguinte, os resultados auferidos conduziram as seguintes constatações:

- O método IEC só é passível de aplicação no acesso de novas instalações, o que na maioria das vezes é impraticável. Portanto, nas situações em que não há a possibilidade de medições antes da inserção de uma unidade consumidora, o método se torna inviável.
- A aplicação do método do Fluxo de Potência Trifásico também se mostrou substancialmente limitada, uma vez que este não é capaz de quantificar as parcelas de responsabilidade entre os agentes, pois apenas possibilita constatar a fonte preponderante dos desequilíbrios.
- O uso do método da Corrente Não Conforme, por sua vez, se apresenta infactível para o compartilhamento de tensão. Visto que as regulamentações nacionais estabelecem limites para os indicadores de tensão, a aplicação da mencionada metodologia não é recomendada.
- Uma vez definidos meios capazes para a estabelecimento dos parâmetros que perfazem o Método da Superposição, o mesmo se apresenta como ferramenta sólida e promissora para atender os objetivos aqui postos. Este último procedimento, como esclarecido, se apresenta como tese de doutorado em desenvolvimento na UFU, sendo conduzida pela aluna Raquel Cristina Filiagi Gregory.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. F. L. Arão, "Avaliação Comparativa entre Métodos para Atribuição de Responsabilidades Devido ao Desequilíbrio de Tensão," Dissertação (Mestrado), Universidade de Brasília, Brasília, 2014.
- [2] R. C. F. Gregory, L. T. Oliveira and J. C. Oliveira, "A eficácia de compensadores de desequilíbrios a componentes passivos," *O Setor Elétrico*, no. 138, pp. 52-60, Jul. 2017.
- [3] A. von Jouanne and B. B. Banerjee, "Assessment of Voltage Unbalance," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, no. 4, pp. 782-790, Oct. 2001.
- [4] J. Kearney, "Grid Voltage Unbalance and The Integration of DFIG's," Tese (Doutorado), Dublin Institute of Technology, Dublin, 2013.
- [5] A. L. Ferreira Filho, "Análise do Comportamento do Fator de Desequilíbrio Frente a Variação da Amplitude e do Ângulo de Tensão," Tese (Doutorado), Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- [6] R. S. Herrera and J. R. Vázquez, "Identification of unbalanced loads in electric power systems," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 24, no. 9, pp. 1232-1243, Sep. 2014.
- [7] T. A. P. Beneteli, "Método Para Limitação de Índices de Desequilíbrio de Máquinas Elétricas Trifásicas em Sistemas de Distribuição," Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Juiz de Fora, Juíz de Fora, Ago. 2015.
- [8] R. C. Filiagi Gregory, T. M. Scotti and J. C. Oliveira, "Avaliação das Metodologias para a Atribuição das Parcelas de Responsabilidade sobre os Desequilíbrios," Trabalho submetido ao VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (VII SBSE), 2017.
- [9] J. Kearney, "Grid Voltage Unbalance and The Integration of DFIG's," Dublin, 2013.
- [10] R. G. Teodoro, "Metodologia Para Compensação de Desequilíbrio em Redes Elétricas," Ilha Solteira, 2015.

- [11] C. L. Fortescue, Method of Symmetrical Co-ordinates Applied to the Solution of Polyphase Network, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 37, 1918, pp. 1027-1140.
- [12] I. S. 1159, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality," IEEE Power & Energy Society , New York, USA, 2009.
- [13] L. T. Oliveira, R. C. Filiagi Gregory and J. C. Oliveira, "A Eficácia dos Compensadores de Desequilíbrios Passivos Frente às Solicitações Dinâmicas de Cargas," 2017.
- [14] Agência Nacional de Energia Elétrica, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST: Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica," Brasília, 2017.
- [15] ONS, "Procedimentos de Rede - Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia elétrica da Rede Básica," 2016.
- [16] L. F. L. Arão, "Avaliação Comparativa Entre Métodos para Atribuição de Responsabilidades devido ao Desequilíbrio de Tensão," Brasília, 2014.
- [17] P. H. L. S. Pinto, M. V. B. Mendonça and F. A. M. Moura, "Avaliação de Método para Atribuição da Responsabilidade pelo Desequilíbrio de Tensão em Sistemas com Motores Elétricos," in *XII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*, Curitiba, Ago. 2017.
- [18] L. F. L. Arão, A. L. Ferreira Filho and M. V. B. Mendonça, "Comparative Evaluation of Methods for Attributing Responsibilities Due To Voltage Unbalance," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 31, no. 2, pp. 743-752, Apr. 2016.
- [19] K. Srinivasan and R. Jutras, "Conforming and Non-conforming Current for Attributing Stady State Power Quality Problems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 1, pp. 212-217, Jan. 1998.
- [20] A. C. Santos, "Uma Contribuição ao Processo do Compartilhamento de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas via Chaveamento de Unidades Capacitivas," Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

- [21] W. Xu and Y. Liu, "A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 2, pp. 804-811, 2000.