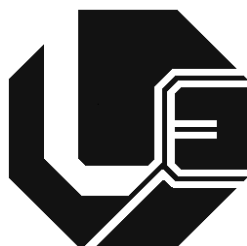


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



**UMA CONTRIBUIÇÃO AO PROCESSO DO
COMPARTILHAMENTO DE
RESPONSABILIDADES SOBRE AS
DISTORÇÕES HARMÔNICAS VIA
CHAVEAMENTO DE UNIDADES CAPACITIVAS**

Andréia Crico dos Santos

Uberlândia
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

**UMA CONTRIBUIÇÃO AO PROCESSO DO
COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES SOBRE
AS DISTORÇÕES HARMÔNICAS VIA CHAVEAMENTO DE
UNIDADES CAPACITIVAS**

Dissertação apresentada por Andréia
Crico dos Santos à Universidade Federal
de Uberlândia, como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do título de
Mestre em Ciências.

Banca Examinadora:

José Carlos de Oliveira, PhD (Orientador) – UFU
Carlos Eduardo Tavares, Dr. – UFU
Ivan Nunes Santos, Dr. – UFU
Marcus Vinícius Borges Mendonça, Dr. – UFTM

**UMA CONTRIBUIÇÃO AO PROCESSO DO
COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES SOBRE
AS DISTORÇÕES HARMÔNICAS VIA CHAVEAMENTO DE
UNIDADES CAPACITIVAS**

Andréia Crico dos Santos

Dissertação apresentada por Andréia Crico dos Santos
à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. José Carlos de Oliveira
Orientador

Prof. Edgard Afonso Lamounier Júnior
Coordenador da Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha querida vovó Anna, por todo amor, atenção, incentivo, torcida, dedicação e cuidados dedicados a mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tornar possível a realização deste trabalho. Obrigada, Senhor, pelas bênçãos derramadas, pela companhia contínua, por iluminar meus caminhos e por me conceder saúde e força para superar os obstáculos encontrados.

Agradeço ao meu professor orientador, José Carlos de Oliveira, pela presença, atenção e entusiasmo constantes. Sou grata por todos os ensinamentos, pela paciência e pelos bons exemplos, os quais foram fundamentais para a minha formação e para a elaboração deste trabalho.

Estendo meus agradecimentos ao professor Ivan Nunes Santos pelo acompanhamento, pela disposição em me auxiliar e pelas importantes contribuições feitas. Sou grata também ao professor Carlos Eduardo Tavares pelo apoio, incentivo e receptividade sempre a mim dispensada.

Agradeço, com muita ternura, aos meus pais, Lucília e Carlos, e à minha vovó, Anna, pelo amor, presença, carinho, compreensão e pelas grandes lições de vida, que são minha fonte de inspiração e motivação. Agradeço ao meu irmão e amigo Carlos Júnior por me acompanhar nessa jornada, sempre com alegria contagiante. Sou grata também aos demais familiares que me incentivaram a seguir e a buscar a vitória.

Expresso minha sincera gratidão aos meus queridos amigos, de modo especial: Aguiar Vieira, Ana Carla Crico, Arthur Costa, Bruna Beatriz Sousa, Daniel Tobias, Felipe Arruda, Gislene Moreira, Mariana Cardoso, Roni Gilberto Gonçalves e Thales Lima. Os bons momentos compartilhados com vocês tornaram a caminhada mais leve. Obrigada pela torcida, pelo afeto, pela convivência, por cada palavra de apoio e cada gesto de companheirismo.

Registro ainda meus agradecimentos aos colegas do laboratório de Qualidade da Energia Elétrica, bem como a todos os professores com os quais convivi e aprendi durante o período do mestrado.

Agradeço, por fim, à Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade, a Cinara pela simpatia e prontidão nos procedimentos junto à secretaria do programa e a CAPES pelo incentivo financeiro.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas graças a Deus, não sou o que era antes.”

(Marthin Luther King)

RESUMO

Em meio aos pontos que merecem notoriedade no contexto da Qualidade da Energia Elétrica, no que se refere às distorções harmônicas, está a questão do compartilhamento de responsabilidades. De fato, dada a constatação de níveis relevantes de distorções harmônicas em determinado ponto ou barramento de medição, a importância de conhecer as parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas se mostra clara diante da necessidade de implementação de medidas mitigadoras, a exemplo da instalação de filtros harmônicos. Nesse caso, torna-se desejável o emprego de um procedimento sistematizado e confiável que possa culminar em um consenso sobre a responsabilidade financeira associada ao processo de mitigação a ser implementado.

A literatura apresenta algumas metodologias destinadas aos fins do compartilhamento, porém trabalhos anteriores evidenciaram inconsistências ou dificuldades que, por vezes, estão relacionadas a fragilidades inerentes aos desenvolvimentos propostos ou a inviabilidades de ordem prática. Dentre esses procedimentos, merece atenção o princípio da Superposição que, apesar de ter sólida sustentação metodológica, possui aplicação limitada devido à necessidade do prévio conhecimento das impedâncias harmônicas dos agentes envolvidos. Os valores dessas impedâncias, principalmente da parte do consumidor, não são informações facilmente obtidas em campo.

Inserido nesse contexto, este trabalho apresenta uma proposta que procura contribuir para o processo de compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas utilizando uma técnica que envolve o chaveamento de unidades capacitivas. Este procedimento visa, sobretudo, oferecer informações consistentes sobre as impedâncias harmônicas de uma unidade consumidora para fins da aplicação do princípio da superposição suprarreferido.

Palavras Chave: compartilhamento de responsabilidades, distorções harmônicas, princípio da superposição, qualidade da energia elétrica.

ABSTRACT

Among the points that deserve recognition in the context of Electric Power Quality area related to the harmonic distortions is the issue of responsibilities assignment. In fact, given significant levels of harmonic distortions where at a particular point or along a specific measurement bus, the importance of knowing the percentages of responsibility to be assigned to the parties involved becomes clear when it is necessary to implement mitigation measures, such as the installation of harmonic filters. In this case, it is desirable to use a systematic and reliable procedure that culminate in a consensus on the financial responsibility associated with mitigation process.

The literature presents some procedures that propose the allocation of responsibility for harmonic distortion, but previous studies have sought to highlight difficulties related to inherent weaknesses to the proposed developments or infeasibility practices. Among these methodologies deserves attention the principle of Superposition that, despite consistent development, has limited application due to the need for prior knowledge of the harmonic impedances of the agents involved. The values of these impedances, especially consumer part, it is not an information easily obtained.

Inserted in this context, this work presents a proposal which seeks to contribute to the process of responsibility assignment on harmonic distortions using capacitor units switching. This technique aims to provide consistent information on the harmonic impedances of a consumer unit for the application of superposition principle aforementioned.

Keywords: harmonic distortions, power quality, sharing responsibility, superposition principle.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL.....	20
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	20
1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E ESTADO DA ARTE.....	22
1.2.1 Quanto às Diretrizes Gerais.....	22
1.2.2 Quanto aos Procedimentos para o Compartilhamento.....	24
1.3 CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA DISSERTAÇÃO.....	27
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	28

CAPÍTULO II

PRINCIPAIS METODOLOGIAS EXISTENTES PARA O COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES.....	31
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	31
2.2 MÉTODO DO FLUXO DE POTÊNCIA HARMÔNICA.....	32
2.3 MÉTODO DA CORRENTE CONFORME E NÃO CONFORME.....	34
2.4 MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO.....	38
2.4.1 Superposição de Correntes.....	40
2.4.2 Superposição de Tensões.....	42
2.5 MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO MODIFICADO.....	44
2.6 MÉTODO DA ANÁLISE DO ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS.....	47

CAPÍTULO III

ANÁLISE DE DESEMPENHO DAS METODOLOGIAS DESTINADAS AO COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES.....	51
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	51

3.2 SISTEMA ELÉTRICO UTILIZADO COMO TESTE.....	52
3.3 APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS AO SISTEMA TESTE.....	58
3.3.1 Aplicação do Método do Fluxo de Potência Harmônica.....	58
3.3.2 Aplicação do Método da Corrente Conforme e Não Conforme.....	59
3.3.3 Aplicação do Método da Superposição.....	60
3.3.4 Aplicação do Método da Superposição Modificado.....	61
3.3.5 Aplicação do Método da Análise do Espectro de Frequências.....	63
3.4 DISCUSSÕES SOBRE O DESEMPENHO DAS METODOLOGIAS.....	64
 CAPÍTULO IV	
MÉTODO DO CHAVEAMENTO DE CAPACITORES.....	69
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	69
4.2 PRINCIPAIS METODOLOGIAS EXISTENTES PARA A DETERMINAÇÃO DAS IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS DO CONSUMIDOR.....	70
4.3 METODOLOGIA PROPOSTA.....	74
4.4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO MÉTODO DO CHAVEAMENTO DE CAPACITORES.....	82
4.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A METODOLOGIA PROPOSTA.....	89
 CAPÍTULO V	
CONCLUSÕES.....	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Composição simplificada de um sistema segundo o método da Corrente Conforme e Não Conforme.....	35
Figura 2.2 – Arranjo elétrico sintetizando um ponto de acoplamento entre a concessionária e um consumidor que contém cargas lineares e não lineares.....	38
Figura 2.3 – Circuito equivalente de Norton evidenciando as partes envolvidas na problemática.....	39
Figuras 2.4 – Circuito equivalente de Norton considerando a contribuição: (a) apenas do sistema supridor; (b) apenas do consumidor.....	39
Figura 2.5 – Projeção de fasores sobre a corrente total no PAC para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas.....	42
Figura 2.6 – Projeção de fasores sobre a tensão total no PAC para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas.....	43
Figura 2.7 – Arranjo elétrico representativo do método da Superposição Modificado.....	44
Figuras 2.8 – Circuito equivalente de Norton com a impedância dominante considerando a contribuição: (a) apenas do sistema supridor; (b) apenas do consumidor.....	45
Figura 2.9 – Projeção de fasores sobre a corrente total no filtro para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas.....	46
Figura 2.10 – Diagrama de blocos da primeira etapa de aplicação da metodologia da Análise do Espectro de Frequências.....	48
Figura 2.11 – Projeção de fasores sobre a corrente total normalizada no PAC para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas....	49
Figura 3.1 – Modelagem do sistema simulado no software ATP.....	53
Figuras 4.1 – Esquemas simplificados de complexos industriais com duas possíveis configurações: (a) banco de capacitores do lado primário dos transformadores; (b) banco de capacitores do lado secundário dos transformadores.....	75

Figuras 4.2 – Arranjo elétrico representativo do método do Chaveamento de Capacitores mostrando as duas condições operativas: (a) com o banco de capacitores conectado; (b) com o banco de capacitores desconectado.....	77
Figura 4.3 – Esquema simplificado do arranjo analisado evidenciando as impedâncias calculadas.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Sistema supridor.....	54
Tabela 3.2 – Transformadores.....	54
Tabela 3.3 – Banco de capacitores.....	54
Tabela 3.4 – Cabos.....	54
Tabela 3.5 – Cargas Lineares.....	54
Tabela 3.6 – Motor de Indução.....	55
Tabela 3.7 – Dados relativos às fontes de corrente utilizadas na condição operacional I.....	55
Tabela 3.8 – Grandezas obtidas no PAC para a condição operacional I.....	55
Tabela 3.9 – Dados relativos à fonte supridora utilizada na condição operacional II.....	56
Tabela 3.10 – Grandezas obtidas no PAC para a condição operacional II.....	56
Tabela 3.11 – Grandezas obtidas no PAC para a condição operacional III.....	57
Tabela 3.12 – Resultados da aplicação do método do Fluxo de Potência Harmônica para a condição operacional I.....	58
Tabela 3.13 – Resultados da aplicação do método do Fluxo de Potência Harmônica para a condição operacional II.....	59
Tabela 3.14 – Resultados da aplicação do método do Fluxo de Potência Harmônica para a condição operacional III.....	59
Tabela 3.15 – Resultados da aplicação do método da Corrente Conforme e Não Conforme para a condição operacional I.....	59
Tabela 3.16 – Resultados da aplicação do método da Corrente Conforme e Não Conforme para a condição operacional II.....	60

Tabela 3.17 – Resultados da aplicação do método da Corrente Conforme e Não Conforme para a condição operacional III.....	60
Tabela 3.18 – Impedâncias harmônicas do sistema supridor e consumidor no sistema teste.....	60
Tabela 3.19 – Resultados da aplicação do método da Superposição de Tensões para a condição operacional I.....	61
Tabela 3.20 – Resultados da aplicação do método da Superposição de Tensões para a condição operacional II.....	61
Tabela 3.21 – Resultados da aplicação do método da Superposição de Tensões para a condição operacional III.....	61
Tabela 3.22 – Parâmetros R, L e C usados para obtenção da impedância dominante no PAC.....	62
Tabela 3.23 – Resultados da aplicação do método da Superposição Modificado para a condição operacional I.....	62
Tabela 3.24 – Resultados da aplicação do método da Superposição Modificado para a condição operacional II.....	62
Tabela 3.25 – Resultados da aplicação do método da Superposição Modificado para a condição operacional III.....	62
Tabela 3.26 – Resultados da aplicação do método da Análise do Espectro de Frequências para a condição operacional I.....	63
Tabela 3.27 – Resultados da aplicação do método da Análise do Espectro de Frequências para a condição operacional II.....	63
Tabela 3.28 – Resultados da aplicação do método da Análise do Espectro de Frequências para a condição operacional III.....	63
Tabela 3.29 – Resumo do desempenho das metodologias analisadas.....	67
Tabela 4.1 – Valores esperados para as impedâncias harmônicas totais do sistema.....	83
Tabela 4.2 – Valores esperados para a atribuição de responsabilidades sobre as distorções harmônicas nos três casos investigados.....	83
Tabela 4.3 – Valores das impedâncias harmônicas equivalentes dos transformadores de entrada.....	84

Tabela 4.4 – Dados de entrada para aplicação do procedimento na condição operacional I.....	84
Tabela 4.5 – Impedâncias harmônicas fornecidas pela metodologia na condição operacional I.....	85
Tabela 4.6 – Compartilhamento de responsabilidades para a condição operacional I.....	87
Tabela 4.7 – Dados de entrada para aplicação do procedimento na condição operacional II.....	87
Tabela 4.8 – Impedâncias harmônicas fornecidas pela metodologia na condição operacional II.....	88
Tabela 4.9 – Compartilhamento de responsabilidades para a condição operacional II.....	88
Tabela 4.10 – Dados de entrada para aplicação do procedimento na condição operacional III.....	88
Tabela 4.11 – Impedâncias harmônicas fornecidas pela metodologia na condição operacional III.....	88
Tabela 4.12 – Compartilhamento de responsabilidades para a condição operacional III.....	89

LISTA DE SÍMBOLOS

EN	<i>European Standard.</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Comission.</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers.</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
PRODIST	Procedimentos de Distribuição.
ONS	Operador Nacional do Sistema.
PAC	Ponto de Acoplamento Comum.
P	Potência ativa total de fase no PAC.
P_1	Parcela da potência ativa total referente à frequência fundamental.
P_h	Parcela da potência ativa total referente às frequências harmônicas.
V_{pac-1}	Módulo da tensão de fase eficaz de frequência fundamental no PAC.
I_{pac-1}	Módulo da corrente eficaz de fase de frequência fundamental no PAC.
\emptyset_1	Defasagem angular entre a tensão e a corrente fundamental no PAC.
V_{pac-h}	Módulo da tensão de fase eficaz de frequência harmônica h no PAC.
I_{pac-h}	Módulo da corrente eficaz de fase de frequência harmônica h no PAC.
\emptyset_h	Defasagem angular entre a tensão e a corrente de frequência harmônica h no PAC.
$v(t)$	Tensão instantânea presente no PAC.
$i(t)$	Corrente instantânea total presente no PAC.
$i_c(t)$	Parcela da corrente dita conforme, a qual supre as cargas do grupo 1.
$i_{nc}(t)$	Parcela da corrente chamada não conforme, a qual supre as cargas do grupo 2.
$\dot{I}(\omega)$	Fasor representativo da corrente total no PAC.
$\dot{I}_c(\omega)$	Fasor representativo da parcela de corrente conforme.
$\dot{I}_{nc}(\omega)$	Fasor representativo da parcela de corrente não conforme.
y	Constante complexa que expressa a admitância referente a todas as frequências harmônicas.
\dot{I}_{s-h}	Fonte representativa da corrente harmônica de ordem h gerada pelas cargas não lineares conectadas ao sistema supridor.

\dot{I}_{c-h}	Fonte representativa da corrente harmônica de ordem h gerada pelas cargas não lineares conectadas ao consumidor.
\dot{Z}_{s-h}	Impedância harmônica de ordem h do sistema supridor, vista a partir do PAC.
\dot{Z}_{c-h}	Impedância harmônica de ordem h do consumidor, vista a partir do PAC.
\dot{V}_{pac-h}	Tensão harmônica de ordem h medida no ponto de acoplamento.
\dot{I}_{pac-h}	Corrente harmônica de ordem h medida no ponto de acoplamento.
$\dot{I}_{s-pac-h}$	Contribuição da concessionária para a corrente harmônica total de ordem h no PAC.
$\dot{I}_{c-pac-h}$	Contribuição do consumidor para a corrente harmônica total de ordem h no PAC.
$I_{s-proj-h}$	Projeção de $\dot{I}_{s-pac-h}$ sobre \dot{I}_{pac-h} .
$I_{c-proj-h}$	Projeção de $\dot{I}_{c-pac-h}$ sobre \dot{I}_{pac-h} .
$\dot{V}_{s-pac-h}$	Contribuição da concessionária para a tensão harmônica total de ordem h no PAC.
$\dot{V}_{c-pac-h}$	Contribuição do consumidor para a tensão harmônica total de ordem h no PAC.
$V_{s-proj-h}$	Projeção de $\dot{V}_{s-pac-h}$ sobre \dot{V}_{pac-h} .
$V_{c-proj-h}$	Projeção de $\dot{V}_{c-pac-h}$ sobre \dot{V}_{pac-h} .
\dot{Z}_{f-h}	Impedância harmônica do filtro para a ordem h .
\dot{I}_{f-h}	Corrente harmônica de ordem h no filtro.
$\dot{I}_{pac-in-h}$	Corrente harmônica de ordem h à montante do PAC.
$\dot{I}_{pac-out-h}$	Corrente harmônica de ordem h à jusante do PAC.
\dot{I}_{fs-h}	Contribuição do supridor para a corrente total de ordem h no filtro.
\dot{I}_{fc-h}	Contribuição do consumidor para a corrente total de ordem h no filtro.
$I_{fs-proj-h}$	Projeção de \dot{I}_{fs-h} sobre \dot{I}_{f-h} .
$I_{fc-proj-h}$	Projeção de \dot{I}_{fc-h} sobre \dot{I}_{f-h} .
FFT	<i>Fast Fourier Transform.</i>
\dot{I}_{n-h}	Corrente normalizada no PAC para dada ordem harmônica h .
$\dot{V}_{n-h} = \dot{I}_{un-h}$	Tensão normalizada no PAC para dada ordem harmônica h .
\dot{I}_{cn-h}	Diferença entre os fasores \dot{I}_{n-h} e \dot{I}_{un-h} .

α	Ângulo entre os fasores \dot{I}_{un-h} e \dot{I}_{n-h} .
β	Ângulo entre os fasores \dot{I}_{cn-h} e \dot{I}_{n-h} .
$I_{s-contr-h}$	Projeção de \dot{I}_{un-h} sobre \dot{I}_{n-h} .
$I_{c-contr-h}$	Projeção de \dot{I}_{cn-h} sobre \dot{I}_{n-h} .
ATP	<i>Alternative Transients Program.</i>
DIT _h	Distorção harmônica individual de tensão de ordem h .
DII _h	Distorção harmônica individual de corrente de ordem h .
DTT	Distorção harmônica total de tensão.
R	Resistência
L	Indutância
C	Capacitância
BB	<i>Black Box</i>
$\dot{Z}_{carga-h}$	Impedância harmônica de ordem h , vista a partir do ponto de chaveamento, excluindo a capacitância chaveada.
\dot{Z}_{cap-h}	Impedância harmônica de ordem h do banco de capacitores chaveado.
\dot{V}'_{pac-h}	Tensão harmônica no PAC de ordem h após o chaveamento do banco de capacitores.
\dot{I}'_{pac-h}	Corrente harmônica de ordem h no PAC após o chaveamento do banco de capacitores.
\dot{I}_{cap-h}	Corrente harmônica de ordem h que flui pelo capacitor chaveado antes dele ser desconectado.
\dot{I}'_{cap-h}	Corrente harmônica de ordem h que flui pelo capacitor chaveado após ele ser desconectado.
$\dot{I}_{carga-h}$	Corrente harmônica de ordem h que flui pela carga antes da desconexão do capacitor.
$\dot{I}'_{carga-h}$	Corrente harmônica de ordem h que flui pela carga após a desconexão do capacitor.
$\dot{Z}_{carga-tot-h}$	Impedância harmônica total de ordem h vista a partir do ponto de chaveamento, incluindo a capacitância chaveada.
\dot{V}_h	Tensão harmônica, de fase, de ordem h , no ponto de chaveamento, antes do mesmo ocorrer.

\dot{I}_h	Corrente harmônica, de fase, de ordem h , no ponto de chaveamento, antes do mesmo ocorrer.
\dot{V}'_h	Tensão harmônica de fase, de ordem h , no ponto de chaveamento, após o mesmo ocorrer.
\dot{I}'_h	Corrente harmônica de fase, de ordem h , no ponto de chaveamento, após o mesmo ocorrer.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Embora a área da Qualidade da Energia Elétrica já possa ser considerada uma linha de pesquisa clássica no contexto da Engenharia de Sistemas Elétricos, é oportuno salientar que constantemente novos desafios passam a fazer parte do panorama desse campo de investigações. Isso é decorrência, de forma geral, do peculiar fato de a qualidade do produto energia elétrica depender não apenas de processos relacionados às fases de geração, transmissão e distribuição, mas também das características operacionais de seus consumidores.

Nesse sentido, novas questões são levantadas diante da natural modernização e das sucessivas modificações nos moldes de funcionamento dos sistemas elétricos. Concomitantemente, os consumidores também se tornam cada vez mais atentos aos padrões de energia com os quais são supridos, uma vez que problemas de qualidade podem provocar uma série de efeitos indesejados, como falha de equipamentos e interrupção de cadeias produtivas. Diante desse dinâmico cenário, esforços devem ser somados no intuito de garantir que os serviços relacionados ao fornecimento e o próprio

produto energia elétrica apresentem características como segurança, continuidade, qualidade, entre outros.

Inserida no contexto dos fatores capazes de provocar deturpações na qualidade do produto energia elétrica está situada a problemática das distorções harmônicas. Em linhas gerais, os harmônicos são fenômenos associados com deformações nas formas de onda de tensões e correntes, cujos espectros revelam a presença de sinais de frequências múltiplas inteiras da fundamental sobrepostos ao sinal fundamental de 60 Hz, no caso do Brasil.

Essa temática suscita questões que recebem importante destaque no panorama energético mundial devido, sobretudo, à massiva intensificação da presença de cargas elétricas com características não lineares conectadas aos sistemas, principalmente a partir da segunda metade do século XX. Dentro desse panorama, equipamentos que utilizam técnicas de controle eletrônico, em nível residencial, comercial ou industrial, podem ser caracterizados como exemplos de cargas causadoras de distorções [1].

Tais distorções podem provocar diversos efeitos indesejados à operação dos sistemas, dentre os quais é possível mencionar aqueles relacionados ao estresse térmico de equipamentos (aumento das perdas, elevação da temperatura e redução de vida útil), ao estresse dielétrico (sobretensões na frequência de ressonância paralela) e ao estresse mecânico (prejuízo ao desempenho do torque de máquinas rotativas e aumento de vibrações) [2].

Dessa forma, paulatinamente, documentos têm procurado estabelecer limites que visam manter os níveis de distorções em patamares aceitáveis para a garantia do bom desempenho de sistemas. Ao mesmo tempo, técnicas de mitigação envolvendo a utilização de diferentes tipos de filtros ganham cada vez maior eficácia e sofisticação.

Com efeito, nota-se que lacunas ainda estão presentes em certos aspectos que tangem o assunto apresentado. No contexto dos desafios existentes surge a temática de investigação desta dissertação de mestrado, que lida com a questão da atribuição de responsabilidades sobre as distorções harmônicas eventualmente constatadas em um ponto de acoplamento entre concessionária e consumidor.

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E ESTADO DA ARTE

1.2.1 Quanto às Diretrizes Gerais

Diante da necessidade de sistematização do tratamento da problemática relacionada à presença de componentes harmônicas em tensões e/ou correntes, documentos foram elaborados visando oferecer orientações e definir valores limítrofes ou de referência para as distorções. Em contexto internacional merecem destaque os seguintes documentos: EN 50160 [3], IEC 61000-3-6 [4] e IEEE 519-2014 [5].

A norma europeia e o documento da IEC apresentam como meta imediata a qualidade de tensão, uma vez que são definidos valores máximos admissíveis para a distorção harmônica individual e total de tensão. De maneira geral, a IEC 61000-3-6 recomenda que, para cada frequência harmônica, os níveis permissíveis de distorção de corrente sejam obtidos por meio da divisão do valor máximo tolerável de distorção de tensão pela impedância harmônica do consumidor em questão. Dessa maneira, assegura-se que não existirão problemas relacionados à ultrapassagem dos limites de tensão e o encargo por isso recai sobre o consumidor [6].

Por outro lado, a norma IEEE 519-2014 apresenta limites tanto para as distorções harmônicas de corrente, quanto de tensão. Nesse caso, as distorções máximas permitidas para as correntes são definidas de acordo com a relação entre a capacidade do sistema e a capacidade de um consumidor (divisão entre a corrente de curto-circuito do barramento e a corrente de carga nominal do consumidor). Dessa maneira, pode-se afirmar que esse documento prima pela união de esforços entre consumidores e concessionárias para manutenção dos patamares aceitáveis de distorções harmônicas, uma vez que se ainda houver problemas de distorção de tensão quando todos os consumidores estiverem dentro de seus limites de distorção de corrente, fica a cargo da concessionária a tarefa de restaurar a qualidade da tensão [6].

Com relação à regulamentação técnica do setor elétrico brasileiro, o módulo de número oito do documento da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), denominado Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) [7], estabelece valores de referência para os níveis de distorções harmônicas individuais e totais de tensão. Ainda em termos de Brasil, o documento Procedimentos de Rede, elaborado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), no submódulo 2.8 [8], mostra os limites referentes aos indicadores associados às distorções harmônicas de tensão quando se avalia o impacto de novas condições de conexão à rede básica.

Os dois documentos brasileiros citados estabelecem tão somente valores com referência a distorções de tensão, sem uma imposição direta a consumidores e, desse modo, caso limites sejam ultrapassados, são necessárias negociações entre concessionárias e consumidores. Vale ressaltar que discussões apontam para novos horizontes no que se refere a esse tema no país, uma vez que valores atualmente tomados como recomendações tendem a ser regulamentados num breve futuro e,

certamente, tal fato desencadeará novas necessidades, sobretudo no que tange a diversos aspectos relacionados à execução de medidas mitigadoras.

Apesar das diferentes abordagens apresentadas pelos documentos anteriormente discutidos, nota-se que todos eles possuem a comum característica de não tratar sobre uma metodologia que seja capaz de definir os percentuais de responsabilidade a serem atribuídos ao supridor e ao consumidor, pela distorção harmônica presente em determinado barramento.

Assim, diante de eventuais problemas de ultrapassagem dos limites de harmônicos em um ponto de acoplamento comum (PAC) do sistema, onde se faz necessário aplicar uma solução, a exemplo da instalação de um filtro [9], seria equânime contar com um procedimento que pudesse definir com clareza as parcelas de contribuição de cada um dos agentes envolvidos na distorção total presente no local. Dessa forma, do ponto de vista dos dispêndios financeiros [10], tornar-se-ia possível chegar à justa divisão da importância que competiria a cada parte. Nesse contexto, torna-se evidente, portanto, a relevância da temática de pesquisa relacionada à busca de mecanismos capazes de conduzir ao efetivo compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas.

1.2.2 Quanto aos Procedimentos para Compartilhamento

Uma série de pesquisas e publicações tem sido realizada em nível nacional e internacional acerca do tema em pauta neste trabalho. Pode-se dizer que o primeiro procedimento proposto na literatura que desperta especial atenção é conhecido como método do Fluxo de Potência Harmônica [11-16], o qual não se compromete em definir parcelas de responsabilidades, mas tão somente visa à identificação da fonte de

distorções dominante no PAC. Apesar de essa metodologia ser empregada até mesmo em alguns equipamentos de medição, alguns trabalhos, preocupados em avaliar a confiabilidade do processo, demonstraram evidentes fragilidades relacionadas à sua aplicação [17,18].

Outra metodologia proposta, conhecida como método da Corrente Conforme e Não Conforme [19, 20], considera em seu desenvolvimento algumas hipóteses simplificadoras que refutam princípios básicos ligados à teoria de circuitos elétricos de corrente alternada. Este fato levantou muitos questionamentos na comunidade científica interessada no assunto e alguns trabalhos, a exemplo de [21, 22], atestaram fortes inconsistências ao avaliar o desempenho desse procedimento.

O método da Superposição [23, 24], por sua vez, mostra-se como uma proposta de grande difusão na literatura e fundamenta-se, conforme sua própria denominação sugere, no princípio básico de superposição de circuitos elétricos. Muitos trabalhos realizados [22, 25, 26, 27] confirmaram a eficácia do procedimento, no entanto, vale ressaltar que a principal dificuldade de aplicação prática do mesmo refere-se à necessidade de se conhecer o valor das impedâncias harmônicas do supridor e do consumidor.

Nesse particular, há técnicas [28-31] capazes de determinar com precisão a impedância harmônica do sistema supridor, contudo muitas dificuldades são observadas no que se refere aos mecanismos vinculados à determinação da impedância harmônica do consumidor. Sobre esse assunto, a referência [2] aponta a existência de processos invasivos e não invasivos, ressaltando as principais dificuldades relacionadas à aplicação deles. É importante destacar, também, que sérias fragilidades já foram constatadas no que se refere ao âmbito de desenvolvimentos que procuram modelar cargas utilizando componentes passivos associados a elementos representativos de

eventuais não linearidades [32]. Observa-se, ainda, a existência de propostas baseadas em outros campos de pesquisa, como, por exemplo, a utilização de técnicas de otimização e estatística [33].

Diante dessa conjuntura, uma proposição denominada método da Superposição Modificado [34, 35] procurou contornar as dificuldades associadas à utilização do tradicional método da Superposição, por meio da utilização de uma impedância harmônica dominante no PAC. Apesar dos aspectos promissores acerca da utilização dessa metodologia, destaca-se que a sua aplicação carece da utilização de uma impedância dominante, a exemplo de um filtro harmônico, para conexão no ponto de acoplamento. Esse fato ofusca a viabilidade e dificulta o emprego do procedimento em termos práticos.

Tendo por base outra linha de pesquisa, uma proposta recentemente publicada e aqui denominada método da Análise do Espectro de Frequências [36] comprometeu-se em definir as parcelas de responsabilidade sobre as distorções harmônicas de forma atrativa, à primeira vista, devido à sua grande praticidade. Contudo, avaliações já apontaram a fragilidade do procedimento [37], que não apresentou a confiabilidade necessária para o emprego em sistemas reais.

Existem ainda outras propostas, envolvendo diferentes campos de investigações, que buscam encontrar soluções viáveis para a problemática do compartilhamento. Inseridas nesse contexto, podem ser citadas as técnicas que utilizam redes neurais [38-42], estimação de estados [43-49], estatística [50], entre outras. Em geral, muitos destes trabalhos se preocupam em identificar apenas os principais pontos causadores de distorções em um sistema, sem tratar da definição efetiva de parcelas de responsabilidades da concessionária e do consumidor em determinado PAC.

À luz das considerações feitas fica, pois, evidenciado que o método da Superposição se destaca perante os demais e, nesse sentido, torna-se evidente a necessidade de buscar desenvolvimentos com direção ao estabelecimento de um procedimento consistente para a estimativa das impedâncias harmônicas equivalentes de unidades consumidoras. Esta questão se apresenta como o cerne da pesquisa contemplada por este trabalho.

1.3 CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA DISSERTAÇÃO

Após apresentação dos aspectos gerais que permeiam o tema central objeto de investigação desta dissertação, e tendo em mente as conquistas já obtidas e os desafios ainda existentes na área, reconhecem-se como contribuições oferecidas por este trabalho os pontos destacados na sequência:

- Apreciação sobre as principais metodologias existentes para o compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas, com o intuito de contemplar os seguintes aspectos: detalhamento físico e matemático dos procedimentos, realização de simulações computacionais e avaliação de desempenho, com destaque à identificação de fragilidades ou dificuldades de aplicação dos processos até então encontrados na literatura;
- Proposição de um procedimento metodológico que avança no sentido de possibilitar a determinação da impedância harmônica de uma unidade

consumidora, com vistas à aplicação segura do método da Superposição para determinação das parcelas de responsabilidades dos agentes envolvidos;

- Avaliação computacional da nova metodologia proposta, envolvendo a análise crítica de aspectos relacionados ao desempenho e à aplicabilidade da mesma.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Em consonância com os objetivos por ora expostos, além do presente capítulo introdutório, esta dissertação encontra-se estruturada da seguinte maneira:

CAPÍTULO II – Principais Metodologias Existentes para o Compartilhamento de Responsabilidades.

Este capítulo destina-se à análise dos fundamentos das principais metodologias encontradas na literatura para o compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas. São apresentados o princípio físico e o detalhamento matemático de cinco métodos, com a abordagem de suas potencialidades e limitações.

CAPÍTULO III – Análise de Desempenho das Metodologias Destinadas ao Compartilhamento de Responsabilidades.

Avançando na direção de verificar o desempenho das metodologias apresentadas no capítulo II, são realizadas simulações computacionais considerando diferentes condições operativas de um mesmo sistema teste que possui características concordantes à topologia de sistemas reais. A análise dos resultados fornecidos a partir da aplicação dos procedimentos permite o estabelecimento de termos conclusivos sobre a viabilidade e a consistência de cada um deles.

CAPÍTULO IV – Método do Chaveamento de Capacitores.

Nesta etapa é apresentada a proposta de um novo procedimento metodológico que objetiva a determinação das impedâncias harmônicas de uma unidade consumidora com vistas à definição de meios que possam conduzir a um efetivo compartilhamento de responsabilidades. A técnica envolve a realização de medições em duas condições de operação distintas, as quais são obtidas a partir do chaveamento de capacitores. Os fundamentos do procedimento são apresentados e, além disso, são feitos trabalhos computacionais para avaliar a eficácia e aplicabilidade do mesmo, utilizando o mesmo sistema teste evidenciado no capítulo III.

CAPÍTULO V – Conclusões.

Este capítulo exhibe considerações conclusivas sobre o trabalho, com o intuito de sumarizar as suas principais contribuições e apontar eventuais necessidades de investigações futuras na área de pesquisa em foco.

Referências Bibliográficas.

Por fim, é apresentado o material bibliográfico utilizado no desenvolvimento desta dissertação.

CAPÍTULO II

PRINCIPAIS METODOLOGIAS EXISTENTES PARA O COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Conforme brevemente discutido no capítulo introdutório, o assunto em pauta nesta dissertação se apresenta como uma questão já debatida no meio científico, sendo que esforços concentrados em distintas linhas de desenvolvimentos foram feitos no intuito de alcançar um meio sólido para o compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas. O fato de ainda não existir consenso sobre o assunto e os desafios que permeiam esta área da qualidade da energia incitam a realização de novas investigações. É importante salientar, todavia, que os avanços obtidos por meio das pesquisas realizadas até o momento mostram-se como informações relevantes para a constatação das particularidades da problemática, abrindo, assim, possibilidades para identificar limitações e vislumbrar medidas solucionadoras aos entraves observados.

À luz dessas constatações, o presente capítulo tem o intuito de apresentar os principais métodos encontrados na literatura para os fins aqui discutidos, sendo que são

feitos apontamentos no que diz respeito aos seus princípios físicos e formulações matemáticas. Na sequência, é realizado o detalhamento dos procedimentos conhecidos como: Fluxo de Potência Harmônica, Corrente Conforme e Não-Conforme, Superposição, Superposição Modificado e Análise do Espectro de Frequências.

2.2 MÉTODO DO FLUXO DE POTÊNCIA HARMÔNICA

O método do Fluxo de Potência Harmônica [11-16] apresenta-se como uma clássica proposta respaldada na identificação da direcionalidade do fluxo de harmônicos em sistemas elétricos para definição das fontes predominantes de distorções. Assim, a partir da obtenção das formas de onda de tensão e corrente no ponto de acoplamento de interesse, por meio de medições ou simulações computacionais, é possível encontrar as componentes harmônicas individuais desses sinais por meio da decomposição por Série de Fourier [2]. A potência ativa total no PAC pode ser expressa conforme indica equação (2.1).

$$P = P_1 + P_h = V_{pac-1} \cdot I_{pac-1} \cdot \cos \phi_1 + \sum_{h=2}^{\infty} V_{pac-h} \cdot I_{pac-h} \cdot \cos \phi_h \quad (2.1)$$

Onde:

P = potência ativa total de fase no PAC;

P_1 = parcela da potência ativa total referente à frequência fundamental;

P_h = parcela da potência ativa total referente às frequências harmônicas;

V_{pac-1} = módulo da tensão de fase eficaz de frequência fundamental no PAC;

I_{pac-1} = módulo da corrente eficaz de fase de frequência fundamental no PAC;

ϕ_1 = defasagem angular entre a tensão e a corrente fundamental no PAC;

V_{pac-h} = módulo da tensão de fase eficaz de frequência harmônica h no PAC;

I_{pac-h} = módulo da corrente eficaz de fase de frequência harmônica h no PAC;

\varnothing_h = defasagem angular entre a tensão e a corrente de frequência harmônica h no PAC;

O procedimento sugere que na ausência de geração interna do consumidor, adota-se como positivo o sentido do fluxo da potência ativa de frequência fundamental. Assim, a partir do ângulo \varnothing_h é possível obter o sinal da potência harmônica e, de acordo com princípios clássicos, tem-se que:

- $-90^\circ < \varnothing_h < 90^\circ$: neste caso a potência harmônica ativa tem sinal positivo (sinal concordante ao sinal da potência ativa fundamental) e, assim, o supridor atua como gerador predominante da ordem em questão;
- $90^\circ < \varnothing_h < 270^\circ$: neste caso, por outro lado, a potência harmônica ativa apresenta sinal negativo (sinal oposto ao sinal da potência ativa fundamental) e, dessa forma, o consumidor atua como causador principal das distorções da ordem considerada.

Com base no que foi apresentado, vale ressaltar que a metodologia em questão não permite a quantificação de parcelas de responsabilidade a serem atribuídas ao sistema supridor e ao consumidor, uma vez que indica tão somente o sentido predominante da fonte de harmônicos.

O procedimento aqui discutido já foi alvo de trabalhos avaliativos [17, 18] que visaram discorrer sobre a sua consistência metodológica. De acordo com [11, 22, 34], existe uma série de pontos desfavoráveis à aplicação prática do método, dentre os quais podem ser destacados: a possibilidade de imprecisão da resposta quando há baixos níveis de distorções harmônicas e o fato de os erros advindos dos equipamentos de medição poderem influenciar de maneira decisiva os resultados da aplicação da

metodologia, principalmente quando o ângulo \varnothing_h apresenta valores próximos a 90° ou -90° .

Nesse sentido, apesar de o método ter sido bem difundido e empregado em certas circunstâncias, constata-se fragilidades desencorajadoras quanto à sua utilização de maneira efetiva e segura.

2.3 MÉTODO DA CORRENTE CONFORME E NÃO CONFORME

O método da Corrente Conforme e Não Conforme [19, 20] propõe um processo que sugere a separação da corrente no ponto de acoplamento em duas parcelas, sendo uma denominada “conforme” e a outra “não conforme”, cada uma com características peculiares quanto à natureza da carga que suprem.

Seguindo esse raciocínio, a metodologia indica, em um primeiro momento, que as instalações consumidoras são constituídas por elementos que podem ser divididos em dois grupos, quais sejam: cargas que não produzem distorções adicionais às já presentes na tensão de suprimento (grupo 1) e cargas que produzem distorções adicionais às originalmente presentes na tensão de suprimento (grupo 2). Como, naturalmente, as tensões e correntes em sistemas elétricos são grandezas fasoriais, as cargas do grupo 2 podem ocasionar diferentes efeitos, e por isso são classificadas como: desejáveis (quando atenuam os níveis de distorções originalmente presentes na rede), indesejáveis (quando intensificam os níveis de distorções *a priori* constatados no suprimento) ou geradoras de distorção (que produzem uma corrente distorcida, mesmo quando a tensão de suprimento original se apresenta puramente senoidal).

Com base em tais definições, a Figura 2.1 exibe um circuito simplificado que contém uma fonte de suprimento em série com uma impedância, a qual define o nível de

curto-circuito da rede, e uma unidade consumidora contendo elementos representativos do grupo 1 e do grupo 2. Conforme se observa, pela parte da carga pertencente ao grupo 1 circula a parcela de corrente dita “conforme”, enquanto a fração pertencente ao grupo 2 é suprida pela parcela de corrente chamada de “não conforme”.

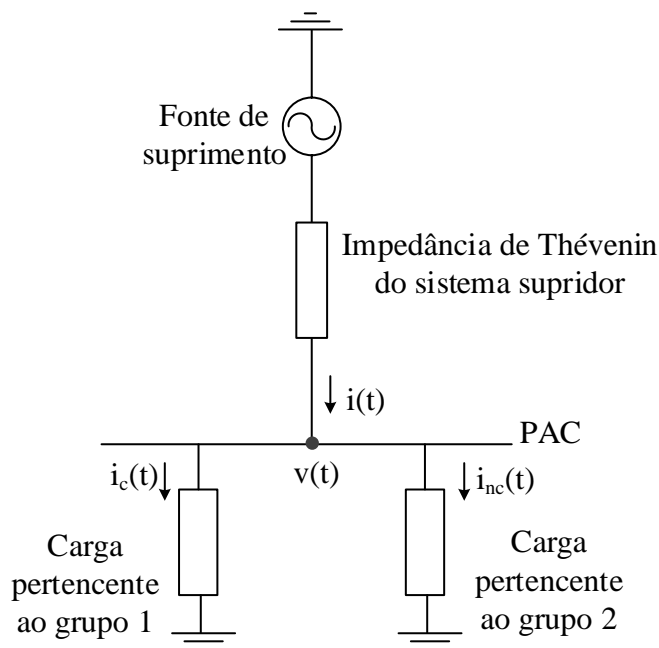


Figura 2.1 – Composição simplificada de um sistema segundo o método da Corrente Conforme e Não Conforme.

Na figura, observa-se:

$v(t)$ – tensão instantânea presente no PAC;

$i(t)$ – corrente instantânea total presente no PAC;

$i_c(t)$ – parcela da corrente dita conforme, a qual supre as cargas do grupo 1;

$i_{nc}(t)$ – parcela da corrente chamada não conforme, a qual supre as cargas do grupo 2.

A análise da Figura 2.1 permite constatar que a adição das parcelas conforme e não conforme resulta na corrente total presente no PAC, como indica a equação (2.2).

$$i(t) = i_c(t) + i_{nc}(t) \quad (2.2)$$

Alternativamente, pode-se reescrever a equação (2.2) utilizando o domínio da frequência. Nesse sentido, para qualquer frequência genérica (ω) presente no sistema, pode-se estabelecer a relação indicada pela equação (2.3).

$$\dot{I}(\omega) = \dot{I}_c(\omega) + \dot{I}_{nc}(\omega) \quad (2.3)$$

Particularizando a análise da equação (2.3) para a frequência fundamental, constata-se que nesse caso a corrente total é igual à corrente conforme, como evidencia (2.4), uma vez que as cargas do grupo 2 não geram potência ativa fundamental. A partir dessa constatação, pode-se reescrever a equação (2.3), para a frequência fundamental, como é mostrado em (2.5).

$$\dot{I}_{nc}(\omega_1) = 0 \quad (2.4)$$

$$\dot{I}(\omega_1) = \dot{I}_c(\omega_1) \quad (2.5)$$

Dando sequência aos desenvolvimentos, a metodologia sugere como hipótese simplificadora que a relação entre a tensão de qualquer frequência harmônica e sua respectiva corrente é dada por uma impedância constante. A partir de tal consideração, é possível obter a parcela de corrente determinada como conforme, como indica a equação (2.6).

$$\dot{I}_c(\omega) = y \cdot \dot{V}(\omega) \quad (2.6)$$

Onde:

y = constante complexa que expressa a admitância referente a todas as frequências harmônicas.

Considerando a análise de (2.6) para a frequência fundamental e substituindo-a em (2.5), obtém-se a equação (2.7), a qual fornece o valor da constante y .

$$y = \frac{\dot{I}(\omega_1)}{\dot{V}(\omega_1)} \quad (2.7)$$

Uma vez que o método sugere como premissa que o valor de y é o mesmo para qualquer frequência, inserindo a constante obtida de (2.7) na equação (2.6), tem-se então a expressão genérica para a corrente conforme, válida para qualquer ordem harmônica, a qual é mostrada em (2.8).

$$\dot{I}_c(\omega) = \frac{\dot{I}(\omega_1)}{\dot{V}(\omega_1)} \cdot \dot{V}(\omega) \quad (2.8)$$

Por fim, observando a equação (2.3), constata-se que de posse do valor da corrente total no PAC e da parcela correspondente à parte conforme, torna-se possível obter a parcela da corrente não conforme, como exhibe (2.9).

$$\dot{I}_{nc}(\omega) = \dot{I}(\omega) - \frac{\dot{I}(\omega_1)}{\dot{V}(\omega_1)} \cdot \dot{V}(\omega) \quad (2.9)$$

Após serem encontradas as parcelas de correntes conforme e não conforme que compõem a corrente total do ponto de acoplamento comum, a metodologia preconiza que as parcelas de contribuição às distorções harmônicas por parte do sistema supridor e do consumidor estão associadas com a proporção existente entre os módulos das parcelas de corrente conforme e não conforme.

O método da Corrente Conforme e Não Conforme gerou certames no cenário científico, uma vez que ele se embasa em princípios questionáveis sob o ponto de vista da solução de circuitos, quando considera a impedância de determinada instalação constante para qualquer frequência. Assim, ao avaliar o desempenho de sua aplicação, alguns trabalhos [21, 22] atestaram a presença de fortes discordâncias entre o que era

esperado e os resultados proporcionados pela aplicação da metodologia. Tal fato torna claro que o procedimento não se mostra adequado para o fim almejado.

2.4 MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO

Com vistas ao compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas, o método da Superposição [23, 24] lança mão de um clássico conceito associado à resolução de circuitos elétricos. Pode-se adiantar, nesse sentido, que a fundamentação da proposta possui sólida consistência, apresentando-se como uma proposição promissora de acordo com o estado da arte atual.

Com o intuito de sintetizar visualmente a problemática do compartilhamento em determinado ponto de acoplamento comum, a Figura 2.2 exibe uma unidade consumidora que apresenta cargas de caráter linear e não linear, e um sistema supridor que pode fornecer ao consumidor uma tensão com padrão já pré-distorcido.

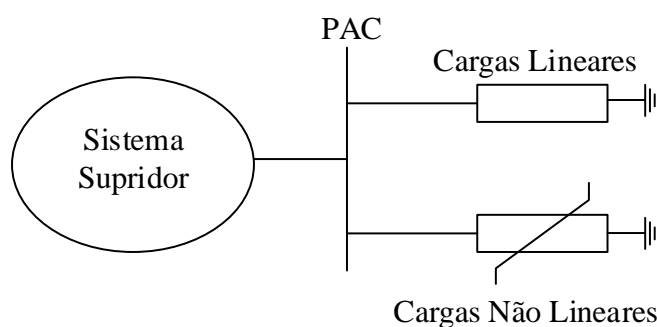


Figura 2.2 – Arranjo elétrico sintetizando um ponto de acoplamento entre a concessionária e um consumidor que contém cargas lineares e não lineares.

Tendo como foco principal de análise um ponto de acoplamento entre o equivalente do sistema supridor e uma determinada unidade consumidora, pode-se representar o arranjo, para uma determinada frequência de ordem h , pelo seu equivalente de Norton, como exibe a Figura 2.3.

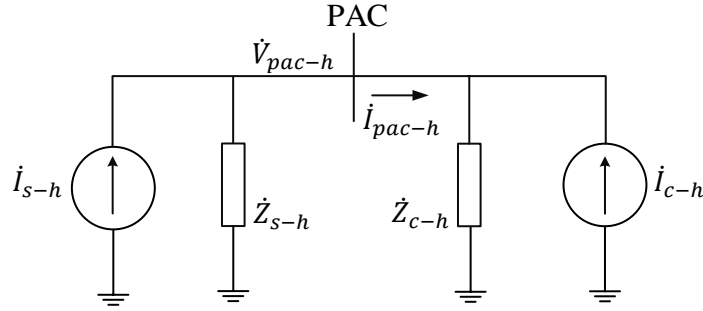


Figura 2.3 – Circuito equivalente de Norton evidenciando as partes envolvidas na problemática.

Na figura, tem-se:

i_{s-h} – fonte representativa da corrente harmônica de ordem h gerada pelas cargas não lineares conectadas ao sistema supridor;

i_{c-h} – fonte representativa da corrente harmônica de ordem h gerada pelas cargas não lineares conectadas ao consumidor;

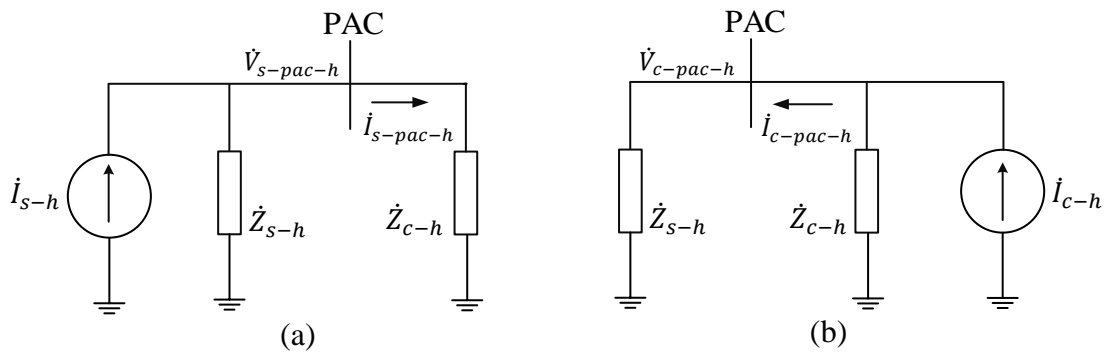
Z_{s-h} – impedância harmônica de ordem h do sistema supridor;

Z_{c-h} – impedância harmônica de ordem h do consumidor;

V_{pac-h} – tensão harmônica de ordem h medida no ponto de acoplamento;

i_{pac-h} – corrente harmônica de ordem h medida no ponto de acoplamento.

A partir do arranjo anteriormente exibido, a metodologia sugere que seja aplicado o princípio da superposição de circuitos elétricos, sendo possível, dessa forma, definir a contribuição individual de cada uma das fontes de harmônicos nas distorções constatadas no PAC, conforme indicam as Figuras 2.4 (a) e (b).



Figuras 2.4 – Circuito equivalente de Norton considerando a contribuição: (a) apenas do sistema supridor; (b) apenas do consumidor.

Na figura anterior, observa-se:

$\dot{I}_{s-pac-h}$ e $\dot{I}_{c-pac-h}$ – contribuição, respectivamente, da concessionária e do consumidor para a corrente harmônica total de ordem h no PAC (\dot{I}_{pac-h});

$\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$ – contribuição, respectivamente, da concessionária e do consumidor para a tensão harmônica total de ordem h no PAC (\dot{V}_{pac-h}).

É oportuno salientar que, não obstante ao fato de a superposição ser uma clássica técnica de aplicação restrita a circuitos de característica linear, a metodologia aponta que o procedimento deve ser aplicado separadamente a cada frequência envolvida no processo, ou seja, deve-se elaborar e analisar um circuito equivalente para cada harmônica. Dessa forma, garante-se que não haverá superposição de efeitos de uma frequência sobre outra.

A seguir são sumarizados os procedimentos necessários à aplicação da superposição de tensões e de correntes no ponto de acoplamento comum. Cabe ressaltar que apesar da sólida consistência da metodologia da Superposição para o compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções, seu emprego prático é dificultado diante da carência alguns dados necessários à realização dos cálculos, como os valores de impedância harmônica do sistema supridor e, principalmente, do consumidor.

2.4.1 Superposição de Correntes

Para aplicar o procedimento que visa à superposição de correntes, deve-se primeiramente encontrar as correntes harmônicas geradas por cada uma das fontes representativas das cargas não lineares presentes nos circuitos do supridor e do

consumidor, as quais foram respectivamente nomeadas de \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} na Figura 2.3.

Tais correntes podem ser obtidas a partir da aplicação das equações (2.10) e (2.11).

$$\dot{I}_{s-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{s-h}} + \dot{I}_{pac-h} \quad (2.10)$$

$$\dot{I}_{c-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{c-h}} - \dot{I}_{pac-h} \quad (2.11)$$

A partir da definição das correntes representativas das fontes de harmônicos dos lados correspondentes ao sistema supridor e consumidor, é possível, então, por meio da análise dos circuitos exibidos nas Figuras 2.4 (a) e (b), obter as contribuições na corrente harmônica total no PAC de cada uma das partes envolvidas. As equações (2.12) e (2.13) permitem calcular tais contribuições.

$$\dot{I}_{s-pac-h} = \frac{\dot{Z}_{s-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{c-h}} \cdot \dot{I}_{s-h} \quad (2.12)$$

$$\dot{I}_{c-pac-h} = \frac{\dot{Z}_{c-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{c-h}} \cdot \dot{I}_{c-h} \quad (2.13)$$

Portanto, a corrente total no PAC pode ser obtida conforme indica (2.14).

$$\dot{I}_{pac-h} = \dot{I}_{s-pac-h} + (-\dot{I}_{c-pac-h}) \quad (2.14)$$

Por fim, para a definição das parcelas de responsabilidades propriamente ditas, procede-se à realização da projeção dos fasores representativos das contribuições individuais de corrente ($\dot{I}_{s-pac-h}$ e $-\dot{I}_{c-pac-h}$) sobre o fasor da corrente total presente no PAC (\dot{I}_{pac-h}). Esse procedimento é evidenciado na Figura 2.5.

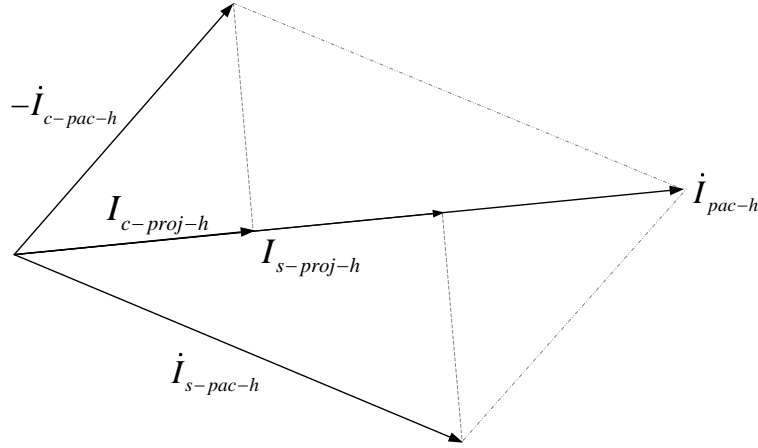


Figura 2.5 – Projeção de fasores sobre a corrente total no PAC para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas.

Na figura, observa-se:

$I_{s-proj-h}$ – projeção de $\dot{I}_{s-pac-h}$ sobre \dot{I}_{pac-h} , a qual define a parcela de contribuição advinda do sistema supridor;

$I_{c-proj-h}$ – projeção de $-\dot{I}_{c-pac-h}$ sobre \dot{I}_{pac-h} , a qual define a parcela de contribuição advinda do consumidor.

2.4.2 Superposição de Tensões

O processo de superposição de tensões segue modelo análogo à superposição de correntes. O primeiro passo refere-se, da mesma forma que no procedimento anterior, à realização dos cálculos necessários para a definição das correntes representativas das fontes de distorção (\dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h}), por meio das equações (2.10) e (2.11).

A partir desse ponto, as contribuições individuais do sistema supridor e consumidor na tensão total do ponto de acoplamento podem ser obtidas, respectivamente, pelas equações (2.15) e (2.16).

$$\dot{V}_{s-pac-h} = \frac{\dot{Z}_{s-h} \cdot \dot{Z}_{c-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{c-h}} \cdot \dot{I}_{s-h} \quad (2.15)$$

$$\dot{V}_{c-pac-h} = \frac{\dot{Z}_{s-h} \cdot \dot{Z}_{c-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{c-h}} \cdot \dot{I}_{c-h} \quad (2.16)$$

Nesse sentido, a tensão harmônica no PAC é formada a partir da soma fasorial das contribuições individuais das partes, conforme indica a equação (2.17).

$$\dot{V}_{pac-h} = \dot{V}_{s-pac-h} + \dot{V}_{c-pac-h} \quad (2.17)$$

Para encontrar as parcelas de responsabilidades sobre as distorções harmônicas, deve-se realizar a superposição das contribuições individuais ($\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$) sobre a tensão total no PAC (\dot{V}_{pac-h}). Para elucidar o procedimento, a Figura 2.6 exibe a decomposição da tensão no ponto de acoplamento em dois escalares obtidos das projeções.

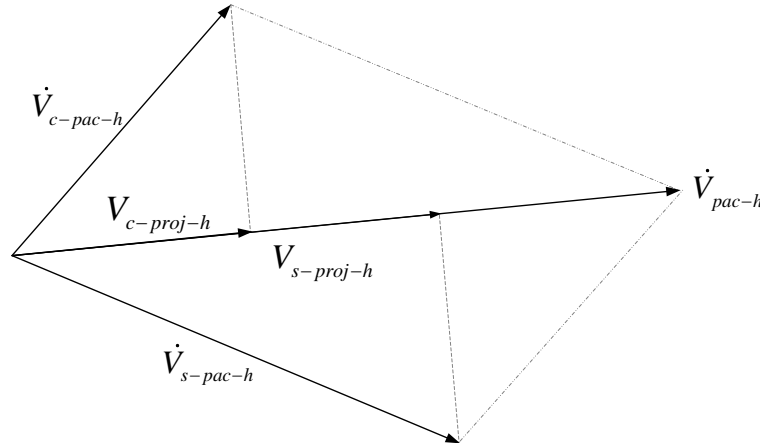


Figura 2.6 – Projeção de fasores sobre a tensão total no PAC para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas.

Na figura, observa-se:

$V_{s-proj-h}$ – projeção de $\dot{V}_{s-pac-h}$ sobre \dot{V}_{pac-h} , que define a parcela de contribuição advinda do sistema supridor;

$V_{c-proj-h}$ – projeção de $\dot{V}_{c-pac-h}$ sobre \dot{V}_{pac-h} , que define a parcela de contribuição advinda do consumidor.

2.5 MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO MODIFICADO

O método da Superposição Modificado [34, 35] apresenta-se como uma proposta que objetiva, essencialmente, contornar as limitações sofridas pelo método da Superposição relacionadas à carência de dados sobre as impedâncias harmônicas dos arranjos elétricos analisados. Isso é conseguido a partir da utilização de uma impedância harmônica dominante no ponto de acoplamento comum.

Com vistas ao compartilhamento de responsabilidades sobre as tensões harmônicas, com o auxílio das equações (2.15) e (2.16), nota-se que a contribuição dos agentes envolvidos depende exclusivamente dos valores de \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} . Assim sendo, para se conhecer as parcelas de responsabilidade do sistema supridor e do consumidor, basta conhecer tais correntes, ou a proporcionalidade entre ambas.

Seguindo esse raciocínio, a metodologia sugere que seja instalado, no ponto de acoplamento, um filtro que apresente uma baixa impedância para a frequência de interesse ao compartilhamento de responsabilidades. A Figura 2.7 mostra o arranjo representativo do princípio do método da Superposição Modificado.

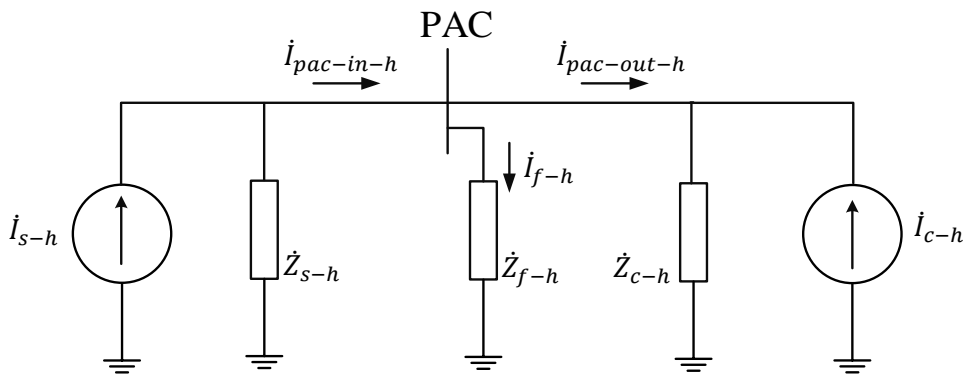


Figura 2.7 – Arranjo elétrico representativo do método da Superposição Modificado.

Na figura, observa-se:

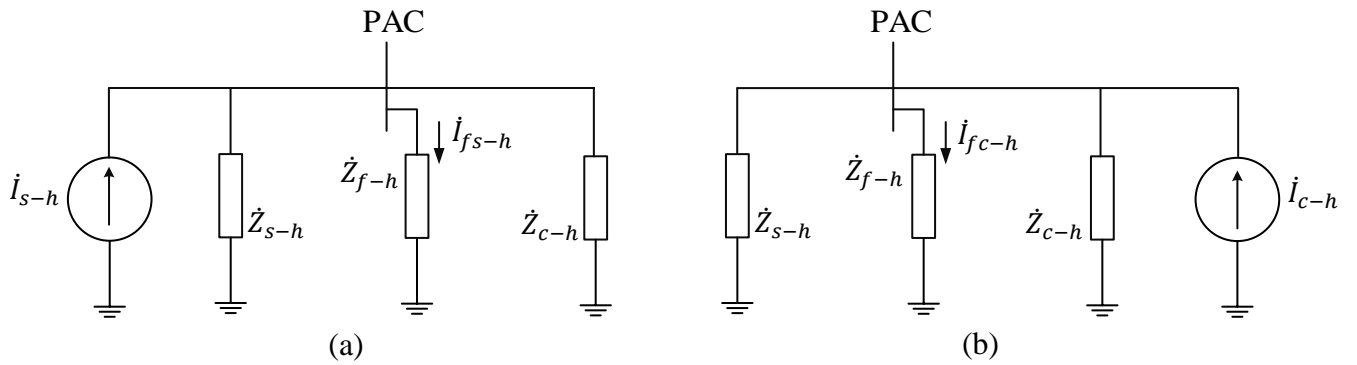
\dot{Z}_{f-h} – impedância harmônica de ordem h do filtro;

\dot{I}_{f-h} – corrente harmônica de ordem h no filtro;

$\dot{I}_{pac-in-h}$ – corrente harmônica de ordem h à montante do PAC;

$\dot{I}_{pac-out-h}$ – corrente harmônica de ordem h à jusante do PAC.

Aplicando o princípio da superposição ao sistema representado na Figura 2.7, obtêm-se as Figuras 2.8 (a) e (b).



Figuras 2.8 – Circuito equivalente de Norton com a impedância dominante considerando a contribuição: (a) apenas do sistema supridor; (b) e apenas do consumidor.

Onde se observa:

\dot{I}_{fs-h} – contribuição do sistema supridor para a corrente total de ordem h no filtro (\dot{I}_{f-h});

\dot{I}_{fc-h} – contribuição do consumidor para a corrente total de ordem h no filtro (\dot{I}_{f-h}).

Uma vez que a impedância \dot{Z}_{f-h} tem caráter predominante sobre as demais, ou seja, apresenta valor significativamente inferior ao valor das impedâncias harmônicas do sistema supridor e do consumidor, pode-se considerar que a corrente \dot{I}_{fs-h} é praticamente igual a \dot{I}_{s-h} e, mais ainda, a corrente \dot{I}_{fc-h} é praticamente igual a \dot{I}_{c-h} . Assim, a corrente total no filtro pode ser escrita como indica (2.18).

$$\dot{I}_{f-h} = \dot{I}_{fs-h} + \dot{I}_{fc-h} = \dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h} = \dot{I}_{pac-in-h} - \dot{I}_{pac-out-h} \quad (2.18)$$

Objetivando o emprego da metodologia para definição dos percentuais de responsabilidades cabidos às partes envolvidas, o passo final refere-se à realização das projeções dos fasores \dot{I}_{fs-h} e \dot{I}_{fc-h} sobre o fasor da corrente total no filtro (\dot{I}_{f-h}), como evidenciado na Figura 2.9.

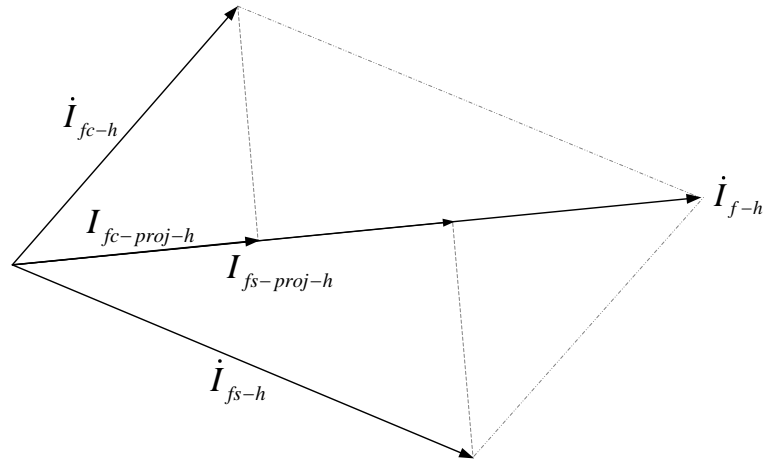


Figura 2.9 – Projeção de fasores sobre a corrente total no filtro para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas.

Na figura tem-se:

$I_{fs-proj-h}$ – projeção de \dot{I}_{fs-h} sobre \dot{I}_{f-h} , a qual define a parcela de contribuição advinda do sistema supridor;

$I_{fc-proj-h}$ – projeção de \dot{I}_{fc-h} sobre \dot{I}_{f-h} , a qual define a parcela de contribuição advinda do consumidor.

Vale ressaltar, por fim, que apesar de o procedimento descrito prezar pelo manuseamento de grandezas relacionadas a valores de correntes, conforme anteriormente abordado, as contribuições encontradas estão em consonância com estratégia clássica de superposição de tensões. Não obstante à sólida fundamentação da metodologia, o seu emprego em situações reais é dificultado pela necessidade de dispor de uma impedância dominante para conexão no PAC para cada ordem harmônica analisada.

2.6 MÉTODO DA ANÁLISE DO ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS

O Método aqui intitulado de Análise do Espectro de Frequências [36, 37] apresenta-se como uma proposta recentemente publicada e que, portanto, ainda não foi alvo de avaliações mais detalhadas. Essa metodologia se compromete em definir as parcelas de responsabilidade sobre as distorções harmônicas de maneira bastante prática e se apresenta, à primeira vista, com características atrativas quanto à simplicidade das técnicas empregadas para trabalhos de campo.

O procedimento aponta, como ponto inicial, que uma carga com teor puramente resistivo pode ser considerada como uma carga ideal não poluidora, uma vez que, nesse caso, as formas de onda da tensão e da corrente são idênticas.

Seguindo este raciocínio, em termos de atribuição de responsabilidades sobre as distorções harmônicas, torna-se evidente que se as formas de onda da tensão e da corrente no PAC forem idênticas, a responsabilidade pelas eventuais distorções constatadas é exclusivamente do sistema supridor. Por outro lado, se tais formas de onda forem distintas entre si, como ocorre na maioria dos casos reais, existem três possibilidades, quais sejam:

- As distorções serem causadas exclusivamente pelo consumidor;
- As distorções serem causadas exclusivamente pelo supridor e as alterações entre as formas de onda de tensão e corrente surgirem devido à presença de elementos reativos na carga;

- Tanto o lado supridor quanto o lado consumidor terem responsabilidades sobre as distorções harmônicas presentes no PAC.

A metodologia estabelece, em um primeiro momento, que as formas de onda de tensão, $v_{pac}(t)$, e corrente, $i_{pac}(t)$, sejam normalizadas e decompostas em série de Fourier. Este processo pode ser realizado conforme procedimento exibido na Figura 2.10, como sugerido em [36].

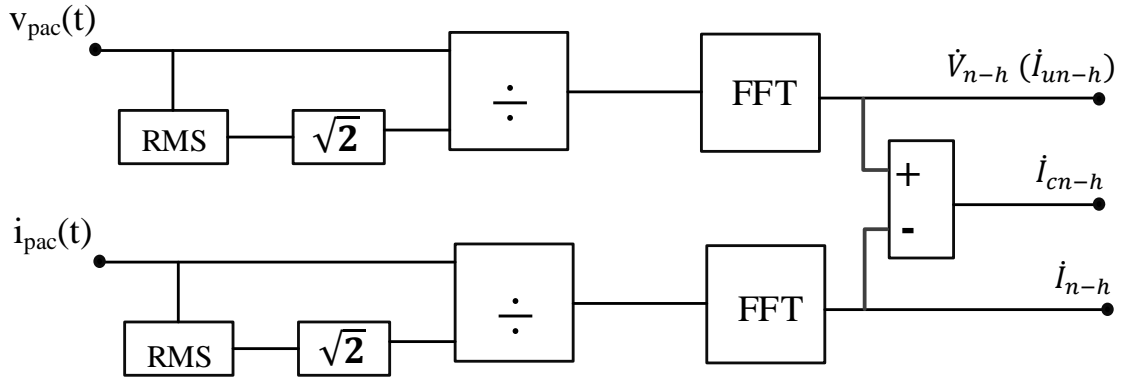


Figura 2.10 – Diagrama de blocos da primeira etapa de aplicação da metodologia da Análise do Espectro de Frequências.

O procedimento supra-apresentado ilustra a obtenção das grandezas \dot{I}_{n-h} e \dot{V}_{n-h} , as quais são, respectivamente, a corrente e a tensão normalizadas no PAC para dada ordem harmônica h . A tensão \dot{V}_{n-h} , uma vez normalizada, passa a ser denominada por \dot{I}_{un-h} . Nestas circunstâncias, a partir desse ponto, torna-se possível obter a grandeza denominada \dot{I}_{cn-h} , a qual representa a diferença entre os fasores \dot{I}_{n-h} e \dot{I}_{un-h} , conforme é indicado na equação (2.19). O método afirma que tal diferença é nula apenas para o caso em que a carga é puramente resistiva e, por consequência, \dot{I}_{cn-h} representa a corrente no PAC procedente da contribuição do sistema consumidor [36].

$$\dot{I}_{cn-h} = \dot{I}_{n-h} - \dot{I}_{un-h} \quad (2.19)$$

A partir da obtenção dos fasores \dot{I}_{un-h} , \dot{I}_{n-h} e \dot{I}_{cn-h} , o método articula que as contribuições do supridor ($I_{s-contr-h}$) e do consumidor ($I_{c-contr-h}$) podem ser determinadas a partir de (2.20) e (2.21), respectivamente.

$$I_{s-contr-h} = |\dot{I}_{un-h}| \cdot \cos \alpha \quad (2.20)$$

$$I_{c-contr-h} = |\dot{I}_{cn-h}| \cdot \cos \beta \quad (2.21)$$

Onde:

α = ângulo entre os fasores \dot{I}_{un-h} e \dot{I}_{n-h} ;

β = ângulo entre os fasores \dot{I}_{cn-h} e \dot{I}_{n-h} .

Para melhor elucidar a filosofia da metodologia, na Figura 2.11 são mostrados os fasores e ângulos envolvidos no procedimento.

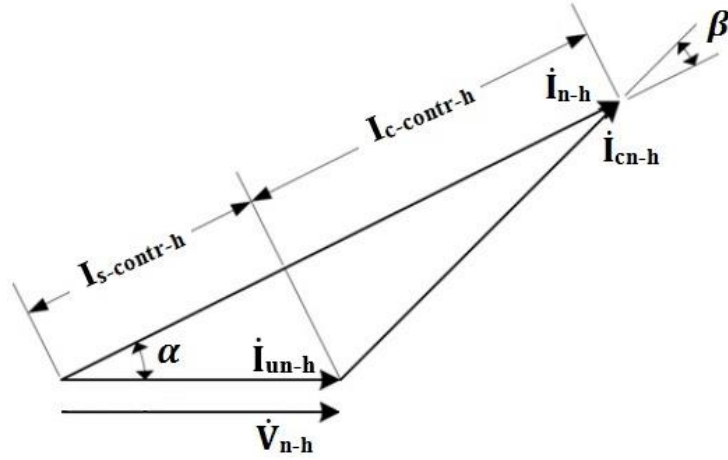


Figura 2.11 – Projeção de fasores sobre a corrente total normalizada no PAC para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas.

Na figura tem-se:

$I_{s-contr-h}$ – projeção de \dot{I}_{un-h} sobre \dot{I}_{n-h} , a qual define a parcela de contribuição advinda do sistema supridor;

$I_{c-contr-h}$ – projeção de \dot{I}_{cn-h} sobre \dot{I}_{n-h} , a qual define a parcela de contribuição advinda do consumidor.

Avaliações preliminares de desempenho da metodologia da Análise do Espectro de Frequências [37] indicaram inconsistências que podem estar associadas às considerações teóricas do método, que partem do princípio de o consumidor possuir teor puramente resistivo. Tal caracterização se distancia da realidade dos sistemas elétricos que em sua maioria contam com a presença de cargas compostas por elementos resistivos e reativos.

CAPÍTULO III

ANÁLISE DE DESEMPENHO DAS METODOLOGIAS DESTINADAS AO COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Conforme discutido no capítulo anterior, as metodologias existentes para o compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas esbarram, muitas vezes, em questões que, de alguma forma, dificultam o seu emprego prático de maneira confiável e utilitária. Tais aspectos estão relacionados, sobretudo, a fragilidades inerentes aos princípios físicos sobre os quais as metodologias se sustentam ou, por outro lado, a dificuldades de aplicabilidade em campo.

Dessa maneira, apesar de diversos trabalhos, a exemplo de [18, 21, 22, 37], já terem reunido esforços no sentido de avaliar criticamente o desempenho dos métodos abordados no capítulo II, considera-se importante nesse ponto sintetizar os resultados fornecidos pela avaliação computacional de cada um deles, quando aplicados em um mesmo sistema elétrico utilizado como teste. Tal decisão é apoiada no fato que as

inconsistências constatadas até o momento foram extraídas de estudos realizados em circuitos elétricos bastante simplificados e distintos daqueles encontrados em complexos industriais típicos, nos quais a presença de transformadores abaixadores exerce grandes influências sobre as impedâncias equivalentes.

Com este foco, o presente capítulo preza, em um primeiro momento, pela apresentação do arranjo elétrico teste, o qual possui características consoantes a instalações reais. Em seguida, levando em consideração diferentes condições operacionais do complexo elétrico em análise, são evidenciados os resultados obtidos a partir da aplicação dos métodos e as conclusões sobre o desempenho dos mesmos.

3.2 SISTEMA ELÉTRICO UTILIZADO COMO TESTE

Dada a natureza das investigações realizadas, é utilizado um arranjo elétrico que reúne os atributos essenciais de simplicidade e verossimilhança com as características de um sistema real. Dessa forma, a problemática do compartilhamento de responsabilidades é explorada num ponto de acoplamento comum entre um sistema supridor e uma unidade consumidora industrial.

Com relação ao sistema supridor, este é resumidamente denotado por uma fonte de tensão em série com uma impedância representativa do nível de curto-circuito do sistema. A fonte utilizada é responsável, evidentemente, pelo suprimento de tensão de frequência fundamental e também, caso seja feita a opção por um suprimento previamente distorcido, que a esta sejam impostas componentes de frequências harmônicas, a fim de simbolizar padrões típicos de distorções na rede da concessionária. Já a unidade consumidora possui cargas lineares resistivas e indutivas, além de um banco de capacitores para correção do fator de potência. São usadas, ainda, fontes de

corrente harmônica com o intuito de sinalizar a presença de cargas não lineares no complexo industrial. A Figura 3.1 exibe a modelagem do sistema no software ATP (*Alternative Transients Program*), o qual é utilizado para a realização das simulações computacionais.

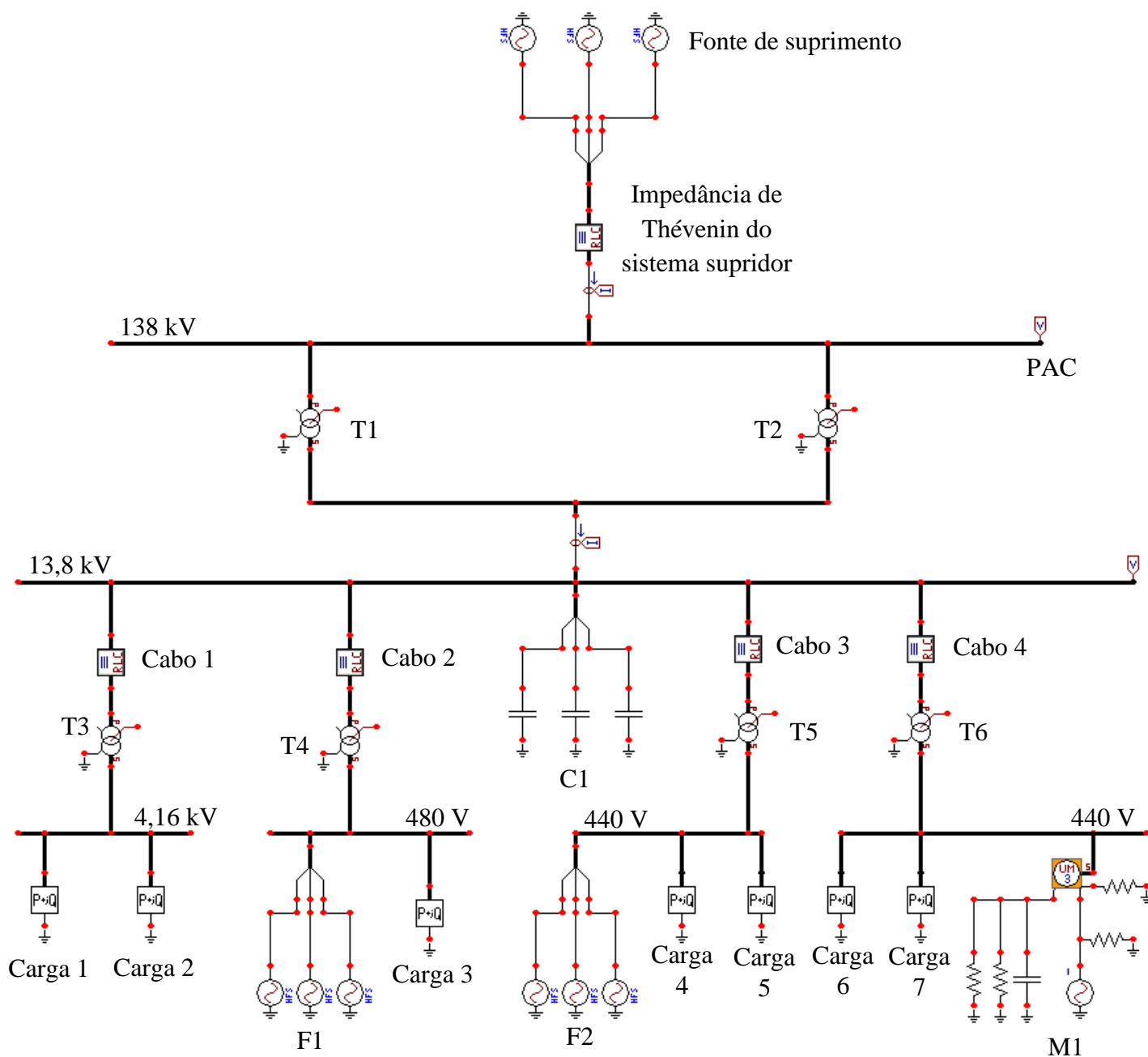


Figura 3.1 – Modelagem do sistema simulado no software ATP.

As informações necessárias para a parametrização do circuito apresentado, no que tange aos dados da concessionária, dos transformadores, do banco de capacitores, dos cabos e das cargas são apresentadas nas Tabelas 3.1 a 3.6.

Tabela 3.1 – Sistema supridor.

Potência de Curto-circuito [MVA]	Tensão Nominal [kV]	Frequência [Hz]
500	138	60

Tabela 3.2 – Transformadores.

Transformador	Potência Nominal [MVA]	Tensão do Primário [kV]	Tensão do Secundário [kV]	Resistência Percentual	Reatância Percentual	Conexão
T1	7,5	138	13,8	1	6	Delta-Estrela Aterrada
T2	7,5	138	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 3.3 – Banco de capacitores.

Banco de Capacitores	Q[MVAr]	Tensão Nominal [kV]
C1	1,5	13,8

Tabela 3.4 – Cabos.

Cabo	Classe de Tensão [kV]	Comprimento [km]	Bitola [mm ²]	Corrente Nominal [A]	Resistência [Ω/km]	Reatância [Ω/km]
Cabo 1	13,8	1,5	25	129	0,971	0,158
Cabo 2	13,8	1,0	25	129	0,971	0,158
Cabo 3	13,8	2,0	25	129	0,971	0,158
Cabo 4	13,8	0,8	25	129	0,971	0,158

Tabela 3.5 – 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 3.6 – Motor de indução.

Motor	Potência [cv]	Tensão Nominal [kV]	Rendimento [%]	Inércia [kg.m ²]	Fator de Potência	Escorregamento
M1	150	0,44	89	7,728	0,85	0,015

As simulações realizadas compreendem três condições de operação distintas do sistema elétrico em questão, as quais são brevemente descritas a seguir:

- **Condição de Operação I:**

Nesse caso, ao arranjo elétrico é aplicada uma tensão de suprimento puramente senoidal e a unidade consumidora é modelada de forma a conter cargas lineares e não lineares. Para isso, as fontes de corrente harmônica que representam a não linearidade presente no complexo industrial são parametrizadas conforme mostra a Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Dados relativos às fontes de corrente utilizadas na condição operacional I.

Fonte de Corrente	Corrente de 5 ^a Ordem Harmônica [A]	Corrente de 7 ^a Ordem Harmônica [A]	Corrente de 11 ^a Ordem Harmônica [A]	Corrente de 13 ^a Ordem Harmônica [A]
F1	1446,03∠-12,35°	963,36∠-123,15°	410,69∠118,10°	404,25∠-50,40°
F2	1035,49∠-0,60°	857,72∠-109,81°	382,69∠152,79°	362,32∠-29,50°

A Tabela 3.8 apresenta os valores eficazes das tensões e correntes harmônicas de fase obtidas no PAC para essa situação, bem como os níveis de distorções harmônicas individuais de tensão (DIT_h) e corrente (DII_h) para cada frequência envolvida no estudo.

Tabela 3.8 – Grandezas obtidas no PAC para a condição operacional I.

Ordem Harmônica	Tensão fase-neutro		Corrente	
	[V]	DIT _h [%]	[A]	DII _h [%]
1 ^a	79331,0∠-0,81°	-	29,96∠-17,64°	-
5 ^a	1704,7∠115,01°	2,15	8,95∠-155,14°	29,86
7 ^a	2051,7∠-128,91°	2,59	7,69∠-38,86°	25,66
11 ^a	2449,1∠-179,49°	3,09	5,84∠-89,51°	19,50
13 ^a	1993,3∠-150,9°	2,51	4,02∠-60,89°	13,43

Vale ressaltar que nessa condição a distorção harmônica total de tensão (DTT) no ponto de acoplamento alcança o valor de 5,21% e, devido às condições impostas, toda a responsabilidade sobre tal distorção cabe ao consumidor.

- **Condição de Operação II:**

Essa condição é caracterizada pelo fato de o consumidor conter exclusivamente cargas lineares, enquanto o supridor fornece uma tensão de suprimento com padrão de distorção pré-definido. Para efeito de simulação, são portanto adicionadas componentes harmônicas à tensão de frequência fundamental da fonte supridora do sistema, como indica a Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Dados relativos à fonte supridora utilizada na condição operacional II.

Ordem Harmônica	Tensão fase-fase [V]
1 ^a	138000,00∠0°
5 ^a	2969,85∠142°
7 ^a	2545,58∠201°
11 ^a	1354,11∠58°
13 ^a	743,17∠-9°

As tensões e correntes de fase e as distorções harmônicas individuais obtidas no ponto de acoplamento são exibidas na Tabela 3.10. Nesse caso, a distorção total de tensão no PAC assume o valor de 5,80%.

Tabela 3.10 – Grandezas obtidas no PAC para a condição operacional II.

Ordem Harmônica	Tensão fase-neutro		Corrente	
	[V]	DIT _h [%]	[A]	DII _h [%]
1 ^a	79331,0∠-0,8°	-	29,96∠-17,64°	-
5 ^a	3116,7∠137,37°	3,93	1,48∠170,12°	4,94
7 ^a	2852,8∠-167,60°	3,60	1,88∠-125,85°	6,26
11 ^a	1764,2∠14,99°	2,22	2,86∠54,96°	9,55
13 ^a	472,75∠-77,11°	0,60	1,44∠-61,56°	4,80

Nessa condição de operação destaca-se que, devido às condições impostas, toda a distorção encontrada é de responsabilidade do sistema supridor.

- **Condição de Operação III:**

A condição de operação III se caracteriza pela aplicação de uma tensão de suprimento com padrão de distorção pré-definido, com o consumidor contendo cargas lineares e não lineares. Assim, são impostos, simultaneamente, os distúrbios presentes nas condições I e II. As tensões e correntes de fase encontradas no PAC nessa situação e as distorções harmônicas individuais associadas a essas grandezas são mostrados na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Grandezas obtidas no PAC para a condição operacional III.

Ordem Harmônica	Tensão fase-neutro		Corrente	
	[V]	DIT _h [%]	[A]	DII _h [%]
1 ^a	79331,0∠-0,81°	-	29,96∠-17,65°	-
5 ^a	4734,9∠129,46°	5,97	10,20∠-159,87°	34,02
7 ^a	4632,5∠-151,52°	5,84	8,01∠-52,37°	26,73
11 ^a	860,6∠149,67°	1,08	3,89∠-64,16°	12,97
13 ^a	2172,0∠-138,81°	2,74	5,46∠-61,06°	18,23

A distorção total de tensão no ponto de acoplamento alcança, na presente situação, valores próximos de 8,85% e a responsabilidade sobre tal distorção é compartilhada entre as partes envolvidas. Faz-se oportuno adiantar, nesse ponto, que os valores fornecidos pelo método da Superposição são tomados como referência para a análise de consistência dos resultados fornecidos pelas demais metodologias, como é elucidado no item 3.4.

3.3 APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS AO SISTEMA TESTE

Uma vez apresentado o sistema utilizado como base para os testes, procede-se, na sequência, à aplicação das metodologias destinadas ao compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas. É importante ressaltar que os subitens seguintes enfatizam tão somente os resultados fornecidos a partir da aplicação dos métodos, sem qualquer análise sobre a coerência ou não dos valores encontrados. As considerações sobre o desempenho dos procedimentos e dos casos investigados são realizadas ao final do capítulo.

3.3.1 Aplicação do Método do Fluxo de Potência Harmônica

Para análise da metodologia do Fluxo de Potência Harmônica são levadas em consideração as condições operativas I, II e III. Os resultados encontrados para cada um dos casos apresentam-se sintetizados, respectivamente, nas Tabelas 3.12, 3.13 e 3.14.

Tabela 3.12 – Resultados da aplicação do método do Fluxo de Potência Harmônica para a condição operacional I.

Ordem Harmônica	Ângulo entre Tensão e Corrente	Potência Harmônica [kW]	Responsabilidade Majoritária sobre as Distorções
1 ^a	16,83°	2275,06	-
5 ^a	-89,85°	0,04	Supridor
7 ^a	-90,05°	-0,02	Consumidor
11 ^a	-89,98°	0,004	Supridor
13 ^a	-90,01°	-0,001	Consumidor

Tabela 3.13 – Resultados da aplicação do método do Fluxo de Potência Harmônica para a condição operacional II.

Ordem Harmônica	Ângulo entre Tensão e Corrente	Potência Harmônica [kW]	Responsabilidade Majoritária sobre as Distorções
1 ^a	16,83°	2275,21	-
5 ^a	-32,75°	3,88	Supridor
7 ^a	-41,75°	3,99	Supridor
11 ^a	-39,97°	3,87	Supridor
13 ^a	-15,55°	0,66	Supridor

Tabela 3.14 – Resultados da aplicação do método do Fluxo de Potência Harmônica para a condição operacional III.

Ordem Harmônica	Ângulo entre Tensão e Corrente	Potência Harmônica [kW]	Responsabilidade Majoritária sobre as Distorções
1 ^a	16,84°	2275,25	-
5 ^a	-70,67°	15,98	Supridor
7 ^a	-99,15°	-5,90	Consumidor
11 ^a	-146,17°	-2,78	Consumidor
13 ^a	-77,75°	2,52	Supridor

3.3.2 Aplicação do Método da Corrente Conforme e Não Conforme

Na sequência, as Tabelas 3.15, 3.16 e 3.17 apresentam as respostas obtidas para o compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas a partir da aplicação do procedimento conhecido como Corrente Conforme e Não Conforme.

Tabela 3.15 – Resultados da aplicação do método da Corrente Conforme e Não Conforme para a condição operacional I.

Ordem Harmônica	Corrente Conforme [A]	Corrente Não Conforme [A]	Responsabilidade Supridor [%]	Responsabilidade Consumidor [%]
1 ^a	29,96∠-17,65°	0∠0°	-	-
5 ^a	0,64∠98,18°	9,15∠-151,28°	6,57	93,43
7 ^a	0,77∠-145,74°	7,95∠-33,50°	8,88	91,12
11 ^a	0,92∠-196,32°	6,17∠-81,26°	13,03	86,97
13 ^a	0,75∠-167,73°	4,30∠-51,25°	14,89	85,11

Tabela 3.16 – Resultados da aplicação do método da Corrente Conforme e Não Conforme para a condição operacional II.

Ordem Harmônica	Corrente Conforme [A]	Corrente Não Conforme [A]	Responsabilidade Supridor [%]	Responsabilidade Consumidor [%]
1 ^a	29,96∠-17,64°	0∠0°	-	-
5 ^a	1,18∠120,54°	1,15∠-138,52°	50,64	49,36
7 ^a	1,08∠-184,43°	1,60∠-90,86°	40,19	59,81
11 ^a	0,67∠-1,84°	2,56∠67,55°	20,67	79,33
13 ^a	0,18∠-93,94°	1,29∠-57,31°	12,15	87,85

Tabela 3.17 – Resultados da aplicação do método da Corrente Conforme e Não Conforme para a condição operacional III.

Ordem Harmônica	Corrente Conforme [A]	Corrente Não Conforme [A]	Responsabilidade Supridor [%]	Responsabilidade Consumidor [%]
1 ^a	29,97∠-17,65°	0∠0°	-	-
5 ^a	1,79∠112,62°	10,27∠-149,85°	14,83	85,17
7 ^a	1,75∠-168,36°	8,91∠-42,21°	16,41	83,59
11 ^a	0,33∠132,83°	4,20∠-62,87°	7,19	92,81
13 ^a	0,82∠-155,65°	5,59∠-52,64°	12,80	87,20

3.3.3 Aplicação do Método da Superposição

Como as impedâncias harmônicas de todo o sistema analisado são facilmente obtidas, é possível aplicar a metodologia da Superposição de maneira segura e fiável. Os valores de tais impedâncias são exibidos na Tabela 3.18 e, em seguida, as Tabelas 3.19, 3.20 e 3.21 compreendem os resultados obtidos a partir da aplicação do procedimento da Superposição de Tensões nas três condições investigadas.

Tabela 3.18 – Impedâncias harmônicas do sistema supridor e consumidor no sistema teste.

Ordem Harmônica	Impedância do Supridor [Ω]	Impedância do Consumidor [Ω]
5 ^a	190,44∠90°	2105,92∠-32,80°
7 ^a	266,61∠90°	1520,08∠-41,76°
11 ^a	418,96∠90°	617,10∠-39,98°
13 ^a	495,14∠90°	328,77∠-15,39°

Tabela 3.19 – Resultados da aplicação do método da Superposição de Tensões para a condição operacional I.

Ordem Harm.	$\dot{V}_{s-pac-h}$ [V]	$\dot{V}_{c-pac-h}$ [V]	$V_{s-proj-h}$ [V]	$V_{c-proj-h}$ [V]	Resp. Supridor [%]	Resp. Consumidor [%]
5 ^a	4,81∠-173,11°	1703,21∠114,86°	1,50	1703,21	0,09	99,91
7 ^a	3,33∠-177,92°	2049,52∠-128,84°	2,18	2049,52	0,11	99,89
11 ^a	2,45∠160,50°	2446,80∠-179,47°	2,31	2446,80	0,09	99,91
13 ^a	0,98∠131,16°	1993,10∠-150,87°	0,20	1993,09	0,01	99,99

Tabela 3.20 – Resultados da aplicação do método da Superposição de Tensões para a condição operacional II.

Ordem Harm.	$\dot{V}_{s-pac-h}$ [V]	$\dot{V}_{c-pac-h}$ [V]	$V_{s-proj-h}$ [V]	$V_{c-proj-h}$ [V]	Resp. Supridor [%]	Resp. Consumidor [%]
5 ^a	3116,95∠137,37°	0,26∠-26,32°	3116,95	-0,25	99,99	0,01
7 ^a	2853,12∠-167,61°	0,44∠-31,48°	2853,12	-0,32	99,99	0,01
11 ^a	1764,43∠15,04°	1,40∠-84,42°	1764,43	-0,23	99,98	0,02
13 ^a	472,13∠-76,97°	1,34∠-139,57°	472,13	0,62	99,87	0,13

Tabela 3.21 – Resultados da aplicação do método da Superposição de Tensões para a condição operacional III.

Ordem Harm.	$\dot{V}_{s-pac-h}$ [V]	$\dot{V}_{c-pac-h}$ [V]	$V_{s-proj-h}$ [V]	$V_{c-proj-h}$ [V]	Resp. Supridor [%]	Resp. Consumidor [%]
5 ^a	3116,34∠137,37°	1703,17∠114,87°	3086,66	1648,24	65,19	34,81
7 ^a	2853,01∠-167,60°	2049,70∠-128,84°	2741,33	1891,17	59,18	40,82
11 ^a	1764,32∠15,02°	2446,98∠-179,47°	-1239,97	2100,58	37,12	62,88
13 ^a	472,32∠-76,98°	1993,00∠-150,87°	222,98	1949,02	10,27	89,73

3.3.4 Aplicação do Método da Superposição Modificado

O método da Superposição Modificado sugere a inserção de uma impedância dominante no ponto de acoplamento, a qual dispensa a necessidade do conhecimento prévio das impedâncias harmônicas das partes envolvidas. É interessante ressaltar, todavia, que a metodologia não define claramente valores ou ordens de grandeza capazes de caracterizar uma impedância como sendo dominante e, assim sendo, essa é

uma questão que exige estudos complementares. A Tabela 3.22 apresenta os parâmetros R (resistência), L (indutância) e C (capacitância) que neste trabalho são conectados em série com o intuito de se obter uma impedância dominante em cada frequência analisada. Em seguida, as Tabelas 3.23, 3.24 e 3.25 exibem os valores encontrados após a aplicação da metodologia nas condições operativas I, II e III.

Tabela 3.22 – Parâmetros R, L e C usados para obtenção da impedância dominante no PAC.

Ordem Harmônica	R [Ω]	L [mH]	C [μ F]
5 ^a	0,1	10,1	27,9
7 ^a	0,1	5,1	28,1
11 ^a	0,1	4,1	14,2
13 ^a	0,1	3,1	13,4

Tabela 3.23 – Resultados da aplicação do método da Superposição Modificado para a condição operacional I.

Ordem Harm.	$\dot{I}_{pac-in-h}$ [A]	$\dot{I}_{pac-out-h}$ [A]	\dot{I}_{f-h} [A]	$I_{fs-proj}$ [A]	$I_{fc-proj}$ [A]	Resp. Supr. [%]	Resp. Cons. [%]
5 ^a	0,016 \angle -120°	8,533 \angle -150,6°	8,519 \angle 29,36°	-0,014	-8,533	0,16	99,84
7 ^a	0,012 \angle -117,1°	6,862 \angle -30,41°	6,862 \angle 149,7°	-0,001	-6,862	0,01	99,99
11 ^a	0,060 \angle 4,42°	4,473 \angle -46,85°	4,482 \angle 133,3°	-0,038	-4,4730	0,83	99,17
13 ^a	0,016 \angle -170,3°	6,317 \angle 6,64°	6,327 \angle -173,4°	0,016	-6,317	0,25	99,75

Tabela 3.24 – Resultados da aplicação do método da Superposição Modificado para a condição operacional II.

Ordem Harm.	$\dot{I}_{pac-in-h}$ [A]	$\dot{I}_{pac-out-h}$ [A]	\dot{I}_{f-h} [A]	$I_{fs-proj}$ [A]	$I_{fc-proj}$ [A]	Resp. Supr. [%]	Resp. Cons. [%]
5 ^a	15,210 \angle 54,19°	0,007 \angle 51,31°	15,200 \angle 54,2°	15,210	0,007	99,95	0,05
7 ^a	9,567 \angle 110,2°	0,004 \angle 0,33°	9,570 \angle 110,3°	9,568	-0,001	99,98	0,02
11 ^a	3,222 \angle -32,5°	0,011 \angle -179,1°	3,231 \angle -32,4°	3,222	-0,009	99,72	0,28
13 ^a	1,505 \angle -99,75°	0,007 \angle -176,1°	1,503 \angle -99,49°	1,505	0,002	99,89	0,11

Tabela 3.25 – Resultados da aplicação do método da Superposição Modificado para a condição operacional III.

Ordem Harm.	$\dot{I}_{pac-in-h}$ [A]	$\dot{I}_{pac-out-h}$ [A]	\dot{I}_{f-h} [A]	$I_{fs-proj}$ [A]	$I_{fc-proj}$ [A]	Resp. Supr. [%]	Resp. Cons. [%]
5 ^a	15,210 \angle 54,21°	8,525 \angle -150,6°	23,220 \angle 45,35°	15,029	-8,197	64,71	35,29
7 ^a	9,567 \angle 110,3°	6,868 \angle -30,38°	15,500 \angle 126,6°	9,182	-6,321	59,23	40,77
11 ^a	3,222 \angle -32,52°	4,474 \angle -46,84°	1,569 \angle 102,6°	-2,283	-3,853	37,21	62,79
13 ^a	1,506 \angle -99,76°	6,317 \angle 6,63°	6,895 \angle -161,3°	0,718	-6,177	10,41	89,59

3.3.5 Aplicação do Método da Análise do Espectro de Frequências

Procedendo-se à aplicação do procedimento denominado Análise do Espectro de Frequências ao sistema teste, na sequência são exibidos os resultados obtidos por meio das Tabelas 3.26 a 3.28.

Tabela 3.26 – Resultados da aplicação do método da Análise do Espectro de Frequências para a condição operacional I.

Ordem Harm.	i_{cn-h} [A]	$I_{s-contr-h}$ [A]	$I_{c-contr-h}$ [A]	Resp. Supridor [%]	Resp. Consumidor [%]
5 ^a	0,27∠-150,62°	5,62.10 ⁻⁵	0,27	0,02	99,98
7 ^a	0,23∠-32,54°	-2,40.10 ⁻⁵	0,23	0,01	99,99
11 ^a	0,18∠-79,63°	9,15.10 ⁻⁶	0,18	0,01	99,99
13 ^a	0,12∠-49,27°	-3,50.10 ⁻⁶	0,12	0,01	99,99

Tabela 3.27 – Resultados da aplicação do método da Análise do Espectro de Frequências para a condição operacional II.

Ordem Harm.	i_{cn-h} [A]	$I_{s-contr-h}$ [A]	$I_{c-contr-h}$ [A]	Resp. Supridor [%]	Resp. Consumidor [%]
5 ^a	0,03∠-136,84°	0,03	0,02	67,39	32,61
7 ^a	0,04∠-91,71°	0,03	0,04	43,17	56,83
11 ^a	0,08∠65,37°	0,02	0,08	17,97	82,03
13 ^a	0,04∠-59,38°	0,01	0,04	12,04	87,96

Tabela 3.28 – Resultados da aplicação do método da Análise do Espectro de Frequências para a condição operacional III.

Ordem Harm.	i_{cn-h} [A]	$I_{s-contr-h}$ [A]	$I_{c-contr-h}$ [A]	Resp. Supridor [%]	Resp. Consumidor [%]
5 ^a	0,29∠-148,78°	0,02	0,29	6,43	93,57
7 ^a	0,26∠-39,41°	-0,01	0,25	3,57	96,43
11 ^a	0,13∠-61,42°	-0,01	0,13	6,67	93,33
13 ^a	0,16∠-51,49°	0,01	0,16	3,53	96,47

3.4 DISCUSSÕES SOBRE O DESEMPENHO DAS METODOLOGIAS

Uma vez que o método da Superposição é baseado em um sólido princípio de resolução de circuitos elétricos e como todos os parâmetros necessários a sua aplicação se apresentam disponíveis, os resultados fornecidos por essa metodologia são usados como base de comparação para análise de desempenho das demais. Dessa maneira, a análise dos testes realizados conduz aos seguintes apontamentos:

- **Método do Fluxo de Potência Harmônica:** apesar de ser uma proposta relativamente simples e bastante difundida, nota-se que o procedimento, conforme já ressaltado em momentos anteriores, não define parcelas de responsabilidades, uma vez que apenas sugere o sentido predominante do fluxo de harmônicos. Os resultados obtidos indicam a fragilidade da metodologia já na condição operativa I, em que a responsabilidade pelas distorções deveria ser atribuída exclusivamente ao consumidor. As indicações errôneas evidenciadas na 5ª e na 11ª ordens harmônicas podem ser decorrentes do fato de os ângulos entre tensões e correntes harmônicas estarem próximos a -90° , região de limiar no procedimento sugerido pela metodologia. A condição II exibiu resultados coerentes com o que era esperado, uma vez que as responsabilidades pelas distorções presentes no PAC foram atribuídas ao sistema supridor em todas as frequências. Já no caso III é possível perceber que o procedimento falhou ao indicar erroneamente os principais agentes causadores das distorções de 7ª e 13ª ordens. É, então, perceptível que

esta metodologia não é passível de ser confiada na análise da problemática em foco neste trabalho.

- **Método da Corrente Conforme e Não Conforme:** observa-se que na condição I a metodologia atribuiu uma pequena parcela indevida de responsabilidade ao sistema supridor, quando de antemão era conhecido que apenas o consumidor contribuía com as distorções harmônicas presentes no ponto de acoplamento. Apesar disso, reconhece-se que o método indicou corretamente o sentido predominante da origem das distorções como sendo o lado do consumidor. Na condição II percebe-se, no entanto, um resultado totalmente distinto do esperado, uma vez que em todas as ordens o procedimento atribuiu responsabilidade ao consumidor, quando este era constituído apenas por cargas lineares. Também na condição III o encargo pelas distorções foi conferido quase totalmente ao consumidor, sendo que em todas as frequências harmônicas, com exceção da 13ª ordem, foram observados resultados consideravelmente distintos do esperado. Presume-se que a expressiva incoerência dos resultados obtidos é decorrente da hipótese simplificadora assumida no método, que considera constante a impedância harmônica de um sistema, qualquer que seja a sua frequência. Nesse sentido, é evidente que esta metodologia também se mostra inadequada para os propósitos pretendidos.
- **Método da Superposição:** conforme foi adiantado no início desta seção, a aplicação do procedimento da superposição conduziu a um

compartilhamento consistente. Como era esperado, nas condições I e II foram atribuídas responsabilidades aproximadamente iguais a 100% às partes causadoras de distorções, enquanto na condição III a atribuição foi compartilhada entre os agentes envolvidos de maneira proporcional às projeções das contribuições de cada um deles ($\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$) sobre o fasor de tensão total (\dot{V}_{pac-h}) no PAC. É necessário atentar-se para o fato de que sua aplicação segura só foi possível porque a topologia do arranjo investigado é totalmente conhecida e, assim, as impedâncias harmônicas do sistema supridor e consumidor puderam ser obtidas sem maiores dificuldades. Em casos reais, entretanto, essas impedâncias não são comumente disponibilizadas ou facilmente calculadas, fato que dificulta o emprego desta metodologia em campo.

- **Método da Superposição Modificado:** seus resultados estão em consonância com aqueles encontrados a partir da aplicação do procedimento da Superposição clássico nas três condições de operação. Assim, é possível afirmar que a metodologia se mostra consistente. No entanto, a necessidade de dispor de uma impedância dominante, como um filtro, para conexão no PAC é um fato que dificulta, na maioria das situações, a aplicação prática deste processo.
- **Método da Análise do Espectro de Frequências:** apesar dos resultados favoráveis fornecidos pelo método da Análise do Espectro de Frequências na condição operativa I, observa-se, já para o segundo caso, uma considerável incoerência entre os valores obtidos e aqueles

esperados. Nesse caso, para as ordens de número 7, 11 e 13 a metodologia atribuiu parcelas predominantes de responsabilidades ao consumidor, quando o supridor era o único causador de distorções. Resultados errôneos também foram apontados por este método no caso III, onde o consumidor recebeu quase a totalidade da responsabilidade pelas distorções de todas as frequências harmônicas. A inexatidão dos resultados pode estar associada às considerações teóricas do procedimento, as quais partem do princípio de o consumidor possuir teor puramente resistivo. Assim, apesar dessa metodologia se comprometer a fornecer a separação das parcelas de responsabilidades entre o consumidor e o supridor de maneira prática, ela também se apresentou insuficiente para a solução da problemática em foco.

Com o intuito sintetizar o desempenho dos cinco métodos anteriormente explorados, a Tabela 3.29 apresenta quais deles apresentaram resultados satisfatórios ou insatisfatórios nas três condições de operação simuladas.

Tabela 3.29 – Resumo do desempenho das metodologias analisadas.

Método	Condição Operacional I	Condição Operacional II	Condição Operacional III
Fluxo de Potência Harmônica	Insatisfatório	Satisfatório	Insatisfatório
Corrente Conforme e Não Conforme	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório
Superposição	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório
Superposição Modificado	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório
Análise do Espectro de Frequências	Satisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório

Portanto, de maneira geral, compreende-se que o compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas ainda se apresenta como uma questão que inspira a realização de esforços no sentido de definir um procedimento que seja, concomitantemente, eficaz e viável para aplicações em campo.

CAPÍTULO IV

MÉTODO DO CHAVEAMENTO DE CAPACITORES

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Conforme anteriormente evidenciado no texto, as metodologias do Fluxo de Potência Harmônica, Corrente Conforme e Não Conforme e Análise do Espectro de Frequências apresentam em seus desenvolvimentos pontos críticos, considerações, aproximações ou simplificações que as tornam impróprias para aplicação em sistemas elétricos reais. Já os procedimentos conhecidos como Superposição e Superposição Modificado, apesar de serem confiáveis e apresentarem sólida base de sustentação metodológica, esbarram em diferentes dificuldades associadas a aspectos de aplicação prática.

Destacando, neste ponto, o método da Superposição convencional, no que concerne à necessidade de conhecimento das impedâncias harmônicas das partes envolvidas, ressalta-se que a dificuldade maior reside na obtenção das impedâncias referentes ao consumidor, já que essa é ainda uma questão inacabada no panorama científico. Por outro lado, no que tange à determinação das impedâncias do sistema

supridor, a literatura aponta procedimentos seguros, conforme evidenciam os trabalhos [28-31].

Diante dessa conjuntura, objetivando encontrar um caminho que permita a aplicação sólida e prática da Superposição, este capítulo apresenta uma proposta para a obtenção da impedância harmônica de uma unidade consumidora, a qual foi nomeada como método do Chaveamento de Capacitores. Basicamente, o processo consiste na realização de medições de tensões e correntes harmônicas no ponto de interesse, antes e após o chaveamento de um banco de capacitores.

Inserido nesse cenário, o presente capítulo procura, inicialmente, destacar as principais técnicas existentes na literatura que visam à determinação dos valores de impedâncias harmônicas de consumidores. Em seguida, são evidenciados os procedimentos metodológicos envolvidos na proposição da técnica do Chaveamento de Capacitores, bem como sua avaliação de desempenho quando aplicada ao sistema teste apresentado no capítulo anterior. São realizadas, por fim, considerações sobre a eficácia e a viabilidade do método apresentado, com ênfase aos pontos merecedores de investigações mais detalhadas visando à sua consolidação.

4.2 PRINCIPAIS METODOLOGIAS EXISTENTES PARA A DETERMINAÇÃO DAS IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS DO CONSUMIDOR

Dentre os apontamentos encontrados na literatura acerca do assunto relacionado à determinação das impedâncias harmônicas, a referência [2] discorre sobre duas

possibilidades: a primeira relacionada à aplicação de técnicas não invasivas e a segunda referente ao emprego de procedimentos invasivos.

Pode-se dizer que os métodos não invasivos são caracterizados pela utilização de medições de formas de onda de tensões e correntes presentes no sistema, ou seja, usam o conteúdo harmônico já existente, sem qualquer intervenção externa. Como exemplo ilustrativo de teste não invasivo, cita-se a possibilidade de fazer uso dos harmônicos produzidos por uma grande estação conversora, sendo a impedância calculada de forma direta, a partir da divisão entre as tensões e as correspondentes correntes harmônicas mensuradas [51].

Nesse âmbito, como premissas para garantir a confiabilidade dos métodos não invasivos, podem ser elencados os seguintes aspectos:

- Presença de uma fonte de harmônicos no sistema que apresente potência suficiente para assegurar a aplicação eficaz do procedimento desejado em determinado ponto de medição, evitando os erros advindos de instrumentos quando em condições de baixa distorção;
- Garantia que todas as demais fontes de harmônicos estejam desconectadas durante o teste, uma vez que a presença de mais de uma fonte torna impraticável a determinação da parcela de corrente harmônica advinda apenas da fonte de interesse;
- Utilização de instrumentos de medição precisos e exatos;
- Realização de vários testes, os quais devem envolver diferentes condições de operação do complexo elétrico.

Por outro lado, ainda de acordo com [2], os testes de caráter invasivo carecem, via de regra, da posse de instrumentos capazes de injetar sinais distorcidos nos sistemas. Observa-se que na prática as medições são feitas em locais que apresentam, de antemão, altas distorções e, naturalmente, os harmônicos injetados pela fonte externa se somam àqueles já presentes no sistema. Este fato pode resultar em um sinal com excessiva taxa de ruído, tornando as medições não confiáveis.

Uma opção que busca contornar essa dificuldade refere-se à construção de um dispositivo capaz de gerar sinais de frequências inter-harmônicas, próximas aos valores das ordens harmônicas de interesse. Assim, para encontrar as impedâncias desejadas, faz-se necessário realizar a interpolação entre os valores encontrados a partir das medições [52]. Nota-se, contudo, que tal técnica necessita de um equipamento robusto, fato que dificulta seu emprego em campo.

De maneira mais pontual, é válido ressaltar, também, proposições clássicas que procuram representar cargas lineares e não lineares a partir da utilização dos parâmetros R (resistência), L (indutância), C (capacitância) e, quando for o caso, de recursos representativos de harmônicos residuais.

Nesse contexto, destaca-se a referência [53], a qual propõe que a representação de cargas seja estruturada por meio de um modelo constituído por três parâmetros passivos (R , L e C), um bloco denominado por BB (“*Black-Box*”) e uma fonte de corrente. Em rápidas palavras, pode-se dizer que o bloco BB possui uma correspondência direta com as frequências harmônicas de mesma ordem que as encontradas nas tensões e que não foram absorvidas pelos elementos passivos, enquanto a fonte está atrelada com as ordens harmônicas encontradas na corrente medida e que não possuem correspondentes tensões.

Tendo por base [53], o trabalho [54] se propõe a utilizar um modelo bastante próximo ao comentado anteriormente, sendo que a diferença fundamental entre ambos consiste na subdivisão de correntes. O autor desta metodologia sugere a existência de uma corrente nomeada de “reativa” ou “em quadratura”, a qual engloba as componentes indutiva e capacitiva da corrente total. Contudo, de acordo com [32], durante a formulação matemática tal alteração não foi efetivamente empregada e, por esse motivo, os resultados conduzidos a partir da aplicação das metodologias propostas em [53] e [54] são os mesmos.

Ainda dentro da mesma linha de desenvolvimentos, a referência [27] apresenta uma proposta que merece atenção por não subdividir os resíduos de corrente em dois blocos. Sendo assim, além dos parâmetros R , L e C , há no modelo uma fonte de corrente que representa as ordens harmônicas presentes na corrente que não são encontradas na tensão e, adicionalmente, possui a função de fechar o balanço de correntes.

Os testes de desempenho dos procedimentos discutidos, realizados em [32], revelam que as propostas apresentadas em [53] e [54] fornecem resultados consideravelmente distantes do que era esperado até mesmo diante de situações simples, que contam com a presença exclusiva de cargas lineares na unidade consumidora. Já o método sugerido em [27], de modo geral, mostra-se mais promissor quanto ao processo de obtenção dos parâmetros equivalentes, muito embora divergências significativas entre os valores obtidos e os esperados sejam observadas na análise de situações em que o consumidor é constituído por cargas lineares e não lineares.

São encontradas ainda propostas embasadas em distintas linhas de investigações visando à modelagem de cargas no contexto das frequências harmônicas, como [55] que sugere a utilização de técnicas de elementos finitos em conjunto com algoritmos de

estimação por meio dos mínimos erros quadrados para a obtenção dos parâmetros desejados. Dentro da temática, merecem ainda ser citados os trabalhos [33, 45].

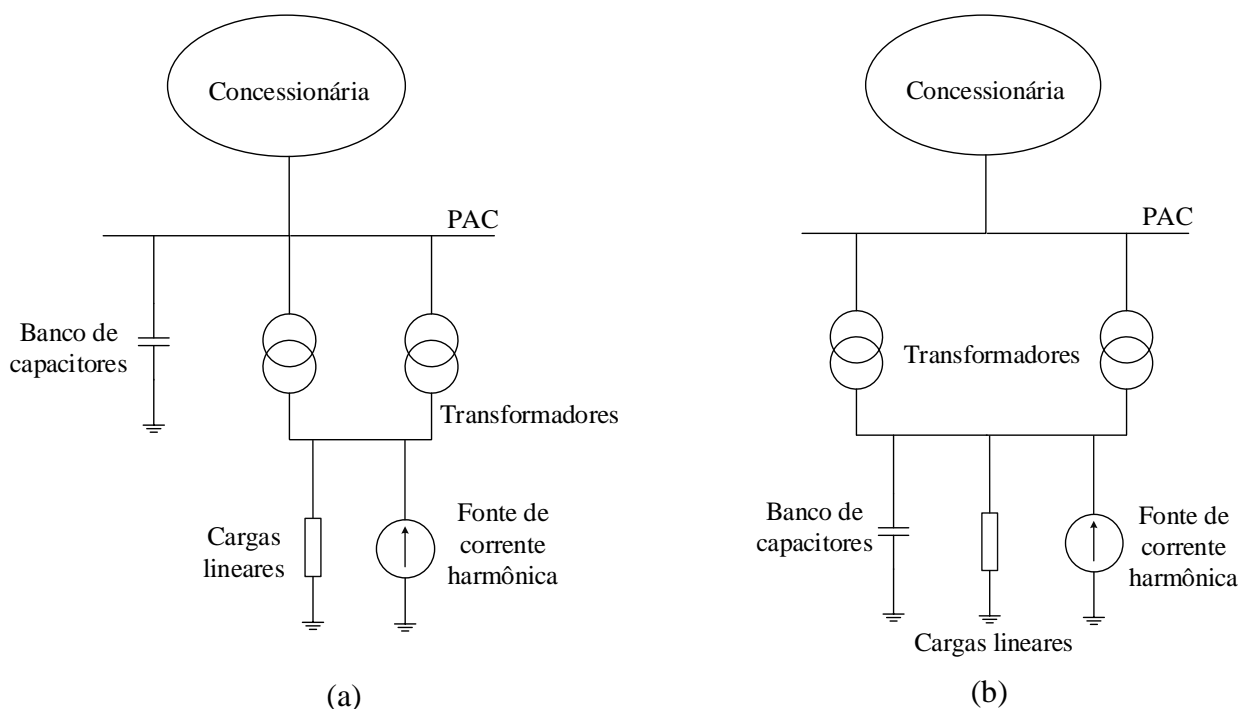
Tendo em mente os desenvolvimentos realizados e as principais dificuldades constatadas até o momento, surge a proposta deste trabalho, que é detalhada na sequência.

4.3 METODOLOGIA PROPOSTA

Com vistas à determinação das impedâncias harmônicas de uma unidade consumidora, a metodologia proposta neste trabalho baseia-se na análise de tensões e correntes em duas condições de funcionamento diferentes do sistema elétrico analisado. Para isso, é necessária a realização do chaveamento de um banco de capacitores presente no ponto a partir do qual se deseja conhecer a impedância.

Vale ressaltar que, muito embora a particularização utilizada para unidades capacitivas, efetivamente, sob o ponto de vista teórico, o chaveamento de qualquer outro componente inserido junto ao ponto de interesse, poderia, em tese, oferecer os recursos físicos necessários à aplicação do processo. Não obstante a tal reconhecimento, sabidamente, a presença de bancos de capacitores destinados à correção do fator de potência de instalações sempre se apresenta como uma possibilidade concreta para as instalações reais, motivo pelo qual o cerne do processo encontra-se direcionado para a manobra de tal componente.

As Figuras 4.1 (a) e (b) apresentam esquemas representativos de sistemas industriais genéricos com duas distintas configurações quanto ao ponto de conexão das unidades capacitivas.



Figuras 4.1 – Esquemas simplificados de complexos industriais com duas possíveis configurações: (a) – banco de capacitores do lado primário dos transformadores e (b) – banco de capacitores do lado secundário dos transformadores.

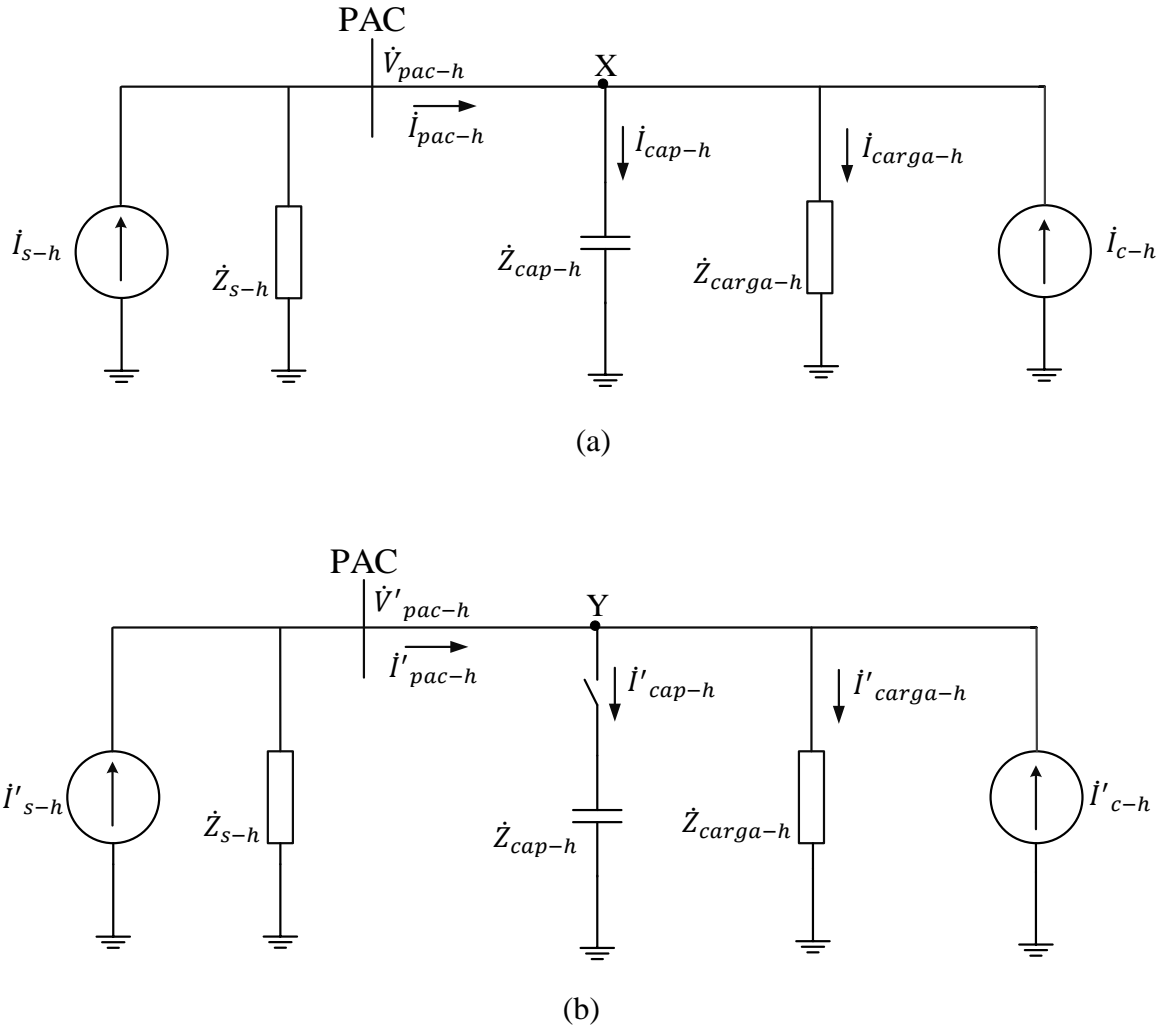
O método do Chaveamento de Capacitores pode ser aplicado em ambas as configurações mostradas nos esquemas anteriores. No caso do arranjo exibido na Figura 4.1 (a), uma vez que o banco de capacitores apresenta-se conectado diretamente ao ponto de acoplamento comum, a aplicação do procedimento fornecerá como resultado a impedância harmônica total da indústria. Já na configuração da Figura 4.1 (b), como os capacitores estão ligados no secundário dos transformadores, a metodologia resultará no valor da impedância harmônica a partir desse ponto. Contudo, uma vez que as impedâncias dos transformadores são parâmetros facilmente encontrados, pode-se fazer a associação série entre o valor de impedância obtido a partir da aplicação do método e a impedância equivalente dos transformadores, de forma a obter a impedância harmônica total do complexo industrial sem maiores dificuldades.

Nesse ponto, ressalta-se que, via de regra, não se faz necessário chavear a capacitância total do banco presente no complexo industrial. O chaveamento de uma

quantidade de capacitores que seja capaz de ocasionar mudança nos valores de tensões e correntes, no ponto em questão, já é suficiente para a aplicação da metodologia. Esta é uma possibilidade que se justifica pelo fato que bancos de capacitores podem se apresentar na forma de distintos estágios destinados à composição da estrutura do sistema de compensação de reativos.

Alternativamente, caso não seja de interesse chavear um banco já presente na unidade consumidora, é possível ainda conectar ao PAC um capacitor que não faça parte do arranjo industrial, apenas para efeito de aplicação do procedimento. Destaca-se, ainda, que para a realização das medições necessárias, é preciso garantir que os efeitos de transitórios envolvidos no chaveamento de capacitores já tenham sido extintos, o que ocorre frequentemente em poucos milissegundos.

Para análise dos princípios físicos e matemáticos relacionados ao desenvolvimento da metodologia será tomada como base a configuração 4.1(a), na qual o PAC coincide com o barramento de conexão do banco de capacitores. Nesse sentido, as Figuras 4.2 (a) e (b) exibem arranjos contendo os circuitos equivalentes de Norton representativos das partes envolvidas no processo de compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções de determinada frequência harmônica h em um ponto de acoplamento comum. Como se pode observar, na situação operativa ilustrada pela Figura 4.2 (a) um banco de capacitores encontra-se conectado ao PAC, enquanto na situação apresentada pela Figura 4.2 (b) o banco de capacitores foi desconectado.



Figuras 4.2 – Arranjo elétrico representativo do método do Chaveamento de Capacitores mostrando as duas condições operativas: (a) com o banco de capacitores conectado; (b) com o banco de capacitores desconectado.

Nas figuras, observa-se:

I_{s-h} e I'_{s-h} – fonte representativa da corrente harmônica de ordem h gerada pelas cargas não lineares conectadas ao sistema supridor para as condições operativas (a) e (b), respectivamente;

I_{c-h} e I'_{c-h} – fonte representativa da corrente harmônica de ordem h gerada pelas cargas não lineares conectadas ao consumidor para as condições operativas (a) e (b), respectivamente;

Z_{s-h} – impedância harmônica de ordem h do sistema supridor;

$Z_{carga-h}$ – impedância harmônica de ordem h , vista a partir do ponto de chaveamento, excluindo a capacitância chaveada;

\dot{Z}_{cap-h} – impedância harmônica de ordem h do banco de capacitores chaveado;
 \dot{V}_{pac-h} e \dot{V}'_{pac-h} – tensões harmônicas de ordem h no ponto de acoplamento para as condições operativas (a) e (b), respectivamente;
 \dot{I}_{pac-h} e \dot{I}'_{pac-h} – correntes harmônicas de ordem h no ponto de acoplamento para as condições operativas (a) e (b), respectivamente;
 \dot{I}_{cap-h} e \dot{I}'_{cap-h} – correntes harmônicas de ordem h que fluem pelo capacitor nas condições operativas (a) e (b), respectivamente;
 $\dot{I}_{carga-h}$ e $\dot{I}'_{carga-h}$ – correntes harmônicas de ordem h que fluem pela carga $\dot{Z}_{carga-h}$ nas condições operativas (a) e (b), respectivamente.

Ao aplicar a Lei de Kirchhoff dos nós ao nó X presente na configuração ilustrada na Figura 4.2 (a), pode-se escrever que o somatório das correntes que entram em X é dado por:

$$\sum \dot{I}_X = 0 \quad (4.1)$$

$$\dot{I}_{pac-h} - \dot{I}_{cap-h} - \dot{I}_{carga-h} + \dot{I}_{c-h} = 0 \quad (4.2)$$

Ainda, analisando o circuito da Figura 4.2 (a), as correntes \dot{I}_{cap-h} e $\dot{I}_{carga-h}$ podem ser obtidas como indicado em (4.3) e (4.4):

$$\dot{I}_{cap-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{cap-h}} \quad (4.3)$$

$$\dot{I}_{carga-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{carga-h}} \quad (4.4)$$

Ao substituir as equações (4.3) e (4.4) em (4.2), obtém-se (4.5):

$$\dot{I}_{pac-h} - \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{cap-h}} - \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{carga-h}} + \dot{I}_{c-h} = 0 \quad (4.5)$$

Isolando o termo \dot{I}_{c-h} chega-se à equação (4.6):

$$i_{c-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{cap-h}} + \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{carga-h}} - i_{pac-h} \quad (4.6)$$

Analisando, por outro lado, a configuração apresentada na Figura 4.2 (b), pode-se escrever para o nó Y:

$$\sum i_Y = 0 \quad (4.7)$$

$$i'_{pac-h} - i'_{cap-h} - i'_{carga-h} + i'_{c-h} = 0 \quad (4.8)$$

Para essa situação, uma vez que o capacitor foi desconectado, entende-se que i'_{cap-h} é igual a zero. Já a corrente $i'_{carga-h}$ pode ser obtida como indica (4.9):

$$i'_{carga-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{\dot{Z}_{carga-h}} \quad (4.9)$$

Com base em tais informações, a equação (4.8) pode ser reescrita conforme mostra (4.10):

$$i'_{pac-h} - \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{\dot{Z}_{carga-h}} + i'_{c-h} = 0 \quad (4.10)$$

Isolando a corrente i'_{c-h} na expressão anterior, obtém-se (4.11):

$$i'_{c-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{\dot{Z}_{carga-h}} - i'_{pac-h} \quad (4.11)$$

Considerando que as correntes harmônicas geradas pelas cargas não lineares presentes no sistema se comportam como fontes de correntes e, assim, permanecem constantes antes e após o chaveamento do banco de capacitores, entende-se, neste trabalho, que $i_{s-h} \approx i'_{s-h}$ e $i_{c-h} \approx i'_{c-h}$. Seguindo tal premissa, pode-se, então, igualar as equações (4.6) e (4.11), de modo a obter (4.12):

$$\frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{cap-h}} + \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{carga-h}} - i_{pac-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{\dot{Z}_{carga-h}} - i'_{pac-h} \quad (4.12)$$

Ao realizar as manipulações algébricas necessárias em (4.12) com o objetivo de isolar o termo $\dot{Z}_{carga-h}$, chega-se, à (4.13) e, finalmente à (4.14):

$$\frac{1}{\dot{Z}_{carga-h}} \cdot (\dot{V}_{pac-h} - \dot{V}'_{pac-h}) = \dot{I}_{pac-h} - \dot{I}'_{pac-h} - \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{cap-h}} \quad (4.13)$$

$$\dot{Z}_{carga-h} = \frac{(\dot{V}_{pac-h} - \dot{V}'_{pac-h})}{\dot{I}_{pac-h} - \dot{I}'_{pac-h} - \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{cap-h}}} \quad (4.14)$$

Observa-se que em (4.14) os valores de \dot{V}_{pac-h} , \dot{V}'_{pac-h} , \dot{I}_{pac-h} e \dot{I}'_{pac-h} são obtidos a partir de medições no ponto de interesse, enquanto \dot{Z}_{cap-h} é um valor conhecido, o qual representa a impedância harmônica do capacitor utilizado para chaveamento. Assim, a partir desses dados pode-se obter o valor da impedância harmônica $\dot{Z}_{carga-h}$, fato este que se apresenta como o grande desafio transposto.

É válido notar que o valor de impedância calculado por meio da equação (4.14) não inclui a capacitância chaveada. Dessa forma, para obter o valor total de impedância, incluindo o banco de capacitores usado para aplicação da metodologia, pode-se evidentemente fazer a associação paralela entre \dot{Z}_{cap-h} e $\dot{Z}_{carga-h}$, como sugere a equação (4.15):

$$\dot{Z}_{carga-tot-h} = \frac{\dot{Z}_{cap-h} \cdot \dot{Z}_{carga-h}}{\dot{Z}_{cap-h} + \dot{Z}_{carga-h}} \quad (4.15)$$

Na equação (4.15) tem-se:

$\dot{Z}_{carga-tot-h}$ – impedância harmônica de ordem h da unidade consumidora, incluindo a capacitância chaveada, vista a partir do ponto de chaveamento. Nesse caso, como o ponto de chaveamento coincide com o ponto de acoplamento, é evidente que $\dot{Z}_{carga-tot-h}$ pode ser chamada de \dot{Z}_{c-h} (impedância total da unidade consumidora vista a partir do PAC).

Desse modo, a partir dos valores de impedâncias harmônicas obtidos, é possível proceder à aplicação segura do método da Superposição.

Com o intuito de sintetizar o procedimento proposto, em consonância com a metodologia apresentada e os desenvolvimentos realizados, o compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas deve ocorrer de acordo com os seguintes passos:

1. Realização de medições de tensões e correntes harmônicas no ponto de acoplamento comum em condição operativa normal da unidade consumidora, obtendo-se, assim, as grandezas \dot{V}_{pac-h} e \dot{I}_{pac-h} ;
2. Desconexão de um banco de capacitores de impedância conhecida (\dot{Z}_{cap-h}), quer seja a unidade completa ou estágios deste;
3. Realização de novas medições de tensões e correntes harmônicas no ponto de acoplamento comum, agora com o banco de capacitores desligado, obtendo-se as novas grandezas \dot{V}'_{pac-h} e \dot{I}'_{pac-h} ;
4. Aplicação dos princípios sintetizados na equação (4.14) para obtenção da impedância $\dot{Z}_{carga-h}$;
5. Utilização da equação (4.15) para obtenção de $\dot{Z}_{carga-tot-h}$, que, no caso analisado, é a própria impedância do consumidor vista a partir do PAC e, assim, pode ser também chamada de \dot{Z}_{c-h} ;
6. Aplicação do método da Superposição convencional, conforme descrito no item 2.4 deste trabalho, para obtenção das parcelas de responsabilidades sobre as distorções harmônicas a serem atribuídas às partes envolvidas.

É oportuno salientar, mais uma vez, que os procedimentos suprarrelacionados estão particularizados para a situação em que o banco de capacitores encontra-se

conectado diretamente ao PAC. Caso as unidades capacitivas estejam instaladas no secundário dos transformadores, ressalta-se que as medições de tensões e correntes devem ser realizadas nesse específico barramento e não no ponto de acoplamento comum.

4.4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO MÉTODO DO CHAVEAMENTO DE CAPACITORES

Para a avaliação de desempenho do procedimento metodológico proposto são analisadas as condições operativas I, II e III do sistema teste apresentado no item 3.2 do capítulo anterior. Já que são conhecidos todos os parâmetros de tal arranjo hipotético, torna-se possível determinar previamente os valores de gabarito ou de referência tanto para as impedâncias harmônicas do consumidor, como também para as parcelas de atribuição de responsabilidades sobre as distorções harmônicas presentes no PAC, a partir da aplicação do princípio da Superposição. Muito embora esses valores já tenham sido mostrados nas Tabelas 3.18 a 3.21, por conveniência, são repetidos a seguir. Assim, procede-se à apresentação, em um primeiro momento, dos valores esperados para as grandezas em questão e, na sequência, são exibidos os resultados encontrados a partir do procedimento de Chaveamento de Capacitores.

- **Resultados esperados:**

Os resultados esperados para as impedâncias harmônicas totais da unidade consumidora são apresentados na Tabela 4.1. Nota-se que as cargas não lineares foram modeladas como fontes de corrente harmônica e considera-se que a configuração do

complexo consumidor não sofra nenhuma mudança brusca de operação durante os processos associados à aplicação dos procedimentos.

Tabela 4.1 – Valores esperados para as impedâncias harmônicas totais do sistema.

Ordem Harmônica	Impedância do Consumidor [Ω] ($V_{ref} = 138 \text{ kV}$)
5 ^a	2105,92 \angle -32,80°
7 ^a	1520,08 \angle -41,76°
11 ^a	617,10 \angle -39,98°
13 ^a	328,77 \angle -15,39°

As parcelas referentes ao compartilhamento de responsabilidades obtidas pelo método da Superposição de Tensões são sintetizadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores esperados para a atribuição de responsabilidades sobre as distorções harmônicas nos três casos investigados.

Ordem Harm.	Condição I		Condição II		Condição III	
	Resp. Supridor [%]	Resp. Consumidor [%]	Resp. Supridor [%]	Resp. Consumidor [%]	Resp. Supridor [%]	Resp. Consumidor [%]
5 ^a	0,09	99,91	99,99	0,01	65,19	34,81
7 ^a	0,11	99,89	99,99	0,01	59,18	40,82
11 ^a	0,09	99,91	99,98	0,02	37,12	62,88
13 ^a	0,01	99,99	99,87	0,13	10,27	89,73

- **Resultados encontrados:**

Ao observar a Figura 3.1 (página 53), a qual retrata o sistema elétrico usado nos trabalhos de simulação computacional, nota-se que um banco de capacitores (C1) de potência reativa de 1,5 MVar encontra-se conectado ao barramento de média tensão (13,8 kV). Para efeito de aplicação da técnica proposta, é realizado o chaveamento de uma capacitância de 2 μ F/fase, o que equivale a uma potência reativa capacitiva trifásica de aproximadamente 145 kVar. Isso determina que o banco de capacitores se apresenta constituído por estágios e que apenas uma parcela foi manobrada para os fins aqui postos.

Vale ainda ressaltar que a configuração da indústria simulada está consonante com a Figura 4.1 (b), ou seja, o banco de capacitores não se apresenta diretamente conectado ao ponto de acoplamento comum, mas sim ao secundário dos transformadores de entrada da indústria. Conforme anteriormente evidenciado, para a obtenção das impedâncias harmônicas totais vistas a partir do PAC, é preciso reconhecer que esta é resultante da combinação série da impedância dos transformadores e a fornecida pela metodologia (cargas). A Tabela 4.3 exibe as impedâncias equivalentes dos transformadores T1 e T2, referidas à tensão de 138 kV, para as frequências harmônicas envolvidas nas investigações.

Tabela 4.3 – Valores das impedâncias harmônicas equivalentes dos transformadores de entrada.

Ordem Harmônica	Impedância Equivalente dos Transformadores T1 e T2 [Ω] ($V_{ref} = 138 \text{ kV}$)
5 ^a	381,09 \angle 88,09°
7 ^a	533,38 \angle 88,64°
11 ^a	838,03 \angle 89,13°
13 ^a	990,37 \angle 89,27°

Tendo como foco, primeiramente, a análise da condição operacional I, a Tabela 4.4 apresenta os dados necessários para posterior aplicação do procedimento do Chaveamento de Capacitores para obtenção de impedâncias. Como pode ser observado, as grandezas representativas das tensões e correntes harmônicas, mensuradas no barramento de 13,8 kV, se fazem presente em pares, uma correspondendo ao funcionamento com a unidade capacitiva a ser chaveada e a outra sem este componente.

Tabela 4.4 – Dados de entrada para aplicação do procedimento na condição operacional I.

Ordem Harm.	\dot{V}_h [V]	\dot{I}_h [A]	\dot{V}'_h [V]	\dot{I}'_h [A]	\dot{Z}_{cap-h} [Ω] ($V_{ref} = 13,8 \text{ kV}$)
5 ^a	510,67 \angle 83,66°	89,43 \angle 174,98°	498,47 \angle 83,99°	87,31 \angle 175,31°	265,26 \angle -90°
7 ^a	615,00 \angle -99,74°	76,86 \angle -8,69°	582,83 \angle -98,56°	72,82 \angle -7,51°	189,47 \angle -90°
11 ^a	733,96 \angle 150,06°	58,40 \angle -119,19°	654,68 \angle 164,38°	52,09 \angle -104,88°	120,57 \angle -90°
13 ^a	703,60 \angle -126,33°	47,36 \angle -35,61°	827,55 \angle -109,03°	55,70 \angle -18,31°	102,02 \angle -90°

Na tabela, observa-se:

\dot{V}_h e \dot{I}_h – tensões e correntes harmônicas, de fase, de ordem h , no ponto de chaveamento, com a presença da unidade capacitiva manobrável;

\dot{V}'_h e \dot{I}'_h – tensões e correntes harmônicas, de fase, de ordem h , no ponto de chaveamento, após a manobra da unidade capacitiva em questão;

\dot{Z}_{cap-h} – impedância harmônica de ordem h do capacitor chaveado.

De posse de tais informações, é possível dar sequência ao procedimento, com a utilização das equações (4.14) e (4.15). Entretanto, destaca-se que nesse caso para a aplicação da equação (4.14) não são usados os valores de tensões e correntes no PAC, mas sim no barramento onde se encontra instalado o banco de capacitores. Tomando por base, portanto, os valores mostrados na Tabela 4.4, chega-se aos resultados exibidos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Impedâncias harmônicas fornecidas pela metodologia na condição operacional I.

Ordem Harm.	$\dot{Z}_{carga-h}$ [Ω] ($V_{ref} = 13,8$ kV)	$\dot{Z}_{carga-tot-h}$ [Ω] ($V_{ref} = 13,8$ kV)	\dot{Z}_{c-h} [Ω] ($V_{ref} = 138$ kV)	Erro Percentual de \dot{Z}_{c-h} com relação aos valores esperados (%)
5 ^a	25,18∠-37,61°	23,74∠-41,68°	2150,46∠-33,85°	2,11
7 ^a	20,85∠-50,62°	19,18∠-54,30°	1526,34∠-42,14°	0,41
11 ^a	14,71∠-67,34°	13,21∠-69,76°	617,75∠-40,51°	0,11
13 ^a	12,53∠-72,43°	11,21∠-74,33°	327,93∠-15,81°	0,26

Nessa situação, observa-se que o ponto de chaveamento não coincide com o ponto de acoplamento do sistema e, por isso, $\dot{Z}_{carga-tot-h}$ não representa diretamente a impedância total da unidade consumidora (\dot{Z}_{c-h}). Com o intuito de elucidar a nomenclatura adotada na Tabela 4.5, a Figura 4.3 mostra o esquema simplificado do arranjo simulado.

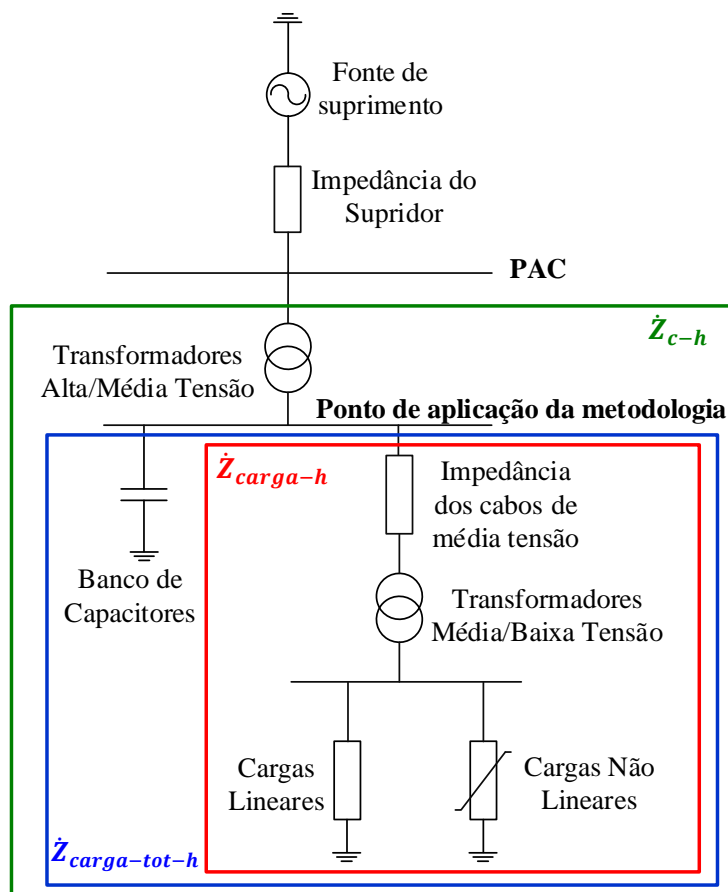


Figura 4.3 – Esquema simplificado do arranjo analisado evidenciando as impedâncias calculadas.

A partir da análise da figura anterior, conclui-se:

$\dot{Z}_{carga-h}$ – impedância harmônica obtida por meio da equação (4.14), a qual se refere à impedância de ordem h vista a partir do secundário dos transformadores de entrada, sem inclusão da capacitância chaveada, na tensão de 13,8 kV;

$\dot{Z}_{carga-tot-h}$ – impedância harmônica de ordem h obtida por meio da equação (4.15), a qual se refere à impedância vista a partir do secundário dos transformadores de entrada, incluindo a capacitância chaveada, na tensão de 13,8 kV;

\dot{Z}_{c-h} – impedância total de ordem h da unidade consumidora, vista do PAC, na tensão de 138 kV. Para cada ordem harmônica, seu valor foi obtido a partir da associação série entre $\dot{Z}_{carga-tot-h}$ (referida à tensão de 138 kV) e a impedância equivalente dos transformadores que foi mostrada na Tabela 4.3.

Com base no valor total da impedância da unidade consumidora (\dot{Z}_{c-h}) fornecido pela metodologia, pode-se aplicar o método da Superposição de Tensões, o qual conduz aos resultados mostrados na Tabela 4.6. A nomenclatura das grandezas apresentadas nessa tabela está de acordo com aquela usada no detalhamento do princípio da Superposição de Tensões, realizado no item 2.4.2 deste trabalho.

Tabela 4.6 – Compartilhamento de responsabilidades para a condição operacional I.

Ordem Harm.	$\dot{V}_{s-pac-h}$ [V]	$\dot{V}_{c-pac-h}$ [V]	$V_{s-proj-h}$ [V]	$V_{c-proj-h}$ [V]	Resp. Supridor [%]	Resp. Consumidor [%]
5 ^a	4,81∠-172,96°	1703,22∠114,86°	1,48	1703,22	0,09	99,91
7 ^a	3,33∠-177,84°	2049,52∠-128,84°	2,19	2049,51	0,11	99,89
11 ^a	2,47∠160,54°	2446,78∠-179,47°	2,33	2446,78	0,09	99,91
13 ^a	0,98∠130,75°	1993,10∠-150,87°	0,20	1993,10	0,01	99,99

A análise dos resultados da condição operacional I mostra total concordância entre os valores esperados e os obtidos pela técnica proposta, tanto para as impedâncias harmônicas, como para as parcelas de atribuição de responsabilidades.

Seguindo a mesma linha de raciocínio, o procedimento é realizado também para a avaliação da condição operacional II. Nesse sentido a Tabela 4.7 apresenta o conjunto de informações necessárias aos desenvolvimentos, enquanto a Tabela 4.8 resume os resultados relacionados à obtenção das impedâncias harmônicas. Por último, a Tabela 4.9 trata da determinação das parcelas de responsabilidades para esse caso.

Tabela 4.7 – Dados de entrada para aplicação do procedimento na condição operacional II.

Ordem Harm.	\dot{V}_h [V]	\dot{I}_h [A]	\dot{V}'_h [V]	\dot{I}'_h [A]	\dot{Z}_{cap-h} [Ω] ($V_{ref} = 13,8$ kV)
5 ^a	343,44∠99,37°	14,63∠140,62°	335,34∠99,70°	13,49∠136,9°	265,26∠-90°
7 ^a	358,42∠-149,78°	18,63∠-95,39°	339,57∠-148,60°	16,23∠-97,90°	189,47∠-90°
11 ^a	376,86∠-44,51°	28,54∠25,25°	336,15∠-30,22°	22,87∠37,13°	120,57∠-90°
13 ^a	160,85∠-105,72°	14,34∠-31,36°	189,17∠-88,39°	15,09∠-15,92°	102,02∠-90°

Tabela 4.8 – Impedâncias harmônicas fornecidas pela metodologia na condição operacional II.

Ordem Harm.	$\dot{Z}_{carga-h} [\Omega]$ ($V_{ref} = 13,8 \text{ kV}$)	$\dot{Z}_{carga-tot-h} [\Omega]$ ($V_{ref} = 13,8 \text{ kV}$)	$\dot{Z}_{c-h} [\Omega]$ ($V_{ref} = 138 \text{ kV}$)	Erro Percentual de \dot{Z}_{c-h} com relação aos valores esperados (%)
5 ^a	24,88 \angle -37,24°	23,49 \angle -41,28°	2127,41 \angle -33,32°	1,02
7 ^a	20,91 \angle -50,75°	19,23 \angle -54,43°	1530,41 \angle -42,34°	0,68
11 ^a	14,70 \angle -67,32°	13,21 \angle -69,74°	617,81 \angle -40,46°	0,11
13 ^a	12,53 \angle -72,43°	11,21 \angle -74,33°	327,99 \angle -15,81°	0,24

Tabela 4.9 – Compartilhamento de responsabilidades para a condição operacional II.

Ordem Harm.	$\dot{V}_{s-pac-h} [\text{V}]$	$\dot{V}_{c-pac-h} [\text{V}]$	$V_{s-proj-h} [\text{V}]$	$V_{c-proj-h} [\text{V}]$	Resp. Supridor [%]	Resp. Consumidor [%]
5 ^a	3117,87 \angle 137,44°	4,14 \angle 31,01°	3117,87	-1,17	99,96	0,04
7 ^a	2855,76 \angle -167,48°	6,69 \angle 76,25°	2855,75	-2,95	99,90	0,10
11 ^a	1777,73 \angle 15,08°	13,78 \angle -154,04°	1777,73	-13,53	99,24	0,76
13 ^a	473,38 \angle -77,37°	2,27 \angle 28,94°	473,38	-0,63	99,87	0,13

As tabelas anteriores revelam consistência nos resultados fornecidos pelo procedimento também na condição operacional II.

Por fim, a metodologia foi aplicada à condição III, seguindo as mesmas etapas que nos casos anteriores, conforme evidenciam as Tabelas 4.10 a 4.12.

Tabela 4.10 – Dados de entrada para aplicação do procedimento na condição operacional III.

Ordem Harm.	$\dot{V}_h [\text{V}]$	$\dot{I}_h [\text{A}]$	$\dot{V}'_h [\text{V}]$	$\dot{I}'_h [\text{A}]$	$\dot{Z}_{cap-h} [\Omega]$ ($V_{ref} = 13,8 \text{ kV}$)
5 ^a	846,45 \angle 89,94°	101,82 \angle 170,32°	826,32 \angle 90,27°	98,22 \angle 170,41°	265,26 \angle -90°
7 ^a	888,6 \angle -117,73°	80,13 \angle -22,11°	842,01 \angle -116,55°	74,52 \angle -20,08°	189,47 \angle -90°
11 ^a	381,04 \angle 164,46°	38,90 \angle -93,92°	339,92 \angle 178,8°	36,86 \angle -82,42°	120,57 \angle -90°
13 ^a	855,95 \angle -122,53°	61,67 \angle -34,62°	1006,7 \angle -105,22°	70,78 \angle -17,80°	102,02 \angle -90°

Tabela 4.11 – Impedâncias harmônicas fornecidas pela metodologia na condição operacional III.

Ordem Harm.	$\dot{Z}_{carga-h} [\Omega]$ ($V_{ref} = 13,8 \text{ kV}$)	$\dot{Z}_{carga-tot-h} [\Omega]$ ($V_{ref} = 13,8 \text{ kV}$)	$\dot{Z}_{c-h} [\Omega]$ ($V_{ref} = 138 \text{ kV}$)	Erro Percentual de \dot{Z}_{c-h} com relação aos valores esperados (%)
5 ^a	25,10 \angle -37,31°	23,68 \angle -41,38°	2146,04 \angle -33,50°	1,91
7 ^a	20,84 \angle -50,58°	19,16 \angle -54,26°	1525,34 \angle -42,09°	0,35
11 ^a	14,70 \angle -67,36°	13,20 \angle -69,78°	617,04 \angle -40,52°	0,01
13 ^a	12,53 \angle -72,42°	11,21 \angle -74,32°	328,20 \angle -15,81°	0,17

Tabela 4.12 – Compartilhamento de responsabilidades para a condição operacional III.

Ordem Harm.	$\dot{V}_{s-pac-h}$ [V]	$\dot{V}_{c-pac-h}$ [V]	$V_{s-proj-h}$ [V]	$V_{c-proj-h}$ [V]	Resp. Supridor [%]	Resp. Consumidor [%]
5 ^a	3116,84∠137,49°	1705,24∠114,66°	3086,24	1648,66	65,18	34,82
7 ^a	2854,59∠-167,54°	2046,35∠-128,88°	2743,79	1888,71	59,23	40,77
11 ^a	1779,26∠14,99°	2461,65∠-179,40°	-1251,03	2111,64	37,20	62,80
13 ^a	473,78∠-77,36°	1989,56∠-150,88°	226,45	1945,55	10,43	89,57

A apreciação dos resultados mostrados sugere que o método proposto é consistente uma vez que conduziu a valores que tiveram boa correspondência com o que era esperado inclusive na condição operativa III, a qual possui maior complexidade e proximidade com casos reais. Todavia, é importante reconhecer que apesar da excelência qualitativa e quantitativa dos resultados, a metodologia desenvolvida se apoiou em premissas que merecem futuras investigações, como considerado na sequência.

4.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A METODOLOGIA PROPOSTA

Muito embora o método proposto tenha se mostrado bastante promissor a partir dos trabalhos de simulação computacional realizados até o momento, reconhece-se que uma série de desdobramentos, investigações e aperfeiçoamentos são necessários para assegurar a confiabilidade da técnica em condições reais.

Nesse contexto, um dos pontos que merece atenção está relacionado à modelagem de cargas não lineares. Conforme evidenciado, em todos os casos apresentados as cargas causadoras de distorções foram modeladas como fontes de corrente harmônica que se mantiveram constantes para ambas as condições operacionais atreladas com a unidade capacitiva chaveada. Caberia, todavia, uma investigação

detalhada sobre a consistência desta premissa diante de situações reais em campo e eventuais trabalhos voltados para a adequação de modelos, caso este seja o caso.

Acredita-se, ainda, que ao considerar esses aspectos de operação dinâmica dos arranjos elétricos, seja possível chegar a um valor de capacitância de chaveamento ótimo, o qual dependerá das características do sistema analisado.

Uma vez colocados os desafios, pode-se dizer que o método do Chaveamento de Capacitores representa uma potencial alternativa para obtenção das impedâncias harmônicas de uma unidade consumidora de maneira eficiente e prática. Por fim, destaca-se que a consolidação do procedimento poderá tornar segura a aplicação do método da Superposição para a realização de um efetivo compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Esta dissertação de mestrado procurou explorar a temática do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas. Uma vez colocados os aspectos que embasam o entendimento da problemática no capítulo introdutório, o capítulo II prezou pela apresentação das principais metodologias para a atribuição de responsabilidades que são encontradas na literatura. Nesse sentido, os métodos conhecidos como: Fluxo de Potência Harmônica, Corrente Conforme e Não Conforme, Superposição, Superposição Modificado e Análise do Espectro de Frequências foram explorados no que diz respeito aos seus princípios físicos e modelagens matemáticas.

Dando sequência aos trabalhos, o capítulo III apresentou um arranjo elétrico que possibilitou a análise da origem das distorções harmônicas presentes em um ponto de acoplamento entre o sistema equivalente de uma concessionária e uma unidade consumidora industrial, a qual apresentava em sua composição cargas lineares e não lineares. A esse sistema foram aplicados os cinco procedimentos anteriormente citados, de modo que as investigações foram conduzidas levando em consideração três condições operativas distintas: no caso I apenas o consumidor contribuía para as distorções encontradas no PAC, no caso II somente o sistema supridor era responsável

pelos harmônicos constatados e no caso III as partes envolvidas tinham responsabilidades compartilhadas sobre as distorções.

De um modo geral, é cabível afirmar que os resultados fornecidos pelas metodologias do Fluxo de Potência Harmônico, da Corrente Conforme e Não Conforme e da Análise do Espectro de Frequências foram suficientemente claros no sentido de atestar a inviabilidade da aplicação desses procedimentos em sistemas elétricos reais. Até mesmo nas condições de operação I e II, que eram as mais simples, foram constatados erros relevantes que distanciaram consideravelmente os valores encontrados daqueles esperados. Por outro lado, os métodos da Superposição e Superposição Modificado proporcionaram respostas condizentes, os quais evidenciaram a consistência metodológica de tais técnicas.

Todavia, foi ressaltado que a coerência manifestada por esses dois últimos procedimentos não sinaliza, ainda, a resolução da problemática do compartilhamento de responsabilidades. Isso porque, para sua aplicação em determinado ponto de acoplamento, o método da Superposição requer o conhecimento das impedâncias harmônicas das partes envolvidas e, infelizmente, esses dados não são facilmente encontrados e/ou mensurados em campo. Tentando contornar essa dificuldade, o princípio da Superposição Modificado exhibe uma maneira de encontrar as parcelas de responsabilidades das partes envolvidas sem a necessidade do conhecimento das impedâncias harmônicas representativas da carga. Entretanto, esta proposta requer a utilização de filtros harmônicos sintonizados nas frequências que se deseja analisar e, dificuldades associadas com a disponibilização destes arranjos para sistemas elétricos genéricos, certamente restringem a aplicação em campo do método.

Diante desse cenário, as constatações sobre as lacunas ainda existentes no que tange ao assunto em pauta motivaram a realização desta pesquisa de mestrado, a qual

buscou caminhos que pudessem apontar em uma direção capaz de avançar na busca por um meio de realizar o compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas de maneira sólida, consistente e, evidentemente, factível de aplicação prática.

Dessa maneira, no capítulo IV foi apresentada uma proposta alternativa nomeada como Método do Chaveamento dos Capacitores. Como os bancos de capacitores são equipamentos amplamente utilizados em unidades consumidoras industriais, considera-se que o método seja viável para aplicações em campo.

Como visto, este processo possui por cerne a busca de meios para a obtenção das impedâncias harmônicas de uma unidade consumidora, com vistas à posterior aplicação segura do Método da Superposição. De modo geral, a técnica apresentada se baseia na mudança das condições operativas do ponto a partir do qual se deseja obter as impedâncias harmônicas, por meio do chaveamento de um banco de capacitores, e a obtenção de informações derivadas de medições em campo que conduzam a um mecanismo de cálculo voltado para a determinação das impedâncias harmônicas ora requeridas.

Após exposição dos princípios que nortearam os desenvolvimentos propostos, o capítulo IV ainda compreendeu a análise de desempenho da metodologia, empregando o mesmo sistema teste utilizado nos trabalhos de avaliação anteriores. Observou-se, então, que os resultados encontrados para as impedâncias da unidade consumidora nas diferentes frequências harmônicas que compunham o estudo estavam em total consonância com os valores esperados. Assim, de posse desses valores das impedâncias, ao lançar mão do princípio da Superposição foi possível chegar, de maneira eficaz, às parcelas de responsabilidades que deveriam ser atribuídas a cada parte envolvida.

Não obstante aos resultados promissores evidenciados até o momento, reconhece-se que a técnica ainda carece de maiores investigações e adaptações para viabilizar seu emprego em sistemas reais. Dessa forma, como trabalhos futuros com vistas à consolidação da metodologia aqui proposta, destaca-se a necessidade de:

- Avaliar o desempenho da metodologia do chaveamento de capacitores levando em consideração condições dinâmicas de operação dos sistemas elétricos, como acontece em complexos reais e, dentro destas premissas, se haveria um valor de capacitância considerado ótimo para o processo de chaveamento;
- Analisar a resposta da metodologia em condições adversas de funcionamento, de forma a contemplar: a interdependência entre as gerações de correntes harmônicas com variações das tensões, a presença de ressonâncias harmônicas, dentre outros fatores;
- Aplicar o processo em ambiente laboratorial controlado e em campo, com vistas a avaliação de desempenho objetivando o aperfeiçoamento e a adaptação do procedimento para aplicações no contexto do setor elétrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty, “Electrical Power Systems Quality” – Third Edition, McGraw-Hill, New York, 2012.
- [2] Jos Arrillaga, Neville R. Watson, “Power System Harmonics”, John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, 1985.
- [3] EN – European Standard, “Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems”, EN 50160:2010.
- [4] IEC – International Electrotechnical Commission. Electromagnetic Compatibility, (EMC) - Part 3: Limits - Section 6: “Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems - Basic EMC publication”, IEC 61000-3-6, 2008.
- [5] IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers, “Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems”, IEEE Standard 519-2014.
- [6] M. Barbosa, “Análise Comparativa entre as normas IEEE e IEC”, Eletricidade Moderna, Ano 42, nº 478, Jan. 2014, pp. 68-75.
- [7] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, “Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST”. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Brasília, 2012.
- [8] ONS – Operador Nacional do Sistema, “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”, Nov. 2011.
- [9] George J. Wakileh, “Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design”, Springer, Berlin, 2010.

- [10] A. E. Emanuel, "Harmonic cost allocation: a difficult task". In: IEEE Power Eng. Soc. Summer Meet. v. 1, p. 333-338, 1999.
- [11] T. Tanaka, H. Akagi, "A new method of harmonic power detection based on the instantaneous active power in three-phase circuits". IEEE Trans. Power Del., v. 10, n. 4, p. 1737-1742, 1995.
- [12] P. H. Swart, M. J. Case, J. D. Van Wyk, "On techniques for localization of sources producing distortion in three-phase networks". Eur. Trans. Elect. Power, v. 6, n. 6, p. 391-396, 1996.
- [13] L. Cristaldi, A. Ferrero, "Harmonic power flow analysis for the measurement of the electric power quality". IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, v. 44, n. 3, p. 683-685, 1995.
- [14] W. M. Lin, C. H. Lin, K. P. Tu, C. H. Wu, "Multiple harmonic source detection and equipment identification with cascade correlation network". IEEE Trans. Power Del., v. 20, n. 3, p. 2166-2173, 2005.
- [15] A. Leiria, A. Morched, M. T. C. Barros, "Identification of harmonic content and their origin in power networks". In: IEEE BOLOGNA POWERTECH CONFERENCE, 2003.
- [16] R. Azouaou, S. Rabahallah, S. Leuimi, "Study of the direction of the harmonic injections in the electrical power systems". In: UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE, 2004. p. 944-947.
- [17] W. Xu, X. Liu, Y. Liu, "An investigation on the validity of power-direction method for harmonic source determination". IEEE Trans. Power Del., v. 18, n. 1, p. 214-219, 2003.
- [18] I. N. Santos, J. C. Oliveira, S. F. P. Silva, "Critical Evaluation of the Performance of the Method of Harmonic Power Flow to Determine the Dominant Source of Distortion", IEEE Latin America Transactions, Vol. 9, No. 5, pp 740-746, September, 2011.

- [19] K. Srinivasan, "On separating customer and supply side harmonic contributions", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, April 1996.
- [20] K. Srinivasan, R. Jutras, "Conforming and non-conforming current for attributing steady state power quality problems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, January 1998.
- [21] A. C. Santos, J. C. Oliveira, I. N. Santos, C. E. Tavares, "Avaliação do Método da Corrente Conforme e Não-Conforme para Compartilhamento de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas", Anais Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Foz do Iguaçu/PR, 2014.
- [22] I. N. Santos, "Uma Contribuição à Avaliação de Desempenho dos Principais Métodos Para a Atribuição de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas". Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.
- [23] W. Xu, Y. Liu, "A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling". IEEE Trans. Power Del., v. 15, n. 2, p. 804-811, 2000.
- [24] W. Xu, Y. Liu, "A method to determine customer harmonic contributions for incentive-based harmonic control applications". In: IEEE PANEL ON HARMONIC MEASUREMENTS AND ALLOCATION, 1999. p. 361-366.
- [25] S. F. P. Silva, J. C. Oliveira, "The sharing of responsibility between the supplier and the consumer for harmonic voltage distortion: a case study". Electric Power System Research, v. 78, n. 11, p. 1959-1964, 2008.
- [26] F. H. Costa, I. N. Santos, S. F. P. Silva, J. C. Oliveira, "A case study of sharing the harmonic voltage distortion responsibility between the utility and the consumer". Renewable Energies and Power Quality Journal, n. 7, paper 327, 2009.
- [27] S. F. P. Silva, "Uma proposta para o compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas". 2007. 179 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

- [28] A. Oliveira, J. C. Oliveira, J. W. Resende, M. S. Miskulin, “Practical approaches for AC system harmonic impedance measurements”. IEEE Trans. Power Del., v. 6, n. 4, p. 1721-1726, 1991.
- [29] A. A. Girgis, R. B. Mcmanis, “Frequency domain techniques for modeling distribution or transmission networks using capacitor switching induced transients”. IEEE Trans. Power Del., v. 4, n. 3, p. 1882-1890, 1989.
- [30] W. Xu, E. E. Ahmed, X. Zhang, X. Liu, “Measurement of network harmonic impedances: practical implementation issues and their solutions”. IEEE Trans. Power Del., v. 17, n. 1, p. 210-216, 2002.
- [31] W. Wang, E. E. Nino, W. Xu, “Harmonic impedance measurement using a thyristor-controlled short circuit”. IET Generation, Transmission and Distribution, v. 1, n. 5, p. 707-713, 2007.
- [32] F. H. Costa, “Uma contribuição à avaliação de desempenho dos principais métodos para a modelagem de cargas nos estudos do compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas”. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.
- [33] Q. I. Fei, L.I. Jian-wen, L.I. Yong-gang, S.U.N. Wei, L.I. Zhong-liang, “Research on the Responsibility Partition of Harmonic Pollution and Harmonic Impedance Based on the Total Least-squares Regression Method”, International Conference on Power System Technology, Chengdu, 2014.
- [34] I. N. Santos, “Método da Superposição Modificado como uma Nova Proposta de Atribuição de Responsabilidades sobre Distorções Harmônicas”. Tese (Doutorado). – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.
- [35] I. N. Santos, J. C. Oliveira, “A Proposal of Methodology for the Assignment of Responsibilities on Harmonic Distortions Using the Superposition Principle”, Revista IEEE América Latina, v. 12, p. 1418-1423, 2014.

- [36] F. M. Fernandez, P. S. Chandramohanan Nair, “Method for separation of customer and utility contributions of harmonics at point of common coupling”, IET Generation, Transmission & Distribution, v. 7, n. 4, p. 374-381, 2013.
- [37] A. C. Santos, J. C. Oliveira, I. N. Santos, C. E. Tavares, “Avaliação Crítica do Método do Compartilhamento de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas Baseado na Análise do Espectro de Frequências”, Anais da Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, Uberlândia/MG, 2014.
- [38] R. K. Hartana, G. G. Richards, “Harmonic source monitoring and identification using neural networks”. IEEE Trans. Power Del., v. 5, n. 4, p. 1098- 1104, 1990.
- [39] J. Mazumdar, R. G. Harley, F. Lambert, “System and method for determining harmonic contributions from non-linear loads using recurrent neural networks”. In: International Joint Conference on Neural Networks, Montreal, 2005.
- [40] D. Srinivasan, W. S. Ng, A. C. Liew, “Neural-network-based signature recognition for harmonic source identification”. IEEE Trans. Power Del., v. 21, n. 1, p. 398-405, 2006.
- [41] J. Mazumdar, et al. “Intelligent tool for determining the true harmonic current contribution of a customer in a power distribution network”. IEEE Trans. Industry Applications, v. 44, n. 5, p. 1477-1485, 2008.
- [42] A. R. A. Manito, U. H. Bezerra, M. E. L. Tostes, T. M. Soares, “Estimação da Contribuição de Cargas Não Lineares na Distorção Harmônica de Tensão de um Barramento de Interesse do Sistema Elétrico Utilizando Rede Neural Artificial”, Anais Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Foz do Iguaçu/PR, 2014.
- [43] H. Ma, A. A. Girgis, “Identification and tracking of harmonic sources in a power system using a Kalman filter”. IEEE Trans. Power Del., v. 11, n. 3, p. 1659-1665, 1996.
- [44] Kent K. C. Yu, N. R. Watson, J. Arrillaga, “An adaptive Kalman filter dynamic harmonic state estimation and harmonic injection tracking”. IEEE Trans. Power Del., v. 20, n. 2, p. 1577-1584, 2005.

- [45] S. R. Naidu, et al. “Contribuições da distorção harmônica de tensão entre concessionária e consumidor”. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, Campina Grande, 2006.
- [46] Z. P. Du, J. Arrilaga, S. C. Watson, “Identification of harmonic sources of power systems using state estimation”, Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm. Distrib., vol. 146, pp. 7-12, Jan. 1999.
- [47] Mau Teng Au, J. V. Milanovic, “Development of Stochastic Aggregate Harmonic Load Model Based on Field Measurements”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 22, no. 1, pp. 323-330, January 2007.
- [48] S. A. Arefifar, W. Xu, “Online Tracking of Power System Impedance Parameters and Field Experiences”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 24, no. 4, pp. 1781-1788, Oct.2009.
- [49] C. F. M. Almeida, “Distribuídas de Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência”. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- [50] T. M. Soares, “Estimação da Contribuição de Múltiplas Fontes Harmônicas utilizando Regressão Não Paramétrica”. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.
- [51] G. D. Breuer, J. H. Chow, T. J. Gentile, et al. “HVDC-AC harmonic interaction Part I - Development of a harmonic measurement system hardware and software”. IEEE Trans., PAS 101, 701-708, 1982.
- [52] W. P. Baker, “The measurement of the system impedance at harmonic frequencies”. International Conference on Harmonics in Power Systems, UMIST, Manchester, 1981.
- [53] E. B. Makram, S. Varadan, “A Generalized Load Modeling in Presence of Harmonics and Distortion”, Proceedings Twenty-Fifth Southeastern Symposium on System Theory, pp. 124-128, March 1993.

[54] M. M. M. El Arini, "A Time Domain Load Modeling Technique and Harmonics Analysis", 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Proceedings Volume II, pp. 930-938, October 1998.

[55] S. A. Soliman, A. M. Al-Kandari, "A Simple and Noval Technique for Linear and Nonlinear Load Modeling in the Time Domain", 8th Mediterranean Electrotechnical Conference, Volume 3, pp. 1616-1619, May 1996.