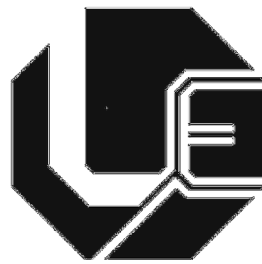


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



**MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO
MODIFICADO COMO UMA NOVA
PROPOSTA DE ATRIBUIÇÃO DE
RESPONSABILIDADES SOBRE
DISTORÇÕES HARMÔNICAS**

Ivan Nunes Santos

Uberlândia
2011

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

**MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO MODIFICADO COMO
UMA NOVA PROPOSTA DE ATRIBUIÇÃO DE
RESPONSABILIDADES SOBRE DISTORÇÕES
HARMÔNICAS**

Tese apresentada por Ivan Nunes Santos à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Ciências. Aprovada em 02 de dezembro de 2011 pela Banca Examinadora:

José Carlos de Oliveira, Ph.D (Orientador) - UFU
Antônio César Baleeiro Alves, Dr. – UFG
Ivan Marques de Toledo Camargo, Dr. – UnB
José Wilson Resende, Ph.D - UFU
Sérgio Ferreira de Paula Silva, Dr. – UFU

Espaço reservado ao Setor de Catalogação e Classificação
do Sistema de Bibliotecas da UFU.

MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO MODIFICADO COMO UMA NOVA PROPOSTA DE ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES SOBRE DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Ivan Nunes Santos

Tese apresentada por Ivan Nunes Santos à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Prof. José Carlos de Oliveira
Orientador

Prof. Alexandre Cardoso
Coordenador da Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à
Ana Cristina por sua amizade,
por seu afeto e por todo
seu amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família: Ana Cristina, meus pais Ivo e Nelita, meu irmão Nelivan, T. Nenê (*in memoriam*), Ana Paula, João Pedro, Francisca, Juliano, Joelma, D. Marli, S. João, pelo carinho, amizade e apoio incondicional.

Meus agradecimentos ao Prof. José Carlos de Oliveira por todos seus ensinamentos, por sua dedicação e por sua amizade.

A todos os colegas de pós-graduação, Alex Reis, Fabrício Parra e Gabi, Fernanda Hein e Thiago, Isaque, João Areis, Loana Velasco, Thiago Vieira, Arthur, Arnaldo, Guilherme Leal, Paulo Henrique, Paulo Naves, Nilo, Fernando Belchior, Ana Cláudia, Adeon, pela amizade e apoio.

Aos colegas de profissão, Cadu e Angélica, Sérgio Ferreira, José Rubens, Pratinha Filho, Augusto, Luciano Coutinho, José Wilson, Marcelo Linz, Milton Samesima, Kleiber, pelo companheirismo e apoio.

Aos colegas servidores, Cinara, Kátia, Zé Maria, Rubinho, Carlinho, pelo apoio em todos os momentos.

À Instituição Universidade Federal de Uberlândia pelo suporte físico, material e humano.

RESUMO

Orientações contidas em documentos aprovados pela ANEEL e ONS contemplam, dentre outros indicadores de qualidade da energia elétrica, a temática das distorções harmônicas. Tais textos abordam, no contexto das distorções harmônicas, distintos assuntos vinculados com: definições, procedimentos de medição, valores de referência, etc. À luz destas determinações e reconhecendo que as soluções mitigadoras para a adequação dos indicadores de desempenho envolvem expressivos custos financeiros, surge a questão da busca de meios para a determinação das responsabilidades sobre eventuais violações dos limites preestabelecidos para as distorções harmônicas.

Dentre as propostas encontradas na literatura para a caracterização das parcelas de responsabilidades entre os agentes envolvidos, a saber, o supridor e o consumidor, há de se reconhecer que, de um modo geral, as metodologias fundamentadas em princípios que utilizam o domínio da frequência, conciliado com a superposição de efeitos, têm-se mostrado mais promissoras.

Não obstante a simplicidade deste procedimento no que tange aos seus conceitos vale ressaltar que diversas publicações que tratam do tema têm indicado que os processos de compartilhamento assim fundamentados se mostram com potencialidades promissoras e, paradoxalmente, com limitações impostas pelo desconhecimento das informações requeridas para aplicação da estratégia, qual seja, necessidade do prévio conhecimento das impedâncias do sistema supridor e do consumidor.

Visando oferecer meios para contornar tais dificuldades surge a presente tese, a qual visa contribuir no sentido de se estabelecer uma sistemática adequada aos fins aqui postos. Adicionalmente aos fundamentos físicos, o trabalho ainda se propõe a avançar na direção da validação e consolidação da nova proposta metodológica, qual seja, o Método da Superposição Modificado, para o cumprimento dos desafios ora estabelecidos.

Palavras-Chave: compartilhamento de responsabilidade, distorções harmônicas, princípio da superposição, potência harmônica, qualidade da energia elétrica.

ABSTRACT

Guidelines provided by the Brazilian Electricity Distribution Agency and the National Operator Grid considers, amongst other power quality indicators, issues associated to harmonic distortions. Such documents, as far as harmonics are concerned, are focused to different goals such as definitions, measurement procedures, reference values, etc. Having in mind these orientations and by recognizing that mitigation techniques to adequate the harmonic levels to the recommended values are frequently linked to high costs emerges the necessity of ways to find, at a given PCC, the harmonic distortion percentile due to the utility and the consumer itself.

Within this context, a few publications have attempted to provide means to share the responsibility upon a measured voltage distortion and, usually, the approaches are based on frequency domain procedures and superposition principles. These have shown to be promising but the final methodology is still to be fulfilled. Although the simplicity of such approaches it has been found that the difficulties at obtaining the required supply system and consumer equivalent harmonic impedance are quite limiting to the use of such strategies.

Aiming at achieving a manner of overcome such matters emerges this thesis which context is dedicated to the search of a systematic manner of sharing the responsibilities for a given busbar distortion. The work is then developed towards the investigation of the current methods limitations and inaccuracy and to propose a new mechanism that allows for attributing the percentile origin of the distortions. This has been called by Modified Superposition Method and its fundamentals, procedures, computational results, etc. are fully described in the work.

Keywords: harmonic distortions, harmonic power, power quality, sharing of responsibility, superposition approach.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL.....	23
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	23
1.2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E ESTADO DA ARTE.....	24
1.2.1. Quanto aos fundamentos de análise.....	24
1.2.2. Quanto à terminologia aplicável.....	25
1.2.3. Quanto aos documentos normativos.....	27
1.2.4. Quanto aos procedimentos para o compartilhamento.....	29
1.2.5. Quanto aos trabalhos realizados no âmbito da Universidade Federal de Uberlândia.....	31
1.3. CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA TESE.....	32
1.4. ESTRUTURA DA TESE.....	33

CAPÍTULO II

METODOLOGIAS PARA ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES SOBRE AS DISTORÇÕES HARMÔNICAS.....	35
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	35
2.2. MÉTODO DO FLUXO DE POTÊNCIA.....	36
2.2.1. Fundamentação do método.....	37
2.2.2. Avaliação computacional da metodologia.....	42
2.3. MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO.....	49
2.3.1. Fundamentação do método.....	50

a) <i>Método da superposição de correntes</i>	53
b) <i>Método da superposição de tensões</i>	54
2.3.2. Avaliação computacional da metodologia.....	57
2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64

CAPÍTULO III

MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO MODIFICADO	66
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	66
3.2. DEFINIÇÃO DO MÉTODO.....	67
3.3. AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO DO MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO MODIFICADO.....	73
3.3.1. Arranjo elétrico.....	73
3.3.2. Resultados obtidos através da aplicação da Metodologia da Superposição Modificada.....	75
3.3.3. Valores esperados para as responsabilidades sobre as distorções harmônicas.....	78
3.3.4. Análise comparativa dos resultados.....	79
3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	80

CAPÍTULO IV

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE DESEMPENHO DO MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO MODIFICADO	82
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	82
4.2. ARRANJO EXPERIMENTAL.....	83
4.3. ESTUDO DE CASOS.....	90
4.3.1. Caso 1 – Consumidor com carga não linear fortemente dominante.....	91
4.3.2. Caso 2 – Consumidor com carga não linear dominante.....	92

4.3.3. Caso 3 – Sistema supridor com carga não linear dominante...	93
4.3.4. Caso 4 – Sistema supridor com carga não linear fortemente dominante.....	95
4.4. RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DA SUPERPOSIÇÃO MODIFICADA.....	96
4.5. VALORES ESPERADOS PARA AS RESPONSABILIDADES SOBRE AS DISTORÇÕES HARMÔNICAS.....	99
4.6. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS.....	102
4.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	103
 CAPÍTULO V	
ESTRATÉGIAS PARA DEFINIÇÃO DA IMPEDÂNCIA DOMINANTE.....	105
5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	105
5.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE FILTROS HARMÔNICOS.....	106
5.2.1. Filtro harmônico sintonizado.....	109
<i>a) Filtro sintonizado em uma frequência.....</i>	<i>109</i>
<i>b) Filtro sintonizado em duas frequências.....</i>	<i>112</i>
<i>c) Filtro sintonizado em três frequências.....</i>	<i>114</i>
5.2.2. Filtro harmônico amortecido.....	116
<i>a) Filtro amortecido de primeira ordem.....</i>	<i>116</i>
<i>b) Filtro amortecido de segunda ordem.....</i>	<i>117</i>
<i>c) Filtro amortecido de terceira ordem.....</i>	<i>118</i>
<i>d) Filtro amortecido tipo C.....</i>	<i>120</i>
5.3. ANÁLISE COMPARATIVA DAS ESTRATÉGIAS PARA OBTENÇÃO DA IMPEDÂNCIA DOMINANTE.....	121
5.3.1. Arranjo elétrico hipotético simplificado.....	122

5.3.2. Arranjo elétrico de 14 barras – padrão IEEE.....	131
5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	144
CAPÍTULO VI	
CONCLUSÕES.....	147
CAPÍTULO VII	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	153

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Circuito harmônico equivalente para fins de avaliação matemática.....	39
Figura 2.2 – Circuito harmônico equivalente de Norton.....	40
Figura 2.3 – Circuito elétrico utilizado para os estudos computacionais avaliativos do desempenho do Método do Fluxo de Potência Harmônica.....	43
Figura 2.4 – Variações em magnitude e sinal das potências harmônicas de ordem 3 em função das alterações impostas para α_{s-3h} e α_{s-5h}	48
Figura 2.5 – Variações em magnitude e sinal das potências harmônicas de ordem 5 em função das alterações impostas para α_{s-3h} e α_{s-5h}	48
Figura 2.6 – Complexo elétrico constituído por um supridor e um consumidor contendo cargas lineares e não lineares.....	50
Figura 2.7 – Circuito equivalente de Norton para uma dada ordem harmônica h	51
Figura 2.8 – Circuitos equivalentes de Norton para uma ordem harmônica h considerando: (a) contribuição da fonte e (b) contribuição do consumidor.....	52
Figura 2.9 – Decomposição da corrente no PAC em dois escalares obtidos das projeções.....	54
Figura 2.10 – Decomposição da tensão no PAC em dois escalares obtidos das projeções.....	55
Figura 2.11 – Arranjo elétrico para estudos de desempenho das metodologias via superposição de correntes e de tensões.....	58
Figura 2.12 – Circuito equivalente de Norton de ordem h para o sistema elétrico proposto.....	59
Figura 2.13 – Circuito equivalente de Norton para uma ordem harmônica h – visto do PAC.....	60
Figura 2.14 – Parametrização do circuito equivalente de Norton – ordem harmônica 5.....	60
Figura 3.1 – Arranjo físico relacionado com o Método da Superposição Modificado..	69
Figura 3.2 – Circuitos equivalentes indicando as contribuições individuais da fonte e consumidor – com a inserção da impedância harmônica dominante para uma ordem h	70
Figura 3.3 – Decomposição da corrente no filtro em dois escalares obtidos das projeções.....	72
Figura 3.4 – Arranjo elétrico adotado para os estudos computacionais de desempenho da metodologia proposta.....	74

Figura 3.5 – Circuito equivalente de Norton para a ordem harmônica 5 com a inserção do filtro sintonizado no PAC.....	76
Figura 3.6 – Circuito equivalente de Norton para a ordem harmônica 5.....	78
Figura 4.1 – Diagrama de blocos do arranjo experimental usado para avaliação de desempenho da Metodologia da Superposição Modificada.....	84
Figura 4.2 – Detalhes do arranjo físico utilizado para avaliação de desempenho da metodologia proposta.....	85
Figura 4.3 – Fonte HP usada nos experimentos.....	87
Figura 4.4 – Medidores RMS usados nos experimentos.....	88
Figura 4.5 – Arranjo físico utilizado para avaliação de desempenho da metodologia proposta.....	89
Figura 4.6 – Filtro harmônico sintonizado em 180Hz.....	90
Figura 4.7 – Detalhes do arranjo físico utilizado para avaliação experimental de desempenho da metodologia proposta – Caso 1.....	92
Figura 4.8 – Detalhes do arranjo físico utilizado para avaliação experimental de desempenho da metodologia proposta – Caso 2.....	93
Figura 4.9 – Detalhes do arranjo físico utilizado para avaliação experimental de desempenho da metodologia proposta – Caso 3.....	94
Figura 4.10 – Detalhes do arranjo físico utilizado para avaliação experimental de desempenho da metodologia proposta – Caso 4.....	95
Figura 4.11 – Correntes medidas e requeridas para aplicação do Método da Superposição Modificado.....	97
Figura 4.12 – Circuito equivalente de Norton para ordem harmônica 3.....	101
Figuras 5.1 – Principais arranjos para os filtros harmônicos sintonizados.....	108
Figuras 5.2 – Principais arranjos para os filtros harmônicos amortecidos.....	108
Figuras 5.3 – Desempenho da impedância harmônica para um filtro sintonizado em uma frequência: (a) módulo da impedância equivalente versus frequência angular; (b) ângulo da impedância equivalente versus frequência angular.....	111
Figuras 5.4 – Desempenho da impedância harmônica para um filtro sintonizado em duas frequências: (a) módulo da impedância equivalente versus frequência angular; (b) resistência versus a reatância equivalente do filtro em função da frequência angular.....	113
Figuras 5.5 – Desempenho da impedância harmônica para um filtro sintonizado em três frequências: (a) módulo da impedância equivalente versus frequência angular; (b) resistência versus a reatância equivalente do filtro em função da frequência angular....	115
Figuras 5.6 – Desempenho da impedância harmônica para um filtro amortecido de 1ª ordem: módulo da impedância equivalente versus frequência angular.....	117
Figuras 5.7 – Desempenho da impedância harmônica para um filtro amortecido de 2ª ordem: módulo da impedância equivalente versus frequência angular.....	118

Figuras 5.8 – Desempenho da impedância harmônica para um filtro amortecido de 3ª ordem: módulo da impedância equivalente versus frequência angular.....	119
Figuras 5.9 – Desempenho da impedância harmônica para um filtro amortecido tipo C: módulo da impedância equivalente versus frequência angular.....	121
Figuras 5.10 – Arranjo elétrico hipotético simplificado adotado para os estudos computacionais de desempenho das estratégias de filtragem harmônica.....	123
Figuras 5.11 – Circuito equivalente de Norton para a 5ª ordem harmônica.....	124
Figuras 5.12 – Circuito equivalente de Norton para a 7ª ordem harmônica.....	124
Figuras 5.13 – Circuito equivalente de Norton para a 11ª ordem harmônica.....	125
Figuras 5.14 – Sistema padrão de 14 barras IEEE.....	132
Figuras 5.15 – Circuito equivalente de Norton – ordem genérica h – observado a partir da barra 14 do sistema de 14 barras do IEEE.....	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais de tensão em porcentagem da tensão fundamental – PRODIST.....	27
Tabela 1.2 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão em porcentagem da tensão fundamental – PRODIST.....	28
Tabela 2.1 – Potência ativa e tensão harmônica no PAC (V_{pac-h}) – supridor puramente senoidal e carga contendo componentes não lineares.....	44
Tabela 2.2 – Resultados computacionais para as duas condições idealizadas para a operação do complexo elétrico – tensões e correntes harmônicas de ordem 3 e 5 no PAC.....	45
Tabela 2.3 – Caracterização dos casos investigados computacionalmente.....	46
Tabela 2.4 – Resultado das simulações computacionais – potências harmônicas ativas de ordem 3 - P_{pac-3h}	47
Tabela 2.5 – Resultado das simulações computacionais – potências harmônicas ativas de ordem 5 - P_{pac-5h}	47
Tabela 2.6 – Correntes no PAC e contribuições dos agentes envolvidos.....	61
Tabela 2.7 – Tensões no PAC e contribuições dos agentes envolvidos.....	63
Tabela 3.1 – Parâmetros por fase do filtro sintonizado de ordem 5 inserido no sistema.....	75
Tabela 3.2 – Correntes harmônicas – com filtro sintonizado.....	77
Tabela 3.3 – Percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor – tensão harmônica de ordem 5 – Método da Superposição Modificado....	77
Tabela 3.4 – Percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor – tensão harmônica de ordem 5 – valores esperados.....	79
Tabela 3.5 – Quadro comparativo entre os resultados de atribuição de responsabilidades - valores esperados versus metodologia proposta – avaliação computacional.....	80
Tabela 4.1 – Parâmetros do reator a núcleo saturado.....	87
Tabela 4.2 – Parâmetros do filtro harmônico sintonizado em 180Hz.....	89
Tabela 4.3 – Parâmetros do arranjo físico utilizado nos experimentos – Caso 1.....	91
Tabela 4.4 – Parâmetros do arranjo físico utilizado nos experimentos – Caso 2.....	93
Tabela 4.5 – Parâmetros do arranjo físico utilizado nos experimentos – Caso 3.....	94
Tabela 4.6 – Parâmetros do arranjo físico utilizado nos experimentos – Caso 4.....	96

Tabela 4.7 – Correntes medidas – com inserção do filtro harmônico de ordem 3 junto ao PAC.....	97
Tabela 4.8 – Percentuais de responsabilidade entre o sistema supridor e o consumidor – tensão harmônica de ordem 3 – Método da Superposição Modificado....	98
Tabela 4.9 – Correntes e tensões harmônicas de ordem 3 – medição – filtro harmônico desconectado.....	100
Tabela 4.10 – Impedâncias e fontes de correntes harmônicas equivalentes de ordem 3	101
Tabela 4.11 – Valores esperados para as parcelas de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor – tensão harmônica de ordem 3 – método da superposição de tensões.....	102
Tabela 4.12 – Quadro comparativo entre os resultados de atribuição de responsabilidades – valores esperados versus metodologia proposta – avaliação experimental.....	103
Tabela 5.1 – Percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor – valores esperados.....	126
Tabela 5.2 – Casos avaliados e respectivas parametrizações dos filtros empregados....	127
Tabela 5.3 – Correntes harmônicas à montante, à jusante e no filtro harmônico.....	128
Tabela 5.4 – Percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor – distorção harmônica de ordem 5 – Método da Superposição Modificado.....	128
Tabela 5.5 – Percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor – distorção harmônica de ordem 7 – Método da Superposição Modificado.....	129
Tabela 5.6 – Percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor – distorção harmônica de ordem 11 – Método da Superposição Modificado.....	129
Tabela 5.7 – Quadro síntese dos percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor encontrados e valores esperados.....	130
Tabela 5.8 – Módulos das impedâncias harmônicas dos filtros em cada uma das ordens harmônicas avaliadas.....	130
Tabela 5.9 – Parâmetros dos elementos constituintes do sistema de 14 barras do IEEE.....	133
Tabela 5.10 – Fontes de distorções adicionadas ao sistema de 14 barras do IEEE.....	135
Tabela 5.11 – Distorções individuais e totais de tensão no sistema de 14 barras do IEEE com a inserção das fontes harmônicas de corrente.....	135
Tabela 5.12 – Impedâncias e fontes harmônicas equivalentes do sistema elétrico estabelecido.....	137
Tabela 5.13 – Percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor – valores esperados.....	138
Tabela 5.14 – Casos avaliados e respectivas parametrizações dos filtros empregados – sistema de 14 barras do IEEE.....	139

Tabela 5.15 – Correntes harmônicas à montante, à jusante e no filtro harmônico – sistema de 14 barras do IEEE – barra 14.....	140
Tabela 5.16 – Percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor – distorção harmônica de ordem 5 – Método da Superposição Modificado.....	140
Tabela 5.17 – Percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor – distorção harmônica de ordem 7 – Método da Superposição Modificado.....	141
Tabela 5.18 – Percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor – distorção harmônica de ordem 11 – Método da Superposição Modificado.....	141
Tabela 5.19 – Quadro síntese dos percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor e respectivas correlações com os valores esperados.....	142
Tabela 5.20 – Distorções harmônicas individuais de tensão verificadas com e sem conexão do filtro na barra analisada.....	142
Tabela 5.21 – Percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor e respectivas correlações com os valores esperados – banco de capacitores de 10% da potência reativa da carga.....	143

LISTA DE SÍMBOLOS

$DIT_h\%$	– Distorção harmônica individual de tensão de ordem h em porcentagem da fundamental
$DII_h\%$	– Distorção harmônica individual de corrente de ordem h em porcentagem da fundamental
$DTT\%$	– Distorção harmônica total de tensão em porcentagem da fundamental
$DTI\%$	– Distorção harmônica total de corrente em porcentagem da fundamental
h	– Ordem harmônica
V_h	– Magnitude da tensão harmônica de ordem h
V_1	– Magnitude da tensão fundamental ou de referência
I_h	– Magnitude da corrente harmônica de ordem h
I_1	– Magnitude da corrente fundamental ou de referência
V_N	– Tensão nominal do barramento
PAC	– Ponto de Acoplamento Comum
P	– Potência ativa
ϕ_h	– Defasagem angular entre a tensão e a corrente harmônica de ordem h
ϕ_1	– Defasagem angular entre a tensão e a corrente harmônica fundamental
P_h	– Potência harmônica ativa de ordem h
\dot{V}_{s-h}	– Tensão harmônica equivalente de ordem h produzida pelo supridor
α_{s-h}	– Ângulo de fase da tensão harmônica equivalente de ordem h produzida pelo supridor
\dot{V}_{c-h}	– Tensão harmônica equivalente de ordem h produzida pelo consumidor
α_{c-h}	– Ângulo de fase da tensão harmônica equivalente de ordem h produzida pelo consumidor
\dot{Z}_{s-h}	– Impedância harmônica equivalente de ordem h do supridor
R_{s-h}	– Componente resistiva da impedância harmônica equivalente de ordem h do supridor
X_{s-h}	– Componente reativa da impedância harmônica equivalente de ordem h do supridor
θ_{s-h}	– Ângulo de fase da impedância harmônica equivalente de ordem h do supridor
\dot{Z}_{c-h}	– Impedância harmônica equivalente de ordem h do consumidor

R_{c-h}	– Componente resistiva da impedância harmônica equivalente de ordem h do consumidor
X_{c-h}	– Componente reativa da impedância harmônica equivalente de ordem h do consumidor
θ_{c-h}	– Ângulo de fase da impedância harmônica equivalente de ordem h do consumidor
P_{pac-h}	– Potência harmônica ativa de ordem h verificada no PAC
δ_h	– Diferença angular entre as tensões harmônicas do supridor e do consumidor para a ordem h
\dot{I}_{s-h}	– Corrente harmônica equivalente de ordem h produzida pelo supridor
β_{s-h}	– Ângulo de fase da corrente harmônica equivalente de ordem h produzida pelo supridor
\dot{I}_{c-h}	– Corrente harmônica equivalente de ordem h produzida pelo consumidor
β_{c-h}	– Ângulo de fase da corrente harmônica equivalente de ordem h produzida pelo consumidor
λ_h	– Diferença angular entre as correntes harmônicas do supridor e do consumidor para ordem h
\dot{V}_{pac-h}	– Tensão harmônica de ordem h determinada ou medida no PAC
\dot{I}_{pac-h}	– Corrente harmônica de ordem h determinada ou medida no PAC
$\dot{I}_{s-pac-h}$	– Contribuição de corrente harmônica de ordem h da concessionária para a corrente \dot{I}_{pac-h}
$\dot{I}_{c-pac-h}$	– Contribuição de corrente harmônica de ordem h do consumidor para a corrente \dot{I}_{pac-h}
$\dot{V}_{s-pac-h}$	– Contribuição de tensão harmônica de ordem h da concessionária para a tensão \dot{V}_{pac-h}
$\dot{V}_{c-pac-h}$	– Contribuição de tensão harmônica de ordem h do consumidor para a tensão \dot{V}_{pac-h}
$I_{s-proj-h}$	– 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}
$V_{s-proj-h}$	– 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{S}_{cc}	– Potência de curto-circuito
\dot{K}_h	– Grandeza complexa representativa da relação entre as impedâncias no método de Superposição de Tensões
\dot{Z}_{f-h}	– Impedância harmônica equivalente do filtro para a ordem h
\dot{I}_{f-h}	– Corrente harmônica de ordem h no filtro harmônico

$\dot{I}_{pac-in-h}$	– 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 de corrente harmônica de ordem h da concessionária para a corrente do filtro \dot{I}_{f-h}
\dot{I}_{fc-h}	– Contribuição de corrente harmônica de ordem h do consumidor para a corrente do filtro \dot{I}_{f-h}
C_f	– Capacitância do elemento capacitivo do filtro harmônico sintonizado empregado em laboratório
L_f	– Indutância do elemento indutivo do filtro harmônico sintonizado empregado em laboratório
r_f	– Resistência atrelada aos elementos construtivos do filtro harmônico sintonizado empregado em laboratório
R_1	– Resistência atrelada à carga linear do consumidor 1 da Fig. 4.2; resistência também utilizada como parâmetro dos filtros harmônicos da Fig. 5.2 e 5.3
R_2	– Resistência utilizada como parâmetro dos filtros harmônicos das Fig. 5.2 e 5.3
R_3	– Resistência utilizada como parâmetro dos filtros harmônicos das Fig. 5.2 e 5.3
R_4	– Resistência utilizada como parâmetro dos filtros harmônicos das Fig. 5.2 e 5.3
R_5	– Resistência utilizada como parâmetro dos filtros harmônicos das Fig. 5.2 e 5.3
L_1	– Indutância atrelada à carga linear do consumidor 1 da Fig. 4.2; indutância também utilizada como parâmetro dos filtros harmônicos das Fig. 5.2 e 5.3
L_2	– Indutância utilizada como parâmetro dos filtros harmônicos das Fig. 5.2 e 5.3
L_3	– Indutância utilizada como parâmetro dos filtros harmônicos das Fig. 5.2 e 5.3
R_{ret1}	– Resistência atrelada à carga não linear do consumidor 1 da Fig. 4.2
R_2	– Resistência atrelada à carga linear do consumidor 2 da Fig. 4.2
L_2	– Indutância atrelada à carga linear do consumidor 2 da Fig. 4.2
L_{ret2}	– Indutância atrelada ao sistema de alisamento da carga não linear do consumidor 2 da Fig. 4.2
R_{ret2}	– Resistência atrelada à carga não linear do consumidor 2 da Fig. 4.2
C_1	– Capacitância utilizada como parâmetro dos filtros harmônicos das Fig. 5.2 e 5.3
C_2	– Capacitância utilizada como parâmetro dos filtros harmônicos das Fig. 5.2 e 5.3
C_3	– Capacitância utilizada como parâmetro dos filtros harmônicos das Fig. 5.2 e 5.3
$3h$	– Referência que se faz à 3ª ordem harmônica

$5h$	– Referência que se faz à 5ª ordem harmônica
$7h$	– Referência que se faz à 7ª ordem harmônica
$11h$	– Referência que se faz à 11ª ordem harmônica
$13h$	– Referência que se faz à 13ª ordem harmônica
ω	– Frequência angular dada em radianos por segundo
$\dot{Z}_f(\omega)$	– Impedância complexa do filtro em função de ω
$Z_f(\omega)$	– Módulo da impedância complexa do filtro em função de ω
$\phi(\omega)$	– Ângulo da impedância complexa do filtro em função de ω
ω_0	– Frequência angular de ressonância para os filtros sintonizados, ou ainda, frequência a partir da qual um filtro amortecido passa a efetivamente a filtrar
ω_{0-1}	– Valor aproximado da primeira frequência angular de ressonância dos filtro sintonizados de 2 e 3 frequências
ω_{0-2}	– Valor aproximado da segunda frequência angular de ressonância dos filtro sintonizados de 2 e 3 frequências
ω_{0-3}	– Valor aproximado da terceira frequência angular de ressonância dos filtro sintonizados 3 frequências
G	– Geradores síncronos de 60 Hz do sistema de 14 barras do IEEE
CS	– Compensadores síncronos de reativos do sistema de 14 barras do IEEE
$Carga$	– Cargas trifásicas tipo impedância constante e definidas pelos seus equivalentes de consumo $P + jQ$ do sistema de 14 barras do IEEE
MT	– Média tensão
LT	– Linhas de transmissão do sistema de 14 barras do IEEE
T	– Transformadores do sistema de 14 barras do IEEE

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Pesquisas na área de Qualidade da Energia Elétrica têm conquistado crescente importância no cenário energético brasileiro e internacional. De fato, sabe-se, que os distintos fenômenos relacionados à área [1] e que são designados por desvios ou perda de qualidade da energia elétrica podem acarretar grandes transtornos para os diversos grupos de consumidores conectados à rede, sejam eles, industriais, comerciais ou residenciais. Estes, atualmente atentos aos seus direitos previstos em legislação e também diante do emprego, cada vez maior, de equipamentos altamente sensíveis às variações de tensão, já não ignoram que o fornecimento da energia deva, necessariamente, ocorrer na forma de um serviço ou produto que reúna propriedades como: segurança, continuidade, qualidade e outros. O assunto, todavia, não fica restrito ao mercado consumidor visto que, também, as concessionárias de eletricidade têm se preocupado sobremaneira com os problemas relacionados à qualidade da energia. Não obstante às regras e padrões estabelecidos em legislação, atender às expectativas do consumidor e manter sua confiança é de fundamental importância em um mercado altamente competitivo, exigente e em crescente expansão.

Neste sentido, atualmente, os problemas de qualidade da energia tornaram-se abundantes no vocabulário dos consumidores, uma vez que, os mesmos, têm-se mostrado preocupados com a possibilidade de queda na produção de seus insumos por falhas ou operação indevida de seus equipamentos elétricos advindos de uma energia de má qualidade. Associada a esta apreensão está o crescente interesse por normas ou documentos orientativos que estabeleçam, através de legislação própria, os padrões mínimos de suprimento e as sanções aplicáveis quando os valores de referência não forem obedecidos.

Dentro do grande cenário da qualidade da energia elétrica surge a presente tese de doutorado, a qual se encontra direcionada para as questões vinculadas com o indicador de qualidade atrelado com as distorções harmônicas, com destaque à problemática da identificação das fontes responsáveis por tais efeitos.

1.2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E ESTADO DA ARTE

1.2.1. Quanto aos fundamentos de análise

Dentre os vários indicadores de qualidade da energia elétrica, as distorções harmônicas possuem uma posição de destaque. É sabido, que as tensões de suprimento das instalações consumidoras devem, em tese, ser perfeitamente senoidais. No entanto, esta condição ideal dificilmente é encontrada nos sistemas elétricos reais, visto que, estes se apresentam com um crescente emprego de dispositivos com características “não lineares”. A designação “não linear”, sob o ponto de vista de harmônicos, deve ser aplicada a todo e qualquer dispositivo presente nos complexos elétricos para os quais a correlação entre a tensão e a corrente não obedece a formas de onda similares.

De acordo com princípios clássicos da matemática, uma onda não senoidal pode ser representada como uma somatória de ondas puramente senoidais de frequências múltiplas

inteiras da frequência da onda original. Esta decomposição é realizada por meio da Série de Fourier [2], resultando em uma componente com a mesma frequência da tensão aplicada, denominada de “componente fundamental” e um conjunto de outras frequências, conhecidas por “componentes harmônicas”, ou, como são comumente tratadas, “harmônicos”. Uma das vantagens da utilização desta estratégia, fundamentada em técnicas de análise no domínio da frequência é que, para sistemas lineares, cada componente harmônica pode ser considerada separadamente e os efeitos atrelados com os fenômenos globais são simplificados e determinados através da superposição das várias componentes constituintes do sinal distorcido.

Por fim, vale ressaltar que, a questão em pauta já foi amplamente fundamentada, analisada, utilizada, etc. em vários trabalhos e, diante disto, alicerçado no fato que o assunto encontra-se amplamente difundido na engenharia elétrica e outras especialidades, considera-se desnecessário tecer maiores comentários sobre os princípios que regem o assunto.

1.2.2. Quanto à terminologia aplicável

Para quantificar as distorções harmônicas presentes nos sinais de tensões e/ou correntes existem inúmeras publicações, padrões, normas, etc. que esclarecem sobre os termos e formulações aplicáveis à área. Isto pode ser facilmente detectado através de levantamentos bibliográficos em nível nacional e internacional. Visando pois evitar repetições de textos já contemplados em outros trabalhos e face a grande maturidade brasileira neste campo, optou-se, para fins desta pesquisa, utilizar-se tão somente das terminologias recomendadas pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), as quais encontram-se definidas em seus Procedimentos de Distribuição (PRODIST) [3], cujas as equações e definições estão transcritas a seguir.

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100 \quad (1.1)$$

$$DII_h\% = \frac{I_h}{I_1} \cdot 100 \quad (1.2)$$

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (1.3)$$

$$DTI\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (1.4)$$

Sendo:

$DIT_h\%$ – distorção harmônica individual de tensão de ordem h em porcentagem da fundamental;

$DII_h\%$ – distorção harmônica individual de corrente de ordem h em porcentagem da fundamental;

$DTT\%$ – distorção harmônica total de tensão em porcentagem da fundamental;

$DTI\%$ – distorção harmônica total de corrente em porcentagem da fundamental;

h – ordem harmônica;

V_h – magnitude da tensão harmônica de ordem h ;

V_1 – magnitude da tensão fundamental ou de referência;

I_h – magnitude da corrente harmônica de ordem h ;

I_1 – magnitude da corrente fundamental ou de referência.

1.2.3. Quanto aos documentos normativos

Tendo em vista os efeitos das componentes harmônicas de tensão e/ou corrente no sistema elétrico, existem normas e recomendações cuja finalidade é oferecer orientações e valores de referência para as distorções harmônicas de forma a garantir um padrão desejável para os suprimentos elétricos.

No contexto nacional pode-se citar: o PRODIST da ANEEL – módulo 8 [3] e o Procedimento de Rede do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) – submódulo 2.8 [4]. No cenário internacional destacam-se os documentos clássicos da IEC e do IEEE, os quais fornecem diretrizes e informações importantes aos mais distintos temas relacionados com definições, medições, valores recomendados, etc.. Neste particular ressaltam-se aqueles conhecidos por IEC 61000-3-6 [5] e IEEE 519-1992 [6].

A título de ilustração, a Tabela 1.1 apresenta os valores globais de referência para as distorções harmônicas de tensão contidos no PRODIST, enquanto que a Tabela 1.2 sintetiza os níveis de referência individuais para cada ordem harmônica. Em ambas as tabelas os valores recomendados possuem forte correlação com a tensão nominal do barramento (V_N).

Tabela 1.1 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais de tensão em porcentagem da tensão fundamental – PRODIST.

Tensão Nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão [%]
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_N \leq 69kV$	6
$69kV < V_N \leq 230kV$	3

Tabela 1.2 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão em percentagem da tensão fundamental – PRODIST.

Ordem Harmônica		Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]			
		$V_N \leq 1kV$	$1kV < V_N \leq 13,8kV$	$13,8kV < V_N \leq 69kV$	$69kV < V_N \leq 230kV$
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	6	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Embora os documentos existentes contemplem questões atreladas com valores, formas de medição, protocolos, etc., praticamente não há menções sobre quaisquer mecanismos voltados para a identificação da origem das distorções, isto é, não há qualquer menção a meios direcionados para a determinação, junto a um determinado ponto ou barramento de medição, dos percentuais de responsabilidades a serem atribuídos ao supridor ou ao consumidor. Não obstante a isto, reconhece-se que esta temática assume importância à medida que, quando necessária, a implantação de soluções mitigadoras certamente implicará em custos financeiros [7] cuja responsabilidade deverá ser identificada e justamente compartilhada entre as partes. Caso não haja uma metodologia para se chegar a tal consenso, há de se compreender que o fato poderia gerar controvérsias entre os agentes (supridor e consumidor) envolvidos.

Sintetizando, uma vez constatada uma violação dos limites preconizados para uma dada avaliação junto ao Ponto de Acoplamento Comum (PAC) entre o supridor e o consumidor, é de suma relevância o emprego de um procedimento sistematizado para a identificação das parcelas de responsabilidades de cada agente. Inserido neste contexto, surge, então, o tema “compartilhamento de responsabilidade”, o qual consiste no grande motivador desta tese.

1.2.4. Quanto aos procedimentos para o compartilhamento

É importante destacar que várias pesquisas e publicações têm sido realizadas com vistas à identificação das parcelas de responsabilidade sobre as distorções harmônicas. Dentre as possibilidades apontadas na literatura, uma das mais difundidas refere-se ao emprego da análise do fluxo de potência harmônica ativa como procedimento responsável pela indicação da fonte dominante das distorções medidas no PAC. Naturalmente, os princípios aqui ressaltados indicam, como primeira limitação, o fato de não se atingir um refinamento metodológico que culmine na distribuição das responsabilidades entre o supridor e o consumidor, mas, tão somente, é indicativo da principal fonte de distorção. Esta estratégia é explorada em várias publicações [8-13], e, apoiando-se nestas premissas, vários equipamentos de medição comercializados no mundo contemplam cálculos das potências harmônicas visando o objetivo aqui delineado. Apesar da aparente aplicabilidade deste procedimento, alguns trabalhos, a exemplo de [14], contestam este método alegando que, além de não realizar a atribuição de responsabilidade entre os agentes, a metodologia sugerida não possui nenhum embasamento teórico que garanta a correta identificação da fonte harmônica predominante no sistema.

Outra possibilidade, bem difundida na literatura, encontra-se fundamentada em um conceito básico da análise de circuitos elétricos, a saber, o princípio da superposição. O

emprego de tal procedimento fora primeiramente proposto em trabalhos destacados nas referências [15,16], os quais foram posteriormente discutidos, avaliados e criticados em [17,18]. Não obstante a simplicidade do método em foco, é importante ponderar que um dos pontos mais complexos, para a aplicação prática do processo, está na necessidade do prévio conhecimento das impedâncias harmônicas equivalentes da concessionária e, de modo especial, do consumidor. Vale ressaltar ainda, que se reconhece, na literatura internacional, a existência de vários procedimentos capazes de determinar, com segurança, a impedância harmônica da concessionária [19-22]. Todavia, os procedimentos voltados à obtenção da impedância harmônica do consumidor, de um modo geral, têm se mostrado frágeis e pouco confiáveis. É o que revelam estudos realizados em [23, 24].

As duas metodologias: método do fluxo potência ativa e o método da superposição se apresentam como sendo os principais processos voltados à busca de responsáveis pelas distorções harmônicas presentes na interface consumidor-concessionária, contudo, existem prerrogativas que impossibilitam o efetivo uso de cada um dos procedimentos. Então, uma vez apontadas as limitações aplicativas de cada método, este trabalho voltar-se-á à proposição de um procedimento metodológico que culmine no efetivo compartilhamento de responsabilidades conduzindo a resultados aceitáveis para dirimir os problemas aqui apontados.

Por fim, vale ressaltar que as publicações internacionais contemplam outros procedimentos, os quais estão fundamentados em distintas técnicas e que receberam, portanto, designações próprias, a exemplo de: “corrente conforme e não-conforme” [25-28]; “redes neurais” [29-32]; “estimação de estado com filtro de Kalman” [33-35], entre outros. De um modo geral, estas publicações procuram identificar tão somente a origem da principal fonte de distorções, não se preocupando, de forma direta, em estabelecer procedimentos para a separação das parcelas de contribuição referentes ao consumidor e a concessionária. Diante

disto e devido à pequena relevância destas propostas à luz daquelas discutidas anteriormente, as mesmas não serão consideradas em maiores detalhes nesta tese.

1.2.5. Quanto aos trabalhos realizados no âmbito da Universidade Federal de Uberlândia

No âmbito nacional e local, a referência [36] constituiu-se num marco inicial para o campo de pesquisas em pauta. Tal trabalho centrou-se na síntese da bibliografia existente sobre o tema compartilhamento de responsabilidades e ofereceu um detalhamento físico e matemático dos principais procedimentos existentes na literatura, destacando-se seus aspectos positivos e negativos.

Complementarmente, em [37] pode-se reconhecer um grande avanço na busca por uma metodologia confiável para o efetivo compartilhamento de responsabilidades. Este trabalho realizou uma síntese dos procedimentos para determinação das impedâncias harmônicas equivalentes do sistema supridor e consumidor, complementada pelo desenvolvimento de um procedimento próprio de cálculo das impedâncias harmônicas do consumidor. Outro aspecto relevante que pode ser encontrado no referido trabalho está na aplicação da proposta para um sistema real para o qual se reconhecia, de antemão, os desempenhos físicos esperados. Contudo vale ressaltar que, embora as contribuições feitas, os resultados finais ainda se apresentaram com importantes lacunas a serem preenchidas, fato este que motivou, novamente, os estudos complementares aqui propostos.

Outra pesquisa realizada na UFU prosseguiu na direção de contribuir para a questão da análise crítica dos processos de determinação das impedâncias harmônicas [23]. Tais estudos conduziram à conclusão que os procedimentos até então divulgados se mostram bastante frágeis. Este fato, naturalmente, evidenciou a necessidade de pesquisas adicionais até se

atingir uma metodologia mais eficaz para os fins aqui almejados, ou então, para a busca de mecanismos alternativos para os quais a relevância das impedâncias harmônicas equivalentes dos supridores e consumidores assuma um papel secundário, fundamento este que sustenta a ideia da presente pesquisa.

1.3. CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA TESE

Tendo contextualizado o tema e estabelecidas as diretrizes que nortearam a concepção e o desenvolvimento da presente pesquisa, vale ressaltar que esta tese oferece as seguintes contribuições direcionadas à temática do compartilhamento de responsabilidades entre sistemas poluidores:

- Detalhamento físico e matemático dos principais procedimentos existentes na literatura voltados para atribuição de responsabilidades sobre as distorções harmônicas, acompanhado de uma avaliação de desempenho com destaque as suas inconsistências, fragilidades e limitações;
- Proposição de um procedimento metodológico, o qual, fundamentado em princípios clássicos, avança no sentido de oferecer meios práticos e confiáveis para utilização em campo, conduzindo a uma estratégia para um efetivo compartilhamento de responsabilidades;
- Avaliação de desempenho computacional e experimental da metodologia proposta, qual seja, Método da Superposição Modificado;
- Realização de um primeiro estudo acerca do dispositivo a ser implementado em campo, com vistas à aplicação do método proposto em um caso real.

1.4. ESTRUTURA DA TESE

Diante das metas supramencionadas, além do presente capítulo introdutório, esta tese apresenta-se estruturada da seguinte maneira:

Capítulo II – Avaliação de Desempenho das Principais Metodologias para Atribuição de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas

Este capítulo destina-se a avaliação dos principais procedimentos encontrados na literatura para a atribuição de responsabilidades sobre as distorções harmônicas presentes em um Ponto de Acoplamento Comum entre um sistema supridor e um consumidor, apontando suas fragilidades e limitações. A avaliação é feita por meio de desenvolvimentos matemáticos, simulações computacionais e análises de aplicabilidade em casos reais.

Capítulo III – Método da Superposição Modificado

Esta unidade encontra-se centrada na proposição de um novo método para o compartilhamento de responsabilidades, o qual se encontra fundamentado no princípio da superposição e na inserção de uma impedância harmônica dominante no PAC. Formulações matemáticas são então realizadas e o procedimento é avaliado de forma computacional.

Capítulo IV – Avaliação Experimental de Desempenho do Método da Superposição Modificado

Nesta etapa são realizados estudos avaliativos experimentais em ambiente laboratorial controlado. Para tanto, é estabelecida uma proposta de estrutura

física formada por um suprimento elétrico controlado alimentando um conjunto de cargas lineares e não lineares. Em consonância com a proposta de metodologia feita neste trabalho, procede-se, também, à avaliação do desempenho do processo proposto através da inserção de uma impedância harmônica dominante entre a fonte e a carga.

Capítulo V – Estratégias para Definição da Impedância Dominante

Visando explorar as possibilidades para a obtenção da impedância dominante, este capítulo apresenta-se voltado para a realização de um estudo investigativo das diferentes topologias de filtragem harmônica, destacando-se suas possibilidades e limitações. Para tanto, será realizada uma fundamentação das principais estratégias de filtragem existentes, das quais serão selecionadas algumas para avaliação computacional em arranjos elétricos hipotéticos.

Capítulo VI – Conclusões

Este capítulo sintetiza as principais contribuições do trabalho e suas conclusões finais, bem como aponta para as fragilidades e limitações dos processos de cálculo desenvolvidos e avaliados. Além disso, são apresentadas sugestões de trabalhos futuros para fins de se obter, com base em critérios técnicos e científicos, a implementação em campo da metodologia aqui proposta.

Capítulo VII – Referências Bibliográficas

Por fim, condensa-se neste capítulo o material bibliográfico utilizado para o desenvolvimento da tese.

CAPÍTULO II

METODOLOGIAS PARA ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES SOBRE AS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Tendo em vista que o tema contemplado nesta pesquisa se apresenta como um desafio já investigado no passado e que resultou em um número de publicações, ainda que restrito, de ampla difusão no meio técnico e científico, considera-se, nesta etapa inicial, que os avanços dos processos até então estabelecidos sejam sintetizados de forma a esclarecer sobre pontos focais como: princípios físicos, técnicas de análise, desempenhos obtidos, ressalvas quanto à aplicabilidade, etc..

Dentro deste cenário, os levantamentos bibliográficos realizados, como resumidamente discutidos no Capítulo I, culminam pela indicação de procedimentos alicerçados em técnicas de análise que utilizam a modelagem dos complexos elétricos no domínio da frequência, em que pese as especificidades de cada proposta. Os trabalhos sobre o assunto evidenciam, como também já mencionado anteriormente, que os processos voltados para a identificação da responsabilidade sobre o fenômeno em pauta se apoiam em estratégias

que se propõem a definir a fonte dominante das distorções ou ainda, de modo mais avançado, na determinação das parcelas de responsabilidade entre os agentes envolvidos. Nesta perspectiva, dentre a diversidade de artigos encontrados, pode-se, certamente, constatar que os encaminhamentos até então materializados na forma de documentos apontam para dois princípios: o da potência harmônica ativa e o do emprego do método da superposição de efeitos.

À luz deste reconhecimento, torna-se imperativo que este trabalho seja iniciado com estudos pormenorizados visando oferecer subsídios para a compreensão e visualização de questões importantes sobre a consistência, aplicabilidade, limitações e perspectivas para avançar com as pesquisas nas direções apontadas. Adicionalmente, objetivando preencher lacunas existentes nas publicações feitas, procurar-se-á, ainda, estabelecer bases matemáticas e físicas que possam melhor fundamentar as propostas. Por fim, os métodos são então aplicados a casos exemplos para melhor caracterizar, ilustrar e enfatizar as potencialidades e fragilidades do estado da arte sobre o tema.

2.2. MÉTODO DO FLUXO DE POTÊNCIA

Em consonância com a sequência dos desenvolvimentos realizados dentro do contexto desta pesquisa, o primeiro método a ser considerado consiste no clássico procedimento conhecido por “Método do Fluxo de Potência Harmônica”. Para tanto, utilizar-se-á de uma estratégia, para o presente procedimento e o da superposição, em que as discussões serão subdivididas em seções representativas dos principais pontos atrelados com cada um dos processos.

2.2.1. Fundamentação do método

O método de análise do fluxo de potência, como já estabelecido, tem por princípio a análise da direção do fluxo de potência harmônica ativa na rede e sua correlação com o fluxo de potência fundamental.

A equação (2.1) destaca a expressão utilizada para o cálculo da potência ativa (P), a qual é obtida pela combinação das componentes individuais de tensão eficaz (V_h) e corrente eficaz (I_h) harmônicas adicionadas à combinação da tensão eficaz (V_1) e corrente eficaz (I_1) fundamental [38-40]. O índice h , conforme já mencionado, refere-se à ordem harmônica sob análise. A grandeza ϕ_h representa a defasagem angular entre a tensão e a corrente harmônica de ordem h e ϕ_1 a defasagem angular entre a tensão e a corrente fundamental.

$$P = V_1 I_1 \cos \phi_1 + \sum_{h \neq 1}^{\infty} V_h I_h \cos \phi_h = V_1 I_1 \cos \phi_1 + \sum_{h \neq 1}^{\infty} P_h \quad (2.1)$$

A equação (2.2) fornece, para cada tensão e corrente harmônica de ordem h , a respectiva potência harmônica ativa (P_h) de ordem h .

$$P_h = V_h I_h \cos \phi_h \quad (2.2)$$

Nesta expressão, as tensões e correntes harmônicas junto ao PAC são advindas de registros feitos com equipamentos de medição ou, alternativamente, para o caso de simulações, pela utilização da série de Fourier para fins da decomposição dos sinais encontrados.

A partir do conhecimento das componentes harmônicas individuais para as tensões e correntes, o procedimento para se determinar a principal fonte poluidora obedece a seguinte lógica [8]:

- Determinação da potência ativa fundamental, observando o seu sinal, o qual, na ausência de geração interna do consumidor, é adotado como positivo;
- Para as componentes harmônicas de tensão e corrente de mesma ordem, deverá ser obtida a respectiva diferença angular ou de fases (ϕ_h);
- Através de princípios clássicos considera-se que:
 - $-90^\circ < \phi_h < 90^\circ$: o consumidor estaria, predominantemente, atuando como receptor da ordem harmônica sob consideração. Nestas circunstâncias a potência harmônica calculada será também positiva;
 - $90^\circ < \phi_h < 270^\circ$: o consumidor atua, predominantemente, como gerador da ordem harmônica sob enfoque e a potência harmônica assim calculada receberia um sinal contrário ao da fundamental, ou seja, negativo.

Do exposto, segue que a determinação da fonte harmônica predominante no sistema ocorre unicamente por meio da verificação do sinal da potência ativa harmônica em relação ao fluxo de potência fundamental.

Na Fig. 2.1 tem-se, para fins de avaliação matemática do método, o circuito elétrico equivalente de Thevenin de ordem harmônica h , onde o sistema supridor e o consumidor são representados por fontes harmônicas de tensão e impedâncias harmônicas próprias. O PAC mostra claramente a barra de conexão entre o supridor e consumidor.

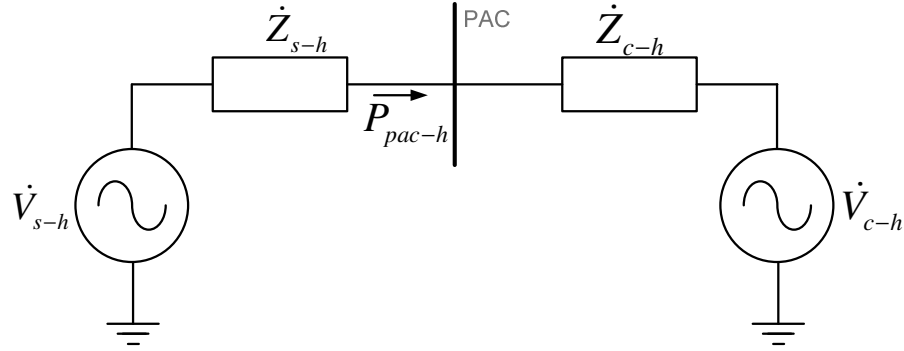


Fig. 2.1. Circuito harmônico equivalente para fins de avaliação matemática.

Nesta figura:

$\dot{V}_{s-h} = |\dot{V}_{s-h}| \angle \alpha_{s-h}$ – tensão harmônica equivalente de ordem h produzida pelo supridor;

$\dot{V}_{c-h} = |\dot{V}_{c-h}| \angle \alpha_{c-h}$ – tensão harmônica equivalente de ordem h produzida pelo consumidor;

$\dot{Z}_{s-h} = R_{s-h} + jX_{s-h} = |\dot{Z}_{s-h}| \angle \theta_{s-h}$ – impedância harmônica equivalente de ordem h do supridor;

$\dot{Z}_{c-h} = R_{c-h} + jX_{c-h} = |\dot{Z}_{c-h}| \angle \theta_{c-h}$ – impedância harmônica equivalente de ordem h do consumidor;

P_{pac-h} – potência harmônica ativa de ordem h verificada no PAC.

A partir destas tensões e destes parâmetros, a potência harmônica ativa pode ser calculada [41]. O resultado final é dado em (2.3).

$$\begin{aligned}
 P_{pac-h} = \frac{1}{(R_{s-h} + R_{c-h})^2 + (X_{s-h} + X_{c-h})^2} & \left[(R_{s-h} + R_{c-h}) |\dot{V}_{s-h}|^2 \right. \\
 & - (R_{s-h} + R_{c-h}) |\dot{V}_{s-h}| |\dot{V}_{c-h}| \cos \delta_h \\
 & \left. + (X_{s-h} + X_{c-h}) |\dot{V}_{s-h}| |\dot{V}_{c-h}| \sin \delta_h \right]
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Onde δ_h é a diferença angular entre as tensões harmônicas do supridor e do consumidor para a ordem h , ou seja, $\delta_h = \alpha_{s-h} - \alpha_{c-h}$.

Visando oferecer meios para uma melhor caracterização do método, a Fig. 2.2 representa o circuito equivalente de Norton do arranjo sob análise, o qual é utilizado para as análises que se seguem.

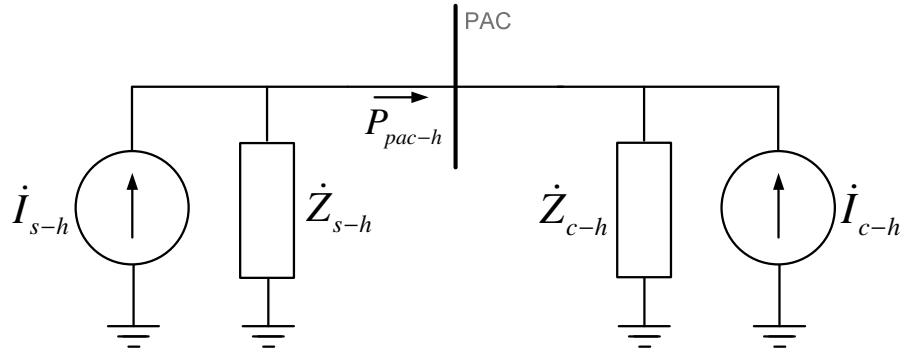


Fig. 2.2. Circuito harmônico equivalente de Norton.

Neste circuito:

$i_{s-h} = |i_{s-h}| \angle \beta_{s-h}$ – corrente harmônica equivalente de ordem h produzida pelo supridor;

$i_{c-h} = |i_{c-h}| \angle \beta_{c-h}$ – corrente harmônica equivalente de ordem h produzida pelo consumidor.

Estas correntes podem ser relacionadas com as tensões, do circuito em foco, como se segue:

$$\dot{V}_{s-h} = \dot{I}_{s-h} \cdot \dot{Z}_{s-h} = |\dot{I}_{s-h}| |\dot{Z}_{s-h}| \angle (\beta_{s-h} + \theta_{s-h}) \quad (2.4)$$

$$\dot{V}_{c-h} = \dot{I}_{c-h} \cdot \dot{Z}_{c-h} = |\dot{I}_{c-h}| |\dot{Z}_{c-h}| \angle (\beta_{c-h} + \theta_{c-h}) \quad (2.5)$$

Utilizando do circuito equivalente da Fig. 2.2, pode-se então obter a expressão da potência harmônica ativa que se estabelece no PAC, como expresso em (2.6).

$$\begin{aligned} P_{pac-h} = & \frac{\sqrt{R_{s-h}^2 + X_{s-h}^2}}{(R_{s-h} + R_{c-h})^2 + (X_{s-h} + X_{c-h})^2} \left[(R_{s-h} + R_{c-h}) \sqrt{R_{s-h}^2 + X_{s-h}^2} |\dot{I}_{s-h}|^2 \right. \\ & - (R_{s-h} + R_{c-h}) \sqrt{R_{c-h}^2 + X_{c-h}^2} |\dot{I}_{s-h}| |\dot{I}_{c-h}| \cos \delta_h \\ & \left. + (X_{s-h} + X_{c-h}) \sqrt{R_{c-h}^2 + X_{c-h}^2} |\dot{I}_{s-h}| |\dot{I}_{c-h}| \sin \delta_h \right] \end{aligned} \quad (2.6)$$

O ângulo δ_h é dado por:

$$\begin{aligned} \delta_h &= (\beta_{s-h} + \theta_{s-h}) - (\beta_{c-h} + \theta_{c-h}) = (\beta_{s-h} - \beta_{c-h}) + (\theta_{s-h} - \theta_{c-h}) \\ &= \lambda_h + (\theta_{s-h} - \theta_{c-h}) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Onde λ_h é a diferença angular entre as correntes harmônicas do supridor e do consumidor para ordem h .

Objetivando uma análise simplificada, desconsiderando-se as resistências presentes no circuito sob consideração, obtém-se a equação (2.8). As resistências R_{s-h} e R_{c-h} são feitas iguais a zero.

$$P_{pac-h} = \frac{X_{s-h}X_{c-h}}{X_{s-h} + X_{c-h}} |i_{s-h}| |i_{c-h}| \sen \lambda_h \quad (2.8)$$

A equação (2.8) mostra que:

- a magnitude da potência ativa é diretamente proporcional às amplitudes das correntes e à razão $\frac{X_{s-h} \cdot X_{c-h}}{X_{s-h} + X_{c-h}}$;
- o sentido do fluxo de potência harmônica ativa no PAC é dependente da defasagem angular entre as contribuições harmônicas de corrente do supridor e do consumidor (λ_h);
- a magnitude da corrente harmônica não é, portanto, determinante da fonte de distorção dominante do sistema, uma vez que a direção do fluxo, conforme já dito, depende exclusivamente do valor de λ_h .

2.2.2. Avaliação computacional da metodologia

Objetivando elucidar a utilização da metodologia supra descrita, a seguir procede-se à aplicação do procedimento estabelecido para um arranjo elétrico hipotético, o qual, pelas suas características, tem por meta uma representação simplificada de uma unidade consumidora constituída por cargas resistivas (aquecedores, fornos elétricos, etc.), cargas indutivas (motores), cargas capacitivas (banco de capacitores) e cargas especiais (retificadores, controladores de velocidade, etc.).

A Fig. 2.3 apresenta o referido complexo elétrico com seus principais parâmetros. Este circuito, para propósitos deste trabalho foi então implementado no simulador ATP através do qual foram realizados os estudos investigativos contemplados nesta unidade.

O circuito mostra uma fonte de tensão composta por um gerador de tensão alternada, monofásico, com frequência fundamental de 60 Hz, sobre a qual podem ser adicionadas

componentes harmônicas definidas pelo usuário. Já a carga não linear é constituída por um retificador de onda completa alimentando uma carga resistiva. O barramento de corrente contínua do retificador possui um capacitor de alisamento.

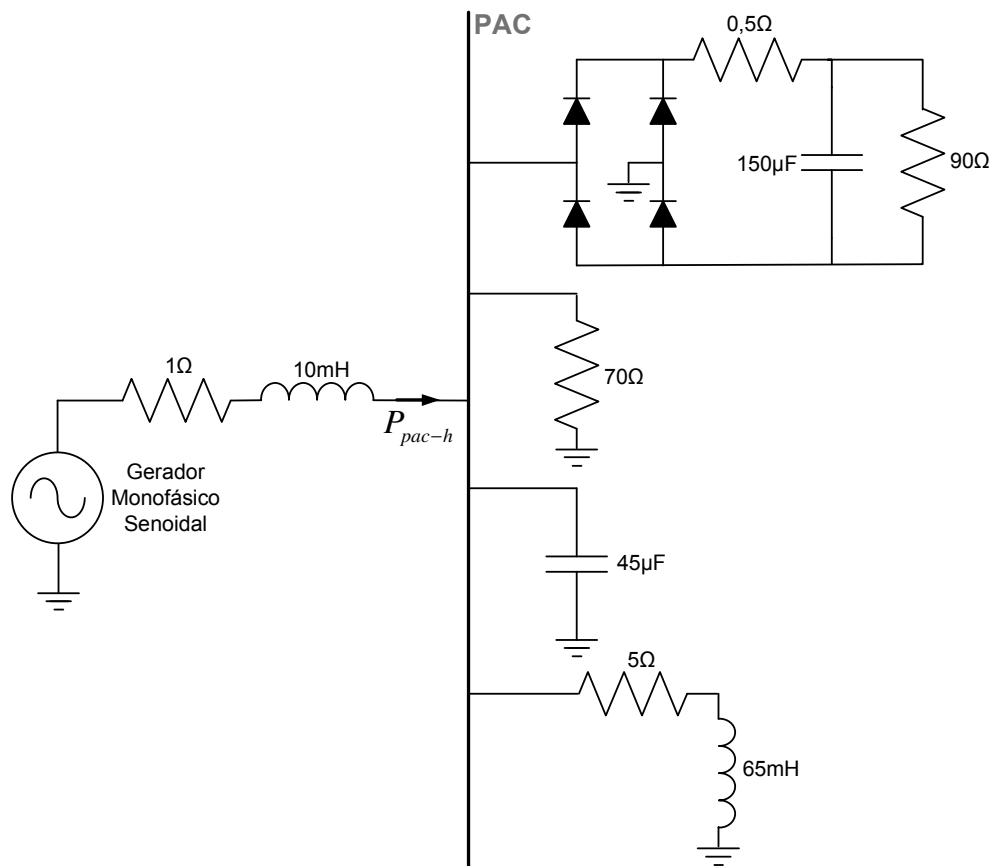


Fig. 2.3. Circuito elétrico utilizado para os estudos computacionais avaliativos do desempenho do Método do Fluxo de Potência Harmônica.

A Tabela 2.1 fornece as distorções harmônicas individuais de tensão atreladas com o funcionamento isolado do consumidor. O valor da tensão fundamental de 60 Hz foi adotado como $100 \pm 0^\circ V$. Também, visando consubstanciar as análises posteriores, são apresentadas as potências harmônicas correspondentes encontradas no PAC sob as condições impostas. Vale observar que a carga suprida, por si só, produz um conteúdo espectral bastante elevado, principalmente no que se refere às ordens harmônicas 3 e 5. Não obstante tal reconhecimento

considera-se que tais patamares permitem avaliações posteriores com maior propriedade. Como se observa, as potências harmônicas determinadas através da simulação se apresentam consistentes com as expectativas iniciais, isto é, se apresentam todas negativas em relação à correspondente grandeza fundamental.

Tabela 2.1 – Potência ativa e tensão harmônica no PAC (V_{pac-h}) – supridor puramente senoidal e carga contendo componentes não lineares.

Ordem h	Tensão Harmônica V_{pac-h} (%)	Potência Ativa P_{pac-h} (W)
1	-	331,093
3	20,39	-2,212
5	7,87	-0,120
7	2,23	-0,005
9	0,94	0,000
11	0,45	0,000
13	0,43	0,000

Em vista do objetivo maior deste subitem, qual seja, a análise crítica do método da potência harmônica como procedimento para a determinação da principal fonte de distorções, os trabalhos prosseguem através da inserção, via fontes ideais de tensões, das ordens harmônicas advindas da rede de suprimento. Para tanto se adiciona à tensão fundamental, anteriormente explicitada, duas componentes. Uma delas está vinculada com uma frequência de 180 Hz (3ª harmônica), com um nível equivalente a 5% da fundamental. A outra distorção harmônica individual corresponde a uma tensão de 300 Hz (5ª harmônica) e de 20% da tensão fundamental. Isto posto, fica evidenciado de antemão que:

- A componente harmônica de tensão de ordem 3 apresentada pela carga se mostra dominante;
- A componente harmônica de tensão de ordem 5 apresentada pelo suprimento evidencia que o supridor é o principal responsável por tal ordem.

Dentro das premissas estabelecidas foram feitas diversas avaliações computacionais. Os primeiros resultados, constantes da Tabela 2.2, mostram os desempenhos obtidos empregando-se: a fonte puramente senoidal e o consumidor contendo cargas não lineares, e outra, com a fonte possuindo a distorção supra caracterizada, com o consumidor possuindo apenas cargas lineares. Portanto, as grandezas verificadas na tabela subsequente constituem-se nos efeitos individuais de uma e outra parte que formam o arranjo elétrico em pauta. Vale ressaltar que, para ambas as situações, a potência fundamental é positiva, visto não haver qualquer geração de energia por parte do consumidor.

Tabela 2.2 – Resultados computacionais para as duas condições idealizadas para a operação do complexo elétrico – tensões e correntes harmônicas de ordem 3 e 5 no PAC.

Condições de Operação		V_{pac-3h} (%)	P_{pac-3h} (W)	V_{pac-5h} (%)	P_{pac-5h} (W)
Fonte	Retificador				
Ideal	Presente	20,39	-2,212	7,87	-0,120
Distorcida	Ausente	8,85	0,997	29,33	10,382

A Tabela 2.2 revela que:

- O principal responsável pela distorção harmônica de 3ª ordem é o consumidor, pois a maior distorção harmônica de tensão desta ordem ocorre quando o retificador está presente no sistema;
- Contrariamente, a responsabilidade principal da distorção harmônica de 5ª ordem é a concessionária, como seria esperado diante das condições impostas;
- Dentro deste contexto, o método da potência ativa deverá apresentar uma potência de ordem 3 negativa, pois a fonte harmônica predominante desta ordem, como ressaltado, é o consumidor;

- Complementarmente, a potência harmônica de ordem 5 deverá se apresentar positiva uma vez que a fonte dominante de tal componente está localizada do lado do supridor.

Avançando nos estudos investigativos, os desenvolvimentos descritos a seguir contemplam a simultaneidade das fontes de distorção, isto é, tanto a fonte como a carga se apresentam como agentes responsáveis pelas distorções harmônicas totais no PAC. Para tanto aplicou-se, novamente, uma tensão fundamental de $100\pm 0^\circ V$, adicionada de 5% de 180 Hz (3ª harmônica) e de 20% de 300 Hz (5ª harmônica). Quanto aos ângulos de fase utilizados para as simulações das distorções harmônicas estes foram variados em relação ao da tensão fundamental, adotado como $\alpha_{s-1h} = 0^\circ$. Variando-se os ângulos de fase das componentes harmônicas (α_{s-3h} e α_{s-5h}) de 60° em 60° graus tornou-se possível obter um universo de resultados representativos da correlação entre as grandezas envolvidas no processo. Assim procedendo, obteve-se um total de 36 simulações, conforme destacado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Caracterização dos casos investigados computacionalmente.

Caso	α_{s-3h}	α_{s-5h}	Caso	α_{s-3h}	α_{s-5h}	Caso	α_{s-3h}	α_{s-5h}
1	0°	0°	13	120°	0°	25	240°	0°
2	0°	60°	14	120°	60°	26	240°	60°
3	0°	120°	15	120°	120°	27	240°	120°
4	0°	180°	16	120°	180°	28	240°	180°
5	0°	240°	17	120°	240°	29	240°	240°
6	0°	300°	18	120°	300°	30	240°	300°
7	60°	0°	19	180°	0°	31	300°	0°
8	60°	60°	20	180°	60°	32	300°	60°
9	60°	120°	21	180°	120°	33	300°	120°
10	60°	180°	22	180°	180°	34	300°	180°
11	60°	240°	23	180°	240°	35	300°	240°
12	60°	300°	24	180°	300°	36	300°	300°

Os resultados das simulações, no que se refere às potências harmônicas ativas no PAC, estão apresentados nas Tabelas 2.4 e 2.5.

Tabela 2.4 – Resultado das simulações computacionais – potências harmônicas ativas de ordem 3 - P_{pac-3h} .

Potência Harmônica Ativa de Ordem 3 - P_{pac-3h} (W)						
$\alpha_{s-5h} \downarrow \alpha_{s-3h} \rightarrow$	0°	60°	120°	180°	240°	300°
0°	-2,385	4,061	6,703	2,123	-2,902	-4,362
60°	-7,496	0,613	6,468	4,807	2,459	-10,603
120°	-9,966	-1,987	4,948	6,505	0,652	-8,305
180°	-7,803	-1,236	4,017	6,627	3,767	-4,434
240°	-3,902	1,696	4,633	5,632	4,647	-0,783
300°	-1,302	4,316	5,810	3,715	2,359	-0,128

Tabela 2.5 – Resultado das simulações computacionais – potências harmônicas ativas de ordem 5 - P_{pac-5h} .

Potência Harmônica Ativa de Ordem 5 - P_{pac-5h} (W)						
$\alpha_{s-5h} \downarrow \alpha_{s-3h} \rightarrow$	0°	60°	120°	180°	240°	300°
0°	2,326	2,112	-0,118	-2,197	0,166	2,798
60°	6,157	8,155	5,590	1,667	0,575	2,447
120°	8,551	11,489	11,562	7,971	4,482	4,692
180°	7,762	8,703	12,192	13,076	10,184	8,144
240°	5,005	2,493	5,269	10,169	11,800	9,471
300°	2,549	-1,087	-1,587	1,966	6,441	6,740

Os valores das tabelas precedentes mostram que, em função dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão do supridor, os respectivos valores das potências harmônicas se apresentam ora positivos ora negativos. Este fato, por si só, mostra que a mera utilização dos sinais destas potências para os fins aqui almejados, evidencia uma extrema fragilidade para o processo de identificação aqui almejado, pois ora as potências se apresentam com sinais positivos, ora se mostram com sinais negativos.

A título de melhor visualização dos resultados indicados nas tabelas anteriores, as Fig. 2.4 e 2.5 representam as potências harmônicas e suas variações com os ângulos de fase das grandezas estabelecidas.

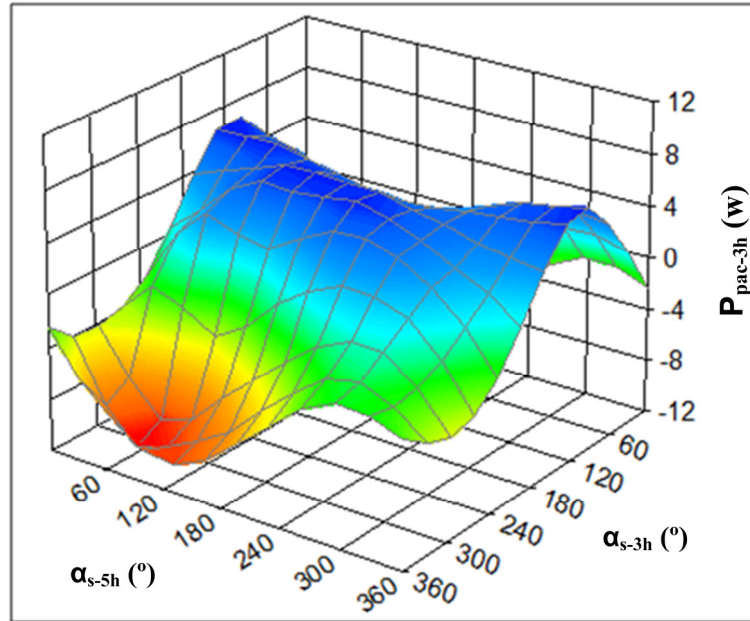


Fig. 2.4. Variações em magnitude e sinal das potências harmônicas de ordem 3 em função das alterações impostas para α_{s-3h} e α_{s-5h} .

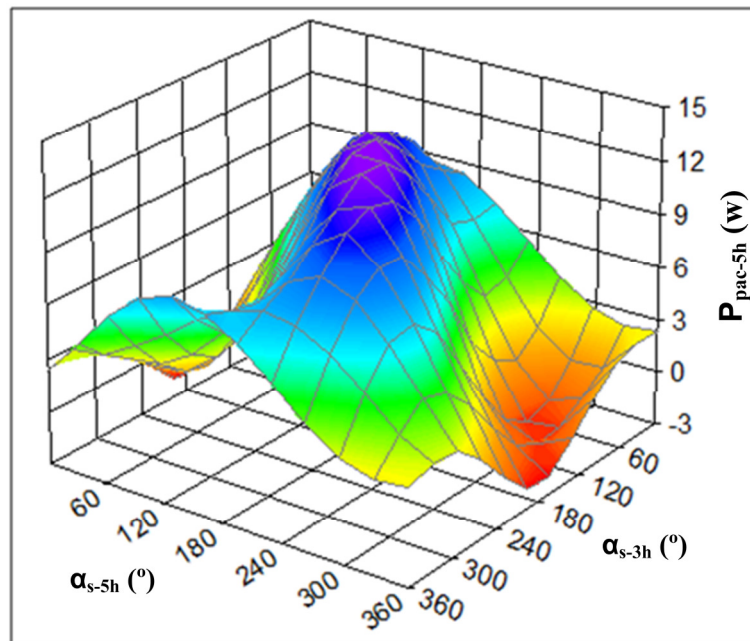


Fig. 2.5. Variações em magnitude e sinal das potências harmônicas de ordem 5 em função das alterações impostas para α_{s-3h} e α_{s-5h} .

As regiões identificadas pela cor azul representam, em destaque, aquelas para as quais foram constatadas as maiores potências ativas com sinal positivo. Por outro lado, aquelas em

cor vermelha representam os pontos para os quais se obtiveram os menores valores de potência harmônica. As demais colorações estão atreladas com valores intermediários.

Os resultados das simulações computacionais evidenciam que:

- Apesar da 3ª harmônica ter sido imposta como sendo predominantemente advinda do consumidor, para o sistema em estudo, a utilização do método da potência harmônica mostrou, em função das variações dos ângulos de fase das distorções preexistentes no suprimento, inconsistência para fins da definição do agente dominante;
- Situação semelhante foi detectada para os estudos envolvendo a ordem harmônica 5, a qual, pela imposição feita, deveria se mostrar como de responsabilidade maior o supridor;
- Vale também ressaltar que as piores inversões (erros) atribuídas à questão da identificação da fonte dominante das distorções harmônicas ocorreram quando os ângulos de fase se apresentaram com $\alpha_{s-3h} = 120^\circ$ e $\alpha_{s-5h} = 0^\circ$ (para a 3ª ordem harmônica) e de $\alpha_{s-3h} = 180^\circ$ e $\alpha_{s-5h} = 0^\circ$ (para a 5ª ordem harmônica).

2.3. MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO

De modo semelhante ao conteúdo da seção anterior, realiza-se, a seguir, uma análise que sintetiza os princípios físicos, matemáticos e de desempenho do procedimento que, conforme aponta a literatura, se mostra mais promissor para os fins aqui estabelecidos, em que pese ainda a atribuição não apenas do agente dominante, mas também, as parcelas de responsabilidades do supridor e do consumidor.

2.3.1. Fundamentação do método

A Fig. 2.6 caracteriza uma configuração genérica e representativa de um sistema elétrico visto a partir do Ponto de Acoplamento Comum entre um supridor e um consumidor. O consumidor é representado por cargas lineares e não lineares, enquanto a rede de alimentação é simplificada indicada na forma de um arranjo equivalente e representativo da geração, transmissão, distribuição, outros consumidores, etc..

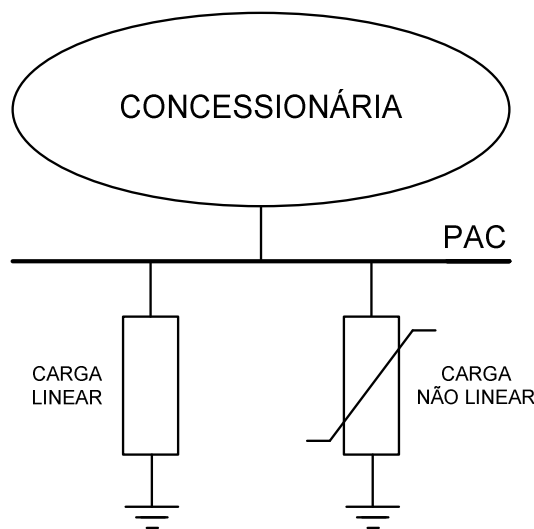


Fig. 2.6. Complexo elétrico constituído por um supridor e um consumidor contendo cargas lineares e não lineares.

O arranjo físico apresentado pode ser modelado através de seu circuito equivalente de Norton, mostrado na Fig. 2.7. Este deve ser compreendido como uma representação que utiliza de técnicas de modelagem no domínio da frequência, a qual representa tanto circuitos equivalentes quanto forem as ordens harmônicas existentes para análise [39]. Nestas circunstâncias, haverá distintos circuitos representativos, cada qual atrelado com a harmônica focada e representada por h .

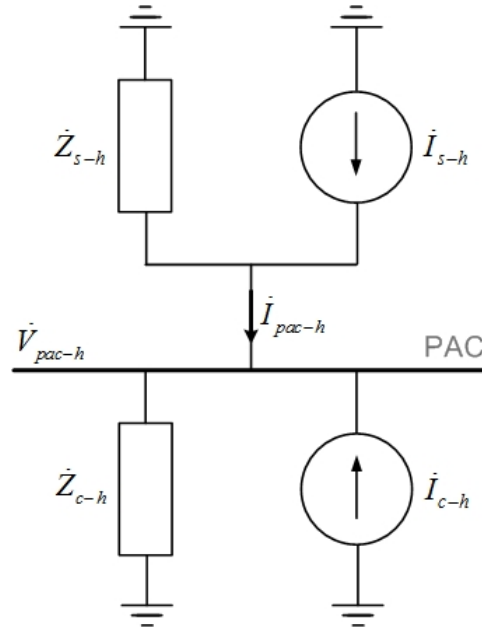


Fig. 2.7. Circuito equivalente de Norton para uma dada ordem harmônica h .

Nesta figura, os termos usados são os mesmos utilizados no método do fluxo de potência ativa, ressaltando-se que as grandezas \dot{V}_{pac-h} e \dot{I}_{pac-h} são, respectivamente, a tensão e a corrente harmônica de ordem h determinadas ou medidas no PAC.

As equações (2.9) e (2.10), derivadas do circuito equivalente de Norton, estabelecem as correntes harmônicas geradas por cada uma das fontes de corrente representativas das cargas não lineares presentes nos circuitos do supridor e do consumidor, respectivamente.

$$\dot{I}_{s-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{s-h}} + \dot{I}_{pac-h} \quad (2.9)$$

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

As contribuições de cada uma das partes envolvidas para a corrente total (\dot{I}_{pac-h}) e para a tensão total (\dot{V}_{pac-h}) no PAC podem ser encontradas por meio do princípio da superposição. Os circuitos relacionados com esta estratégia de análise podem ser visualizados

nas Fig. 2.8(a) e (b). A primeira figura esclarece sobre a configuração destinada a determinação das contribuições advindas do circuito da concessionária (para a corrente total e para a tensão total) e a segunda está associada com as contribuições provenientes do consumidor. Neste momento considera-se oportuno lembrar que o uso do princípio da superposição para situações envolvendo componentes não lineares se mostra, numa primeira análise, inconsistente com os fundamentos físicos estabelecidos pela teoria de circuitos elétricos. Não obstante o reconhecimento e concordância com tais prerrogativas inquestionáveis, o autor desta pesquisa observa que o processo em pauta encontra-se aplicado, individualmente, a cada uma das frequências envolvidas no processo e o cerne da questão da superposição está vinculado com uma mesma frequência produzida pelos dois agentes envolvidos no processo. Portanto, não há superposição de efeitos distintos de uma frequência sobre outra.

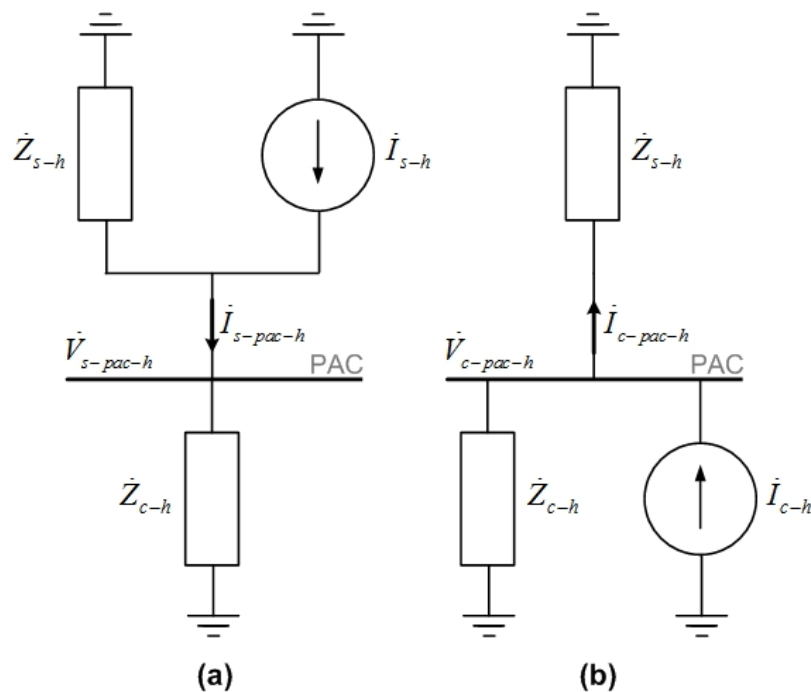


Fig. 2.8. Circuitos equivalentes de Norton para uma ordem harmônica h considerando: (a) contribuição da fonte e (b) contribuição do consumidor.

Na figura anterior:

$\dot{I}_{s-pac-h}$ – contribuição de corrente harmônica de ordem h da concessionária para a corrente \dot{I}_{pac-h} ;

$\dot{I}_{c-pac-h}$ – contribuição de corrente harmônica de ordem h do consumidor para a corrente \dot{I}_{pac-h} ;

$\dot{V}_{s-pac-h}$ – contribuição de tensão harmônica de ordem h da concessionária para a tensão \dot{V}_{pac-h} ;

$\dot{V}_{c-pac-h}$ – contribuição de tensão harmônica de ordem h do consumidor para a tensão \dot{V}_{pac-h} .

As contribuições de correntes harmônicas podem ser encontradas por meio da aplicação de princípios tradicionais de análise de circuitos e, no que tange às tensões, procedimentos similares podem ser utilizados, como esclarecido a seguir.

a) Método da superposição de correntes

As contribuições para a corrente harmônica no PAC podem ser determinadas através das equações (2.11) e (2.12).

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

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

Por conseguinte, a corrente total no PAC poderá ser obtida através da superposição destas componentes, ou seja:

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

O método da superposição de correntes proposto em [15,16] estabelece que o compartilhamento das responsabilidades entre as partes deve ser feito por meio dos valores das projeções 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 (\dot{I}_{pac-h}). Estas projeções estão evidenciadas na Fig. 2.9.

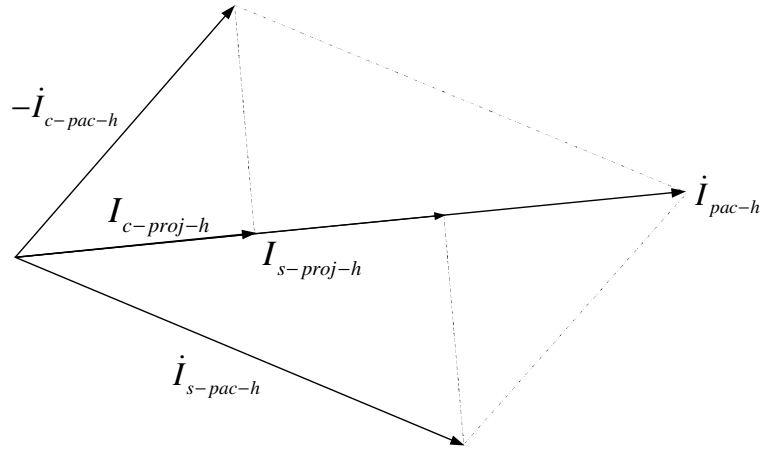


Fig. 2.9. Decomposição da corrente no PAC em dois escalares obtidos das projeções.

Onde:

$I_{s-proj-h}$ – é a projeção de $\dot{I}_{s-pac-h}$ sobre \dot{I}_{pac-h} ;

$I_{c-proj-h}$ – é a projeção de $-\dot{I}_{c-pac-h}$ sobre \dot{I}_{pac-h} .

b) Método da superposição de tensões

As contribuições para a tensão harmônica no PAC [42] podem ser determinadas através das equações (2.14) e (2.15).

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

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

A tensão harmônica no PAC poderá, então, ser obtida conforme se segue:

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

O método da superposição de tensões segue a mesma estratégia apresentada para superposição de correntes. Portanto, o princípio para o compartilhamento das responsabilidades entre os agentes deve ser realizado por meio dos valores das projeções dos fasores representativos das contribuições individuais de tensão ($\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$) sobre o fasor da tensão total (\dot{V}_{pac-h}), como indicado na Fig. 2.10.

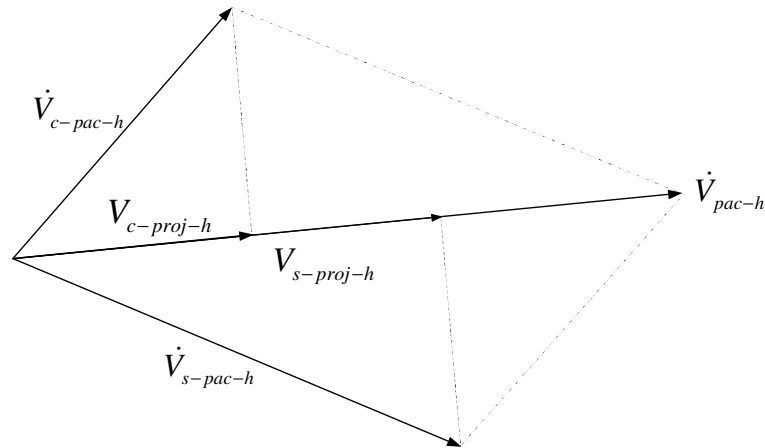


Fig. 2.10. Decomposição da tensão no PAC em dois escalares obtidos das projeções.

Em que:

$V_{s-proj-h}$ – é a projeção de $\dot{V}_{s-pac-h}$ sobre \dot{V}_{pac-h} ;

$V_{c-proj-h}$ – é a projeção de $\dot{V}_{c-pac-h}$ sobre \dot{V}_{pac-h} .

Ademais, a aplicação prática do método da superposição, seja via superposição de correntes ou tensões, nos termos discutidos, compreenderá a seguinte rotina:

- Determinar as impedâncias equivalentes \dot{Z}_{s-h} e \dot{Z}_{c-h} ;
- Realizar trabalhos de medição para se determinar \dot{V}_{pac-h} e \dot{I}_{pac-h} ;
- Calcular as fontes equivalentes \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} usando, respectivamente, as equações (2.9) e (2.10);
- Para superposição de correntes:
 - Calcular $\dot{I}_{s-pac-h}$ e $\dot{I}_{c-pac-h}$ usando, respectivamente, as equações (2.11) e (2.12);
 - Projetar $\dot{I}_{s-pac-h}$ e $-\dot{I}_{c-pac-h}$ sobre o fasor \dot{I}_{pac-h} , encontrando-se, assim, as parcelas $I_{s-proj-h}$ e $I_{c-proj-h}$ que definem as contribuições advindas da fonte e da carga;
- Para superposição de tensões:
 - Calcular $\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$ usando, respectivamente, as equações (2.14) e (2.15);
 - Projetar $\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$ sobre o fasor \dot{V}_{pac-h} , encontrando-se, assim, as parcelas $V_{s-proj-h}$ e $V_{c-proj-h}$ que definem as contribuições advindas da fonte e da carga.

Tendo em vista que as principais normas e recomendações, nacionais e internacionais, empregam valores de referência para as tensões harmônicas, em detrimento das correntes harmônicas, isto implica que, para o momento, o estabelecimento de um procedimento

direcionado à proposta defendida pelo método da superposição de tensões se mostra mais atrativo. Não obstante a tais observações, ambos os procedimentos serão considerados nos trabalhos investigativos subsequentes.

2.3.2. Avaliação computacional da metodologia

A Fig. 2.11 apresenta o arranjo elétrico destinado à aplicação do Método da Superposição. Como se constata, este encontra-se constituído por duas cargas consumidoras, possuindo, cada uma, componentes lineares e não lineares. Esta configuração, embora hipotética e bastante simples, oferece os meios necessários para a realização dos estudos e da análise dos resultados, visto que, conhecendo-se, a priori, as características e condições operativas de ambos, torna-se factível o prévio conhecimento das contribuições de cada um para as distorções harmônicas do PAC. Diante deste contexto, é importante observar que, ao se avaliar a distribuição de responsabilidades de um dado consumidor, o outro estará intrinsecamente inserido como parte integrante da rede de alimentação, e vice versa. Desta forma, o sistema dito como concessionária, na verdade, agrupa a rede de alimentação propriamente dita e os demais consumidores que não estão sendo objeto da avaliação em pauta. Portanto, uma vez predefinido que a rede de suprimento se apresenta com características ideais, e que ambos os consumidores sejam similares no que tange a composição de cargas, características de funcionamento e carregamentos, isto determina que as contribuições das mesmas deverão ser necessariamente iguais. Isto posto fica, então, estabelecido como expectativa física que as distorções totais de tensão encontradas no PAC (barramento 3) deverão ser iguais para o consumidor e a concessionária.

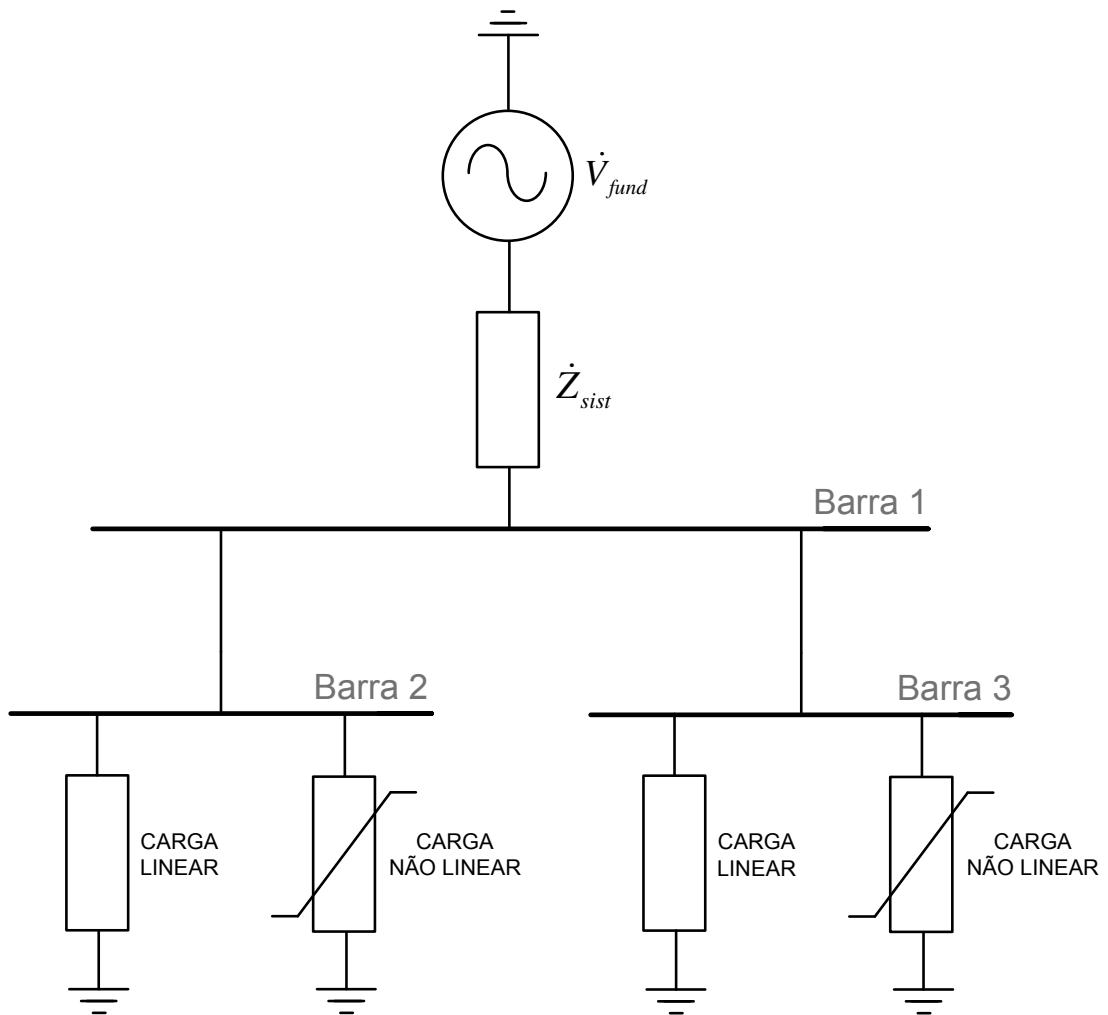


Fig. 2.11. Arranjo elétrico para estudos de desempenho das metodologias via superposição de correntes e de tensões.

Na figura, \dot{Z}_{sist} representa a impedância do sistema, que engloba a impedância do complexo de suprimento até o PAC. Também, pode-se notar que o referido arranjo expressa um circuito monofásico com uma fonte de tensão puramente senoidal.

Com base nas condições postuladas e considerando a barra 3 (Fig. 2.11) como sendo o Ponto de Acoplamento Comum a ser focado, tem-se na Fig. 2.12, para uma dada ordem harmônica h , o circuito equivalente de Norton representativo do complexo proposto.

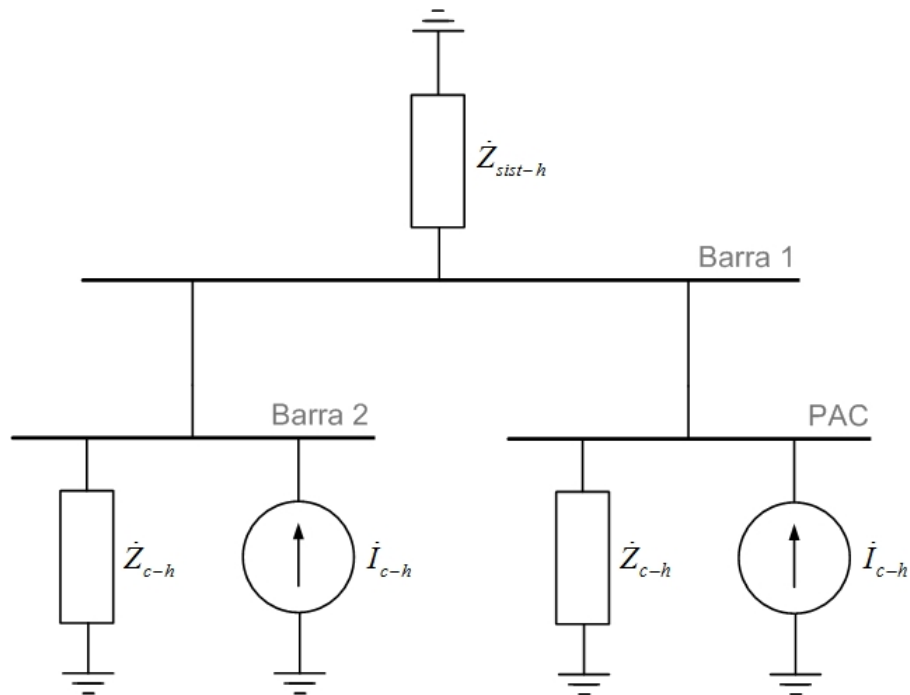


Fig. 2.12. Circuito equivalente de Norton de ordem h para o sistema elétrico proposto.

Agrupando a rede de suprimento com o consumidor conectado à barra 2 obtém-se o circuito equivalente mostrado na Fig. 2.13. Uma observação relevante a esta figura está no fato que a nova impedância equivalente do supridor corresponde à combinação paralela da impedância da fonte e do consumidor vizinho ao de interesse nos estudos. Da mesma forma, a fonte de corrente harmônica indicada na parte superior da figura representa a geração da componente de ordem h proveniente da carga adjacente, pois a fonte de alimentação do sistema se apresenta ideal.

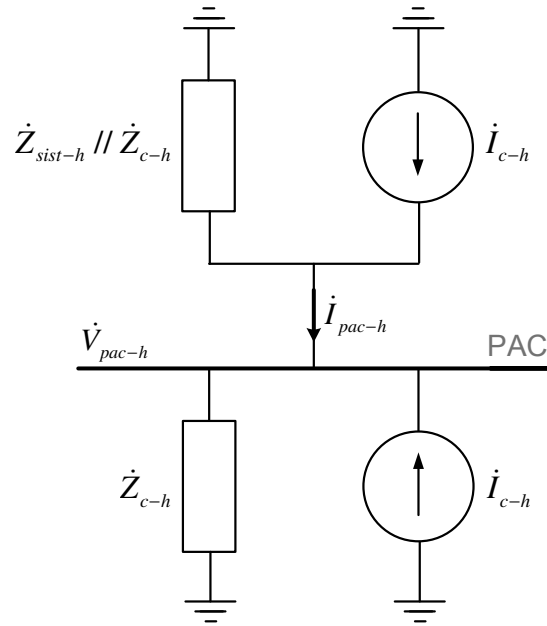


Fig. 2.13. Circuito equivalente de Norton para uma ordem harmônica h - visto do PAC.

Em consonância com a proposta anterior, a Fig. 2.14 quantifica as grandezas constantes no circuito precedente, visando assim uma maior simplicidade nas análises. E, nesse sentido, apenas a componente harmônica de ordem 5 será utilizada como fonte de distorção harmônica. Valendo ressaltar que esta foi uma escolha arbitrária.

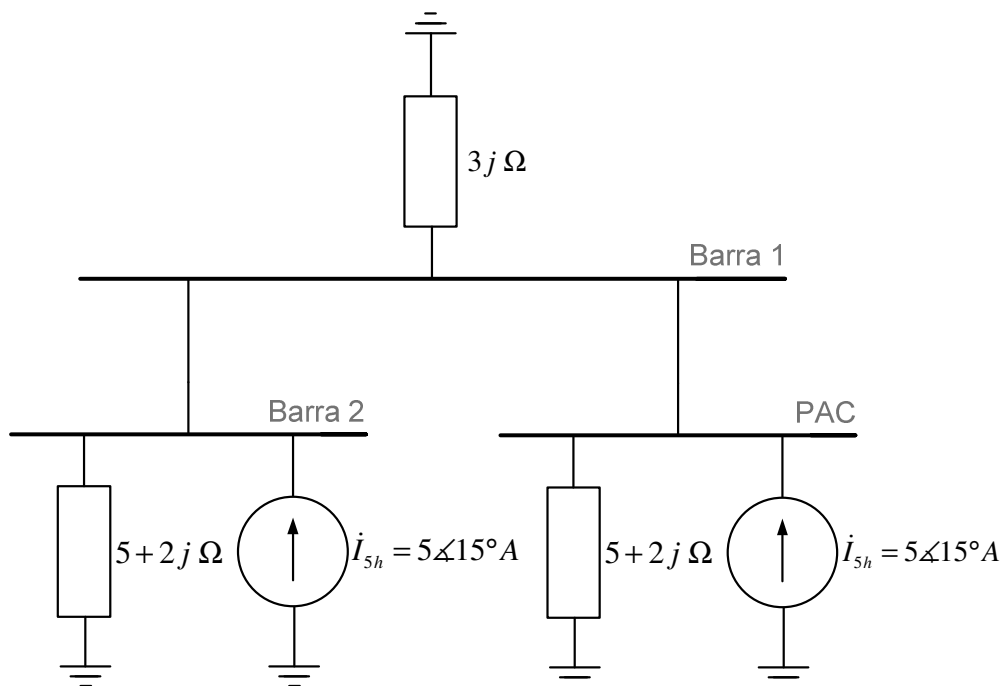


Fig. 2.14. Parametrização do circuito equivalente de Norton - ordem harmônica 5.

Para o circuito selecionado pode-se observar, mais uma vez, que:

- A rede de suprimento (fonte de tensão ideal), por si, não produz qualquer componente harmônica responsável pela distorção da tensão ou corrente no PAC;
- Portanto, quanto à origem da contribuição harmônica advinda da rede da concessionária, esta se encontra totalmente vinculada com o consumidor adjacente conectado ao barramento 2;
- Tendo em vista que ambos consumidores (consumidor vizinho e sob estudo) possuem fontes de distorções iguais, há de se esperar que as distorções harmônicas de tensão encontradas sejam igualmente compartilhadas entre as partes.

Empregando-se o método da superposição de correntes, anteriormente descrito, obtêm-se os resultados fornecidos na Tabela 2.6. As grandezas e respectivos valores são indicativos das contribuições individuais do supridor e do consumidor em foco para as correntes no PAC. Também, são apresentados os valores das projeções das componentes de corrente sobre a corrente total determinada no PAC.

Tabela 2.6 – Correntes no PAC e contribuições dos agentes envolvidos.

Grandezas	Valor Calculado (A)
$\dot{I}_{s-pac-5h}$	0,6374-46,4°
$\dot{I}_{c-pac-5h}$	4,729421,8°
\dot{I}_{pac-5h}	4,5314-150,7°
$I_{s-proj-5h}$	-0,157
$I_{c-proj-5h}$	4,688

A tabela anterior evidencia que:

- A aplicação do princípio da superposição de correntes produziu as duas parcelas de correntes harmônicas que formam a corrente total do PAC. Estas, conforme

destacado, possuem amplitudes distintas, sendo a parcela proveniente do consumidor maior que a advinda da concessionária. Isto se apresenta com coerência física em função da menor impedância equivalente da rede da concessionária;

- As projeções estão em consonância com as expectativas físicas, pois a contribuição do consumidor se apresenta com maior valor absoluto que a correspondente componente da concessionária;
- Nota-se, ainda, que as projeções encontram-se com sinais contrários, fato este que evidencia que a contribuição da concessionária está agindo no sentido de diminuir a distorção no PAC [15];
- Fica evidenciado que a metodologia sob análise não se mostra inconsistente quanto à atribuição de responsabilidades das distorções harmônicas de correntes no PAC. Contudo, os resultados são indicativos de que o grande responsável pelas distorções seria o consumidor sob análise;
- Por fim, as observações anteriores evidenciam que tal procedimento não se apresenta com a devida coerência para os estudos do compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas de tensão, uma vez que a atribuição de responsabilidades não resultou em um compartilhamento igualitário junto ao PAC.

A Tabela 2.7 apresenta os valores das contribuições individuais para as tensões no PAC e respectivas projeções.

Tabela 2.7 – Tensões no PAC e contribuições dos agentes envolvidos.

Grandezas	Valor Calculado (V)
$\dot{V}_{s-pac-5h}$	254,359∠130,1°
$\dot{V}_{c-pac-5h}$	254,359∠130,1°
\dot{V}_{pac-5h}	508,718∠130,1°
$V_{s-proj-5h}$	254,359
$V_{c-proj-5h}$	254,359

A tabela anterior evidencia que:

- A aplicação do método da superposição de tensões permitiu determinar duas parcelas de tensões harmônicas que formam a tensão harmônica do PAC. Estas se apresentam com amplitudes iguais, o que já era esperado, uma vez que as fontes de distorções presentes em cada circuito são idênticas;
- As projeções estão em consonância com as expectativas físicas, pois as contribuições do consumidor e do supridor se apresentam com os mesmos valores;
- Nota-se, ainda, que as projeções encontram-se com mesmos sinais, fato este que evidencia que a contribuição da concessionária e do consumidor intensificam a distorção total do PAC;
- Por fim, fica evidenciado que a metodologia sob análise, via componentes de tensão, se mostra apropriada aos fins aqui almejados.

Não obstante a simplicidade das metodologias apresentadas, vale ressaltar que um dos pontos mais complexos para a aplicação do processo e exatidão das respostas, para sistemas reais, está na necessidade do conhecimento das impedâncias equivalentes da concessionária e, de modo especial, do consumidor. Tal problemática será melhor discutida nas considerações finais deste capítulo.

2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Num primeiro momento, o presente capítulo procurou explorar, sob o ponto de vista da fundamentação, aplicabilidade e consistência de resultados, um dos mais simples e difundidos mecanismos para a determinação da fonte dominante das distorções harmônicas, qual seja, o método do fluxo da potência harmônica. Este procedimento, de fato, já se encontra disponibilizado numa boa parte dos equipamentos de medição dos indicadores de qualidade da energia encontrados no mercado. Os trabalhos primaram pelo desenvolvimento matemático da metodologia, fundamentação esta desenvolvida de forma original neste trabalho. Somado a considerações teóricas da análise do fluxo de potência, os desenvolvimentos prosseguiram através da definição e avaliação crítica dos resultados obtidos para um sistema elétrico hipotético. Este foi implementado no simulador ATP e os estudos computacionais foram realizados por meio deste recurso. Com tal estratégia em mente, foram realizadas avaliações da responsabilidade dominante sobre as distorções harmônicas do PAC através da metodologia do fluxo de potência e com as condições operativas das fontes dominantes predefinidas.

Os resultados das investigações quanto à aplicação da proposta de identificação de responsabilidades sobre as distorções harmônicas supra sintetizado apontaram para a seguinte constatação: *o método sob análise não possui a necessária confiabilidade para a determinação da fonte predominante das distorções harmônicas, isto é, se a maior contribuição é advinda do supridor ou do consumidor.* Diante do exposto, este trabalho indicou, de forma clara e inequívoca, a fragilidade da metodologia do fluxo de potência com vistas à determinação da fonte harmônica dominante, evidenciando, deste modo, que os desafios ainda se fazem presentes para o estabelecimento de procedimentos que conduzam a uma adequada identificação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas.

Em um segundo momento, os trabalhos avançaram no sentido de apresentar, avaliar e discutir o método da superposição de efeitos, o qual se apresenta como um dos mais difundidos e promissores procedimentos voltados ao compartilhamento de responsabilidades. Os estudos contemplados, além de apresentarem uma síntese dos processos existentes, primaram pelo estabelecimento de um arranjo elétrico hipotético para o estudo de desempenho da metodologia em foco. Os resultados obtidos, como esclarecido no texto, ratificaram as críticas sobre o fato que o emprego da superposição de correntes para os fins esperados (compartilhamento das tensões harmônicas) se mostra inadequado. No entanto, quando a análise se apresenta fundamentada nas contribuições das tensões harmônicas, houve uma boa correlação entre os desempenhos esperados e obtidos.

Embora a simplicidade e os resultados atingidos através da aplicação do método da superposição, vale ressaltar que um dos pontos mais complexos para se atingir uma boa exatidão dos resultados encontra-se vinculado com a necessidade do conhecimento prévio das impedâncias harmônicas equivalentes da concessionária e do consumidor. Esta dificuldade é diretamente impactante sobre a qualidade e exatidão dos resultados de compartilhamento. De fato, em função da utilização de valores equivocados para as impedâncias equivalentes, pode-se constatar grandes discrepâncias numéricas e até mesmo inconsistências físicas quanto a emissão de um parecer final sobre os percentuais e responsabilidades entre os agentes. Diante desta conjuntura, os desenvolvimentos subsequentes foram centrados na busca de soluções para as questões elencadas e, assim, será considerado no capítulo subsequente, o qual se constitui no cerne da contribuição desta pesquisa.

CAPÍTULO III

MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO MODIFICADO

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os procedimentos estabelecidos na metodologia da superposição, conforme já ressaltado no texto, encontram grandes barreiras quando se considera certos aspectos a exemplo da caracterização e obtenção dos parâmetros representativos das impedâncias harmônicas equivalentes dos agentes envolvidos. De fato, tais dificuldades e seus impactos sobre a qualidade dos resultados obtidos através da aplicação do processo, já apontado em trabalhos anteriores e devidamente referenciados no texto anterior, conduzem a erros bastante significativos para os resultados dos compartilhamentos, fato este que determina a ineficácia do processo nos termos atuais para os propósitos almejados. À luz destas constatações, este capítulo está centrado na busca de uma alternativa para contornar os problemas aqui destacados.

Tendo isto em mente, foram então conduzidas investigações diversas, as quais, por fim, culminaram em um procedimento simples e factível de ser aplicado a casos reais. Tal estratégia encontra-se, também, embasada no princípio da superposição e envolve a inserção

de uma impedância harmônica dominante no PAC, produzindo, deste modo, um procedimento diferenciado em relação ao estabelecido na literatura até o presente momento.

Vale observar que a mencionada impedância harmônica dominante se apresenta na forma de um filtro com frequência de ressonância ajustável ou outro que atenda as necessidades do método, o qual se configura como um recurso físico adicional que seria instalado junto a um determinado PAC tão somente durante os trabalhos de medição para a extração das informações requeridas à aplicação do compartilhamento aqui almejado.

A metodologia ora proposta, devido às suas características e fundamentação distintas da proposta contemplada no Capítulo II, será designada por Método da Superposição Modificado. Este será tratado no que tange à sua fundamentação física, formulações matemáticas e avaliação computacional de desempenho. Tendo, este último, o objetivo de correlacionar os novos resultados de atribuições de responsabilidade com aqueles obtidos a partir da aplicação da metodologia tradicional.

3.2. METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta nesta pesquisa se apoia no princípio da superposição de tensões, como determinado pelas equações (2.14) e (2.15) do capítulo anterior. E, como já mencionado, estas expressões revelam a grande importância que as impedâncias equivalentes da rede de suprimento e do consumidor exercem sobre a consistência dos resultados da análise do compartilhamento da responsabilidade das distorções harmônicas individuais e totais, encontradas num determinado PAC.

Reconhecendo este fato, a metodologia proposta é iniciada através da definição de uma grandeza complexa representativa da relação entre as impedâncias, como indicado na equação (3.1).

$$\dot{K}_h = \frac{\dot{Z}_{s-h}\dot{Z}_{c-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{c-h}} \quad (3.1)$$

Introduzindo esta definição nas expressões (2.14) e (2.15):

$$\dot{V}_{s-pac-h} = \dot{K}_h \dot{I}_{s-h} \quad (3.2)$$

$$\dot{V}_{c-pac-h} = \dot{K}_h \dot{I}_{c-h} \quad (3.3)$$

Nota-se, a partir das relações (3.2) e (3.3), que as parcelas de contribuição de cada um dos agentes envolvidos para a distorção harmônica total no PAC, para uma dada situação operacional, dependem exclusivamente das correntes \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} . Portanto, para se realizar o compartilhamento de responsabilidades, será suficiente o conhecimento destas correntes, ou da proporcionalidade entre as mesmas.

À luz da constatação anteriormente descrita, o procedimento aqui proposto consiste numa estratégia bastante simples, a qual se configura pela conexão junto ao PAC, de um componente passivo que apresente como uma impedância harmônica conhecida e dominante sobre aquelas referidas anteriormente (\dot{Z}_{s-h} e \dot{Z}_{c-h}), visto que, assim, tornar-se-á possível a determinação das supra citadas parcelas de correntes harmônicas e, por conseguinte, a determinação da procurada distribuição de responsabilidades entre os agentes envolvidos.

A Fig. 3.1 ilustra a nova configuração do sistema com a inserção de uma impedância harmônica, o qual deverá se apresentar, para cada frequência sob foco, com um módulo significativamente inferior aqueles representativos da rede e da carga. Para se atingir este propósito, naturalmente, uma primeira ideia para se obter a propriedade de uma baixa impedância relativa seria o emprego de um filtro sintonizado com frequência de ressonância

ajustada para aquela para o qual se deseja conhecer as contribuições harmônicas, ou ainda, o emprego de um filtro amortecido, ajustado para uma certa faixa de frequências.

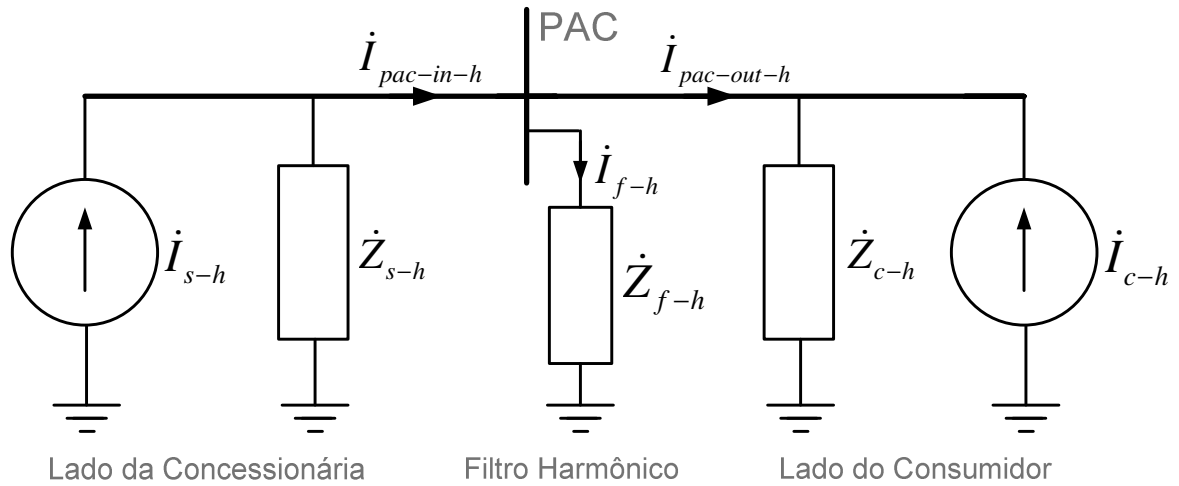


Fig. 3.1. Arranjo físico relacionado com o Método da Superposição Modificado.

Na figura anterior:

Z_{f-h} - impedância harmônica equivalente do filtro para a ordem h ;

i_{f-h} - corrente harmônica de ordem h no filtro harmônico;

$i_{pac-in-h}$ - corrente harmônica de ordem h à montante do PAC;

$i_{pac-out-h}$ - corrente harmônica de ordem h à jusante do PAC.

Na sequência, procede-se à formulação aplicável ao novo circuito, utilizando-se, para tanto, o princípio da superposição. Para fundamentar o equacionamento, apresenta-se, através das Figs. 3.2(a) e (b), os circuitos equivalentes para o arranjo em pauta.

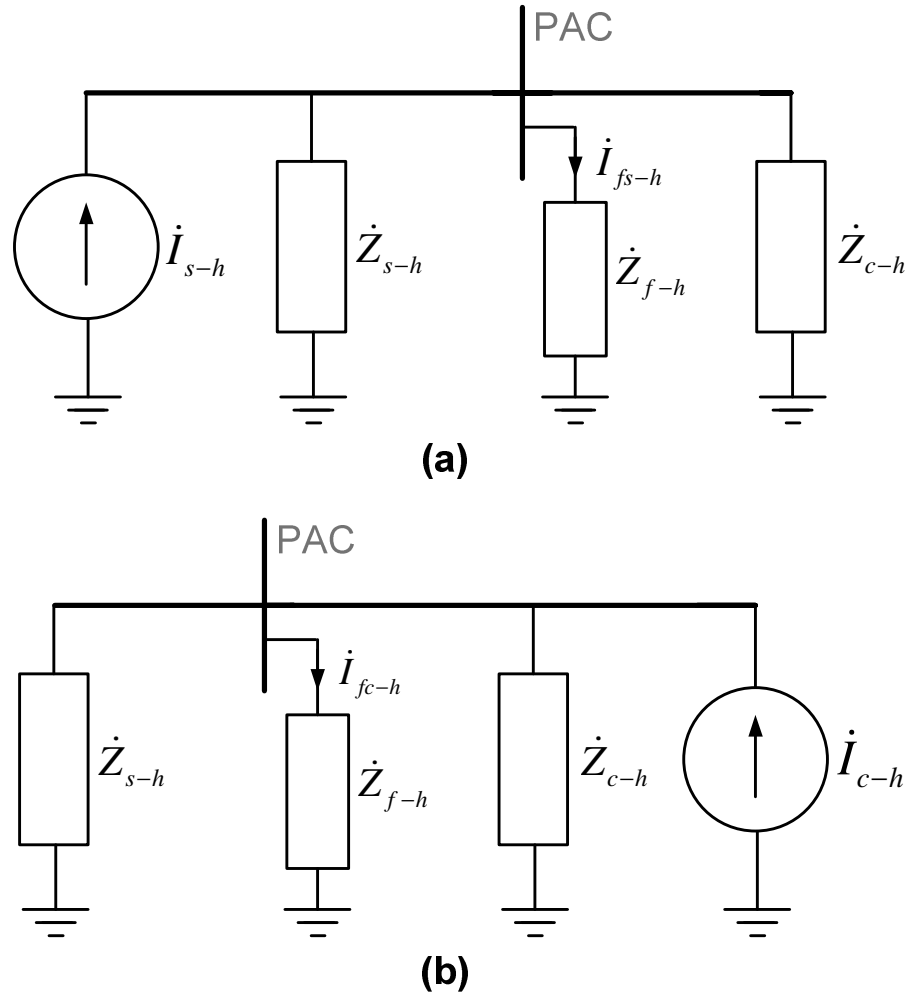


Fig. 3.2. Circuitos equivalentes indicando as contribuições individuais da fonte e consumidor – com a inserção da impedância harmônica dominante para uma ordem h .

Nas figuras:

\dot{I}_{fs-h} - contribuição de corrente harmônica de ordem h da concessionária para a corrente do filtro \dot{I}_{f-h} ;

\dot{I}_{fc-h} - contribuição de corrente harmônica de ordem h do consumidor para a corrente do filtro \dot{I}_{f-h} .

Em vista do fato que, em se tratando de um filtro, a nova tensão harmônica de ordem h no PAC se apresentará com um valor reduzido, as seguintes observações são válidas:

- A impedância do filtro \dot{Z}_{f-h} é predominante sobre as demais impedâncias do sistema, isto é, esta deve ter um valor significativamente inferior às correspondentes impedâncias do sistema supridor e do consumidor;
- Diante desta conjuntura, a corrente \dot{I}_{fs-h} – Fig. 3.2a – será praticamente igual a \dot{I}_{s-h} ;
- Complementarmente, a corrente \dot{I}_{fc-h} – Fig. 3.2b – será aproximadamente igual a \dot{I}_{c-h} ;
- À luz destes fatos, pode-se então escrever as equações (3.4) e (3.5).

$$\dot{I}_{fs-h} \cong \dot{I}_{s-h} \cong \dot{I}_{pac-in-h} \quad (3.4)$$

$$\dot{I}_{fc-h} \cong \dot{I}_{c-h} \cong -\dot{I}_{pac-out-h} \quad (3.5)$$

Por fim, aplicando-se o princípio da superposição tem-se que a corrente de ordem h no filtro será:

$$\dot{I}_{f-h} = \dot{I}_{fs-h} + \dot{I}_{fc-h} = \dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h} = \dot{I}_{pac-in-h} - \dot{I}_{pac-out-h} \quad (3.6)$$

Uma vez encontradas \dot{I}_{fs-h} e \dot{I}_{fc-h} , tendo em vista a aplicação da metodologia da superposição de tensões, deve-se proceder às projeções destes fasores sobre aquele representativo da corrente total \dot{I}_{f-h} , gerando, respectivamente, as projeções $\dot{I}_{fs-proj-h}$ e $\dot{I}_{fc-proj-h}$. Estas componentes podem ser visualizadas na ilustração da Fig. 3.3.

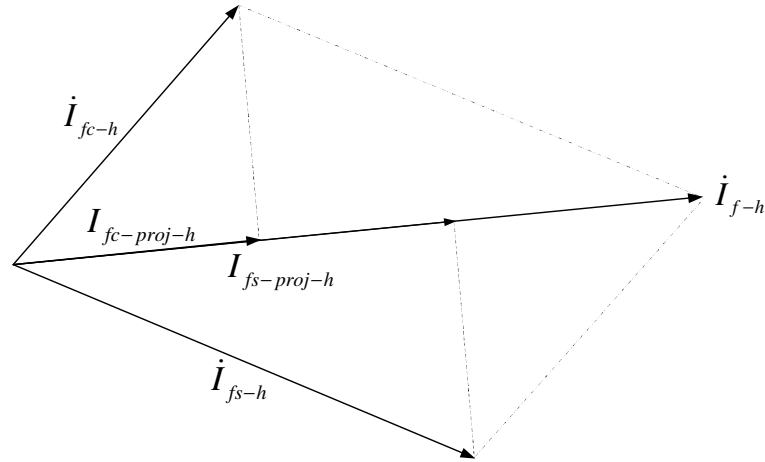


Fig. 3.3. Decomposição da corrente no filtro em dois escalares obtidos das projeções.

Onde:

$I_{fs-proj-h}$ – é a projeção de \dot{I}_{fs-h} sobre \dot{I}_{f-h} ;

$I_{c-proj-h}$ – é a projeção de \dot{I}_{fc-h} sobre \dot{I}_{f-h} .

A Fig. 3.3 mostra a atribuição de responsabilidades, via metodologia proposta, como resultado das projeções das contribuições de corrente, de cada uma das partes, para a corrente harmônica total de ordem h do filtro, todavia, vale ressaltar que estas contribuições, conforme desenvolvimento previamente realizado e apresentado, embora se utilizem de grandezas vinculadas com a medição de correntes, estão em plena harmonia com a estratégia clássica de superposição de tensões, que fora também anteriormente explanada.

Do exposto segue que o compartilhamento de responsabilidades sobre a distorção harmônica de ordem h em um PAC, em consonância com as etapas apresentadas, deve obedecer à sequência de procedimentos abaixo estabelecida para se atingir o ponto focal aqui almejado:

1. Inserir um filtro harmônico junto ao PAC, com frequências compatíveis com as componentes harmônicas de interesse;

2. Determinar as grandezas: $\dot{I}_{pac-in-h}$ e $\dot{I}_{pac-out-h}$, como indicadas no circuito da Fig. 3.2;
3. Encontrar \dot{I}_{fs-h} , \dot{I}_{fc-h} e \dot{I}_{f-h} usando, respectivamente, (3.4), (3.5) e (3.6);
4. Projetar os fasores \dot{I}_{fs-h} e \dot{I}_{fc-h} sobre o \dot{I}_{f-h} ;
5. Por fim, determinar os percentuais que definirão as parcelas de responsabilidades, empregando, para tanto, os resultados numéricos das projeções supra referenciadas.

3.3. AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO DO MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO MODIFICADO

Para fins de avaliação da metodologia proposta, esta seção encontra-se voltada para um estudo de um caso hipotético envolvendo um suprimento, em nível de distribuição, para dois consumidores adjacentes e responsáveis pela geração de distorções harmônicas.

3.3.1. Arranjo elétrico

A Fig. 3.4 apresenta o arranjo em pauta, o qual, como se constata, representa uma configuração tipicamente encontrada em redes elétricas. Muito embora a simplicidade do arranjo, o mesmo se apresenta com características próprias aos objetivos aqui delineados e, com o intuito de uma maior generalização do problema, optou-se pelo emprego de um circuito para o qual os dois consumidores se apresentam, operacionalmente, com características distintas, mantendo-se, todavia, o suprimento da concessionária como ideal.

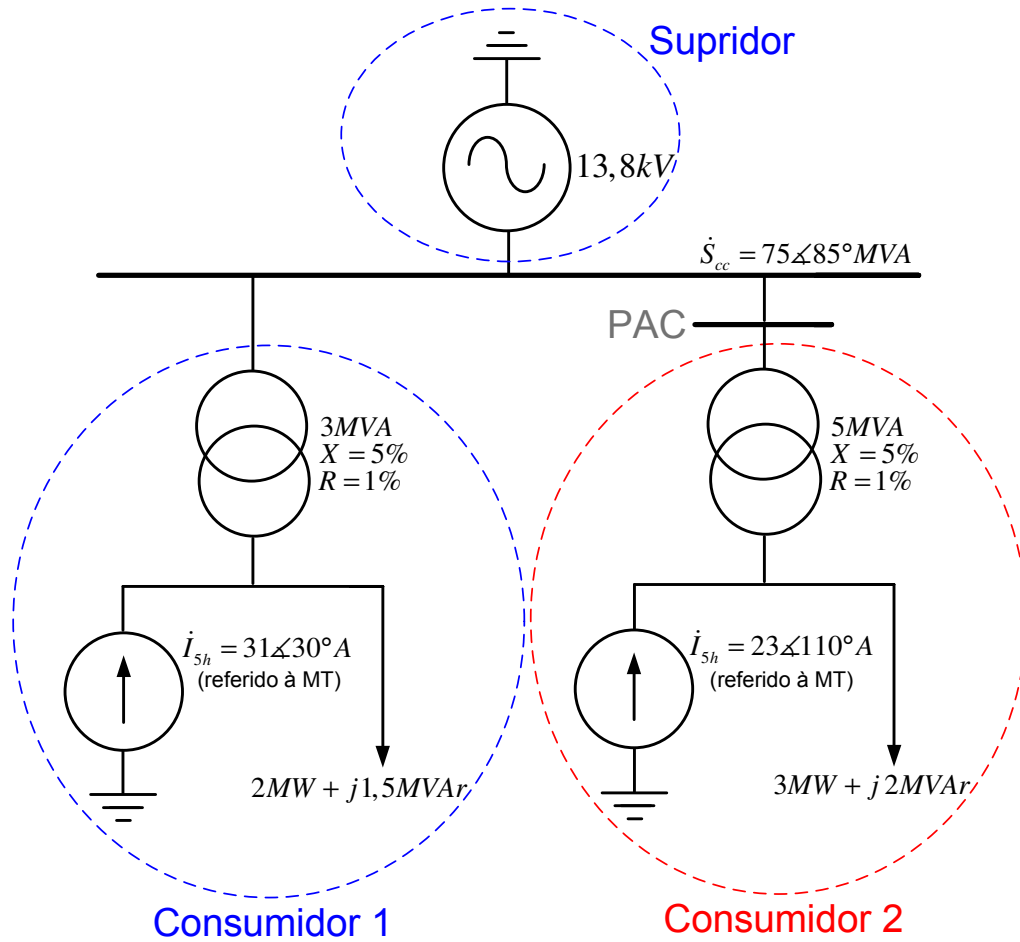


Fig. 3.4. Arranjo elétrico adotado para os estudos computacionais de desempenho da metodologia proposta.

Como esclarece o circuito equivalente utilizado, este é composto por um suprimento ideal de 13,8 kV em 60 Hz. Portanto, no que tange à rede de alimentação, esta não possui qualquer distorção inicial, a não ser os efeitos advindos dos consumidores. Quanto aos consumidores 1 e 2, estes são conectados ao barramento de média tensão por meio de transformadores. As principais características atreladas com o complexo utilizado, encontram-se identificadas na própria figura, a qual evidencia que as cargas possuem natureza linear ($P+jQ$) e injeções de correntes harmônicas, para o caso, definida pela componente de ordem 5. Estas últimas, em consonância com procedimentos clássicos, são representadas por fontes

de correntes, as mesmas já se encontram referidas, conforme destacado na figura, ao lado de média tensão (MT).

3.3.2. Resultados obtidos através da aplicação da Metodologia da Superposição Modificada

Visando-se a aplicação da metodologia ora proposta, conduziu-se, neste caso, a introdução, no circuito sob análise, de um filtro sintonizado para 300 Hz, objetivando-se, assim, se atingir uma impedância harmônica dominante para a frequência analisada.

A Tabela 3.1 fornece os parâmetros por fase do filtro harmônico sintonizado para a ordem 5, o qual, para a frequência fundamental, proporciona uma potência reativa trifásica da ordem de 2 MVar. O filtro escolhido se apresenta com um fator de qualidade [43] de aproximadamente 63.

Tabela 3.1 – Parâmetros por fase do filtro sintonizado de ordem 5 inserido no sistema.

Parâmetro	Valor
C	27,9 μF
L	10,1 mH
R	0,3 Ω

A título de ilustração, o filtro harmônico acima especificado representa, na frequência de 300 Hz, uma impedância equivalente de $0,301\angle 4,4^\circ \Omega$. Por outro lado, as respectivas impedâncias equivalentes da rede de suprimento e do consumidor, que foram adotadas, valem, respectivamente, $12,103\angle 88,4^\circ \Omega$ e $162,186\angle 74,1^\circ \Omega$ na 5ª ordem harmônica. Isto posto resulta que, para o arranjo selecionado na frequência avaliada, a impedância do filtro é de cerca de 2,5% da impedância equivalente da concessionária e 0,2% da impedância equivalente do consumidor. Como se pode notar, a impedância do filtro em questão mostra-

se, como era esperado, dominante quando comparada às impedâncias do sistema suprido e/ou consumidor.

Tem-se representado na Fig. 3.5, o circuito equivalente de Norton do arranjo estabelecido, o qual se apresenta com o circuito do filtro inserido. Tal figura evidencia que o consumidor 1 foi adicionado à rede de suprimento, uma vez que o PAC está definido no ponto de acoplamento do consumidor 2. Os detalhes do processo de obtenção deste arranjo unifilar equivalente são aqui omitidos por obedecerem aos procedimentos tradicionais de circuitos elétricos.

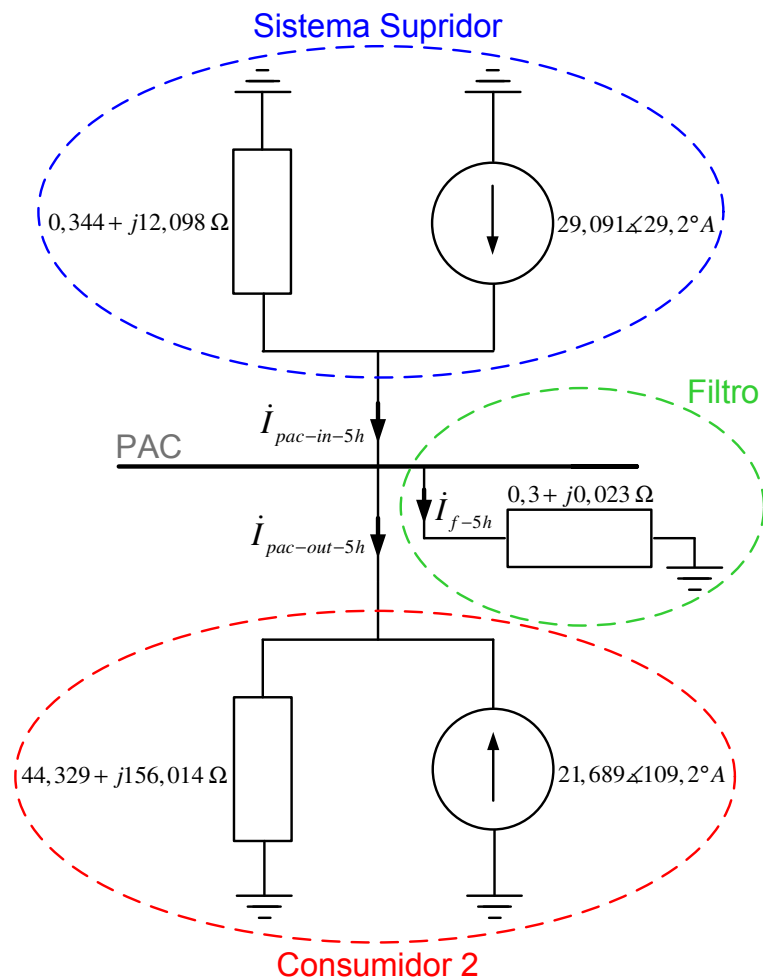


Fig. 3.5. Circuito equivalente de Norton para a ordem harmônica 5 com a inserção do filtro sintonizado no PAC.

Para a configuração obtida, em consonância com a proposta deste capítulo, realizaram-se, então, os cálculos dos percentuais de contribuição do sistema supridor equivalente (concessionária e consumidor 1) e do consumidor 2, para a distorção harmônica de 5ª ordem no ponto de acoplamento. Para tanto, procede-se, primeiramente, aos cálculos das correntes harmônicas de 300 Hz à montante e à jusante do PAC, assim como a corrente do filtro, obtendo-se os valores constantes na Tabela 3.2. É importante ressaltar que tais grandezas, para complexos elétricos reais, seriam obtidas através de medições diretas mediante a inserção de impedância dominante (filtro).

Tabela 3.2 – Correntes harmônicas – com filtro sintonizado.

Corrente	Valor
$\dot{I}_{pac-in-5h}$	28,47 4 30,7° A
$\dot{I}_{pac-out-5h}$	21,72 4 70,7° A
\dot{I}_{f-5h}	39,06 4 63,7° A

Empregando-se os valores das correntes harmônicas da Tabela 3.2, chega-se, mesmo em uma hipótese de haver o total desconhecimento das impedâncias equivalentes do sistema supridor e do consumidor, aos resultados da Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor – tensão harmônica de ordem 5 – Método da Superposição Modificado.

Referência	Resultado das Projeções	Parcelas de Responsabilidades
Supridor	$I_{fs-proj-5h} = 23,867 \text{ A}$	61,1%
Consumidor	$I_{fc-proj-5h} = 15,195 \text{ A}$	38,9%

Vale observar que os resultados anteriores devem ser considerados conjuntamente com as equações (3.2) e (3.3) visto que estas evidenciam que os percentuais das correntes estão

diretamente atrelados com as responsabilidades sobre as distorções de tensões através da relação complexa \hat{K}_h . Este fato determina que, não obstante os valores indicados na Tabela 3.3 sejam expressos em correntes, estes percentuais são indicativos das parcelas de contribuições do supridor e consumidor para a distorção de tensão do PAC.

3.3.3. Valores esperados para as responsabilidades sobre as distorções harmônicas

Objetivando-se agora, a obtenção dos valores esperados que se apresentariam como o “gabarito” para os valores de atribuição de responsabilidades, visto que todos os componentes e grandezas envolvidas são conhecidos, aplicou-se o método tradicional de superposição de tensões. Neste íterim, tendo por base os princípios apresentados, o circuito equivalente de Norton, para a ordem harmônica sob análise, encontra-se indicado na Fig. 3.6.

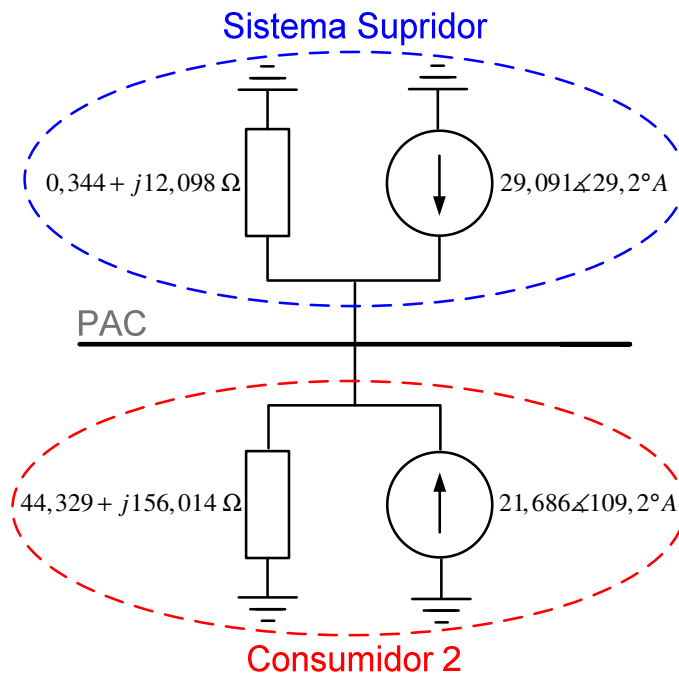


Fig. 3.6. Circuito equivalente de Norton para a ordem harmônica 5.

Uma vez obtido o presente modelo e realizados os devidos cálculos visando a obtenção das parcelas de responsabilidades sobre a distorção harmônica de ordem 5 que se manifestaria no PAC, a Tabela 3.4 apresenta os resultados derivados da aplicação do método da superposição de tensões. Tais proporções serão consideradas, conforme já mencionado, como sendo os valores esperados (valores corretos) para efeito de futuras comparações.

Tabela 3.4 – Percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor – tensão harmônica de ordem 5 – valores esperados.

Referência	Resultado das Projeções	Parcelas de Responsabilidades
Supridor	$V_{s-proj-5h} = 275,308 V$	62,2%
Consumidor	$V_{c-proj-5h} = 167,103 V$	37,8%

Para se atingir estes resultados, vale lembrar a necessidade de informações de grande relevância ao processo do compartilhamento nos termos estabelecidos. São elas: as impedâncias equivalentes para a concessionária e consumidores e as distorções harmônicas de tensão e de corrente no PAC para cada ordem harmônica sob consideração. O pré conhecimento das impedâncias harmônicas para os sistemas reais, tanto no que se refere à concessionária como o consumidor, constitui-se, como já amplamente discutido, na maior dificuldade de aplicação do processo clássico nos termos anteriormente esclarecidos.

3.3.4. Análise comparativa dos resultados

Tendo-se estabelecidos os valores esperados da atribuição de responsabilidades, pode-se observar, na Tabela 3.5, um quadro comparativo entre os resultados provenientes da aplicação computacional da Metodologia da Superposição Modificada e as parcelas de responsabilidades provenientes dos procedimentos clássicos de superposição.

Tabela 3.5 – Quadro comparativo entre os resultados de atribuição de responsabilidades – valores esperados versus metodologia proposta – avaliação computacional.

Percentuais de Atribuição de Responsabilidades			
Valores Esperados		Resultados Advindos da Metodologia Proposta	
Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor
62,2%	37,8%	61,1%	38,9%

Os resultados apresentados, nesta tabela, evidenciam uma boa correlação entre os indicadores esperados (valores corretos) e os obtidos via aplicação do Método da Superposição Modificado.

Todavia, mais uma vez vale ressaltar que as grandezas tidas por valores esperados exigiram o levantamento das impedâncias harmônicas dos agentes envolvidos, enquanto que os valores encontrados por meio da metodologia ora proposta não necessitam do conhecimento de tais parâmetros.

3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Muito embora a praticidade e simplicidade dos procedimentos estabelecidos na metodologia da superposição tradicional, a utilização da mesma encontra grandes dificuldades quando da caracterização e obtenção dos parâmetros representativos das impedâncias harmônicas equivalentes dos agentes envolvidos, conforme ressaltado no texto. Como demonstrado em outros trabalhos, as imprecisões vinculadas às impedâncias equivalentes conduzem a erros bastante significativos para os resultados dos compartilhamentos, fato este que determina a ineficácia do processo, nos termos propostos pela literatura, para os propósitos almejados. À luz destas constatações, este capítulo concentrou-se na busca de uma alternativa para contornar os problemas aqui apontados, o que orientou para uma sistemática que conduzisse a um mecanismo de cálculo para o qual as impedâncias do supridor e do

consumidor passassem a ter um papel secundário no processo. Neste sentido surgiu a ideia da utilização, junto ao ponto de acoplamento entre a fonte a carga, de uma impedância dominante sobre as demais, fato este que originou a inserção de um filtro sintonizado (ou outro), o qual, uma vez anexado ao arranjo sob análise, proporcionou meios para se atingir as parcelas de responsabilidades entre as partes. Para ilustrar a aplicação da proposta, através de um arranjo elétrico hipotético, procedeu-se a aplicação do processo, a qual revelou uma boa correlação entre os resultados esperados e obtidos, ratificando, assim, que o Método da Superposição Modificado apresenta um desempenho apropriado aos fins almejados. Naturalmente, há de se considerar que os indicativos até então obtidos foram fundamentados em desenvolvimentos teóricos e não em trabalhos de campo, fato este que orienta, inevitavelmente, à necessidade de estudos complementares, os quais serão contemplados nos capítulos subsequentes.

CAPÍTULO IV

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE DESEMPENHO DO MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO MODIFICADO

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma vez realizados os trabalhos de cunho teórico e computacional, assim como uma análise crítica dos processos clássicos encontrados na literatura pertinente, procede-se, nesta etapa da pesquisa, ao desenvolvimento de atividades relacionadas diretamente com experimentos laboratoriais, num ambiente totalmente controlado no que tange às distorções advindas da fonte de suprimento, carga alimentada e parâmetros diversos, visando, sobretudo, a ratificação ou não da consistência da metodologia proposta por esta tese.

Para tanto, é estabelecida uma estrutura física formada por um suprimento elétrico oferecido por uma fonte programável com tensão praticamente senoidal. Através desta é alimentado um conjunto de cargas lineares e não lineares, as quais representam dois consumidores adjacentes, arranjo este, correspondente a muitas situações tipicamente encontradas em campo. Tais cargas se apresentam com características tais a possuírem

elementos passivos lineares (resistores e indutores), adicionados por componentes fortemente não lineares, a exemplo de retificadores e reatores a núcleo saturado.

Através deste arranjo, e alternando-se a predominância da geração de componentes harmônicas por um e outro consumidor, são produzidas situações diversas de operação, em que pese os aspectos qualitativos e quantitativos dos níveis de responsabilidades entre as partes e, por fim, são utilizados os princípios de determinação das parcelas de contribuições sobre as distorções harmônicas junto ao Ponto de Acoplamento Comum.

Assim procedendo obtêm-se, complementarmente, via utilização de método clássico atrelado com os princípios da superposição de tensões, valores de responsabilidades das distorções harmônicas que podem ser tidos como esperados ou “gabaritos”. Estes valores passam, então, a constituir-se um banco de dados a ser empregado para fins comparativos, com o intuito de fornecer bases à avaliação de desempenhos da aplicação da metodologia proposta, a saber, da superposição modificada.

4.2. ARRANJO EXPERIMENTAL

O arranjo experimental adotado, como anteriormente referido, é constituído por uma tensão monofásica fornecida por uma fonte programável, responsável por um suprimento praticamente senoidal. Esta, como indicado na Fig. 4.1, encontra-se alimentando dois consumidores, cada qual com suas particularidades quanto aos seus componentes lineares e não lineares. Vale ressaltar que, um deles, para fins deste trabalho, deve ser visto como integrante da rede de suprimento, conforme ocorre para as instalações reais, e o outro, constitui-se aquele para o qual é focado o seu PAC para os estudos aqui realizados. De fato, a carga adotada como parte da rede de alimentação possui uma natureza tal que pode ser considerada como o equivalente de um grande conjunto de consumidores circunvizinhos àquela para a qual se deseja determinar o nível percentual de contribuição para as distorções

harmônicas medidas no ponto de acoplamento em foco. Reportando à figura anteriormente mencionada, para maior clareza, destaca-se que o consumidor denominado por 1 corresponde à carga equivalente adicionada ao sistema supridor, enquanto que o chamado consumidor 2 é aquele para o qual se busca a responsabilidade sobre as distorções harmônicas encontradas junto ao destacado barramento PAC.

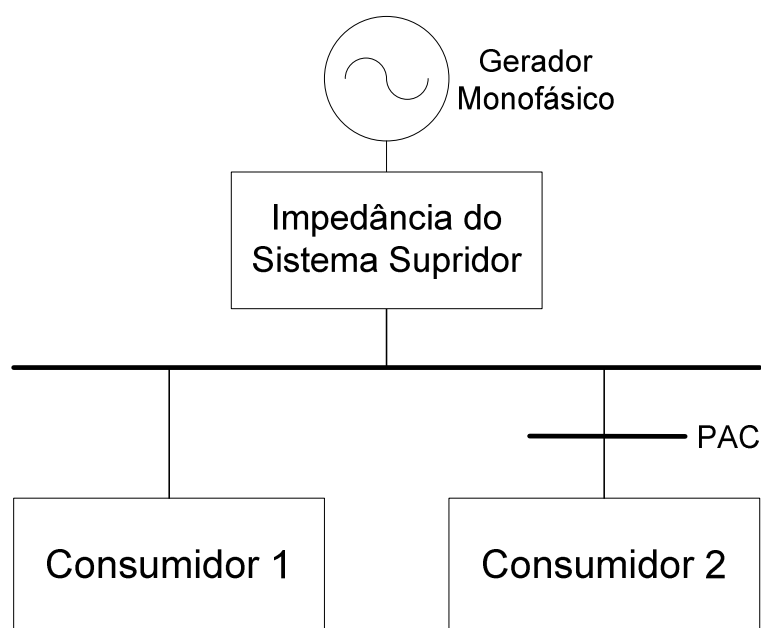


Fig. 4.1. Diagrama de blocos do arranjo experimental usado para avaliação de desempenho da Metodologia da Superposição Modificada.

O arranjo físico completo utilizado para fins dos trabalhos experimentais, em seus pormenores, encontra-se apresentado na Fig. 4.2.

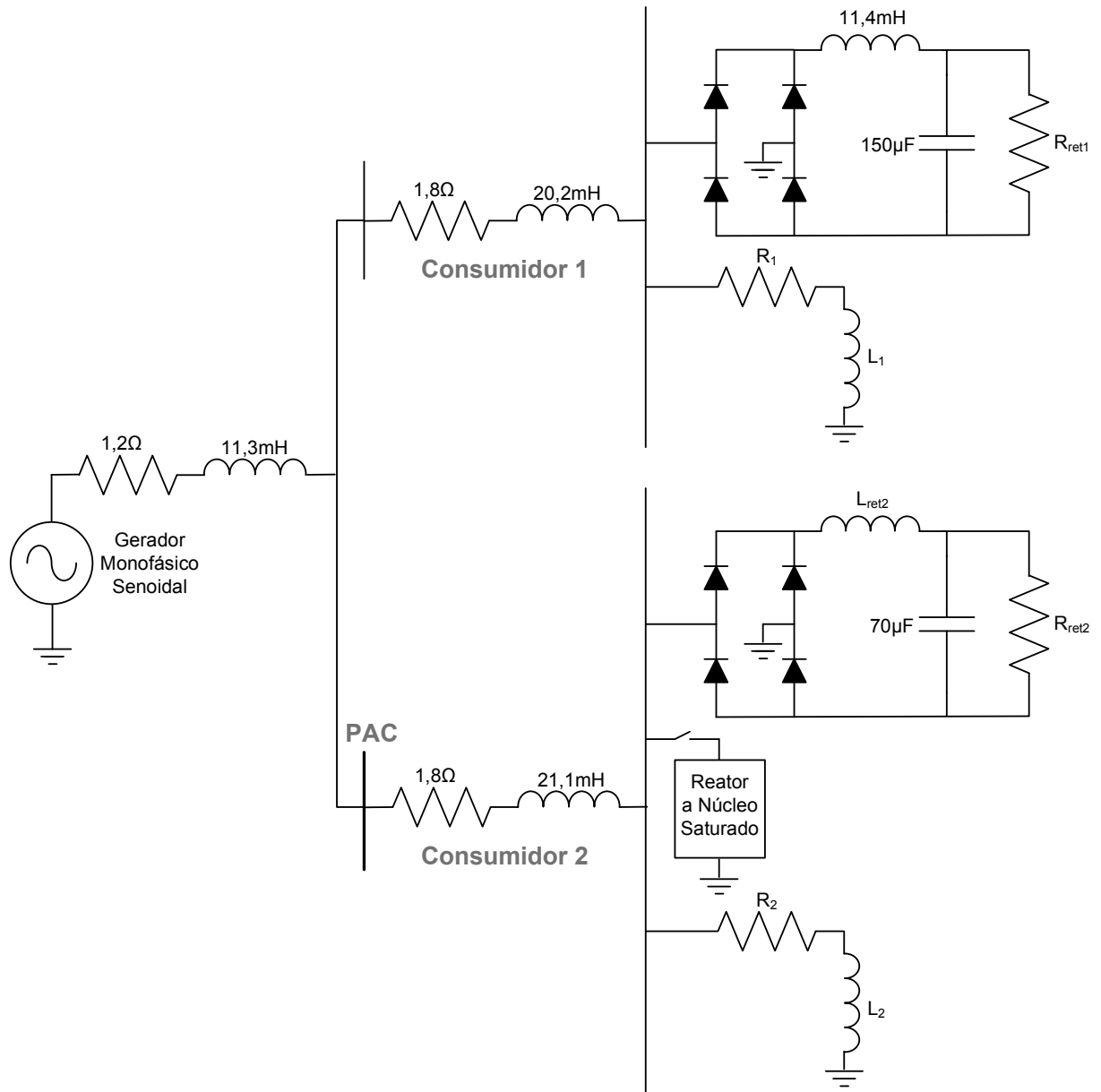


Fig. 4.2. Detalhes do arranjo físico utilizado para avaliação de desempenho da metodologia proposta.

Pode-se notar, na figura anterior, que alguns parâmetros representativos das cargas dos consumidores 1 e 2 não se encontram quantitativamente especificados. Isto se deve ao fato de que os mesmos terão seus valores alterados para os diversos casos estudados, conforme será posteriormente esclarecido. Neste sentido, os elementos que formam o arranjo em pauta são:

- Supridor: a impedância do supridor é modelada através de um indutor de núcleo de ar com sua resistência própria, cujos parâmetros encontram-se indicados na figura anterior;
- Consumidor 1: este encontra-se composto por um retificador destinado a suprir uma carga resistiva em paralelo com um capacitor (filtro), constatando-se, também, um elo CC com indutor série. Somado a esta componente não linear da composição da carga, há ainda uma parcela linear definida por um indutor de núcleo de ar em série com uma resistência. Visando a representação de um transformador, o qual, usualmente, se faz presente para a alimentação da carga do consumidor, constata-se, ainda, um indutor de núcleo de ar para fins da inserção da impedância deste componente;
- Consumidor 2: este representa o consumidor sob análise, isto é, aquele para o qual se deseja determinar e compartilhar os níveis de distorções harmônicas presentes no barramento definido por PAC. A sua composição compreende uma carga não linear associada com um retificador cuja estrutura é, qualitativamente, idêntica a do consumidor 1, diferindo, todavia, pelos valores dos parâmetros empregados. A estrutura que perfaz a parcela não linear da carga ainda é formada por um reator monofásico a núcleo saturado, o qual, mediante chaveamentos, poderá ser retirado ou inserido junto ao complexo em pauta. Os principais parâmetros do mencionado reator encontram-se estabelecidos na Tabela 4.1. Por fim, a carga total do consumidor em questão possui ainda uma resistência linear em paralelo e, mais uma vez, visando a representação de um eventual transformador de conexão da carga ao barramento de suprimento, verifica-se, também, um indutor de núcleo de ar nos mesmos moldes anteriormente explicitados para o consumidor 1.

Tabela 4.1 – Parâmetros do reator a núcleo saturado.

Parâmetro	Valor
Tensão Nominal	63,5V
Potência Nominal	583,3VA
Frequência	60Hz

Objetivando garantir um suprimento puramente senoidal utilizou-se de um gerador programável HP, modelo 6834A, potência 4500VA, o qual é mostrado em Fig. 4.3. O mesmo foi ajustado para gerar uma tensão eficaz de 100V e frequência 60Hz.



Fig. 4.3. Fonte HP usada nos experimentos.

Para a realização das diversas medições requeridas para a aplicação do Método aqui focado, qual seja, o da Superposição Modificado, os registros das distorções harmônicas totais

e individuais, tanto para as tensões e correntes, foram feitos através do equipamento RMS Marh 21, da empresa RMS Sistemas Eletrônicos. Este encontra-se ilustrado na Fig. 4.4 e, dentre várias outras características, o mesmo é capaz de realizar aquisições para as tensões e correntes de forma a contemplar cada ciclo desejado e, na sequência, os resultados podem ser enviados, processados e armazenados num microcomputador.



Fig. 4.4. Medidores RMS usados nos experimentos.

O arranjo elétrico implementado, no que tange a sua estrutura física, pode ser observado na fotografia detalhada na Fig. 4.5.

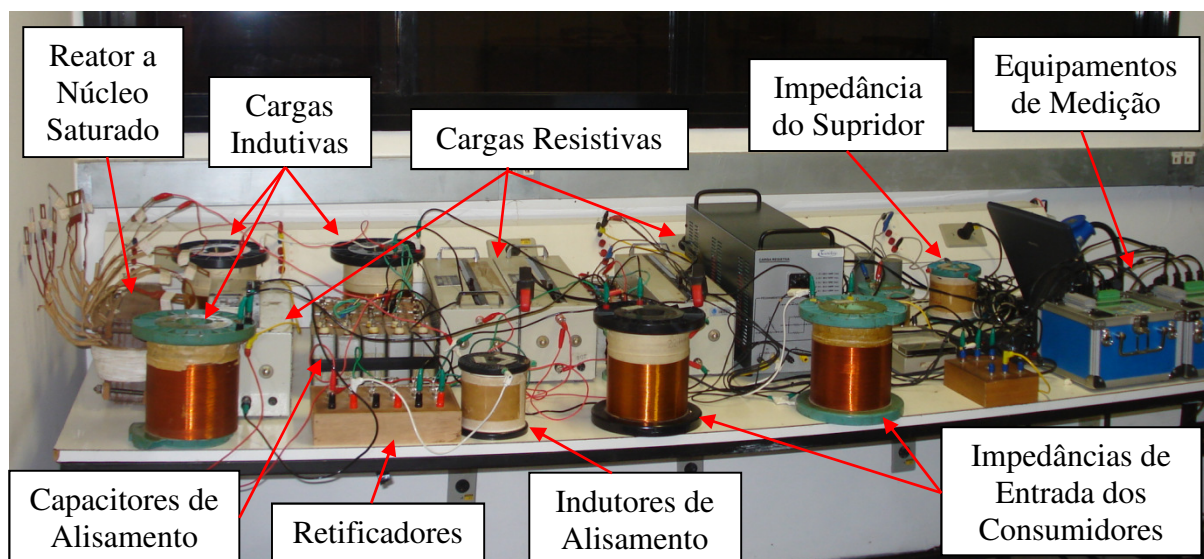


Fig. 4.5. Arranjo físico utilizado para avaliação de desempenho da metodologia proposta.

Com tal topologia em mente, foram então realizados experimentos preliminares que indicaram, como seria esperado, uma predominância das componentes harmônicas de ordem 3. Diante deste fato, a denominada impedância paralela dominante, nos termos requeridos pela metodologia proposta por esta pesquisa, foi adotada na forma de um filtro harmônico sintonizado para a frequência de 180 Hz, cujos parâmetros são destacados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros do filtro harmônico sintonizado em 180Hz.

Parâmetro	Valor
C_f	68,85 μ F
L_f	11,37mH
R_f	1,2 Ω

A Fig. 4.6 mostra a estrutura física do filtro sintonizado para a ordem 3 a ser utilizado em paralelo com a estrutura experimental definida.



Fig. 4.6. Filtro harmônico sintonizado em 180Hz.

Uma vez estabelecido o arranjo físico base, foram então realizados diversos experimentos, objetivando-se atingir um número de casos que contemplasse diferentes perfis de compartilhamento de responsabilidades. Para tanto, foram necessárias diversas alterações de alguns dos parâmetros que foram anteriormente estabelecidos, sem, contudo, alterar a topologia do arranjo apresentado. Do total de experimentos realizados no laboratório, foram então selecionados 4 (quatro) casos para a apresentação, discussão e análise de desempenho da metodologia desenvolvida, em consonância com as preocupações aqui focadas. Os mesmos encontram-se detalhados na sequência.

4.3. CASOS ESTUDADOS

Os quatro casos adotados para fins da composição deste trabalho, os quais serão sempre reportados à avaliação do desempenho do processo de compartilhamento das

responsabilidades das distorções harmônicas junto ao PAC – ponto de acoplamento do consumidor 2, que será denominado, daqui por diante, apenas por Consumidor, visto que o consumidor 1 passará a compor a rede de suprimento – são:

4.3.1. Caso 1 – Consumidor com carga não linear fortemente dominante

Neste Caso 1 procurou-se um arranjo que proporcionasse um compartilhamento de responsabilidades que, de antemão, é sabido que o domínio sobre as distorções de ordem 3 (e outras não incluídas na análise) encontra-se fortemente atrelado com a carga suprida (consumidor).

Para tanto, foi especificado um circuito com os parâmetros constantes da Tabela 4.3, o mesmo encontra-se ilustrado na Fig. 4.7. Uma avaliação dos valores fornecidos para os componentes lineares e não lineares revela que o denominado consumidor se apresenta com características tais a predominar o processo da distorção ocorrida no barramento de suprimento.

Tabela 4.3 – Parâmetros do arranjo físico utilizado nos experimentos – Caso 1.

Parâmetro	Valor
R_1	74,4 Ω
L_1	61,8mH
R_{ret1}	15,6 Ω
R_2	91,5 Ω
L_2	0
L_{ret2}	3,2mH
R_{ret2}	20,4 Ω
Reator a Núcleo Saturado	Conectado ao Consumidor 2

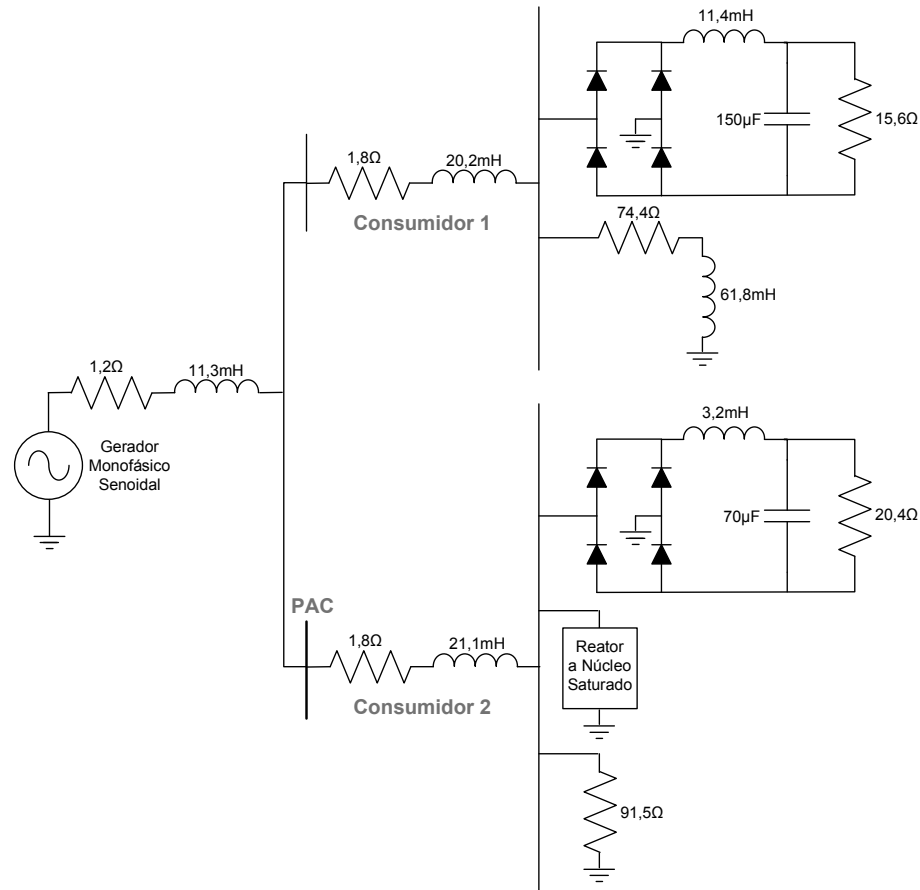


Fig. 4.7. Detalhes do arranjo físico utilizado para avaliação experimental de desempenho da metodologia proposta – Caso 1.

4.3.2. Caso 2 – Consumidor com carga não linear dominante

A diferença básica deste estudo em relação ao anterior está no fato que a corrente situação contempla alterações nos valores dos parâmetros dos elementos lineares e não lineares de forma tal que, o resultado final implica em que o denominado consumidor possua uma ligeira superioridade no processo da distorção registrada para o PAC. Naturalmente, para que isto ocorra, basta modificar os parâmetros dos componentes nos termos indicados na Tabela 4.4 e na Fig. 4.8. Para esta nova parametrização foi aumentada a carga do retificador 1 (integrante do sistema supridor) e, concomitantemente, diminuída a carga do retificador 2 (consumidor). Assim procedendo, é de se esperar um compartilhamento mais equilibrado entre as partes, todavia, prevalecendo a dominância das distorções advindas do consumidor.

Tabela 4.4 – Parâmetros do arranjo físico utilizado nos experimentos – Caso 2.

Parâmetro	Valor
R_1	87,5 Ω
L_1	21,3mH
R_{ret1}	10,0 Ω
R_2	91,5 Ω
L_2	0
L_{ret2}	10,3mH
R_{ret2}	20,4 Ω
Reator a Núcleo Saturado	Conectado ao Consumidor 2

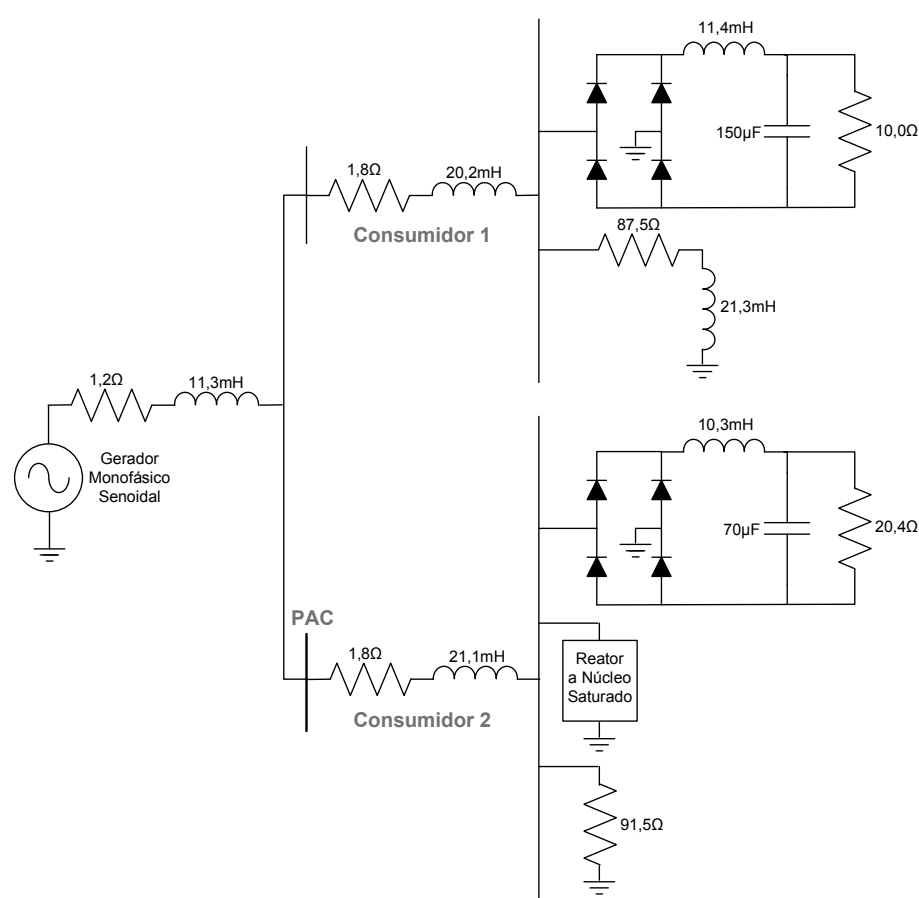


Fig. 4.8. Detalhes do arranjo físico utilizado para avaliação experimental de desempenho da metodologia proposta – Caso 2.

4.3.3. Caso 3 – Sistema supridor com carga não linear dominante

A presente investigação encontra-se direcionada para o processo de inversão da responsabilidade entre o supridor e o consumidor. Isto originou o Caso 3, o qual, através de

uma nova atribuição de valores para os componentes lineares e não lineares, e ainda, a desconexão do reator saturado, resultou numa alteração da fonte dominante sobre as distorções harmônicas detectadas junto ao PAC.

A Tabela 4.5 e a Fig. 4.9 apresentam os novos parâmetros empregados para o arranjo.

Tabela 4.5 – Parâmetros do arranjo físico utilizado nos experimentos – Caso 3.

Parâmetro	Valor
R_1	87,5 Ω
L_1	21,3mH
R_{ret1}	15,6 Ω
R_2	91,5 Ω
L_2	0
L_{ret2}	10,3mH
R_{ret2}	20,4 Ω
Reator a Núcleo Saturado	Desconectado

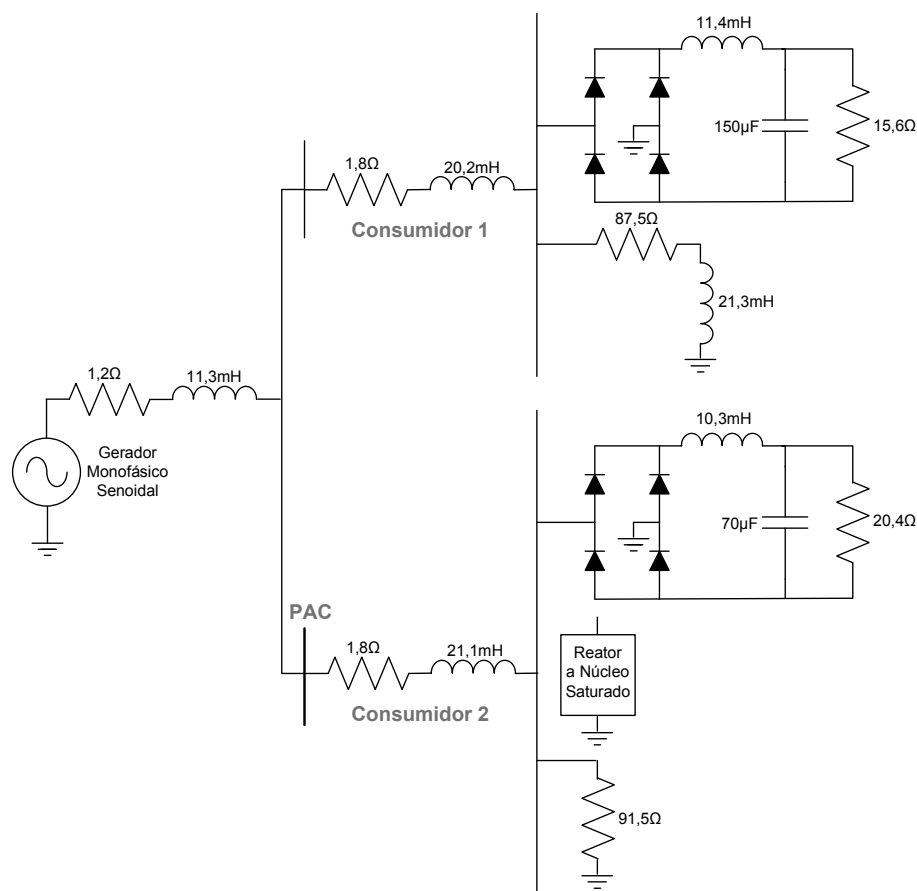


Fig. 4.9. Detalhes do arranjo físico utilizado para avaliação experimental de desempenho da metodologia proposta – Caso 3.

4.3.4. Caso 4 – Sistema supridor com carga não linear fortemente dominante

A Fig. 4.10 e a Tabela 4.6 sintetizam as principais alterações feitas e evidencia que, adicionalmente às modificações dos valores de vários componentes, há ainda a se destacar que o reator saturado foi realocado, desta feita, junto ao sistema supridor. Estas alterações foram decisivas para impactar a operação de forma tal que o supridor passou a se configurar como fonte fortemente dominante na questão da distorção harmônica em pauta.

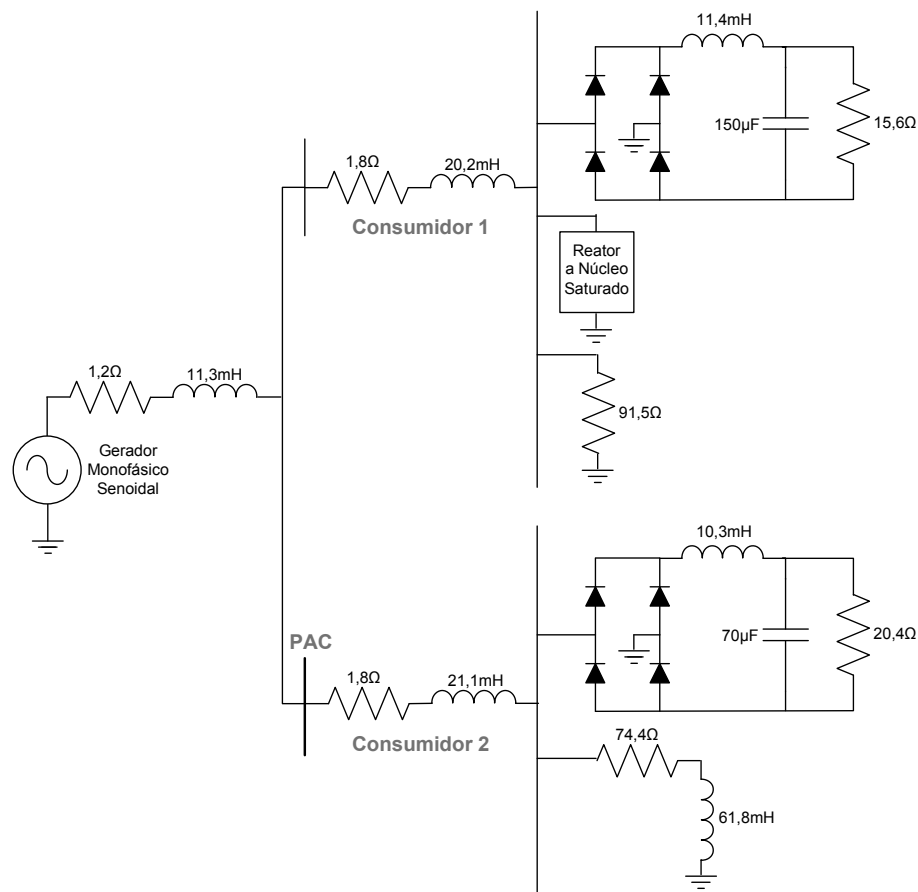


Fig. 4.10. Detalhes do arranjo físico utilizado para avaliação experimental de desempenho da metodologia proposta – Caso 4.

Tabela 4.6 – Parâmetros do arranjo físico utilizado nos experimentos – Caso 4.

Parâmetro	Valor
R_1	91,5 Ω
L_1	0
R_{ret1}	15,6 Ω
R_2	74,4 Ω
L_2	61,8mH
L_{ret2}	10,3mH
R_{ret2}	20,4 Ω
Reator a Núcleo Saturado	Conectado ao Consumidor 1

Uma vez detalhados os arranjos experimentais, os casos selecionados, as parametrizações feitas, dentre outros, apresenta-se, na sequência, os resultados da aplicação do Método da Superposição Modificado.

4.4. RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DA SUPERPOSIÇÃO MODIFICADA

Procedendo-se a inserção da já definida impedância dominante no PAC (filtro harmônico sintonizado), os trabalhos avançaram no sentido da realização de medições associadas com os princípios postulados para o uso do processo do compartilhamento, em consonância com os procedimentos desenvolvidos no Capítulo III. Tais procedimentos orientam para que as atividades experimentais venham a atender a seguinte estratégia, para a ordem harmônica sob análise:

- Conexão do filtro harmônico sintonizado para a frequência de 180 Hz em um ponto junto ao PAC;
- Medição das correntes harmônicas à montante ($i_{pac-in-3h}$) e à jusante ($i_{pac-out-3h}$) do ponto de conexão do filtro, assim como também a respectiva

componente de corrente harmônica que se estabelece pelo mesmo (\dot{I}_{f-3h}), o qual é conectado junto ao PAC, conforme indicado na Fig. 4.11;

- Determinação das projeções das correntes medidas sobre aquela registrada no filtro, quais sejam, $I_{fs-proj-3h}$ e $I_{fc-proj-3h}$;
- Cálculo das parcelas de responsabilidade entre as partes para a frequência harmônica em foco.

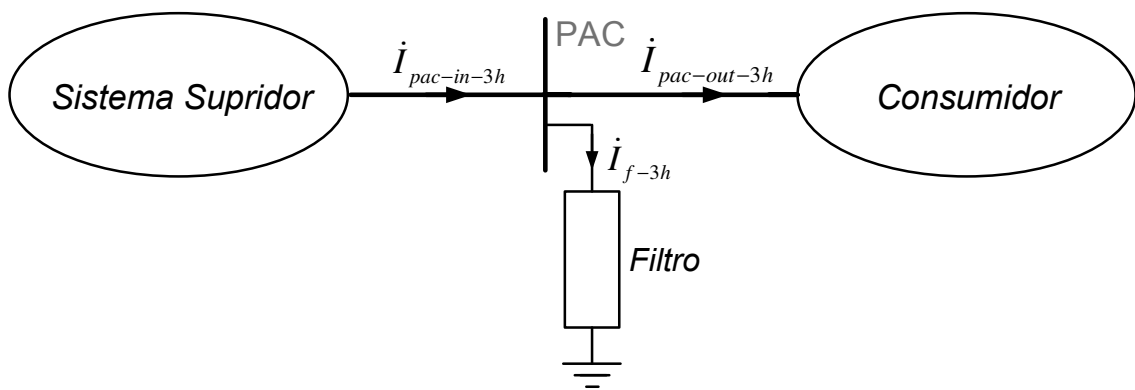


Fig. 4.11. Correntes medidas e requeridas para aplicação do Método da Superposição Modificado.

A partir dos trabalhos de medição chegou-se, então, para os quatro casos investigados, aos resultados para as correntes indicadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Correntes medidas – com inserção do filtro harmônico de ordem 3 junto ao PAC.

Caso	$\dot{I}_{pac-in-3h}$	$\dot{I}_{pac-out-3h}$	\dot{I}_{f-3h}
1	301,650∠-176,2° mA	563,013∠137,7° mA	415,582∠-73,9° mA
2	197,267∠159,1° mA	391,968∠142,8° mA	210,120∠-52,5° mA
3	408,050∠-176,4° mA	293,858∠23,8° mA	691,248∠192,0° mA
4	823,590∠-14,8° mA	620,251∠27,0° mA	560,103∠-63,6° mA

Fundamentando-se nos valores indicados na tabela anterior e utilizando-se do novo processo proposto para o compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas, obtêm-se os percentuais fornecidos na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Percentuais de responsabilidade entre o sistema supridor e o consumidor – tensão harmônica de ordem 3 – Método da Superposição Modificado.

Caso	Resultado das Projeções		Parcelas de Responsabilidades	
	$I_{fs-proj-3h}$	$I_{fc-proj-3h}$	Supridor	Consumidor
1	-64,110 mA	479,687 mA	11,8%	88,2%
2	-167,940 mA	378,058 mA	30,8%	69,2%
3	403,600 mA	287,648 mA	58,4%	41,6%
4	542,136 mA	17,968 mA	96,8%	3,2%

Os resultados obtidos para o compartilhamento, nos termos apresentados, permitem as seguintes constatações:

- Caso 1 - o sistema supridor se apresenta como responsável pela quase totalidade da distorção em pauta, como estipulado para as condições operativas impostas;
- Caso 2 – a presente situação reflete, com clareza, que o supridor apresenta-se ligeiramente dominante quanto as parcelas de responsabilidades atribuídas;
- Caso 3 - esta situação, como predefinido através das condições operativas, indicou uma situação operacional tal que o supridor se apresenta com responsabilidade ligeiramente dominante sobre as distorções;
- Caso 4 - por fim, esta investigação resultou, como esperado, no fato que o supridor se apresenta fortemente dominante sobre a distorção harmônica contemplada nos estudos.

Diante do exposto, embora a consistência física encontrada para os resultados obtidos à luz das condições operativas impostas, reconhece-se que, para o estabelecimento de um processo comparativo sólido, a disponibilização de valores esperados a serem considerados como “exatos” constitui-se em medida importante para fins das estimativas do desempenho

do processo proposto por esta pesquisa. Neste contexto, os desenvolvimentos considerados na sequência se apresentam como tal objetivo.

4.5. VALORES ESPERADOS PARA AS RESPONSABILIDADES SOBRE AS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

O método de referência adotado neste trabalho para a validação do método proposto em condições experimentais é, naturalmente, o método da superposição de tensões, sendo que os fundamentos que norteiam a obtenção das contribuições tidas como esperadas, ou como gabaritos, foram:

- A partir do arranjo experimental proposto tornam-se conhecidas informações relativas à composição e parametrização de todos os componentes lineares. Vale observar que, nesta etapa dos trabalhos, o filtro harmônico não é empregado visto não se constituir em parte integrante do método da superposição clássico, o qual será aqui empregado;
- No que tange as fontes de harmônicos, estas são adotadas como ideais, isto é, as suas correntes, para cada frequência diferente da fundamental, são consideradas como injetadas na rede, sem qualquer impedância paralela equivalente ao dispositivo não linear. Naturalmente, esta hipótese simplificadora se apoia em constatações experimentais e de campo, quando então se constata que, para cada condição operativa quanto ao suprimento de tensão e carregamento linear e não linear, as componentes harmônicas de corrente produzidas praticamente não são afetadas por motivos outros que não a dinâmica operacional [44,45]. Isto, na verdade, consiste num princípio largamente utilizado para os cálculos de distorções harmônicas através de

mecanismos fundamentados na técnica de modelagem de arranjos elétricos no domínio da frequência;

- Através de procedimentos clássicos aplicáveis a circuitos, via princípio da superposição e arranjos equivalentes de Norton, para cada frequência e ponto de operação, pode-se obter, matematicamente, as parcelas de responsabilidades associadas com as distorções harmônicas individuais, advindas do supridor e do consumidor. Esta metodologia foi objeto de maiores discussões ao longo do Capítulo II em sua seção 2.3.

Visando consubstanciar o processo supra descrito, adicionalmente aos parâmetros representativos dos distintos componentes lineares (R e L), foram realizadas novas medições para as correntes e tensões harmônicas para os quatro casos estudados. Os resultados encontram-se destacados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Correntes e tensões harmônicas de ordem 3 - medição – filtro harmônico desconectado.

Caso	I_{pac-3h}	\dot{V}_{pac-3h}
1	413,277±146,6° mA	3,670±-8,4° V
2	300,190±145,3° mA	1,510±7,9° V
3	134,745±32,2° mA	4,662±-94,1° V
4	587,191±21,0° mA	3,986±6,7° V

Tendo como conhecidas as impedâncias do sistema supridor e do consumidor, medidas as correntes e a tensões harmônicas no PAC e utilizando-se das equações (2.9) e (2.10) anteriormente descritas, é possível determinar as impedâncias e as fontes de correntes harmônicas equivalentes constituintes do circuito equivalente de Norton para cada caso estudado, o qual se apresentará dentro da estrutura ilustrada pela Fig. 4.12.

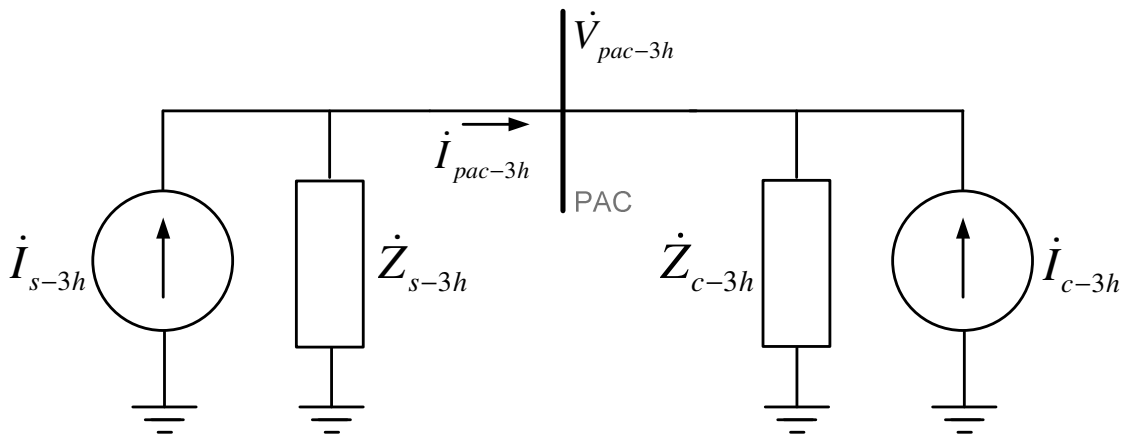


Fig. 4.12. Circuito equivalente de Norton para ordem harmônica 3.

A Tabela 4.10 fornece as impedâncias equivalentes do supridor e do consumidor assim como também as fontes de correntes harmônicas equivalentes, obtidas em consonância com equacionamentos tradicionais aplicáveis a circuitos elétricos.

Tabela 4.10 – Impedâncias e fontes de correntes harmônicas equivalentes de ordem 3.

Caso	Equivalente Supridor		Equivalente Consumidor	
	\dot{Z}_{s-3h}	\dot{I}_{s-3h}	\dot{Z}_{c-3h}	\dot{I}_{c-3h}
1	11,774±81,5° Ω	333,181±179,9° mA	96,303±14,3° Ω	436,436±-33,0° mA
2	11,943±78,9° Ω	225,827±159,3° mA	96,303±14,3° Ω	306,839±-32,7° mA
3	11,943±78,9° Ω	317,711±174,2° mA	96,303±14,3° Ω	151,777±-136,0° mA
4	12,196±77,8° Ω	661,232±-8,6° mA	120,03±50,6° Ω	573,919±204,0° mA

Uma vez conhecidos os dados da tabela anterior e em observação às diretrizes atreladas com o circuito equivalente da Fig. 4.12, chega-se, então aos resultados constantes da Tabela 4.11. Esta fornece, como pode ser verificado, as parcelas de responsabilidades do consumidor e do supridor, para a tensão harmônica em conta, para cada caso investigado.

Tabela 4.11 – Valores esperados para as parcelas de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor – tensão harmônica de ordem 3 – método da superposição de tensões.

Caso	Resultado das Projeções		Parcelas de Responsabilidade	
	$V_{s-proj-3h}$	$V_{c-proj-3h}$	Supridor	Consumidor
1	0,513 V	3,157 V	14,0%	86,0%
2	-1,508 V	3,018 V	33,3%	66,7%
3	2,942 V	1,721 V	63,1%	36,9%
4	3,682 V	0,304 V	92,4%	7,6%

Por fim, vale ressaltar que os indicativos contemplados e referidos como valores a serem utilizados como base comparativa para a validação do método de compartilhamento feito neste trabalho, somente foram possíveis de determinação pelo fato que os parâmetros e demais grandezas representativas do arranjo proposto foram integralmente predefinidas e aferidas num ambiente laboratorial controlado. É importante reconhecer que, em se tratando de aplicações industriais ou outras, tais informações seriam de difícil acesso ou mesmo impossíveis de serem obtidas. Portanto, nestas condições, apenas o resultado do método proposto estariam disponibilizados.

4.6. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

Uma vez estabelecidos os valores esperados da atribuição de responsabilidades, tem-se, na Tabela 4.12, um quadro comparativo entre os resultados provenientes da aplicação da Metodologia da Superposição Modificada e as parcelas de responsabilidades obtidas através dos princípios clássicos anteriormente caracterizados.

Tabela 4.12 – Quadro comparativo entre os resultados de atribuição de responsabilidades – valores esperados versus metodologia proposta – avaliação experimental.

Percentuais de Atribuição de Responsabilidade				
Caso Experimental	Valores Esperados		Resultados Advindos da Metodologia Proposta	
	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor
1	14,0%	86,0%	11,8%	88,2%
2	33,3%	66,7%	30,8%	69,2%
3	63,1%	36,9%	58,4%	41,6%
4	92,4%	7,6%	96,8%	3,2%

À luz dos resultados numéricos fica evidente que os percentuais de atribuição de responsabilidades, advindos da aplicação do método da superposição de tensões e aqueles derivados da proposta feita nesta pesquisa, se apresentam com uma boa correlação de valores, fato este que ratifica a aplicabilidade do processo aqui desenvolvido e apresentado como estratégia para os fins aqui delineados.

4.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Método da Superposição Modificado, fruto desta pesquisa de doutorado, foi ao longo do presente capítulo avaliado quanto à sua adequação aos propósitos do compartilhamento de responsabilidades entre dois agentes envolvidos e responsáveis pela produção, junto ao correspondente PAC, de uma dada distorção harmônica.

A ideia central, aqui pautada, se apoia na proposição de um processo comparativo, em que pese informações sobre as atribuições de responsabilidades atreladas com experimentos laboratoriais, fato este que conduz a situações operativas tais que, os principais elementos, parâmetros e injeção de harmônicos são controláveis, e, a partir destas informações, correlacioná-las com os resultados oferecidos pelo processo matemático desenvolvido.

Os casos avaliados primaram por situações em que, propositalmente, as origens das distorções foram predefinidas de forma a proporcionar uma expectativa física previsível. Neste cenário, dentre uma diversidade de avaliações feitas, foram, para fins deste trabalho, selecionadas quatro situações, a saber: consumidor fortemente predominante quanto à responsabilidade sobre a geração de tensão de 3ª ordem (Caso 1); consumidor com uma discreta predominância sobre a mencionada distorção (Caso 2); inversão da responsabilidade através de uma discreta predominância do supridor sobre a distorção em questão (Caso 3) e; por fim, uma situação tal que o supridor se apresenta com quase totalidade da responsabilidade sobre a distorção de 3ª harmônica da tensão do PAC (Caso 4).

Neste contexto, sem entrar em maiores particularidades dos valores encontrados, cabe reconhecer que os desempenhos obtidos, quer pelos experimentos e respectivas medições, quer pela aplicação da metodologia desenvolvida, se mostraram bastante consistentes e encorajadores. Estas primeiras constatações permitem pois afirmar que o Método da Superposição Modificado, efetivamente, se apresenta como um procedimento sólido para as determinações dos níveis de responsabilidades entre as partes envolvidas num determinado PAC, isto é, entre o sistema supridor e um dado consumidor.

Os resultados oferecidos, como destacado no texto, conduzem a indicadores numéricos percentuais das parcelas de responsabilidades entre as partes, os quais, até então, não tinham sido apontados de forma prática e segura pela literatura encontrada.

CAPÍTULO V

ESTRATÉGIAS PARA DEFINIÇÃO DA IMPEDÂNCIA DOMINANTE

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo se destina aos estudos iniciais relacionados com as diferentes estratégias para obtenção da impedância harmônica dominante a ser conectada no barramento para o qual são feitas as medições das distorções e cujo interesse sobre o compartilhamento de responsabilidades se faz presente.

De acordo com discussões e princípios previamente estabelecidos, a primeira ideia para a concretização da impedância em pauta estaria atrelada com a implementação de um filtro harmônico conectado junto ao PAC. Não obstante os aspectos gerais atrelados com este procedimento, é sabido, que nos dias atuais, existem diferentes estratégias e filosofias para concepção, projeto e especificação de filtros harmônicos. Diante disso, pretende-se, nesta seção, explorar tais proposições por meio de avaliações embasadas em análises matemáticas e simulações computacionais, objetivando-se, assim, oferecer meios para a escolha de uma topologia simples, confiável, econômica e tecnicamente apropriada aos fins aqui almejados.

5.2. FILTROS HARMÔNICOS

Os filtros harmônicos são arranjos elétricos destinados a oferecer meios para que as correntes harmônicas e, por conseguinte, as tensões, presentes nos sistemas elétricos, sejam atenuadas. O princípio que norteia tais soluções classicamente empregadas na engenharia elétrica se baseia na obtenção de uma característica propícia ao processo de compensação nos termos esclarecidos em [46,47] e abaixo discriminados. Estes dispositivos podem ser classificados, quanto à técnica empregada, em:

- Filtros Harmônicos Passivos: arranjos constituídos por composições de elementos ditos passivos, quais sejam: resistores, indutores e capacitores, e destinados a propiciar uma impedância harmônica compatível com o processo de filtragem desejado;
- Filtros Harmônicos Ativos: equipamentos constituídos por elementos ativos fundamentados nas modernas técnicas da eletrônica de potência e que visam um processo de compensação à base da geração e injeção de componentes harmônicas em contraposição àquelas existentes nas redes elétricas.

Muito embora a existências das duas distintas técnicas empregadas na filtragem harmônica, ressalta-se que, para o presente estudo, tão somente a filtragem harmônica passiva será considerada, uma vez que os filtros harmônicos ativos não se apresentam como dispositivos capazes de oferecer a almejada impedância harmônica dominante, a qual é o objeto central dos estudos investigativos deste Capítulo.

Os filtros harmônicos, de uma forma geral, podem ser conectados ao sistema elétrico em série ou em paralelo (ou derivação), todavia, para fins deste trabalho, apenas os arranjos em derivação com a rede elétrica e conectados em estrela [1,39,46] serão aqui considerados.

Os tipos mais comuns de filtros passivos, quanto aos seus arranjos e filosofia de filtragem, podem ser agrupados como a seguir:

- Filtros Sintonizados: possuem uma ou mais frequências de ressonância série definidas, apresentando, nesta(s) frequência(s) de ressonância, baixa impedância resistiva [46];
- Filtros Amortecidos: estes não apresentam uma sintonia de ressonância definida em apenas uma frequência, mas sim, oferecem uma baixa impedância para uma larga faixa de frequência, podendo, por tais motivos, também ser denotados de filtros passa-alta, quando aplicados para elevadas ordens harmônicas [48].

Os principais arranjos para os filtros sintonizados, segundo o número de frequências selecionadas, podem ser visualizados através das ilustrações da Fig. 5.1. Por outro lado, a Fig. 5.2 apresenta os tipos mais comuns de filtros amortecidos, os quais se encontram classificados quanto a ordem de atenuação de ganho do filtro ou o tipo. Vale observar que R , L e C são, respectivamente, representativos dos elementos: resistivos, indutivos e capacitivos, os quais são seguidos de um índice para que possam ser identificados quando dos desenvolvimentos matemáticos a serem realizados posteriormente.

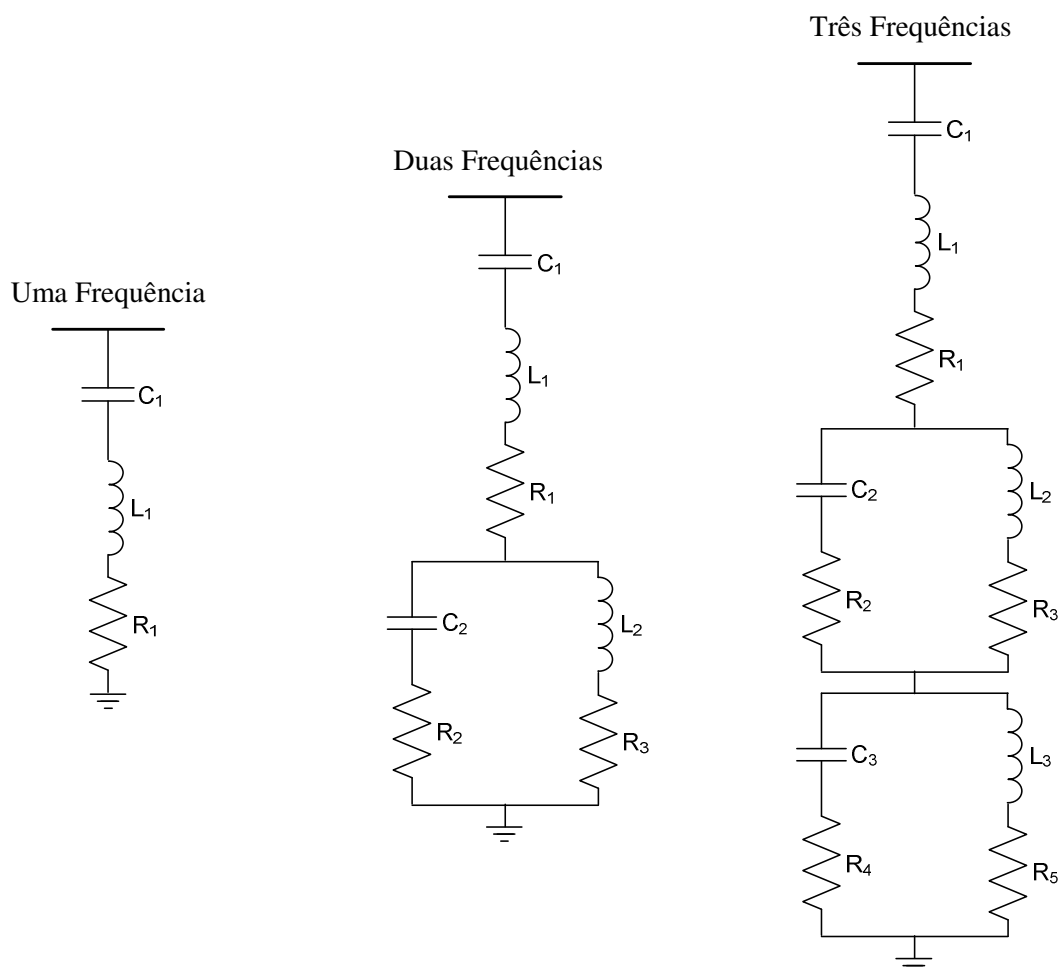


Fig. 5.1. Principais arranjos para os filtros harmônicos sintonizados.

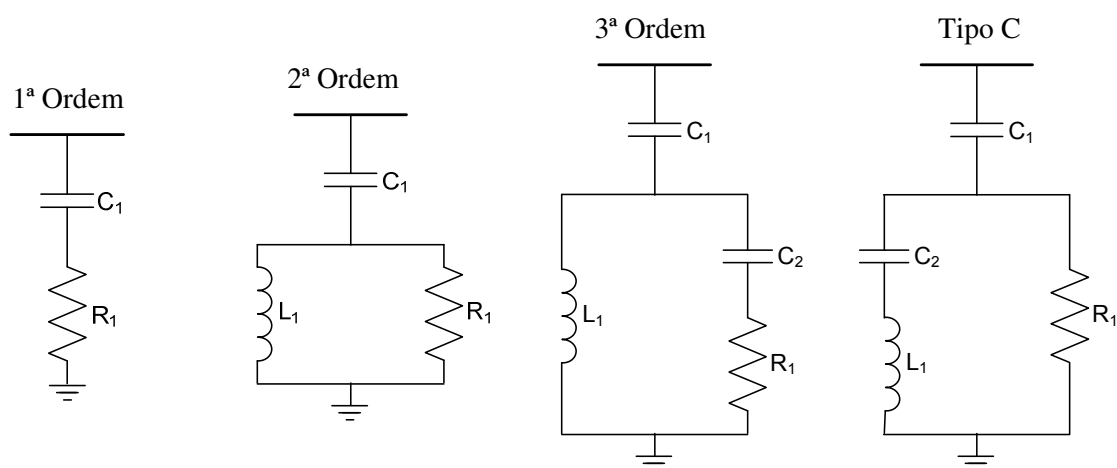


Fig. 5.2. Principais arranjos para os filtros harmônicos amortecidos.

Na sequência é feita uma análise matemática do circuito equivalente para cada topologia selecionada, empregando-se, para tanto, as técnicas de representação através do

domínio da frequência para a obtenção das impedâncias harmônicas equivalentes de cada configuração de filtro harmônico.

5.2.1. Filtro harmônico sintonizado

Os filtros harmônicos sintonizados possuem, como já dito, frequências de sintonia bem definidas, podendo apresentar apenas um ponto de ressonância ou múltiplos, dependendo de seu arranjo elétrico. As principais topologias de filtros sintonizados, para o presente estudo, encontram-se indicadas na sequência, em consonância com o que fora apresentado na Fig. 5.1.

a) Filtro sintonizado em uma frequência

Devido à sua simplicidade e ao custo competitivo, esta é a principal arquitetura de filtro usada em aplicações práticas. A impedância deste filtro pode ser determinada nos termos esclarecidos na equação (5.1).

$$\dot{Z}_f(\omega) = \underbrace{R_1}_{Re[\dot{Z}_f(\omega)]} + j \underbrace{\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right)}_{Im[\dot{Z}_f(\omega)]} \quad (5.1)$$

Nesta equação:

ω – é a frequência angular dada em radianos por segundo;

$\dot{Z}_f(\omega)$ – é a impedância complexa do filtro em função de ω ;

$Re[\dot{Z}_f(\omega)]$ – parte real do valor complexo de impedância;

$Im[\dot{Z}_f(\omega)]$ – parte imaginária do valor complexo de impedância.

Outra forma para visualização do comportamento deste filtro, em função da frequência, pode ser verificada por meio da transformação da equação (5.1), que se encontra no formato cartesiano, para o formato polar como indicado pelas equações (5.2), (5.3) e (5.4).

$$\dot{Z}_f(\omega) = Z_f(\omega) \angle \phi(\omega) \quad (5.2)$$

$$Z_f(\omega) = \text{abs}[\dot{Z}_f(\omega)] = \sqrt{\text{Re}[\dot{Z}_f(\omega)]^2 + \text{Im}[\dot{Z}_f(\omega)]^2} \quad (5.3)$$

$$\phi(\omega) = \text{arg}[\dot{Z}_f(\omega)] = \text{arctg} \left[\frac{\text{Im}[\dot{Z}_f(\omega)]}{\text{Re}[\dot{Z}_f(\omega)]} \right] \quad (5.4)$$

Onde:

$Z_f(\omega)$ – é o módulo da impedância complexa do filtro em função de ω ;

$\phi(\omega)$ – é o ângulo da impedância complexa do filtro em função de ω .

Este filtro, como seria esperado, possui uma única frequência angular de ressonância ω_0 , a qual é determinada pela equação (5.5).

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (5.5)$$

A partir da forma polar para representação da impedância do filtro e considerando, para efeito de visualização gráfica, uma resistência $R_1 = 1\Omega$, uma indutância $L_1 = 30mH$ e uma capacitância $C_1 = 10\mu F$, torna-se, então, possível traçar o gráfico do módulo da impedância e do ângulo dessa impedância versus frequência angular, conforme ilustrado nas Fig. 5.3 (a) e (b). A frequência angular de ressonância verificada é de 1826 rad/s .

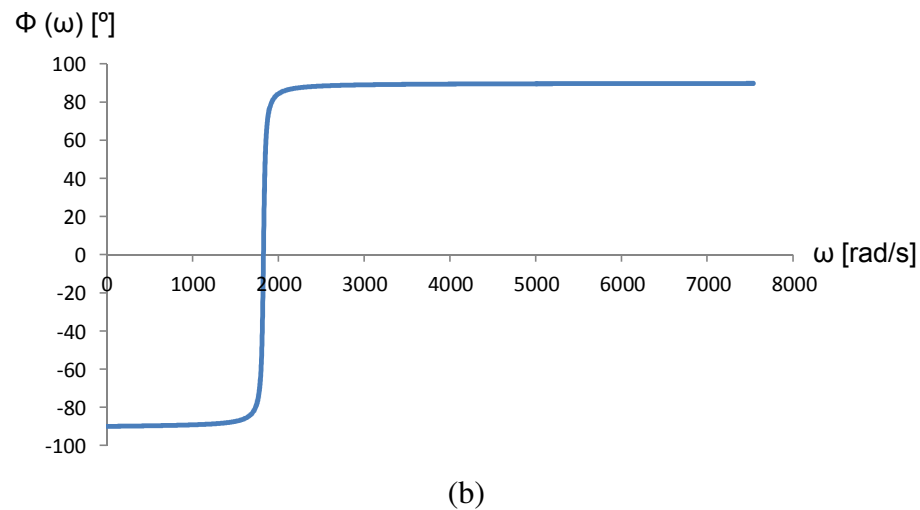
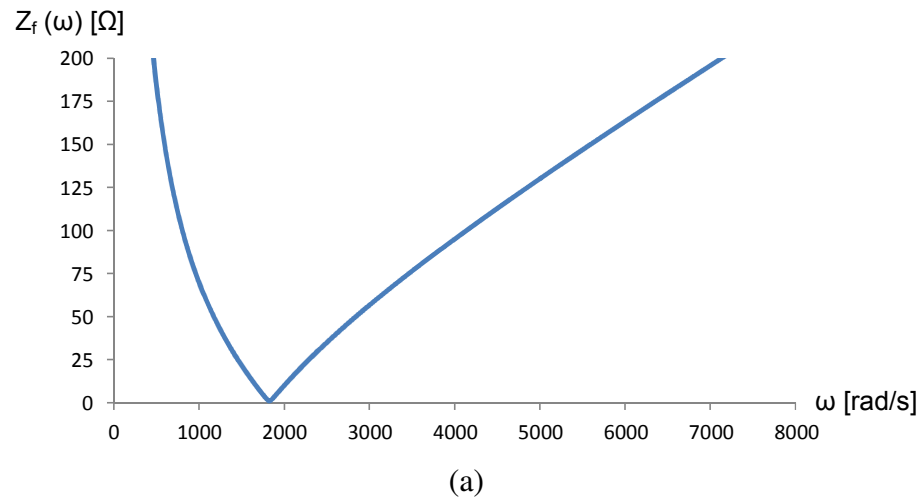


Fig. 5.3. Desempenho da impedância harmônica para um filtro sintonizado em uma frequência: (a) módulo da impedância equivalente versus frequência angular; (b) ângulo da impedância equivalente versus frequência angular.

A Fig. 5.3 (b) mostra que para valores de frequências menores que a de sintonia, o comportamento da impedância é de predomínio capacitivo, enquanto que, para valores superiores a esta frequência, a característica da impedância do filtro passa a ser indutiva. Para a frequência de ressonância o ângulo se apresenta nulo e, conseqüentemente, o arranjo comportar-se-á como um circuito puramente resistivo.

É importante ressaltar que, no que tange aos objetivos definidos para o presente trabalho, o filtro a ser empregado deve se constituir num recurso que será instalado durante o processo de investigação das contribuições do supridor e consumidor para uma dada distorção

harmônica e, uma vez concluído tais trabalhos, o mesmo será retirado da rede. Diante disto, não se considera relevante ressaltar a utilização da região capacitiva para fins da melhoria do fator de potência da instalação ou outra aplicação.

b) Filtro sintonizado em duas frequências

Este arranjo possui, como indicado na sua identificação, duas frequências de sintonia, fato este que proporciona a filtragem harmônica para duas ordens distintas. O cálculo da impedância do presente filtro pode ser realizado por meio da equação (5.6), a qual foi desenvolvida a partir do arranjo elétrico ilustrado na Fig. 5.1.

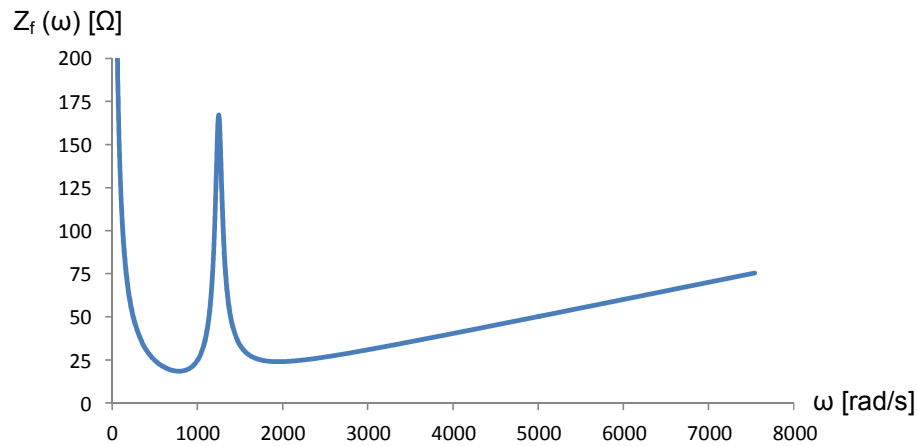
$$\begin{aligned} \dot{Z}_f(\omega) = & \left[R_1 + \frac{\left(R_2 R_3 + \frac{L_2}{C_2} \right) (R_2 + R_3) + \left(\omega R_2 L_2 - \frac{R_3}{\omega C_2} \right) \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)}{(R_2 + R_3)^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2} \right] \\ & + j \left[\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) + \frac{\left(\omega R_2 L_2 - \frac{R_3}{\omega C_2} \right) (R_2 + R_3) - \left(R_2 R_3 + \frac{L_2}{C_2} \right) \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)}{(R_2 + R_3)^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2} \right] \end{aligned} \quad (5.6)$$

As expressões resultantes e representativas das frequências angulares de ressonância estão explicitadas nas equações (5.7) e (5.8), as quais evidenciam os pontos aproximados para os quais ocorrem os menores valores de impedâncias passíveis de obtenção para a estrutura utilizada.

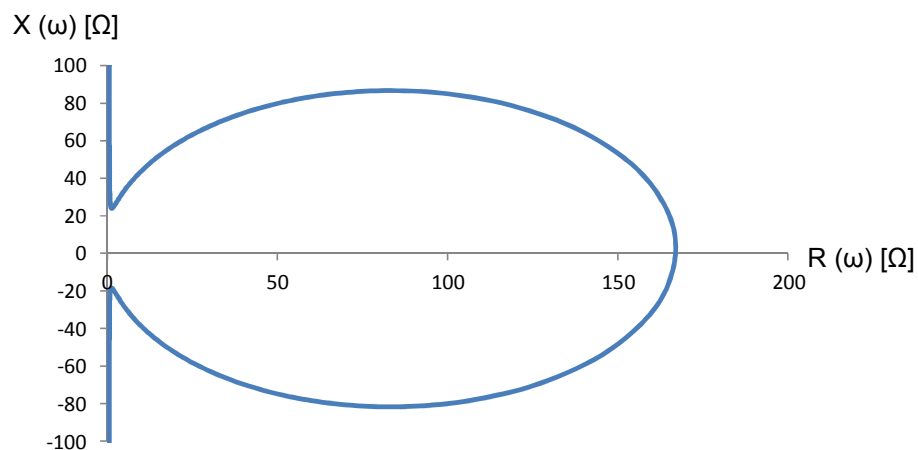
$$\omega_{0-1} = \frac{1}{\sqrt{(L_1 + L_2)C_1}} \quad (5.7)$$

$$\omega_{0-2} = \sqrt{\frac{1}{L_1} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)} \quad (5.8)$$

Mais uma vez, usando-se a mesma estratégia anterior, e atribuindo valores, a título de ilustração, para os elementos constituintes do filtro: $R_1 = R_2 = R_3 = 0,3\Omega$, $L_1 = 10mH$, $L_2 = 8mH$, $C_1 = 80\mu F$ e $C_2 = 80\mu F$, torna-se possível traçar figuras representativas do desempenho do filtro em pauta, como indicado nas Fig. 5.4 (a) e (b), associadas, respectivamente, com a magnitude das impedâncias em função das frequências angulares e com a relação entre as reatâncias e as resistências equivalentes. As frequências angulares de ressonância foram de 830 rad/s e 1580 rad/s .



(a)



(b)

Fig. 5.4. Desempenho da impedância harmônica para um filtro sintonizado em duas frequências: (a) módulo da impedância equivalente versus frequência angular; (b) resistência versus a reatância equivalente do filtro em função da frequência angular.

Por fim, vale ainda observar que o gráfico da variação do ângulo da impedância em função da frequência angular não foi plotado por não oferecer informação adicional relevante.

c) Filtro sintonizado em três frequências

Esta última configuração para os filtros sintonizados se destina a oferecer três pontos de ressonância. A equação da impedância harmônica complexa para o arranjo em pauta é:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_f(\omega) = & \left[R_1 + \frac{\left(R_2 R_3 + \frac{L_2}{C_2}\right)(R_2 + R_3) + \left(\omega R_2 L_2 - \frac{R_3}{\omega C_2}\right)\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)}{(R_2 + R_3)^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)^2} \right. \\ & \left. + \frac{\left(R_4 R_5 + \frac{L_3}{C_3}\right)(R_4 + R_5) + \left(\omega R_4 L_3 - \frac{R_5}{\omega C_3}\right)\left(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3}\right)}{(R_4 + R_5)^2 + \left(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3}\right)^2} \right] \\ & + j \left[\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right) + \frac{\left(\omega R_2 L_2 - \frac{R_3}{\omega C_2}\right)(R_2 + R_3) - \left(R_2 R_3 + \frac{L_2}{C_2}\right)\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)}{(R_2 + R_3)^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)^2} \right. \\ & \left. + \frac{\left(\omega R_4 L_3 - \frac{R_5}{\omega C_3}\right)(R_4 + R_5) - \left(R_4 R_5 + \frac{L_3}{C_3}\right)\left(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3}\right)}{(R_4 + R_5)^2 + \left(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3}\right)^2} \right] \end{aligned} \quad (5.9)$$

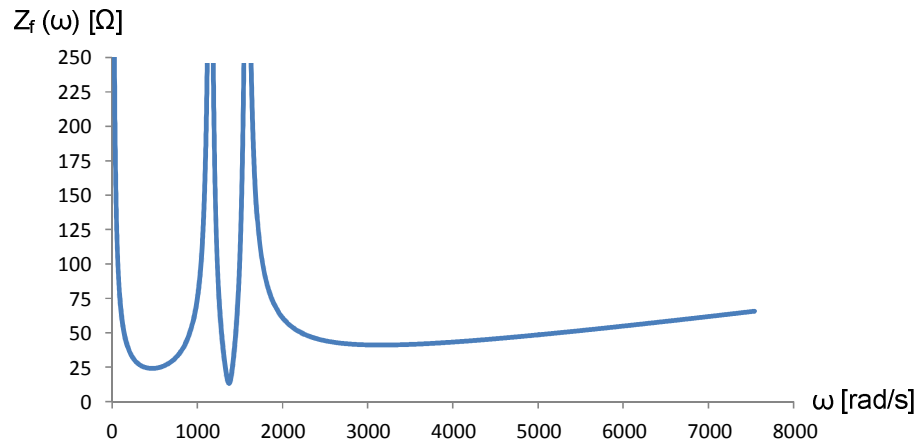
As frequências angulares de ressonância são apresentadas nas equações (5.10), (5.11) e (5.12), as quais indicam os valores aproximados para tais grandezas.

$$\omega_{0-1} = \frac{1}{\sqrt{(L_1 + L_2 + L_3)C_1}} \quad (5.10)$$

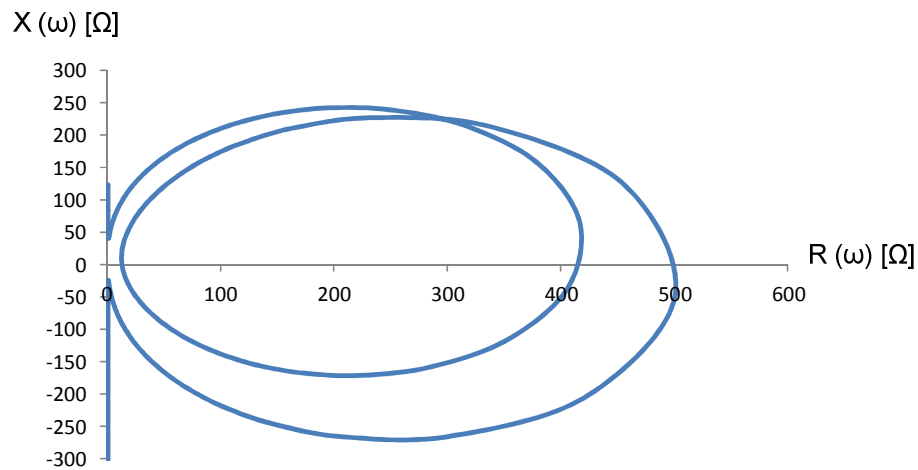
$$\omega_{0-2} = \sqrt{\frac{1}{(L_1 + L_3)\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right)}} \approx \sqrt{\frac{1}{(L_1 + L_2)\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_3}\right)}} \quad (5.11)$$

$$\omega_{0-3} = \sqrt{\frac{1}{L_1} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_2} \right)} \quad (5.12)$$

Objetivando-se uma ilustração gráfica do comportamento do filtro, uma vez adotados os parâmetros: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 0,3\Omega$, $L_1 = 8mH$, $L_2 = 15mH$, $L_3 = 10mH$, $C_1 = 150\mu F$, $C_2 = 50\mu F$ e $C_3 = 40\mu F$, foi possível obter-se as Fig. 5.5 (a) e (b) representando, respectivamente, as magnitudes das impedâncias em função das frequências angulares e as relações entre as reatâncias e resistências.



(a)



(b)

Fig. 5.5. Desempenho da impedância harmônica para um filtro sintonizado em três frequências: (a) módulo da impedância equivalente versus frequência angular; (b) resistência versus a reatância equivalente do filtro em função da frequência angular.

As frequências angulares de ressonância verificadas para o circuito exemplificado são: 450 rad/s , 1210 rad/s e 2540 rad/s .

Outros filtros sintonizados de um número maior de frequências poderiam ser implementados a partir de associações ou mesmo combinações dos arranjos anteriores, todavia, tais estudos não serão aqui realizados por não apresentarem topologias diferenciadas de filtragem, mas tão somente extensões dos desenvolvimentos anteriormente feitos.

5.2.2. Filtro harmônico amortecido

Os filtros amortecidos, conforme já afirmado, apresentam uma baixa impedância para uma faixa de frequências e não apenas um ponto definido. Objetivando contemplar pois tal estratégia para a questão da impedância dominante requerida pelo método proposto nesta tese, apresenta-se, a seguir, as principais configurações aqui consideradas, em sintonia com as configurações indicadas na Fig. 5.2.

a) Filtro amortecido de primeira ordem

Apesar da simplicidade de seu arranjo construtivo, esta configuração não é muito utilizada por requerer um grande capacitor. Somado a isto, há ainda de considerar que esta topologia possui perdas relativamente elevadas na frequência fundamental [39,48]. Não obstante tais observações, este filtro será aqui considerado visando oferecer um melhor embasamento acerca da fundamentação para os filtros amortecidos.

Lembrando que o filtro de 1ª ordem amortecido é constituído por uma combinação série de um capacitor e um resistor, a equação (5.13) é indicativa do desempenho de sua impedância com a frequência angular.

$$\dot{Z}_f(\omega) = R_1 - j \frac{1}{\omega C_1} \quad (5.13)$$

Adotando-se $R_1 = 1\Omega$ e $C_1 = 20\mu F$ obtém-se o desempenho da impedância harmônica ilustrada na Fig. 5.6, a qual evidencia que o arranjo se mostra pouco eficiente para os fins almejados.

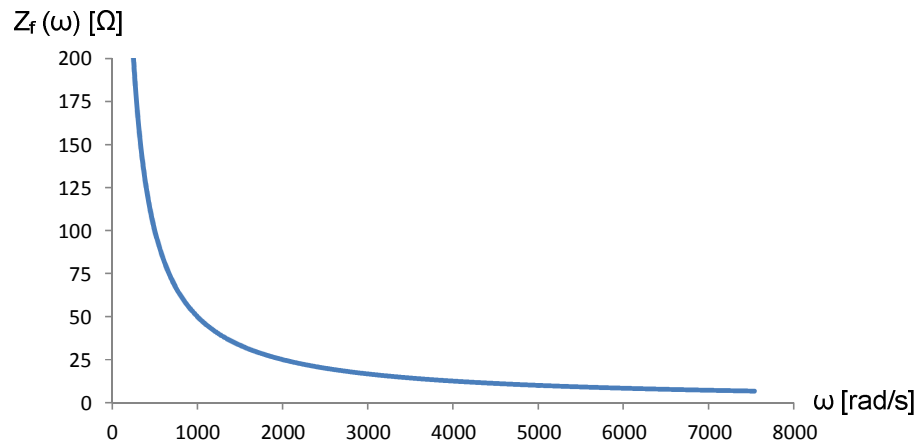


Fig. 5.6. Desempenho da impedância harmônica para um filtro amortecido de 1ª ordem: módulo da impedância equivalente versus frequência angular.

b) Filtro amortecido de segunda ordem

A equação (5.14) oferece o comportamento matemático da impedância complexa do filtro amortecido de 2ª ordem.

$$\dot{Z}_f(\omega) = \left[\frac{\omega^2 R_1 L_1^2}{R_1^2 + \omega^2 L_1^2} \right] + j \left[\frac{\omega R_1^2 L_1}{R_1^2 + \omega^2 L_1^2} - \frac{1}{\omega C_1} \right] \quad (5.14)$$

A frequência angular a partir da qual o filtro de primeira ordem passa a atuar é dada pela equação (5.15).

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (5.15)$$

A Fig. 5.7, vinculada com uma aplicação particular em que: $R_1 = 15\Omega$, $L_1 = 3mH$ e $C_1 = 100\mu F$, mostra o comportamento deste filtro em função da frequência angular e indica que, a partir, aproximadamente, da frequência 1825 rad/s , o módulo da impedância do filtro se apresenta com os valores que oferecem as propriedades aqui esperadas. Comparativamente ao amortecido de 1ª ordem, constata-se que a presente topologia explicita uma curva de atenuação mais acentuada, além, é claro, de não apresentar as limitações impostas por aquele arranjo inicial.

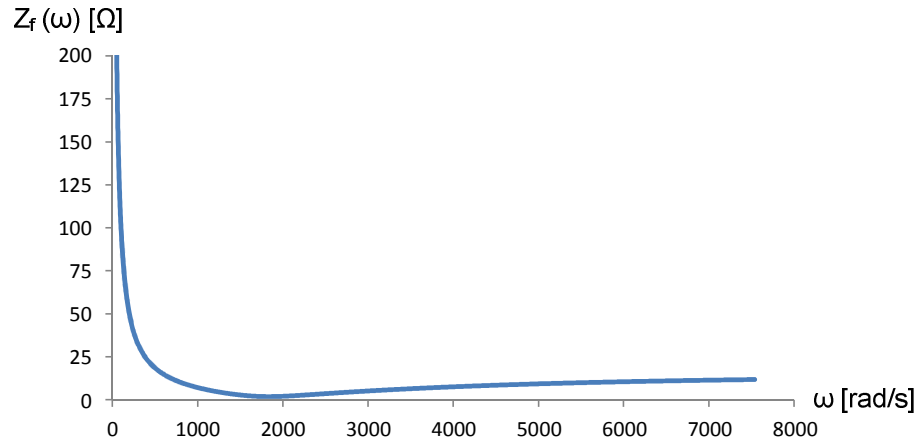


Fig. 5.7. Desempenho da impedância harmônica para um filtro amortecido de 2ª ordem: módulo da impedância equivalente versus frequência angular.

c) Filtro amortecido de terceira ordem

Para o caso da configuração já definida por filtro amortecido de 3ª ordem, o comportamento de sua impedância complexa em função da frequência angular é indicado através da equação (5.16).

$$\dot{Z}_f(\omega) = \left[\frac{\omega^2 R_1 L_1^2}{R_1^2 + \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2} \right] + j \left[\frac{\omega R_1^2 L_1 - \frac{\omega L_1^2}{C_2} + \frac{L_1}{\omega C_2^2}}{R_1^2 + \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2} - \frac{1}{\omega C_1} \right] \quad (5.16)$$

A atuação deste filtro ocorre, efetivamente, a partir da frequência angular dada pela equação (5.17).

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (5.17)$$

Atribuindo os valores: $R_1 = 10\Omega$, $L_1 = 3mH$, $C_1 = 100\mu F$ e $C_2 = 100\mu F$, a relação entre o módulo da impedância harmônica do filtro em questão em função da frequência angular assume a forma ilustrada na Fig. 5.8. Esta é indicativa que, a partir de 1825 rad/s o módulo da impedância do filtro se apresenta com valores compatíveis com as exigências do método para compartilhamento das responsabilidades ora proposto.

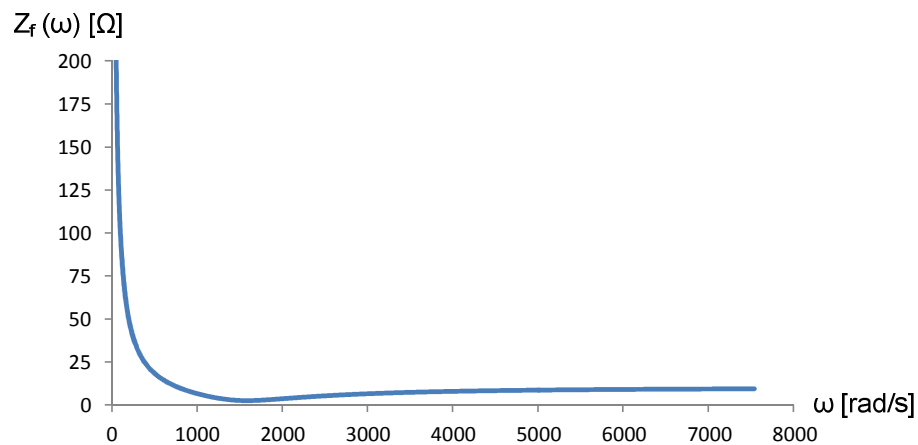


Fig. 5.8. Desempenho da impedância harmônica para um filtro amortecido de 3ª ordem: módulo da impedância equivalente versus frequência angular.

d) Filtro amortecido tipo C

Este possui uma topologia que diverge dos demais arranjos amortecidos pelo fato de acrescentar um ramo RLC série sintonizado à frequência fundamental ou outra predefinida pelas necessidades impostas. A expressão da impedância complexa para o filtro em questão corresponde a da equação (5.18).

$$\dot{Z}_f(\omega) = \left[\frac{R_1 \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2}{R_1^2 + \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2} \right] + j \left[\frac{R_1^2 \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_2} \right)}{R_1^2 + \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2} - \frac{1}{\omega C_1} \right] \quad (5.18)$$

A denominada frequência angular para a qual o filtro passa a oferecer uma baixa impedância é dada pela equação (5.19).

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_1} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)} \quad (5.19)$$

Novamente, objetivando-se evidenciar a característica de desempenho do filtro amortecido tipo C, adotando-se: $R_1 = 10\Omega$, $L_1 = 12mH$, $C_1 = 100\mu F$ e $C_2 = 500\mu F$, apresenta-se na Fig. 5.9 o comportamento da sua impedância harmônica com a frequência angular. Esta mostra que, a partir da frequência angular de 1000 rad/s , o módulo da impedância do filtro se apresenta em proporções apropriadas, para várias frequências. O formato gráfico característico ressalta uma forte atenuação de sua impedância, somado, ainda, ao fato que as perdas são inferiores quando comparadas com as dos demais filtros, desde que C_2 e L_1 sejam sintonizados na frequência fundamental [49].

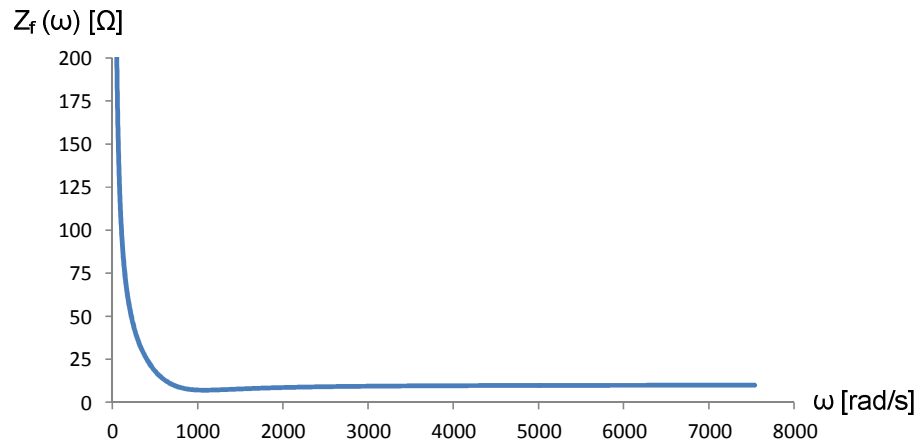


Fig. 5.9. Desempenho da impedância harmônica para um filtro amortecido tipo C: módulo da impedância equivalente versus frequência angular.

5.3. ANÁLISE COMPARATIVA DAS ESTRATÉGIAS PARA OBTENÇÃO DA IMPEDÂNCIA DOMINANTE

Uma vez apresentadas as principais estratégias para obtenção da impedância dominante através de filtros harmônicos, realiza-se, nesta seção, uma investigação computacional do desempenho das soluções consideradas factíveis aos propósitos estabelecidos.

Em sua essência a estratégia empregada consiste na adoção de arranjos elétricos típicos, para os quais as distintas configurações de filtros são especificadas, implementadas e suas eficiências avaliadas visando, a partir de valores esperados para os compartilhamentos ou gabaritos, constatar sobre o nível de aderência entre os resultados oferecidos por uma ou outra solução.

Diante das observações tecidas na seção anterior (5.2), foi feita uma pré-seleção das topologias de filtros a serem considerados, descartando-se aqueles arranjos que se apresentam com uma maior complexidade construtiva ou, ainda, com problemas para implementação em campo. Neste sentido, os filtros sintonizados de duas e três frequências não serão aqui

analisados, por serem de custos mais elevados, pouco flexíveis a múltiplos ajustes, factíveis de geração de ressonâncias indesejáveis nas faixas entre frequências de filtragem, além, é claro, de poderem ser substituídos por filtros amortecidos. Em relação às topologias do tipo amortecido, para efeito do presente estudo, não serão considerados os filtros amortecidos de primeira ordem, devido às razões já elencadas, quais sejam, apresentam-se com consideráveis níveis de perdas à frequência fundamental e possuem baixa eficácia para ordens harmônicas inferiores, além de necessitarem de um valor de capacitância de grande montante. Portanto, serão aqui analisados, os seguintes arranjos para filtragem harmônica: filtro sintonizado em uma frequência, filtros amortecidos de segunda e terceira ordem e do tipo C.

5.3.1. Arranjo elétrico hipotético simplificado

O arranjo elétrico hipotético utilizado para a presente investigação corresponde ao mesmo já empregado no Capítulo 3 para análise computacional da Metodologia da Superposição Modificada. Este se encontra ilustrado na Fig. 3.4 daquele capítulo. Naquela figura, pôde-se notar que, o arranjo ali apresentado, era dotado de fontes de distorções harmônicas apenas de ordem 5, todavia, será feita, para o presente estudo, a implementação de mais duas ordens harmônicas para a avaliação ora proposta.

Neste sentido, a Fig. 5.10 mostra este arranjo reestruturado, no qual se encontram destacadas as alterações da composição das fontes de distorção, cada qual com uma predominância distinta e preestabelecida de atribuição de responsabilidades para o supridor e o consumidor. Também, o diagrama ressalta que o ponto de acoplamento sob observação e estudo será o de conexão do consumidor 2. As demais partes do circuito são então admitidas como integrantes da unidade supridora.

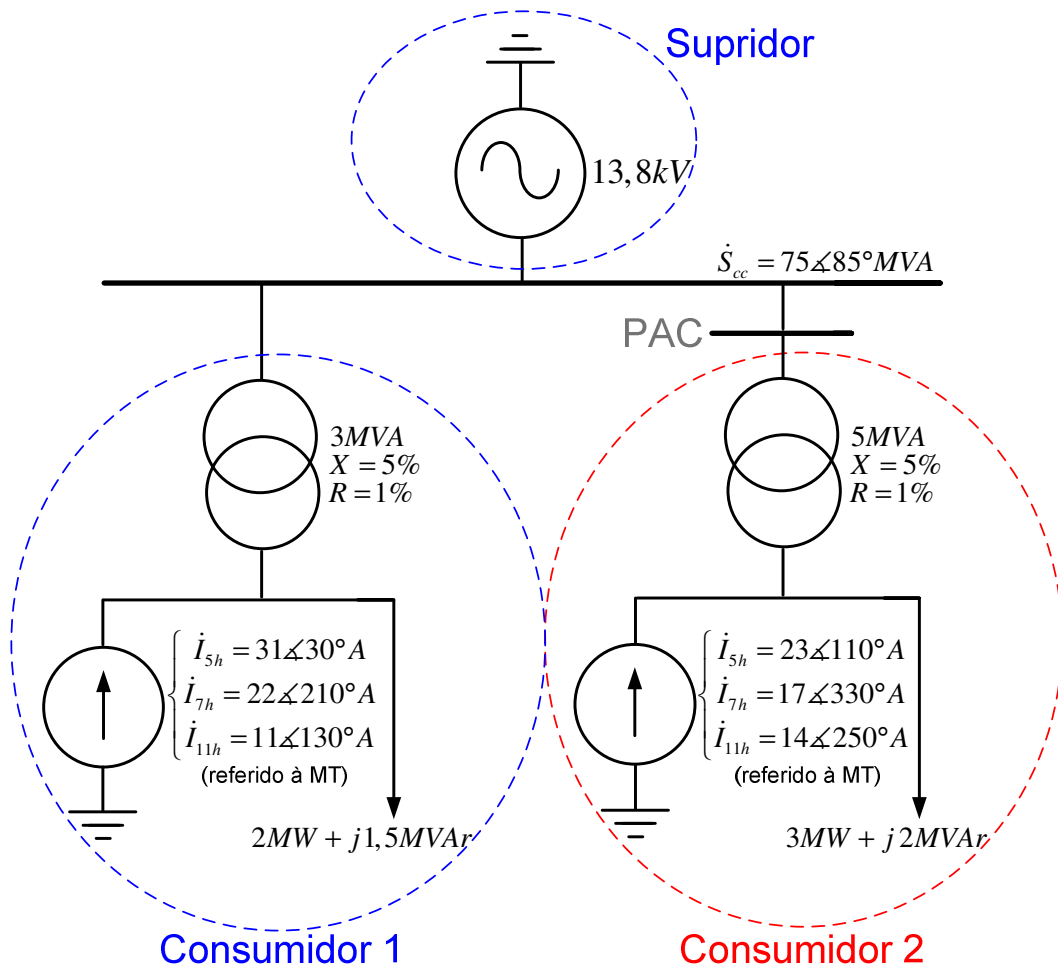


Fig. 5.10. Arranjo elétrico hipotético simplificado adotado para os estudos computacionais de desempenho das estratégias de filtragem harmônica.

Obedecendo-se à mesma lógica anteriormente apresentada, tem-se, nas Fig. 5.11, 5.12 e 5.13, os circuitos equivalentes de Norton do arranjo hipotético simplificado em pauta. Os procedimentos para se alcançar tais circuitos equivalentes estão em consonância com cálculos e equacionamentos comumente empregados em análises de circuitos elétricos e, por isso, os mesmos, não serão aqui apresentados.

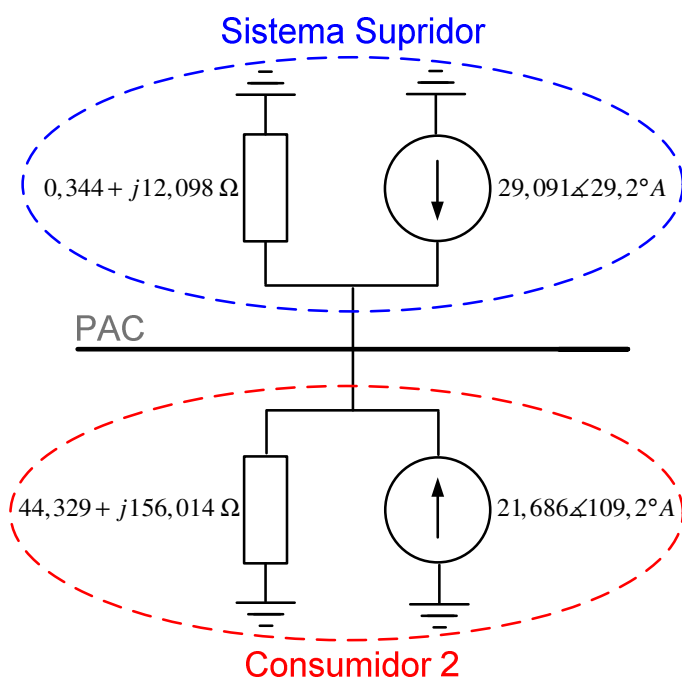


Fig. 5.11. Circuito equivalente de Norton para a 5ª ordem harmônica.

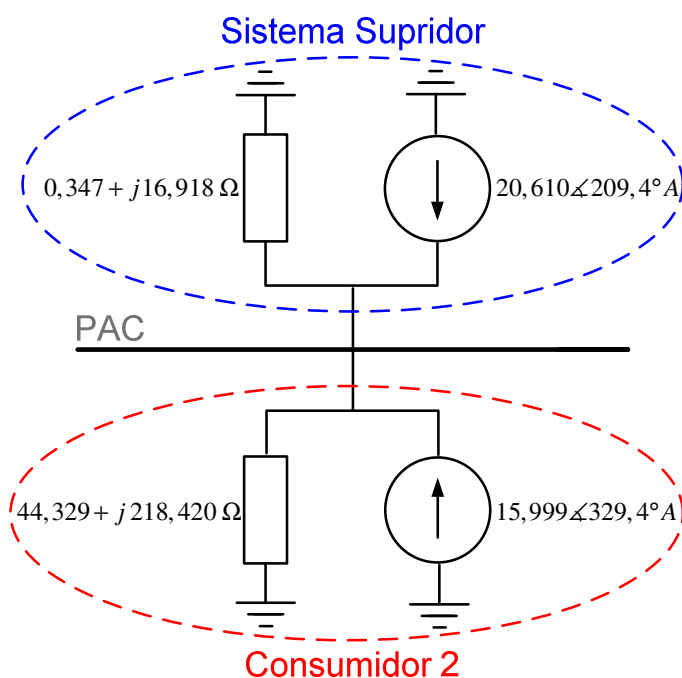


Fig. 5.12. Circuito equivalente de Norton para a 7ª ordem harmônica.

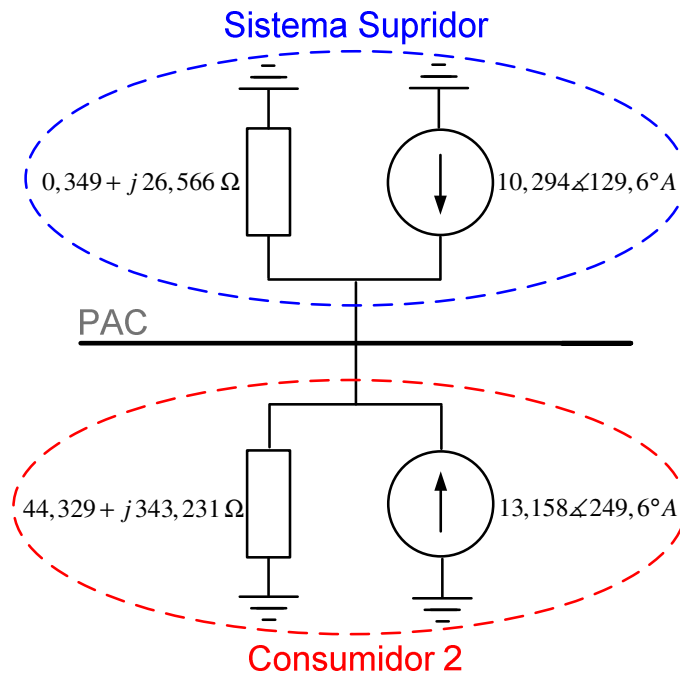


Fig. 5.13. Circuito equivalente de Norton para a 11ª ordem harmônica.

Aplicando-se o método da superposição clássico, obtêm-se os resultados constantes da Tabela 5.1, a qual destaca os percentuais de responsabilidade sobre as distorções harmônicas encontradas no PAC para cada uma das ordens harmônicas ali consideradas. Tais atribuições de responsabilidade serão aqui adotadas como valores esperados, ou ainda, valores gabaritos. Vale ressaltar que, a aplicação da metodologia da superposição clássica só foi possível devido ao conhecimento, para este arranjo hipotético, das impedâncias harmônicas equivalentes do suprido e do consumidor. Como já contemplado em discussões anteriores, o desconhecimento destas grandezas para as configurações elétricas reais foi o fator motivador dos trabalhos aqui discutidos.

Tabela 5.1 – Percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor – valores esperados.

Ordem	Resultado das Projeções	Parcelas de Responsabilidades	
		Supridor	Consumidor
5	$V_{s-proj-5h} = 275,308 V$ $V_{c-proj-5h} = 167,103 V$	62,2%	37,8%
7	$V_{s-proj-7h} = 218,466 V$ $V_{c-proj-7h} = 76,672 V$	74,0%	26,0%
11	$V_{s-proj-11h} = 78,843 V$ $V_{c-proj-11h} = 217,131 V$	26,6%	73,4%

Os procedimentos matemáticos para se obter os percentuais de responsabilidade sobre as distorções harmônicas presentes no PAC obedecem à mesma sequência lógica empregada na aplicação do Método da Superposição tradicional no Capítulo 3. Por este motivo, os desenvolvimentos matemáticos não serão aqui novamente detalhados.

Uma vez calculados os valores esperados de compartilhamento de responsabilidades para o arranjo hipotético simplificado adotado, os trabalhos avançaram no sentido de aplicar o Método da Superposição Modificado utilizando-se das diferentes topologias de filtros harmônicos selecionadas para as investigações, visando-se, assim, a avaliação do desempenho dos mesmos quanto a suas eficácias para a obtenção da impedância dominante, conforme requerido pela metodologia proposta.

Tendo em mente a obtenção de filtros harmônicos trifásicos conectados em estrela, a Tabela 5.2 apresenta os parâmetros dos filtros previamente definidos para os fins deste trabalho.

Tabela 5.2 – Casos avaliados e respectivas parametrizações dos filtros empregados.

Caso	Filtro Harmônico		Parâmetros do Filtro			Observações
	Tipo	Especificação	R	L	C	
1	sintonizado	1 frequência	$R_1 = 1\Omega$	$L_1 = 10\text{mH}$	$C_1 = 28\mu\text{F}$	para 300Hz
2	sintonizado	1 frequência	$R_1 = 1\Omega$	$L_1 = 5\text{mH}$	$C_1 = 28\mu\text{F}$	para 420Hz
3	sintonizado	1 frequência	$R_1 = 1\Omega$	$L_1 = 2\text{mH}$	$C_1 = 28\mu\text{F}$	para 660Hz
4	amortecido	2ª ordem	$R_1 = 40\Omega$	$L_1 = 10\text{mH}$	$C_1 = 28\mu\text{F}$	a partir de 300Hz
5	amortecido	3ª ordem	$R_1 = 40\Omega$	$L_1 = 10\text{mH}$	$C_1 = 28\mu\text{F}$ $C_2 = 22\mu\text{F}$	a partir de 300Hz
6	amortecido	tipo C	$R_1 = 40\Omega$	$L_1 = 10,5\text{mH}$	$C_1 = 28\mu\text{F}$ $C_2 = 670\mu\text{F}$	a partir de 300Hz

Para o dimensionamento dos filtros adotou-se, como premissa, a necessidade de uma compensação reativa de 2MVar para a frequência fundamental. Tal opção foi feita muito embora o reconhecimento do fato que esta tarefa não seja imprescindível para os estudos em questão, mas, tão apenas, ser este um procedimento comumente empregado no projeto de filtros harmônicos [50]. Não obstante este fato, vale destacar que, estudos complementares certamente se farão necessários para uma futura otimização dos dispositivos atrelados a este filtro, os quais, como discutido, não têm por pretensão uma conexão permanente no sistema elétrico sob análise. Os demais elementos foram ajustados em consonância com as propriedades almejadas e particularmente aplicadas a uma ou outra configuração.

Tendo em vista os casos acima elencados, foram aplicados os procedimentos de cálculos computacionais, encontrando-se, então, para cada ordem harmônica sob foco, as correntes necessárias à aplicação da metodologia da superposição modifica, quais sejam, $\dot{I}_{pac-in-h}$, $\dot{I}_{pac-out-h}$ e \dot{I}_{f-h} . As mesmas encontram-se evidenciadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Correntes harmônicas à montante, à jusante e no filtro harmônico.

Caso	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)			$\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)			\dot{I}_{f-h} (A)		
	5h	7h	11h	5h	7h	11h	5h	7h	11h
1	27,395 ∠34,9°	-	-	21,817 ∠-70,3°	-	-	39,227 ∠67,3°	-	-
2	-	19,971 ∠212,3°	-	-	16,086 ∠149,5°	-	-	19,076 ∠-99,1°	-
3	-	-	9,894 ∠131,1°	-	-	13,188 ∠69,7°	-	-	12,126 ∠203,9°
4	18,669 ∠93,4°	11,459 ∠200,9°	6,884 ∠93,0°	22,274 ∠-65,8°	16,130 ∠151,9°	13,022 ∠71,6°	40,280 ∠104,7°	12,213 ∠-73,2°	7,072 ∠230,8°
5	10,243 ∠59,3°	11,022 ∠189,4°	6,962 ∠85,4°	21,472 ∠-66,7°	16,012 ∠152,3°	12,988 ∠71,9°	28,714 ∠96,5°	9,804 ∠-70,3°	6,425 ∠237,3°
6	20,923 ∠94,0°	11,576 ∠201,6°	6,890 ∠93,2°	22,442 ∠-65,8°	16,135 ∠151,8°	13,022 ∠71,6°	42,700 ∠104,5°	12,372 ∠-73,7°	7,086 ∠230,6°

Uma vez conhecidas as correntes e empregando-se os procedimentos atrelados à Metodologia da Superposição Modificada, chega-se aos resultados de compartilhamentos de responsabilidade mostrados nas Tabelas 5.4, 5.5 e 5.6, respectivamente, para as ordens harmônicas 5, 7 e 11.

Tabela 5.4 – Percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor – distorção harmônica de ordem 5 – Método da Superposição Modificado.

Caso	Resultado das Projeções	Parcelas de Responsabilidades	
		Supridor	Consumidor
1	$I_{fs-proj-5h} = 23,112 A$ $I_{fc-proj-5h} = 16,115 A$	58,9%	41,1%
4	$I_{fs-proj-5h} = 18,308 A$ $I_{fc-proj-5h} = 21,972 A$	45,5%	54,5%
5	$I_{fs-proj-5h} = 8,156 A$ $I_{fc-proj-5h} = 20,558 A$	28,4%	71,6%
6	$I_{fs-proj-5h} = 20,579 A$ $I_{fc-proj-5h} = 22,121 A$	48,2%	51,8%

Tabela 5.5 – Percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor – distorção harmônica de ordem 7 – Método da Superposição Modificado.

Caso	Resultado das Projeções	Parcelas de Responsabilidades	
		Supridor	Consumidor
2	$I_{fs-proj-7h} = 13,210 A$ $I_{fc-proj-7h} = 5,866 A$	69,3%	30,7%
4	$I_{fs-proj-7h} = 0,831 A$ $I_{fc-proj-7h} = 11,383 A$	6,8%	93,2%
5	$I_{fs-proj-7h} = -1,979 A$ $I_{fc-proj-7h} = 11,783 A$	14,4%	85,6%
6	$I_{fs-proj-7h} = 1,081 A$ $I_{fc-proj-7h} = 11,291 A$	8,7%	91,3%

Tabela 5.6 – Percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor – distorção harmônica de ordem 11 – Método da Superposição Modificado.

Caso	Resultado das Projeções	Parcelas de Responsabilidades	
		Supridor	Consumidor
3	$I_{fs-proj-11h} = 2,927 A$ $I_{fc-proj-11h} = 9,199 A$	24,1%	75,9%
4	$I_{fs-proj-11h} = -5,102 A$ $I_{fc-proj-11h} = 12,174 A$	29,5%	70,5%
5	$I_{fs-proj-11h} = -6,144 A$ $I_{fc-proj-11h} = 12,568 A$	32,8%	67,2%
6	$I_{fs-proj-11h} = -5,073 A$ $I_{fc-proj-11h} = 12,159 A$	29,4%	70,6%

A Tabela 5.7 apresenta uma síntese dos valores encontrados para o compartilhamento de responsabilidades.

Tabela 5.7 – Quadro síntese dos percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor encontrados e valores esperados.

Referência	Parcelas de Responsabilidades					
	Supridor			Consumidor		
	5h	7h	11h	5h	7h	11h
Valores Esperados	62,2%	74,0%	26,6%	37,8%	26,0%	73,4%
Caso 1	58,9%	-	-	41,1%	-	-
Caso 2	-	69,3%	-	-	30,7%	-
Caso 3	-	-	24,1%	-	-	75,9%
Caso 4	45,5%	6,8%	29,5%	54,5%	93,2%	70,5%
Caso 5	28,4%	14,4%	32,8%	71,6%	85,6%	67,2%
Caso 6	48,2%	8,7%	29,4%	51,8%	91,3%	70,6%

A título de informação, a Tabela 5.8 fornece os valores absolutos das impedâncias dos diversos filtros analisados para as ordens harmônicas em foco, para cada um dos casos.

Tabela 5.8 – Módulos das impedâncias harmônicas dos filtros em cada uma das ordens harmônicas avaliadas.

Caso	Módulo da Impedância do Filtro		
	5ª Ordem	7ª Ordem	11ª Ordem
1	1,005 Ω	-	-
2	-	1,0556 Ω	-
3	-	-	1,049 Ω
4	8,077 Ω	13,065 Ω	23,638 Ω
5	8,795 Ω	18,863 Ω	29,763 Ω
6	7,847 Ω	12,686 Ω	23,494 Ω

Diante dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- Para efeito do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas de 5ª ordem, apenas o Caso 1 (filtro sintonizado em 300 Hz) se mostrou eficiente. Os demais arranjos (filtros amortecidos) levaram a discrepâncias de grande monta;

- No que tange às distorções de 7^a ordem, resultados semelhantes aos anteriormente destacados foram verificados, Contudo, como seria esperado, o Caso 2 (filtro sintonizado na ordem em questão) se apresentou com os melhores resultados;
- Nota-se que os resultados de compartilhamento atrelados com as distorções de 11^a ordem, em geral, apresentaram valores próximos aos esperados, tanto quando se utilizou filtro sintonizado ou quando se empregou filtros amortecidos. Isto se justifica pelo fato que, à medida que a frequência aumenta, as impedâncias equivalentes do supridor e consumidor são correspondentemente incrementadas e, diante deste fato, o filtro se torna mais efetivo e dominante.

5.3.2. Arranjo elétrico de 14 barras - padrão IEEE

Nesta subseção tem-se a aplicação do Método da Superposição Modificado em um arranjo elétrico de 14 barras padrão IEEE [51-55], a qual visa a uma avaliação de desempenho do processo para um complexo elétrico com maior identidade com a estrutura dos sistemas reais. Tal implementação, conforme já afirmado, tem por objetivo uma investigação das estratégias, aqui elencadas, quanto à sua eficácia para obtenção da impedância harmônica dominante. Vale ainda ressaltar que o sistema de 14 barras do IEEE foi selecionado por se tratar de um arranjo elétrico amplamente difundido, validado e, também, representativo de situações práticas frequentemente encontradas em rede elétricas de distribuição.

A Fig. 5.14 apresenta o diagrama unifilar do arranjo elétrico em pauta, o qual, vale ressaltar, trata-se de um sistema elétrico trifásico.

Carga – cargas trifásicas tipo impedância constante e definidas pelos seus equivalentes de consumo $P + jQ$;

LT – linhas de transmissão;

T – transformadores.

A Tabela 5.9 fornece os principais dados atrelados com os componentes constituintes do arranjo elétrico selecionado para os estudos investigativos. No que tange às máquinas síncronas estas são representadas por fontes ideais de tensão com respectivas impedâncias equivalentes, os transformadores pelos clássicos modelos à 60 Hz, as linhas de transmissão pelos seus correspondentes circuitos π e, por fim, as cargas são inseridas através de suas impedâncias constantes.

Tabela 5.9 – Parâmetros dos elementos constituintes do sistema de 14 barras do IEEE.

Elementos	Parâmetros dos Elementos do Sistema de 14 barras IEEE			
Máquinas Síncronas	Tensão Nominal (kV)	Potência Nominal (MVA)	Resistência (Ω)	Indutância (mH)
G_1	69	615	0	18,438
G_2	13,8	60	0,246	221,001
CS_3	69	60	0,246	221,001
CS_6	13,8	25	0,011	25,257
CS_8	18	25	0,011	25,257
Cargas P+jQ	Tensão Nominal (kV)	Potência Aparente (MVA)	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)
$Carga_2$	69	25,14	21,7	12,7
$Carga_3$	69	96,10	94,2	19,0
$Carga_4$	69	48,97	47,8	3,9
$Carga_5$	69	7,77	7,6	1,8
$Carga_6$	13,8	13,48	11,2	7,5
$Carga_9$	13,8	33,85	29,5	16,6
$Carga_{10}$	13,8	10,71	9,0	5,8
$Carga_{11}$	13,8	3,94	3,5	1,8
$Carga_{12}$	13,8	6,31	6,1	1,6
$Carga_{13}$	13,8	14,69	13,5	5,8
$Carga_{14}$	13,8	15,72	14,9	5,0

Linhas de Transmissão	Tensão Nominal (kV)	Resistência (Ω)	Indutância (mH)	Capacitância (μF)
<i>LT₁₋₂</i>	69	0,923	7,473	2,942
<i>LT₁₋₅</i>	69	2,572	28,168	2,741
<i>LT₂₋₃</i>	69	2,237	25,002	2,440
<i>LT₂₋₄</i>	69	2,767	22,267	2,084
<i>LT₂₋₅</i>	69	2,711	21,959	1,894
<i>LT₃₋₄</i>	69	3,190	21,599	1,928
<i>LT₅₋₄</i>	69	0,636	5,318	0,713
<i>LT₆₋₁₁</i>	13,8	0,181	1,005	-
<i>LT₆₋₁₂</i>	13,8	0,234	1,292	-
<i>LT₆₋₁₃</i>	13,8	0,126	0,658	-
<i>LT₇₋₉</i>	13,8	0	0,556	-
<i>LT₉₋₁₀</i>	13,8	0,061	0,427	-
<i>LT₉₋₁₄</i>	13,8	0,242	1,366	-
<i>LT₁₀₋₁₁</i>	13,8	0,156	0,970	-
<i>LT₁₂₋₁₃</i>	13,8	0,421	1,010	-
<i>LT₁₃₋₁₄</i>	13,8	0,341	1,758	-
Transformadores de Força	Relações Nominais de Tensões (kV)	Potência Nominal (MVA)	Reatância Percentual	Razão de TAP
<i>T₄₋₇</i>	69/13,8	50	7%	0,978
<i>T₄₋₉</i>	69/13,8	20	7%	0,969
<i>T₅₋₆</i>	69/13,8	45	7%	0,932
<i>T₇₋₈</i>	18/13,8	40	5%	1

Em consonância com o foco desta pesquisa, foram adicionadas nos principais barramentos de carga do sistema elétrico em questão fontes de correntes harmônicas representativas da presença de cargas não lineares, as quais, como é sabido, constituem-se no cerne dos fenômenos aqui considerados, qual seja, as distorções harmônicas de tensões e a busca pela atribuição das responsabilidades entre os agentes envolvidos. Tais fontes foram adotadas como atreladas com as ordens harmônicas 5, 7, 11 e 13, as quais são representativas, por exemplo, da operação de unidades retificadoras de 6 e 12 pulsos. Quanto aos níveis das correntes injetadas, estas compreenderam valores percentuais em relação à potência nominal da carga em foco, variando de 5 a 20% da magnitude desta. Dentro desta hipótese, têm-se os valores de injeções harmônicas apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Fontes de distorções adicionadas ao sistema de 14 barras do IEEE.

Barra	\dot{I}_{5h} (A)	\dot{I}_{7h} (A)	\dot{I}_{11h} (A)	\dot{I}_{13h} (A)
3	103,9 \angle 222°	68,9 \angle 171°	43,5 \angle 167°	33,9 \angle 122°
4	29,7 \angle 167°	17,0 \angle 50°	38,2 \angle 256°	29,7 \angle – 6°
6	83,8 \angle 2°	57,3 \angle 87°	50,9 \angle 240°	38,2 \angle 111°
9	216,4 \angle 105°	154,9 \angle 215°	108,2 \angle 51°	93,3 \angle 154°
13	33,9 \angle 153°	27,6 \angle 260°	55,2 \angle 92°	35,0 \angle 34°
14	78,5 \angle 137°	70,0 \angle 108°	62,4 \angle 23°	38,6 \angle 48°

Uma vez conhecida a topologia, os modelos, os parâmetros, os carregamentos e as injeções de correntes harmônicas atreladas com a presença das cargas não lineares, nas proporções aleatoriamente escolhidas, foram então realizados estudos computacionais, através do simulador ATP, com vistas ao conhecimento das condições operativas impostas quanto aos níveis de distorções harmônicas presentes nos barramentos constituintes do sistema elétrico. A Tabela 5.11 apresenta as distorções harmônicas individuais e totais de tensão para as 14 barras do sistema avaliado.

Tabela 5.11 – Distorções individuais e totais de tensão no sistema de 14 barras do IEEE com a inserção das fontes harmônicas de corrente.

Barra	DIT_{5h} (%)	DIT_{7h} (%)	DIT_{11h} (%)	DIT_{13h} (%)	DTT (%)
1	4,52	3,67	1,31	3,85	7,10
2	5,58	4,40	1,53	3,87	8,23
3	5,78	3,88	3,75	2,80	8,39
4	7,01	4,84	0,91	2,14	8,83
5	6,77	4,91	1,13	2,82	8,90
6	7,61	4,72	1,37	1,13	9,13
7	7,78	3,74	1,78	0,51	8,83
8	7,26	3,49	1,66	0,53	8,24
9	8,90	3,14	3,08	0,67	9,95
10	8,64	3,41	2,73	0,35	9,69
11	8,11	4,06	2,07	0,43	9,31
12	7,71	4,54	1,65	1,56	9,23
13	7,85	4,43	1,94	1,91	9,42
14	8,87	5,03	4,75	1,75	11,38

A tabela anterior evidencia que o barramento de número 14 apresenta-se, de uma forma geral, como o principal ponto afetado pelas distorções harmônicas individuais (DIT) e totais (DTT). Diante deste fato, tal barra foi selecionada para o presente estudo de compartilhamento de responsabilidades, sendo, por conseguinte, considerada como ponto de acoplamento comum (PAC) entre o consumidor e o suprido (arranjo equivalente da rede elétrica de suprimento que incorpora todos os geradores, compensadores, linhas e demais cargas). Vale ainda ressaltar, que as distorções harmônicas de 5^a, 7^a, 11^a e total ultrapassaram, neste barramento, os valores de referências estabelecidos no PRODIST (Tabela 1.2) e, por outro lado, as distorções harmônicas de 13^o ordem se mostraram com valores relativamente pequenos, não ultrapassando os valores de referência, por tal motivo, tendo por foco os objetivos deste trabalho, estas últimas não serão aqui contempladas para efeito dos estudos de compartilhamento de responsabilidades.

Neste sentido e procurando-se estabelecer valores gabaritos ou esperados para fins da atribuição de responsabilidades, tornou-se essencial a determinação, neste momento, dos níveis individuais de contribuições vinculadas com a denominada “rede equivalente” e a carga suprida pelo barramento 14. Para tanto, como anteriormente realizado para o sistema elétrico simplificado, mais uma vez foram empregadas as técnicas de análise fundamentadas no tradicional método da superposição. Este pode ser, mais uma vez, visualizado através da Fig. 5.15, a qual representa, de modo genérico, o circuito equivalente de Norton para qualquer frequência envolvida no processo de análise.

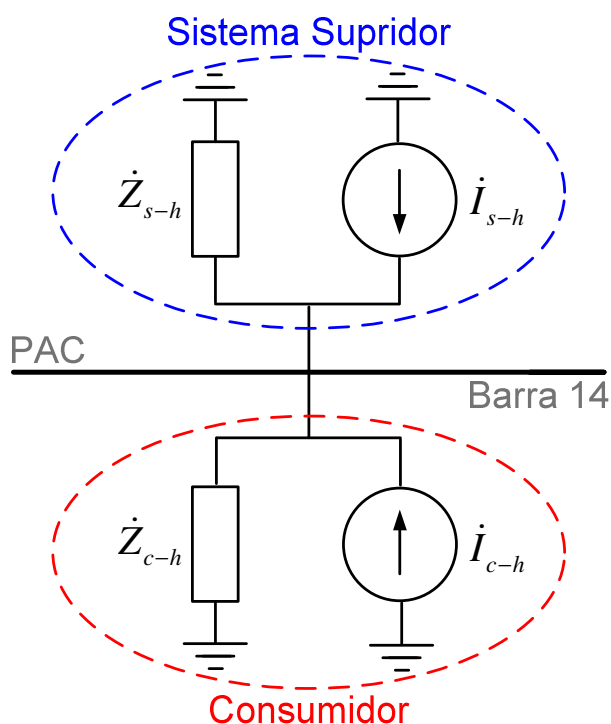


Fig. 5.15. Circuito equivalente de Norton - ordem genérica h – observado a partir da barra 14 do sistema de 14 barras do IEEE.

A Tabela 5.12 indica os valores das impedâncias e fontes de correntes harmônicas equivalentes do circuito elétrico do sistema supridor e do consumidor, os quais são imprescindíveis à aplicação do método da superposição clássico. Estas grandezas somente foram factíveis de serem encontradas devido ao pleno conhecimento das impedâncias harmônicas do arranjo utilizado, o qual, encontra-se, também, implementado no simulador ATP.

Tabela 5.12 – Impedâncias e fontes harmônicas equivalentes do sistema elétrico estabelecido.

Ordem	Impedâncias Harmônicas Equivalentes		Fontes de Correntes Harmônicas Equivalentes	
	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor
5	$2,767 \angle 29,5^\circ$	$12,750 \angle 3,9^\circ$	$295,6 \angle 96,8^\circ$	$78,5 \angle 137^\circ$
7	$3,226 \angle -55,8^\circ$	$12,770 \angle 2,8^\circ$	$91,7 \angle 123,6^\circ$	$70,0 \angle 108^\circ$
11	$4,018 \angle -44,4^\circ$	$12,780 \angle 1,8^\circ$	$45,8 \angle 51,9^\circ$	$62,4 \angle 23^\circ$

Na sequência, aplicou-se o método da superposição clássico, obtendo-se os resultados constantes da Tabela 5.13. Esta destaca os percentuais de responsabilidade sobre as distorções harmônicas encontradas no PAC selecionado (barra 14) para cada uma das ordens harmônicas ali consideradas. Tais atribuições de responsabilidade serão aqui adotadas como valores esperados por representarem as grandezas que efetivamente são advindas de uma ou outra parte (supridor e consumidor).

Tabela 5.13 – Percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor – valores esperados.

Ordem	Resultado das Projeções	Parcelas de Responsabilidades	
		Supridor	Consumidor
5	$V_{s-proj-5h} = 675,132 \text{ V}$ $V_{c-proj-5h} = 153,431 \text{ V}$	81,5%	18,5%
7	$V_{s-proj-7h} = 255,822 \text{ V}$ $V_{c-proj-7h} = 194,303 \text{ V}$	56,8%	43,2%
11	$V_{s-proj-11h} = 142,301 \text{ V}$ $V_{c-proj-11h} = 197,868 \text{ V}$	41,8%	58,2%

Uma vez calculados os valores esperados para as responsabilidades sobre as distorções harmônicas junto ao PAC selecionado, os trabalhos prosseguiram no sentido da aplicação do Método da Superposição Modificado utilizando-se das diferentes topologias de filtros harmônicos já previamente selecionadas. Assim, a Tabela 5.14 apresenta os parâmetros dos filtros definidos para os fins deste trabalho e casos avaliados.

Tabela 5.14 – Casos avaliados e respectivas parametrizações dos filtros empregados – sistema de 14 barras do IEEE.

Caso	Filtro Harmônico		Parâmetros do Filtro			Observações
	Tipo	Especificação	R	L	C	
1	sintonizado	1 frequência	$R_1 = 0,5\Omega$	$L_1 = 4\text{mH}$	$C_1 = 69\mu\text{F}$	para 300Hz
2	sintonizado	1 frequência	$R_1 = 0,5\Omega$	$L_1 = 2,1\text{mH}$	$C_1 = 69\mu\text{F}$	para 420Hz
3	sintonizado	1 frequência	$R_1 = 0,5\Omega$	$L_1 = 0,85\text{mH}$	$C_1 = 69\mu\text{F}$	para 660Hz
4	amortecido	2ª ordem	$R_1 = 30\Omega$	$L_1 = 4\text{mH}$	$C_1 = 69\mu\text{F}$	a partir de 300Hz
5	amortecido	3ª ordem	$R_1 = 30\Omega$	$L_1 = 4\text{mH}$	$C_1 = 69\mu\text{F}$ $C_2 = 41\mu\text{F}$	a partir de 300Hz
6	amortecido	tipo C	$R_1 = 30\Omega$	$L_1 = 4,2\text{mH}$	$C_1 = 69\mu\text{F}$ $C_2 = 1670\mu\text{F}$	a partir de 300Hz

Mais uma vez, para o dimensionamento dos filtros adotou-se, como premissa, a necessidade de uma compensação reativa, que neste caso em particular foi de 5MVar para a frequência fundamental. Não obstante tal opção, vale ressaltar que não há qualquer compromisso desta hipótese para a seleção do banco de capacitores que norteará os demais componentes do filtro. Isto será objeto de discussões posteriores, entretanto, retomando este princípio para a definição do capacitor, os demais elementos foram ajustados em consonância com as propriedades almejadas e particularmente aplicadas a uma ou outra configuração.

Uma vez inseridos, individualmente, cada filtro supra especificado, os trabalhos computacionais foram, então, conduzidos com base nos princípios da metodologia proposta por esta tese. Assim procedendo, determinou-se as correntes elétricas necessárias à implementação da Metodologia da Superposição Modificada, as quais encontram-se fornecidas na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Correntes harmônicas à montante, à jusante e no filtro harmônico
– sistema de 14 barras do IEEE – barra 14.

Caso	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)			$\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)			\dot{I}_{f-h} (A)		
	5h	7h	11h	5h	7h	11h	5h	7h	11h
1	248,40 $\angle 100,2^\circ$	-	-	70,75 $\angle -35,5^\circ$	-	-	303,10 $\angle 109,6^\circ$	-	-
2	-	75,92 $\angle 109,5^\circ$	-	-	64,49 $\angle -72,2^\circ$	-	-	140,40 $\angle 108,7^\circ$	-
3	-	-	37,44 $\angle 47,2^\circ$	-	-	58,67 $\angle 202,4^\circ$	-	-	95,91 $\angle 32,3^\circ$
4	174,70 $\angle 124,1^\circ$	12,39 $\angle 204,4^\circ$	34,62 $\angle 160,7^\circ$	52,18 $\angle -25,6^\circ$	56,68 $\angle -87,2^\circ$	54,30 $\angle 181,8^\circ$	221,4 $\angle 130,9^\circ$	53,38 $\angle 105,3^\circ$	25,28 $\angle 31,4^\circ$
5	153,00 $\angle 111,3^\circ$	14,19 $\angle 228,9^\circ$	36,43 $\angle 161,9^\circ$	51,52 $\angle -34,4^\circ$	56,46 $\angle -88,5^\circ$	54,14 $\angle 181,2^\circ$	197,70 $\angle 119,7^\circ$	47,01 $\angle 103,3^\circ$	23,1 $\angle 32,5^\circ$
6	188,6 $\angle 128,0^\circ$	12,03 $\angle 198,9^\circ$	34,47 $\angle 160,7^\circ$	53,37 $\angle -22,0^\circ$	56,79 $\angle -86,9^\circ$	54,32 $\angle 181,9^\circ$	236,3 $\angle 134,5^\circ$	54,76 $\angle 105,3^\circ$	25,44 $\angle 32,2^\circ$

Diante das informações computacionais obtidas, pôde-se, na sequência, chegar-se aos resultados para os compartilhamentos de responsabilidade mostrados nas Tabelas 5.16, 5.17 e 5.18, respectivamente, para as ordens harmônicas 5, 7 e 11.

Tabela 5.16 – Percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor – distorção harmônica de ordem 5 – Método da Superposição Modificado.

Caso	Resultado das Projeções	Parcelas de Responsabilidades	
		Supridor	Consumidor
1	$I_{fs-proj-5h} = 245,077 A$ $I_{fc-proj-5h} = 58,014 A$	80,9%	19,1%
4	$I_{fs-proj-5h} = 173,460 A$ $I_{fc-proj-5h} = 47,864 A$	78,4%	21,6%
5	$I_{fs-proj-5h} = 159,687 A$ $I_{fc-proj-5h} = 42,715 A$	78,9%	21,1%
6	$I_{fs-proj-5h} = 171,426 A$ $I_{fc-proj-5h} = 49,955 A$	77,4%	22,6%

Tabela 5.17 – Percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor – distorção harmônica de ordem 7 – Método da Superposição Modificado.

Caso	Resultado das Projeções	Parcelas de Responsabilidades	
		Supridor	Consumidor
2	$I_{fs-proj-7h} = 75,913 A$ $I_{fc-proj-7h} = 64,482 A$	54,1%	45,9%
4	$I_{fs-proj-7h} = -1,967 A$ $I_{fc-proj-7h} = 55,344 A$	3,4%	96,6%
5	$I_{fs-proj-7h} = -8,262 A$ $I_{fc-proj-7h} = 55,269 A$	13,0%	87,0%
6	$I_{fs-proj-7h} = -0,754 A$ $I_{fc-proj-7h} = 55,506 A$	1,3%	98,7%

Tabela 5.18 – Percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor – distorção harmônica de ordem 11 – Método da Superposição Modificado.

Caso	Resultado das Projeções	Parcelas de Responsabilidades	
		Supridor	Consumidor
3	$I_{fs-proj-11h} = 36,134 A$ $I_{fc-proj-11h} = 57,845 A$	38,5%	61,5%
4	$I_{fs-proj-11h} = -21,960 A$ $I_{fc-proj-11h} = 47,246 A$	31,7%	68,3%
5	$I_{fs-proj-11h} = 142,301 A$ $I_{fc-proj-11h} = 197,868 A$	38,2%	61,8%
6	$I_{fs-proj-11h} = 11,809 A$ $I_{fc-proj-11h} = 16,279 A$	42,0%	58,0%

A Tabela 5.19 apresenta uma síntese dos resultados obtidos e suas correlações com as grandezas esperadas.

Tabela 5.19 – Quadro síntese dos percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor e respectivas correlações com os valores esperados.

Referência	Parcelas de Responsabilidade					
	Supridor			Consumidor		
	5h	7h	11h	5h	7h	11h
Valores Esperados	81,5%	56,8%	41,8%	18,5%	43,2%	58,2%
Caso 1	80,9%	-	-	19,1%	-	-
Caso 2	-	54,1%	-	-	45,9%	-
Caso 3	-	-	38,5%	-	-	61,5%
Caso 4	78,4%	3,4%	31,7%	21,6%	96,6%	68,3%
Caso 5	78,9%	13,0%	38,2%	21,1%	87,0%	61,8%
Caso 6	77,4%	1,3%	42,0%	22,6%	98,7%	58,0%

De forma complementar, a Tabela 5.20 fornece as tensões harmônicas no PAC para os casos avaliados (com a inserção do filtro). Tais informações complementares foram adicionadas com vistas a evidenciar os impactos da inserção de um e outro filtro sobre as distorções naquela barra, mostrando, assim, qualquer efeito colateral na forma de amplificações para outras ordens harmônicas que não a de sintonia. Estas preocupações podem ser verificadas em diversos trabalhos da literatura especializada [39,50].

Tabela 5.20 – Distorções harmônicas individuais de tensão verificadas com e sem conexão do filtro na barra analisada.

Referência	Distorções Individuais de Tensões		
	<i>DIT_{5h}</i> (%)	<i>DIT_{7h}</i> (%)	<i>DIT_{11h}</i> (%)
Sem Filtro	8,87%	5,03%	4,75%
Com Filtro – Caso 1	1,91%	3,37%	3,71%
Com Filtro – Caso 2	12,28%	0,85%	2,79%
Com Filtro – Caso 3	11,33%	7,26%	0,58%
Com Filtro – Caso 4	5,01%	3,29%	3,53%
Com Filtro – Caso 5	4,39%	3,48%	3,63%
Com Filtro – Caso 6	5,29%	3,25%	3,53%

Por último, foram realizados, também de forma complementar, estudos avaliativos com dispositivos de filtragem contendo banco de capacitores constituídos por unidades que

perfazem uma compensação capacitiva em proporções inferiores àquela inicialmente adotada. Muito embora vários estudos tenham sido realizados, a Tabela 5.21, apresenta os resultados de compartilhamento para o caso em que a potência do banco de capacitores, constituinte do filtro, apresenta-se com apenas 10% do valor necessário para uma compensação total da potência reativa exigida pela carga, ou seja, o banco de capacitores que caracteriza o filtro se apresenta com potência de 0,5 MVar.

Tabela 5.21 – Percentuais de responsabilidades entre o sistema supridor e o consumidor e respectivas correlações com os valores esperados – banco de capacitores de 10% da potência reativa da carga.

Referência	Parcelas de Responsabilidade					
	Supridor			Consumidor		
	5h	7h	11h	5h	7h	11h
Valores Esperados	81,5%	56,8%	41,8%	18,5%	43,2%	58,2%
Caso 1	80,7%	-	-	19,3%	-	-
Caso 2	-	53,6%	-	-	46,4%	-
Caso 3	-	-	41,7%	-	-	58,3%
Caso 4	58,8%	46,1%	48,4%	41,2%	53,9%	51,6%
Caso 5	55,9%	46,7%	48,6%	44,1%	53,3%	51,4%
Caso 6	67,1%	46,0%	48,4%	32,9%	54,0%	51,6%

Resumindo, os estudos aqui descritos evidenciaram que:

- Para efeito do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas avaliadas, os filtros sintonizados se apresentaram com melhor eficiência e desempenho, conduzindo a resultados com baixos níveis de discrepâncias quando comparados aos valores esperados, ou gabaritos. Tais considerações foram evidenciadas independentemente da potência do banco de capacitores utilizado no dispositivo de filtragem, conforme pode ser observado através dos desempenhos numéricos expressos nas Tabelas 5.19 e 5.21;
- Os filtros amortecidos se apresentaram com maiores erros de atribuição de responsabilidades, todavia há de se considerar que, quando do uso de banco de

capacitores de maior potência, as discrepâncias encontradas para o compartilhamento de 5ª e 11ª ordem se mostraram, de uma forma geral, dentro de níveis aceitáveis. Isto se deve ao fato de que os filtros amortecidos, neste primeiro momento, apresentaram uma baixa magnitude de impedância na ordem 5, enquanto que na 11ª ordem, apesar da impedância do filtro não ser tão reduzida, verifica-se uma elevação considerável da impedância do sistema, tornando-se, assim, o dispositivo de filtragem dominante;

- Complementarmente à avaliação anterior dos filtros amortecidos, vale destacar que, quando da utilização de menor potência para os bancos de capacitores atrelados aos arranjos de filtragem, observou-se, de forma geral, uma maior magnitude da impedância equivalente de tal circuito de filtragem, levando, conseqüentemente, maiores discrepâncias em relação aos valores esperados;
- Não obstante aos resultados satisfatórios relacionados com os filtros sintonizados, vale ressaltar que tais dispositivos, quando empregados em ordens harmônicas superiores, podem causar elevação dos níveis de distorção de níveis inferiores, conforme pode ser observado para os casos 2 e 3 indicados na Tabela 5.20. Por isso, pesquisas no sentido de se obter um arranjo ótimo, ou mesmo, uma forma mais eficaz para a minimização destas amplificações se fazem ainda necessárias.

5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo foi voltado para estudos relacionados com as diferentes estratégias para obtenção da impedância harmônica dominante a ser conectada ao barramento PAC.

Num primeiro momento foram tecidas considerações diversas sobre as principais topologias de filtragem, seus arranjos elétricos, formulações matemáticas visando à obtenção

de suas características para a impedância $\hat{Z}_f(\omega)$, aplicações e limitações. Como ressaltado no texto, duas grandes filosofias de filtragem foram contempladas, uma primeira baseada no emprego de filtros sintonizados, e outra, atrelada com os denominados filtros amortecidos ou passa alta. Ambos os princípios estruturais foram considerados para fins dos estudos avaliativos aqui feitos.

No que tange aos princípios para a parametrização dos filtros, um dos alicerces utilizado foi apoiado no fato que a unidade capacitiva seria empregada para fins de uma compensação total da potência reativa exigida pela carga. Não obstante a isto, estudos posteriores evidenciaram que o emprego de outros fundamentos, a exemplo de potências capacitivas reduzidas oferecem propriedades similares, o que reduziria consideravelmente o porte da denominada impedância dominante requerida pelo Método da Superposição Modificado.

Quanto aos sistemas elétricos adotados para os estudos, ambos foram hipotéticos visto que apenas trabalhos investigativos de cunho computacional foram feitos. O primeiro arranjo primou por grande simplicidade em sua topologia pois, assim agindo, as interpretações dos desempenhos do processo como um todo foram transmitidas. Por outro lado, visando à extensão dos trabalhos para um complexo elétrico de maior identidade com as redes de distribuição em operação, os trabalhos foram complementados através do emprego de uma rede elétrica constituída por 14 barramentos, cuja composição e parametrização encontram-se em total consonância com o sistema IEEE de 14 barras.

Para ambos os arranjos, os resultados obtidos não se mostraram divergentes, havendo, de fato, extrema similaridade entre os desempenhos obtidos quanto à eficácia do processo proposta por esta tese, não obstante às observações feitas ao longo do texto.

Os resultados das avaliações computacionais realizadas, respeitadas as condições impostas pelos estudos, apontaram para o fato que os filtros sintonizados se apresentam como

a mais eficiente estratégia para obtenção da impedância dominante necessária à aplicação do Método da Superposição Modificado. Apesar de estes desempenhos serem bastante encorajadores, vale destacar que pesquisas complementares se fazem ainda necessárias, haja vista, os efeitos colaterais da conexão de filtros sintonizados nas instalações elétricas, principalmente quando estes são sintonizados em frequências superiores à 5ª ordem harmônica, bem como os custos das unidades de filtragem, os meios para a obtenção de distintas frequências de sintonia, os protocolos para medição, etc.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

Esta tese, num primeiro momento, procurou explorar, sob o ponto de vista da fundamentação, aplicabilidade e consistência de resultados, um dos mais simples e difundidos mecanismos para a determinação da fonte dominante das distorções harmônicas, qual seja, o método do fluxo da potência harmônica. Esta investigação se fez necessária diante do fato que, embora esta estratégia não permita a divisão das responsabilidades entre os agentes, ao menos, como se proclama, tornaria factível a atribuição da responsabilidade dominante sobre os fenômenos atrelados com as distorções harmônicas. Esta afirmativa fica ainda fortalecida pela grande difusão deste mecanismo, visto que as grandezas utilizadas para tal fim se encontram prontamente disponibilizadas por uma boa parte dos equipamentos de medição de indicadores de qualidade da energia encontrados no mercado.

Visando constatar a eficácia deste procedimento, foram realizados os devidos desenvolvimentos matemáticos que sustentam a metodologia, assim como também estabelecida a fundamentação sobre o emprego da potência harmônica ativa como meio para o atendimento à questão em pauta. Somado às considerações teóricas, os trabalhos prosseguiram através da definição e avaliação crítica dos resultados obtidos para um sistema elétrico hipotético, o qual foi modelado através do simulador ATP.

Os resultados das investigações quanto à aplicação desta proposta de identificação de responsabilidades sobre as distorções harmônicas apontaram para a seguinte constatação: o método sob análise não possui a necessária confiabilidade para a determinação da fonte predominante das distorções harmônicas, isto é, se a maior contribuição é advinda do supridor ou do consumidor. Diante do exposto, este trabalho indicou, de forma clara e inequívoca, a fragilidade da metodologia do fluxo de potência harmônica com vistas à determinação da fonte harmônica dominante, evidenciando, deste modo, que grandes esforços deveriam ainda ser realizados para se atingir procedimentos que conduzam a uma adequada identificação das responsabilidades sobre as distorções harmônicas.

Num segundo momento, os trabalhos avançaram no sentido de apresentar, avaliar e discutir o método da superposição, o qual se apresenta como um dos mais difundidos e promissores procedimentos voltados ao compartilhamento de responsabilidades. Os estudos contemplados, além de apresentarem uma síntese dos processos existentes, primaram pelo estabelecimento de um arranjo elétrico hipotético para o estudo de desempenho da metodologia em foco. Os resultados obtidos, como esclarecido no Capítulo II, ratificaram as críticas sobre o fato que o emprego da superposição de correntes para os fins esperados se mostra inadequado. No entanto, quando a análise feita foi alicerçada nas contribuições das tensões harmônicas, constatou-se uma boa correlação entre os desempenhos esperados e obtidos.

À luz dos resultados obtidos pôde-se constatar que, muito embora a praticidade e simplicidade dos procedimentos estabelecidos na metodologia da superposição, a utilização da mesma encontra grandes barreiras quando da caracterização e obtenção dos parâmetros representativos das impedâncias harmônicas equivalentes dos agentes envolvidos, conforme ressaltado no texto. De fato, estas observações corroboradas com conclusões advindas de outros trabalhos, evidenciaram que as imprecisões vinculadas às impedâncias equivalentes

conduzem a erros bastante significativos para os resultados de compartilhamento, fato este que determina, para muitos casos, uma ineficácia do processo, nos termos propostos pela literatura para os objetivos almejados. Diante disto, o Capítulo III foi centrado na busca de uma alternativa para contornar os problemas aqui apontados, o que orientou para uma sistemática que conduzisse a um mecanismo de cálculo para o qual as impedâncias do supridor e do consumidor passassem a ter um papel secundário no processo. Neste sentido surgiu a ideia da utilização, junto ao ponto de acoplamento entre a fonte e a carga, de uma impedância dominante sobre as demais, fato este que originou a inserção de um filtro sintonizado (ou outro), o qual, uma vez anexado ao arranjo sob análise, proporcionou meios para se atingir as parcelas de responsabilidades entre as partes. Para ilustrar a aplicação da proposta, através de um arranjo elétrico hipotético, procedeu-se a aplicação do processo, num primeiro momento, via simulações computacionais, a qual revelou uma boa correlação entre os resultados esperados e obtidos, ratificando, assim, que o Método da Superposição Modificado apresenta um desempenho apropriado ao processo do compartilhamento das responsabilidades entre as partes.

Em seguida, no Capítulo IV, o Método da Superposição Modificado, fruto desta pesquisa de doutorado, foi avaliado, via aplicação laboratorial, quanto a sua adequação aos propósitos do compartilhamento de responsabilidades entre dois agentes envolvidos e responsáveis pela produção, junto ao correspondente PAC, de uma dada distorção harmônica. Para se atingir tal meta, foi então estabelecido um processo comparativo entre os resultados extraídos de experimentos e os valores esperados. Estes últimos foram obtidos através da aplicação do método da superposição tradicional, visto que todas as informações necessárias se faziam conhecidas. Também, as investigações realizadas num ambiente laboratorial controlado permitiu um conjunto de estudos, em que pese a definição da origem e do nível de contribuição atrelado com o supridor e o consumidor.

Neste cenário, dentre uma diversidade de avaliações feitas, para fins deste trabalho foram selecionadas quatro situações, a saber: consumidor fortemente predominante quanto à responsabilidade sobre a geração de tensão de 3ª ordem; consumidor com uma discreta predominância sobre a mencionada distorção; inversão da responsabilidade através de uma discreta predominância do supridor sobre a distorção em questão e; por fim, uma situação tal que o supridor se apresenta com quase totalidade da responsabilidade sobre a distorção de 3ª harmônica da tensão do PAC.

Neste contexto, cabe reconhecer que os desempenhos obtidos, quer pelos experimentos e respectivas medições, quer pela aplicação da metodologia desenvolvida, se mostraram bastante consistentes e encorajadores. Estas primeiras constatações permitem pois afirmar que o Método da Superposição Modificado, efetivamente, se apresenta como um procedimento sólido para as determinações dos níveis de responsabilidades entre as partes envolvidas num determinado PAC. De fato, os resultados advindos dos trabalhos aqui relatados conduziram a indicadores numéricos percentuais das parcelas de responsabilidades entre as partes, os quais, até então, não tinham sido apontados de forma prática e segura pela literatura encontrada.

No Capítulo V as investigações voltaram-se para fundamentação e análise da consistência dos procedimentos a serem empregados para fins da obtenção da denominada impedância dominante. Num primeiro momento foram tecidas considerações diversas sobre as principais topologias de filtragem, seus arranjos elétricos, formulações matemáticas visando à obtenção de suas características para a impedância $Z(\omega)$, aplicações e limitações. No que tange aos princípios para a parametrização dos filtros, um dos alicerces utilizado foi apoiado no fato que a unidade capacitiva seria empregada para fins de uma compensação total da potência reativa exigida pela carga. Não obstante a isto, estudos posteriores evidenciaram que o emprego de outros fundamentos, a exemplo de potências capacitivas reduzidas, também

conduziram à propriedades similares quanto ao efeito final desejado. Naturalmente, assim procedendo haverá, por conseguinte, uma redução do porte e custos da denominada impedância dominante requerida pelo Método da Superposição Modificado.

Quanto aos trabalhos de avaliação de desempenho das estruturas selecionadas para a caracterização das impedâncias dominantes, estes foram realizados tomando-se por base dois sistemas elétricos para a realização das investigações computacionais. O primeiro arranjo primou por grande simplicidade em sua topologia pois, assim agindo, as interpretações dos desempenhos do processo como um todo foi facilmente transmitida. Por outro lado, visando à extensão dos trabalhos para um complexo elétrico de maior identidade com as redes de distribuição em operação, os trabalhos foram complementados através do emprego de uma rede elétrica constituída por 14 barramentos, cuja composição e parametrização encontram-se em total consonância com o sistema IEEE de 14 barras. Para ambos os arranjos, os resultados obtidos não se mostraram divergentes, havendo, de fato, extrema similaridade entre os desempenhos obtidos quanto à eficácia do processo proposto por esta tese, não obstante às observações feitas ao longo do texto.

Os resultados das avaliações computacionais realizadas, respeitadas as condições impostas pelos estudos, apontaram para o fato que os filtros sintonizados se apresentam, numa primeira avaliação, como a mais eficiente estratégia para obtenção da impedância dominante necessária à aplicação do Método da Superposição Modificado. Apesar dos resultados terem demonstrado reconhecida eficácia aos propósitos estabelecidos e, por conseguinte, serem bastante encorajadores, vale destacar que pesquisas complementares se fazem ainda necessárias, haja vista, os efeitos colaterais da conexão de filtros sintonizados nas instalações elétricas, principalmente quando estes são sintonizados em frequências superiores à 5ª ordem harmônica, os custos das unidades de filtragem, os meios para a obtenção de distintas frequências de sintonia, os protocolos para medição, etc.

Dentro das perspectivas supra ressaltadas vale, por fim, destacar que o tema não se encontra esgotado, como seria esperado, e, diante deste fato, trabalhos posteriores deverão, certamente, ainda se apresentar como temas motivadores para as ações a serem desenvolvidas até a consolidação dos procedimentos destinados ao processo da atribuição das responsabilidades entre os agentes envolvidos num determinado PAC. Dentre alguns tópicos considerados relevantes ressaltam-se:

- Otimização operacional e financeira voltada para a definição do dispositivo destinado a suprir os requisitos impostos pelo Método da Superposição Modificado, a saber: a impedância dominante;
- Construção de protótipos de estruturas para a obtenção da impedância dominante e utilização laboratorial para fins de validação das estratégias a serem propostas;
- Estabelecimento de protocolos destinados ao processo avaliativo em consonância com a dinâmica operacional dos complexos elétricos;
- Aplicação do processo em campo, em que pese distintas situações envolvendo supridores e consumidores.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DUGAN, R. C. et al. **Electrical power systems quality**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [2] KERCHNER, R. M., CORCORAN, G. F.. **Circuitos de corrente alternada**. 3. ed. Porto Alegre: Globo, 1977.
- [3] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Brasília, 2010.
- [4] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **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**. Rio de Janeiro, 2010.
- [5] IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61000-3-6 – Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3: Limits - Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems - Basic EMC publication**. Paris, 1996.

- [6] IEEE – INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Std. 519-1992 – IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**. New York, 1992.
- [7] EMANUEL, A. E.. Harmonic cost allocation: a difficult task. In: IEEE POWER ENG. SOC. SUMMER MEET. v. 1, p. 333-338, 1999.
- [8] TANAK, T.; AKAGI, H.. 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.
- [9] SWART, P. H.; CASE, M. J.; WYK, J. D. Van. On techniques for localization of sources producing distortion in three-phase networks. **Eur. Trans. Elect. Power**, v. 6, n. 6, p. 391-396, 1996.
- [10] CRISTALDI, L.; FERRERO, A.. 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.
- [11] LIN, W. M.; LIN, C. H.; TU, K. P.; WU, C. H.. Multiple harmonic source detection and equipment identification with cascade correlation network. **IEEE Trans. Power Del.**, v. 20, n. 3, p. 2166-2173, 2005.
- [12] LEIRIA, A.; MORCHED, A.; BARROS, M. T. C.. Identification of harmonic content and their origin in power networks. In: IEEE BOLOGNA POWERTECH CONFERENCE, 2003.
- [13] AZOUAOU, R.; RABAHALLAH, S.; LEUIMI, S.. Study of the direction of the harmonic injections in the electrical power systems. In: UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE, 2004. p. 944-947.
- [14] XU, W.; LIU, X.; LIU, Y.. 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.

- [15] XU, W.; LIU, Y.. 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.
- [16] XU, W.; LIU, Y.. 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.
- [17] SILVA, S. F. P.; OLIVEIRA, J. C.. 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.
- [18] COSTA, F. H.; SANTOS, I. N.; SILVA, S. F. P.; OLIVEIRA, J. C.. 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.
- [19] OLIVEIRA, A.; OLIVEIRA, J. C.; RESENDE, J. W.; MISKULIN, M. S.. Practical approaches for AC system harmonic impedance measurements. **IEEE Trans. Power Del.**, v. 6, n. 4, p. 1721-1726, 1991.
- [20] GIRGIS, A. A.; MCMANIS, R. B.. 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.
- [21] XU, W.; AHMED, E. E.; ZHANG, X.; LIU, X.. Measurement of network harmonic impedances: practical implementation issues and their solutions. **IEEE Trans. Power Del.**, v. 17, n. 1, p. 210-216, 2002.
- [22] WANG, W.; NINO, E. E.; XU, W.. Harmonic impedance measurement using a thyristor-controlled short circuit. **IET Generation, Transmission and Distribution**, v. 1, n. 5, p. 707-713, 2007.
- [23] COSTA, F. H.. **Uma contribuição à avaliação de desempenho dos principais métodos para a modelagem de cargas nos estudos do compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas**. 2009. 84 f. Dissertação (Mestrado) – UFU, Uberlândia, 2009.

- [24] COSTA, F. H.; OLIVEIRA, J. C.; SANTOS, I. N.. Avaliação do desempenho das metodologias para a representação de consumidores visando o compartilhamento das distorções harmônicas. In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, Blumenau, 2009.
- [25] SRINIVASAN, K.. On separating customer and supply side harmonic contributions. **IEEE Trans. Power Del.**, v. 11, n. 2, p. 1003-1012, 1996.
- [26] SRINIVASAN, K.; JUTRAS, R.. Conforming and non-conforming current for attributing steady state power quality problems. **IEEE Trans. Power Del.**, v. 13, n. 1, p. 212-217, 1998.
- [27] MOUSTAFA, A. A.; MOUSSA, A. M.; EL-GAMMAL, M. A.. Separation of customer and supply harmonics in electrical power distribution systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER, Orlando, 2000.
- [28] PERETTO, L.; SASDELLI, R.; TINARELLI, R.. A statistical model for estimating the trend of electrical quantities in power systems. **IEEE Trans. Instrumentation and Measurement**, v. 52, n. 4, p. 1143-1147, 2003.
- [29] HARTANA, R. K.; RICHARDS, G. G.. Harmonic source monitoring and identification using neural networks. **IEEE Trans. Power Del.**, v. 5, n. 4, p. 1098-1104, 1990.
- [30] MAZUMDAR, J.; HARLEY, R. G.; LAMBERT, F.. System and method for determining harmonic contributions from non-linear loads using recurrent neural networks. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS, Montreal, 2005.
- [31] SRINIVASAN, D.; NG, W. S.; LIEW, A. C.. Neural-network-based signature recognition for harmonic source identification. **IEEE Trans. Power Del.**, v. 21, n. 1, p. 398-405, 2006.

- [32] MAZUMDAR, J. 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.
- [33] MA, H.; GIRGIS, Adly A.. 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.
- [34] YU, Kent K. C.; WATSON, N. R.; ARRILLAGA, J.. An adaptive Kalman filter dynamic harmonic state estimation and harmonic injection tracking. **IEEE Trans. Power Del.**, v. 20, n. 2, p. 1577-1584, 2005.
- [35] NAIDU, S. R. et al. Contribuições da distorção harmônica de tensão entre concessionária e consumidor. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, Campina Grande, 2006.
- [36] SANTOS, Ivan N.. **Uma contribuição à avaliação de desempenho dos principais métodos para a atribuição de responsabilidades sobre as distorções harmônicas**. 2007. 81 f. Dissertação (Mestrado) - UFU, Uberlândia, 2007.
- [37] SILVA, Sérgio F. P.. **Uma proposta para o compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas**. 2007. 179 f. Tese (Doutorado) - UFU, Uberlândia, 2007.
- [38] AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M.. **Instantaneous power theory and applications to power conditioning**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.
- [39] ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R.. **Power system harmonics**. 2. ed. England: John Wiley & Sons, 2003.
- [40] IEEE – INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Std. 1459-2010 – IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions**. New York, 2010.

- [41] DAS, J. C.. **Power system analysis: short-circuit load flow and harmonics**. New York: Marcel Dekker, 2002.
- [42] CARAMIA, P., CARPINELLI, G., VERDE, P.. **Power quality indices in liberalized markets**, 1. ed., England: Wiley, 2009.
- [43] DAS, J. C.. Passive filters – potentialities and limitations. **IEEE Trans. Industry Applications**, v. 40, n. 1, p. 232-241, 2004.
- [44] Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks. Part 1: concepts, models, and simulation techniques. – Task Force on Harmonics Modeling and Simulation. **IEEE Trans. Power Del.**, v. 11, n. 1, p. 452-465, 1996.
- [45] Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks. Part 2: sample systems and examples. – Task Force on Harmonics Modeling and Simulation. **IEEE Trans. Power Del.**, v. 11, n. 1, p. 466-474, 1996.
- [46] BUDAK, A.. **Circuit theory fundamentals and applications**, USA: Prentice Hall, 1978.
- [47] ALVES, Antônio C. B.. **Análise de problemas e procedimentos na determinação de filtros harmônicos**. 1991. 416 f. Dissertação (Mestrado) - UFU, Uberlândia, 1991.
- [48] KIMBARK, E. W.. **Direct current transmission**, vol. 1, USA: Wiley-Interscience, 1971.
- [49] STANLEY, C. H., PRICE, J. J., BREWER, G. L.. Design and performance of AC filters for 12-pulse HVDC schemes. **IEE Conf. Publ.**, n. 154, p. 158-161, 1971.
- [50] NASCIMENTO, Rogério P.. **Propostas de procedimentos para projetar filtros harmônicos a partir de um programa de penetração harmônica, incluindo cálculos de desempenho e de suportabilidade**. 2007. 238 f. Dissertação (Mestrado) - UFU, Uberlândia, 2007.

- [51] CONEJO, A. J., GALIANA, F. D., KOCKAR, I.. Z-Bus loss allocation. **IEEE Trans. Power Systems**, v. 16, n. 1, p. 105-110, 2001.
- [52] CAÑIZARES, C. A., KODSI, S. K. M.. Modeling and simulation of IEEE 14 bus system with FACTS controllers. **IEEE Technical Report**, 2003.
- [53] IYAMBO, P. K., TZONEVA, R.. Transient stability analysis of the IEEE 14-bus electric power system. In: AFRICON 2007, Windhoek, 2007.
- [54] MENDES, Willians R.. **Influência das conexões dos transformadores de potência na propagação dos afundamentos de tensão pelo sistema elétrico**. 2008. 152 f. Dissertação (Mestrado) - UFU, Uberlândia, 2008.
- [55] FARHOODNEA, M., MOHAMED, A., HUSSAIN, S.. **Harmonic source localization in power systems**, USA: Lambert Academic Publishing, 2011.