



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ANDRÉIA CRICO DOS SANTOS

**COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES HARMÔNICAS: ANÁLISES,
CONTRIBUIÇÕES E PROPOSIÇÕES**

UBERLÂNDIA

2019

ANDRÉIA CRICO DOS SANTOS

**COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES HARMÔNICAS: ANÁLISES,
CONTRIBUIÇÕES E PROPOSIÇÕES**

Tese de doutorado apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Ciências, área de concentração: Engenharia Elétrica.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Ivan Nunes Santos, orientador – UFU

Prof. Dr. José Carlos de Oliveira – UFU

Prof. Dr. José Wilson Resende – UFU

Prof. Dr.^a Maria Emília de Lima Tostes – UFPA

Prof. Dr. Mário Oleskovicz – USP

UBERLÂNDIA

2019

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

S237 Santos, Andréia Crico dos, 1991-
2019 Compartilhamento de responsabilidades harmônicas: análises,
contribuições e proposições [recurso eletrônico] / Andréia Crico
dos Santos. - 2019.

Orientador: Ivan Nunes Santos.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-
graduação em Engenharia Elétrica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2445>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia elétrica. I. Santos, Ivan Nunes, 1979-, (Orient.).
II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em
Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

ANDRÉIA CRICO DOS SANTOS

**COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES HARMÔNICAS: ANÁLISES,
CONTRIBUIÇÕES E PROPOSIÇÕES**

Tese de doutorado apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Ciências, área de concentração: Engenharia Elétrica.

Prof. Ivan Nunes Santos
Orientador

Prof. José Roberto Camacho
Coordenador da Pós-Graduação



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, 248, COPEL				
Data:	18/10/2019	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	12:00
Matrícula do Discente:	11513EEL008				
Nome do Discente:	Andréia Crico dos Santos				
Título do Trabalho:	Compartilhamento de responsabilidades harmônicas: análises, contribuições e proposições.				
Área de concentração:	Sistemas de Energia Elétrica				
Linha de pesquisa:	Qualidade e racionalização da energia elétrica				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Programa: ENGENHARIA ELÉTRICA (32006012001P9). Nome: COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES SOBRE AS DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM UM PONTO DE CONEXÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA. Data de Início: 01/01/2014. Natureza do Projeto: PESQUISA. Situação do Projeto: EM ANDAMENTO.				

Reuniu-se no Anfiteatro 1E, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: José Carlos de Oliveira - FEELT/UFU; José Wilson Resende - FEELT/UFU; Maria Emília de Lima Tostes - UFPA; Mário Oleskovicz - USP-EESC; Ivan Nunes Santos- FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Ivan Nunes Santos, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.

Documento assinado eletronicamente por **Ivan Nunes Santos, Professor(a) do Magistério Superior,**



em 21/10/2019, às 15:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Wilson Resende, Usuário Externo**, em 22/10/2019, às 08:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mario Oleskovicz, Usuário Externo**, em 22/10/2019, às 11:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Emília de Lima Tostes, Usuário Externo**, em 22/10/2019, às 11:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSE CARLOS DE OLIVEIRA, Usuário Externo**, em 23/10/2019, às 11:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1634764** e o código CRC **963B74A5**.

Dedico esse trabalho à minha querida vovó Anna, por todo amor, atenção, incentivo, torcida, dedicação e cuidados dedicados a mim, ao longo de toda a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida! Obrigada, meu Pai, por me acompanhar, proteger, abençoar e conceder boa saúde e força. Ao Senhor todo louvor e glória para sempre!

Agradeço ao meu orientador, professor Ivan, pela constante disposição em me auxiliar e pelas contribuições essenciais para o desenvolvimento de todas as etapas da tese. Sou grata também ao professor José Carlos, por seus ensinamentos, colaborações e por despertar em mim o entusiasmo com o tema do trabalho. Estendo o meu agradecimento a todos os professores que tive ao longo da vida, pois eles foram fundamentais no caminho que trilhei até chegar aqui.

Expresso, com muito amor, minha eterna gratidão aos meus pais, Lucília e Carlos, e à minha vovó Anna. Obrigada por todo carinho, dedicação, presença, incentivo, bons conselhos, por serem minha fonte de inspiração e por nunca terem poupado esforços para me fazer todo tipo de bem. Agradeço também ao meu querido irmão e amigo Carlos Júnior, dono de um coração bondoso e alegre, sua amizade me anima e me ajuda a perseverar.

Registro meu especial agradecimento ao meu amado noivo Thales, sempre tão afetuoso, atencioso e paciente. Sou grata por constantemente estar pronto para me ouvir e disposto a fazer o que tiver ao seu alcance para me ajudar. Muito obrigada por superar comigo os momentos desafiadores, e por tornar os momentos felizes ainda melhores.

Aos familiares e amigos, gratidão pela torcida, orações, palavras de apoio e gestos de companheirismo. As boas experiências compartilhadas com vocês tornam a caminhada mais leve e agradável. Obrigada aos meus gatinhos Félix, Frederico e Felisberto por encherem de fofura os meus dias e ajudarem a aliviar o cansaço da jornada.

Agradeço também a todos os companheiros do laboratório de Qualidade da Energia Elétrica, pela boa convivência e partilha de aprendizados. Obrigada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica pela oportunidade e a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Expresso ainda meus agradecimentos ao projeto de P&D ANEEL 7284-0001/2016 que teve importância relevante para o desenvolvimento desta tese, sobretudo no que se refere à obtenção da estrutura laboratorial para a realização dos ensaios práticos. Por fim, agradeço à Universidade Federal de Uberlândia por ter me acolhido nos últimos dez anos, os quais envolveram a realização da minha graduação, mestrado e doutorado. Sinto sincera gratidão por todas as experiências vivenciadas, que foram decisivas para o meu crescimento pessoal e profissional.

*“Eu, porém, sempre em vós confiarei, sempre
mais aumentarei vosso louvor!
Minha boca anunciará todos os dias vossa
justiça e vossas graças incontáveis.
Cantarei vossos portentos, ó Senhor, lembrarei
vossa justiça sem igual!”*

(Salmo 70, 14-16)

COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES HARMÔNICAS: PROPOSIÇÕES, ANÁLISES E CONTRIBUIÇÕES

Diante da intensificação da presença de elementos não lineares conectados aos sistemas elétricos, em nível de geração, transmissão e distribuição, novos desafios surgem quando se pensa na melhor maneira de gerir os níveis de distorções a patamares seguros. Na literatura nota-se a presença de lacunas desafiadoras no contexto do estabelecimento de um meio notadamente confiável, robusto e prático, para o compartilhamento de responsabilidades entre as partes que contribuem para as distorções constatadas em determinado barramento.

O presente trabalho se propõe a contribuir para avanços nesse campo de investigações. Inicialmente, busca-se a consolidação de uma metodologia já existente, baseada na utilização de impedâncias dominantes para a obtenção do compartilhamento. A partir de minuciosas análises conclusões favoráveis são obtidas, as quais direcionam a aplicação segura e eficaz do processo.

Como proposições inéditas, duas outras metodologias voltadas ao compartilhamento são apresentadas: uma com base na injeção de correntes harmônicas, e outra fundamentada na utilização de chaveamento de capacitores. Tais procedimentos envolvem a realização de intervenções e medições no ponto de interesse para a atribuição de responsabilidades.

Ao reconhecer como uma proposta relevante a possibilidade de efetuar ações em uma barra do sistema e obter os percentuais de compartilhamento em outro ponto, este trabalho ainda propõe os aqui denominados métodos para extrapolação do compartilhamento. Dentro deste propósito, são desenvolvidos procedimentos que utilizam, novamente, as filosofias de conexão de impedâncias dominantes, injeção de correntes harmônicas e chaveamento de capacitores.

Para sustentar as proposições realizadas, os fundamentos teóricos de todas as metodologias são descritos, e as mesmas são submetidas a testes de desempenho em termos de simulações computacionais e ensaios laboratoriais. Os resultados obtidos são promissores e, assim, considera-se que as proposições apresentam potencial de contribuir efetivamente para os avanços científicos no tema compartilhamento de responsabilidades harmônicas.

Palavras-chave: chaveamento de capacitores, compartilhamento de responsabilidades, distorções harmônicas, impedância dominante, injeção de correntes, qualidade da energia.

ABSTRACT

SHARING OF HARMONIC RESPONSIBILITIES: PROPOSITIONS, ANALYSES AND CONTRIBUTIONS

Faced with the intensification of nonlinear elements connected to electric systems, at generation, transmission and distribution levels, new challenges emerge when one thinks about the best way to manage distortions to safe levels. In the literature there are challenging gaps in the context of establishing a reliable, robust and practical method for sharing of responsibilities between the parties that contribute to the distortions found in a particular bus.

The present work intends to contribute to advances in this field of investigations. Initially, it seeks to consolidate an existing methodology, based on the use of dominant impedances to obtain the sharing of responsibilities. About this topic, definitive conclusions are obtained from detailed analyzes and this allows the safe and effective application of the process.

As original propositions, two other methodologies focused on harmonic sharing are presented: one based on the injection of harmonic currents, and another based on the use of capacitor switching. Such procedures involve interventions and measurements at the point of interest for the assignment of responsibilities.

By recognizing as a relevant proposal the possibility of performing actions in a certain bus and obtaining the responsibility percentages in another point, this work still proposes the methods for extrapolation of harmonic sharing. Within this purpose, procedures are developed, using again the philosophies of connection of dominant impedances, injection of harmonic currents and switching of capacitors.

To support the propositions made, the theoretical foundations of all methodologies are described, and they are subjected to performance tests in terms of computational simulations and laboratory tests. The results obtained are promising and, thus, the propositions present the potential to contribute effectively to the scientific advances in the theme sharing of harmonic responsibilities.

Keywords: current injection, dominant impedance, harmonic distortion, power quality, sharing of responsibility, switching of capacitors.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Esquema sintetizador sobre as metodologias abordadas no trabalho.....	45
Figura 2.1 – Composição do levantamento bibliográfico por natureza da referência.....	61
Figura 2.2 – Composição do levantamento bibliográfico por assunto.	62
Figura 3.1 – Arranjo representativo de um ponto de acoplamento entre concessionária e consumidor.....	64
Figura 3.2 – Circuito equivalente de Norton evidenciando as grandezas envolvidas na problemática.....	65
Figura 3.3 – Arranjo evidenciando a inserção de uma impedância dominante no PAC.	67
Figura 3.4 – Circuito equivalente de Norton considerando a contribuição apenas do sistema supridor.	67
Figura 3.5 – Circuito equivalente de Norton considerando a contribuição apenas do consumidor.....	67
Figura 3.6 – Projeção de fasores sobre a corrente total que flui pela impedância dominante para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas.	68
Figura 3.7 – Arranjo do filtro passivo sintonizado em uma frequência.	71
Figura 3.8 – Comportamento do módulo da impedância do filtro para diferentes valores de fator de qualidade. Em azul: $Q = 20$, em magenta: $Q = 40$, em verde: $Q = 60$, em vermelho: $Q = 80$, em amarelo: $Q = 100$ e em preto: $Q = 120$	72
Figura 3.9 – Comportamento do módulo da impedância do filtro para diferentes sintonias. Em vermelho: sintonia na ordem 4,7; em azul: sintonia na ordem 5.	74
Figura 3.10 – Circuito equivalente de Norton do sistema teste.....	75
Figura 3.11 – Comportamento do módulo da impedância vista da barra do PAC, em função da frequência, sem a presença de qualquer impedância dominante.	83
Figura 3.12 – Circuito equivalente de um sistema onde se pretende aplicar o método da Impedância Dominante.	84
Figura 3.13 – Esquema genérico do sistema elétrico estudado em simulação.	90
Figura 3.14 – Esquema representativo da aplicação do MID para o compartilhamento da indústria 1.....	92
Figura 3.15 – Capacitores usados para a constituição das impedâncias dominantes.	97

Figura 3.16 – Indutores de núcleo de ar usados para a constituição das impedâncias dominantes.....	98
Figura 3.17 – Impedâncias dominantes usadas para aplicação do MID em laboratório.....	99
Figura 3.18 – Circuito equivalente de Norton evidenciando as grandezas envolvidas na problemática.	106
Figura 3.19 – Circuito evidenciando o transformador de entrada na instalação do consumidor.	106
Figura 3.20 – Circuito equivalente de Norton das partes envolvidas com relação ao PM. ...	107
Figura 3.21 – Grandezas que devem ser mensuradas para aplicação do EMID – condição 1.....	108
Figura 3.22 – Grandezas que devem ser mensuradas para aplicação do EMID – condição 2.....	108
Figura 3.23 – Projeção de fasores para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas.	111
Figura 3.24 – Esquema representativo da aplicação da EMID para o compartilhamento da indústria 1.....	112
Figura 4.1 – Circuito equivalente de Norton evidenciando as grandezas envolvidas na problemática.	121
Figura 4.2 – Arranjo evidenciando a injeção de corrente harmônica no PAC.....	122
Figura 4.3 – Projeção de fasores para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas.	126
Figura 4.4 – Esquema representativo da aplicação do MIC para o compartilhamento da indústria 1.....	128
Figura 4.5 – Retificador usado para injetar correntes harmônicas nos ensaios laboratoriais.	131
Figura 4.6 – Circuito equivalente de Norton evidenciando as grandezas envolvidas na problemática.	135
Figura 4.7 – Circuito evidenciando o transformador de entrada na instalação do consumidor.	136
Figura 4.8 – Circuito equivalente de Norton das partes envolvidas com relação ao PM.	136
Figura 4.9 – Grandezas que devem ser mensuradas para aplicação do EMIC – condição 1.....	137
Figura 4.10 – Grandezas que devem ser mensuradas para aplicação do EMIC – condição 2.....	137

Figura 4.11 – Esquema representativo da aplicação da EMIC para o compartilhamento da indústria 1.....	141
Figura 4.12 – Circuito equivalente de Norton evidenciando as grandezas envolvidas na problemática.....	145
Figura 4.13 – Circuito evidenciando o transformador de entrada na instalação do consumidor.....	146
Figura 4.14 – Circuito equivalente de Norton das partes envolvidas com relação ao PM.	146
Figura 4.15 – Grandezas que devem ser mensuradas para aplicação da EMIC-MC – condição 1.	147
Figura 4.16 – Grandezas que devem ser mensuradas para aplicação da EMIC-MC – condição 2.	148
Figura 4.17 – Esquema representativo da aplicação da EMIC-MC para o compartilhamento da indústria 1 – condição de operação 1.	151
Figura 4.18 – Esquema representativo da aplicação da EMIC-MC para o compartilhamento da indústria 1 – condição de operação 2.	151
Figura 5.1 – Circuito equivalente de Norton evidenciando as grandezas envolvidas na problemática.....	159
Figura 5.2 – Arranjo evidenciando a conexão do capacitor no PAC.	159
Figura 5.3 – Projeção de fasores para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas.....	162
Figura 5.4 – Esquema representativo da aplicação do MCC para o compartilhamento da indústria 1.....	164
Figura 5.5 – Esquema usado para o chaveamento de capacitores nos ensaios laboratoriais..	167
Figura 5.6 – Circuito equivalente de Norton das partes envolvidas com relação ao PAC.	169
Figura 5.7 – Circuito evidenciando o transformador de entrada na instalação do consumidor.....	170
Figura 5.8 – Circuito equivalente de Norton das partes envolvidas com relação ao PM.	170
Figura 5.9 – Grandezas que devem ser mensuradas para aplicação da EMCC – condição 1.	171
Figura 5.10 – Grandezas que devem ser mensuradas para aplicação da EMCC – condição 2.	171
Figura 5.11 – Esquema representativo da aplicação da EMCC para o compartilhamento da indústria 1.....	175

Figura 6.1 – Projeção de fasores para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas.	187
Figura A.1 – Principais arranjos para filtros passivos sintonizados: (a) uma frequência; (b) duas frequências; (c) três frequências.	220
Figura A.2 – Principais arranjos para filtros passivos amortecidos: (a) primeira ordem; (b) segunda ordem; (c) terceira ordem; (d) tipo “C”.	220
Figura A.3 – Projeto de filtro passivo sintonizado em uma frequência.	222
Figura A.4 – Módulo da impedância, em função da frequência, do filtro de uma sintonia... ..	222
Figura A.5 – Ângulo da impedância, em função da frequência, do filtro de uma sintonia. ..	223
Figura A.6 – Projeto de filtro passivo sintonizado em duas frequências.	224
Figura A.7 – Módulo da impedância, em função da frequência, do filtro de duas sintonias.	225
Figura A.8 – Ângulo da impedância, em função da frequência, do filtro de duas sintonias.	225
Figura A.9 – Projeto de filtro passivo sintonizado em três frequências.	227
Figura A.10 – Módulo da impedância, em função da frequência, do filtro de três sintonias.	227
Figura A.11 – Ângulo da impedância, em função da frequência, do filtro de três sintonias.	228
Figura A.12 – Circuito de filtro passivo amortecido de primeira ordem.	229
Figura A.13 – Módulo da impedância, em função da frequência, do filtro amortecido de primeira ordem.	229
Figura A.14 – Ângulo da impedância, em função da frequência, do filtro amortecido de primeira ordem.	230
Figura A.15 – Projeto de filtro passivo amortecido de segunda ordem.	231
Figura A.16 – Módulo da impedância, em função da frequência, do filtro amortecido de segunda ordem.	232
Figura A.17 – Ângulo da impedância, em função da frequência, para o filtro amortecido de segunda ordem.	232
Figura A.18 – Projeto de filtro passivo amortecido de terceira ordem.	234
Figura A.19 – Módulo da impedância, em função da frequência, para o filtro amortecido de terceira ordem.	234
Figura A.20 – Ângulo da impedância, em função da frequência, para o filtro amortecido de terceira ordem.	235

Figura A.21 – Projeto de filtro passivo amortecido tipo C.....	236
Figura A.22 – Módulo da impedância, em função da frequência, para o filtro amortecido tipo C.....	236
Figura A.23 – Ângulo da impedância, em função da frequência, para o filtro amortecido tipo C.....	237
Figura A.24 – Circuito equivalente de Norton do sistema teste.....	238
Figura B.1 – Esquema sintetizador do sistema elétrico simulado.	248
Figura B.2 – Esquematização dos elementos que constituem o sistema supridor.....	248
Figura B.3 – Esquematização da constituição das indústrias no sistema simulado.	249
Figura B.4 – Esquematização de grandezas de interesse no secundário dos transformadores de entrada das indústrias no sistema simulado.	253
Figura B.5 – Arranjo sintetizador das partes envolvidas na problemática.	255
Figura B.6 – Arranjo representativo das distorções advindas apenas do supridor.	255
Figura B.7 – Arranjo representativo das distorções advindas apenas do consumidor.	255
Figura C.1 – Esquema sintetizador do sistema elétrico simulado.	260
Figura C.2 – Esquema sintetizador das indústrias do sistema laboratorial.	261
Figura C.3 – Configuração laboratorial das três indústrias e sistema de aquisição de dados.	262

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resultados do desempenho dos filtros sintonizados para $h = 3$	76
Tabela 3.2 – Resultados do desempenho dos filtros sintonizados para $h = 5$	77
Tabela 3.3 – Resultados do desempenho dos filtros sintonizados para $h = 7$	78
Tabela 3.4 – Resultados do desempenho dos filtros sintonizados para $h = 11$	79
Tabela 3.5 – Resultados do desempenho dos filtros sintonizados para $h = 13$	80
Tabela 3.6 – Influência do parâmetro k_h no desempenho do procedimento de compartilhamento de responsabilidades.	85
Tabela 3.7 – Influência do parâmetro PD no desempenho do procedimento de compartilhamento de responsabilidades.	87
Tabela 3.8 – Análise das respostas do compartilhamento, considerando os mesmos valores de PD, e diferentes fontes de correntes de distorções.	88
Tabela 3.9 – Influência do parâmetro PD no desempenho do procedimento de compartilhamento de responsabilidades, utilizando o percentil 95.	89
Tabela 3.10 – Caracterização das impedâncias dominantes usadas nos casos I e II – simulações MID.	91
Tabela 3.11 – Grandezas obtidas para a análise da indústria 1 – simulações MID (caso I).	92
Tabela 3.12 – Grandezas obtidas para a análise da indústria 2 – simulações MID (caso I).	93
Tabela 3.13 – Grandezas obtidas para a análise da indústria 3 – simulações MID (caso I).	93
Tabela 3.14 – Grandezas obtidas para a análise da concessionária – simulações MID (caso I).	93
Tabela 3.15 – Grandezas obtidas para a análise da indústria 1 – simulações MID (caso II). ..	93
Tabela 3.16 – Grandezas obtidas para a análise da indústria 2 – simulações MID (caso II). ..	93
Tabela 3.17 – Grandezas obtidas para a análise da indústria 3 – simulações MID (caso II). ..	93
Tabela 3.18 – Grandezas obtidas para a análise da concessionária – simulações MID (caso II).	94
Tabela 3.19 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – simulações MID.	94
Tabela 3.20 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 2 – simulações MID.	94

Tabela 3.21 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 3 – simulações MID.	95
Tabela 3.22 – Resultados obtidos para o compartilhamento da concessionária – simulações MID.	95
Tabela 3.23 – Caracterização das impedâncias dominantes usadas – ensaios MID.	100
Tabela 3.24 – Grandezas mensuradas na análise da indústria 1 – ensaios MID (caso I).	101
Tabela 3.25 – Grandezas mensuradas na análise da indústria 2 – ensaios MID (caso I).	101
Tabela 3.26 – Grandezas mensuradas na análise da indústria 3 – ensaios MID (caso I).	101
Tabela 3.27 – Grandezas mensuradas na análise da concessionária – ensaios MID (caso I).	101
Tabela 3.28 – Grandezas mensuradas na análise da indústria 1 – ensaios MID (caso II).	101
Tabela 3.29 – Grandezas mensuradas na análise da indústria 2 – ensaios MID (caso II).	102
Tabela 3.30 – Grandezas mensuradas na análise da indústria 3 – ensaios MID (caso II).	102
Tabela 3.31 – Grandezas mensuradas na análise da concessionária – ensaios MID (caso II).	102
Tabela 3.32 – Grandezas mensuradas na análise da indústria 1 – ensaios MID (caso III).	102
Tabela 3.33 – Grandezas mensuradas na análise da indústria 2 – ensaios MID (caso III).	102
Tabela 3.34 – Grandezas mensuradas na análise da indústria 3 – ensaios MID (caso III).	102
Tabela 3.35 – Grandezas mensuradas na análise da concessionária – ensaios MID (caso III).	103
Tabela 3.36 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – ensaios MID.	103
Tabela 3.37 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 2 – ensaios MID.	103
Tabela 3.38 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 3 – ensaios MID.	104
Tabela 3.39 – Resultados obtidos para o compartilhamento da concessionária – ensaios MID.	104
Tabela 3.40 – Impedâncias dominantes usadas para análise da indústria 1 – simulações EMID.	113
Tabela 3.41 – Impedâncias dominantes usadas para análise das indústrias 2 e 3 – simulações EMID.	113
Tabela 3.42 – Grandezas obtidas no secundário para a análise da indústria 1 – simulações EMID.	113

Tabela 3.43 – Grandezas obtidas no secundário para a análise da indústria 2 – simulações EMID.	113
Tabela 3.44 – Grandezas obtidas no secundário para a análise da indústria 3 – simulações EMID.	114
Tabela 3.45 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – simulações EMID.	114
Tabela 3.46 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 2 – simulações EMID.	114
Tabela 3.47 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 3 – simulações EMID.	114
Tabela 3.48 – Caracterização das impedâncias dominantes usadas – ensaios EMID.	115
Tabela 3.49 – Grandezas mensuradas no secundário na análise da indústria 1 – ensaios EMID (caso I).	116
Tabela 3.50 – Grandezas mensuradas no secundário na análise da indústria 1 – ensaios EMID (caso II).	116
Tabela 3.51 – Grandezas mensuradas no secundário na análise da indústria 1 – ensaios EMID (caso III).	116
Tabela 3.52 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – ensaios EMID.	117
Tabela 4.1 – Grandezas obtidas para a análise da indústria 1 – simulações MIC.	128
Tabela 4.2 – Grandezas obtidas para a análise da indústria 2 – simulações MIC.	129
Tabela 4.3 – Grandezas obtidas para a análise da indústria 3 – simulações MIC.	129
Tabela 4.4 – Grandezas obtidas para a análise da concessionária – simulações MIC.	129
Tabela 4.5 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – simulações MIC.	129
Tabela 4.6 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 2 – simulações MIC.	129
Tabela 4.7 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 3 – simulações MIC.	130
Tabela 4.8 – Resultados obtidos para o compartilhamento da concessionária – simulações MIC.	130
Tabela 4.9 – Grandezas mensuradas para a análise da indústria 1 – ensaios MIC (caso I).	131

Tabela 4.10 – Grandezas mensuradas para a análise da indústria 2 – ensaios MIC (caso I).....	132
Tabela 4.11 – Grandezas mensuradas para a análise da indústria 3 – ensaios MIC (caso I).....	132
Tabela 4.12 – Grandezas mensuradas para a análise da concessionária – ensaios MIC (caso I).....	132
Tabela 4.13 – Grandezas mensuradas para a análise da indústria 1 – ensaios MIC (caso II).....	132
Tabela 4.14 – Grandezas mensuradas para a análise da indústria 2 – ensaios MIC (caso II).....	132
Tabela 4.15 – Grandezas mensuradas para a análise da indústria 3 – ensaios MIC (caso II).....	132
Tabela 4.16 – Grandezas mensuradas para a análise da concessionária – ensaios MIC (caso II).....	133
Tabela 4.17 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – ensaios MIC.	133
Tabela 4.18 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 2 – ensaios MIC.	133
Tabela 4.19 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 3 – ensaios MIC.	133
Tabela 4.20 – Resultados obtidos para o compartilhamento da concessionária – ensaios MIC.	134
Tabela 4.21 – Grandezas obtidas para a análise da indústria 1 – simulações EMIC.....	142
Tabela 4.22 – Grandezas obtidas para a análise da indústria 2 – simulações EMIC.....	142
Tabela 4.23 – Grandezas obtidas para a análise da indústria 3 – simulações EMIC.....	142
Tabela 4.24 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – simulações EMIC.....	142
Tabela 4.25 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 2 – simulações EMIC.....	143
Tabela 4.26 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 3 – simulações EMIC.....	143
Tabela 4.27 – Grandezas mensuradas para a análise da indústria 1 – ensaios EMIC.....	144
Tabela 4.28 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – ensaios EMIC.....	144

Tabela 4.29 – Grandezas obtidas para a análise da condição 1 – simulações EMIC-MC.....	152
Tabela 4.30 – Grandezas obtidas para a análise da condição 2 – simulações EMIC-MC.....	152
Tabela 4.31 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – simulações EMIC-MC.....	153
Tabela 4.32 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 2 – simulações EMIC-MC.....	153
Tabela 4.33 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 3 – simulações EMIC-MC.....	153
Tabela 4.34 – Grandezas obtidas para a análise da condição 1 da indústria 1 – ensaios EMIC-MC.....	154
Tabela 4.35 – Grandezas obtidas para a análise da condição 2 da indústria 1 – ensaios EMIC-MC.....	154
Tabela 4.36 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – ensaios EMIC-MC.....	155
Tabela 5.1 – Impedâncias harmônicas do capacitor chaveado – simulações MCC.....	163
Tabela 5.2 – Grandezas obtidas para a análise da condição 2 – simulações MCC.....	165
Tabela 5.3 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – simulações MCC.....	165
Tabela 5.4 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 2 – simulações MCC.....	165
Tabela 5.5 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 3 – simulações MCC.....	165
Tabela 5.6 – Resultados obtidos para o compartilhamento da concessionária – simulações MCC.....	166
Tabela 5.7 – Impedâncias harmônicas do capacitor chaveado – ensaios MCC.....	166
Tabela 5.8 – Grandezas obtidas para a análise da condição 2 – ensaios MCC.....	167
Tabela 5.9 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – ensaios MCC. ..	168
Tabela 5.10 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 2 – ensaios MCC.....	168
Tabela 5.11 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 3 – ensaios MCC.....	168
Tabela 5.12 – Resultados obtidos para o compartilhamento da concessionária – ensaios MCC.....	168

Tabela 5.13 – Impedâncias harmônicas do capacitor chaveado – simulações EMCC.	175
Tabela 5.14 – Grandezas obtidas para a análise da condição 2 – simulações EMCC.	176
Tabela 5.15 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – simulações EMCC.....	176
Tabela 5.16 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 2 – simulações EMCC.....	176
Tabela 5.17 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 3 – simulações EMCC.....	176
Tabela 5.18 – Grandezas mensuradas na análise da condição 2 da indústria 1 – ensaios EMCC.....	177
Tabela 5.19 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – ensaios EMCC.....	178
Tabela 6.1 – Síntese dos erros obtidos durante a avaliação computacional dos métodos.	188
Tabela 6.2 – Síntese dos erros obtidos durante a avaliação laboratorial dos métodos.	188
Tabela A.1 – Parametrização do sistema elétrico usado para avaliação das estratégias de filtragem.	238
Tabela A.2 – Parametrização das fontes harmônicas do supridor e consumidor e DIT constatadas no PAC.....	238
Tabela A.3 – Gabarito para o compartilhamento de responsabilidades sobre tensões harmônicas.....	239
Tabela A.4 – Parâmetros usados para composição dos filtros sintonizados em uma frequência.....	240
Tabela A.5 – Resultados do compartilhamento de responsabilidades usando filtros passivos sintonizados em uma frequência como impedância dominante.	240
Tabela A.6 – Resultados do compartilhamento de responsabilidades usando um filtro passivo sintonizado em duas frequências como impedância dominante.....	241
Tabela A.7 – Resultados do compartilhamento de responsabilidades usando um filtro passivo amortecido de primeira ordem como impedância dominante.	241
Tabela A.8 – Resultados do compartilhamento de responsabilidades usando um filtro passivo amortecido de segunda ordem como impedância dominante.....	242
Tabela A.9 – Síntese das respostas obtidas nas análises envolvendo diferentes tipos de impedâncias dominantes.....	243
Tabela B.1 – Parametrização do supridor do sistema simulado.	248
Tabela B.2 – Dados dos transformadores das indústrias do sistema simulado.....	250

Tabela B.3 – Impedâncias dos cabos e das cargas dos retificadores das indústrias do sistema simulado.....	250
Tabela B.4 – Potências nominais das cargas RL das indústrias do sistema simulado.	251
Tabela B.5 – Potências nominais dos capacitores das indústrias do sistema simulado.....	251
Tabela B.6 – Dados dos motores de indução das indústrias do sistema simulado.	251
Tabela B.7 – Tensões e correntes fundamentais no sistema elétrico simulado.	251
Tabela B.8 – Potências consumidas pelas indústrias no sistema simulado.	252
Tabela B.9 – Tensões e correntes harmônicas no PAC do sistema elétrico simulado.	252
Tabela B.10 – Impedâncias harmônicas dos transformadores das indústrias do sistema elétrico simulado.....	253
Tabela B.11 – Tensões e correntes harmônicas no secundário dos transformadores das indústrias do sistema elétrico simulado.	254
Tabela B.12 – Impedâncias harmônicas no sistema elétrico simulado.	254
Tabela B.13 – Obtenção do compartilhamento da indústria 1, para $h = 5$, no sistema elétrico simulado.....	256
Tabela B.14 – Valores de referência para o compartilhamento de responsabilidade no PAC do sistema simulado.....	257
Tabela C.1 – Parametrização do supridor do sistema laboratorial.	259
Tabela C.2 – Dados dos transformadores das indústrias do sistema laboratorial.....	261
Tabela C.3 – Parametrização dos componentes das indústrias do sistema laboratorial.	261
Tabela C.4 – Tensões e correntes fundamentais no sistema elétrico laboratorial.	262
Tabela C.5 – Potências consumidas pelas indústrias no sistema laboratorial.	263
Tabela C.6 – Tensões e correntes harmônicas no PAC do sistema elétrico laboratorial.	263
Tabela C.7 – Impedâncias harmônicas dos transformadores das indústrias do sistema laboratorial.	263
Tabela C.8 – Tensões e correntes harmônicas no secundário do transformador da indústria 1 do sistema laboratorial.	264
Tabela C.9 – Impedâncias harmônicas no sistema elétrico laboratorial.....	264
Tabela C.10 – Obtenção do compartilhamento da indústria 1, para $h = 5$, no sistema laboratorial.	265
Tabela C.11 – Valores de referência para o compartilhamento de responsabilidade no PAC do sistema laboratorial.	266

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampère
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
C	Capacitância
d	Dessintonia
D	Fator de amortecimento
DIT	Distorção Individual de Tensão
DVR	<i>Dynamic Voltage Regulator</i>
EMCC	Extrapolação do Compartilhamento pelo Método do Chaveamento de Capacitores
EMIC	Extrapolação do Compartilhamento pelo Método da Injeção de Corrente Harmônica
EMIC-MC	Extrapolação do Compartilhamento pelo Método da Injeção de Corrente Harmônica com Monitoramento de Carga
EMID	Extrapolação do Compartilhamento pelo Método da Impedância Dominante
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
F	Farad
FACTS	<i>Flexible AC Transmission System</i>
G	Giga
GD	Geração Distribuída
H	Henry
h	Ordem harmônica
HVDC	<i>High Voltage Direct Current</i>
Hz	Hertz
IEC	<i>International Electrotechincal Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
k	Quilo
L	Indutância
M	Mega
m	Mili
MCC	Método do Chaveamento de Capacitores

MIC	Método da Injeção de Corrente Harmônica
MID	Método da Impedância Dominante
ONS	Operador Nacional do Sistema
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PM	Ponto de Medição
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
Q	Fator de Qualidade
Q_{cap}	Potência reativa do capacitor
R	Resistência
RNA	Redes Neurais Artificiais
SIN	Sistema Interligado Nacional
Statcom	<i>Static Synchronous Compensator</i>
UFPA	Universidade Federal do Pará
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
USP	Universidade de São Paulo
UHVDC	<i>Ultra High Voltage Direct Current</i>
V	Volt
VA	Volt-Ampère
VA _r	Volt-Ampère reativo
W	Watt
ω_0	Frequência característica
Z_0	Impedância natural
μ	Micro
Ω	Ohm

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO	39
1.1 Contextualização do tema	39
1.2 Objetivos do trabalho e contribuições oferecidas	42
1.3 Estrutura da tese	45

CAPÍTULO II

2 O ESTADO DA ARTE	49
2.1 Considerações iniciais	49
2.2 Quanto a livros e documentos normativos	49
2.3 Quanto a procedimentos destinados ao compartilhamento	52
2.3.1 Método de Fluxo de Potência Harmônica	52
2.3.2 Método da Corrente Conforme e Não Conforme	54
2.3.3 Método da Superposição	55
2.3.4 Método da Superposição Modificado	56
2.3.5 Métodos baseados em outros princípios	57
2.3.6 Avaliação de desempenho de métodos	58
2.4 Quanto a meios para a determinação de impedâncias harmônicas	59
2.5 Síntese do levantamento realizado	60

CAPÍTULO III

3 O MÉTODO DA IMPEDÂNCIA DOMINANTE (MID)	63
3.1 Considerações iniciais	63
3.2 Fundamentação teórica do MID	64

3.3 Considerações sobre o grau de dominância da impedância	69
3.3.1 Aprofundamento na investigação acerca do filtro sintonizado em uma frequência para a obtenção da impedância dominante	70
3.3.1.1 Fator de Qualidade	71
3.3.1.2 Dessintonia	72
3.3.1.3 Multissintonia	74
3.3.1.4 Aplicação computacional de diferentes parametrizações de filtros sintonizados com vistas ao compartilhamento	75
3.3.1.5 Análise de desempenho dos resultados do compartilhamento a partir da utilização de diferentes parametrizações de filtros sintonizados	81
3.3.2 Proposição do parâmetro de dominância (PD)	83
3.4 Avaliação de desempenho do MID via simulações computacionais	90
3.5 Avaliação de desempenho do MID via ensaios laboratoriais	96
3.6 Extrapolação do compartilhamento para um ponto distinto daquele onde se conecta a impedância dominante (EMID)	105
3.7 Avaliação de desempenho da EMID via simulações computacionais	111
3.8 Avaliação de desempenho da EMID via ensaios laboratoriais	115

CAPÍTULO IV

4 O MÉTODO DA INJEÇÃO DE CORRENTE HARMÔNICA (MIC)	119
4.1 Considerações iniciais	119
4.2 Fundamentação teórica do MIC	120
4.2.1 Determinação das grandezas de interesse	123
4.2.2 Compartilhamento de responsabilidades	125
4.3 Avaliação de desempenho do MIC via simulações computacionais	127
4.4 Avaliação de desempenho do MIC via ensaios laboratoriais	130
4.5 Extrapolação do compartilhamento em ponto distinto daquele onde se injeta corrente harmônica (EMIC)	135
4.6 Avaliação de desempenho da EMIC via simulações computacionais	141
4.7 Avaliação de desempenho da EMIC via ensaios laboratoriais	143

4.8 Extrapolação do compartilhamento a partir do monitoramento de uma carga específica (EMIC-MC)	145
4.9 Avaliação de desempenho da EMIC-MC via simulações computacionais	150
4.10 Avaliação de desempenho da EMIC-MC via ensaios laboratoriais	154

CAPÍTULO V

5 O MÉTODO DO CHAVEAMENTO DE CAPACITORES (MCC)	157
5.1 Considerações iniciais	157
5.2 Fundamentação teórica do MCC	157
5.2.1 Determinação das grandezas de interesse	160
5.2.2 Compartilhamento de responsabilidades	162
5.3 Avaliação de desempenho do MCC via simulações computacionais	163
5.4 Avaliação de desempenho do MCC via ensaios laboratoriais	166
5.5 Extrapolação do compartilhamento em ponto distinto daquele onde se conecta o capacitor (EMCC)	169
5.6 Avaliação de desempenho da EMCC via simulações computacionais	174
5.7 Avaliação de desempenho da EMCC via ensaios laboratoriais	177

CAPÍTULO VI

6 ANÁLISES E CONSIDERAÇÕES COMPLEMENTARES SOBRE AS METODOLOGIAS PARA COMPARTILHAMENTO HARMÔNICO	179
6.1 Considerações iniciais	179
6.2 Sumarização das metodologias apresentadas	179
6.3 Análise comparativa de desempenho	187
6.4 Considerações complementares acerca da aplicação das metodologias em sistemas reais	190
6.4.1 Quanto à sensibilidade dos procedimentos frente às intervenções realizadas	190
6.4.2 Quanto à realização de estudos de suportabilidade dos equipamentos utilizados no processo de compartilhamento	192

6.4.3 Quanto à determinação das impedâncias harmônicas de transformadores	192
6.4.4 Quanto à aplicação das metodologias em sistemas caracterizados por forte dinâmica	193
6.4.5 Quanto ao desenvolvimento de protocolo para realização do compartilhamento harmônico	194

CAPÍTULO VII

7 CONCLUSÕES	197
---------------------	------------

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS	203
--------------------	------------

APÊNDICES

APÊNDICES	219
------------------	------------

A ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MID A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE DISTINTOS ARRANJOS DE FILTRAGEM	219
---	------------

A.1 Tipos de filtros harmônicos passivos	219
---	------------

A.1.1 Filtros sintonizados em uma frequência	221
--	-----

A.1.2 Filtros sintonizados em duas frequências	223
--	-----

A.1.3 Filtros sintonizados em três frequências	225
--	-----

A.1.4 Filtros amortecidos de primeira ordem	228
---	-----

A.1.5 Filtros amortecidos de segunda ordem	230
--	-----

A.1.6 Filtros amortecidos de terceira ordem	233
---	-----

A.1.7 Filtros amortecidos tipo C	235
----------------------------------	-----

A.2 Análise de desempenho de distintos arranjos de filtragem com vistas à obtenção da impedância dominante	237
---	------------

A.2.1 Sistema teste para a avaliação das estratégias de filtragem	237
---	-----

A.2.2	Aplicação computacional de distintos tipos de filtros com vistas ao compartilhamento	239
A.2.3	Análise de desempenho dos resultados do compartilhamento a partir da utilização de diferentes tipos de filtros	242
B	DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO SIMULADO	247
B.1	Estrutura e parametrização	247
B.2	Valores de referência para o compartilhamento	254
C	DESCRIÇÃO DO ARRANJO LABORATORIAL ENSAIADO	259
C.1	Estrutura e parametrização	259
C.2	Valores de referência para o compartilhamento	264

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do tema

O tema deste trabalho está inserido na área da qualidade do produto energia elétrica. Dentre os fatores capazes de acometer a qualidade do referido produto, inspira especial atenção a intensificação da presença de distorções harmônicas nos sistemas elétricos, principalmente nas últimas décadas. Em geral, este fenômeno é decorrente de fatos associados à inserção de novas tecnologias ou melhoramentos tecnológicos em diferentes níveis do sistema: geração, transmissão, distribuição e consumo final.

No que se refere à geração, nota-se uma tendência não apenas em sentido nacional, mas mundial, em estabelecer esforços que visam substituir cada vez mais as fontes de energia não renováveis por renováveis. Isso ocorre evidentemente porque os recursos não renováveis apresentam disponibilidade limitada e, além do mais, existem grandes preocupações associadas aos impactos ambientais causados pela utilização deles. Evidência disso é que várias nações do mundo se uniram no compromisso de reduzir a emissão de gases que contribuem para a intensificação do efeito estufa. O Brasil, por meio do Tratado de Paris em 2015, se comprometeu a diminuir a emissão de carbono em 37% até 2025, e a redução deve chegar a 43% em 2030, sempre com relação às emissões do ano de 2005 (1).

Diante do contexto relatado, verifica-se o crescimento vertiginoso da geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis e que causam pouco impacto em termos ambientais, como é o caso das gerações eólica e fotovoltaica. No Brasil, o Operador Nacional do Sistema (ONS) mostra, nos boletins mensais referentes ao mês de maio de 2019, que a potência instalada de usinas solares fotovoltaicas chegou a 2964,89 MW (2), enquanto a capacidade instalada de usinas eólicas alcançou 15,02 GW (3). As formas de geração renováveis citadas possuem interfaceamento com a rede via conversores de potência e, por isso, representam importantes potenciais de geração de correntes não lineares, o que exige especial atenção por parte do operador do sistema, quando de suas conexões.

Já no âmbito da transmissão de energia elétrica se observa o crescimento do número de elos de HVDC (*High Voltage Direct Current*) ou UHVDC (*Ultra High Voltage Direct Current*) no Sistema Interligado Nacional (SIN). Além das linhas de ± 600 kV que ligam a cidade de

Porto Velho – RO a Araraquara – SP, e Foz do Iguaçu – PR a Ibiúna – SP, destacam-se ainda dois novos empreendimentos relacionados à transmissão de energia elétrica gerada pela usina de Belo Monte – PA, até a subestação de Estreito, em Minas Gerais, e até a região metropolitana do Rio de Janeiro, por meio de linhas de ± 800 kV (4). Verifica-se, também, o surgimento de estações *back-to-back*, a exemplo das instaladas em Porto Velho para a conexão de geração à região Norte. É sabido que tais dispositivos são caracterizados por um comportamento não linear.

Além disso, é importante mencionar elementos causadores de distorções harmônicas que estão sendo inseridos à rede básica com o objetivo de otimizar, aumentar a confiabilidade e a estabilidade de operação. Nesse contexto, podem ser mencionados os dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission System*), que flexibilizam a transferência de energia, e equipamentos que visam a melhoria dos níveis de tensão com controle eletrônico de reativo, tais como DVR (*Dynamic Voltage Regulator*), Statcom's (*Static Synchronous Compensator*) e sintetizadores de energia de uma forma geral (5).

No que tange ao nível de distribuição, certamente este é o setor que experimenta as maiores mudanças associadas à intensificação da presença de distorções, em virtude da utilização de novos recursos de controle eletrônico com característica não linear, em nível residencial, comercial e industrial. Para efeito de exemplificação, podem ser citados sistemas de controle de velocidade e torque em motores que acionam inúmeros tipos de cargas, o surgimento de sistemas de carregamento de veículos elétricos e a modernização dos sistemas de iluminação.

É relevante ainda ponderar que a difusão das redes elétricas inteligentes (*Smart Grids*) também pode ser associada ao aumento de não linearidades no sistema, tendo em vista a necessidade crescente de utilização de sistemas armazenadores de energia, sem contar a ascensão da geração distribuída. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) divulgou que a micro e mini geração distribuída (GD) apresentou uma potência instalada próxima a 1,63 GW no Brasil em outubro de 2019. Os sistemas fotovoltaicos merecem destaque nesse cenário, visto que apresentam 1,47 GW de potência instalada, ou seja, mais de 90% da potência instalada de GD (6).

Com base nos pontos destacados até este momento, é simples perceber que a constatação de níveis relevantes de distorções harmônicas em determinado barramento, via de regra, não apresenta uma origem única. Em outras palavras, as tensões e correntes de frequências harmônicas presentes em um ponto do circuito certamente são resultado da contribuição de

diversos dispositivos de funcionamento não linear, os quais podem estar operando em diferentes setores, ou níveis, do sistema.

São bem conhecidos na literatura os efeitos indesejados à operação dos complexos elétricos que a presença de distorções harmônicas pode provocar. Dentre tais fatores nocivos é possível mencionar: estresses térmicos em equipamentos (aumento das perdas, elevação da temperatura e redução de vida útil), estresses dielétricos (sobretensões na frequência de ressonância paralela), interferências no funcionamento de dispositivos elétricos e mecânicos, e outros impactos de ordem operacional nas redes elétricas (7).

Como consequência disso, usualmente órgãos ou agências reguladoras elaboram documentos que estabelecem valores limítrofes, com o intuito de manter os níveis de distorções em patamares aceitáveis para a garantia do bom desempenho dos sistemas. Ao mesmo tempo, técnicas de mitigação envolvendo a utilização de diferentes tipos de filtros ganham cada vez maior eficácia e sofisticação.

De fato, tendo em mente que as distorções harmônicas presentes em certo ponto podem ser fruto da atuação concomitante de diversos fatores, diferentes filosofias podem ser adotadas em face da necessidade de implementação de uma medida mitigatória. Considerando um ponto de acoplamento entre a rede da concessionária e um determinado consumidor industrial, por exemplo, a responsabilidade por manter as distorções harmônicas do barramento comum em níveis adequados pode recair sobre a concessionária, sobre a indústria, ou sobre ambas as partes. Neste último caso, os custos associados à instalação dos filtros poderiam ser compartilhados, de acordo com a proporção de responsabilidade que cada parte apresenta sobre as distorções totais constatadas.

Não existe uma concepção bem definida, universalmente adotada, que determine como proceder com relação à questão aqui levantada. Ainda, caso se decida por compartilhar as responsabilidades sobre as distorções harmônicas entre as partes envolvidas, na literatura há uma lacuna quando se pensa em uma metodologia para compartilhamento que una os requisitos básicos de confiabilidade, eficácia e viabilidade de aplicação prática (8). Este cenário é descrito, de forma detalhada, no capítulo 2.

A problemática não se restringe a situações que envolvem rede elétrica e consumidores. Como comentado anteriormente, dado o crescente aumento da integração de fontes de geração renováveis que utilizam interfaceamento eletrônico com a rede, relevantes demandas surgem nos estudos de acesso e de avaliação da responsabilidade desta nova fonte de geração sobre os harmônicos totais presentes no barramento de conexão.

Visando contribuir com este desafiador cenário, o tema da presente tese versa sobre métodos que visam à detecção do compartilhamento de responsabilidades sobre distorções harmônicas. Dentro deste assunto, em linhas gerais o trabalho se preocupa em desenvolver análises que buscam contribuir para a consolidação de um procedimento já existente e, além disso, são feitas e testadas novas proposições metodológicas. Os métodos aqui tratados objetivam alcançar os percentuais de responsabilidades sobre as distorções presentes em um barramento comum, cabidos às duas partes conectadas a este ponto, quer seja concessionária e consumidor ou, até mesmo, rede elétrica e fonte de geração não linear.

1.2 Objetivos do trabalho e contribuições oferecidas

O objetivo geral deste trabalho é contribuir rumo ao estabelecimento de meios viáveis e efetivos para a realização do compartilhamento de responsabilidades sobre distorções harmônicas.

Nesse contexto, três métodos distintos são tratados: o Método da Impedância Dominante (MID), o Método da Injeção de Corrente Harmônica (MIC) e o Método do Chaveamento de Capacitores (MCC). Destaca-se que o MID é um procedimento já existente, que aqui é analisado de maneira não antes realizada, com o intuito de consolidar o seu emprego em termos funcionais. Já os outros dois procedimentos, MIC e MCC, são propostas originais.

Também como contribuição inédita desta tese são apresentados meios para obtenção do compartilhamento de responsabilidades em determinado barramento, a partir de técnicas e medições realizadas em outra barra do sistema. Este processo é denominado no presente trabalho como extrapolação do compartilhamento, e se apresenta como uma alternativa potencialmente atraente quando são levados em consideração os aspectos de viabilidade operacional e atratividade financeira.

Com relação a tais processos são apresentadas as seguintes metodologias: a Extrapolação do Compartilhamento pelo Método da Impedância Dominante (EMID), a Extrapolação do Compartilhamento pelo Método da Injeção de Corrente Harmônica (EMIC), a Extrapolação do Compartilhamento pelo Método da Injeção de Corrente Harmônica com Monitoramento de Carga (EMIC-MC) e a Extrapolação do Compartilhamento pelo Método do Chaveamento de Capacitores (EMCC).

Tendo em mente as informações postas até o momento, os seguintes objetivos específicos podem ser traçados para este trabalho:

- Investigar de forma completa o estado da arte relacionado ao tema, de maneira a abranger o levantamento de documentos normativos e metodologias existentes na literatura, associadas de alguma maneira com o assunto de interesse desta tese;
- Consolidar o Método da Impedância Dominante (MID) a partir de análises detalhadas que objetivam clarificar questões práticas e viabilizar a aplicação segura do mesmo. Para se chegar ao compartilhamento de responsabilidades em certa barra, o procedimento tem por fundamento a instalação de uma impedância harmônica neste local, com caráter dominante sobre as demais do sistema. Além disso, é proposta a EMID, inovador procedimento que permite a extrapolação do compartilhamento para um ponto distinto de onde se conecta a impedância dominante;
- Apresentar uma filosofia para se chegar ao compartilhamento a partir da injeção de pequenas correntes harmônicas no ponto de interesse, processo este nomeado como Método da Injeção de Corrente Harmônica (MIC). Ao expandir a linha de raciocínio empregada neste processo, são desenvolvidos dois desdobramentos associados à extrapolação do compartilhamento em barras diferentes do local em que ocorrem as injeções. Tais métodos são aqui denominados como EMIC e EMIC-MC;
- Apresentar o MCC, procedimento que pretende fornecer o compartilhamento harmônico a partir do chaveamento de um capacitor. Também para este caso é concebido um processo de extrapolação. A EMCC permite encontrar percentuais de responsabilidades a partir do chaveamento capacitivo em barra distinta daquela de interesse;
- Avaliar o desempenho de todas as metodologias propostas por meio de simulações computacionais em um sistema constituído por equivalentes de unidades industriais, o qual apresenta configuração similar a complexos possíveis de serem encontrados na realidade prática;

- Expandir as análises de desempenho dos métodos estudados a partir de ensaios experimentais em um complexo elétrico montado em laboratório, que apresenta estrutura semelhante ao simulado, mas em escala reduzida;
- Concluir sobre a adequação e a solidez dos procedimentos propostos a partir dos resultados obtidos nas averiguações de desempenho realizadas computacionalmente e experimentalmente;
- Por fim, busca-se levantar pontos fundamentais que carecem de investigações futuras para viabilizar a aplicação sistematizada das metodologias propostas em sistemas elétricos reais.

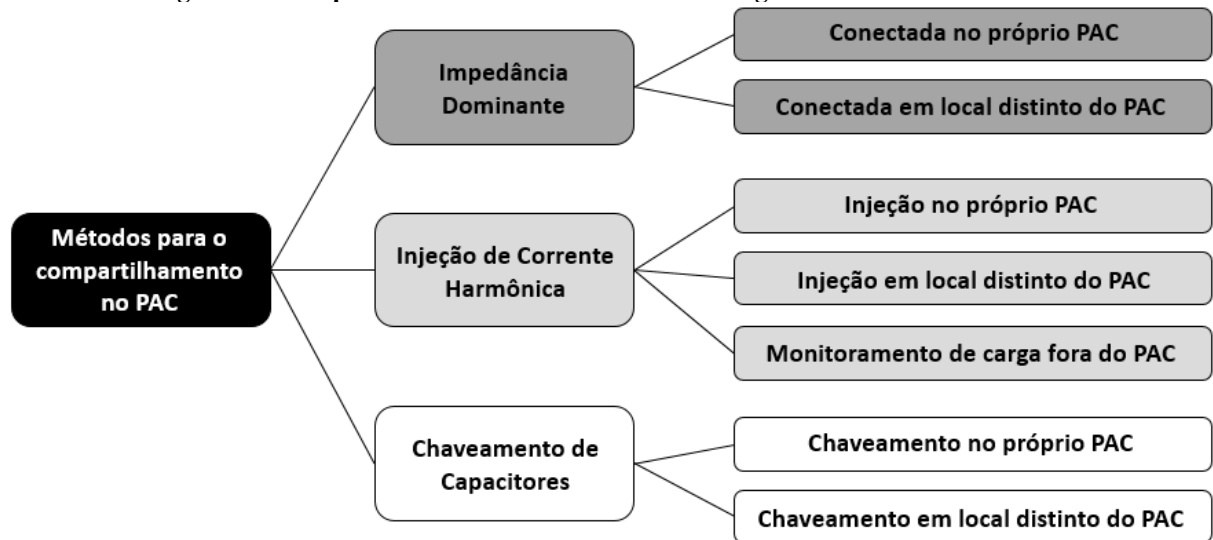
Com base nas demandas atuais oriundas da intensificação da utilização de dispositivos não lineares em todos os níveis dos sistemas elétricos e, ainda, levando em consideração o levantamento do estado da arte sobre o tema, que retrata um cenário carente de definições claras e notadamente decisivas sobre o assunto, percebe-se que as análises e proposições presentes neste trabalho possuem importância relevante.

É oportuno salientar que as diferentes filosofias abordadas abrem uma gama de alternativas para a obtenção do compartilhamento harmônico, de maneira prática, a partir da utilização de dispositivos comumente presentes em sistemas: um filtro passivo, que representa uma impedância harmônica dominante (MID e EMID), um dispositivo de filtragem ativo, que injeta correntes harmônicas (MIC, EMIC e EMIC-MC), ou até mesmo o chaveamento de um componente passivo e linear, como um capacitor (MCC e EMCC).

De fato, os inovadores desenvolvimentos apresentados possuem o potencial de contribuir para o estabelecimento de procedimentos práticos e eficazes, que culminam na definição dos percentuais de responsabilidades harmônicas que cabem às duas partes conectadas a um determinado barramento comum de interesse.

Com o intuito de favorecer um direcionamento mais claro sobre os desenvolvimentos realizados ao longo do trabalho, a Figura 1.1 representa um esquema sintetizador acerca das metodologias abordadas.

Figura 1.1 – Esquema sintetizador sobre as metodologias abordadas no trabalho.



Fonte: Autoria própria.

Na próxima seção é feita a descrição sobre a estrutura da tese, com breve exposição sobre os assuntos tratados nos capítulos seguintes.

1.3 Estrutura da tese

Para alcançar os objetivos traçados, além do presente capítulo introdutório, esta tese se encontra estruturada da maneira apresentada na sequência:

CAPÍTULO II – O Estado da Arte

No capítulo 2 é descrito o estado da arte sobre o tema no qual este trabalho se insere. Assim, são levantadas informações sobre documentos normativos, livros, trabalhos acadêmicos, artigos publicados em periódicos e anais de eventos nacionais e internacionais. O conteúdo retratado neste capítulo visa, portanto, descrever o que a literatura apresenta sobre a temática abordada, além de auxiliar a situar as contribuições e avanços oferecidos por esta tese no contexto descrito.

CAPÍTULO III – O Método da Impedância Dominante (MID)

O capítulo 3 apresenta como tema central o MID. Após a descrição da fundamentação teórica desta metodologia, são realizados minuciosos estudos sobre a relação entre o grau de dominância da impedância utilizada e a eficiência da resposta fornecida pelo procedimento. Em

seguida, o MID é submetido a estudos de desempenho em termos computacionais e laboratoriais. Ainda neste capítulo é apresentada a EMID, processo de extrapolação do compartilhamento segundo a filosofia da impedância dominante e, finalmente, a EMID é também avaliada em termos de simulações e ensaios práticos.

CAPÍTULO IV – O Método da Injeção de Corrente Harmônica (MIC)

No capítulo 4 é detalhadamente descrita a base teórica do MIC, bem como dos procedimentos associados à extrapolação do compartilhamento a partir do conceito de injeção de correntes harmônicas: EMIC e EMIC-MC. Todas as três metodologias mencionadas apresentam o desempenho avaliado por meio de simulações computacionais e experimentos em laboratório.

CAPÍTULO V – O Método do Chaveamento de Capacitores (MCC)

O capítulo 5, por sua vez, apresenta foco nos procedimentos que lançam mão do chaveamento de capacitores para a obtenção dos percentuais de compartilhamento. São apresentados a fundamentação do MCC e os testes avaliativos do procedimento. Organização semelhante é seguida para a EMCC, processo de extrapolação alicerçado no chaveamento capacitivo. Em todos os casos são realizadas análises de desempenho por meio de simulações e ensaios.

CAPÍTULO VI – Análises e Considerações Complementares sobre as Metodologias para Compartilhamento Harmônico

O capítulo 6 possui o intuito de compendiar informações gerais sobre todos os procedimentos metodológicos descritos ao longo do trabalho. Nesse contexto, são realizadas análises comparativas entre os resultados obtidos a partir das avaliações de desempenho dos métodos descritos nos capítulos 3, 4 e 5. Em seguida, são levantados diferentes aspectos que carecem de atenção quando da implementação prática dos processos em sistemas reais.

CAPÍTULO VII – Conclusões

O capítulo 7 apresenta caráter conclusivo e possui o objetivo de sintetizar todo o trabalho realizado, destacando os avanços conseguidos em relação ao estado da arte. São ainda elencados os itens merecedores de investigação em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

Esta seção apresenta a listagem de todos os documentos usados como referência para a produção deste trabalho.

APÊNDICES

O presente documento é constituído por três apêndices.

O Apêndice A apresenta estudos complementares aos desenvolvimentos realizados no capítulo 3. São apresentadas distintas configurações de filtros passivos sintonizados e amortecidos e, após isso, cada uma delas passa por testes de desempenho, visando concluir sobre quais tipos de arranjos apresentam características de dominância necessárias para garantir o sucesso de aplicação do MID.

O Apêndice B apresenta a estrutura e a parametrização do sistema elétrico usado nas simulações computacionais. Além disso, é descrito o processo de obtenção dos valores de referência, ou gabarito, do compartilhamento de responsabilidades harmônicas entre as partes que constituem tal complexo. A obtenção do gabarito possibilita, evidentemente, avaliar o desempenho dos resultados fornecidos pelas metodologias estudadas.

O Apêndice C segue procedimento análogo ao Apêndice B, mas agora para o complexo elétrico de escala reduzida usado nos ensaios de laboratório.

2 O ESTADO DA ARTE

2.1 Considerações iniciais

Como destacado no capítulo introdutório, a intensificação significativa da presença de distorções harmônicas nos sistemas elétricos nas últimas décadas, bem como os desafios consequentes desta realidade, são fatores que justificam a presença de diversas publicações na literatura sobre o assunto compartilhamento de responsabilidades harmônicas, desde a década de 1990.

Neste contexto, o presente capítulo apresenta o objetivo de expor os principais trabalhos já existentes, frutos de linhas de pesquisa com tema correlato ao assunto aqui em foco. A partir deste levantamento, certamente se torna mais transparente a significância desta tese perante os desenvolvimentos já publicados.

Não obstante a exaustiva procura por publicações próprias ao assunto, é importante registrar que as buscas foram realizadas por meios de acesso em prática e disponibilizados no Brasil. Dessa forma, eventuais pesquisas não contempladas ou referenciadas por intermédio desses recursos podem ter sido desconsideradas.

Para efeito de organização, na sequência os resultados da investigação realizada são separados em três categorias: quanto a livros e documentos normativos, quanto a publicações sobre procedimentos destinados ao compartilhamento e quanto a meios para a determinação de impedâncias harmônicas. Finalmente, é realizada uma síntese conclusiva sobre o conjunto de trabalhos analisados.

2.2 Quanto a livros e documentos normativos

Não foram encontrados livros que tratam diretamente do tema compartilhamento de responsabilidades. Contudo, (7), (9) e (10) são obras que possuem grande relevância no contexto do entendimento detalhado do fenômeno das distorções harmônicas, no que diz respeito a origens, caracterização física do distúrbio, análise matemática, modelagem, propagação, ressonâncias e efeitos em geral. Com especial atenção, nota-se que (7) aborda algumas metodologias para a determinação da impedância harmônica de complexos elétricos.

No que diz respeito a processos de mitigação, (9), (11) e (12) apresentam interessante fundamentação a respeito da especificação e utilização de filtros harmônicos passivos. Este assunto é especialmente meritório de atenção neste trabalho no capítulo 3, uma vez que a filosofia do Método da Impedância Dominante envolve a utilização de um filtro passivo para a obtenção do compartilhamento de responsabilidades.

Já os procedimentos de mitigação a partir de filtros ativos são bem descritos em (13) e (14). Em decorrência da filosofia de operação de tais dispositivos, esses livros são de interesse para a aplicação dos procedimentos que envolvem a injeção de correntes harmônicas para realização do compartilhamento, como descrito no capítulo 4.

Focando, neste momento, no estudo de normas ou recomendações relacionadas a limites estabelecidos para harmônicos, pode-se dizer que os dois documentos mais expressivos em nível internacional são: *Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems* – IEC 61000-3-6 (15) e *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems* – IEEE 519-2014 (16).

O primeiro deles (15), elaborado pela IEC (*International Electrotechnical Commission*), fornece recomendações para avaliar as emissões harmônicas dos consumidores conectados em sistemas de média, alta e extra-alta tensão, sendo que são apresentados valores de referência para níveis de distorções harmônicas individuais e totais de tensão. É recomendado que, para cada frequência harmônica, os níveis permissíveis de distorção de corrente sejam obtidos por meio da divisão do valor máximo tolerável de distorção de tensão pela impedância harmônica do consumidor em questão. Dessa maneira, assegura-se que não existirão problemas relacionados à ultrapassagem dos limites de tensão.

A IEC também possui documentos que estabelecem limites para a emissão de correntes harmônicas, como a IEC 61000-3-2 (17), IEC 61000-3-4 (18), e IEC 61000-3-12 (19). Tais recomendações indicam as correntes harmônicas máximas que podem ser emitidas por equipamentos elétricos e eletrônicos conectados em baixa tensão.

Já a norma elaborada pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), a IEEE 519-2014 (16), apresenta limites tanto para as distorções harmônicas de corrente, quanto de tensão. Nesse caso, as distorções máximas permitidas para as correntes são definidas de acordo com a relação entre a capacidade do sistema e a capacidade de um consumidor (divisão entre a corrente de curto-circuito do barramento e a corrente de carga nominal do consumidor).

Pela perspectiva deste documento é possível conjecturar até mesmo uma união de esforços entre consumidores e concessionárias para manutenção dos patamares aceitáveis de distorções harmônicas. Isso porque, ao considerar que ainda há problemas de distorção de tensão quando todos os consumidores estão dentro de seus limites de distorção de corrente, poderia recair sobre a concessionária a tarefa de restaurar a qualidade da tensão (20). No entanto, o estabelecimento de limites para a emissão de correntes harmônicas em função do nível de curto-circuito do ponto de acoplamento é uma prática que desperta questionamentos, visto que uma mesma instalação pode apresentar, dependendo do ponto do sistema em que se encontra conectada, a possibilidade de injetar maior ou menor quantidade de correntes harmônicas no complexo elétrico.

De um modo geral, pode-se afirmar que vários países do mundo se baseiam fortemente nas recomendações da IEC para o estabelecimento de suas normas quanto ao fenômeno das distorções harmônicas (21). É o caso, por exemplo, do documento EN 50160 (22), que representa a base orientativa para diversos países europeus, a norma NRS 048 (23) que vigora na África do Sul e AS/NZS 61000-3-6 (24) na Austrália e Nova Zelândia. Já a IEEE 519 é utilizada pelos Estados Unidos. Há locais do mundo, ainda, que recebem influências das normas IEC e IEEE em conjunto (21).

Em termos de Brasil, o módulo de número oito do documento denominado Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (25), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), trata do assunto no âmbito dos sistemas de distribuição de energia. Já o submódulo 2.8 do documento Procedimentos de Rede (26), elaborado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), cuida das definições relacionadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Nota-se que ambos os documentos estabelecem valores de referência para os níveis de distorções harmônicas de tensão, sem nenhuma menção sobre o estabelecimento de limites para correntes harmônicas.

Merecem ser citados, em caráter complementar, documentos que visam estabelecer os requisitos técnicos mínimos para a conexão de novos acessantes à rede básica, levando em consideração diversos indicativos, inclusive o fenômeno das distorções harmônicas. No Brasil, o submódulo 3.6 do documento Procedimentos de Rede (27), concebido pelo ONS, define as exigências mínimas sobre a conexão de diversos elementos à rede, como centrais eólicas e cargas. Ainda, o ONS elaborou uma norma técnica, nomeada como NT 009/2016, com última revisão publicada em 2018 (28), com instruções para a realização de estudos e medições de

qualidade da energia elétrica relacionados aos acessos de parques eólicos, solares, consumidores livres e distribuidoras.

Em todos os documentos normativos citados não há qualquer menção sobre procedimentos para a realização do compartilhamento de responsabilidades harmônicas. Recebe destaque, contudo, um documento elaborado em 2011 pelo grupo de trabalho C4.109 do Cigré/CIREN, o *Cigré Technical Brochure 468: Review of Disturbance Emission Assessment Techniques* (29). Neste documento são encontradas orientações sobre princípios que podem ser utilizados como base para determinar os requisitos para a conexão, em sistemas de energia elétrica em média, alta ou extra-alta tensão, no que se refere à presença de distorções harmônicas, flutuação e desequilíbrio. Com particular interesse à temática das harmônicas, ressalta-se que é realizada uma discussão acerca da localização de fontes de distúrbios e o estabelecimento das contribuições individuais delas. Nesse sentido, apresenta-se uma metodologia para indicar a fonte predominante de distorções, a partir de informações relacionadas a medições e ao conhecimento prévio das impedâncias harmônicas das partes envolvidas.

2.3 Quanto a procedimentos destinados ao compartilhamento

Neste item são apresentados documentos de diversas origens, os quais envolvem artigos nacionais, internacionais e trabalhos acadêmicos a nível de mestrado e doutorado, sobre procedimentos destinados à realização do compartilhamento de responsabilidades harmônicas. Para efeito de organização, os subitens da sequência procuram dividir o levantamento bibliográfico de acordo com as principais metodologias existentes ou, em outras palavras, as publicações são separadas por assunto.

2.3.1 Método de Fluxo de Potência Harmônica

Dentre os trabalhos pesquisados, observa-se que em 1995 foi publicado o primeiro procedimento para a atribuição de responsabilidades harmônicas, o chamado Método do Fluxo de Potência Harmônica. Tal proposição não se compromete em definir parcelas de responsabilidades, mas tão somente visa à identificação da fonte de distorções dominante no Ponto de Acoplamento Comum (PAC). Com foco de atenção nas publicações relacionadas ao

procedimento, pode-se citar primeiramente (30), que apresenta uma proposta para identificar, em sistemas trifásicos, as cargas geradoras de distorções harmônicas. A metodologia é baseada na análise do fluxo de potência harmônica ativa. Testes experimentais foram executados, sendo que alguns procedimentos relacionados à instrumentação também foram evidenciados no artigo. Já em (31) há a apresentação de um processo de detecção do fluxo de potência harmônica com base na potência ativa instantânea, em circuitos trifásicos, e suas aplicações para identificar fontes harmônicas dominantes em sistemas elétricos de potência. Segundo os autores, o método proposto apresenta aplicação prática simples, sendo que sua validade foi demonstrada por meio simulações. Além disso, tópicos sobre erros de medição da potência harmônica foram teoricamente discutidos.

A publicação (32) possui o objetivo de estender os entendimentos acerca da teoria de definição do direcionamento do fluxo de potência harmônica em circuitos monofásicos e trifásicos. O artigo evidenciou dificuldades associadas ao estabelecimento das fontes geradoras de distorções em sistemas elétricos a partir dessa técnica, uma vez que a direção do fluxo de harmônicos pode mudar constantemente devido às variações do ângulo de disparo de conversores e outros tipos de cargas não lineares que apresentam alterações em seu perfil de maneira imprevisível.

No trabalho (33) é apresentado um procedimento baseado na análise das Séries de Fourier e, também, na direcionalidade do fluxo de potência harmônica. Para ilustrar a aplicabilidade da técnica proposta, simulações computacionais são realizadas e discutidas. Enquanto isso, (34) se propõe a analisar a validade da detecção da localização de fontes harmônicas a partir do método do fluxo de potência. Os problemas e as fragilidades associados à metodologia em foco foram evidenciados a partir de desenvolvimentos matemáticos e, além disso, diferentes investigações foram conduzidas em estudos de caso.

A publicação (35) exhibe uma metodologia para detecção de fontes de distorções harmônicas a partir da análise do sinal (positivo/negativo) do fluxo de potência harmônica ativa. Nesse sentido, simulações computacionais foram discutidas com o intuito de validar a proposição. Já (36) tem o objetivo de apresentar o projeto de um sistema de detecção de fontes harmônicas em complexos elétricos a partir da análise de fluxos harmônicos, com uma técnica nomeada de rede de correlação em cascata. O artigo evidenciou, assim, os fundamentos teóricos do procedimento proposto para detecção de cargas geradoras de distorções, o processo de treinamento da rede de conexão em cascata e a sua aplicação em simulações computacionais, usando como base o sistema de 14 barras do IEEE. Segundo os autores, a técnica permite

otimizar o processo de medição, diminuindo os pontos de alocação de medidores de qualidade da energia.

Ainda em termos internacionais, a pesquisa contida em (37) evidencia as principais fragilidades associadas ao Método do Fluxo de Potência Harmônica para identificação da fonte dominante de distorções. Dessa forma, em um primeiro momento, o artigo exibiu o desenvolvimento matemático das equações relacionadas, seguido de simulações computacionais e ensaios laboratoriais capazes de clarear aspectos essenciais acerca das incoerências da metodologia em questão.

Já em contexto nacional, pode-se afirmar que as referências (38) e (39) apresentam a base teórica desta metodologia e avançam no sentido de destacar as inconsistências do procedimento a partir de diferentes estudos, também realizados em termos de simulações e práticas em laboratório.

2.3.2 Método da Corrente Conforme e Não Conforme

O procedimento conhecido como Método da Corrente Conforme e Não Conforme foi proposto em 1996, em (40), com o compromisso de efetuar a separação das contribuições harmônicas entre um sistema supridor e um dado consumidor. Para isso, o método se baseia na separação das cargas em um grupo não linear, causador de distorções harmônicas, e um grupo linear. Dentro dessa perspectiva, os fundamentos teóricos do método foram exibidos e distintos exemplos de aplicação foram trabalhados. Complementarmente, o artigo (41) avança no sentido de separar as correntes em uma parcela dita conforme e outra nomeada não conforme. O método apresentado se compromete em compartilhar responsabilidades para distintos distúrbios da qualidade da energia, quais sejam: distorções harmônicas, desequilíbrios e flutuações de tensão. Além dos aspectos teóricos associados à metodologia, foram evidenciadas diversas simulações para ilustrar a aplicação da mesma.

A referência (42) apresenta um processo baseado em um refinamento do Método da Corrente Conforme e Não Conforme. Ademais, a proposição também considera, em sua análise, o sinal da potência harmônica ativa. Além dos fundamentos das metodologias, o artigo exibiu um diagrama de decisões que culmina na conclusão acerca da identificação da responsabilidade harmônica de determinado sistema.

A referência (43), por sua vez, é um trabalho brasileiro que procura sintetizar os fundamentos teóricos e avaliar o desempenho da metodologia. Neste sentido, o artigo evidenciou substanciais fragilidades da mesma, a partir de testes feitos em simulações computacionais e em escala laboratorial.

2.3.3 Método da Superposição

O Método da Superposição, publicado nas proximidades do ano 2000, mostra-se como uma proposta de grande difusão na literatura e fundamenta-se, conforme sua própria denominação sugere, em um clássico princípio de resolução de circuitos elétricos. A primeira referência relacionada a esta metodologia é a (44), a qual apresenta a realização do processo de compartilhamento de responsabilidades harmônicas a partir do princípio da superposição. Este artigo exibiu os fundamentos teóricos do método, considerando diferentes possibilidades de caracterização das impedâncias que constituem o complexo elétrico em análise, e trabalhou em estudos de caso para evidenciar a aplicação do procedimento. Além disso, foram feitas considerações a respeito de questões ligadas à implementação prática do processo.

Na sequência, em (45) a metodologia também é detalhada em termos teóricos e aplicada em análises de caso. Este trabalho discutiu, ainda, aspectos práticos e a sensibilidade da metodologia com relação a diferentes fatores, como os efeitos da mudança dos ângulos de fase de harmônicas, os erros de equipamentos de medição, as ressonâncias e o cancelamento de correntes.

É sabido que a principal dificuldade de aplicação prática do Método da Superposição é a necessidade de se conhecer o valor das impedâncias harmônicas do supridor e do consumidor. Dentro deste contexto, em (46) observa-se um primeiro trabalho acadêmico nacional relacionado à temática aqui em discussão: uma tese de doutorado. Tal tese propõe, avalia e sistematiza um procedimento para obtenção do compartilhamento de responsabilidades, incluindo a proposição de um processo destinado à modelagem das cargas harmônicas de consumidores.

Como frutos da linha de investigação do trabalho (46), notam-se as seguintes publicações: (47) e (48), em nível internacional, e (49), (50), (51), (52) e (53), em nível nacional. Em linhas gerais, tais artigos apresentaram a perspectiva de consolidar os procedimentos sumarizados em (46), ao aplicar e discutir a pertinência das propostas de compartilhamento e

de modelagem de cargas harmônicas. Para isto, foram usadas como ferramentas simulações computacionais e/ou ensaios práticos. Vale mencionar que (47), (48) e (53) demonstram a análise de instalações industriais reais, alimentadas por barramentos pré-distorcidos e constituídas por conjuntos de cargas lineares e não-lineares.

Prosseguindo, as publicações (54), (55), (56) e (57) propõem-se a realizar uma avaliação crítica do desempenho do Método da Superposição via dois caminhos: um com foco nas correntes harmônicas presentes no PAC, e outro fundamentado em tensões harmônicas. A partir da utilização de arranjos elétricos modelados em simulações, foram tecidas conclusões associadas às particularidades de cada procedimento, sempre tendo em vista as recomendações contidas em documentos normativos. Em (58) há um aprofundamento na análise da superposição de correntes, com o levantamento de supostas vulnerabilidades associadas à técnica, a partir de análises computacionais.

Já a referência (59) objetiva ressaltar a problemática do compartilhamento de responsabilidades diante do aumento da conexão, em complexos elétricos, de sistemas de geração de energia com base em fontes renováveis. Dessa maneira, utilizando-se do Método da Superposição, o trabalho apresentou um estudo completo acerca do processo de compartilhamento entre uma rede elétrica e um parque eólico. As modelagens e simulações foram feitas computacionalmente, e seus desdobramentos foram amplamente discutidos.

De maneira genérica, pode-se afirmar que apesar da inquestionável adequação física do processo de superposição com vistas ao compartilhamento, a demanda pelo valor das impedâncias harmônicas das partes envolvidas pode ser um fator complicador. Isso devido às dificuldades associadas à modelagem harmônica de cargas consumidoras, como descrito no item 2.4, além do fato de os sistemas elétricos estarem sujeitos a dinâmicas naturais que podem alterar tais impedâncias constantemente.

2.3.4 Método da Superposição Modificado

O Método da Superposição Modificado, pormenorizadamente apresentado em 2011 na tese (60), visa oferecer meios para contornar as dificuldades associadas à necessidade do conhecimento prévio das impedâncias harmônicas da rede e concessionária, para a aplicação do Método da Superposição tradicional. O procedimento prevê a conexão de uma impedância

dominante, a exemplo de filtros harmônicos passivos, no ponto de interesse ao compartilhamento.

Sobre o Método da Superposição Modificado, em nível internacional foram publicados (61), (62), (63) e (64). Já em abrangência nacional, notam-se: (65), (66), (67), (68), (69) e (70). De maneira genérica, tais trabalhos procuraram divulgar a metodologia e, ao mesmo tempo, colaborar para a solidificação da mesma.

Neste sentido, (61), (62), (63), (64), (65), (66) e (68) são artigos que apresentam filosofia de organização similares. Eles discutem os princípios físicos envolvidos no desenvolvimento do método e contemplam avaliações de desempenho, em diversas condições, por meio de simulações e práticas em laboratório. Vale ressaltar que em (63) o procedimento é analisado computacionalmente no sistema de 14 barras do IEEE.

Já (67), (69) e (70) abrangem estudos relacionados ao processo de obtenção de impedâncias dominantes visando à aplicação do Método da Superposição Modificado. Assim, a partir da utilização de alguns tipos de arranjos de filtragem, foi possível levantar potencialidades e limitações, e constatar uma primeira ideia acerca da sensibilidade do processo quanto a alterações no nível de dominância da impedância utilizada.

O Método da Superposição Modificado, dentro do cenário apresentado, mostra-se como uma proposta coerente em termos físicos, mas que carece de lapidações quanto a sua consolidação em termos práticos e funcionais.

2.3.5 Métodos baseados em outros princípios

Nos dias de hoje existem ainda muitas outras propostas, envolvendo diferentes campos de investigações, que buscam encontrar soluções viáveis para a problemática do compartilhamento. O objetivo deste item é apontar brevemente as principais produções encontradas dentro dessa perspectiva.

Em termos de trabalhos acadêmicos desenvolvidos, o assunto do compartilhamento de responsabilidades é tratado a partir de distintas ferramentas: (71) utiliza técnicas de filtro de Kalman e mínimos quadrados recursivo; (72) encara o problema a partir da perspectiva da separação cega de fontes, usando uma técnica de estatística conhecida como Análise de Componentes Independentes (ICA); (73) usa redes neurais artificiais (RNA); (74) lança mão de um método estatístico de regressão não paramétrica, chamado regressão polinomial local de

Kernel; (75) aprofunda na filosofia utilizada por (74) e desenvolve um estudo aplicado em sistema elétrico real; (76) e (77) empregam Teoria de Potência Conservativa, que é um modelo matemático para análise de circuitos elétricos sob condições senoidais e não senoidais.

Dos trabalhos citados, (72) é de nível internacional, ao passo que os demais são nacionais. Como frutos de pesquisas desenvolvidas em academias do Brasil, citam-se os seguintes artigos publicados em âmbito nacional: (78), (79), (80) e (81).

Em termos de artigos internacionais, tendências semelhantes são observadas com o desenvolvimento de linhas de investigação pautadas em variadas vertentes, como: redes neurais artificiais (82), (83), (84), (85), (86), (87); filtros de Kalman (88), (89); procedimentos estatísticos, como correlação, regressão e mínimos quadrados (90), (91), (92); estimação de estados (93); definições acerca de componentes de potência quando da existência de sinais não senoidais (94); e manuseamentos matemáticos e computacionais realizados a partir de medições captadas nos sistemas elétricos (95), (96), (97), (98), (99), (100).

Nota-se que, em termos gerais, muitos destes trabalhos se preocupam em identificar os principais pontos causadores de distorções em um sistema, sem tratar da definição efetiva de números que quantificam parcelas de responsabilidades cabidas às duas partes conectadas a um determinado ponto comum de interesse. Além disso, muitas das técnicas utilizadas carecem de avaliações de desempenho mais detalhadas que atestem, de fato, a consistência acertada delas perante os fenômenos físicos associados à problemática estudada.

2.3.6 Avaliação de desempenho de métodos

São observados trabalhos com o intuito de avaliar a adequação física de metodologias e dos resultados obtidos para o compartilhamento de responsabilidades a partir da aplicação das mesmas. Dentro deste panorama, são ressaltados uma dissertação de mestrado (101), artigos nacionais (102) e (103) e internacionais (104) e (105), os quais possuem o intuito de sintetizar e averiguar a base teórica dos principais processos que se propõem a realizar o compartilhamento. As avaliações críticas são encabeçadas, via de regra, por procedimentos experimentais e computacionais, e procuram destacar pontos fortes, inconsistências e dificuldades associadas à aplicação das técnicas investigadas.

O trabalho (106), por sua vez, não trata especificamente de metodologias relacionadas ao compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas, mas aborda

questões de cunho geral no que tange à presença e quantificação de harmônicos em sistemas elétricos. Nesse sentido, foi percorrido um completo panorama acerca de pontos técnicos ligados ao comportamento de potências na presença de sinais não senoidais, dificuldades inerentes aos processos de medição e a faceta econômica da alocação de harmônicos. O artigo ressaltou, ainda, a necessidade de se realizar investigações para se bem definir quais grandezas físicas devem ser monitoradas no contexto da qualidade da energia, e indicou sugestões sobre de que forma isso deve ser feito.

Tem-se em (107) uma pesquisa com o objetivo de apresentar alguns problemas relacionados ao compartilhamento de responsabilidades, bem como interpretar características de proposições atreladas ao tema. O artigo (108) contemplou uma investigação laboratorial do desempenho das metodologias trabalhadas no artigo referenciado em (107), a partir da utilização de uma configuração com duas cargas causadoras de distúrbios que se encontravam acopladas por meios mecânicos e elétricos.

Por fim, em (109) é promovida uma ampla discussão acerca do atual panorama atrelado à problemática do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas. O artigo pontuou uma visão geral sobre aspectos relacionados ao fato de que, embora existam diversas propostas para solução do desafio, ainda há uma grande lacuna quando se pensa na efetividade de tais proposições. Foram discutidas, dentro desse contexto, questões associadas ao significado físico do problema, documentos normativos e interpretação dos princípios que norteiam os métodos existentes para a identificação de fontes harmônicas.

2.4 Quanto a meios para a determinação de impedâncias harmônicas

Com base no contexto descrito até o presente momento, o Método da Superposição demanda o conhecimento das impedâncias harmônicas das partes envolvidas para a realização do compartilhamento de responsabilidades. Esta seção apresenta foco de atenções no levantamento de processos que visam à determinação de impedâncias harmônicas, sendo que sobre este assunto são encontradas publicações desde a década de 1980.

A literatura aponta a existência de processos invasivos e não invasivos. Pode-se dizer que os métodos não invasivos são caracterizados pela utilização de medições de formas de onda de tensões e correntes presentes no sistema, ou seja, usam o conteúdo harmônico já existente,

sem qualquer intervenção externa. Por outro lado, os testes de caráter invasivo carecem, via de regra, da posse de instrumentos capazes de injetar sinais distorcidos em determinado ponto do sistema, ou envolvem a realização de manobras em algum componente no complexo elétrico (7).

O trabalho de dissertação de mestrado (110) se preocupou em investigar a adequação de três proposições de modelagem de cargas: (46), (111) e (112), as quais procuravam retratar cargas lineares e não lineares a partir da utilização dos parâmetros R (resistência), L (indutância), C (capacitância) e, quando necessário, recursos representativos de harmônicos residuais. Como desdobramentos dos esforços relacionados à avaliação de tais metodologias, podem ser citadas as publicações nacionais (113), (114), (115) e (116).

Já a dissertação (117), baseada em trabalhos como (118), (119), (120), (121) e (122), apresenta uma proposta para a determinação das impedâncias harmônicas de cargas consumidoras a partir do chaveamento de capacitores, com vistas à posterior obtenção do compartilhamento de responsabilidades harmônicas.

Diversos trabalhos ainda podem ser citados como proposições voltadas à determinação de impedâncias harmônicas a partir de procedimentos invasivos, como é o caso de (123), (124), (125), (126) e (127). Outras propostas buscam definir processos não invasivos com apoio em recursos matemáticos, estatísticos e algoritmos voltados à análise inteligente de dados para a solução da questão, como é o caso de (128), (129), (130), (131), (132).

Diante do panorama descrito, é possível inferir que a maior parte das propostas existentes focam na determinação de impedâncias harmônicas de redes elétricas, e não de cargas consumidoras. Além disso, em sistemas caracterizados por uma dinâmica significativa a tarefa de definir impedâncias harmônicas se apresenta como um ponto desafiador.

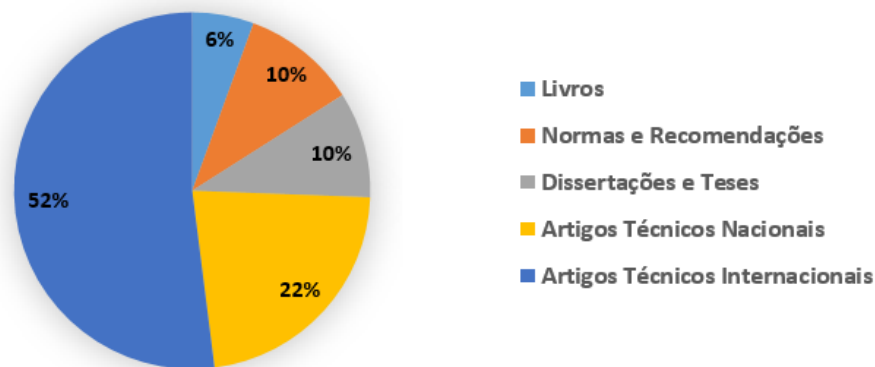
2.5 Síntese do levantamento realizado

Diante do panorama apresentado, nota-se a abrangência e complexidade do tema desta tese de doutorado. O presente capítulo, visando ao reconhecimento do estado da arte do assunto, promoveu o levantamento bibliográfico de um conjunto de 125 documentos. Ao organizá-los na forma de blocos de referências em comum, chega-se à relação descrita na sequência:

- 07 livros;
- 13 normas e recomendações;
- 12 publicações compreendendo dissertações de mestrado e teses de doutorado;
- 93 artigos técnicos, sendo 28 de alcance nacional e 65 de alcance internacional.

Com a intenção de facilitar a percepção visual do levantamento realizado, a Figura 2.1 sintetiza a composição numérica dos documentos encontrados, por blocos de referência.

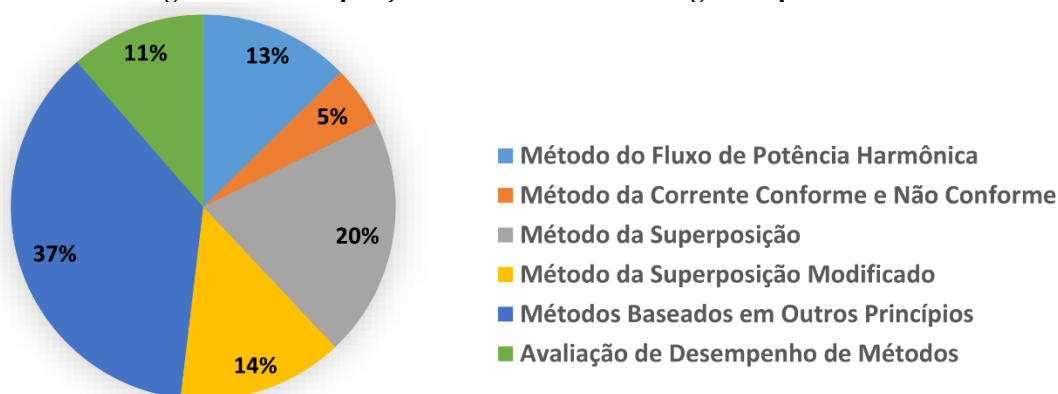
Figura 2.1 – Composição do levantamento bibliográfico por natureza da referência.



Fonte: Autoria própria.

Fica evidenciada, pois, a riqueza de material bibliográfico encontrado, trabalhos estes que representam frutos de pesquisas que vêm sendo realizadas há décadas. Não obstante ao expressivo número de documentos levantados, nota-se que a problemática do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas ainda representa um desafio inacabado no contexto da qualidade da energia elétrica.

Considerando agora as produções que contemplam diretamente o assunto de procedimentos voltados ao compartilhamento de harmônicas, para fins ilustrativos, realiza-se uma divisão entre seis vertentes ou princípios norteadores: Método do Fluxo de Potência Harmônica, Método da Corrente Conforme e Não Conforme, Método da Superposição, Método da Superposição Modificado, métodos baseados em outros princípios e avaliação de desempenho de métodos. Neste sentido, a Figura 2.2 enfatiza, quantitativamente, os trabalhos analisados, de acordo com fundamentos comuns.

Figura 2.2 – Composição do levantamento bibliográfico por assunto.

Fonte: Autoria própria.

Por fim, no panorama descrito é clara a relevância de pesquisas que objetivam estabelecer métodos efetivos para a quantificação das contribuições dos agentes envolvidos, na composição das distorções harmônicas presentes em um barramento de interesse.

Os capítulos seguintes retratam a contribuição da presente tese para o tema investigado. Diante do cenário apresentado, as principais lacunas que se pretende superar estão relacionadas à consolidação da aplicação do Método da Superposição Modificado, em termos práticos, e na concepção de novas metodologias para compartilhamento harmônico. Os procedimentos inovadores propostos buscam aliar consistência física acertada e viabilidade de aplicação, de modo a não depender do conhecimento prévio de grandezas difíceis ou inviáveis de se obter em campo. Ademais, é importante mencionar que é absolutamente inédita a estratégia de realização de intervenções em uma barra do sistema e extrapolação do compartilhamento para outro ponto de interesse. As proposições não são apenas descritas em termos de fundamentos teóricos, pois apresentam desempenho avaliado e discutido em âmbito computacional e laboratorial.

3 O MÉTODO DA IMPEDÂNCIA DOMINANTE (MID)

3.1 Considerações iniciais

Neste capítulo é apresentado o Método da Impedância Dominante (MID) para compartilhamento de responsabilidades harmônicas. É importante destacar que a fundamentação teórica da metodologia, apresentada em 3.2, foi inicialmente concebida em (60). Embora o procedimento tenha sido originalmente publicado como Método da Superposição Modificado, por questão de maior adequação ao seu princípio de funcionamento, ele é agora renomeado como Método da Impedância Dominante.

Como contribuições inéditas do presente trabalho ao MID, o item 3.3 trata de um completo estudo sobre o estabelecimento de mecanismos para relacionar o nível de dominância de configurações de filtragem com a eficiência do processo de compartilhamento de responsabilidades. Em seguida, em 3.4 a metodologia é testada por meio de simulações computacionais em um sistema elétrico de grande porte, o qual apresenta características de operação verossímeis a complexos possíveis de serem encontrados na realidade. No item 3.5 a avaliação de desempenho é realizada por meio de ensaios laboratoriais, em um arranjo elétrico que mantém aproximadamente a mesma estrutura daquele usado nas simulações, mas em escala reduzida.

Da maneira como o MID foi concebido, ele é capaz de fornecer os percentuais de responsabilidades harmônicas cabidas às partes envolvidas exatamente no ponto onde a impedância dominante é conectada. Reconhece-se, no entanto, que a possibilidade de instalar a impedância em um local e estimar o compartilhamento de responsabilidades em outro ponto do circuito elétrico pode ser de grande utilidade em termos práticos. No item 3.6 é apresentada a metodologia desenvolvida neste trabalho com objetivo de transcender o desafio mencionado. A Extrapolação do Compartilhamento pelo Método da Impedância Dominante (EMID) permite, por exemplo, que ao conectar uma impedância dominante no secundário do transformador de entrada de uma instalação, e com medições feitas exclusivamente no secundário, seja possível estimar o compartilhamento de responsabilidades no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), desde que se conheça as impedâncias harmônicas do transformador.

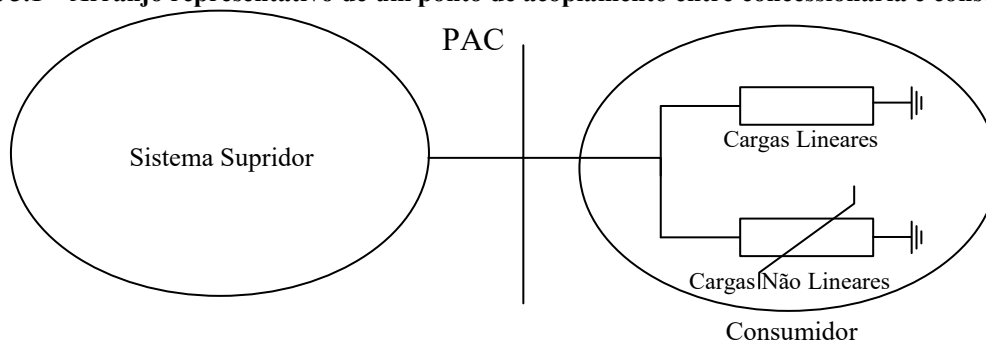
A avaliação da consistência da EMID é feita também em duas etapas: em 3.7 via simulações computacionais e em 3.8 a partir de ensaios laboratoriais.

3.2 Fundamentação teórica do MID

Primeiramente, considera-se importante ressaltar que nos desenvolvimentos realizados ao longo de todos os capítulos desta tese, são estudados casos de compartilhamento de responsabilidades harmônicas entre duas partes conectadas a um barramento: a rede elétrica e um acessante. Sabe-se que este acessante pode ser uma carga consumidora ou até mesmo um complexo gerador de energia elétrica a partir de fontes renováveis. Registrada essa observação, para fins de padronização da terminologia usada no trabalho, as duas partes serão chamadas, a partir deste ponto, de supridor e consumidor. Além disso, ressalta-se que todas as análises são feitas a partir de circuitos equivalentes monofásicos de complexos elétricos.

Conforme trata (60), o Método da Impedância Dominante (MID) é direcionado ao estabelecimento do compartilhamento de responsabilidades sobre distorções harmônicas de tensão constatadas em determinado barramento. Para elucidar os desenvolvimentos matemáticos relacionados à fundamentação física do procedimento, considera-se neste momento um arranjo elétrico genérico nos moldes mostrados na Figura 3.1, a qual exhibe, simplificada, um ponto de acoplamento comum entre o sistema equivalente da concessionária e uma determinada instalação consumidora.

Figura 3.1 – Arranjo representativo de um ponto de acoplamento entre concessionária e consumidor.



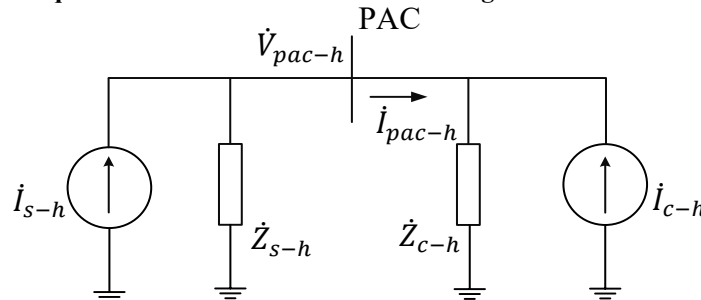
Fonte: Autoria própria.

Considera-se, neste caso, que a rede elétrica possui tensão pré-distorcida, uma vez que a ela são conectadas diversas cargas causadoras de distorções, e a unidade consumidora em foco é constituída por cargas lineares e não lineares. Seguindo este raciocínio, torna-se claro

que as distorções harmônicas constatadas no PAC são fruto da contribuição de ambas as partes conectadas ao barramento.

A Figura 3.2 mostra o arranjo da Figura 3.1 representado em termos do circuito equivalente monofásico de Norton da configuração. Na Figura 3.2, para uma dada ordem h , a corrente \dot{I}_{s-h} representa as distorções harmônicas originadas do circuito equivalente do supridor, \dot{I}_{c-h} é a corrente indicativa das distorções advindas do circuito do consumidor, enquanto \dot{Z}_{s-h} e \dot{Z}_{c-h} são as impedâncias harmônicas dos circuitos do supridor e do consumidor, respectivamente. É evidente que a corrente (\dot{I}_{pac-h}) e a tensão (\dot{V}_{pac-h}), presentes no PAC, são decorrentes da superposição dos efeitos das fontes de corrente representativas das distorções advindas das partes (\dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h}).

Figura 3.2 – Circuito equivalente de Norton evidenciando as grandezas envolvidas na problemática.



Fonte: Adaptado de SANTOS, I. N. (60).

Tendo em mente o clássico teorema de solução de circuitos baseado na superposição de efeitos (133), para uma ordem harmônica h , pode-se encontrar as contribuições individuais de cada uma das partes na corrente e na tensão total observadas no PAC. Embora se tenha consolidado o entendimento que o princípio da superposição não é aplicável a circuitos com características não lineares, neste caso a sua utilização é possível porque é particularizada para a análise de cada ordem harmônica h separadamente. Ora, como as análises de compartilhamento de responsabilidades são feitas de maneira independente para cada frequência de interesse, o arranjo exibido na Figura 3.2 é linear e, por isso, passível de ser resolvido com auxílio da superposição de efeitos.

Ao focar a atenção no compartilhamento de responsabilidades sobre a tensão harmônica total presente no PAC (\dot{V}_{pac-h}), na Figura 3.2 nota-se que esta grandeza pode ser obtida a partir do produto entre a impedância equivalente do arranjo (paralelo de \dot{Z}_{s-h} e \dot{Z}_{c-h}) e a soma das correntes das duas fontes presentes no circuito, como indica a equação (3.1).

$$\dot{V}_{pac-h} = \frac{\dot{Z}_{s-h} \cdot \dot{Z}_{c-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{c-h}} \cdot (\dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h}) \quad (3.1)$$

Aplicando, então, o princípio da superposição de efeitos, pode-se encontrar o fasor representativo da tensão harmônica no PAC proveniente das distorções causadas exclusivamente pelo circuito do supridor ($\dot{V}_{s-pac-h}$), e o fasor indicativo da tensão harmônica advinda apenas da unidade consumidora ($\dot{V}_{c-pac-h}$), como sugerem as equações (3.2) e (3.3).

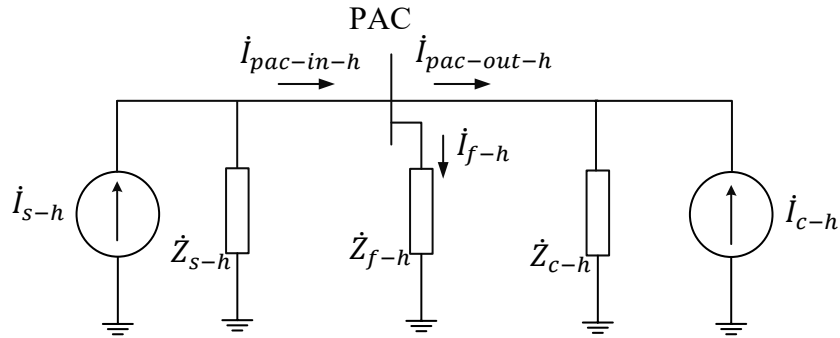
$$\dot{V}_{s-pac-h} = \frac{\dot{Z}_{s-h} \cdot \dot{Z}_{c-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{c-h}} \cdot \dot{I}_{s-h} \quad (3.2)$$

$$\dot{V}_{c-pac-h} = \frac{\dot{Z}_{s-h} \cdot \dot{Z}_{c-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{c-h}} \cdot \dot{I}_{c-h} \quad (3.3)$$

Como se observa, a determinação dos fasores $\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$ depende dos valores das impedâncias harmônicas das partes envolvidas. Todavia, como mencionado no item 2.4, estas informações são de difícil conhecimento e estimativa, principalmente quando se considera a dinâmica natural de sistemas elétricos. Neste ponto se iniciam as percepções que permitiram o desenvolvimento da Metodologia da Impedância Dominante.

Uma primeira informação importante de ser colocada se refere ao fato de $\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$ serem determinados a partir da multiplicação de um mesmo fator (paralelo das impedâncias \dot{Z}_{s-h} e \dot{Z}_{c-h}) pelas correntes \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} , respectivamente. Deste modo, infere-se que o conhecimento de tais correntes é condição suficiente para a obtenção das parcelas de responsabilidades do supridor e do consumidor.

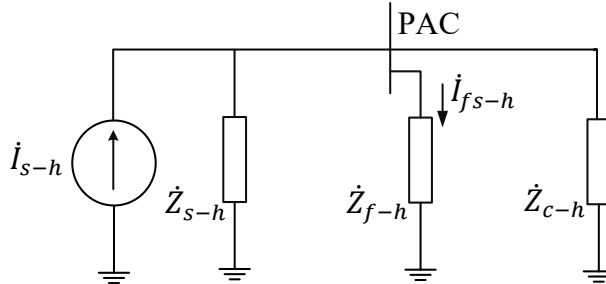
O MID sugere que seja instalada, no ponto de interesse ao compartilhamento, uma impedância que apresente baixo valor na frequência de análise e seja, portanto, dominante sobre as demais impedâncias desconhecidas presentes no arranjo elétrico. Evidentemente, tal impedância de caráter dominante pode ser caracterizada como um filtro harmônico sintonizado para a ordem em questão. A Figura 3.3 exibe o circuito equivalente de Norton do arranjo genérico considerando a inserção de um filtro harmônico no PAC.

Figura 3.3 – Arranjo evidenciando a inserção de uma impedância dominante no PAC.

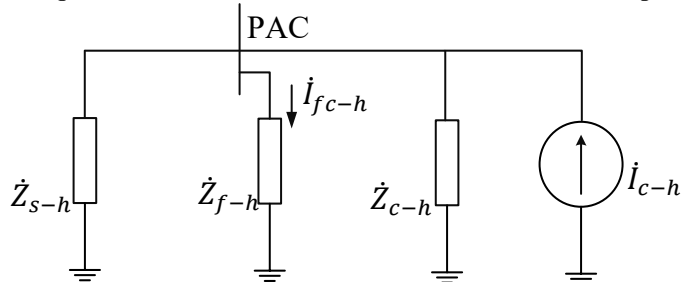
Fonte: Adaptado de SANTOS, I. N. (60).

Na Figura 3.3, para uma determinada ordem h , \dot{Z}_{f-h} representa a impedância dominante instalada no PAC, caracterizada por um filtro sintonizado nesta ordem, \dot{I}_{f-h} indica a corrente que flui pelo filtro, $\dot{I}_{pac-in-h}$ e $\dot{I}_{pac-out-h}$ indicam as correntes que fluem pelo PAC à montante e à jusante da impedância dominante, respectivamente.

Seguindo, ao aplicar o teorema da superposição de efeitos ao circuito apresentado na Figura 3.3, é simples chegar aos circuitos apresentados na Figura 3.4 e na Figura 3.5. Nota-se que \dot{I}_{fs-h} e \dot{I}_{fc-h} representam as correntes que fluem pela impedância dominante, na ordem h , pelo efeito apenas do circuito do supridor, e apenas do consumidor, respectivamente.

Figura 3.4 – Circuito equivalente de Norton considerando a contribuição apenas do sistema supridor.

Fonte: Adaptado de SANTOS, I. N. (60).

Figura 3.5 – Circuito equivalente de Norton considerando a contribuição apenas do consumidor.

Fonte: Adaptado de SANTOS, I. N. (60).

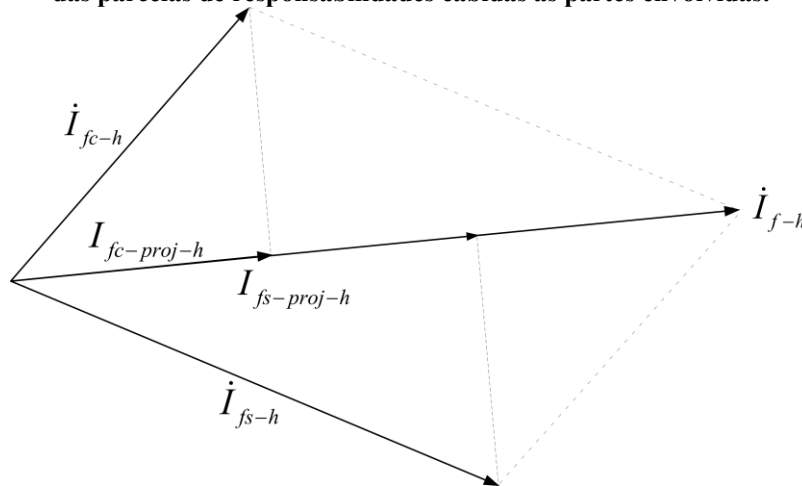
Uma vez que a impedância \dot{Z}_{f-h} tem caráter predominante sobre as demais, ou seja, apresenta valor significativamente inferior ao valor das impedâncias harmônicas do supridor e do consumidor, pode-se considerar que a corrente \dot{I}_{fs-h} é praticamente igual a \dot{I}_{s-h} e, mais ainda, a corrente \dot{I}_{fc-h} é praticamente igual a \dot{I}_{c-h} . Assim, a corrente total no filtro pode ser escrita como indicado na equação (3.4).

$$\dot{I}_{f-h} = \dot{I}_{fs-h} + \dot{I}_{fc-h} \cong \dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h} = \dot{I}_{pac-in-h} + (-\dot{I}_{pac-out-h}) \quad (3.4)$$

Na equação anterior percebe-se que a partir de medições das correntes harmônicas no PAC, à montante ($\dot{I}_{pac-in-h}$) e à jusante ($\dot{I}_{pac-out-h}$) da impedância dominante, é possível conhecer as correntes representativas das fontes harmônicas das partes envolvidas no processo do compartilhamento.

A partir desta constatação, para encontrar os percentuais de responsabilidades cabidos ao supridor e ao consumidor, o MID sugere que seja feita a projeção dos fasores \dot{I}_{fs-h} e \dot{I}_{fc-h} sobre o fasor da corrente total de ordem h que flui pelo filtro (\dot{I}_{f-h}). Este procedimento, ilustrado na Figura 3.6, é inspirado no clássico Método da Superposição (44), (45).

Figura 3.6 – Projeção de fasores sobre a corrente total que flui pela impedância dominante para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas.



Fonte: SANTOS, I. N. (60).

Na figura anterior, $I_{fs-proj-h}$ indica a projeção de \dot{I}_{fs-h} (ou $\dot{I}_{pac-in-h}$) sobre \dot{I}_{f-h} , o que resulta em um número escalar que define a parcela de responsabilidade do supridor. Já $I_{fc-proj-h}$ indica a projeção de \dot{I}_{fc-h} (ou $-\dot{I}_{pac-out-h}$) sobre \dot{I}_{f-h} , o que fornece a parcela de

responsabilidade do consumidor. Para estabelecimento dos percentuais, o módulo de \dot{I}_{f-h} é tido como sendo a totalidade, ou 100%, enquanto $I_{fs-proj-h}$ e $I_{fc-proj-h}$ representam as parcelas indicativas do percentual que cada parte contribui para a corrente total que flui pela impedância dominante.

Vale destacar que apesar de o procedimento descrito prezar pelo manuseamento de grandezas relacionadas a valores de correntes, como demonstrado no início do desenvolvimento, a base que fundamenta o método partiu da estratégia de superposição de tensões harmônicas e, conseqüentemente, o procedimento fornece a atribuição de responsabilidades quanto a harmônicos de tensão presentes no PAC.

3.3 Considerações sobre o grau de dominância da impedância

Durante o desenvolvimento dos princípios norteadores do MID fica claro que o estabelecimento das igualdades apontadas na equação (3.4) e, conseqüentemente, o sucesso da metodologia dependem diretamente do grau de dominância da impedância conectada ao PAC, sobre as impedâncias harmônicas das partes envolvidas no processo de compartilhamento. Naturalmente, associa-se tal impedância dominante a um dispositivo passivo de filtragem harmônica ou, em outras palavras, a um filtro harmônico.

No contexto apresentado, este trabalho pretende contribuir para a consolidação do MID, no sentido de descrever e avaliar a utilização de diferentes configurações de filtragem como impedâncias dominantes. Pode-se dizer que o objetivo central dos estudos tratados neste item é estabelecer estratégias que possam assegurar a boa precisão do processo de compartilhamento de responsabilidades via MID.

Como é sabido, os filtros harmônicos são arranjos elétricos destinados a oferecer meios para que correntes harmônicas e, por conseguinte, tensões harmônicas sejam atenuadas (7), (9). De maneira geral, estes dispositivos podem ser classificados, quanto à filosofia de concepção, em:

- Filtros passivos: arranjos destinados a propiciar um caminho de baixa impedância harmônica, compatível com o processo de filtragem desejado. São constituídos por composições de elementos ditos passivos: resistores, indutores e capacitores;

- Filtros ativos: equipamentos que efetuam o processo de compensação a partir da injeção de componentes harmônicas em contraposição àquelas existentes nas redes elétricas. São constituídos por elementos ativos fundamentados em técnicas da eletrônica de potência.

Diante da definição anterior e tendo em mente os princípios físicos do MID, conclui-se que apenas as configurações de filtros passivos, conectados em derivação, representam possíveis formas de se obter as almejadas impedâncias dominantes.

Na literatura é bem estabelecida a classificação de filtros passivos entre sintonizados e amortecidos (9), (11), (12), (134), (135), (136). À primeira vista, a utilização de filtros amortecidos ou sintonizados em mais de uma frequência pode parecer uma alternativa atraente, visto que essas configurações oferecem impedâncias baixas não apenas para uma única frequência específica. Nesse contexto, a aplicação do MID para diferentes ordens harmônicas poderia ser conduzida a partir de um mesmo arranjo de filtragem.

Tendo em mente essa possibilidade, no Apêndice A são estudadas propriedades físicas e curvas características de distintos arranjos passivos. Em seguida, no referido apêndice, cada tipo de filtro passa por um minucioso teste de desempenho, com vistas à avaliação da eficiência do MID diante da utilização de diferentes configurações de impedâncias dominantes.

As investigações realizadas no Apêndice A revelaram, em linhas gerais, que as impedâncias oferecidas por filtros amortecidos e por filtros sintonizados em mais de uma frequência não são suficientemente baixas para garantir o bom desempenho do compartilhamento de responsabilidades. De fato, o arranjo passivo sintonizado em uma frequência, que é a configuração de filtragem mais simples, foi a única que apresentou teor de dominância satisfatório para os fins pretendidos.

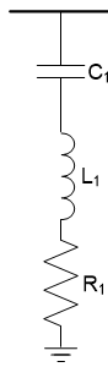
3.3.1 Aprofundamento na investigação acerca do filtro sintonizado em uma frequência para a obtenção da impedância dominante

A partir dos estudos conduzidos no Apêndice A, descartou-se a possibilidade de utilizar filtros amortecidos e sintonizados em mais de uma frequência para aplicação do MID. Assim, é necessário usar um filtro passivo sintonizado em cada frequência que se deseja obter o compartilhamento de responsabilidades.

A presente seção objetiva investigar a operação desse tipo de filtro considerando três características que podem ocasionar significativo impacto no desempenho da aplicação da metodologia supramencionada, são elas: fator de qualidade, dessintonia e multissintonia. Na sequência cada uma desses aspectos são brevemente discutidos.

O circuito que caracteriza o filtro passivo sintonizado em uma frequência é apresentado na Figura A.1 (a) do Apêndice A. Tendo em vista a comodidade do leitor, o referido arranjo é exibido também na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Arranjo do filtro passivo sintonizado em uma frequência.



Fonte: SANTOS, I. N. (60).

3.3.1.1 Fator de Qualidade

O fator de qualidade ou fator de mérito (Q) está associado à relação entre a energia armazenada e a energia dissipada em um circuito (136). Para a frequência de sintonia do filtro (ω_0), quando a impedância do mesmo é resistiva, o fator de qualidade pode ser calculado conforme indicado na equação (3.5).

$$Q = \frac{\omega_0 L_1}{R_1} = \frac{1}{\omega_0 C_1 R_1} \quad (3.5)$$

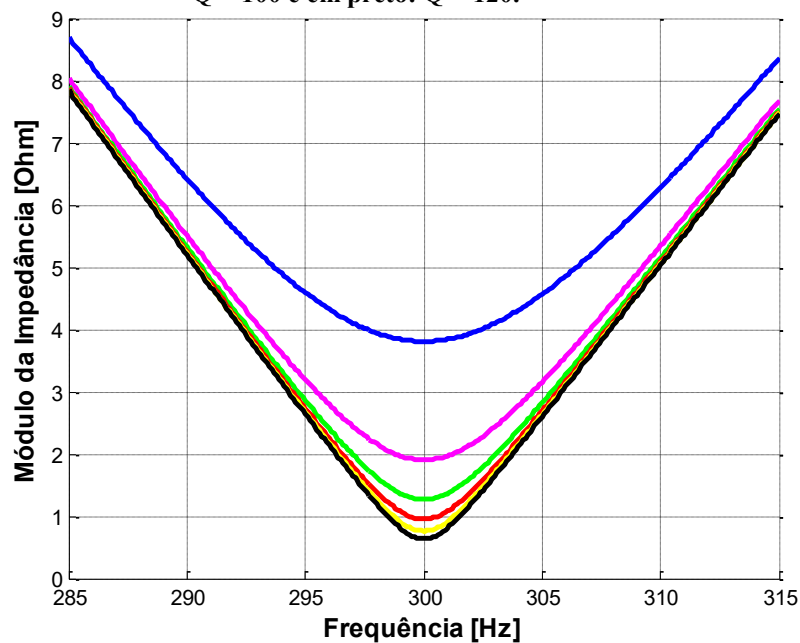
Ressalta-se que na equação (3.5) as denominações dadas aos elementos do circuito (R_1 , L_1 e C_1) estão em consonância com a nomenclatura usada na Figura 3.7.

Buscando compreender o que representa esse parâmetro de maneira mais prática, pode-se afirmar que ele está relacionado à seletividade do filtro. Assim, quanto menor for o valor de

R_1 , maior é o fator de qualidade, mais seletivo é o circuito e, conseqüentemente, menor é a faixa de frequências (em torno da frequência de sintonia) que o filtro é capaz de filtrar.

Para ilustrar esse fenômeno, a Figura 3.8 apresenta o traçado do módulo da impedância do circuito de um filtro sintonizado em uma frequência para distintos Q . O arranjo encontra-se sintonizado na frequência de 300 Hz ($h = 5$) e é constituído pelos parâmetros $L_1 = 40,41mH$ e $C_1 = 6,96\mu F$, mesma configuração discutida da Figura A.3 até a Figura A.5 do Apêndice A.

Figura 3.8 – Comportamento do módulo da impedância do filtro para diferentes valores de fator de qualidade. Em azul: $Q = 20$, em magenta: $Q = 40$, em verde: $Q = 60$, em vermelho: $Q = 80$, em amarelo: $Q = 100$ e em preto: $Q = 120$.



Fonte: Autoria própria.

Dessa maneira, uma vez que a alteração do fator de qualidade influencia diretamente no valor de impedância do filtro na frequência de sintonia, os estudos subsequentes buscarão avaliar o quanto a mudança de Q impacta no desempenho da Metodologia da Impedância Dominante para atribuição de responsabilidades harmônicas.

3.3.1.2 Dessintonia

Um fenômeno que merece destaque quando do projeto de filtros passivos sintonizados se refere à dessintonia (d). De maneira geral, o processo de filtragem é sensível a variações de frequência, que ocorrem devido a dois motivos principais, quais sejam: as oscilações de

frequência da rede e as alterações de valores de capacitância e indutância dos componentes do filtro. Somam-se a esses fatores os desvios de sintonia inerentes à montagem, causados pelas faixas de tolerância de fabricação dos reatores e capacitores e, ainda, os erros inerentes aos processos de medição.

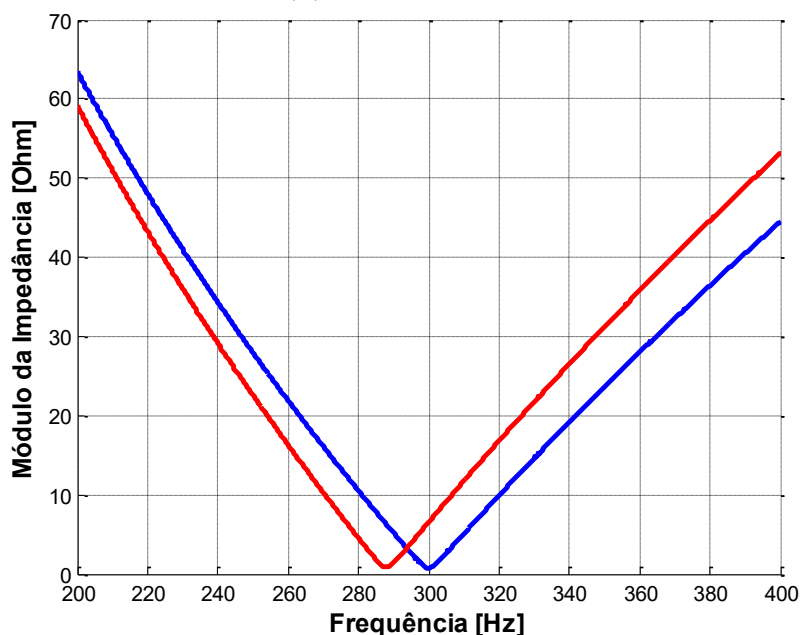
Sabe-se que as alterações de frequência da rede ocorrem devido a efeitos da geração ou modificação expressiva e repentina nas cargas, enquanto as alterações de indutância dos filtros advêm da não linearidade magnética dos indutores. Todavia, o fator mais relevante para contribuir para alteração da sintonia de filtros se refere às mudanças nos valores de capacitância que ocorrem, principalmente, por causa de variações de temperatura e envelhecimento dos bancos de capacitores (136).

Dessa forma, é importante levar em consideração os fenômenos acima discutidos para garantir que o processo de filtragem ocorra de maneira satisfatória. Em termos de projeto, uma prática comumente adotada define a sintonização não exatamente no valor da frequência harmônica que se deseja filtrar, mas sim em uma frequência um pouco inferior a essa. Assim, por exemplo, quando se deseja mitigar a quinta ordem harmônica, projeta-se a sintonia do circuito para a ordem 4,7. Com isso, na frequência de 300 Hz o circuito do filtro apresenta impedância com teor levemente indutivo e, na medida em que algumas unidades capacitivas forem perdidas, com o decorrer do tempo, a frequência de sintonia tende a aumentar (chegando mais próxima da ordem 5) e a impedância do arranjo tende a se tornar resistiva.

Outra possibilidade que justifica a dessintonia em termos de projetos de filtro, trata-se, em alguns casos particulares, da necessidade de diminuição do fator de qualidade do dispositivo na frequência a ser filtrada, seja para dispensar a utilização de resistores ou ainda evitar sobrecorrentes no filtro.

A Figura 3.9 mostra, para efeito de ilustração, as curvas do módulo da impedância em função da frequência, de filtros sintonizados nas ordens 4,7 e 5.

Figura 3.9 – Comportamento do módulo da impedância do filtro para diferentes sintonias. Em vermelho: sintonia na ordem 4,7; em azul: sintonia na ordem 5.



Fonte: Autoria própria.

Tendo isso em mente, investigações posteriores buscam avaliar a influência da dessintonização na eficiência da definição da impedância dominante para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas.

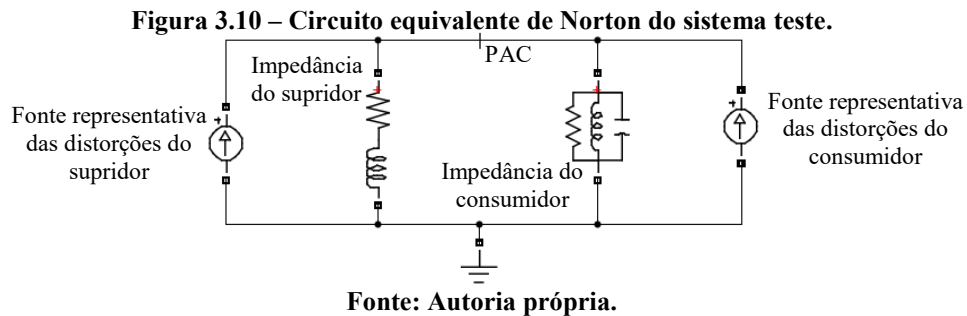
3.3.1.3 Multissintonia

Como diversas vezes mencionado, o Método da Impedância Dominante necessita da instalação de uma impedância dominante, no ponto de interesse, para cada uma das frequências harmônicas que se deseja realizar o compartilhamento de responsabilidades. Em vista disso, uma alternativa que pode conferir maior praticidade e economia à aplicação da metodologia se refere à utilização de um mesmo indutor com diferentes possibilidades de chaveamento de unidades capacitivas, de forma a obter a sintonia em várias frequências. Por outro lado, outra alternativa faz alusão à utilização de um mesmo banco de capacitores e um indutor com tapes, com o intuito de conseguir um arranjo capaz de proporcionar a sintonização em distintas ordens harmônicas. Também, ambas possibilidades podem ser levadas em consideração quando da busca por um dispositivo mais compacto para aplicação em campo.

Na sequência são mostrados os resultados obtidos a partir da aplicação do MID considerando o uso de elementos capacitivos e indutivos de diferentes potências.

3.3.1.4 Aplicação computacional de diferentes parametrizações de filtros sintonizados com vistas ao compartilhamento

Com base nos três fenômenos anteriormente destacados, na sequência são exibidos os resultados obtidos a partir da realização de simulações que utilizam diferentes composições de filtros passivos sintonizados em uma frequência. Nas simulações lançou-se mão do mesmo sistema elétrico teste utilizado nos estudos descritos no Apêndice A. O circuito equivalente monofásico de Norton é mostrado na Figura 3.10, enquanto a sua parametrização detalhada, bem como os valores de gabarito para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas no PAC podem ser consultados no item A.2.1 do Apêndice A.



Nesse sentido, a Tabela 3.1, Tabela 3.2, Tabela 3.3, Tabela 3.4 e a Tabela 3.5 condensam os resultados das simulações, respectivamente, para as ordens harmônicas 3, 5, 7, 11 e 13. Cada uma das tabelas apresenta informações relacionadas à utilização de diferentes quantidades de unidades capacitivas para constituição do filtro, de forma a obter as seguintes potências capacitivas (Q_{cap}): 250 kVAr, 500 kVAr, 750 kVAr e 1000 kVAr. Destaca-se que para análise da multissintonia, foram considerados os mesmos valores de C (com suas respectivas potências) e variou-se a magnitude dos indutores de modo a alcançar a sintonia nas ordens harmônicas em foco.

Para cada uma dessas potências, são testados quatro distintos valores de fator de qualidade (Q): 60, 80, 100 e 120. Em cada um desses casos são consideradas as dessintonias (d) de 0, 0,1 e 0,3 da ordem harmônica em questão.

Além dos valores de Q_{cap} , Q e d , as tabelas apresentam os parâmetros R, L e C que constituem os filtros testados e as respostas obtidas, em cada situação, para as porcentagens de responsabilidade do sistema supridor e consumidor. Ainda, na última coluna das tabelas são evidenciados os valores de Distorção Individual de Tensão (DIT) obtidas no PAC a partir da conexão dos filtros testados.

Tabela 3.1 – Resultados do desempenho dos filtros sintonizados para $h = 3$.

Q_{cap} (kVAr)	Q	d	R (Ω)	L (mH)	C (μ F)	Resp. Supridor (%) (Gabarito: 39,47%)	Resp. Cons. (%) (Gabarito: 60,53%)	DIT* (%)
250	60	0	4,23	224,51	3,48	59,30	40,70	4,09
		0,1	4,53	240,27	3,48	37,68	62,32	5,87
		0,3	5,22	277,18	3,48	46,43	53,57	7,06
	80	0	3,17	224,51	3,48	54,27	45,73	3,36
		0,1	3,40	240,27	3,48	38,00	62,00	5,85
		0,3	3,92	277,18	3,48	46,46	53,54	7,06
	100	0	2,54	224,51	3,48	51,25	48,75	2,83
		0,1	2,72	240,27	3,48	38,18	61,82	5,84
		0,3	3,13	277,18	3,48	46,48	53,52	7,07
	120	0	2,12	224,51	3,48	49,23	50,77	2,44
		0,1	2,26	240,27	3,48	38,30	61,70	5,84
		0,3	2,61	277,18	3,48	46,49	53,51	7,07
500	60	0	2,12	112,26	6,96	49,23	50,77	2,44
		0,1	2,26	120,13	6,96	26,61	73,39	4,72
		0,3	2,61	138,59	6,96	42,97	57,03	6,48
	80	0	1,59	112,26	6,96	46,71	53,29	1,90
		0,1	1,70	120,13	6,96	27,18	72,82	4,69
		0,3	1,96	138,59	6,96	43,03	56,97	6,48
	100	0	1,27	112,26	6,96	45,20	54,80	1,56
		0,1	1,36	120,13	6,96	27,51	72,49	4,68
		0,3	1,57	138,59	6,96	43,07	56,93	6,48
	120	0	1,06	112,26	6,96	44,20	55,80	1,31
		0,1	1,13	120,13	6,96	27,73	72,27	4,68
		0,3	1,31	138,59	6,96	43,09	56,91	6,49
750	60	0	1,41	74,84	10,45	45,87	54,13	1,71
		0,1	1,51	80,09	10,45	16,60	83,40	3,95
		0,3	1,74	92,39	10,45	39,61	60,39	5,99
	80	0	1,06	74,84	10,45	44,20	55,80	1,31
		0,1	1,13	80,09	10,45	17,39	82,61	3,92
		0,3	1,31	92,39	10,45	39,70	60,30	5,99
	100	0	0,85	74,84	10,45	43,19	56,81	1,06
		0,1	0,91	80,09	10,45	17,84	82,16	3,91
		0,3	1,04	92,39	10,45	39,75	60,25	5,99
	120	0	0,71	74,84	10,45	42,52	57,48	0,89
		0,1	0,75	80,09	10,45	18,13	81,87	3,91
		0,3	0,87	92,39	10,45	39,79	60,21	5,99
1000	60	0	1,06	56,13	13,93	44,20	55,80	1,31
		0,1	1,13	60,07	13,93	7,52	92,48	3,39
		0,3	1,31	69,29	13,93	36,35	63,65	5,57
	80	0	0,79	56,13	13,93	42,94	57,06	1,00
		0,1	0,85	60,07	13,93	8,47	91,53	3,36
		0,3	0,98	69,29	13,93	36,47	63,53	5,57
	100	0	0,63	56,13	13,93	42,18	57,82	0,81
		0,1	0,68	60,07	13,93	9,02	90,98	3,35
		0,3	0,78	69,29	13,93	36,53	63,47	5,57
	120	0	0,53	56,13	13,93	41,68	58,32	0,68
		0,1	0,57	60,07	13,93	9,38	90,62	3,35
		0,3	0,65	69,29	13,93	36,58	63,42	5,57

Fonte: Autoria própria.

(*) o valor da DIT antes da conexão do filtro, para a ordem harmônica em questão, é 7,76%.

Tabela 3.2 – Resultados do desempenho dos filtros sintonizados para $h = 5$.

Q_{cap} (kVAr)	Q	d	R (Ω)	L (mH)	C (μ F)	Resp. Supridor (%) (Gabarito: 22,00%)	Resp. Cons. (%) (Gabarito: 78,00%)	DIT* (%)
250	60	0	2,54	80,83	3,48	16,30	83,70	1,55
		0,1	2,64	84,16	3,48	19,25	80,75	2,87
		0,3	2,87	91,47	3,48	36,54	63,46	4,93
	80	0	1,90	80,83	3,48	17,71	82,29	1,20
		0,1	1,98	84,16	3,48	18,69	81,31	2,81
		0,3	2,16	91,47	3,48	36,43	63,57	4,93
	100	0	1,52	80,83	3,48	18,56	81,44	0,97
		0,1	1,59	84,16	3,48	18,34	81,66	2,79
		0,3	1,72	91,47	3,48	36,36	63,64	4,93
	120	0	1,27	80,83	3,48	19,12	80,88	0,82
		0,1	1,32	84,16	3,48	18,10	81,90	2,78
		0,3	1,44	91,47	3,48	36,31	63,69	4,94
500	60	0	1,27	40,41	6,96	19,12	80,88	0,82
		0,1	1,32	42,08	6,96	4,28	95,72	1,77
		0,3	1,44	45,74	6,96	26,62	73,38	3,64
	80	0	0,95	40,41	6,96	19,83	80,17	0,62
		0,1	0,99	42,08	6,96	3,66	96,34	1,72
		0,3	1,08	45,74	6,96	26,44	73,56	3,64
	100	0	0,76	40,41	6,96	20,25	79,75	0,50
		0,1	0,79	42,08	6,96	3,28	96,72	1,70
		0,3	0,86	45,74	6,96	26,34	73,66	3,64
	120	0	0,63	40,41	6,96	20,53	79,47	0,42
		0,1	0,66	42,08	6,96	3,02	96,98	1,69
		0,3	0,72	45,74	6,96	26,27	73,73	3,64
750	60	0	0,85	26,94	10,45	20,06	79,94	0,56
		0,1	0,88	28,05	10,45	4,19	95,81	1,28
		0,3	0,96	30,49	10,45	19,00	81,00	2,88
	80	0	0,63	26,94	10,45	20,53	79,47	0,42
		0,1	0,66	28,05	10,45	4,68	95,32	1,24
		0,3	0,72	30,49	10,45	18,79	81,21	2,88
	100	0	0,51	26,94	10,45	20,81	79,19	0,34
		0,1	0,53	28,05	10,45	4,98	95,02	1,23
		0,3	0,57	30,49	10,45	18,67	81,33	2,88
	120	0	0,42	26,94	10,45	21,00	79,00	0,28
		0,1	0,44	28,05	10,45	5,17	94,83	1,22
		0,3	0,48	30,49	10,45	18,58	81,42	2,88
1000	60	0	0,63	20,21	13,93	20,53	79,47	0,42
		0,1	0,66	21,04	13,93	8,63	91,37	1,00
		0,3	0,72	22,87	13,93	12,96	87,04	2,38
	80	0	0,48	20,21	13,93	20,89	79,11	0,32
		0,1	0,50	21,04	13,93	9,00	91,00	0,97
		0,3	0,54	22,87	13,93	12,74	87,26	2,38
	100	0	0,38	20,21	13,93	21,10	78,90	0,25
		0,1	0,40	21,04	13,93	9,22	90,78	0,96
		0,3	0,43	22,87	13,93	12,61	87,39	2,38
	120	0	0,32	20,21	13,93	21,24	78,76	0,21
		0,1	0,33	21,04	13,93	9,36	90,64	0,95
		0,3	0,36	22,87	13,93	12,52	87,48	2,38

Fonte: Autoria própria.

(*) o valor da DIT antes da conexão do filtro, para a ordem harmônica em questão, é 7,59%.

Tabela 3.3 – Resultados do desempenho dos filtros sintonizados para $h = 7$.

Q_{cap} (kVAr)	Q	d	R (Ω)	L (mH)	C (μ F)	Resp. Supridor (%) (Gabarito: 73,03%)	Resp. Cons. (%) (Gabarito: 26,97%)	DIT* (%)
250	60	0	1,81	41,24	3,48	86,81	13,19	0,47
		0,1	1,87	42,44	3,48	58,57	41,43	0,85
		0,3	1,98	45,01	3,48	1,70	98,30	1,86
	80	0	1,36	41,24	3,48	83,33	16,67	0,36
		0,1	1,40	42,44	3,48	54,99	45,01	0,81
		0,3	1,48	45,01	3,48	5,00	95,00	1,86
	100	0	1,09	41,24	3,48	81,24	18,76	0,29
		0,1	1,12	42,44	3,48	52,84	47,16	0,79
		0,3	1,19	45,01	3,48	6,77	93,23	1,86
	120	0	0,91	41,24	3,48	79,85	20,15	0,24
		0,1	0,93	42,44	3,48	51,40	48,60	0,78
		0,3	0,99	45,01	3,48	7,88	92,12	1,86
500	60	0	0,91	20,62	6,96	79,85	20,15	0,24
		0,1	0,93	21,22	6,96	65,73	34,27	0,46
		0,3	0,99	22,51	6,96	35,57	64,43	1,12
	80	0	0,68	20,62	6,96	78,11	21,89	0,18
		0,1	0,70	21,22	6,96	63,94	36,06	0,44
		0,3	0,74	22,51	6,96	33,67	66,33	1,12
	100	0	0,54	20,62	6,96	77,06	22,94	0,15
		0,1	0,56	21,22	6,96	62,86	37,14	0,43
		0,3	0,59	22,51	6,96	32,53	67,47	1,11
	120	0	0,45	20,62	6,96	76,37	23,63	0,12
		0,1	0,47	21,22	6,96	62,15	37,85	0,42
		0,3	0,49	22,51	6,96	31,77	68,23	1,12
750	60	0	0,60	13,75	10,45	77,53	22,47	0,16
		0,1	0,62	14,15	10,45	68,12	31,88	0,32
		0,3	0,66	15,00	10,45	48,01	51,99	0,80
	80	0	0,45	13,75	10,45	76,37	23,63	0,12
		0,1	0,47	14,15	10,45	66,92	33,08	0,30
		0,3	0,49	15,00	10,45	46,74	53,26	0,80
	100	0	0,36	13,75	10,45	75,67	24,33	0,10
		0,1	0,37	14,15	10,45	66,20	33,80	0,29
		0,3	0,40	15,00	10,45	45,98	54,02	0,79
	120	0	0,30	13,75	10,45	75,21	24,79	0,08
		0,1	0,31	14,15	10,45	65,73	34,27	0,29
		0,3	0,33	15,00	10,45	45,48	54,52	0,79
1000	60	0	0,45	10,31	13,93	76,37	23,63	0,12
		0,1	0,47	10,61	13,93	69,31	30,69	0,24
		0,3	0,49	11,25	13,93	54,23	45,77	0,62
	80	0	0,34	10,31	13,93	75,50	24,50	0,09
		0,1	0,35	10,61	13,93	68,41	31,59	0,23
		0,3	0,37	11,25	13,93	53,28	46,72	0,62
	100	0	0,27	10,31	13,93	74,98	25,02	0,07
		0,1	0,28	10,61	13,93	67,88	32,12	0,22
		0,3	0,30	11,25	13,93	52,71	47,29	0,62
	120	0	0,23	10,31	13,93	74,63	25,37	0,06
		0,1	0,23	10,61	13,93	67,52	32,48	0,22
		0,3	0,25	11,25	13,93	52,33	47,67	0,62

Fonte: Autoria própria.

(*) o valor da DIT antes da conexão do filtro, para a ordem harmônica em questão, é 5,16%.

Tabela 3.4 – Resultados do desempenho dos filtros sintonizados para $h = 11$.

Q_{cap} (kVAr)	Q	d	R (Ω)	L (mH)	C (μ F)	Resp. Supridor (%) (Gabarito: 31,96%)	Resp. Cons. (%) (Gabarito: 68,04%)	DIT* (%)
250	60	0	1,15	16,70	3,48	32,39	67,61	0,18
		0,1	1,18	17,01	3,48	33,15	66,85	0,28
		0,3	1,22	17,65	3,48	34,54	65,46	0,66
	80	0	0,87	16,70	3,48	32,27	67,73	0,14
		0,1	0,88	17,01	3,48	33,04	66,96	0,25
		0,3	0,91	17,65	3,48	34,44	65,56	0,66
	100	0	0,69	16,70	3,48	32,20	67,80	0,11
		0,1	0,71	17,01	3,48	32,97	67,03	0,23
		0,3	0,73	17,65	3,48	34,38	65,62	0,65
	120	0	0,58	16,70	3,48	32,15	67,85	0,09
		0,1	0,59	17,01	3,48	32,93	67,07	0,23
		0,3	0,61	17,65	3,48	34,35	65,65	0,65
500	60	0	0,58	8,35	6,96	32,15	67,85	0,09
		0,1	0,59	8,50	6,96	32,55	67,45	0,14
		0,3	0,61	8,82	6,96	33,33	66,67	0,33
	80	0	0,43	8,35	6,96	32,09	67,91	0,07
		0,1	0,44	8,50	6,96	32,49	67,51	0,13
		0,3	0,46	8,82	6,96	33,27	66,73	0,33
	100	0	0,35	8,35	6,96	32,06	67,94	0,06
		0,1	0,35	8,50	6,96	32,46	67,54	0,12
		0,3	0,37	8,82	6,96	33,24	66,76	0,33
	120	0	0,29	8,35	6,96	32,03	67,97	0,05
		0,1	0,29	8,50	6,96	32,43	67,57	0,11
		0,3	0,30	8,82	6,96	33,22	66,78	0,33
750	60	0	0,38	5,57	10,45	32,07	67,93	0,06
		0,1	0,39	5,67	10,45	32,34	67,66	0,09
		0,3	0,41	5,88	10,45	32,88	67,12	0,22
	80	0	0,29	5,57	10,45	32,03	67,97	0,05
		0,1	0,29	5,67	10,45	32,30	67,70	0,08
		0,3	0,30	5,88	10,45	32,84	67,16	0,22
	100	0	0,23	5,57	10,45	32,00	68,00	0,04
		0,1	0,24	5,67	10,45	32,28	67,72	0,08
		0,3	0,24	5,88	10,45	32,82	67,18	0,22
	120	0	0,19	5,57	10,45	32,00	68,00	0,03
		0,1	0,20	5,67	10,45	32,26	67,74	0,08
		0,3	0,20	5,88	10,45	32,80	67,20	0,22
1000	60	0	0,29	4,17	13,93	32,03	67,97	0,05
		0,1	0,29	4,25	13,93	32,24	67,76	0,07
		0,3	0,30	4,41	13,93	32,65	67,35	0,17
	80	0	0,22	4,17	13,93	32,00	68,00	0,03
		0,1	0,22	4,25	13,93	32,21	67,79	0,06
		0,3	0,23	4,41	13,93	32,62	67,38	0,17
	100	0	0,17	4,17	13,93	31,98	68,02	0,03
		0,1	0,18	4,25	13,93	32,19	67,81	0,06
		0,3	0,18	4,41	13,93	32,60	67,40	0,16
	120	0	0,14	4,17	13,93	31,97	68,03	0,02
		0,1	0,15	4,25	13,93	32,18	67,82	0,06
		0,3	0,15	4,41	13,93	32,59	67,41	0,16

Fonte: Autoria própria.

(*) o valor da DIT antes da conexão do filtro, para a ordem harmônica em questão, é 4,71%.

Tabela 3.5 – Resultados do desempenho dos filtros sintonizados para $h = 13$.

Q_{cap} (kVAr)	Q	d	R (Ω)	L (mH)	C (μ F)	Resp. Supridor (%) (Gabarito: 84,67%)	Resp. Cons. (%) (Gabarito: 15,33%)	DIT* (%)
250	60	0	0,98	11,96	3,48	88,78	11,22	0,16
		0,1	0,99	12,14	3,48	84,59	15,41	0,23
		0,3	1,02	12,53	3,48	75,91	24,09	0,53
	80	0	0,73	11,96	3,48	87,77	12,23	0,12
		0,1	0,74	12,14	3,48	83,57	16,43	0,20
		0,3	0,77	12,53	3,48	74,86	25,14	0,52
	100	0	0,59	11,96	3,48	87,17	12,83	0,10
		0,1	0,60	12,14	3,48	82,95	17,05	0,19
		0,3	0,61	12,53	3,48	74,22	25,78	0,52
	120	0	0,49	11,96	3,48	86,76	13,24	0,08
		0,1	0,50	12,14	3,48	82,54	17,46	0,18
		0,3	0,51	12,53	3,48	73,80	26,20	0,52
500	60	0	0,49	5,98	6,96	86,76	13,24	0,08
		0,1	0,50	6,07	6,96	84,67	15,33	0,12
		0,3	0,51	6,26	6,96	80,33	19,67	0,26
	80	0	0,37	5,98	6,96	86,26	13,74	0,06
		0,1	0,37	6,07	6,96	84,16	15,84	0,10
		0,3	0,38	6,26	6,96	79,80	20,20	0,26
	100	0	0,29	5,98	6,96	85,96	14,04	0,05
		0,1	0,30	6,07	6,96	83,85	16,15	0,09
		0,3	0,31	6,26	6,96	79,49	20,51	0,25
	120	0	0,24	5,98	6,96	85,76	14,24	0,04
		0,1	0,25	6,07	6,96	83,65	16,35	0,09
		0,3	0,26	6,26	6,96	79,28	20,72	0,25
750	60	0	0,33	3,99	10,45	86,09	13,91	0,06
		0,1	0,33	4,05	10,45	84,70	15,30	0,08
		0,3	0,34	4,18	10,45	81,80	18,20	0,17
	80	0	0,24	3,99	10,45	85,76	14,24	0,04
		0,1	0,25	4,05	10,45	84,36	15,64	0,07
		0,3	0,26	4,18	10,45	81,45	18,55	0,17
	100	0	0,20	3,99	10,45	85,56	14,44	0,03
		0,1	0,20	4,05	10,45	84,15	15,85	0,06
		0,3	0,20	4,18	10,45	81,24	18,76	0,17
	120	0	0,16	3,99	10,45	85,42	14,58	0,03
		0,1	0,17	4,05	10,45	84,02	15,98	0,06
		0,3	0,17	4,18	10,45	81,10	18,90	0,17
1000	60	0	0,24	2,99	13,93	85,76	14,24	0,04
		0,1	0,25	3,04	13,93	84,71	15,29	0,06
		0,3	0,26	3,13	13,93	82,54	17,46	0,13
	80	0	0,18	2,99	13,93	85,51	14,49	0,03
		0,1	0,19	3,04	13,93	84,46	15,54	0,05
		0,3	0,19	3,13	13,93	82,28	17,72	0,13
	100	0	0,15	2,99	13,93	85,36	14,64	0,02
		0,1	0,15	3,04	13,93	84,30	15,70	0,05
		0,3	0,15	3,13	13,93	82,12	17,88	0,12
	120	0	0,12	2,99	13,93	85,25	14,75	0,02
		0,1	0,12	3,04	13,93	84,20	15,80	0,04
		0,3	0,13	3,13	13,93	82,01	17,99	0,12

Fonte: Autoria própria.

(*) o valor da DIT antes da conexão do filtro, para a ordem harmônica em questão, é 4,02%.

3.3.1.5 Análise de desempenho dos resultados do compartilhamento a partir da utilização de diferentes parametrizações de filtros sintonizados

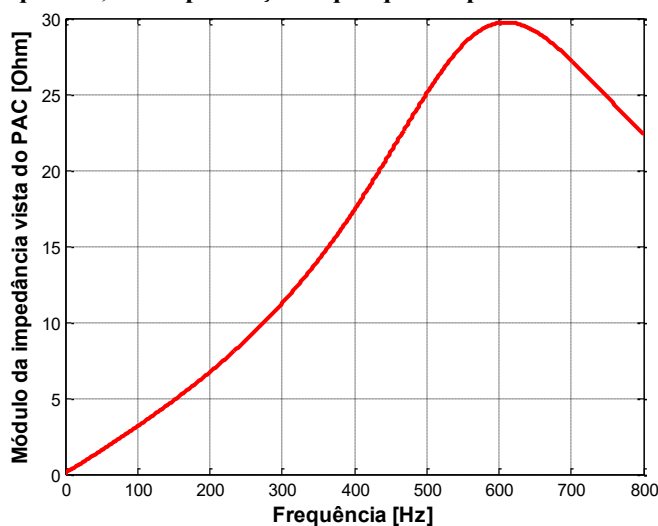
A partir da apreciação cautelosa dos valores descritos da Tabela 3.1 até a Tabela 3.5, as seguintes conclusões podem ser formuladas:

- A constatação geral que conduz à compreensão das respostas obtidas pode ser resumida no fato de a eficiência do Método da Impedância Dominante depender diretamente do teor de dominância do filtro utilizado. Assim, quanto menor for o valor da impedância conectada ao ponto de interesse, na frequência em análise, mais confiáveis são os resultados fornecidos para o compartilhamento de responsabilidades.
- No que tange à potência capacitiva usada, considerando um mesmo fator de qualidade e dessintonia zero, nota-se que quanto maior for o capacitor, melhor é o desempenho da metodologia. Isso acontece porque, para realizar a sintonia em determinada frequência, à medida que se aumenta o valor de C, o valor de L é diminuído. Dessa maneira, mantendo-se o fator de qualidade fixo, um menor valor de L ocasiona uma diminuição no valor de R. Logo, com R menor, a impedância do filtro se torna menor (mais dominante) na frequência de ressonância, o que acarreta a uma melhoria no desempenho do procedimento de compartilhamento.
- Focando a análise no fator de qualidade, nota-se que para um mesmo valor de potência capacitiva e considerando a dessintonia zero, quanto maior o fator de qualidade, mais seletivo é o filtro, menor é o valor de R e, consequentemente, mais exatas são as respostas obtidas. Contudo, não é possível definir, categoricamente, um valor de fator de qualidade a partir do qual o procedimento para compartilhamento de responsabilidades se mostra seguramente eficaz. Isso ocorre porque, como já dito, o que confere exatidão à Metodologia da Impedância Dominante é o quão pequeno é o valor da impedância do arranjo na frequência de interesse. Dependendo do valor de L usado no filtro, um mesmo Q pode ocasionar um maior ou menor valor de R, ou, em outras palavras, dependendo da potência do filtro, um mesmo fator de qualidade pode proporcionar respostas mais ou menos precisas.

- No que se refere à sintonização, verifica-se que o aumento de dessintonia ocasiona aumento nos erros dos resultados de compartilhamento de responsabilidades. Em alguns casos isolados acontecem comportamentos inesperados, como, por exemplo, na Tabela 3.1 (análise de $h = 3$) na condição em que $Q_{cap} = 250$ kVAr e $Q = 60$: nota-se que $d = 0,1$ proporcionou menor erro do que $d = 0$. Eventos como esse podem ser acasos matemáticos, sem fundamentos físicos que os justifiquem.
- É natural que aconteça uma diminuição na eficácia do MID quando se aumenta a dessintonia. Esse fenômeno pode ser observado, para efeito de exemplificação, na Tabela 3.3 (análise de $h = 7$) quando $Q_{cap} = 750$ kVAr e $Q = 80$. Nessa situação há uma resposta eficaz para o compartilhamento quando $d = 0$, e a presença de dessintonia acarreta uma diminuição do teor de dominância do filtro, o que conduz a aumentos nos erros encontrados para os percentuais de responsabilidades.
- Em linhas gerais, pode-se dizer que dependendo da topologia do sistema elétrico e da frequência harmônica em análise, alterações nos parâmetros Q_{cap} , Q e d e, por conseguinte, nos valores de impedância dos filtros, podem ocasionar um maior ou menor impacto no desempenho do Método da Impedância Dominante para fins de compartilhamento de responsabilidades. A Tabela 3.4 (análise de $h = 11$) ilustra esse fenômeno, visto que em tal frequência poucas modificações nos resultados são notadas quando os testes avaliativos são realizados, ao contrário do que acontece em outras ordens harmônicas.
- Para facilitar a compreensão da afirmação feita no item anterior, a Figura 3.11 mostra o comportamento da impedância equivalente vista da barra do PAC, em função da frequência, sem a presença de qualquer tipo de filtro. Como se nota no gráfico, na ordem harmônica 11 a impedância vista da barra apresenta um elevado valor, fato que torna mais simples a tarefa de obter uma impedância que domine sobre aquelas já presentes no sistema elétrico. Por outro lado, na ordem harmônica 3, por exemplo, observa-se um pequeno valor de impedância equivalente, o que demanda um filtro com impedância muito baixa para de fato dominar sobre as existentes no sistema. Fica, dessa maneira, justificado o fato de a frequência de 660 Hz apresentar bom desempenho da metodologia mesmo

em situações em que a impedância do filtro não se apresenta relativamente tão baixa.

Figura 3.11 – Comportamento do módulo da impedância vista da barra do PAC, em função da frequência, sem a presença de qualquer impedância dominante.



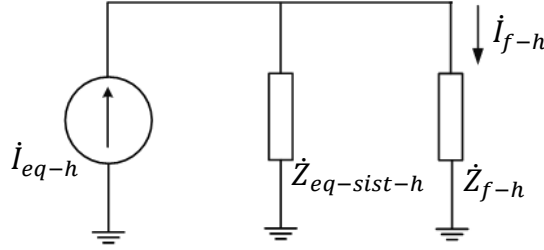
Fonte: Autoria própria.

Pelo exposto até o momento, conclui-se que definir um filtro capaz de garantir a eficiência do procedimento em estudo é uma tarefa delicada. Via de regra, percebe-se que os resultados mais exatos são obtidos para filtros com maior potência, maior fator de qualidade e na ausência de dessintonia. Em termos práticos, essas características devem ser buscadas, respeitando-se, evidentemente, a viabilidade física e econômica de cada situação.

3.3.2 Proposição do parâmetro de dominância (PD)

Esta seção apresenta esforços realizados no sentido de definir se determinado arranjo apresenta, ou não, impedância suficientemente dominante sobre as demais presentes em um sistema em que se deseja aplicar o Método da Impedância Dominante. Para isto, foi investigado o circuito equivalente simplificado evidenciado na Figura 3.12.

Figura 3.12 – Circuito equivalente de um sistema onde se pretende aplicar o método da Impedância Dominante.



Fonte: Autoria própria.

Onde:

$\dot{Z}_{eq-sist-h}$ – impedância harmônica total equivalente, de ordem h , vista da barra onde o filtro foi conectado;

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

\dot{I}_{eq-h} – corrente harmônica total equivalente, de ordem h , advinda de diversas partes do sistema simplificado em questão;

\dot{I}_{f-h} – corrente harmônica, de ordem h , que flui pelo filtro.

Em um primeiro momento, tendo em mente a necessidade de expressar o quão dominante \dot{Z}_{f-h} é em relação a $\dot{Z}_{eq-sist-h}$, idealizou-se o parâmetro mostrado em (3.6), o qual foi denominado como k_h .

$$k_h = \frac{\dot{Z}_{eq-sist-h}}{\dot{Z}_{eq-sist-h} + \dot{Z}_{f-h}} \quad (3.6)$$

Como se nota na equação (3.6), quanto mais próximo o parâmetro k_h for de 1 (unidade), melhores são os resultados obtidos para os fins aqui pretendidos. É simples perceber que para a condição hipotética em que o filtro apresenta máxima dominância possível, ou seja, impedância nula na frequência de sintonia h , k_h assume seu máximo valor possível: 1.

Uma outra maneira de enxergar este fato, é escrevendo a corrente \dot{I}_{f-h} em função das demais grandezas do circuito. A partir de conceitos básicos de divisor de correntes, no circuito mostrado na Figura 3.12, é fácil concluir que a corrente que flui pelo filtro em determinada ordem harmônica h pode ser calculada a partir da equação (3.7).

$$\dot{I}_{f-h} = \frac{\dot{Z}_{eq-sist-h}}{\dot{Z}_{eq-sist-h} + \dot{Z}_{f-h}} \cdot \dot{I}_{eq-h} \quad (3.7)$$

Substituindo (3.6) em (3.7), chega-se a (3.8).

$$\dot{I}_{f-h} = k_h \cdot \dot{I}_{eq-h} \quad (3.8)$$

Como vem sendo discutido ao longo deste trabalho, de acordo com os fundamentos do procedimento da Impedância Dominante, o filtro deve possuir impedância de caráter dominante sobre as demais do sistema, de maneira que \dot{I}_{f-h} seja aproximadamente igual a \dot{I}_{eq-h} . Dessa forma, a equação (3.8) ratifica o fato de o método atingir melhores resultados quando k_h se aproxima da unidade.

Visando ilustrar a aplicação do parâmetro aqui concebido, a Tabela 3.6 demonstra os erros absolutos máximos constatados na gama das simulações mostradas da Tabela 3.1 até a Tabela 3.5, e compara-os com as respostas obtidas quando são considerados apenas os casos em que k_h se aproxima de 1.

Tabela 3.6 – Influência do parâmetro k_h no desempenho do procedimento de compartilhamento de responsabilidades.

Ordem Harmônica	Erro absoluto máximo (em unidades percentuais)		
	Sem limitação de k_h	$0,9 < k_h < 1$	$0,95 < k_h < 1$
$h = 3$	31,95	9,76	4,73
$h = 5$	18,98	5,7	2,88
$h = 7$	71,33	13,78	10,3
$h = 11$	2,58	2,58	2,58
$h = 13$	10,87	10,87	9,81

Fonte: Autoria própria.

Respeitado o grau de exatidão pretendido em cada circunstância, com base nas informações contidas na Tabela 3.6, pode-se inferir, com uma perspectiva geral, que a condição $0,9 < k_h < 1$ garante resultados aceitáveis para o compartilhamento de responsabilidades.

Apesar de o parâmetro k_h possuir fundamentos consistentes, sua determinação pode ser dificultada pela necessidade de se conhecer as impedâncias harmônicas equivalentes do sistema, vistas a partir da barra do PAC. Com o intuito de contornar tal dificuldade, procurou-se definir um parâmetro possível de ser calculado a partir de grandezas que podem ser facilmente obtidas por medições.

Atentando-se para o fato que o nível de tensão harmônica presente no barramento de interesse após a conexão do filtro também pode sinalizar o nível de dominância do arranjo de filtragem, propõe-se aqui a criação do Parâmetro de Dominância (PD), conforme indica a equação (3.9).

$$PD = \frac{DIT_{h_antes}}{DIT_{h_antes} + DIT_{h_após}} \quad (3.9)$$

Onde:

DIT_{h_antes} : distorção individual de tensão de ordem h , no PAC, antes de inserir o filtro;

$DIT_{h_após}$: distorção individual de tensão de ordem h , no PAC, após a inserção do filtro.

Nota-se que a determinação do PD é factível em termos práticos, pois depende unicamente do conhecimento dos valores de tensões harmônicas observadas no PAC antes e após a inserção dos filtros, grandezas estas facilmente mensuradas em campo.

Assim como acontece com k_h , quanto mais próximo PD for da unidade, melhores são os resultados obtidos para o compartilhamento de responsabilidades. Isso acontece porque no caso hipotético em que a instalação do filtro ocasiona tensão harmônica nula no barramento ($DIT_{h_após} = 0$), ou seja, na situação de máxima dominância possível do arranjo, PD apresenta o seu máximo valor possível: 1. Essa proposição pode ser, mais uma vez, explicada a partir de conceitos elementares associados à observação do circuito da Figura 3.12, os quais são detalhados na equação (3.10).

$$PD = \frac{DIT_{h_antes}}{DIT_{h_antes} + DIT_{h_após}} = \frac{V_{h_antes}}{V_{h_antes} + V_{h_após}} = \frac{\dot{Z}_{eq-sist-h} \cdot \dot{I}_{eq-h}}{\dot{Z}_{eq-sist-h} \cdot \dot{I}_{eq-h} + \dot{Z}_{f-h} \cdot \dot{I}_{f-h}} \quad (3.10)$$

Onde:

V_{h_antes} : tensão de ordem h , presente no PAC, antes da inserção do filtro;

$V_{h_após}$: tensão de ordem h , presente no PAC, após a inserção do filtro.

Seguindo a mesma premissa comentada anteriormente, devido à característica de dominância da impedância do filtro, em (3.10) pode-se entender que \dot{I}_{f-h} é aproximadamente igual a \dot{I}_{eq-h} . Além disso, uma segunda consideração pondera que as fontes de distúrbio do sistema permanecem inalteradas quando da conexão dos filtros ou, em outras palavras, \dot{I}_{eq-h} é a mesma antes e após a inserção da impedância dominante. Destas constatações se origina a equação (3.11).

$$PD = \frac{\dot{Z}_{eq-sist-h} \cdot \dot{I}_{eq-h}}{\dot{Z}_{eq-sist-h} \cdot \dot{I}_{eq-h} + \dot{Z}_{f-h} \cdot \dot{I}_{f-h}} \cong \frac{\dot{Z}_{eq-sist-h}}{\dot{Z}_{eq-sist-h} + \dot{Z}_{f-h}} = k_h \quad (3.11)$$

O raciocínio exposto ratifica que o desempenho do Método da Impedância Dominante tende a melhorar quando PD chega próximo ao valor unitário. Embora (3.11) indique que PD é aproximadamente igual a k_h , devido às ponderações comentadas anteriormente, os dois parâmetros apresentam um grau de sensibilidade diferente quando se trata da necessidade de garantir a eficácia do processo de compartilhamento de responsabilidades.

Para ilustrar esta questão, a Tabela 3.7 condensa os erros absolutos máximos observados no conjunto das simulações mostradas na Tabela 3.1 até a Tabela 3.5, e compara-os com os resultados encontrados quando são levados em conta apenas os casos em que PD se aproxima da unidade.

Tabela 3.7 – Influência do parâmetro PD no desempenho do procedimento de compartilhamento de responsabilidades.

Ordem Harmônica	Sem limitação de PD	Erro absoluto máximo (em unidades percentuais)			
		$0,8 < PD < 1$	$0,85 < PD < 1$	$0,9 < PD < 1$	$0,95 < PD < 1$
$h = 3$	31,95	7,24	4,73	2,71	*
$h = 5$	18,98	18,98	17,81	2,88	1,19
$h = 7$	71,33	41,26	27,55	13,78	6,82
$h = 11$	2,58	2,58	2,58	1,37	1,01
$h = 13$	10,87	10,87	10,87	5,39	4,11

Fonte: Autoria própria.

(*) as simulações evidenciadas da Tabela 3.1 até a Tabela 3.5 não abrangeram nenhuma condição em que PD se enquadre no intervalo em questão.

Ao analisar a Tabela 3.7, pode-se observar que para $h = 3$ o conjunto de simulações feitas não abrange casos em que PD é maior que 0,95. Isso ocorre nesta frequência menor porque, neste caso, os fatores de qualidade considerados representam maiores valores de R (quando comparados com os filtros de frequências harmônicas maiores), fato que resulta em uma redução menos eficaz da tensão harmônica no PAC. Consequentemente, tais casos apresentam menores valores de PD, comparativamente aos resultados constatados em ordens superiores. Para conseguir aumentar PD na ordem harmônica 3 bastaria usar filtros mais eficientes (aumentar a potência capacitiva e/ou aumentar o fator de qualidade do filtro).

Outro fenômeno pode interferir na análise envolvendo a variação de PD e a exatidão das respostas da atribuição de responsabilidades, a saber: a interação entre os ângulos das correntes representativas das distorções advindas das partes envolvidas. Essas interações fazem o

resultado final do compartilhamento sofrer um maior ou menor impacto dos desvios da condição considerada ideal (toda a corrente harmônica presente no sistema ser filtrada pela impedância dominante). Em outras palavras, tais interações entre ângulos provocam variações de sensibilidade durante os procedimentos de projeções de fasores que culminam na obtenção dos percentuais de atribuição de responsabilidades.

Com o objetivo de ilustrar esse fato, propõe-se a reflexão sobre a busca do motivo de, dentro do grupo de simulações realizadas, a sensibilidade de PD ser diferente para as ordens harmônicas 5 e 7, conforme exhibe a Tabela 3.7. Para isso, na sequência são estudadas quatro situações, as quais envolvem a utilização de filtros harmônicos especialmente determinados de maneira a propiciar que todas elas apresentem os mesmos valores de PD. Mais uma vez, considera-se o mesmo sistema teste usado nas análises do item 3.3.1.4, o qual possui a parametrização descrita na seção A.2.1 do Apêndice A.

Para cada uma das frequências em questão (300 Hz e 420 Hz) são analisados dois casos. O primeiro deles considera que as mesmas fontes de corrente de distorção originalmente presentes na ordem 5, são impostas também nas simulações da ordem 7. Já no segundo caso, as mesmas fontes de corrente de distorção originalmente usadas na ordem 7 são levadas em consideração também para análise da ordem 5. A Tabela 3.8 condensa os resultados obtidos a partir desses estudos.

Tabela 3.8 – Análise das respostas do compartilhamento, considerando os mesmos valores de PD, e diferentes fontes de correntes de distorções.

Caso	Fonte de Corrente do Supridor (A)	Fonte de Corrente do Consumidor (A)	Ordem Harmônica	PD	Erro absoluto (unidades percentuais)
1	21,92 \angle -3°	45,96 \angle 78°	$h = 5$	0,97	1,69
			$h = 7$	0,97	1,14
2	32,53 \angle -20°	28,99 \angle 201°	$h = 5$	0,97	10,05
			$h = 7$	0,97	12,77

Fonte: Autoria própria.

Os resultados apresentados na tabela anterior esclarecem que no caso 1, ao conservar o mesmo PD e as mesmas fontes de corrente, os erros absolutos foram bastante próximos em ambas as frequências investigadas (1,69 e 1,14 unidades percentuais). No caso 2 os distanciamentos do gabarito também foram similares para as duas ordens harmônicas (10,05 e 12,77 unidades percentuais), porém bem maiores que no caso 1. Esse fato indica que os ângulos das correntes representativas da inserção de distorções em sistemas podem exercer influência sobre todo o procedimento aqui em análise.

Diante do cenário exposto, em linhas gerais, considera-se factível ponderar que ao estabelecer uma impedância dominante capaz de proporcionar a obtenção de PD maior que 0,9, assegura-se boa exatidão nos percentuais de atribuição de responsabilidades fornecidos pelo Método da Impedância Dominante.

Ainda com o objetivo de obter uma visão mais abrangente e nítida da dinâmica relacionada à variação do parâmetro PD e dos resultados obtidos para o compartilhamento, a Tabela 3.9 sugere a mesma análise proposta na Tabela 3.7, porém adotando outra perspectiva. Ao invés de apresentar o distanciamento máximo dos valores de referência diante de diferentes intervalos de PD, é exibido o percentil 95 dos erros absolutos em cada condição.

Tabela 3.9 – Influência do parâmetro PD no desempenho do procedimento de compartilhamento de responsabilidades, utilizando o percentil 95.

Ordem Harmônica	Sem limitação de PD	Percentil 95 do erro absoluto (em unidades percentuais)			
		$0,8 < PD < 1$	$0,85 < PD < 1$	$0,9 < PD < 1$	$0,95 < PD < 1$
$h = 3$	30,32	6,82	4,73	2,69	*
$h = 5$	18,15	18,59	17,29	2,88	1,17
$h = 7$	65,87	39,08	26,33	10,68	6,82
$h = 11$	2,41	2,41	2,41	1,27	0,91
$h = 13$	9,44	9,44	9,44	4,68	3,36

Fonte: Autoria própria.

(*) as simulações evidenciadas na Tabela 3.1 até a Tabela 3.5 não abrangeram nenhuma condição em que PD se enquadre no intervalo em questão.

As informações expostas da tabela acima ratificam as constatações anteriores visto que, via de regra, os casos com PD maior que 0,9 apresentaram resultados satisfatórios em todas as frequências harmônicas estudadas.

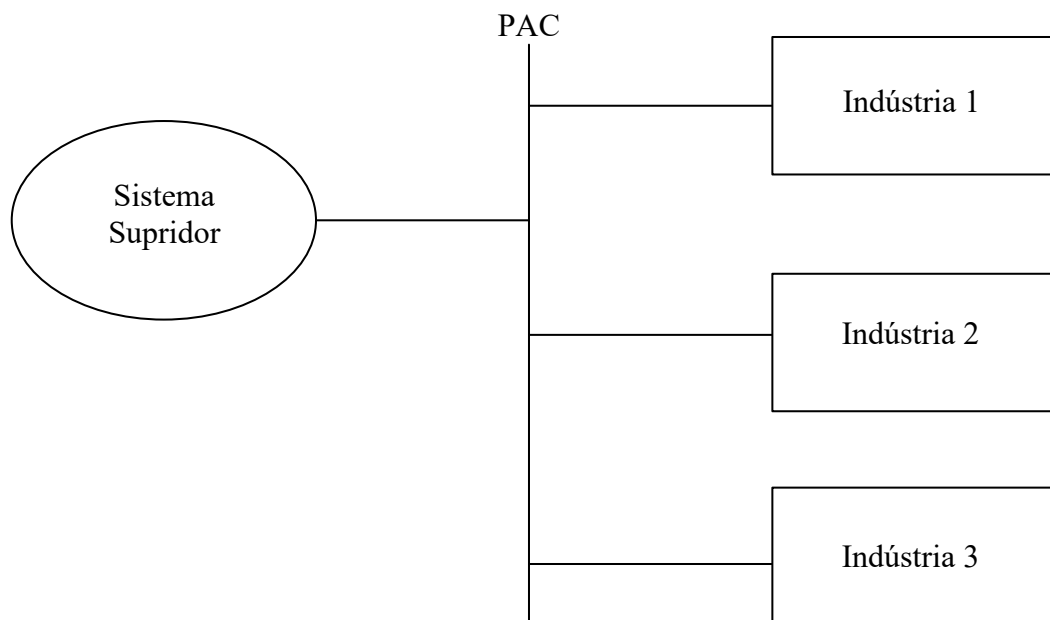
Por fim, ressalta-se que quando a impedância do filtro assume teor de dominância suficiente para garantir exatidão dos resultados buscados, o aumento dos parâmetros Q_{cap} e/ou Q não ocasiona mais alterações nos valores de correntes harmônicas mensuradas no procedimento ($\dot{I}_{pac-in-h}$, $\dot{I}_{pac-out-h}$ e \dot{I}_{f-h}). Assim, outra técnica que permite assegurar a dominância suficiente da impedância do filtro e, consequentemente, a exatidão das respostas obtidas para o compartilhamento de responsabilidades, é alterar estes parâmetros (Q_{cap} e/ou Q) até não se observar mais mudanças significativas na quantidade de corrente que flui pelo filtro. Esta ideia é teoricamente consistente, embora reconheça-se que seja de difícil implementação em campo.

3.4 Avaliação de desempenho do MID via simulações computacionais

Embora o Método da Impedância Dominante já tenha sido submetido a diversos testes computacionais na seção anterior, este item apresenta o objetivo de mostrar a aplicação do MID em um sistema elétrico de grande porte, cuja caracterização detalhada se encontra no Apêndice B. Este sistema é usado para as avaliações de desempenho computacionais das metodologias tratadas neste capítulo e nos subsequentes. Todas as simulações relatadas foram feitas no software Matlab / Simulink®.

O arranjo simulado é constituído basicamente por quatro partes distintas conectadas a um barramento nomeado como PAC: a concessionária, constituída por uma fonte de tensão trifásica perfeitamente senoidal em série com uma impedância representativa do nível de curto-circuito do PAC, e três unidades consumidoras, modeladas de maneira a representar instalações industriais com cargas lineares e não lineares. A Figura 3.13, similar à Figura B.1 do Apêndice B, é colocada na sequência com o objetivo de viabilizar a rápida percepção da estrutura genérica do sistema em estudo.

Figura 3.13 – Esquema genérico do sistema elétrico estudado em simulação.



Fonte: Autoria própria.

O conteúdo harmônico existente nesse sistema elétrico abrange tensões e correntes de ordens 5, 7, 11 e 13, como descrito no Apêndice B. Neste apêndice, a Tabela B.9 e a Tabela B.11 exibem tensões e correntes harmônicas presentes em diferentes pontos do complexo elétrico.

A aplicação do MID neste sistema é feita em duas etapas, as quais são chamadas aqui como casos I e II. Com a intenção de analisar os efeitos da inserção de impedâncias com níveis de dominância diferentes, o caso I representa a utilização de um filtro com fator de qualidade e potência do capacitor menores, enquanto o caso II apresenta fator de qualidade e potência capacitiva maiores. A Tabela 3.10 detalha as características das impedâncias dominantes usadas em ambos os casos. Em decorrência das conclusões obtidas na seção anterior, são usados filtros passivos sintonizados em uma frequência, sendo que R, L, C indicam, respectivamente, a resistência, a indutância e a capacitância da configuração de filtragem.

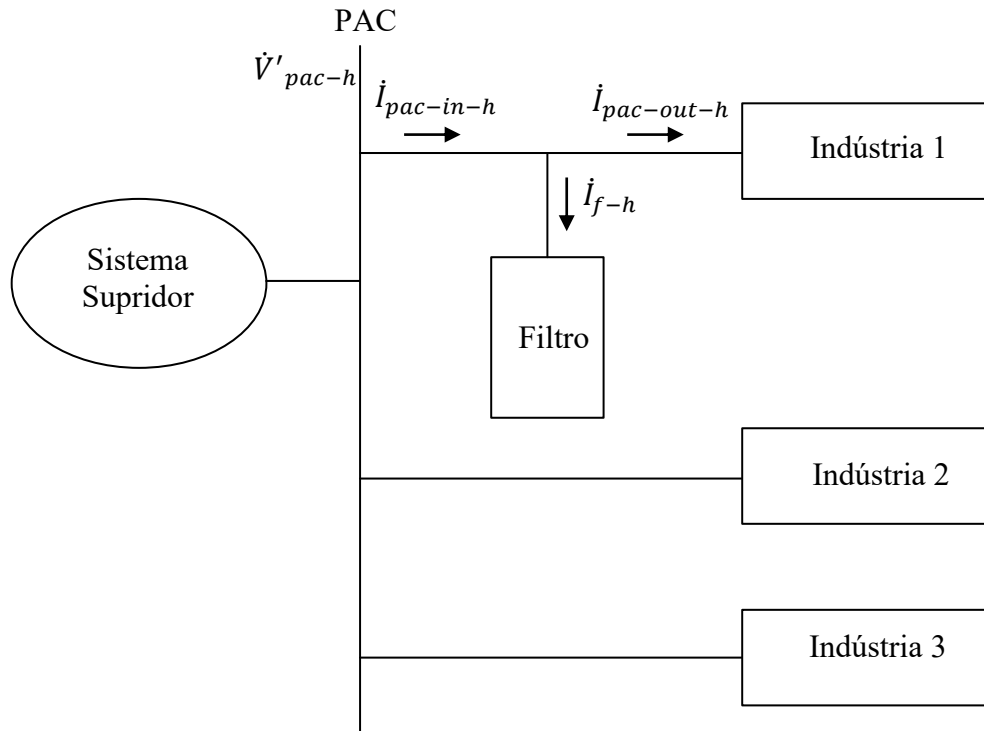
Tabela 3.10 – Caracterização das impedâncias dominantes usadas nos casos I e II – simulações MID.

Caso	Potência do Capacitor do Filtro (kVAr)	Fator de Qualidade do Filtro (Q)	Dessintonia (d)	h	R (Ω)	L (mH)	C (μ F)
I	200	50	0	5	3,8088	101,0316	2,7857
				7	2,7206	51,5467	2,7857
				11	1,7313	20,8743	2,7857
				13	1,4649	14,9455	2,7857
II	900	100	0	5	0,4232	22,4515	12,5358
				7	0,3023	11,4548	12,5358
				11	0,1924	4,6387	12,5358
				13	0,1628	3,3212	12,5358

Fonte: Autoria própria.

As análises da sequência envolvem a determinação das parcelas de responsabilidades cabidas à concessionária e às indústrias 1, 2 e 3. Nota-se, aqui, que o procedimento para determinação dos percentuais de cada uma das partes foi feito separadamente, apesar de as impedâncias dominantes serem conectadas no PAC em todas as situações. Para determinar a parcela referente a indústria 1, por exemplo, a parte consumidora é considerada como sendo apenas a indústria 1, enquanto o sistema supridor engloba todo o resto do complexo (concessionária e indústrias 2 e 3). Para clarear os procedimentos seguidos, a Figura 3.14 exhibe a estrutura usada para proceder à simulação visando ao estudo do compartilhamento entre a indústria 1 e o restante do sistema.

Figura 3.14 – Esquema representativo da aplicação do MID para o compartilhamento da indústria 1.



Fonte: Autoria própria.

Na figura anterior, nota-se que \dot{V}'_{pac-h} indica a tensão no PAC após a inserção da impedância dominante, \dot{I}_{f-h} é a corrente que flui pelo filtro e $\dot{I}_{pac-in-h}$ e $\dot{I}_{pac-out-h}$ são as correntes à montante e à jusante da impedância dominante, respectivamente, seguindo a nomenclatura definida desde a seção 3.2.

É simples perceber que com a conexão da impedância dominante em pontos estratégicos do PAC, mecanismos semelhantes ao relatado anteriormente são realizados para a análise das demais partes que constituem o arranjo elétrico.

Com base no exposto, a Tabela 3.11 até a Tabela 3.14 exibem as grandezas obtidas nas simulações referentes ao caso I, para as ordens harmônicas 5, 7, 11 e 13. Já a Tabela 3.15 até a Tabela 3.18 apresentam os dados associados às simulações do caso II.

Tabela 3.11 – Grandezas obtidas para a análise da indústria 1 – simulações MID (caso I).

Situação	h	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
Indústria 1 Caso I	5	$19,57 \angle 104,8^\circ$	$33,46 \angle 47,6^\circ$	$47,03 \angle 68,07^\circ$	$178,5 \angle 68,31^\circ$
	7	$9,79 \angle 33,98^\circ$	$10,63 \angle 14,47^\circ$	$20,13 \angle 23,82^\circ$	$54,87 \angle 23,88^\circ$
	11	$3,48 \angle 157,6^\circ$	$3,75 \angle -130,5^\circ$	$5,86 \angle -164,8^\circ$	$10,16 \angle -164,8^\circ$
	13	$2,70 \angle 143,1^\circ$	$3,11 \angle -142,2^\circ$	$4,62 \angle -176,5^\circ$	$6,80 \angle -176,4^\circ$

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.12 – Grandezas obtidas para a análise da indústria 2 – simulações MID (caso I).

Situação	h	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
Indústria 2 Caso I	5	40,81 \angle 78,41°	10,05 \angle 21,29°	47,03 \angle 68,07°	178,5 \angle 68,31°
	7	15,92 \angle 30,45°	4,69 \angle 0,73°	20,13 \angle 23,82°	54,87 \angle 23,88°
	11	4,69 \angle -150,0°	1,79 \angle 153,1°	5,86 \angle -164,8°	10,16 \angle -164,8°
	13	3,74 \angle -162,0°	1,37 \angle 140,5°	4,62 \angle -176,5°	6,80 \angle -176,4°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.13 – Grandezas obtidas para a análise da indústria 3 – simulações MID (caso I).

Situação	h	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
Indústria 3 Caso I	5	38,81 \angle 81,72°	13,06 \angle 23,57°	47,03 \angle 68,07°	178,5 \angle 68,31°
	7	14,96 \angle 33,92°	6,00 \angle -2,08°	20,13 \angle 23,82°	54,87 \angle 23,88°
	11	4,72 \angle -144,4°	2,18 \angle 146,2°	5,86 \angle -164,8°	10,16 \angle -164,8°
	13	3,78 \angle -157,4°	1,62 \angle 134,1°	4,62 \angle -176,5°	6,80 \angle -176,4°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.14 – Grandezas obtidas para a análise da concessionária – simulações MID (caso I).

Situação	h	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
Concessionária Caso I	5	55,27 \angle 37,42°	28,19 \angle 159,1°	47,03 \angle 68,07°	178,5 \angle 68,31°
	7	21,13 \angle 6,79°	6,19 \angle 114,5°	20,13 \angle 23,82°	54,87 \angle 23,88°
	11	5,90 \angle -171,9°	0,73 \angle -74,82°	5,86 \angle -164,8°	10,16 \angle -164,8°
	13	4,64 \angle 178,5°	0,41 \angle -86,65°	4,62 \angle -176,5°	6,80 \angle -176,4°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.15 – Grandezas obtidas para a análise da indústria 1 – simulações MID (caso II).

Situação	h	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
Indústria 1 Caso II	5	30,28 \angle 25,20°	38,55 \angle 40,54°	68,23 \angle 33,80°	30,42 \angle 35,08°
	7	12,29 \angle -6,68°	12,55 \angle 5,20°	24,70 \angle -0,68°	7,48 \angle -0,44°
	11	4,18 \angle 139,20°	3,24 \angle -140,0°	1,12 \angle 173,9°	5,68 \angle 173,5°
	13	2,53 \angle 127,40°	2,60 \angle -133,30°	3,32 \angle 178,0°	0,55 \angle 178,7°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.16 – Grandezas obtidas para a análise da indústria 2 – simulações MID (caso II).

Situação	h	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
Indústria 2 Caso II	5	54,77 \angle 38,40°	14,33 \angle 15,93°	68,23 \angle 33,80°	30,42 \angle 35,08°
	7	19,27 \angle 2,02°	5,52 \angle -10,11°	24,70 \angle -0,68°	7,48 \angle -0,44°
	11	4,19 \angle -172,80°	1,89 \angle 141,70°	1,12 \angle 173,9°	5,68 \angle 173,5°
	13	2,67 \angle -163,50°	1,16 \angle 131,1°	3,32 \angle 178,0°	0,55 \angle 178,7°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.17 – Grandezas obtidas para a análise da indústria 3 – simulações MID (caso II).

Situação	h	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
Indústria 3 Caso II	5	51,96 \angle 39,25°	17,23 \angle 17,13°	68,23 \angle 33,80°	30,42 \angle 35,08°
	7	17,96 \angle 3,22°	6,90 \angle -10,86°	24,70 \angle -0,68°	7,48 \angle -0,44°
	11	4,10 \angle -166,10°	2,33 \angle 135,60°	1,12 \angle 173,9°	5,68 \angle 173,5°
	13	2,76 \angle -157,7°	1,40 \angle 123,40°	3,32 \angle 178,0°	0,55 \angle 178,7°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.18 – Grandezas obtidas para a análise da concessionária – simulações MID (caso II).

Situação	h	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
Concessionária Caso II	5	68,59 \angle 29,78°	4,82 \angle 126,1°	68,23 \angle 33,80°	30,42 \angle 35,08°
	7	24,73 \angle -2,62°	0,84 \angle 90,48°	24,70 \angle -0,68°	7,48 \angle -0,44°
	11	5,68 \angle 172,70°	0,08 \angle -99,45°	1,12 \angle 173,9°	5,68 \angle 173,5°
	13	3,32 \angle 177,40°	0,03 \angle -97,65°	3,32 \angle 178,0°	0,55 \angle 178,7°

Fonte: Autoria própria.

Com base nos dados apresentados anteriormente, é possível aplicar o MID, seguindo a filosofia apresentada na seção 3.2, para se chegar aos percentuais de responsabilidades cabidos às partes envolvidas. Dessa maneira, na sequência a Tabela 3.19 até a Tabela 3.22 apresentam os resultados conseguidos para as indústrias 1, 2, 3 e concessionária.

Para viabilizar a avaliação de desempenho do método em análise, nas tabelas são mostrados os valores de referência, ou gabarito, para o compartilhamento e os valores obtidos a partir da aplicação do MID, nos casos I e II. Ressalta-se que os valores de gabarito adotados são aqueles fornecidos pela aplicação do Método da Superposição (44), (45), conforme detalhadamente descrito no Apêndice B, seção B.2.

As tabelas ainda contemplam a quantificação do distanciamento do gabarito, ou erro absoluto, constatado em cada situação. Estes valores foram obtidos a partir do módulo da diferença entre o valor do gabarito e o valor fornecido pelo MID. Além disso, com base nas tensões harmônicas no PAC existentes antes e após a inserção das impedâncias dominantes, é possível expressar o valor do parâmetro de dominância (PD) em cada uma das situações.

Tabela 3.19 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – simulações MID.

h	Gabarito (%)	Resultado MID Caso I (%)	Resultado MID Caso II (%)	Erro Absoluto Caso I	Erro Absoluto Caso II	PD Caso I	PD Caso II
5	54,04	66,66	56,11	12,62	2,07	0,61	0,90
7	48,83	52,11	50,54	3,28	1,71	0,70	0,95
11	44,61	52,87	39,20	8,26	5,41	0,84	0,98
13	49,63	55,61	51,60	5,98	1,97	0,87	0,99

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.20 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 2 – simulações MID.

h	Gabarito (%)	Resultado MID Caso I (%)	Resultado MID Caso II (%)	Erro Absoluto Caso I	Erro Absoluto Caso II	PD Caso I	PD Caso II
5	20,92	14,63	19,99	6,29	0,93	0,61	0,90
7	22,76	21,43	22,06	1,33	0,70	0,70	0,95
11	26,34	22,67	28,33	3,67	1,99	0,84	0,98
13	24,44	21,62	23,93	2,82	0,51	0,87	0,99

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.21 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 3 – simulações MID.

h	Gabarito (%)	Resultado MID Caso I (%)	Resultado MID Caso II (%)	Erro Absoluto Caso I	Erro Absoluto Caso II	PD Caso I	PD Caso II
5	25,02	19,81	24,19	5,21	0,88	0,61	0,90
7	28,45	26,83	27,47	1,62	0,98	0,70	0,95
11	29,06	24,46	32,39	4,60	3,33	0,84	0,98
13	25,81	22,75	24,37	3,06	1,44	0,87	0,99

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.22 – Resultados obtidos para o compartilhamento da concessionária – simulações MID.

h	Gabarito (%)	Resultado MID Caso I (%)	Resultado MID Caso II (%)	Erro Absoluto Caso I	Erro Absoluto Caso II	PD Caso I	PD Caso II
5	0	1,07	0,29	1,07	0,29	0,61	0,90
7	0	0,36	0,07	0,36	0,07	0,70	0,95
11	0	0,01	0,07	0,01	0,07	0,84	0,98
13	0	0,03	0,10	0,03	0,10	0,87	0,99

Fonte: Autoria própria.

A análise atenta das tabelas anteriores mostra, de forma geral, que o caso I apresenta erros absolutos maiores e parâmetros de dominância menores que o caso II. Este comportamento se encontra em perfeita consonância com o que era esperado, uma vez que o filtro definido no caso I representa uma impedância de caráter menos dominante que o filtro caracterizador do caso II.

No que se refere aos resultados relacionados ao circuito da concessionária, percebe-se na Tabela 3.22 que ambos os casos apresentaram respostas igualmente satisfatórias ao atribuir responsabilidade praticamente nula a esta parte do circuito. Isto era esperado porque a fonte de tensão foi parametrizada de maneira a fornecer tensão perfeitamente senoidal.

Com relação às análises das indústrias, na Tabela 3.19 é possível perceber que para a indústria 1, na ordem harmônica $h = 5$ o caso I apresentou PD de 0,61, e este baixo valor associado ao teor de dominância refletiu no maior erro absoluto encontrado nos resultados (12,62 unidades percentuais). Ao aumentar PD para 0,90, no caso II, o erro absoluto caiu de 12,62 para 2,07 unidades percentuais.

Considerando ainda a indústria 1, sensibilidade diferente é percebida para a frequência de ordem $h = 11$. Nesta situação, PD de 0,84 no caso I ocasionou erro de 8,26, enquanto que PD de 0,98 no caso II resultou em um erro de 5,41 unidades percentuais. Conforme amplamente discutido na seção 3.3, estas diferenças de sensibilidade são naturais, devido aos distintos valores de impedâncias vistos dos pontos de interesse para cada frequência harmônica, questão esta que ocasiona interações diferentes com as impedâncias dominantes conectadas.

Na Tabela 3.19 e na Tabela 3.20 há resultados bastante satisfatórios para o compartilhamento das indústrias 2 e 3, em todas as ordens harmônicas estudadas, sendo verificada a tendência de redução dos erros absolutos no caso II, devido aos maiores valores de PD.

Nota-se que os erros absolutos maiores constatados para a indústria 1, comparativamente às indústrias 2 e 3, justificam-se pelo fato de ela ter magnitude maior e, mais especificamente, carga não linear com potência maior. Assim, para reduzir ainda mais o erro absoluto desta instalação bastaria tornar o filtro mais dominante, aumentando a potência do capacitor, ou aumentando o fator de qualidade.

Para proporcionar uma ideia mais ampla sobre os resultados encontrados, destaca-se que 3,85 unidades percentuais foi o valor encontrado para o percentil 95 dos erros absolutos constatados para o caso II, considerando as respostas para o compartilhamento de todas as partes (concessionária e indústrias 1, 2 e 3), nas quatro frequências harmônicas estudadas.

Do exposto, fica claro que a consistência física do MID e as particularidades levantadas sobre o grau de dominância das impedâncias foram devidamente confirmadas com os trabalhos de simulação relatados nesta seção.

3.5 Avaliação de desempenho do MID via ensaios laboratoriais

Esta seção apresenta a avaliação de desempenho do MID via ensaios práticos realizados em ambiente laboratorial. A estrutura montada se assemelha com o sistema usado nas simulações computacionais e segue o mesmo esquema de blocos exibido na Figura 3.13, o qual possui o equivalente de um sistema supridor fornecendo tensão perfeitamente senoidal a três arranjos representativos de indústrias constituídas por cargas lineares e não lineares. No laboratório, para garantir o suprimento de tensão totalmente desprovida de distorções, foi usada uma fonte trifásica controlada da marca *California Instruments*, modelo CSW5550 (137).

A descrição sobre todos os componentes que constituem o sistema elétrico de escala reduzida, bem como detalhamentos acerca de suas características gerais de operação são encontrados no Apêndice C deste trabalho. Em todas as três indústrias montadas existem retificadores trifásicos alimentando cargas resistivas, elementos estes que ocasionam o surgimento de distorções harmônicas no complexo. Assim como nas análises computacionais, optou-se por investigar as distorções de ordens 5, 7, 11 e 13. As tensões e correntes harmônicas

presentes em diferentes pontos do sistema laboratorial são mostradas na Tabela C.6 e na Tabela C.8 do Apêndice C.

Para proceder, então, à aplicação do MID faz-se necessário estabelecer impedâncias dominantes para serem conectadas no PAC, conforme sugerido na exemplo sintetizador da Figura 3.14. Nesse sentido, esforços foram feitos para definir componentes resistivos (R), indutivos (L) e capacitivos (C) que pudessem ser combinados de maneira a constituir arranjos de filtros passivos sintonizados nas frequências de interesse no estudo.

Tratando primeiramente dos valores de potência capacitiva dos filtros, para cada ordem harmônica foi estabelecido que seriam feitos experimentos com três níveis diferentes de capacitância, a saber: 100 μF , 150 μF e 200 μF . Estes valores correspondem, respectivamente, às seguintes potências capacitivas trifásicas, sendo 220 V a tensão nominal de linha do arranjo em escala reduzida: 1,82 kVAr, 2,74 kVAr e 3,65 kVAr. A Figura 3.15 mostra os capacitores usados para a constituição das impedâncias dominantes.

Figura 3.15 – Capacitores usados para a constituição das impedâncias dominantes.



Fonte: Autoria própria.

Uma vez definidos os valores de capacitância, procedeu-se à determinação das indutâncias necessárias para a realização das sintonias desejadas. Nos experimentos foram usados indutores com núcleo de ar, como mostra a Figura 3.16. Com o objetivo de conseguir uma maior gama de possibilidades e liberdade para constituição de impedâncias dominantes com distintas características, optou-se por adquirir indutores de diversos valores, de forma que as sintonizações pretendidas pudessem ser obtidas a partir de composições série e/ou paralelo de elementos indutivos.

Figura 3.16 – Indutores de núcleo de ar usados para a constituição das impedâncias dominantes.

Fonte: Autoria própria.

Neste ponto, merece ser destacada uma preocupação de ordem prática relacionada à resistência dos indutores. Evidentemente, era preciso obter elementos L com a menor resistência possível, visto que este fator influencia, de maneira incisiva, no teor de dominância do filtro e, consequentemente, no desempenho do Método da Impedância Dominante. Dentro deste cenário, inicialmente a intenção era adquirir indutores com baixo valor de R , de forma que fosse possível alterar os valores do fator de qualidade em ensaios, com a inserção de elementos resistivos em série com os elementos L e C dos filtros.

Após a realização de cuidadosas reflexões, os parâmetros dos indutores foram definidos a partir da busca do melhor consenso entre o desejo de obtenção de um alto fator de qualidade e a necessidade de construção de um equipamento viável para utilização em nível laboratorial. Evidentemente, quanto maior fosse a área de seção transversal do fio de cobre utilizado, maiores seriam as dimensões, a massa e o custo dos indutores.

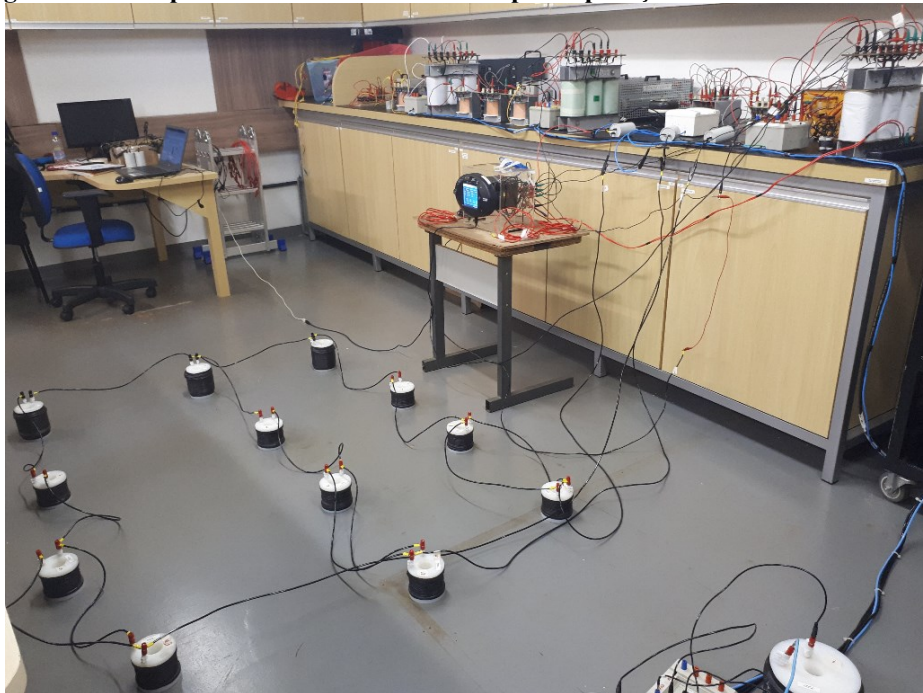
Tendo em vista este desafio prático, verificou-se que com os indutores adquiridos não seria possível obter filtros com elevado fator de qualidade. Este fato impossibilitou a ideia inicial de realizar ensaios que tivessem um elemento resistivo em série com L e C , para verificação da influência da variação de Q nos resultados do compartilhamento de responsabilidades. Assim, as análises de desempenho do MID foram feitas considerando tão somente a resistência do arranjo de indutores usado em cada caso, sem a adição de qualquer outro elemento resistivo no circuito do filtro.

Uma outra dificuldade encontrada em termos práticos foi a obtenção da sintonia na exata frequência harmônica de interesse. Uma vez que a hipótese de realização de ensaios com filtros

contendo dessintonia foi descartada, a princípio foram cuidadosamente escolhidos elementos para a constituição de arranjos que possuíam, nos cálculos, uma sintonia certa em cada ordem desejada. Entretanto, ao montar os filtros, para efeito de teste, percebeu-se que a sintonia medida não correspondia exatamente àquela obtida na teoria. Via de regra, as medições apresentavam sintonia um pouco abaixo daquela indicada pelos cálculos, visto que os indutores se mostravam com um valor de L aparentemente maior que o esperado. Diversos fatores podem ter influenciado este fato, dentre os quais podem ser destacados: a variação dos valores de indutância em função da frequência (devido a efeitos capacitivos intrínsecos às espiras), e a possibilidade de existência de fatores externos exercendo influência sobre os fluxos gerados pelos indutores (malha de aterramento do piso do laboratório, onde os indutores foram posicionados).

Para contornar estas dificuldades e obter a sintonia almejada, foi definido um fator de correção para aplicação aos cálculos de cada ordem harmônica, de forma a propiciar a obtenção da exata sintonia dos filtros na prática. A Figura 3.17 mostra os arranjos de impedâncias dominantes dispostos no laboratório durante os ensaios, os indutores de núcleo de ar foram posicionados no solo e os capacitores ficaram sobre as bancadas que sustentavam os demais equipamentos que constituíam os equivalentes das indústrias em escala reduzida.

Figura 3.17 – Impedâncias dominantes usadas para aplicação do MID em laboratório.



Fonte: Autoria própria.

Com base nos aspectos discutidos até o momento, a Tabela 3.23 apresenta as informações sobre os filtros projetados para análise de desempenho do MID. Para efeito de organização, as exposições seguintes consideram como casos I, II e III o conjunto de ensaios que apresentam filtros com capacitores de 100 μF , 150 μF e 200 μF , respectivamente.

Tabela 3.23 – Caracterização das impedâncias dominantes usadas – ensaios MID.

Caso	Potência do Capacitor do Filtro (kVAr)	h	Fator de Qualidade do Filtro (Q)	Dessintonia (d)	R (Ω)	L (mH)	C (μF)
I	1,82	5	11,77	0,01	0,4460	2,7840	100,6
		7	10,56	0,03	0,3540	1,4166	100,6
		11	12,08	0,06	0,1969	0,5737	100,2
		13	9,92	0,01	0,2067	0,4182	99,6
II	2,74	5	10,74	0,05	0,3217	1,8335	150,4
		7	12,07	0,09	0,2043	0,9345	149,4
		11	9,67	0,08	0,1631	0,3802	154,9
		13	6,42	0,01	0,2067	0,2706	154,0
III	3,65	5	9,58	0,02	0,2738	1,3922	200,3
		7	10,55	0,09	0,1737	0,6944	201,3
		11	10,00	0,08	0,1216	0,2933	201,0
		13	19,23	0,09	0,0535	0,2098	201,2

Fonte: Autoria própria.

Para aplicação do MID foi seguido procedimento análogo ao realizado nas simulações computacionais, na seção 3.4. As impedâncias dominantes foram conectadas sempre no PAC e, para cada arranjo de filtragem, quatro conjuntos de medições foram realizados para a obtenção das parcelas de responsabilidades das partes: concessionária, indústria 1, indústria 2 e indústria 3. Em consonância com a nomenclatura usada na Figura 3.14, a Tabela 3.24 até a Tabela 3.35 mostram as grandezas mensuradas durante os ensaios dos casos I, II e III.

Conforme detalhado no Apêndice C, as medições foram realizadas com o medidor trifásico de qualidade da energia Nexus 1500, classe D, da marca Nansen (138). O equipamento possui tensão nominal de 127 V / 220 V, corrente máxima de 20 A, precisão igual a 0,1% do fundo de escala utilizado, e apresenta certificação do INMETRO e da norma sobre métodos de medição da qualidade da energia ABNT NBR IEC 61000-4-30 (139).

Embora todos os ensaios tenham sido realizados em um arranjo elétrico trifásico, buscando maior clareza e concisão na exposição dos resultados, apenas os dados de uma das fases são exibidos. Isto não traz prejuízos às análises subsequentes, visto que o sistema elétrico foi montado de maneira a buscar equilíbrio entre as três fases.

Esclarece-se, ainda, que os dados mostrados nas tabelas seguintes representam a média dos valores obtidos a partir de cinco medições diferentes, as quais foram consecutivamente captadas pelo medidor, com um intervalo de tempo entre elas de cinco segundos.

Tabela 3.24 – Grandezas mensuradas na análise da indústria 1 – ensaios MID (caso I).

Situação	h	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
Indústria 1 Caso I	5	0,46 \angle -4,61°	0,31 \angle -9,95°	0,78 \angle -5,22°	0,35 \angle -8,53°
	7	0,23 \angle 5,41°	0,15 \angle -3,53°	0,38 \angle -0,10°	0,14 \angle -4,71°
	11	0,19 \angle -152,53°	0,13 \angle -160,52°	0,32 \angle -153,98°	0,06 \angle -161,96°
	13	0,15 \angle 212,89°	0,10 \angle 202,97°	0,25 \angle -152,03°	0,05 \angle -151,76°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.25 – Grandezas mensuradas na análise da indústria 2 – ensaios MID (caso I).

Situação	h	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
Indústria 2 Caso I	5	0,57 \angle -1,69°	0,20 \angle -23,59°	0,78 \angle -8,97°	0,35 \angle -7,87°
	7	0,28 \angle -1,01°	0,10 \angle 12,18°	0,39 \angle 4,71°	0,13 \angle -3,65°
	11	0,25 \angle -158,23°	0,07 \angle -142,12°	0,32 \angle -153,80°	0,06 \angle -164,46°
	13	0,19 \angle -157,17°	0,06 \angle 215,97°	0,25 \angle -158,20°	0,05 \angle -147,37°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.26 – Grandezas mensuradas na análise da indústria 3 – ensaios MID (caso I).

Situação	h	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
Indústria 3 Caso I	5	0,50 \angle -5,51°	0,27 \angle -7,34°	0,78 \angle -4,15°	0,35 \angle -7,74°
	7	0,25 \angle 9,01°	0,13 \angle -14,58°	0,39 \angle -0,12°	0,14 \angle -2,46°
	11	0,21 \angle -150,64°	0,11 \angle -159,94°	0,32 \angle -149,79°	0,07 \angle -164,98°
	13	0,17 \angle 215,10°	0,08 \angle 193,14°	0,25 \angle -153,66°	0,05 \angle -152,00°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.27 – Grandezas mensuradas na análise da concessionária – ensaios MID (caso I).

Situação	h	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
Concessionária Caso I	5	0,77 \angle -12,55°	0,10 \angle 87,14°	0,78 \angle -5,22°	0,35 \angle -7,74°
	7	0,38 \angle -3,47°	0,03 \angle 67,74°	0,39 \angle 0,12°	0,14 \angle -2,46°
	11	0,30 \angle -156,11°	0,02 \angle -123,60°	0,32 \angle -153,98°	0,07 \angle -164,98°
	13	0,24 \angle -156,84°	0,02 \angle -95,72°	0,25 \angle -152,03°	0,05 \angle -152,00°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.28 – Grandezas mensuradas na análise da indústria 1 – ensaios MID (caso II).

Situação	h	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
Indústria 1 Caso II	5	0,48 \angle -5,81°	0,32 \angle -7,39°	0,79 \angle -6,55°	0,26 \angle -19,04°
	7	0,23 \angle -1,72°	0,16 \angle -13,98°	0,39 \angle -8,14°	0,08 \angle -27,12°
	11	0,19 \angle 187,53°	0,13 \angle -184,54°	0,32 \angle -181,09°	0,05 \angle -174,07°
	13	0,15 \angle 212,89°	0,10 \angle 202,97°	0,25 \angle -152,03°	0,05 \angle -151,76°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.29 – Grandezas mensuradas na análise da indústria 2 – ensaios MID (caso II).

Situação	h	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
Indústria 2 Caso II	5	0,59 \angle -2,28°	0,21 \angle -17,77°	0,80 \angle -4,02°	0,26 \angle -20,22°
	7	0,29 \angle -7,62°	0,10 \angle 4,7°	0,39 \angle -4,67°	0,09 \angle -25,74°
	11	0,25 \angle -176,85°	0,07 \angle -170,69°	0,32 \angle -174,60°	0,05 \angle -175,55°
	13	0,18 \angle 184,57°	0,06 \angle 206,69°	0,24 \angle -164,62°	0,03 \angle -141,63°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.30 – Grandezas mensuradas na análise da indústria 3 – ensaios MID (caso II).

Situação	h	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
Indústria 3 Caso II	5	0,52 \angle -6,37°	0,28 \angle -7,73°	0,79 \angle -7,05°	0,26 \angle -19,06°
	7	0,25 \angle 1,61°	0,14 \angle -18,00°	0,39 \angle -5,15°	0,09 \angle -23,70°
	11	0,21 \angle 188,57°	0,12 \angle -185,23°	0,32 \angle -173,17°	0,05 \angle -173,68°
	13	0,16 \angle 195,48°	0,08 \angle 171,64°	0,24 \angle -177,59°	0,04 \angle -164,20°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.31 – Grandezas mensuradas na análise da concessionária – ensaios MID (caso II).

Situação	h	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
Concessionária Caso II	5	0,80 \angle -10,20°	0,05 \angle 89,29°	0,79 \angle -6,55°	0,26 \angle -19,06°
	7	0,38 \angle -10,73°	0,02 \angle 67,48°	0,39 \angle -8,14°	0,09 \angle -23,70°
	11	0,32 \angle 178,34°	0,01 \angle -81,05°	0,32 \angle 178,91°	0,05 \angle -173,68°
	13	0,23 \angle -166,44°	0,01 \angle -123,71°	0,24 \angle -164,62°	0,04 \angle -164,20°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.32 – Grandezas mensuradas na análise da indústria 1 – ensaios MID (caso III).

Situação	h	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
Indústria 1 Caso III	5	0,49 \angle -7,84°	0,32 \angle -12,27°	0,81 \angle -10,04°	0,22 \angle -15,14°
	7	0,24 \angle -3,55°	0,16 \angle -12,27°	0,40 \angle -5,40°	0,07 \angle -21,49°
	11	0,19 \angle 180,14°	0,14 \angle -184,65°	0,33 \angle -181,45°	0,05 \angle -35,72°
	13	0,14 \angle 184,38°	0,10 \angle 170,21°	0,24 \angle -183,49°	0,01 \angle -5,32°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.33 – Grandezas mensuradas na análise da indústria 2 – ensaios MID (caso III).

Situação	h	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
Indústria 2 Caso III	5	0,59 \angle -3,22°	0,22 \angle -22,59°	0,80 \angle -9,56°	0,22 \angle -15,42°
	7	0,30 \angle -8,85°	0,10 \angle 3,57°	0,40 \angle -6,06°	0,08 \angle -21,85°
	11	0,25 \angle 176,57°	0,07 \angle -173,34°	0,32 \angle -178,25°	0,05 \angle -106,74°
	13	0,18 \angle 176,06°	0,06 \angle 195,94°	0,24 \angle -174,57°	0,01 \angle -44,04°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.34 – Grandezas mensuradas na análise da indústria 3 – ensaios MID (caso III).

Situação	h	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
Indústria 3 Caso III	5	0,53 \angle -8,10°	0,28 \angle -7,78°	0,81 \angle -5,85°	0,22 \angle -13,79°
	7	0,26 \angle -0,12°	0,14 \angle -20,39°	0,40 \angle -7,61°	0,08 \angle -21,14°
	11	0,21 \angle 180,91°	0,12 \angle -191,97°	0,32 \angle -181,58°	0,05 \angle -176,27°
	13	0,16 \angle 187,04°	0,08 \angle 167,92°	0,24 \angle -178,16°	0,01 \angle -36,8°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.35 – Grandezas mensuradas na análise da concessionária – ensaios MID (caso III).

Situação	h	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
Concessionária Caso III	5	0,82 \angle -13,46°	0,05 \angle 91,57°	0,81 \angle -10,04°	0,22 \angle -13,79°
	7	0,40 \angle -11,19°	0,04 \angle 85,66°	0,40 \angle -5,40°	0,08 \angle -21,14°
	11	0,33 \angle 175,33°	0,02 \angle -92,73°	0,33 \angle 178,55°	0,05 \angle -176,27°
	13	0,24 \angle 175,93°	0,01 \angle -44,72°	0,24 \angle 176,51°	0,01 \angle -36,8°

Fonte: Autoria própria.

De posse dos dados colhidos durante os ensaios e seguindo a metodologia de aplicação do MID exposta na seção 3.2, é possível chegar aos percentuais de responsabilidades harmônicas cabidos às quatro partes que constituem o sistema. A Tabela 3.36 até a Tabela 3.39 apresentam os resultados fornecidos pelo MID e os valores considerados como gabarito, os quais foram encontrados em ensaios práticos a partir da aplicação do Método da Superposição (44), (45), como descrito no Apêndice C, seção C.2.

Além dessas informações, as tabelas apresentam os erros absolutos contatados entre os valores de referência e as respostas do MID, e os resultados obtidos para o parâmetro de dominância PD em cada ensaio, sendo tal parâmetro calculado de acordo com a filosofia descrita no item 3.3.2.

Tabela 3.36 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – ensaios MID.

h	Gabarito (%)	Resultado MID (%)			Erro Absoluto			PD		
		Caso I	Caso II	Caso III	Caso I	Caso II	Caso III	Caso I	Caso II	Caso III
5	39,94	40,44	39,93	39,86	0,50	0,01	0,08	0,92	0,94	0,95
7	40,73	40,40	40,23	40,57	0,33	0,50	0,16	0,96	0,97	0,98
11	43,81	39,99	42,00	42,06	3,82	1,81	1,75	0,99	0,99	0,99
13	45,31	39,61	41,38	41,98	5,70	3,93	3,33	0,98	0,98	0,99

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.37 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 2 – ensaios MID.

h	Gabarito (%)	Resultado MID (%)			Erro Absoluto			PD		
		Caso I	Caso II	Caso III	Caso I	Caso II	Caso III	Caso I	Caso II	Caso III
5	24,78	25,76	25,49	26,43	0,98	0,71	1,65	0,92	0,94	0,95
7	26,45	25,14	25,00	25,16	1,31	1,45	1,29	0,96	0,97	0,98
11	29,27	21,78	22,83	23,05	7,49	6,44	6,22	0,99	0,99	0,99
13	31,44	24,79	26,13	25,76	6,65	5,31	5,68	0,98	0,98	0,99

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.38 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 3 – ensaios MID.

<i>h</i>	Gabarito (%)	Resultado MID (%)			Erro Absoluto			PD		
		Caso I	Caso II	Caso III	Caso I	Caso II	Caso III	Caso I	Caso II	Caso III
5	36,83	35,42	34,87	34,84	1,41	1,96	1,99	0,92	0,94	0,95
7	36,39	34,46	34,60	35,07	1,93	1,79	1,32	0,96	0,97	0,98
11	33,18	34,58	35,49	35,53	1,40	2,31	2,35	0,99	0,99	0,99
13	27,11	32,12	33,96	33,45	5,01	6,85	6,34	0,98	0,98	0,99

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.39 – Resultados obtidos para o compartilhamento da concessionária – ensaios MID.

<i>h</i>	Gabarito (%)	Resultado MID (%)			Erro Absoluto			PD		
		Caso I	Caso II	Caso III	Caso I	Caso II	Caso III	Caso I	Caso II	Caso III
5	1,51	0,53	0,65	1,21	0,53	0,65	1,21	0,92	0,94	0,95
7	3,34	2,52	1,15	0,19	2,52	1,15	0,19	0,96	0,97	0,98
11	5,56	5,97	0,17	0,13	5,97	0,17	0,13	0,99	0,99	0,99
13	3,59	5,31	3,54	1,16	5,31	3,54	1,16	0,98	0,98	0,99

Fonte: Autoria própria.

Uma vez que em todos os casos os arranjos estavam satisfatoriamente sintonizados na frequência de interesse, as análises dos resultados podem ser feitas em termos do único parâmetro que de fato altera a efetividade da dominância da configuração: a resistência.

Devido às características dos indutores adquiridos, a Tabela 3.23 mostra que os fatores de qualidade dos filtros montados são considerados baixos, se comparados com filtros comercialmente fabricados para instalação em sistemas reais. No entanto, como nos experimentos laboratoriais são usadas indutâncias muito baixas, observa-se que mesmo indutores com fator de qualidade baixo já apresentam resistências suficientemente pequenas para assegurar o sucesso dos estudos pretendidos.

De forma geral, nota-se na Tabela 3.23 que as resistências dos arranjos sintonizados eram um pouco maiores para os filtros de capacitores de 100 μF (caso I) e menores para os arranjos com capacitores de 200 μF (caso III). Como esperado, esta característica influencia diretamente nos valores dos parâmetros de dominância de cada ensaio: resultados de PD mais baixos para o caso I, intermediários para o caso II e maiores para o caso III. Este comportamento pode ser confirmado pela observação da Tabela 3.36 até a Tabela 3.39. Apesar de PD ser relativamente menor no caso I, mesmo nesta situação tal parâmetro já possui valores que garantem o desempenho acertado do MID.

Assim, uma vez que os valores de resistência dos arranjos não sofreram grandes alterações nos casos I, II e III e como PD sempre apresentou elevado valor (maior que 0,9), em

linhas gerais, pode-se dizer que todos os experimentos realizados tiveram respostas favoráveis para o compartilhamento de responsabilidades.

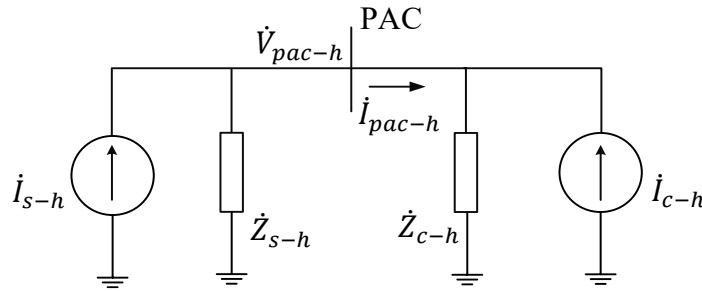
Nota-se que o máximo erro absoluto constatado dentre todos os ensaios é 7,49 unidades percentuais, enquanto o percentil 95 destes valores de erros é 6,58 unidades percentuais. É importante mencionar que os resultados são animadores, especialmente quando se pensa que os próprios valores considerados como gabarito carregam algumas inexatidões. Este fato pode ser constatado, por exemplo, na Tabela 3.39 que mostra a atribuição de pequenos percentuais de responsabilidades à concessionária pelo Método da Superposição. Este fato é justificado por dificuldades de ordem prática, as quais foram explicadas de forma pormenorizada no Apêndice C, seção C.2.

Com base no exposto, infere-se que os erros absolutos encontrados são favoráveis diante dos desafios peculiares da realidade laboratorial, e a eficiência do MID fica também confirmada via ensaios práticos.

3.6 Extrapolação do compartilhamento para um ponto distinto daquele onde se conecta a impedância dominante (EMID)

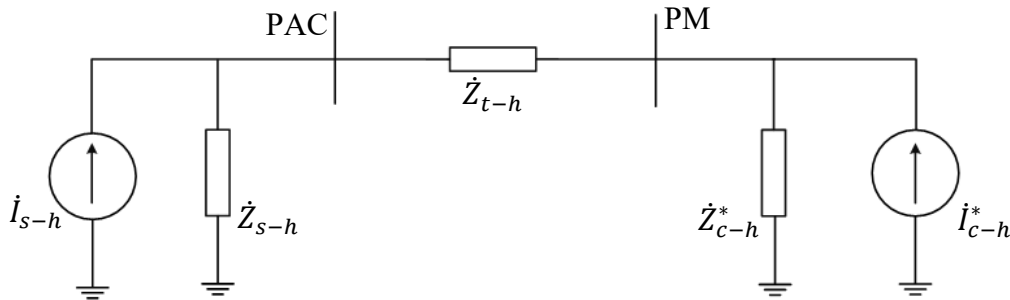
Conforme discutido até o presente momento, o Método da Impedância Dominante (MID) representa um meio eficaz para realizar o compartilhamento de responsabilidades harmônicas, entre duas partes, com relação ao exato ponto do sistema elétrico em que é conectada uma impedância dominante. Esta seção se preocupa em apresentar os fundamentos de um novo procedimento, desenvolvido com o intuito de viabilizar a obtenção do compartilhamento de responsabilidades em um ponto distinto daquele onde se conecta a impedância dominante. Tal procedimento é nomeado neste trabalho como Extrapolação do Compartilhamento pelo Método da Impedância Dominante (EMID).

Para melhor compreender as bases da metodologia, iniciam-se as discussões considerando o circuito equivalente de Norton de um complexo elétrico genérico, para uma ordem harmônica h , do mesmo molde mostrado na Figura 3.2, a qual é repetida por conveniência na sequência, como Figura 3.18.

Figura 3.18 – Circuito equivalente de Norton evidenciando as grandezas envolvidas na problemática.

Fonte: Adaptado de SANTOS, I. N. (60).

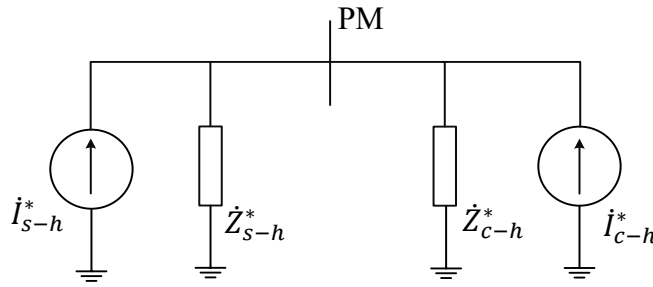
Considerando, agora, que a parte caracterizadora do consumidor tenha um transformador de entrada, com uma impedância harmônica conhecida (\dot{Z}_{t-h}), a Figura 3.18 pode ser relida na forma apresentada na Figura 3.19.

Figura 3.19 – Circuito evidenciando o transformador de entrada na instalação do consumidor.

Fonte: Autoria própria.

Na figura anterior, a sigla PAC continua indicando o Ponto de Acoplamento Comum, representativo do local de interesse ao compartilhamento, enquanto PM indica o Ponto de Medição, no qual é instalada a impedância dominante e são feitas as medições de tensões e correntes necessárias, conforme detalhado na sequência. Já \dot{Z}_{c-h}^* e \dot{I}_{c-h}^* indicam, respectivamente, a impedância e a corrente harmônicas, de ordem h , que caracterizam o arranjo equivalente do consumidor nesta nova configuração, agora sem contar com a presença da impedância do transformador \dot{Z}_{t-h} .

Uma vez que a instalação da impedância dominante e as medições são feitas agora na barra do PM, é conveniente representar o circuito da Figura 3.19 na forma de um equivalente de Norton para a parte à esquerda e à direita do PM. Esta representação é mostrada a seguir, na Figura 3.20.

Figura 3.20 – Circuito equivalente de Norton das partes envolvidas com relação ao PM.**Fonte: Autoria própria.**

Nesta figura, \dot{Z}_{s-h}^* e \dot{i}_{s-h}^* indicam, respectivamente, a impedância e a corrente harmônicas, de ordem h , que caracterizam o arranjo à esquerda do PM, enquanto \dot{Z}_{c-h}^* e \dot{i}_{c-h}^* apontam as grandezas caracterizadoras do arranjo à direita do PM. Utilizando conceitos básicos da teoria de resolução de circuitos elétricos, tendo em mente o Teorema de Norton e sabendo que os circuitos da Figura 3.18, Figura 3.19 e Figura 3.20 são equivalentes, as relações (3.12) a (3.15) podem ser estabelecidas:

$$\dot{Z}_{s-h}^* = \dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{t-h} \quad (3.12)$$

$$\dot{i}_{s-h}^* = \frac{\dot{Z}_{s-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{t-h}} \cdot \dot{i}_{s-h} \quad (3.13)$$

$$\dot{Z}_{c-h} = \dot{Z}_{c-h}^* + \dot{Z}_{t-h} \quad (3.14)$$

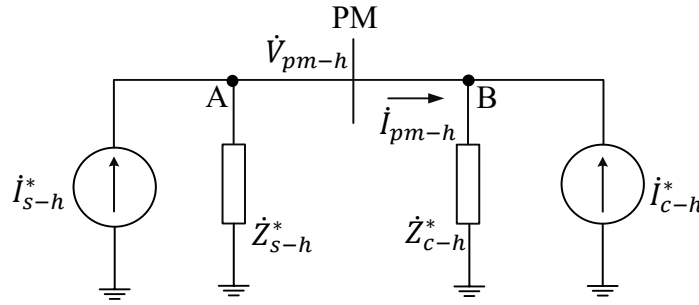
$$\dot{i}_{c-h} = \frac{\dot{Z}_{c-h}^*}{\dot{Z}_{c-h}^* + \dot{Z}_{t-h}} \cdot \dot{i}_{c-h}^* \quad (3.15)$$

Pelo que foi destacado até este ponto, é possível inferir que a Figura 3.20 representa o circuito de interesse no que tange à instalação da impedância dominante e ao estabelecimento de medições no PM. Já a Figura 3.18 apresenta o arranjo que deve ser considerado para a realização do compartilhamento de responsabilidades, propriamente dito, no PAC.

Para aplicar o procedimento EMID é necessário conhecer a impedância harmônica existente entre o PAC e o PM, que neste caso é a impedância do transformador (\dot{Z}_{t-h}). Além disso, é preciso realizar dois grupos de medições no PM, sendo um deles sem a conexão da impedância dominante, condição aqui chamada de 1, e outro após a conexão da mesma, condição nomeada de 2.

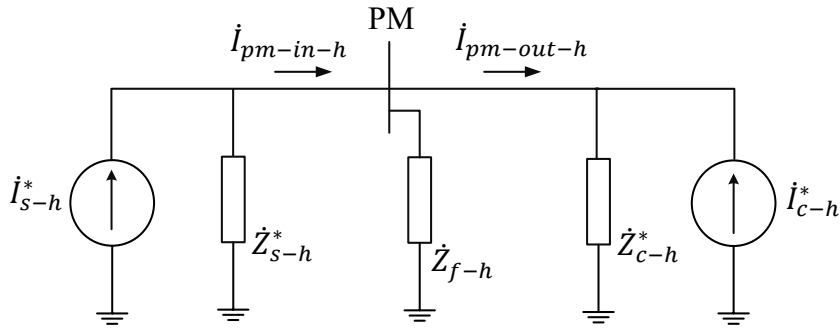
Com base no circuito da Figura 3.20, em Figura 3.21 e Figura 3.22 são apresentadas as grandezas que devem ser mensuradas no PM nas condições de operação 1 e 2, respectivamente.

Figura 3.21 – Grandezas que devem ser mensuradas para aplicação do EMID – condição 1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 3.22 – Grandezas que devem ser mensuradas para aplicação do EMID – condição 2.



Fonte: Autoria própria.

Onde:

 \dot{V}_{pm-h} : tensão harmônica de ordem h mensurada no PM, na condição de operação 1; \dot{I}_{pm-h} : corrente harmônica de ordem h mensurada no PM, na condição de operação 1, com sentido do sistema supridor para o consumidor; \dot{Z}_{f-h} : impedância dominante, na ordem h , instalada no PM na condição de operação 2; $\dot{I}_{pm-in-h}$ e $\dot{I}_{pm-out-h}$: correntes harmônicas de ordem h , que fluem pelo PM à montante e à jusante da impedância dominante, respectivamente, na condição de operação 2.

Para proceder ao compartilhamento de responsabilidades no PAC, seguindo a mesma linha de raciocínio usada no desenvolvimento do MID, é preciso encontrar as grandezas \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} , da Figura 3.18. Os desenvolvimentos feitos na sequência visam, então, expressar \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} em função da impedância do transformador \dot{Z}_{t-h} e das grandezas mensuradas no PM nas condições operativas 1 e 2: \dot{V}_{pm-h} , \dot{I}_{pm-h} , $\dot{I}_{pm-in-h}$ e $\dot{I}_{pm-out-h}$.

É importante mencionar que nos desenvolvimentos da sequência considera-se que entre as duas condições operativas não ocorreram mudanças no perfil de distorções harmônicas existentes no sistema, e nem nas impedâncias harmônicas das partes. Assim, a mudança que difere os circuitos da Figura 3.21 e da Figura 3.22 é unicamente a conexão da impedância dominante no PM.

Seguindo as mesmas primícias discutidas quando da apresentação dos fundamentos do MID, no item 3.2, nota-se na Figura 3.22 que sendo \dot{Z}_{f-h} uma impedância suficientemente dominante sobre as demais, a corrente que flui por ela (\dot{I}_{f-h}) pode ser escrita conforme mostra a equação (3.16).

$$\dot{I}_{f-h} = \dot{I}_{s-h}^* + \dot{I}_{c-h}^* = \dot{I}_{pm-in-h} + (-\dot{I}_{pm-out-h}) \quad (3.16)$$

Da observação de (3.16) é simples escrever (3.17) e (3.18):

$$\dot{I}_{s-h}^* = \dot{I}_{pm-in-h} \quad (3.17)$$

$$\dot{I}_{c-h}^* = -\dot{I}_{pm-out-h} \quad (3.18)$$

Focando, neste momento, na análise dos pontos referenciados como A e B na Figura 3.21, podem ser estabelecidas, respectivamente, as equações (3.19) e (3.20).

$$\dot{I}_{s-h}^* = \frac{\dot{V}_{pm-h}}{\dot{Z}_{s-h}^*} + \dot{I}_{pm-h} \quad (3.19)$$

$$\dot{I}_{c-h}^* = \frac{\dot{V}_{pm-h}}{\dot{Z}_{c-h}^*} - \dot{I}_{pm-h} \quad (3.20)$$

Isolando as grandezas \dot{Z}_{s-h}^* e \dot{Z}_{c-h}^* nas equações anteriores, podem ser escritas (3.21) e (3.22), nesta ordem.

$$\dot{Z}_{s-h}^* = \frac{\dot{V}_{pm-h}}{\dot{I}_{s-h}^* - \dot{I}_{pm-h}} \quad (3.21)$$

$$\dot{Z}_{c-h}^* = \frac{\dot{V}_{pm-h}}{\dot{I}_{c-h}^* + \dot{I}_{pm-h}} \quad (3.22)$$

Ao substituir a equação (3.21) em (3.12) e isolar a grandeza \dot{Z}_{s-h} obtém-se:

$$\dot{Z}_{s-h} = \frac{\dot{V}_{pm-h}}{\dot{I}_{s-h}^* - \dot{I}_{pm-h}} - \dot{Z}_{t-h} \quad (3.23)$$

Substituindo, agora, (3.23) em (3.13) e isolando \dot{I}_{s-h} chega-se à equação (3.24).

$$\dot{I}_{s-h} = \frac{\dot{V}_{pm-h} \cdot \dot{I}_{s-h}^*}{\dot{V}_{pm-h} - \dot{Z}_{t-h} \cdot (\dot{I}_{s-h}^* - \dot{I}_{pm-h})} \quad (3.24)$$

Ainda, ao substituir a equação (3.17) em (3.24), encontra-se (3.25).

$$\dot{I}_{s-h} = \frac{\dot{V}_{pm-h} \cdot \dot{I}_{pm-in-h}}{\dot{V}_{pm-h} - \dot{Z}_{t-h} \cdot (\dot{I}_{pm-in-h} - \dot{I}_{pm-h})} \quad (3.25)$$

Procedimento semelhante é seguido, agora, para a determinação de \dot{I}_{c-h} . Substituindo-se (3.22) em (3.15) e isolando \dot{I}_{c-h} chega-se em:

$$\dot{I}_{c-h} = \frac{\dot{V}_{pm-h} \cdot \dot{I}_{c-h}^*}{\dot{V}_{pm-h} + \dot{Z}_{t-h} \cdot (\dot{I}_{c-h}^* + \dot{I}_{pm-h})} \quad (3.26)$$

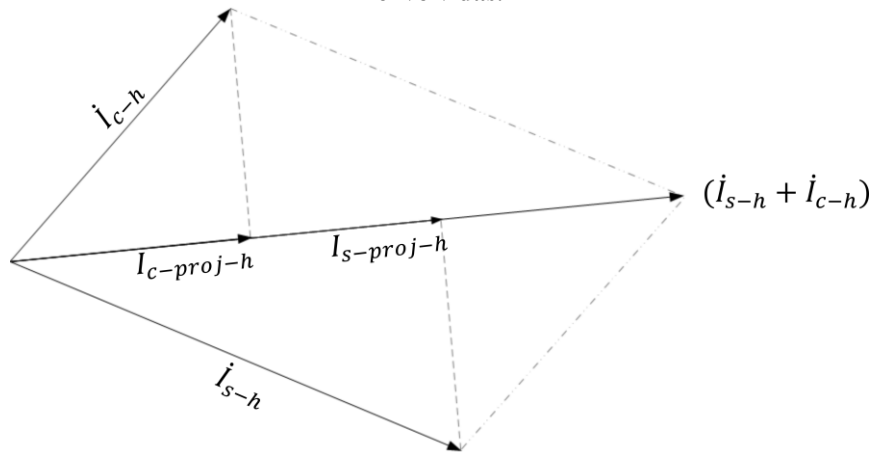
Substituindo, finalmente, (3.18) em (3.26) obtém-se (3.27).

$$\dot{I}_{c-h} = \frac{-\dot{V}_{pm-h} \cdot \dot{I}_{pm-out-h}}{\dot{V}_{pm-h} + \dot{Z}_{t-h} \cdot (\dot{I}_{pm-h} - \dot{I}_{pm-out-h})} \quad (3.27)$$

As equações (3.25) e (3.27) são importantes porque permitem obter, respectivamente, \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} , grandezas estas representadas no circuito da Figura 3.18 e de interesse direto para a obtenção do compartilhamento de responsabilidades no PAC. Como almejado, tais equações são escritas em função do valor de impedância harmônica do transformador (\dot{Z}_{t-h}) e de medições de tensões e correntes harmônicas no PM nas condições operativas 1 e 2 (\dot{V}_{pm-h} , \dot{I}_{pm-h} , $\dot{I}_{pm-in-h}$ e $\dot{I}_{pm-out-h}$).

Assim, de posse dos valores de \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} , de maneira semelhante àquela realizada quando do desenvolvimento do MID, sugere-se que para a obtenção dos percentuais de responsabilidades sobre as distorções do PAC, cabidos ao supridor e ao consumidor, sejam feitas as projeções mostradas na Figura 3.23.

Figura 3.23 – Projeção de fasores para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas.



Fonte: Autoria própria.

Nesta figura, $I_{s-proj-h}$ indica a projeção de i_{s-h} sobre $(i_{s-h} + i_{c-h})$, o que fornece um valor representativo da parcela de responsabilidade do sistema supridor. Já $I_{c-proj-h}$ indica a projeção de i_{c-h} sobre $(i_{s-h} + i_{c-h})$, o que resulta na parcela de responsabilidade do consumidor.

Como demonstrado, o procedimento EMID permite que a partir de medições de tensões e correntes em determinado ponto do sistema elétrico em duas condições diferentes (com a impedância dominante desconectada e conectada), seja possível calcular o compartilhamento de responsabilidades em outra barra do arranjo, desde que se conheça a impedância harmônica existente entre o ponto de medição e o ponto de interesse ao compartilhamento. A aplicação do EMID pode ser especialmente proveitosa em instalações que apresentam um transformador de entrada, pois neste caso é possível obter ou estimar a impedância harmônica do mesmo, e criam-se meios para que a impedância dominante seja instalada em um barramento com nível de tensão menor, fato que, via de regra, pode representar uma solução viável em termos técnicos e econômicos.

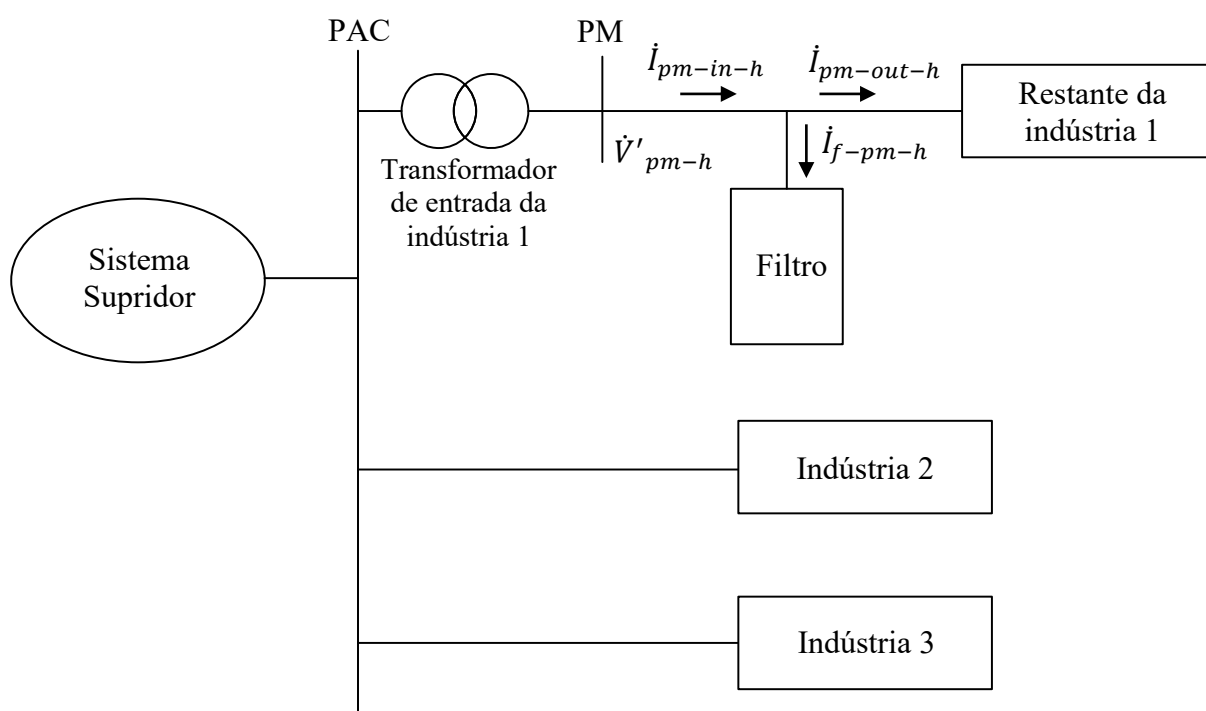
3.7 Avaliação de desempenho da EMID via simulações computacionais

Para avaliação computacional da EMID utiliza-se o mesmo sistema elétrico explorado na seção 3.4, quando da análise de desempenho do MID. No Apêndice B são cuidadosamente

descritas a estrutura e a parametrização deste arranjo, bem como o processo de obtenção dos valores de referência para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas no PAC.

Segundo a filosofia da EMID, a impedância dominante deve ser conectada ao secundário do transformador de entrada da indústria em análise. Neste contexto, para efeito de ilustração, a Figura 3.24 apresenta a esquematização do arranjo de interesse para o caso em que se intenciona obter os percentuais de responsabilidades cabidos à indústria 1, a partir da aplicação da EMID.

Figura 3.24 – Esquema representativo da aplicação da EMID para o compartilhamento da indústria 1.



Fonte: Autoria própria.

Na figura anterior, \dot{V}'_{pm-h} indica a tensão no PM após conexão da impedância dominante, \dot{I}_{f-pm-h} representa a corrente que flui por ela, enquanto $\dot{I}_{pm-in-h}$ e $\dot{I}_{pm-out-h}$ apontam as correntes à montante e à jusante do filtro, nesta ordem. Evidentemente, procedimento análogo ao mostrado é seguido para se chegar nos percentuais de responsabilidades cabidos às indústrias 2 e 3.

No que se refere aos filtros harmônicos passivos sintonizados, nota-se que para a aplicação da EMID na indústria 1 foi usado um dispositivo de potência igual a 600 kVAr, enquanto que nas indústrias 2 e 3 utilizaram-se filtros de 300 kVAr. Esta diferença se justifica pelo fato de a indústria 1 apresentar potência maior e carga não linear mais expressiva que as

demais, o que demanda um filtro maior para a referida instalação. A Tabela 3.40 e a Tabela 3.41 detalham os componentes resistivos (R), indutivos (L) e capacitivos (C) usados nas configurações de filtragem.

Tabela 3.40 – Impedâncias dominantes usadas para análise da indústria 1 – simulações EMID.

Potência do Capacitor do Filtro (kVAr)	Fator de Qualidade do Filtro (Q)	Dessintonia (d)	h	R (mΩ)	L (μH)	C (mF)
600	100	0	5	0,65	34,24	8,22
			7	0,46	17,47	8,22
			11	0,29	7,07	8,22
			13	0,25	5,06	8,22

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.41 – Impedâncias dominantes usadas para análise das indústrias 2 e 3 – simulações EMID.

Potência do Capacitor do Filtro (kVAr)	Fator de Qualidade do Filtro (Q)	Dessintonia (d)	h	R (mΩ)	L (μH)	C (mF)
300	100	0	5	1,29	68,47	4,11
			7	0,92	34,94	4,11
			11	0,59	14,15	4,11
			13	0,50	10,13	4,11

Fonte: Autoria própria.

Seguindo, Tabela 3.42, Tabela 3.43 e Tabela 3.44 mostram as informações obtidas por meio de simulações no PM, após a inserção das impedâncias dominantes no secundário dos transformadores de entrada das instalações consumidoras 1, 2 e 3, respectivamente. Nestas tabelas é adotada a nomenclatura definida na Figura 3.24.

Tabela 3.42 – Grandezas obtidas no secundário para a análise da indústria 1 – simulações EMID.

h	$\dot{I}_{pm-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pm-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-pm-h} (A)	\dot{V}'_{pm-h} (V)
5	287,6∠-8,04°	1673∠27,40°	1915∠22,44°	1,09∠24,46°
7	117,8∠24,95°	709,3∠53,90°	814,4∠49,85°	0,38∠50,47°
11	42,27∠111,4°	139,4∠165,58°	167,6∠153,8°	0,05∠155,4°
13	28,23∠158,0°	65,05∠-84,31°	57,65∠-110,0°	0,02∠-109,3°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.43 – Grandezas obtidas no secundário para a análise da indústria 2 – simulações EMID.

h	$\dot{I}_{pm-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pm-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-pm-h} (A)	\dot{V}'_{pm-h} (V)
5	553,4∠16,33°	555,3∠-1,60°	1095∠7,36°	2,48∠6,35°
7	172,8∠32,96°	228,6∠23,80°	400,2∠27,76°	0,47∠49,71°
11	44,64∠167,1°	78,33∠111,89°	110,1∠131,3°	0,06∠129,8°
13	31,01∠-131,4°	33,50∠159,34°	53,1∠-167,6°	0,02∠147,0°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.44 – Grandezas obtidas no secundário para a análise da indústria 3 – simulações EMID.

h	$I_{pm-in-h}$ (A)	$-I_{pm-out-h}$ (A)	I_{f-pm-h} (A)	V'_{pm-h} (V)
5	510,2 \angle 20,79°	671,2 \angle -1,70°	1159 \angle 7,99°	2,90 \angle 11,54°
7	159,3 \angle 35,46°	285,3 \angle 23,10°	442,2 \angle 27,52°	0,52 \angle 49,77°
11	44,14 \angle 172,80°	97,02 \angle 105,22°	121,0 \angle 124,9°	0,06 \angle 124,7°
13	31,72 \angle -125,0°	38,75 \angle 150,53°	52,39 \angle -172,4°	0,03 \angle 145,3°

Fonte: Autoria própria.

Como descrito na seção anterior, além dos dados presentes na Tabela 3.42 até a Tabela 3.44, para a aplicação da EMID é preciso ainda conhecer a tensão e a corrente harmônicas no PM de cada indústria antes da instalação da impedância dominante. Estas informações estão presentes na Tabela B.11, no Apêndice B. Os valores de impedância harmônica dos transformadores de entrada também foram expostos no referido apêndice, na Tabela B.10.

Dessa maneira, de posse de todas as informações necessárias para a aplicação da EMID, Tabela 3.45, Tabela 3.46 e Tabela 3.47 resumem os resultados obtidos para os percentuais de responsabilidades, sobre tensões harmônicas no PAC, cabidos às indústrias 1, 2 e 3, nesta ordem.

Tabela 3.45 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – simulações EMID.

h	Gabarito (%)	Resultado EMID (%)	Erro absoluto
5	54,04	60,29	6,25
7	48,83	53,33	4,50
11	44,61	43,82	0,79
13	49,63	53,10	3,47

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.46 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 2 – simulações EMID.

h	Gabarito (%)	Resultado EMID (%)	Erro absoluto
5	20,92	21,18	0,26
7	22,76	24,68	1,92
11	26,34	27,26	0,92
13	24,44	20,91	3,53

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.47 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 3 – simulações EMID.

h	Gabarito (%)	Resultado EMID (%)	Erro absoluto
5	25,02	27,25	2,23
7	28,45	30,86	2,41
11	29,06	30,73	1,67
13	25,81	20,38	5,43

Fonte: Autoria própria.

Os resultados mostrados indicam que, em linhas gerais, os valores mais próximos da referência foram encontrados para a indústria 2, enquanto os mais afastados foram constatados

para a indústria 1 (erro absoluto mínimo de 0,26 unidades percentuais para $h = 5$ na indústria 2, e erro absoluto máximo de 6,25 unidades percentuais para $h = 5$ na indústria 1). Ademais, registra-se que o percentil 95 dos erros associados a todos os casos de compartilhamento descritos da Tabela 3.45 até a Tabela 3.47 foi de 5,80 unidades percentuais.

Assim, pode-se afirmar que a EMID responde de maneira adequada aos fins pretendidos, uma vez que os resultados obtidos em todos os casos estão satisfatoriamente próximos do esperado.

3.8 Avaliação de desempenho da EMID via ensaios laboratoriais

Para verificar o desempenho da EMID no sistema montado em laboratório, descrito no Apêndice C, optou-se por fazer um estudo de caso específico da indústria 1. Esta escolha foi feita porque a referida indústria é a que apresenta carga não linear de maior potência e, consequentemente, maiores níveis de responsabilidades pelas distorções presentes no PAC.

Como indica o esquema da Figura 3.24, para aplicação da EMID é instalada uma impedância dominante no secundário do transformador de entrada da indústria de interesse, no chamado ponto de medição (PM). Assim como feito nos experimentos laboratoriais para avaliação do MID, os ensaios da presente seção são divididos em casos I, II e III, os quais representam a utilização de filtros com capacitores de 100 μF , 150 μF e 200 μF , respectivamente. As configurações de filtros utilizadas são as mesmas descritas na Tabela 3.23 do item 3.5, mas para comodidade do leitor são novamente colocadas aqui na Tabela 3.48.

Tabela 3.48 – Caracterização das impedâncias dominantes usadas – ensaios EMID.

Caso	Potência do Capacitor do Filtro (kVAr)	h	Fator de Qualidade do Filtro (Q)	Dessintonia (d)	R (Ω)	L (mH)	C (μF)
I	1,82	5	11,77	0,01	0,4460	2,7840	100,6
		7	10,56	0,03	0,3540	1,4166	100,6
		11	12,08	0,06	0,1969	0,5737	100,2
		13	9,92	0,01	0,2067	0,4182	99,6
II	2,74	5	10,74	0,05	0,3217	1,8335	150,4
		7	12,07	0,09	0,2043	0,9345	149,4
		11	9,67	0,08	0,1631	0,3802	154,9
		13	6,42	0,01	0,2067	0,2706	154,0
III	3,65	5	9,58	0,02	0,2738	1,3922	200,3
		7	10,55	0,09	0,1737	0,6944	201,3
		11	10,00	0,08	0,1216	0,2933	201,0
		13	19,23	0,09	0,0535	0,2098	201,2

Fonte: Autoria própria.

Seguindo a nomenclatura adotada neste trabalho, em consonância com as grandezas descritas na Figura 3.24, Tabela 3.49, Tabela 3.50 e Tabela 3.51 apresentam as medições realizadas no PM, para os ensaios do caso I, II e III, respectivamente. Os valores presentes nas tabelas representam a média obtida a partir de cinco medições distintas, espaçadas por um intervalo de tempo de 5 segundos.

Tabela 3.49 – Grandezas mensuradas no secundário na análise da indústria 1 – ensaios EMID (caso I).

h	$\dot{I}_{pm-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pm-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-pm-h} (A)	\dot{V}'_{pm-h} (V)
5	0,33 \angle 21,07°	0,32 \angle -19,19°	0,60 \angle 0,82°	0,47 \angle -18,23°
7	0,16 \angle 29,74°	0,16 \angle -26,60°	0,30 \angle 0,91°	0,33 \angle -113,96°
11	0,15 \angle 209,76°	0,12 \angle 176,46°	0,26 \angle 198,81°	0,12 \angle 116,48°
13	0,11 \angle 215,69°	0,09 \angle -186,58°	0,20 \angle -155,55°	0,17 \angle 14,62°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.50 – Grandezas mensuradas no secundário na análise da indústria 1 – ensaios EMID (caso II).

h	$\dot{I}_{pm-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pm-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-pm-h} (A)	\dot{V}'_{pm-h} (V)
5	0,34 \angle 30,88°	0,32 \angle -19,67°	0,60 \angle 5,94°	0,42 \angle -23,81°
7	0,17 \angle 39,59°	0,17 \angle -17,38°	0,30 \angle 12,26°	0,35 \angle -120,86°
11	0,15 \angle 229,30°	0,13 \angle -187,74°	0,24 \angle -152,06°	0,10 \angle 109,98°
13	0,11 \angle -122,45°	0,10 \angle 159,45°	0,17 \angle 207,05°	0,19 \angle 14,46°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.51 – Grandezas mensuradas no secundário na análise da indústria 1 – ensaios EMID (caso III).

h	$\dot{I}_{pm-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pm-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-pm-h} (A)	\dot{V}'_{pm-h} (V)
5	0,35 \angle 42,25°	0,32 \angle -13,33°	0,59 \angle 16,41°	0,36 \angle -21,03°
7	0,17 \angle 55,07°	0,17 \angle -12,66°	0,28 \angle 25,92°	0,35 \angle -123,65°
11	0,15 \angle -111,27°	0,13 \angle -195,84°	0,21 \angle 206,54°	0,10 \angle 105,83°
13	0,12 \angle -96,26°	0,10 \angle 164,42°	0,14 \angle -138,7°	0,20 \angle 13,85°

Fonte: Autoria própria.

Além das medições mostradas nas tabelas anteriores, realizadas no secundário do transformador após a inserção das impedâncias dominantes, é preciso ainda conhecer dois outros grupos de informações para proceder à aplicação da EMID: os valores de impedâncias harmônicas do transformador e os valores de tensões e correntes no secundário antes da instalação dos filtros. A descrição destes dados se encontra na Tabela C.7 e na Tabela C.8 do Apêndice C.

Tendo em mãos todos os requisitos necessários, a metodologia da EMID é aplicada conforme a filosofia descrita no item 3.6. A Tabela 3.52 resume os percentuais de responsabilidades cabidos à indústria 1, pelas distorções no PAC, a partir dos procedimentos realizados no PM. Na tabela também é possível constatar os erros absolutos obtidos em cada

caso, tendo como referência o gabarito dos resultados de compartilhamento obtidos no item C.2 do Apêndice C.

Tabela 3.52 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – ensaios EMID.

h	Gabarito (%)	Resultado EMID (%)			Erro Absoluto		
		Caso I	Caso II	Caso III	Caso I	Caso II	Caso III
5	39,94	37,21	35,78	34,79	2,73	4,16	5,15
7	40,73	38,23	38,13	38,57	2,50	2,60	2,16
11	43,81	48,28	48,77	48,77	4,47	4,96	4,96
13	45,31	53,80	54,67	55,49	8,49	9,36	10,18

Fonte: Autoria própria.

A análise dos resultados presentes na Tabela 3.52 revelam um erro absoluto máximo de 10,18 unidades percentuais, enquanto o percentil 95 dos erros é 9,73 unidades percentuais. É importante perceber que os erros são claramente mais altos para as ordens harmônicas maiores (11 e 13), e isso se deve ao fato de as distorções destas frequências serem menores, o que tornam mais imprecisas as medições nestes casos.

Além disso, percebe-se que os erros nos casos II e III são maiores do que no caso I. De fato, no caso I o filtro com capacitor de 100 μF já apresenta teor de dominância suficiente para garantir o sucesso da EMID, e ao considerar filtros com potências maiores, mais mudanças acontecem nos moldes de operação do sistema, inclusive na frequência fundamental, o que contribui para aumento dos erros.

Enfim, dadas as limitações e imprecisões intrínsecas ao ambiente laboratorial, considera-se que os erros constatados são promissores para confirmar a eficiência da EMID. Os resultados são ainda mais prósperos quando se reconhece que a configuração do sistema ensaiado apresenta um cenário particularmente desafiador: a instalação de impedâncias dominantes de potências relativamente altas exatamente no mesmo barramento onde a carga não linear está conectada. A EMID parece ser uma metodologia robusta, pois fornece bons resultados mesmo quando acontecem alterações significativas nas características de operação do sistema.

4 O MÉTODO DA INJEÇÃO DE CORRENTE HARMÔNICA (MIC)

4.1 Considerações iniciais

Este capítulo apresenta uma proposta inédita para a realização do compartilhamento de responsabilidades sobre distorções harmônicas. O procedimento intitulado Método da Injeção de Corrente Harmônica (MIC) baseia-se na inserção de pequenas correntes harmônicas no ponto de interesse, com o intuito de se obter os percentuais de responsabilidades cabidos às partes envolvidas. Reconhece-se que existem na literatura propostas que utilizam a injeção de correntes para a determinação de impedâncias harmônicas de sistemas, como (7), (123) e (126), contudo a originalidade do método aqui proposto é que tais injeções são usadas com a intenção direta de determinar a responsabilização harmônica.

A fundamentação teórica do MIC é descrita em 4.2, e as avaliações de desempenho da mesma foram realizadas em duas etapas. No item 4.3 são exibidos e discutidos resultados provenientes de simulações computacionais, enquanto em 4.4 são analisados os dados advindos de ensaios laboratoriais.

Como desdobramento da metodologia, ainda outros dois procedimentos são apresentados no presente capítulo. No item 4.5 é desenvolvido um meio para se obter o compartilhamento em um ponto do sistema elétrico diferente daquele onde as correntes harmônicas são injetadas, desde que seja conhecido o valor de impedância harmônica existente do ponto da injeção de correntes até o ponto de interesse ao compartilhamento. A Extrapolação do Compartilhamento pelo Método da Injeção de Corrente Harmônica (EMIC) é avaliada nos itens 4.6 e 4.7 em termos de simulações e em ensaios práticos, respectivamente.

O segundo desdobramento do MIC está relacionado à possibilidade de se monitorar diretamente as correntes harmônicas produzidas por uma carga não linear dentro de uma unidade consumidora. A Extrapolação do Compartilhamento pelo Método da Injeção de Corrente Harmônica com Monitoramento de Carga (EMIC-MC) é apresentada, em 4.8, como um meio de se encontrar o percentual de responsabilidade de uma carga específica, desde que sejam monitoradas as correntes harmônicas geradas por ela, e se conheça a impedância harmônica entre a barra em que esta carga se encontra conectada e o ponto de interesse ao

compartilhamento. Este procedimento é aplicável a instalações que apresentam uma carga não linear de destaque, com potência relevante, responsável por praticamente a totalidade das distorções geradas pela instalação. Nota-se que a EMIC-MC não demanda a inserção de uma fonte de corrente harmônica externa no sistema, visto que o monitoramento das correntes de distorção geradas pela própria carga de interesse já é suficiente para se chegar aos fins pretendidos. Também o procedimento EMIC-MC apresenta seu desempenho avaliado em termos de simulações e práticas laboratoriais nos itens 4.9 e 4.10, respectivamente.

Ressalta-se que, em todos os casos, os sistemas elétricos usados para as simulações e para os ensaios em laboratório são exatamente os mesmos empregados nos trabalhos relatados no capítulo 3.

4.2 Fundamentação teórica do MIC

A fundamentação física do Método da Injeção de Corrente Harmônica (MIC) mostra que o estabelecimento de duas condições distintas, no que se refere à injeção de correntes harmônicas no ponto de interesse ao compartilhamento, permite determinar os percentuais de responsabilidades cabidos aos agentes envolvidos de maneira confiável. Tais condições podem envolver, por exemplo, um primeiro caso sem qualquer tipo de injeção e o segundo com a inserção de determinada corrente harmônica, ou ainda, dois casos que contam com a injeção de correntes distintas entre eles.

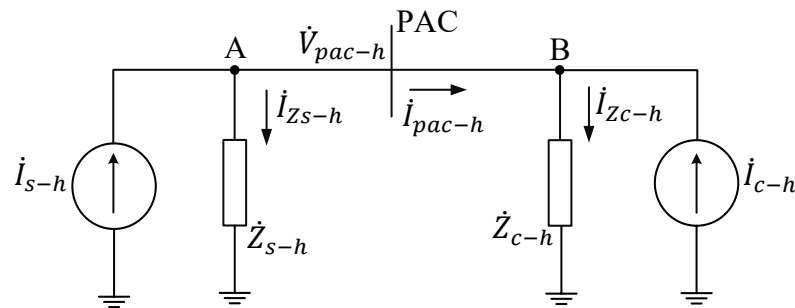
É importante esclarecer que a partir do manuseamento dos resultados da perturbação, o procedimento se propõe a realizar, de forma direta, o compartilhamento de responsabilidades entre duas partes de um sistema. Assim, não há o objetivo de se definir, ou estimar, valores de impedâncias harmônicas de redes elétricas ou de unidades consumidoras.

Apesar de poder ser considerada como invasiva, a metodologia proposta neste momento procura minimizar as dificuldades intrínsecas a este fato, visto que envolve a injeção de pequenos valores de correntes harmônicas. Isto pode ser conseguido, por exemplo, a partir de um instrumento de controle eletrônico desenvolvido especialmente para este fim ou, até mesmo, de um dispositivo ativo de filtragem harmônica. A utilização de tais equipamentos pode viabilizar o colhimento contínuo de informações e a obtenção de um perfil de atribuição de responsabilidades ao longo de um período de tempo, e não apenas de maneira pontual.

Para orientar os desenvolvimentos relacionados ao método proposto, seguindo a ideia apresentada pela Figura 3.1, imagina-se um ponto de acoplamento comum entre o sistema supridor e uma determinada unidade consumidora constituída por cargas lineares e não lineares. Neste caso, uma vez que o supridor possui a ele conectado diversas outras instalações causadoras de distorções, torna-se claro que os harmônicos constatados no PAC são resultado de contribuições advindas de ambas as partes a ele conectadas.

O circuito equivalente de Norton do complexo mencionado é mostrado na Figura 3.2. Por conveniência, para facilitar as análises vindouras, esta configuração é adaptada e mostrada na Figura 4.1 abaixo.

Figura 4.1 – Circuito equivalente de Norton evidenciando as grandezas envolvidas na problemática.



Fonte: Autoria própria.

Sabe-se que nesta figura, para uma dada ordem h , a corrente \dot{I}_{s-h} representa as distorções harmônicas originadas do circuito equivalente do supridor, \dot{I}_{c-h} é a corrente indicativa das distorções advindas do circuito do consumidor, \dot{Z}_{s-h} e \dot{Z}_{c-h} são as impedâncias harmônicas dos circuitos do supridor e do consumidor, respectivamente. Ainda, \dot{I}_{zs-h} e \dot{I}_{zc-h} indicam as correntes que fluem por \dot{Z}_{s-h} e \dot{Z}_{c-h} , nesta ordem.

Conforme comentado na seção 3.2, a observação do circuito equivalente mostrado anteriormente sugere que a corrente (\dot{I}_{pac-h}) e a tensão (\dot{V}_{pac-h}) presentes no PAC são decorrentes da superposição dos efeitos das fontes de corrente representativas das distorções advindas das partes (\dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h}). Em outras palavras, o Método da Superposição (44), (45) pode ser utilizado para definir as contribuições individuais do supridor e do consumidor na corrente e na tensão total observadas no PAC, para uma ordem h específica.

Com foco na grandeza tensão, as equações (3.2) e (3.3) são repetidas a seguir, por conveniência, como (4.1) e (4.2). Elas fornecem o fasor representativo da tensão harmônica no

PAC proveniente das distorções advindas exclusivamente do supridor ($\dot{V}_{s-pac-h}$), e o fasor indicativo da tensão harmônica ocasionada apenas pela unidade consumidora ($\dot{V}_{c-pac-h}$).

$$\dot{V}_{s-pac-h} = \frac{\dot{Z}_{s-h} \cdot \dot{Z}_{c-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{c-h}} \cdot \dot{I}_{s-h} \quad (4.1)$$

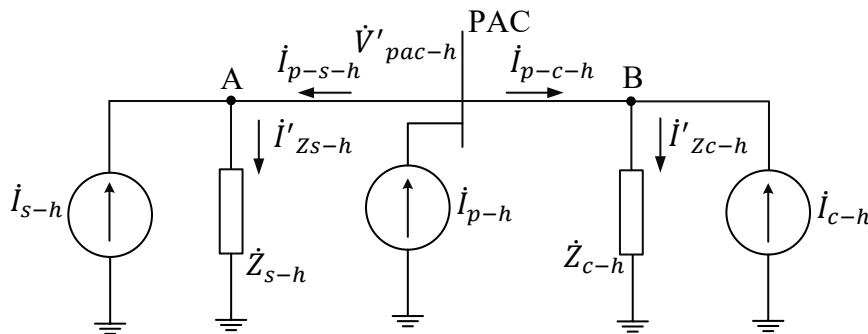
$$\dot{V}_{c-pac-h} = \frac{\dot{Z}_{s-h} \cdot \dot{Z}_{c-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{c-h}} \cdot \dot{I}_{c-h} \quad (4.2)$$

É evidente que os fasores $\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$ dependem de um mesmo fator, que indica o paralelo das impedâncias \dot{Z}_{s-h} e \dot{Z}_{c-h} , multiplicado pelas correntes \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} , respectivamente. Deste modo, constata-se que a partir do conhecimento de tais correntes, ou da proporcionalidade entre ambas, chega-se ao compartilhamento de responsabilidades sobre tensões harmônicas, e não correntes.

À luz desta percepção, o Método da Injeção de Correntes Harmônicas busca sugerir um procedimento que culmine na determinação das correntes \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} a partir de grandezas possíveis de se mensurar na prática.

Para facilitar o entendimento do procedimento proposto, a Figura 4.2 exhibe o circuito equivalente do mesmo complexo mostrado na Figura 4.1, após a injeção de corrente no PAC.

Figura 4.2 – Arranjo evidenciando a injeção de corrente harmônica no PAC.



Com o objetivo de facilitar a organização das ideias, considera-se que a Figura 4.1 indica a condição de operação 1, e a Figura 4.2 representa a condição operativa 2.

Observa-se que nesta última figura, para uma dada ordem h , \dot{V}'_{pac-h} representa a tensão harmônica no PAC na condição 2, \dot{I}_{p-h} faz referência à corrente de perturbação injetada, sendo \dot{I}_{p-s-h} e \dot{I}_{p-c-h} as parcelas desta corrente que fluem do ponto de inserção em direção ao sistema

supridor e ao consumidor, respectivamente. Por fim, as grandezas \dot{I}'_{zs-h} e \dot{I}'_{zc-h} indicam as correntes que fluem pelas impedâncias representativas do sistema supridor e do consumidor, nesta ordem.

Entre as condições de operação 1 e 2 considera-se que não houve alterações nas impedâncias \dot{Z}_{s-h} e \dot{Z}_{c-h} e nas correntes \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} . Assim, as duas condições diferem entre si unicamente pela inserção da corrente \dot{I}_{p-h} no PAC.

Seguindo o raciocínio, os desenvolvimentos mostrados na sequência são divididos em duas partes. Primeiramente, é formulada a obtenção das correntes \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} , em função de grandezas possíveis de serem mensuradas nas condições operativas representadas por Figura 4.1 e Figura 4.2, a saber: \dot{V}_{pac-h} , \dot{I}_{pac-h} , \dot{V}'_{pac-h} , \dot{I}_{p-s-h} e \dot{I}_{p-c-h} . Em seguida, de posse das correntes \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} , argumenta-se sobre o procedimento usado para a determinação do compartilhamento de responsabilidades propriamente dito.

4.2.1 Determinação das grandezas de interesse

Ao aplicar a Lei de Kirchhoff das correntes, nos pontos referenciados como A na Figura 4.1 e Figura 4.2, podem ser escritas as equações (4.3) e (4.4), respectivamente:

$$\dot{I}_{s-h} - \dot{I}_{zs-h} - \dot{I}_{pac-h} = 0 \quad (4.3)$$

$$\dot{I}_{s-h} - \dot{I}'_{zs-h} + \dot{I}_{p-s-h} = 0 \quad (4.4)$$

Ainda de acordo com a análise imediata dos circuitos representativos das condições de operação 1 e 2, é facilmente compreensível estabelecer as relações mostradas em (4.5) e (4.6):

$$\dot{Z}_{s-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{I}_{zs-h}} \quad (4.5)$$

$$\dot{Z}_{s-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{\dot{I}'_{zs-h}} \quad (4.6)$$

Considerando que a impedância \dot{Z}_{s-h} é a mesma nas duas condições operativas analisadas pode-se, então, igualar os segundos termos de (4.5) e (4.6). A equação obtida a partir

deste procedimento é escrita em (4.7), considerando que foi feita a opção por isolar a grandeza \dot{I}'_{zs-h} .

$$\dot{I}'_{zs-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{\dot{V}_{pac-h}} \cdot \dot{I}_{zs-h} \quad (4.7)$$

Procede-se, agora, à substituição da equação (4.7) em (4.4), com a intenção de isolar a grandeza \dot{I}_{zs-h} , como mostra (4.8).

$$\dot{I}_{zs-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{V}'_{pac-h}} \cdot (\dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{p-s-h}) \quad (4.8)$$

Por fim, ao substituir (4.8) em (4.3) e realizar manobras matemáticas para isolar a grandeza \dot{I}_{s-h} , obtém-se a equação (4.9).

$$\dot{I}_{s-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h} \cdot \dot{I}_{p-s-h} + \dot{V}'_{pac-h} \cdot \dot{I}_{pac-h}}{\dot{V}'_{pac-h} - \dot{V}_{pac-h}} \quad (4.9)$$

Uma vez obtido \dot{I}_{s-h} , procede-se agora ao desenvolvimento da formulação de \dot{I}_{c-h} . Seguindo uma linha de raciocínio análoga à descrita anteriormente, agora com o foco de atenções voltado aos pontos referenciados como B em Figura 4.1 e Figura 4.2, é possível escrever as equações (4.10) e (4.11).

$$\dot{I}_{pac-h} - \dot{I}_{zc-h} + \dot{I}_{c-h} = 0 \quad (4.10)$$

$$\dot{I}_{p-c-h} - \dot{I}'_{zc-h} + \dot{I}_{c-h} = 0 \quad (4.11)$$

A análise direta dos circuitos estudados também permite definir a impedância \dot{Z}_{c-h} conforme mostrado nas equações (4.12) e (4.13).

$$\dot{Z}_{c-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{I}_{zc-h}} \quad (4.12)$$

$$\dot{Z}_{c-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{\dot{I}'_{zc-h}} \quad (4.13)$$

Considerando que a impedância \dot{Z}_{c-h} é a mesma nas duas condições operativas, pode-se igualar os segundos membros de (4.12) e (4.13) e isolar a grandeza \dot{I}'_{zc-h} , de maneira a obter (4.14).

$$\dot{I}'_{zc-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{\dot{V}_{pac-h}} \cdot \dot{I}_{zc-h} \quad (4.14)$$

Ao substituir (4.14) em (4.11), com o objetivo de isolar de \dot{I}_{zc-h} , chega-se a (4.15).

$$\dot{I}_{zc-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{V}'_{pac-h}} \cdot (\dot{I}_{c-h} + \dot{I}_{p-c-h}) \quad (4.15)$$

Finalmente, substituindo (4.15) em (4.10) e fazendo o manuseio matemático necessário, é possível definir a formulação para cálculo de \dot{I}_{c-h} , como mostra (4.16).

$$\dot{I}_{c-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h} \cdot \dot{I}_{p-c-h} - \dot{V}'_{pac-h} \cdot \dot{I}_{pac-h}}{\dot{V}'_{pac-h} - \dot{V}_{pac-h}} \quad (4.16)$$

Com a obtenção das grandezas \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} , nas formas mostradas nas equações (4.9) e (4.16), respectivamente, torna-se possível avançar nos desenvolvimentos necessários para se chegar ao compartilhamento de responsabilidades, como trata a seção a seguir.

4.2.2 Compartilhamento de responsabilidades

Tendo em mente o conteúdo das equações (4.1) e (4.2), é evidente que a parcela de responsabilidade, de cada uma das partes envolvidas sobre a tensão harmônica total constatada no PAC, depende diretamente da relação entre as correntes \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} . Desta forma, a metodologia aqui apresentada sugere que para encontrar os percentuais de responsabilidades, cabidos ao supridor e ao consumidor, sejam feitas as projeções dos fasores \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} sobre o fasor da corrente total de distorção de ordem h a que o sistema elétrico se encontra submetido ($\dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h}$). Este procedimento é ilustrado na Figura 4.3.

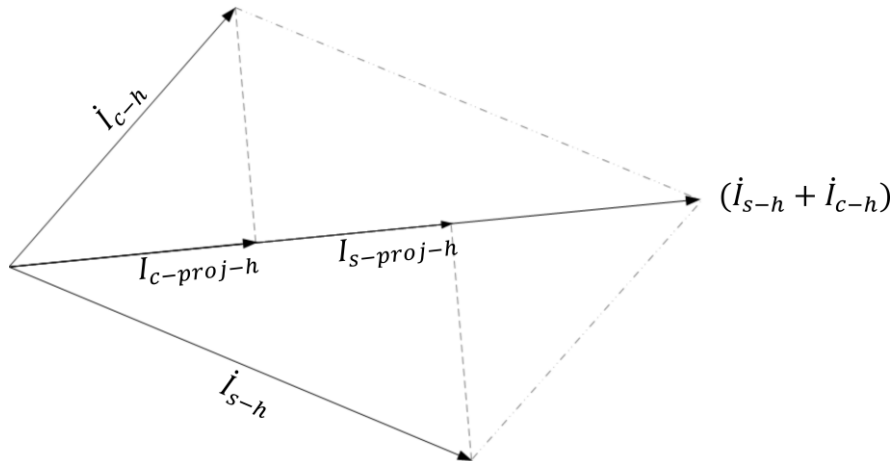
Reitera-se, neste ponto, uma observação relevante: o compartilhamento feito com base nas projeções de \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} sobre $(\dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h})$ conduz exatamente ao mesmo resultado do compartilhamento realizado com base nas projeções das grandezas $\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$ sobre

\dot{V}_{pac-h} . Assim, diferentemente do compartilhamento de corrente no PAC, que depende diretamente dos valores das impedâncias harmônicas das partes, o compartilhamento de tensões está unicamente atrelado a \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} , sem depender das impedâncias harmônicas do supridor e consumidor.

Ademais, como já comentado no Capítulo 2 deste trabalho, a maior parte das normas e recomendações relacionadas ao tema da qualidade da energia elétrica, em diferentes partes do mundo, preza pelo estabelecimento de valores de referência para tensões harmônicas, e não correntes.

Pelos motivos expostos, considera-se pertinente o procedimento aqui proposto, formulado de maneira a culminar no compartilhamento de responsabilidades sobre tensões harmônicas.

Figura 4.3 – Projeção de fasores para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas.



Fonte: Autoria própria.

Nesta figura, $I_{s-proj-h}$ indica a projeção de \dot{I}_{s-h} sobre $(\dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h})$, o que resulta em um número escalar que define a parcela de responsabilidade do sistema supridor. Já $I_{c-proj-h}$ aponta a projeção de \dot{I}_{c-h} sobre $(\dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h})$, o que fornece a parcela de responsabilidade da unidade consumidora em questão. Neste processo, considera-se que o módulo de $(\dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h})$ indica a totalidade, ou 100%, enquanto as projeções $I_{s-proj-h}$ e $I_{c-proj-h}$ representam as parcelas referentes aos percentuais das partes.

É importante mencionar que, em geral, pequenos valores de corrente harmônica injetada no PAC (\dot{I}_{p-h}) já fornecem bons resultados para a metodologia, sendo necessário apenas ocasionar uma perturbação mínima perceptível pelos aparelhos de medição na ordem

harmônica h de interesse. Além disso, as condições operativas 1 e 2, definidas aqui para o desenvolvimento da proposta, indicam apenas uma orientação sobre os princípios do método.

Na verdade, o procedimento pode ser aplicado para quaisquer duas situações de operação, desde que se observe, de uma situação para outra, uma variação na corrente \dot{I}_{p-h} . Assim, com auxílio de controle eletrônico, como um dispositivo de filtragem ativa, a metodologia pode ser aplicada continuamente, em um determinado intervalo de tempo, a partir de uma pequena alteração na corrente injetada, para mais ou para menos. Isto permite que seja traçado um perfil do compartilhamento de responsabilidades durante certo período, o que é interessante de se obter principalmente em sistemas caracterizados por uma acentuada dinâmica de operação.

4.3 Avaliação de desempenho do MIC via simulações computacionais

O objetivo desta seção é avaliar o Método da Injeção de Corrente Harmônica por meio computacional. O sistema elétrico simulado, cuja descrição pormenorizada se encontra no Apêndice B, é o mesmo usado no capítulo anterior para avaliação do MID e da EMID. Dessa maneira, pode-se dizer que o arranjo é constituído pelo circuito da concessionária alimentando, com tensões perfeitamente senoidais, três unidades industriais constituídas por cargas lineares e não lineares, conforme indica o esquema genérico da Figura 3.13.

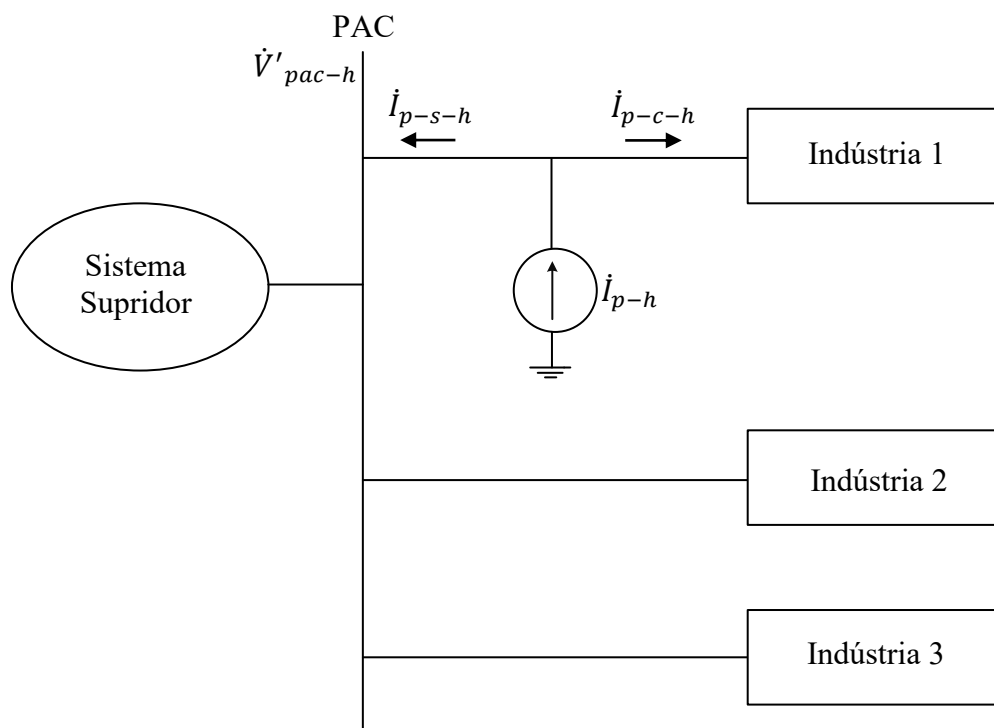
Para viabilizar a aplicação do MIC é preciso que o arranjo seja submetido a duas condições operativas diferentes. Considera-se que a primeira delas, conforme indicado na Figura 4.1, abrange a obtenção de tensões e correntes harmônicas no PAC sem qualquer injeção de corrente. Já a segunda condição de operação envolve a injeção de uma pequena corrente de perturbação, como representado na Figura 4.2.

As informações relativas a tensões e correntes harmônicas na condição 1 são encontradas no Apêndice B, mais especificamente na Tabela B.9. No que diz respeito à obtenção da condição 2, a Figura 4.4 segue a nomenclatura da Figura 4.2 e procura clarear o processo de injeção de correntes para realização do compartilhamento de responsabilidades entre a indústria 1 e o restante do sistema. Neste caso, o consumidor é encarado como sendo apenas a indústria 1, enquanto todas as demais partes passam a constituir o sistema supridor

desta indústria. Raciocínio análogo é repetido para a obtenção dos percentuais de compartilhamento cabidos às unidades industriais 2 e 3.

A Tabela 4.1 até a Tabela 4.4 indicam as grandezas obtidas no PAC, quando da injeção de correntes harmônicas para a obtenção das responsabilidades cabidas às indústrias 1, 2, 3 e concessionária, nesta ordem. Foi feita a opção por inserir correntes de magnitudes bastante reduzidas, sempre inferiores a 1% da corrente presente nos pontos de interesse na condição operativa 1, em cada ordem h estudada. A terminologia usada nas referidas tabelas segue o padrão adotado na seção anterior, e mostrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Esquema representativo da aplicação do MIC para o compartilhamento da indústria 1.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.1 – Grandezas obtidas para a análise da indústria 1 – simulações MIC.

h	I_{p-h} (A)	I_{p-s-h} (A)	I_{p-c-h} (A)	V'_{pac-h} (V)
5	$0,5 \angle 0^\circ$	$28,79 \angle 36,24^\circ$	$28,39 \angle -143,16^\circ$	$285,9 \angle 108,7^\circ$
7	$0,4 \angle 0^\circ$	$8,03 \angle -1,44^\circ$	$7,63 \angle 178,49^\circ$	$131,4 \angle 80,71^\circ$
11	$0,3 \angle 0^\circ$	$2,83 \angle -114,48^\circ$	$2,96 \angle 60,22^\circ$	$50,27 \angle -85,43^\circ$
13	$0,2 \angle 0^\circ$	$2,33 \angle -126,51^\circ$	$2,46 \angle 49,73^\circ$	$45,28 \angle -93,51^\circ$

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.2 – Grandezas obtidas para a análise da indústria 2 – simulações MIC.

h	\dot{I}_{p-h} (A)	\dot{I}_{p-s-h} (A)	\dot{I}_{p-c-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
5	0,5 \angle 0°	9,26 \angle -11,21°	8,77 \angle 168,16°	131,4 \angle 80,71°
7	0,4 \angle 0°	3,18 \angle -16,13°	2,80 \angle 161,60°	131,4 \angle 80,71°
11	0,3 \angle 0°	1,23 \angle 130,47°	1,44 \angle -40,46°	50,27 \angle -85,43°
13	0,2 \angle 0°	0,97 \angle 116,79°	1,08 \angle -53,70°	45,28 \angle -93,51°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.3 – Grandezas obtidas para a análise da indústria 3 – simulações MIC.

h	\dot{I}_{p-h} (A)	\dot{I}_{p-s-h} (A)	\dot{I}_{p-c-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
5	0,5 \angle 0°	11,23 \angle -0,66°	10,73 \angle 179,31°	285,9 \angle 108,7°
7	0,4 \angle 0°	4,53 \angle -14,77°	4,15 \angle 163,82°	131,4 \angle 80,71°
11	0,3 \angle 0°	1,68 \angle 127,70°	1,88 \angle -45,05°	50,27 \angle -85,43°
13	0,2 \angle 0°	1,26 \angle 114,03°	1,36 \angle -58,25°	45,28 \angle -93,51°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.4 – Grandezas obtidas para a análise da concessionária – simulações MIC.

h	\dot{I}_{p-h} (A)	\dot{I}_{p-s-h} (A)	\dot{I}_{p-c-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
5	0,5 \angle 0°	44,66 \angle -160,24°	45,13 \angle 19,54°	285,9 \angle 108,7°
7	0,4 \angle 0°	14,43 \angle 171,08°	14,83 \angle -8,68°	131,4 \angle 80,71°
11	0,3 \angle 0°	3,91 \angle 4,49°	3,61 \angle -175,12°	50,27 \angle -85,43°
13	0,2 \angle 0°	2,95 \angle -2,91°	2,75 \angle 176,89°	45,28 \angle -93,51°

Fonte: Autoria própria.

Uma vez obtidas todas as grandezas necessárias para a aplicação do MIC, na sequência a Tabela 4.5 até a Tabela 4.8 mostram os resultados obtidos para o compartilhamento de responsabilidades em cada caso. A coluna referente ao erro absoluto compreende, simplesmente, o módulo da diferença entre a parcela prevista no gabarito e a obtida a partir da aplicação do MIC. Vale ressaltar que os procedimentos detalhados sobre o processo de obtenção dos valores de gabarito estão descritos no item B.2 do Apêndice B.

Tabela 4.5 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – simulações MIC.

h	Gabarito (%)	Resultado MIC (%)	Erro absoluto
5	54,04	55,16	1,12
7	48,83	49,88	1,05
11	44,61	46,40	1,79
13	49,63	51,13	1,50

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.6 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 2 – simulações MIC.

h	Gabarito (%)	Resultado MIC (%)	Erro absoluto
5	20,92	20,41	0,51
7	22,76	22,33	0,43
11	26,34	25,34	1,00
13	24,44	23,52	0,92

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.7 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 3 – simulações MIC.

<i>h</i>	Gabarito (%)	Resultado MIC (%)	Erro absoluto
5	25,02	24,41	0,61
7	28,45	27,88	0,57
11	29,06	28,30	0,76
13	25,81	25,31	0,50

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.8 – Resultados obtidos para o compartilhamento da concessionária – simulações MIC.

<i>h</i>	Gabarito (%)	Resultado MIC (%)	Erro absoluto
5	0	0,02	0,02
7	0	0,09	0,09
11	0	0,04	0,04
13	0	0,04	0,04

Fonte: Autoria própria.

As tabelas anteriores exibem uma correspondência acertada entre os percentuais de responsabilidades harmônicas fornecidos pelo MIC e os valores de referência. Nota-se que 1,79 unidades percentuais é o valor do máximo desvio observado, enquanto que 1,57 unidades percentuais representa o percentil 95 dos erros absolutos constatados dentre todos os casos simulados.

Fica, pois, evidenciada a consistência metodológica do procedimento em um sistema elétrico computacional de porte industrial.

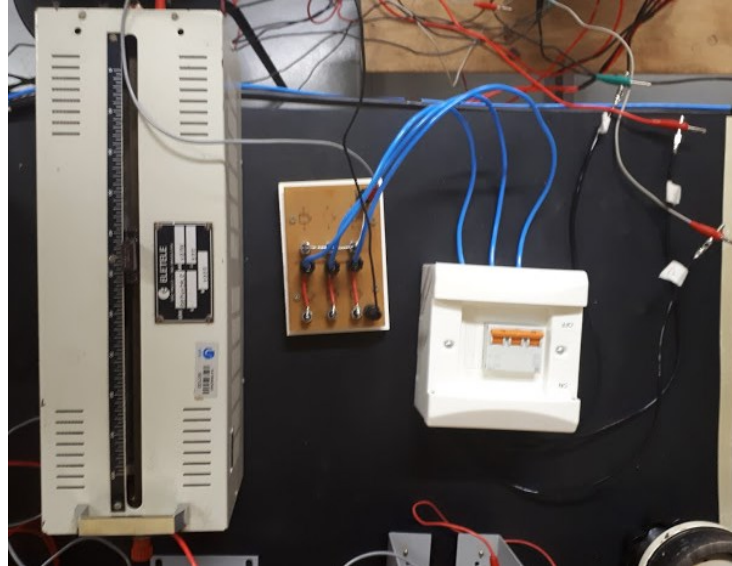
4.4 Avaliação de desempenho do MIC via ensaios laboratoriais

A avaliação de desempenho do MIC em laboratório tem por base o mesmo sistema elétrico em escala reduzida utilizado no capítulo anterior para análise do MID e da EMID. Como já ressaltado, todas as características operacionais deste complexo se encontram descritas no Apêndice C. As informações sobre tensões e correntes no PAC do sistema, antes da inserção de correntes harmônicas, são detalhadas na Tabela C.6 do Apêndice C.

Reconhece-se que para injetar correntes de frequências harmônicas no PAC poderia ser usado um dispositivo eletrônico, como uma fonte de corrente controlada ou até mesmo um filtro ativo. No entanto, diante da inexistência destes equipamentos em laboratório e tendo em mente que o objetivo desta parte do trabalho é unicamente verificar o desempenho da nova metodologia proposta, optou-se por conectar um retificador no PAC. Essa alternativa mostrou-se satisfatória para o propósito aqui exposto, uma vez que, nas frequências harmônicas, o retificador pode ser modelado como uma fonte de corrente.

A Figura 4.5 mostra o arranjo utilizado nos ensaios. O retificador alimentava um reostato, de maneira que ao alterar o valor de sua resistência, evidentemente, era possível mudar os níveis de correntes harmônicas injetados no PAC.

Figura 4.5 – Retificador usado para injetar correntes harmônicas nos ensaios laboratoriais.



Fonte: Autoria própria.

Em consonância com a nomenclatura descrita no esquema da Figura 4.4, a Tabela 4.9 até a Tabela 4.16 mostram as medições realizadas durante os ensaios de injeção de correntes harmônicas no PAC, considerando os quatro grupos de análises necessárias para posterior definição dos percentuais de responsabilidades da concessionária e das indústrias 1, 2 e 3. São exibidos os resultados obtidos a partir de dois casos diferentes: o caso I representa a situação em que a corrente fundamental consumida pelo retificador era 1 A, enquanto no caso II a corrente fundamental consumida era 2 A. Em outras palavras, as potências trifásicas consumidas pelo retificador nos casos I e II eram aproximadamente 380 VA e 760 VA, respectivamente.

Tabela 4.9 – Grandezas mensuradas para a análise da indústria 1 – ensaios MIC (caso I).

h	\dot{I}_{p-h} (A)	\dot{I}_{p-s-h} (A)	\dot{I}_{p-c-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
5	$0,23 \angle -31,63^\circ$	$0,58 \angle -25,14^\circ$	$0,35 \angle 153,83^\circ$	$5,65 \angle 54,40^\circ$
7	$0,10 \angle -52,35^\circ$	$0,28 \angle -31,18^\circ$	$0,18 \angle 153,32^\circ$	$3,87 \angle 50,98^\circ$
11	$0,09 \angle 101,22^\circ$	$0,22 \angle 72,81^\circ$	$0,16 \angle -132,44^\circ$	$5,13 \angle 135,97^\circ$
13	$0,06 \angle 95,63^\circ$	$0,12 \angle 62,71^\circ$	$0,08 \angle 205,84^\circ$	$3,25 \angle 116,40^\circ$

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.10 – Grandezas mensuradas para a análise da indústria 2 – ensaios MIC (caso I).

h	\dot{I}_{p-h} (A)	\dot{I}_{p-s-h} (A)	\dot{I}_{p-c-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
5	0,24 \angle -26,05°	0,53 \angle -37,59°	0,30 \angle 134,28°	5,68 \angle 54,41°
7	0,11 \angle -44,03°	0,25 \angle -40,98°	0,15 \angle 142,27°	3,91 \angle 50,88°
11	0,09 \angle 113,80°	0,26 \angle 48,56°	0,22 \angle 207,21°	5,14 \angle 135,79°
13	0,06 \angle 110,83°	0,15 \angle 27,00°	0,15 \angle 179,52°	3,28 \angle 116,10°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.11 – Grandezas mensuradas para a análise da indústria 3 – ensaios MIC (caso I).

h	\dot{I}_{p-h} (A)	\dot{I}_{p-s-h} (A)	\dot{I}_{p-c-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
5	0,24 \angle -29,78°	0,50 \angle -26,28°	0,27 \angle 152,73°	5,67 \angle 54,42°
7	0,10 \angle -49,48°	0,23 \angle -39,50°	0,13 \angle 142,80°	3,89 \angle 50,81°
11	0,09 \angle 105,51°	0,15 \angle 88,46°	0,08 \angle -119,39°	5,15 \angle 135,60°
13	0,06 \angle 100,69°	0,09 \angle 87,86°	0,03 \angle -128,58°	3,26 \angle 115,97°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.12 – Grandezas mensuradas para a análise da concessionária – ensaios MIC (caso I).

h	\dot{I}_{p-h} (A)	\dot{I}_{p-s-h} (A)	\dot{I}_{p-c-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
5	0,23 \angle -29,79°	0,91 \angle 147,72°	1,14 \angle -30,50°	5,69 \angle 53,68°
7	0,11 \angle -49,28°	0,46 \angle 147,80°	0,56 \angle -33,41°	3,87 \angle 50,11°
11	0,08 \angle 105,33°	0,44 \angle 220,28°	0,49 \angle 52,24°	5,18 \angle 134,63°
13	0,06 \angle 100,80°	0,24 \angle 196,01°	0,26 \angle 33,60°	3,23 \angle 115,29°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.13 – Grandezas mensuradas para a análise da indústria 1 – ensaios MIC (caso II).

h	\dot{I}_{p-h} (A)	\dot{I}_{p-s-h} (A)	\dot{I}_{p-c-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
5	0,47 \angle -35,39°	0,82 \angle -29,31°	0,36 \angle 152,15°	6,88 \angle 51,28°
7	0,20 \angle -57,54°	0,37 \angle -38,88°	0,19 \angle 152,62°	4,55 \angle 45,42°
11	0,16 \angle 92,46°	0,28 \angle 68,74°	0,16 \angle 212,13°	5,72 \angle 126,74°
13	0,12 \angle -273,23°	0,16 \angle 60,15°	0,09 \angle 185,69°	3,62 \angle 106,24°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.14 – Grandezas mensuradas para a análise da indústria 2 – ensaios MIC (caso II).

h	\dot{I}_{p-h} (A)	\dot{I}_{p-s-h} (A)	\dot{I}_{p-c-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
5	0,47 \angle -29,67°	0,76 \angle -38,99°	0,31 \angle 130,17°	6,87 \angle 51,29°
7	0,20 \angle -48,91°	0,35 \angle -47,68°	0,16 \angle 136,95°	4,56 \angle 45,49°
11	0,16 \angle 105,40°	0,31 \angle 46,53°	0,25 \angle 193,65°	5,70 \angle 126,83°
13	0,12 \angle 102,52°	0,17 \angle 27,20°	0,17 \angle 164,98°	3,63 \angle 106,32°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.15 – Grandezas mensuradas para a análise da indústria 3 – ensaios MIC (caso II).

h	\dot{I}_{p-h} (A)	\dot{I}_{p-s-h} (A)	\dot{I}_{p-c-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
5	0,49 \angle -31,13°	0,75 \angle -30,56°	0,27 \angle 152,17°	6,98 \angle 50,92°
7	0,20 \angle -51,55°	0,32 \angle -45,88°	0,13 \angle 144,93°	4,61 \angle 44,92°
11	0,17 \angle 101,90°	0,21 \angle 84,01°	0,07 \angle 223,99°	5,74 \angle 125,81°
13	0,12 \angle -262,16°	0,13 \angle 83,30°	0,03 \angle 207,92°	3,64 \angle 105,17°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.16 – Grandezas mensuradas para a análise da concessionária – ensaios MIC (caso II).

h	\dot{I}_{p-h} (A)	\dot{I}_{p-s-h} (A)	\dot{I}_{p-c-h} (A)	\dot{V}'_{pac-h} (V)
5	0,47 \angle -35,39°	0,92 \angle 144,92°	1,39 \angle -35,19°	6,88 \angle 49,50°
7	0,20 \angle -57,54°	0,47 \angle 145,37°	0,66 \angle -41,43°	4,54 \angle 41,12°
11	0,16 \angle 92,46°	0,46 \angle -155,93°	0,54 \angle 40,28°	5,72 \angle 123,50°
13	0,12 \angle -273,23°	0,28 \angle 175,23°	0,30 \angle 18,83°	3,62 \angle 101,70°

Fonte: Autoria própria.

Após colhimento de todas as informações necessárias, a aplicação do MIC conduz aos resultados de compartilhamento de responsabilidades mostrados na Tabela 4.17 até a Tabela 4.20. Também são apresentados os erros absolutos das respostas do MIC com relação aos valores de gabarito obtidos a partir da aplicação do Método da Superposição (44), (45) de acordo com o exposto no item C.2 do Apêndice C.

Tabela 4.17 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – ensaios MIC.

h	Gabarito (%)	Resultado MIC (%)		Erro Absoluto	
		Caso I	Caso II	Caso I	Caso II
5	39,94	38,45	38,25	1,49	1,69
7	40,73	36,51	37,22	4,22	3,51
11	43,81	49,72	43,92	5,91	0,11
13	45,31	49,57	44,07	4,26	1,24

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.18 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 2 – ensaios MIC.

h	Gabarito (%)	Resultado MIC (%)		Erro Absoluto	
		Caso I	Caso II	Caso I	Caso II
5	24,78	27,99	27,69	3,21	2,91
7	26,45	26,83	27,16	0,38	0,71
11	29,27	35,25	33,69	5,98	4,42
13	31,44	36,28	35,15	4,84	3,71

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.19 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 3 – ensaios MIC.

h	Gabarito (%)	Resultado MIC (%)		Erro Absoluto	
		Caso I	Caso II	Caso I	Caso II
5	36,83	35,16	34,55	1,67	2,28
7	36,39	34,36	34,64	2,03	1,75
11	33,18	38,39	33,85	5,21	0,67
13	27,11	35,92	32,04	8,81	4,93

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.20 – Resultados obtidos para o compartilhamento da concessionária – ensaios MIC.

h	Gabarito (%)	Resultado MIC (%)		Erro Absoluto	
		Caso I	Caso II	Caso I	Caso II
5	1,51	1,04	3,27	1,04	3,27
7	3,34	2,06	0,26	2,06	0,26
11	5,56	1,21	0,84	1,21	0,84
13	3,59	0,77	1,50	0,77	1,50

Fonte: Autoria própria.

Ao avaliar os resultados presentes nas tabelas anteriores, nota-se: para o caso I erro absoluto máximo de 8,81 unidades percentuais e percentil 95 de 6,69 unidades percentuais; no caso II há o máximo erro de 4,93 unidades percentuais e percentil 95 de 4,55 unidades percentuais. O percentil 95 dos erros considerando os dois casos é igual a 5,94 unidades percentuais.

Uma primeira conclusão direta a ser destacada é que os erros constatados no caso II são menores que no caso I. Isto acontece porque no caso I o retificador injeta correntes harmônicas de magnitude muito baixas no PAC, o que torna o processo de medição mais propenso a imprecisões e inexatidões. Ainda, os distanciamentos do gabarito são maiores para as ordens harmônicas mais elevadas porque, de acordo com o perfil de operação de retificadores, à medida que a frequência aumenta, as magnitudes das correntes harmônicas de perturbação injetadas diminuem. Os valores de correntes de perturbação (\hat{I}_{p-h}) mensurados em cada ensaio podem ser observados da Tabela 4.9 até a Tabela 4.16.

Os erros encontrados para a avaliação do MIC em termos práticos são um pouco maiores do que os constatados nas simulações computacionais descritas no item 4.3. Além dos desafios inerentes do ambiente laboratorial, outra causa para este fenômeno é que as correntes foram injetadas por meio de retificadores, os quais causam alterações nos moldes de funcionamento do sistema elétrico também em frequência fundamental.

Considera-se, assim, que o fato de a metodologia ter apresentado performance satisfatória mesmo diante da utilização deste arranjo básico para injeção de correntes é um forte indicativo que o MIC é um procedimento sólido, versátil e robusto.

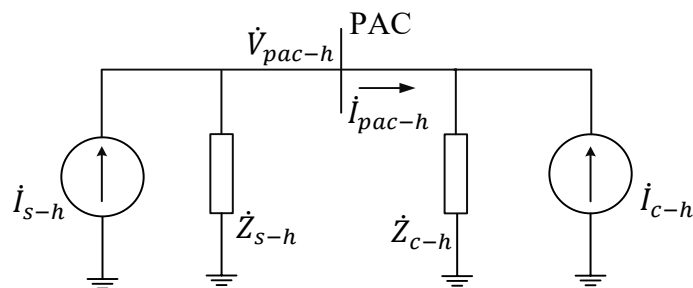
4.5 Extrapolação do compartilhamento em ponto distinto daquele onde se injeta corrente harmônica (EMIC)

Como visto, o Método da Injeção de Corrente Harmônica (MIC) permite obter o compartilhamento de responsabilidades entre duas partes, com relação às distorções harmônicas constatadas no ponto em que acontece a injeção de corrente. Esta seção apresenta um desdobramento do MIC, aqui chamado de Extrapolação do Compartilhamento pelo Método da Injeção de Corrente Harmônica (EMIC), que permite calcular o compartilhamento de responsabilidades harmônicas em um ponto distinto daquele onde ocorre a injeção de correntes.

Adianta-se que, assim como para o procedimento EMID, tratado na seção 3.6, para aplicar o EMIC é necessário conhecer a impedância harmônica existente entre o ponto em que ocorrem as medições e o ponto de interesse ao compartilhamento e, além disso, é preciso colher medições do sistema em duas condições operativas diferentes.

Para elucidar o desenvolvimento da metodologia, considera-se novamente o circuito equivalente de Norton de um arranjo elétrico genérico, para uma ordem harmônica h , como indica a Figura 4.1, que é reproduzida abaixo como Figura 4.6.

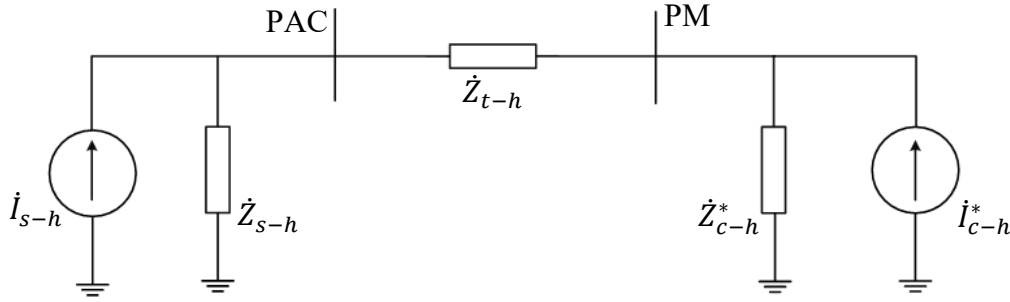
Figura 4.6 – Circuito equivalente de Norton evidenciando as grandezas envolvidas na problemática.



Fonte: Autoria própria.

Considerando, então, que a parte do circuito referente à instalação do consumidor tenha um transformador de entrada, com uma impedância harmônica conhecida (\dot{Z}_{t-h}), a configuração presente na Figura 4.6 pode ser redesenhada na forma apresentada na Figura 4.7.

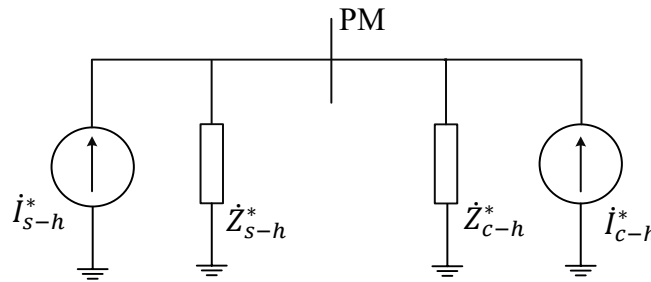
Figura 4.7 – Circuito evidenciando o transformador de entrada na instalação do consumidor.



Fonte: Autoria própria.

Sabe-se que PAC é o ponto em que se deseja realizar o compartilhamento, enquanto o Ponto de Medição (PM) representa o local onde são injetadas as correntes harmônicas e mensuradas as tensões e correntes de interesse. Ao ilustrar o arranjo da Figura 4.7 na forma de circuitos equivalentes de Norton à direita e à esquerda do PM, chega-se à Figura 4.8.

Figura 4.8 – Circuito equivalente de Norton das partes envolvidas com relação ao PM.



Fonte: Autoria própria.

Nesta figura, \dot{Z}_{s-h}^* e \dot{I}_{s-h}^* apontam, nesta ordem, a impedância e a corrente harmônicas, de ordem h , que caracterizam o arranjo à esquerda do PM, enquanto \dot{Z}_{c-h}^* e \dot{I}_{c-h}^* indicam, respectivamente, a impedância e a corrente harmônicas, de ordem h , que definem o circuito à direita do PM. Para que as configurações mostradas em Figura 4.6, Figura 4.7 e Figura 4.8 sejam equivalentes, com base na aplicação do Teorema de Norton, as relações (4.17) a (4.20) são estabelecidas.

$$\dot{Z}_{s-h}^* = \dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{t-h} \quad (4.17)$$

$$\dot{I}_{s-h}^* = \frac{\dot{Z}_{s-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{t-h}} \cdot \dot{I}_{s-h} \quad (4.18)$$

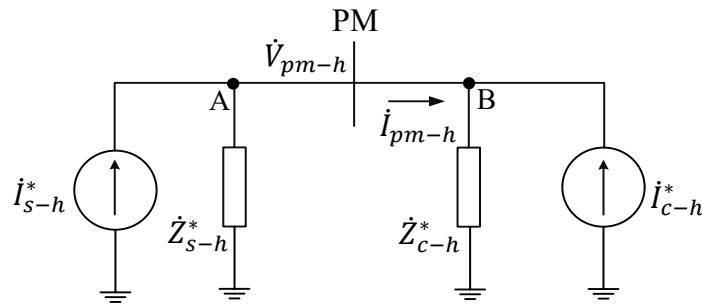
$$\dot{Z}_{c-h}^* = \dot{Z}_{c-h} + \dot{Z}_{t-h} \quad (4.19)$$

$$\dot{I}_{c-h}^* = \frac{\dot{Z}_{c-h}^*}{\dot{Z}_{c-h}^* + \dot{Z}_{t-h}} \cdot \dot{I}_{c-h} \quad (4.20)$$

O circuito de interesse para a injeção de correntes e a realização de medições é aquele apresentado na Figura 4.8. Como mencionado anteriormente, para propiciar a aplicação do EMIC é preciso colher medições de duas condições operativas distintas, as quais são representadas na Figura 4.9 e na Figura 4.10.

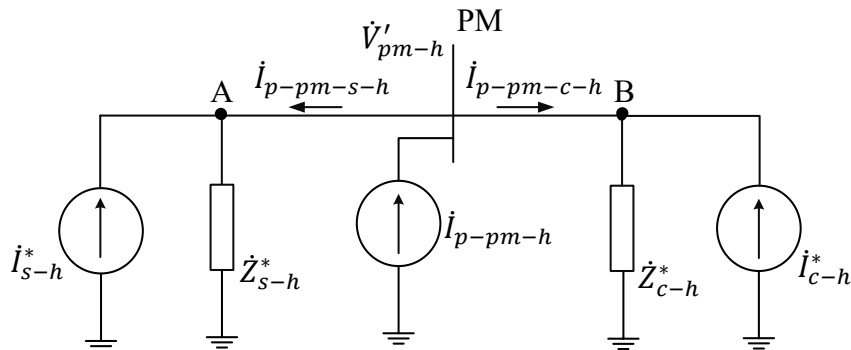
A Figura 4.9 ilustra a condição 1, em que não há injeção de correntes harmônicas no PM, enquanto a Figura 4.10 indica a condição 2, na qual existe uma corrente de perturbação inserida no PM.

Figura 4.9 – Grandezas que devem ser mensuradas para aplicação do EMIC – condição 1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.10 – Grandezas que devem ser mensuradas para aplicação do EMIC – condição 2.



Fonte: Autoria própria.

Onde:

\dot{V}_{pm-h} : tensão harmônica de ordem h mensurada no PM, na condição de operação 1;

\dot{I}_{pm-h} : corrente harmônica de ordem h mensurada no PM, na condição de operação 1, com sentido do sistema supridor para o consumidor;

\dot{I}_{p-pm-h} : corrente harmônica de perturbação, de ordem h , injetada no PM na condição de operação 2;

$\dot{I}_{p-pm-s-h}$ e $\dot{I}_{p-pm-c-h}$: correntes harmônicas de ordem h , que fluem do PM para o supridor e do PM para o consumidor, respectivamente, na condição de operação 2.

Entre as condições de operação 1 e 2 considera-se que o sistema manteve suas características de operação inalteradas, sendo a injeção de correntes no PM a única alteração ocorrida.

Tendo por base o circuito da Figura 4.6 e seguindo a mesma linha de raciocínio desenvolvida na apresentação do MIC, nota-se que para alcançar o compartilhamento de responsabilidades no PAC, é preciso encontrar \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} . Assim, na sequência é feita a explanação sobre como calcular tais grandezas a partir da impedância do transformador \dot{Z}_{t-h} e das tensões e correntes mensuradas no PM nas condições operativas 1 e 2.

Uma análise atenta dos pontos nomeados como A nos circuitos da Figura 4.9 e da Figura 4.10 permite escrever as equações (4.21) e (4.22).

$$\dot{I}_{s-h}^* = \frac{\dot{V}_{pm-h}}{\dot{Z}_{s-h}^*} + \dot{I}_{pm-h} \quad (4.21)$$

$$\dot{I}_{s-h}^* = \frac{\dot{V}_{pm-h}'}{\dot{Z}_{s-h}^*} - \dot{I}_{p-pm-s-h} \quad (4.22)$$

Ao isolar a grandeza \dot{Z}_{s-h}^* nas equações (4.21) e (4.22), chega-se, respectivamente, às relações (4.23) e (4.24):

$$\dot{Z}_{s-h}^* = \frac{\dot{V}_{pm-h}}{\dot{I}_{s-h}^* - \dot{I}_{pm-h}} \quad (4.23)$$

$$\dot{Z}_{s-h}^* = \frac{\dot{V}_{pm-h}'}{\dot{I}_{s-h}^* + \dot{I}_{p-pm-s-h}} \quad (4.24)$$

Continuando, ao igualar (4.23) e (4.24) e isolar \dot{I}_{s-h}^* , tem-se (4.25).

$$\dot{I}_{s-h}^* = \frac{\dot{V}'_{pm-h} \cdot \dot{I}_{pm-h} + \dot{V}_{pm-h} \cdot \dot{I}_{p-pm-s-h}}{\dot{V}'_{pm-h} - \dot{V}_{pm-h}} \quad (4.25)$$

Substituindo (4.25) em (4.23) obtém-se a equação (4.26).

$$\dot{Z}_{s-h}^* = \frac{\dot{V}'_{pm-h} - \dot{V}_{pm-h}}{\dot{I}_{p-pm-s-h} + \dot{I}_{pm-h}} \quad (4.26)$$

Por fim, substituindo (4.17), (4.25) e (4.26) na equação (4.18), com o objetivo de isolar a grandeza \dot{I}_{s-h} , encontra-se (4.27).

$$\dot{I}_{s-h} = \frac{\dot{V}'_{pm-h} \cdot \dot{I}_{pm-h} + \dot{V}_{pm-h} \cdot \dot{I}_{p-pm-s-h}}{\dot{V}'_{pm-h} - \dot{V}_{pm-h} - \dot{Z}_{s-h}^* \cdot (\dot{I}_{p-pm-s-h} + \dot{I}_{pm-h})} \quad (4.27)$$

Com o objetivo de desenvolver um procedimento semelhante, neste momento, para a determinação de \dot{I}_{c-h} , faz-se uma análise dos pontos nomeados como B nos circuitos da Figura 4.9 e da Figura 4.10, de maneira a obter as equações (4.28) e (4.29).

$$\dot{I}_{c-h}^* = \frac{\dot{V}_{pm-h}}{\dot{Z}_{c-h}^*} - \dot{I}_{pm-h} \quad (4.28)$$

$$\dot{I}_{c-h}^* = \frac{\dot{V}'_{pm-h}}{\dot{Z}_{c-h}^*} - \dot{I}_{p-pm-c-h} \quad (4.29)$$

Isolando a grandeza \dot{Z}_{c-h}^* nas equações (4.28) e (4.29), chega-se a (4.30) e (4.31), respectivamente.

$$\dot{Z}_{c-h}^* = \frac{\dot{V}_{pm-h}}{\dot{I}_{c-h}^* + \dot{I}_{pm-h}} \quad (4.30)$$

$$\dot{Z}_{c-h}^* = \frac{\dot{V}'_{pm-h}}{\dot{I}_{c-h}^* + \dot{I}_{p-pm-c-h}} \quad (4.31)$$

Ao igualar os segundos membros das equações (4.30) e (4.31) e isolar a grandeza \dot{I}_{c-h}^* , chega-se à equação (4.32).

$$\dot{I}_{c-h}^* = \frac{\dot{V}'_{pm-h} \cdot \dot{I}_{pm-h} - \dot{V}_{pm-h} \cdot \dot{I}_{p-pm-c-h}}{\dot{V}_{pm-h} - \dot{V}'_{pm-h}} \quad (4.32)$$

Prosseguindo, ao substituir (4.32) em (4.30) obtém-se a equação (4.33).

$$\dot{Z}_{c-h}^* = \frac{\dot{V}_{pm-h} - \dot{V}'_{pm-h}}{\dot{I}_{pm-h} - \dot{I}_{p-pm-c-h}} \quad (4.33)$$

Agora, ao substituir (4.32) e (4.33) na equação (4.20), com o intuito de isolar a grandeza \dot{I}_{c-h} , chega-se em (4.34).

$$\dot{I}_{c-h} = \frac{\dot{V}'_{pm-h} \cdot \dot{I}_{pm-h} - \dot{V}_{pm-h} \cdot \dot{I}_{p-pm-c-h}}{\dot{V}_{pm-h} - \dot{V}'_{pm-h} + \dot{Z}_{t-h} \cdot (\dot{I}_{pm-h} - \dot{I}_{p-pm-c-h})} \quad (4.34)$$

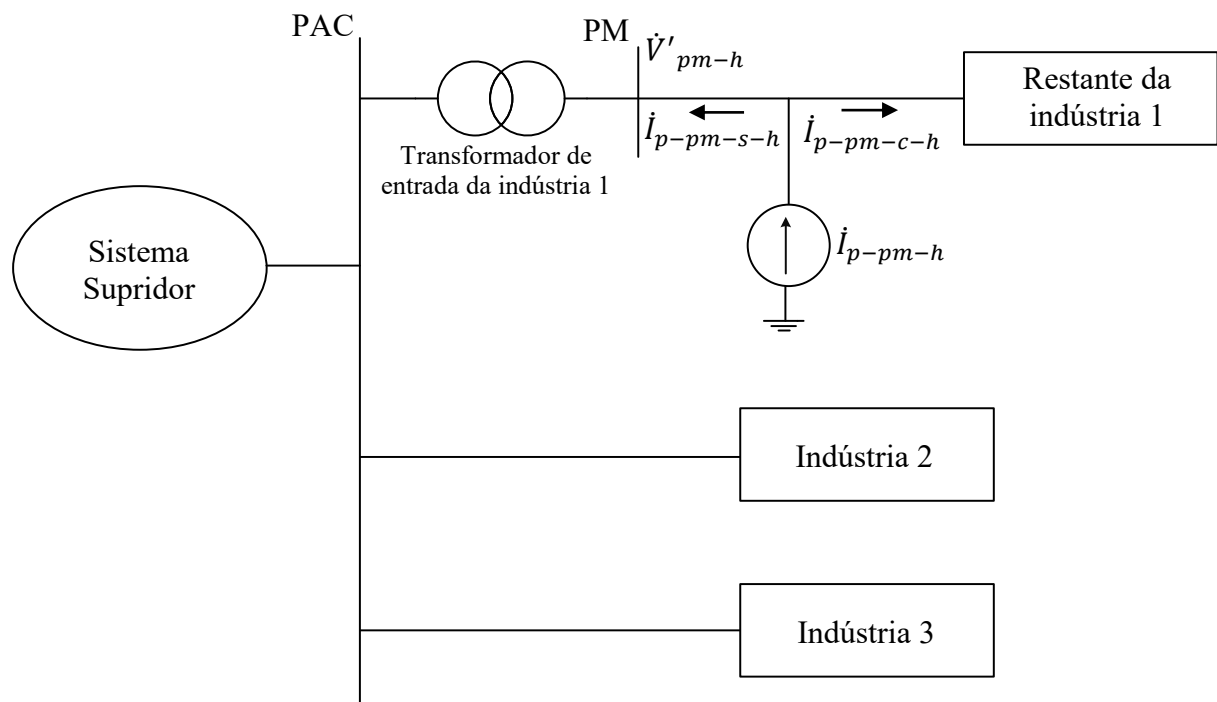
Do exposto, fica claro que as equações (4.27) e (4.34), nesta ordem, permitem a obtenção de \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} a partir do conhecimento da impedância do transformador (\dot{Z}_{t-h}) e de grandezas mensuradas no PM nas condições de operação 1 e 2.

Por fim, observando o circuito da Figura 4.6 e levando em consideração a filosofia seguida para a realização do compartilhamento pelo MIC, sugere-se que o procedimento EMIC seja concluído da mesma maneira descrita no item 4.2.2, ou seja, a partir das projeções mostradas na Figura 4.3. Neste caso, $I_{s-proj-h}$ representa a projeção de \dot{I}_{s-h} sobre $(\dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h})$, enquanto $I_{c-proj-h}$ indica a projeção de \dot{I}_{c-h} sobre $(\dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h})$. Os percentuais de responsabilidades sobre as distorções harmônicas cabidos ao supridor e ao consumidor são, então, definidos pelos escalares $I_{s-proj-h}$ e $I_{c-proj-h}$, respectivamente.

4.6 Avaliação de desempenho da EMIC via simulações computacionais

Utilizando o sistema elétrico descrito no Apêndice B, atenções são voltadas agora para a avaliação computacional de desempenho da EMIC. A Figura 4.11 apresenta um esquema indicativo da aplicação deste procedimento do arranjo de interesse.

Figura 4.11 – Esquema representativo da aplicação da EMIC para o compartilhamento da indústria 1.



Fonte: Autoria própria.

A figura acima apresenta foco de atenção voltado ao processo de obtenção do compartilhamento referente à indústria 1. Contudo, é importante mencionar que procedimento análogo foi feito para as análises das demais unidades consumidoras industriais.

Prosseguindo à aplicação da EMIC, os dados relacionados à condição operacional 1, que representa a ausência da inserção de qualquer corrente de perturbação externa, conforme indicado na Figura 4.9, são facilmente obtidos na Tabela B.11 do Apêndice B. As impedâncias harmônicas dos transformadores de entrada das indústrias são também encontradas nesse apêndice, na Tabela B.10.

No que tange à condição operativa 2, seguindo a terminologia usada na Figura 4.10 e na Figura 4.11, nota-se que Tabela 4.21, Tabela 4.22 e Tabela 4.23 exibem as grandezas obtidas em simulação quando da análise das indústrias 1, 2 e 3, respectivamente. Para cada ordem harmônica h , as correntes de perturbação inseridas possuem magnitude exatamente igual a 1% das correntes harmônicas que originalmente fluíam pelo ponto PM, na entrada de cada unidade industrial.

Tabela 4.21 – Grandezas obtidas para a análise da indústria 1 – simulações EMIC.

h	\dot{I}_{p-pm-h} (A)	$\dot{I}_{p-pm-s-h}$ (A)	$\dot{I}_{p-pm-c-h}$ (A)	\dot{V}'_{pm-h} (V)
5	8,93 \angle 0°	898,1 \angle 6,70°	889,3 \angle -173,2°	17,64 \angle 86,18°
7	2,41 \angle 0°	242,2 \angle 28,60°	240,0 \angle -151,1°	7,40 \angle 113,20°
11	0,92 \angle 0°	91,78 \angle -148,61°	92,57 \angle 31,09°	3,21 \angle -85,64°
13	0,76 \angle 0°	76,35 \angle -99,32°	76,47 \angle 80,12°	3,07 \angle -33,53°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.22 – Grandezas obtidas para a análise da indústria 2 – simulações EMIC.

h	\dot{I}_{p-pm-h} (A)	$\dot{I}_{p-pm-s-h}$ (A)	$\dot{I}_{p-pm-c-h}$ (A)	\dot{V}'_{pm-h} (V)
5	2,76 \angle 0°	278,0 \angle -41,3°	275,9 \angle 138,3°	11,42 \angle 71,49°
7	0,89 \angle 0°	89,50 \angle 12,0°	88,63 \angle -167,8°	5,32 \angle 108,2°
11	0,44 \angle 0°	44,40 \angle 108,60°	44,54 \angle -70,86°	2,43 \angle -132,4°
13	0,33 \angle 0°	33,22 \angle 155,51°	33,52 \angle -24,26°	2,12 \angle -81,62°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.23 – Grandezas obtidas para a análise da indústria 3 – simulações EMIC.

h	\dot{I}_{p-pm-h} (A)	$\dot{I}_{p-pm-s-h}$ (A)	$\dot{I}_{p-pm-c-h}$ (A)	\dot{V}'_{pm-h} (V)
5	3,38 \angle 0°	340,2 \angle -30,3°	337,3 \angle 149,4°	12,19 \angle 73,04°
7	1,31 \angle 0°	132,1 \angle 14,10°	130,8 \angle -165,8°	5,90 \angle 108,0°
11	0,58 \angle 0°	58,00 \angle 104,08°	58,15 \angle -75,37°	2,63 \angle -137,40°
13	0,42 \angle 0°	41,96 \angle 151,02°	42,33 \angle -28,7°	2,27 \angle -86,42°

Fonte: Autoria própria.

Neste momento, de posse de todas as grandezas necessárias à aplicação da EMIC, seguindo os procedimentos descritos na seção 4.5, é possível chegar aos percentuais de compartilhamento sintetizados em Tabela 4.24, Tabela 4.25 e Tabela 4.26.

Tabela 4.24 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – simulações EMIC.

h	Gabarito (%)	Resultado EMIC (%)	Erro absoluto
5	54,04	55,45	1,41
7	48,83	50,84	2,01
11	44,61	47,19	2,58
13	49,63	51,99	2,36

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.25 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 2 – simulações EMIC.

<i>h</i>	Gabarito (%)	Resultado EMIC (%)	Erro absoluto
5	20,92	20,89	0,03
7	22,76	22,45	0,31
11	26,34	25,56	0,78
13	24,44	23,83	0,61

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.26 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 3 – simulações EMIC.

<i>h</i>	Gabarito (%)	Resultado EMIC (%)	Erro absoluto
5	25,02	25,01	0,01
7	28,45	28,06	0,39
11	29,06	28,49	0,57
13	25,81	25,65	0,16

Fonte: Autoria própria.

Os resultados mostrados nas tabelas anteriores são claros ao evidenciar a eficácia da EMIC, em vista dos erros absolutos reduzidos encontrados (erro máximo de 2,58 unidades percentuais para $h = 11$ na indústria 1). O percentil 95 dos erros obtidos, dentre todos os casos de compartilhamento avaliados, foi de 2,46 unidades percentuais.

Assim, com base nos trabalhos computacionais realizados, pode-se dizer que a EMIC se mostra como uma alternativa viável para obtenção do compartilhamento de responsabilidades harmônicas.

4.7 Avaliação de desempenho da EMIC via ensaios laboratoriais

O sistema laboratorial descrito no Apêndice C é usado nesta seção para avaliação de desempenho da EMIC. De acordo com o exposto no item 4.5, para realizar a aplicação do procedimento é preciso, primeiramente, conhecer as impedâncias harmônicas dos transformadores de entrada das indústrias, bem como mensurar tensões e correntes harmônicas no secundário, antes de qualquer intervenção externa. Essas informações podem ser consultadas na Tabela C.7 e na Tabela C.8 do Apêndice C.

Optou-se aqui por apresentar a aplicação da EMIC em um estudo de caso da indústria 1, a qual apresenta o maior nível de carga não linear do complexo ensaiado. Neste ponto, é preciso encontrar uma maneira para injetar correntes harmônicas no secundário do transformador da indústria analisada, no chamado ponto de medição (PM). Seguindo o mesmo procedimento adotado no item 4.4 para a avaliação do MIC, um retificador é usado para injetar as correntes de perturbação no sistema.

Em consonância com o esquema apresentado na Figura 4.11, a Tabela 4.27 mostra as medições realizadas quando o retificador foi conectado no secundário do transformador da indústria 1. Neste caso, a carga resistiva do retificador foi ajustada de maneira que ele consumisse uma corrente fundamental de 3 A.

Tabela 4.27 – Grandezas mensuradas para a análise da indústria 1 – ensaios EMIC.

h	I_{p-pm-h} (A)	$I_{p-pm-s-h}$ (A)	$I_{p-pm-c-h}$ (A)	V'_{pm-h} (V)
5	$0,64\angle -45,19^\circ$	$0,98\angle -43,27^\circ$	$0,35\angle 134,63^\circ$	$9,96\angle 27,76^\circ$
7	$0,23\angle -68,36^\circ$	$0,42\angle -57,69^\circ$	$0,19\angle 129,35^\circ$	$5,74\angle 16,27^\circ$
11	$0,12\angle 56,56^\circ$	$0,24\angle 29,75^\circ$	$0,16\angle 182,42^\circ$	$5,83\angle 94,38^\circ$
13	$0,08\angle 47,69^\circ$	$0,14\angle 17,19^\circ$	$0,09\angle 161,13^\circ$	$3,63\angle 69,30^\circ$

Fonte: Autoria própria.

Prosseguindo à aplicação do procedimento da EMIC, propriamente dito, os resultados obtidos para o compartilhamento de responsabilidades da indústria 1 são mostrados na Tabela 4.28.

Tabela 4.28 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – ensaios EMIC.

h	Gabarito (%)	Resultado EMIC (%)	Erro absoluto
5	39,94	40,17	0,23
7	40,73	47,05	6,32
11	43,81	44,28	0,47
13	45,31	44,89	0,42

Fonte: Autoria própria.

Os resultados mostrados na tabela anterior revelam desempenho acertado da EMIC, sendo o erro absoluto máximo constatado de 6,32 unidades percentuais e percentil 95 de 5,44 unidades percentuais.

Nota-se que o maior erro foi constatado para ordem harmônica 7, enquanto nas demais frequências as divergências do gabarito foram bastante diminutas, menores que uma unidade percentual.

Os resultados são promissores mesmo diante da utilização de um arranjo simplório para a injeção de correntes harmônicas no PM, o qual modifica em certa medida as características de operação do complexo até mesmo em frequência fundamental. Fica, então, reconhecida a eficiência e robustez da EMIC em ambiente laboratorial.

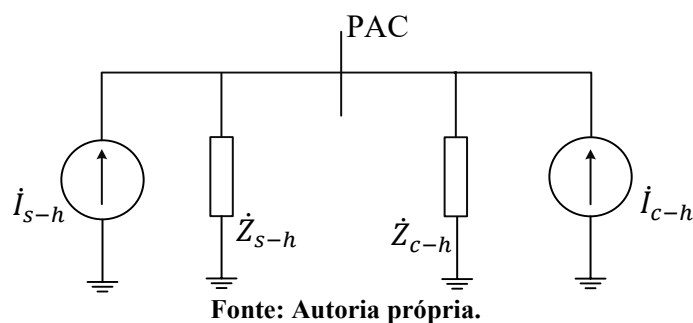
4.8 Extrapolação do compartilhamento a partir do monitoramento de uma carga específica (EMIC-MC)

Esta seção apresenta outra derivação do MIC. A Extrapolação do Compartilhamento pelo Método da Injeção de Corrente Harmônica com Monitoramento de Carga (EMIC-MC) representa um meio para se estabelecer os percentuais de responsabilidade harmônica de uma carga específica, desde que se tenha condições de monitorar a corrente harmônica produzida por ela. Assim, este processo não envolve um dispositivo externo para injetar correntes harmônicas no sistema elétrico, mas conta apenas com o monitoramento da corrente advinda da própria carga não linear de interesse.

Para empregar a metodologia de compartilhamento harmônico a partir do monitoramento de carga, é preciso que o consumidor analisado tenha uma carga não linear de potência relevante, a qual deve representar a origem de praticamente todas as distorções geradas pela instalação. Nesse sentido, exemplos de casos apropriados para aplicação do procedimento são metalúrgicas e siderúrgicas, que possuem fornos a arco elétrico, além de cargas que possuem grandes laminadores.

Para proceder ao desenvolvimento do método, tem-se em mente, mais uma vez, um arranjo elétrico geral como apresentado na Figura 4.12. Como comentado, considera-se agora que o consumidor tenha um tipo de carga não linear de elevada potência e que ela seja o elemento predominante causador de distorções nesta instalação.

Figura 4.12 – Circuito equivalente de Norton evidenciando as grandezas envolvidas na problemática.

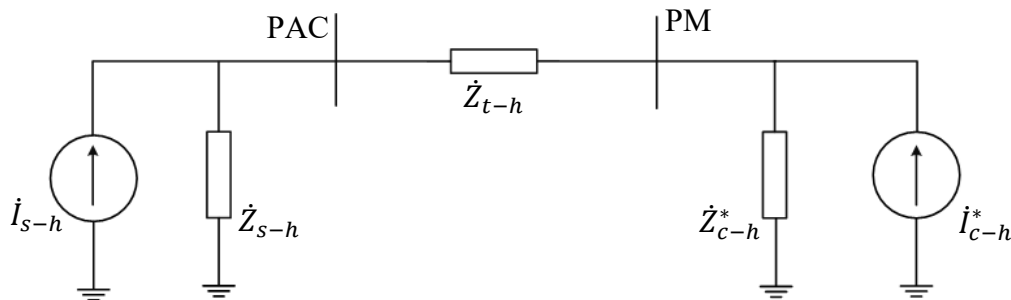


Caso o ponto de interesse ao compartilhamento seja o PAC e a carga não linear esteja diretamente conectada ao PAC, considerando que seja possível medir a corrente harmônica produzida por ela (I_{c-h}), é necessário apenas determinar I_{s-h} . Assim, é possível recorrer ao MIC, conforme descrito na seção 4.2, para determinar I_{s-h} a partir da equação (4.9).

Observa-se que, neste caso, as duas condições operativas distintas dependem da própria variação natural de \dot{I}_{c-h} . Diante de pequenas alterações na corrente produzida pela carga não linear é possível estabelecer duas condições de operação diferentes, o que possibilita aplicar a equação (4.9) para determinar \dot{I}_{s-h} . De posse de \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} , procede-se à realização das projeções para determinação dos percentuais de responsabilidades harmônicas, conforme descrito em 4.2.2. Importa reforçar que essa solução apenas é viável quando a própria carga não linear está conectada diretamente ao ponto de interesse do compartilhamento (PAC) e é possível mensurar diretamente as correntes harmônicas produzidas por ela.

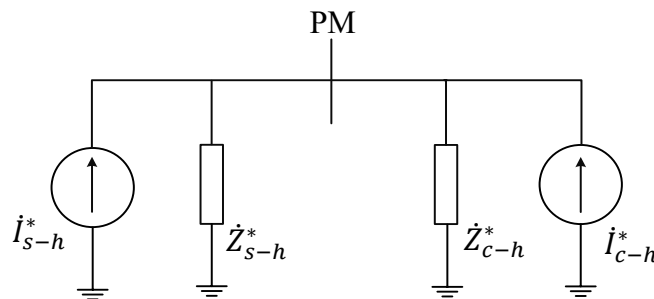
Para descrição da EMIC-MC, imagina-se agora a hipótese que a carga geradora de distorções não se encontra conectada ao PAC, mas sim ao secundário de um transformador na instalação do consumidor, no ponto denominado PM. A Figura 4.13 ilustra esta situação, enquanto a Figura 4.14 apresenta o arranjo equivalente de Norton, com relação ao PM, da configuração mostrada na Figura 4.13.

Figura 4.13 – Circuito evidenciando o transformador de entrada na instalação do consumidor.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.14 – Circuito equivalente de Norton das partes envolvidas com relação ao PM.



Fonte: Autoria própria.

Assim como estabelecido na seção 4.5, as relações (4.17) a (4.20) podem ser escritas para relacionar as grandezas presentes nas figuras anteriores. Tais relações são novamente colocadas na sequência para facilitar as análises dos desenvolvimentos vindouros:

$$\dot{Z}_{s-h}^* = \dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{t-h} \quad (4.35)$$

$$\dot{I}_{s-h}^* = \frac{\dot{Z}_{s-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{t-h}} \cdot \dot{I}_{s-h} \quad (4.36)$$

$$\dot{Z}_{c-h} = \dot{Z}_{c-h}^* + \dot{Z}_{t-h} \quad (4.37)$$

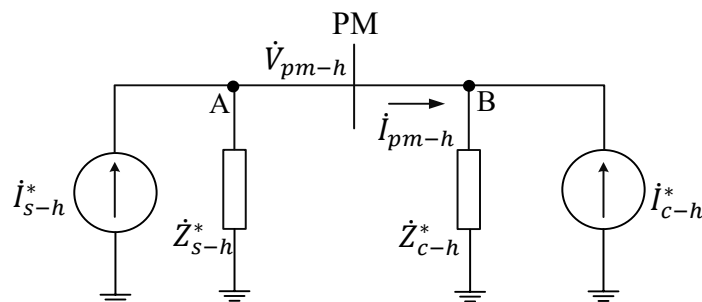
$$\dot{I}_{c-h} = \frac{\dot{Z}_{c-h}^*}{\dot{Z}_{c-h}^* + \dot{Z}_{t-h}} \cdot \dot{I}_{c-h}^* \quad (4.38)$$

Como a premissa fundamental para a aplicação da EMIC-MC é que seja possível mensurar a corrente harmônica gerada pela carga de interesse, ao olhar para a Figura 4.14 considera-se que a grandeza \dot{I}_{c-h}^* é conhecida, ou seja, obtida a partir de medições.

Seguindo procedimento semelhante ao estabelecido para a EMIC, são necessárias duas condições operativas distintas para se alcançar o compartilhamento de responsabilidades. Para a aplicação da EMIC-MC tais condições são obtidas a partir de variações naturais da corrente harmônica gerada pela carga de interesse (\dot{I}_{c-h}^*), sendo mantidas inalteradas todas as demais características operativas do sistema elétrico.

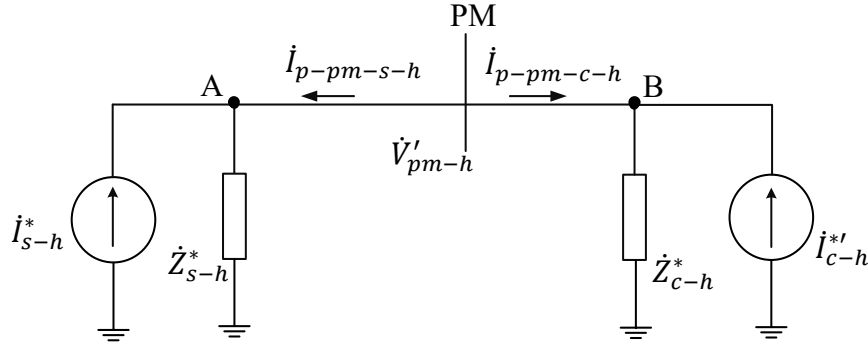
Os circuitos da Figura 4.15 e da Figura 4.16 mostram as grandezas que precisam ser mensuradas nas duas situações de operação.

Figura 4.15 – Grandezas que devem ser mensuradas para aplicação da EMIC-MC – condição 1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.16 – Grandezas que devem ser mensuradas para aplicação da EMIC-MC – condição 2.



Fonte: Autoria própria.

Nas imagens anteriores foi usada a mesma nomenclatura daquela adotada no desenvolvimento da EMIC, no item 4.5. Nota-se que o único aspecto distintivo das condições operativas 1 e 2 é uma alteração da corrente harmônica produzida pela carga não linear (i_{c-h}^* e $i_{c-h}^{*'}$).

Na Figura 4.16, devido à ausência de uma corrente de perturbação externa injetada no PM, é claro que as correntes $i_{p-pm-s-h}$ e $i_{p-pm-c-h}$ apresentam intensidades iguais, mas sentidos opostos, como exhibe (4.39). Assim, na condição operativa 2, basta mensurar uma corrente no PM. Contudo, optou-se por representar $i_{p-pm-s-h}$ e $i_{p-pm-c-h}$ na figura para manter a correspondência com a terminologia usada anteriormente no desenvolvimento da EMIC.

$$i_{p-pm-s-h} = -i_{p-pm-c-h} \quad (4.39)$$

Ao partir do princípio que as correntes i_{c-h}^* e $i_{c-h}^{*'}$ são mensuradas, objetiva-se obter i_{s-h} e i_{c-h} para, então, ser possível chegar ao compartilhamento de responsabilidades. Para isso, iniciam-se as análises com a equação (4.40), a qual é fruto da observação do ponto B do circuito da Figura 4.16.

$$i_{c-h}^{*'} = \frac{V'_{pm-h}}{Z_{c-h}^*} - i_{p-pm-c-h} \quad (4.40)$$

Ao isolar \dot{Z}_{c-h}^* em (4.40), chega-se a (4.41).

$$\dot{Z}_{c-h}^* = \frac{\dot{V}_{pm-h}'}{\dot{I}_{c-h}^{*'} + \dot{I}_{p-pm-c-h}} \quad (4.41)$$

Substituindo, então, (4.41) em (4.38) é possível escrever (4.42).

$$\dot{I}_{c-h} = \frac{\dot{V}_{pm-h}' \cdot \dot{I}_{c-h}^{*'}}{\dot{Z}_{t-h} \cdot (\dot{I}_{c-h}^{*'} + \dot{I}_{p-pm-c-h}) + \dot{V}_{pm-h}'} \quad (4.42)$$

A equação (4.42) permite obter a corrente \dot{I}_{c-h} a partir da impedância do transformador e tensões e correntes possíveis de serem obtidas a partir de medições no PM. Para a determinação de \dot{I}_{s-h} , nota-se que as análises do circuito à esquerda de PM permanecem exatamente iguais àsquelas feitas quando da dedução da EMIC. Assim, para encontrar \dot{I}_{s-h} se utiliza a equação (4.27), que é repetida na sequência por conveniência como (4.43).

$$\dot{I}_{s-h} = \frac{\dot{V}_{pm-h}' \cdot \dot{I}_{pm-h} + \dot{V}_{pm-h} \cdot \dot{I}_{p-pm-s-h}}{\dot{V}_{pm-h}' - \dot{V}_{pm-h} - \dot{Z}_{t-h} \cdot (\dot{I}_{p-pm-s-h} + \dot{I}_{pm-h})} \quad (4.43)$$

De posse das correntes \dot{I}_{c-h} e \dot{I}_{s-h} , fornecidas pelas expressões (4.42) e (4.43), respectivamente, é possível proceder ao compartilhamento de responsabilidades conforme o procedimento de projeções discutido nos desenvolvimentos anteriores, como detalhado no item 4.2.2.

Conclui-se, dessa forma, que a EMIC-MC é uma derivação da EMIC, viável de aplicação em situações nas quais existem meios para monitorar diretamente a corrente harmônica gerada por determinada carga de interesse. Para que se garanta a efetividade do processo é preciso, conforme fica claro no desenvolvimento, que a referida carga não linear seja a fonte predominante de distorções da unidade consumidora.

4.9 Avaliação de desempenho da EMIC-MC via simulações computacionais

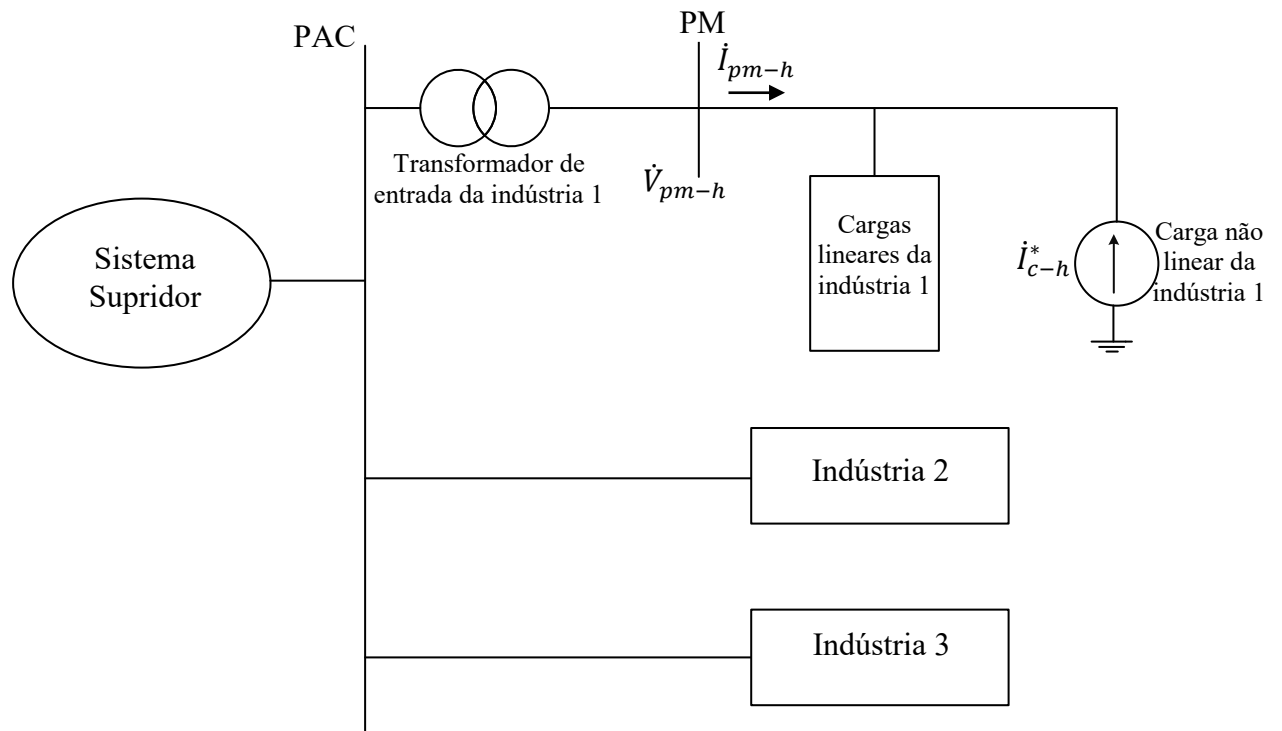
A avaliação de desempenho, via simulações, da EMIC-MC é feita seguindo o mesmo sistema usado nos casos anteriores para as análises computacionais realizadas. Contudo, neste caso, é fundamental que as indústrias possuam uma expressiva carga não linear, responsável por praticamente todas as distorções geradas na instalação e, mais ainda, julga-se ser possível obter as correntes harmônicas advindas de tal carga.

Observando a caracterização das indústrias presentes no arranjo simulado no Apêndice B, mais especificamente na Figura B.3, é fácil inferir que o elemento responsável por gerar distorções harmônicas em cada instalação industrial é um retificador que alimenta uma carga resistiva (R_{ret}). Para obtenção de duas situações de operação distintas foi feita uma alteração em R_{ret} , de maneira a conseguir pequenas modificações nos valores de correntes harmônicas geradas.

Assim, para cada indústria em análise, na condição operativa 1 foi adotado R_{ret} com valor 1% maior que no sistema original, enquanto que na condição 2 tal resistência possui valor igual ao originalmente adotado, de acordo com a parametrização definida na Tabela B.3 do Apêndice B.

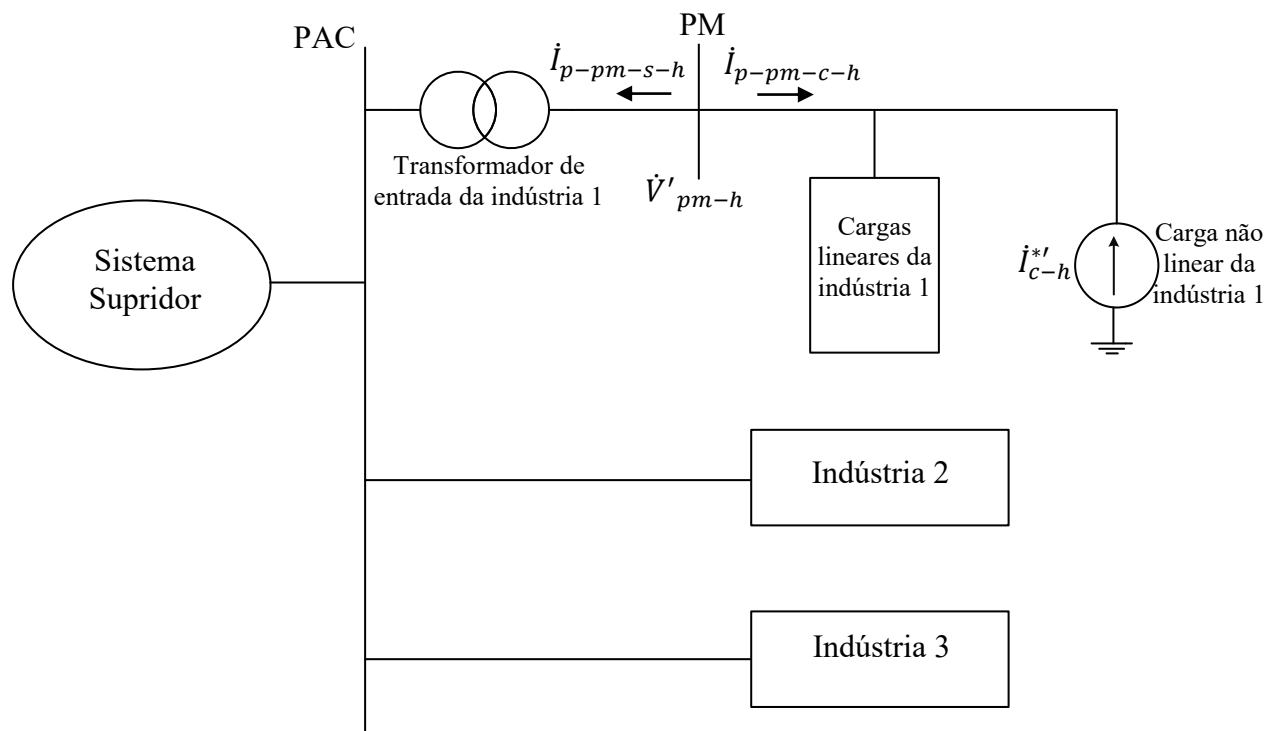
Seguindo a filosofia estabelecida na seção anterior, tendo em mente as duas condições operativas representadas por Figura 4.15 e Figura 4.16, na sequência, a Figura 4.17 e a Figura 4.18 ilustram o esquema representativo da aplicação da EMIC-MC no sistema de interesse, visando à obtenção dos percentuais cabidos à indústria 1. Processos semelhantes foram realizados também para análise das instalações consumidoras 2 e 3.

Figura 4.17 – Esquema representativo da aplicação da EMIC-MC para o compartilhamento da indústria 1 – condição de operação 1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.18 – Esquema representativo da aplicação da EMIC-MC para o compartilhamento da indústria 1 – condição de operação 2.



Fonte: Autoria própria.

Seguindo a nomenclatura utilizada na Figura 4.17 e na Figura 4.18, a Tabela 4.29 e a Tabela 4.30 exibem os dados obtidos por simulação para as três indústrias, nas condições de operação 1 e 2, respectivamente.

Tabela 4.29 – Grandezas obtidas para a análise da condição 1 – simulações EMIC-MC.

Grandeza	h	Indústria 1	Indústria 2	Indústria 3
\dot{V}_{pm-h} (V)	5	17,52∠86,45°	11,38∠71,65°	12,15∠73,21°
	7	7,34∠113,6°	5,29∠108,5°	5,87∠108,4°
	11	3,22∠-84,77°	2,43∠-132,2°	2,65∠-136,3°
	13	3,07∠-32,96°	2,14∠-80,85°	2,29∠-85,55°
\dot{I}_{pm-h} (A)	5	890,8∠-172,9°	274,7∠138,9°	336,7∠149,9°
	7	239,2∠-150,9°	87,92∠-167,2°	130,2∠-165,3°
	11	92,64∠32,19°	44,50∠-71,04°	57,65∠-74,33°
	13	76,56∠81,28°	33,21∠-22,94°	41,97∠-27,47°
\dot{I}_{c-h}^* (A)	5	1116∠16,36°	472,9∠-11,40°	559,9∠-12,48°
	7	340,8∠63,21°	172,9∠19,75°	211,3∠18,82°
	11	144,0∠-155,5°	63,22∠118,5°	75,10∠112,8°
	13	112,9∠-105,6°	46,45∠167,2°	54,00∠160,3°

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.30 – Grandezas obtidas para a análise da condição 2 – simulações EMIC-MC.

Grandeza	h	Indústria 1	Indústria 2	Indústria 3
\dot{V}'_{pm-h} (V)	5	17,57∠86,24°	11,39∠71,47°	12,16∠73,02°
	7	7,38∠113,4°	5,31∠108,3°	5,89∠108,1°
	11	3,23∠-85,69°	2,44∠-131,4°	2,64∠-137,2°
	13	3,08∠-33,74°	2,13∠-81,66°	2,28∠-86,45°
$\dot{I}_{p-pm-c-h}$ (A)	5	893,2∠-173,2°	276,3∠138,5°	338,1∠149,5°
	7	241,4∠-151,2°	88,93∠-167,9°	131,3∠-165,8°
	11	92,10∠31,23°	44,12∠-69,69°	58,11∠-75,55°
	13	76,37∠80,43°	33,43∠-24,34°	42,21∠-28,8°
\dot{I}_{c-h}^{*t} (A)	5	1119∠16,09°	474,1∠-11,76°	561,2∠-12,83°
	7	343,3∠62,87°	174,1∠19,26°	212,6∠18,35°
	11	143,6∠-156,5°	62,96∠119,8°	75,47∠111,6°
	13	112,8∠-106,5°	46,54∠165,9°	54,13∠159,0°

Fonte: Autoria própria.

É importante mencionar que a Tabela 4.29 e a Tabela 4.30 concentram informações referentes às três unidades consumidoras, opção feita com o intuito de condensar a apresentação dos resultados. No entanto, a simulação associada ao estudo de cada instalação foi realizada separadamente, sempre com uma indústria analisada por vez.

Além dos dados apresentados até este momento, para a aplicação da EMIC-MC é preciso conhecer as impedâncias harmônicas dos transformadores de entrada das indústrias, informações essas apresentadas na Tabela B.10 do Apêndice B.

Seguindo o procedimento apresentado na seção anterior para obtenção dos percentuais de compartilhamento pela EMIC-MC, Tabela 4.31, Tabela 4.32 e Tabela 4.33 exibem os

percentuais cabidos às indústrias 1, 2 e 3, respectivamente, sobre as tensões harmônicas existentes no PAC.

Tabela 4.31 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – simulações EMIC-MC.

h	Gabarito (%)	Resultado EMIC-MC (%)	Erro absoluto
5	54,04	50,72	3,32
7	48,83	46,29	2,54
11	44,61	43,84	0,77
13	49,63	47,97	1,66

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.32 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 2 – simulações EMIC-MC.

h	Gabarito (%)	Resultado EMIC-MC (%)	Erro absoluto
5	20,92	19,02	1,90
7	22,76	21,17	1,59
11	26,34	23,49	2,85
13	24,44	22,50	1,94

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.33 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 3 – simulações EMIC-MC.

h	Gabarito (%)	Resultado EMIC-MC (%)	Erro absoluto
5	25,02	23,05	1,97
7	28,45	26,75	1,70
11	29,06	26,03	3,03
13	25,81	23,83	1,98

Fonte: Autoria própria.

Observa-se nas tabelas anteriores que o erro absoluto máximo constatado dentre todos os casos é 3,32 unidades percentuais, para a ordem $h = 5$ na indústria 1. Já o percentil 95 dos erros obtidos, considerando os resultados do compartilhamento das três indústrias nas quatro frequências harmônicas estudadas, é igual a 3,16 unidades percentuais.

Logo, é possível afirmar que os resultados fornecidos pela EMIC-MC neste estudo de caso computacional são consistentes e o referido procedimento apresenta desempenho comprovadamente acertado.

4.10 Avaliação de desempenho da EMIC-MC via ensaios laboratoriais

Esta seção se preocupa em avaliar o desempenho da EMIC-MC no sistema em escala reduzida descrito no Apêndice C. O estudo tem como foco a análise da indústria 1, a qual apresenta um retificador responsável por praticamente toda não linearidade gerada nesta indústria. As duas condições de operação necessárias para aplicação do método foram conseguidas a partir da realização de pequena alteração na carga do retificador da própria indústria 1, sem a inserção de nenhuma intervenção externa para injeção de correntes harmônicas no sistema.

Neste contexto, na condição de operação 1 o retificador da indústria analisada consome corrente fundamental de magnitude de 3 A. Já na condição 2 é consumida uma corrente fundamental de 1,3 A, sendo essa a condição originalmente adotada no sistema, de acordo com a parametrização definida na Tabela C.3 do Apêndice C.

Em consonância com as grandezas descritas na Figura 4.17 e na Figura 4.18, a Tabela 4.34 e a Tabela 4.35 apresentam as grandezas mensuradas no sistema elétrico ensaiado nas condições de operação 1 e 2, respectivamente.

Tabela 4.34 – Grandezas obtidas para a análise da condição 1 da indústria 1 – ensaios EMIC-MC.

h	\dot{I}_{pm-h} (A)	\dot{I}_{c-h}^* (A)	\dot{V}_{pm-h} (V)
5	$0,72\angle-217,10^\circ$	$0,63\angle-30,33^\circ$	$7,76\angle33,62^\circ$
7	$0,31\angle-228,36^\circ$	$0,23\angle-40,42^\circ$	$4,27\angle24,87^\circ$
11	$0,25\angle-132,88^\circ$	$0,11\angle94,95^\circ$	$6,00\angle119,37^\circ$
13	$0,14\angle-149,68^\circ$	$0,07\angle109,41^\circ$	$3,94\angle94,52^\circ$

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.35 – Grandezas obtidas para a análise da condição 2 da indústria 1 – ensaios EMIC-MC.

h	$\dot{I}_{p-pm-c-h}$ (A)	$\dot{I}_{c-h}^{*'} (A)$	\dot{V}_{pm-h}' (V)
5	$0,34\angle-206,45^\circ$	$0,29\angle-16,12^\circ$	$4,99\angle43,08^\circ$
7	$0,17\angle-209,79^\circ$	$0,12\angle-18,49^\circ$	$2,86\angle40,53^\circ$
11	$0,18\angle-111,79^\circ$	$0,07\angle140,19^\circ$	$5,32\angle142,01^\circ$
13	$0,11\angle-131,50^\circ$	$0,06\angle152,59^\circ$	$3,50\angle117,09^\circ$

Fonte: Autoria própria.

Além dos dados de medições mostrados nas tabelas anteriores, para a aplicar a EMIC-MC é preciso lançar mão das informações presentes na Tabela C.7 do Apêndice C, para obter os valores das impedâncias harmônicas do transformador de entrada da indústria 1.

Seguindo o processo metodológico para obtenção do compartilhamento harmônico pela EMIC-MC, a Tabela 4.36 mostra os resultados obtidos para as parcelas de responsabilidades da indústria 1.

Tabela 4.36 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – ensaios EMIC-MC.

h	Gabarito (%)	Resultado EMIC-MC (%)	Erro absoluto
5	39,94	38,04	1,90
7	40,73	46,57	5,84
11	43,81	38,26	5,55
13	45,31	52,36	7,05

Fonte: Autoria própria.

A tabela anterior indica erro absoluto máximo de 7,05 unidades percentuais, enquanto o percentil 95 dos erros é igual a 6,87 unidades percentuais. Os distanciamentos do gabarito, um pouco maiores do que os constatados nos estudos computacionais descritos no item 4.9, podem ser justificados pelos baixos valores de correntes injetadas pelo retificador (i_{c-h}^*), principalmente nas frequências harmônicas maiores, o que reduz a exatidão das medições realizadas.

Apesar disso, considera-se que os resultados encontrados são promissores e os trabalhos realizados corroboram a eficiência da EMIC-MC também em ambiente laboratorial.

5 O MÉTODO DO CHAVEAMENTO DE CAPACITORES (MCC)

5.1 Considerações iniciais

O presente capítulo apresenta uma terceira filosofia para a realização do compartilhamento de responsabilidades harmônicas: o Método do Chaveamento de Capacitores (MCC). Esta é uma proposição inovadora, uma vez que os processos existentes na literatura que se valem de chaveamento capacitivo, como (117), (118), (119), (120), (121) e (122), visam tão somente à obtenção de impedâncias harmônicas. Os fundamentos teóricos do MCC são definidos na seção 5.2.

Por meio de simulações computacionais, em 5.3, e ensaios práticos, em 5.4, é avaliado o desempenho do processo de obtenção dos percentuais de responsabilidades a partir do chaveamento de unidades capacitivas no ponto de interesse ao compartilhamento.

Assim como feito nos capítulos anteriores, neste caso também foi desenvolvida uma teoria que culmina na possibilidade de realizar o chaveamento de capacitores em um ponto do sistema e obter a atribuição de responsabilidades harmônicas em outra barra, desde que seja conhecida a impedância harmônica entre esses dois pontos. Tal procedimento, aqui chamado de Extrapolação do Compartilhamento pelo Método do Chaveamento de Capacitores (EMCC), é detalhadamente descrito na seção 5.5. As avaliações de desempenho desta metodologia são examinadas nos itens 5.6 e 5.7 por meio de simulações e práticas laboratoriais, nesta ordem.

Mais uma vez, ressalta-se que os arranjos elétricos adotados em todos os trabalhos de análise de desempenho são os mesmos usados para o estudo dos métodos apresentados nos capítulos anteriores.

5.2 Fundamentação teórica do MCC

A fundamentação teórica do Método do Chaveamento de Capacitores (MCC) envolve a análise do sistema elétrico de interesse em duas situações operativas distintas, as quais devem ser diferenciadas unicamente pela conexão de unidades capacitivas no ponto em que se deseja

obter o compartilhamento de responsabilidades sobre distorções harmônicas. A proposta se preocupa em unir consistência física acertada e, ao mesmo tempo, facilidade de aplicação em campo.

A originalidade deste procedimento está no desenvolvimento de uma teoria que culmina diretamente nos percentuais de responsabilidades harmônicas cabidos às partes envolvidas no processo de compartilhamento, sem a necessidade de passar pela etapa de estimação das impedâncias harmônicas. Isto é possível a partir, simplesmente, de medições de tensões e correntes harmônicas no ponto de interesse, antes e após a realização do chaveamento de capacitores.

É importante pontuar que apesar da particularização utilizada aqui para unidades capacitivas, sob o ponto de vista teórico, o chaveamento de qualquer outro componente passivo e linear, como um resistor ou um reator, poderia também oferecer os recursos físicos necessários à aplicação do processo. A opção feita neste trabalho por considerar o chaveamento de capacitores é justificada pelo fato de este componente ser bastante comum em instalações reais. Além disso, usualmente bancos de capacitores podem ser manobrados em pequenas quantidades, ou em estágios. De fato, uma pequena mudança nas tensões e correntes do barramento analisado, ocasionada pelo chaveamento de um estágio capacitivo, já é suficiente para a atribuição de responsabilidades harmônicas.

Como ponto norteador dos desenvolvimentos relacionados à fundamentação física do MCC, são considerados os mesmos princípios usados para a apresentação do MIC, na seção 4.2. Supõe-se, então, a existência de um ponto de acoplamento comum entre o sistema equivalente do sistema supridor, que fornece tensão com padrão pré-distorcido, e uma determinada instalação consumidora constituída por cargas lineares e não lineares. A Figura 3.1 mostra um esquema ilustrativo deste arranjo genérico.

Seguindo nomenclatura similar àquela utilizada nos capítulos anteriores, na Figura 5.1 há a representação, para determinada ordem harmônica h , do circuito equivalente de Norton desta configuração. Nesta figura, a corrente \dot{I}_{s-h} representa as distorções harmônicas originadas do circuito equivalente do supridor, \dot{I}_{c-h} é a corrente indicativa das distorções advindas do circuito do consumidor, \dot{Z}_{s-h} e \dot{Z}_{c-h} são as impedâncias harmônicas, respectivamente, dos circuitos do supridor e do consumidor, enquanto \dot{I}_{pac-h} e \dot{V}_{pac-h} indicam a corrente e a tensão totais presentes no PAC, nesta ordem.

Na Figura 5.2, por sua vez, considera-se que seja conectado ao PAC um banco de capacitores de maneira que, para uma dada ordem h , \dot{Z}_{cap-h} indica a impedância capacitiva conectada, enquanto \dot{V}'_{pac-h} e \dot{I}'_{pac-h} representam, respectivamente, a tensão e a corrente harmônicas no PAC nesta nova condição.

Figura 5.1 – Circuito equivalente de Norton evidenciando as grandezas envolvidas na problemática.

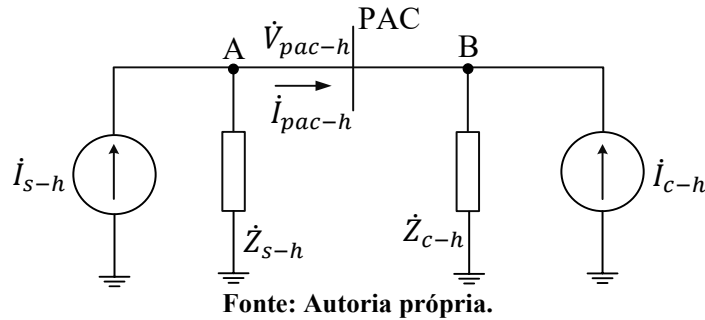
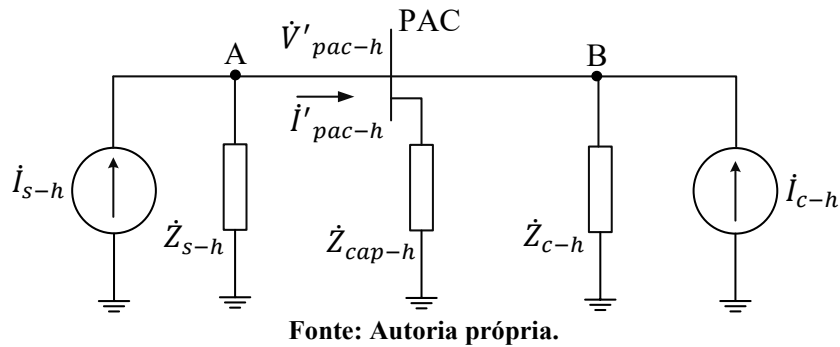


Figura 5.2 – Arranjo evidenciando a conexão do capacitor no PAC.



Para fins da aplicação da metodologia do chaveamento de capacitores, estabelece-se que a Figura 5.1 representa a primeira condição operativa, sem capacitores, e a Figura 5.2 indica a segunda condição de operação, após conexão do banco de capacitores ao PAC. Importa salientar também que o desenvolvimento subsequente é feito considerando que não houve alterações nas impedâncias \dot{Z}_{s-h} e \dot{Z}_{c-h} e nas correntes \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} durante as medições realizadas nas duas condições.

O cenário aqui tratado representa apenas uma possibilidade exemplificadora e, assim sendo, não existe nenhuma imposição de que em uma das situações não exista capacitor conectado ao PAC e em outra situação exista. O que se faz necessário é, simplesmente, a existência de uma diferença conhecida entre os valores de impedâncias capacitivas conectadas ao ponto de interesse nas duas situações de operação. Como retrata a Figura 5.2, a impedância chaveada é aqui nomeada como \dot{Z}_{cap-h} .

Lançando mão da mesma linha de raciocínio usada do desenvolvimento teórico do MIC e tendo em mente o princípio da superposição de efeitos, nota-se que a tensão harmônica no PAC devido às distorções causadas apenas pelo sistema supridor é igual ao produto de \dot{I}_{s-h} pela impedância harmônica total equivalente do arranjo. Já a tensão harmônica devido às distorções advindas do consumidor é dada pelo produto de \dot{I}_{c-h} pela mesma impedância. Por isso, é correto afirmar que o conhecimento das referidas correntes já é condição suficiente para se chegar aos percentuais de atribuição de responsabilidades sobre tensões harmônicas.

Seguindo, então, à apresentação do MCC, na sequência são realizados os desenvolvimentos necessários para se representar as correntes \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} a partir de grandezas conhecidas ou facilmente mensuradas na prática. Após esta etapa, procede-se efetivamente ao processo de compartilhamento de responsabilidades.

5.2.1 Determinação das grandezas de interesse

A partir da análise imediata dos circuitos mostrados na Figura 5.1 e na Figura 5.2, com a aplicação da Lei de Kirchhoff das correntes aos pontos nomeados como A nas referidas figuras, é possível chegar às equações (5.1) e (5.2), respectivamente.

$$\dot{I}_{s-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{s-h}} + \dot{I}_{pac-h} \quad (5.1)$$

$$\dot{I}_{s-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{\dot{Z}_{s-h}} + \dot{I}'_{pac-h} \quad (5.2)$$

Nota-se que em (5.2) é perfeitamente possível isolar a grandeza \dot{Z}_{s-h} , de forma a obter (5.3).

$$\dot{Z}_{s-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{(\dot{I}_{s-h} - \dot{I}'_{pac-h})} \quad (5.3)$$

Conforme já mencionado, considerando que a corrente \dot{I}_{s-h} é a mesma nas duas condições operativas, pode-se substituir (5.3) em (5.1) e realizar os desenvolvimentos matemáticos adequados para isolar a grandeza \dot{I}_{s-h} , de maneira a obter a equação (5.4).

$$i_{s-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h} \cdot i_{pac-h} - \dot{V}_{pac-h} \cdot i'_{pac-h}}{\dot{V}'_{pac-h} - \dot{V}_{pac-h}} \quad (5.4)$$

Seguindo uma linha de raciocínio análoga, mas agora com o foco de atenções voltado para a análise do ponto referenciado como B na Figura 5.1 e na Figura 5.2, respectivamente, é possível escrever (5.5) e (5.6).

$$i_{c-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{c-h}} - i_{pac-h} \quad (5.5)$$

$$i_{c-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{\dot{Z}_{c-h}} + \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{\dot{Z}_{cap-h}} - i'_{pac-h} \quad (5.6)$$

Ao reescrever (5.6) de forma a isolar a impedância \dot{Z}_{c-h} , a equação (5.7) é obtida.

$$\dot{Z}_{c-h} = \frac{\dot{Z}_{cap-h} \cdot \dot{V}'_{pac-h}}{\dot{Z}_{cap-h} \cdot (i_{c-h} + i'_{pac-h}) - \dot{V}'_{pac-h}} \quad (5.7)$$

Uma vez que i_{c-h} não sofre alterações entre as duas condições de operação, pode-se substituir (5.7) em (5.5) e fazer os artifícios necessários para chegar à formulação para o cálculo de i_{c-h} , como mostra a equação (5.8).

$$i_{c-h} = \frac{\dot{Z}_{cap-h} \cdot (\dot{V}_{pac-h} \cdot i'_{pac-h} - \dot{V}'_{pac-h} \cdot i_{pac-h}) - (\dot{V}_{pac-h} \cdot \dot{V}'_{pac-h})}{\dot{Z}_{cap-h} \cdot (\dot{V}'_{pac-h} - \dot{V}_{pac-h})} \quad (5.8)$$

Como se observa, as equações (5.4) e (5.8) permitem obter as grandezas i_{s-h} e i_{c-h} a partir de informações facilmente obtidas em situações práticas. É preciso apenas conhecer o valor da impedância capacitiva chaveada (\dot{Z}_{cap-h}) e as medições de tensões e correntes no PAC nas duas condições operativas estudadas.

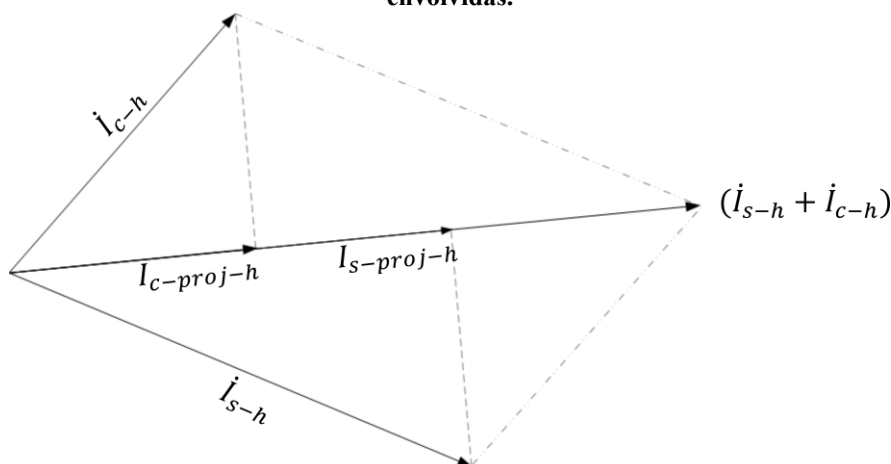
A partir das formulações obtidas, a seção a seguir comenta sobre os procedimentos finais a serem seguidos para o processo do compartilhamento de responsabilidades propriamente dito.

5.2.2 Compartilhamento de responsabilidades

Para compartilhar responsabilidades sobre tensões de uma determinada ordem harmônica h , sugere-se, primeiramente, que seja feita a projeção fasorial de \dot{I}_{s-h} sobre a soma total das correntes harmônicas oriundas do supridor e do consumidor ($\dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h}$). Esta projeção resulta um número escalar que quantifica a responsabilidade do supridor sobre as distorções totais no PAC. Por outro lado, a projeção fasorial de \dot{I}_{c-h} sobre $(\dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h})$ indica a responsabilidade do consumidor sobre as distorções totais constatadas no ponto de interesse.

Esse processo é similar ao sugerido para o MIC, na Figura 4.3. Por conveniência, esta imagem é repetida na sequência como Figura 5.3 e nela é possível observar que $I_{s-proj-h}$ e $I_{c-proj-h}$ indicam as projeções que culminam nos percentuais de responsabilidades cabidos ao supridor e ao consumidor, respectivamente.

Figura 5.3 – Projeção de fasores para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas.



Fonte: Autoria própria.

Mais uma vez, chama-se atenção para o fato de as projeções de \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} sobre $(\dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h})$ estarem fisicamente atreladas à contribuição do sistema supridor e do consumidor, respectivamente, sobre a tensão harmônica total presente no PAC, e não sobre a corrente do PAC.

É importante reforçar, ainda, que o chaveamento no PAC de qualquer dispositivo passivo e linear, que se conheça a impedância, é suficiente para que se obtenha os dados necessários para a aplicação do procedimento. Evidentemente, neste caso, a impedância

capacitiva \dot{Z}_{cap-h} , na equação (5.8), deve ser substituída pela impedância do elemento chaveado.

Apesar de o processo aqui tratado ser considerado invasivo, chaveamentos que ocasionam pequenas alterações no complexo elétrico, minimamente capazes de serem percebidas pelos equipamentos de medição, já são suficientes para o sucesso do compartilhamento de responsabilidades.

Assim, sugere-se que para evitar impactos significativos na operação dos sistemas em análise, seja realizado o chaveamento de elementos com pequena potência em relação à ordem de grandeza do complexo como um todo. Caso o sistema em estudo envolva uma dinâmica de operação expressiva, o procedimento de chaveamento pode ser repetido sucessivas vezes, de maneira a se obter um perfil do comportamento do compartilhamento de responsabilidades ao longo do tempo.

5.3 Avaliação de desempenho do MCC via simulações computacionais

Para avaliação computacional do Método do Chaveamento de Capacitores lança-se mão, outra vez, do sistema elétrico detalhado no Apêndice B. Como descrito anteriormente, as duas condições operativas necessárias para aplicação do MCC podem ser obtidas da análise do ponto de interesse antes e após a conexão de um banco de capacitores.

Assim, os dados relacionados a tensões e correntes harmônicas no PAC antes da conexão dos capacitores são encontrados a partir da consulta da Tabela B.9 do Apêndice B. Com relação à obtenção da segunda condição, foi feita a escolha por utilizar um capacitor de 500 kVAr para a análise de todos os casos de compartilhamento de responsabilidades. As impedâncias harmônicas do capacitor chaveado (\dot{Z}_{cap-h}), referidas para a tensão de 13,8 kV, são mostradas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Impedâncias harmônicas do capacitor chaveado – simulações MCC.

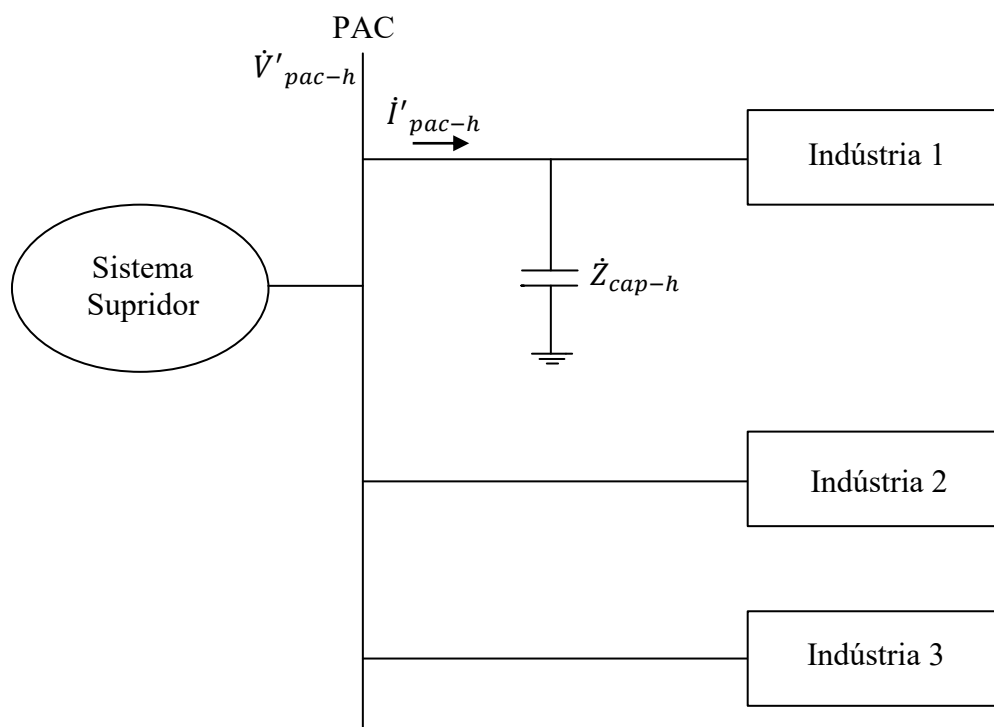
h	$\dot{Z}_{cap-h} (\Omega)$
5	76,18 \angle -90°
7	54,41 \angle -90°
11	34,63 \angle -90°
13	29,30 \angle -90°

Fonte: Autoria própria.

A conexão estratégica de um capacitor no PAC para a análise do compartilhamento referente à indústria 1 é ilustrada na Figura 5.4. Esta imagem segue a nomenclatura definida na Figura 5.2.

Procedimento análogo ao retratado na Figura 5.4 para o estudo da indústria 1 é feito, também, para a obtenção das responsabilidades referentes às demais partes que constituem o arranjo.

Figura 5.4 – Esquema representativo da aplicação do MCC para o compartilhamento da indústria 1.



Fonte: Autoria própria.

Seguindo, a Tabela 5.2 sintetiza as informações referentes a \dot{V}'_{pac-h} e \dot{I}'_{pac-h} nas investigações realizadas.

Reforça-se que apesar de a Tabela 5.2 conter dados referentes a distintas partes do circuito, tais partes foram estudadas vez a vez, separadamente. Simulações específicas foram executadas, com o capacitor devidamente posicionado de forma a obter a segunda condição operativa para análise das três indústrias e da concessionária. Assim, as informações são todas mostradas na mesma tabela apenas para efeito de compendiar a apresentação dos resultados.

Tabela 5.2 – Grandezas obtidas para a análise da condição 2 – simulações MCC.

Grandeza	<i>h</i>	Indústria 1	Indústria 2	Indústria 3	Concessionária
\dot{V}'_{pac-h} (V)	5	300,58∠108,01°	300,58∠108,01°	300,58∠108,01°	300,58∠108,01°
	7	144,32∠79,76°	144,32∠79,76°	144,32∠79,76°	144,32∠79,76°
	11	73,64∠-87,96°	73,64∠-87,96°	73,64∠-87,96°	73,64∠-87,96°
	13	78,28∠-99,06°	78,28∠-99,06°	78,28∠-99,06°	78,28∠-99,06°
\dot{I}'_{pac-h} (V)	5	31,76∠-145,62°	12,08∠175,55°	14,18∠-176,99°	43,50∠18,89°
	7	9,96∠176,36°	5,20∠164,53°	6,54∠165,38°	13,63∠-9,53°
	11	4,28∠37,38°	3,09∠-17,18°	3,45∠-22,43°	3,16∠-177,46°
	13	4,17∠18,89°	3,25∠-23,58°	3,45∠-27,83°	2,08∠171,72°

Fonte: Autoria própria.

Com os dados mostrados até este ponto e seguindo a metodologia exposta na seção anterior, é possível chegar aos percentuais de responsabilidades mostrados da Tabela 5.3 até a Tabela 5.6, para as indústrias 1, 2, 3 e concessionária, nesta ordem. Usando a sistemática assumida ao longo deste trabalho, as referidas tabelas apresentam os valores de gabarito para o compartilhamento, os quais foram obtidos conforme explicado no item B.2, do Apêndice B. Além disso, com o intuito de facilitar a análise de desempenho do MCC, em cada caso é registrado o módulo da diferença entre os percentuais encontrados pelo método em estudo e os valores de referência.

Tabela 5.3 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – simulações MCC.

<i>h</i>	Gabarito (%)	Resultado MCC (%)	Erro absoluto
5	54,04	54,05	0,01
7	48,83	47,84	0,99
11	44,61	40,92	3,69
13	49,63	51,14	1,51

Fonte: Autoria própria.**Tabela 5.4 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 2 – simulações MCC.**

<i>h</i>	Gabarito (%)	Resultado MCC (%)	Erro absoluto
5	20,92	20,50	0,42
7	22,76	22,81	0,05
11	26,34	28,23	1,89
13	24,44	23,73	0,71

Fonte: Autoria própria.**Tabela 5.5 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 3 – simulações MCC.**

<i>h</i>	Gabarito (%)	Resultado MCC (%)	Erro absoluto
5	25,02	25,36	0,34
7	28,45	29,26	0,81
11	29,06	30,81	1,75
13	25,81	25,02	0,79

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5.6 – Resultados obtidos para o compartilhamento da concessionária – simulações MCC.

h	Gabarito (%)	Resultado MCC(%)	Erro absoluto
5	0	0,10	0,10
7	0	0,11	0,11
11	0	0,01	0,01
13	0	0,11	0,11

Fonte: Autoria própria.

Os dados anteriores revelam desempenho acertado do MCC para compartilhamento de responsabilidades sobre tensões harmônicas. Nota-se que dentre todos os 16 resultados mostrados, apenas quatro deles possuem erro absoluto maior que 1, sendo o 3,69 unidades percentuais o desvio máximo constatado, o qual ocorreu para ordem $h = 11$ na indústria 1. O percentil 95 dos erros absolutos presentes na Tabela 5.3 até a Tabela 5.6 é igual a 2,34 unidades percentuais.

5.4 Avaliação de desempenho do MCC via ensaios laboratoriais

Esta seção pretende investigar o desempenho do MCC no sistema elétrico descrito com detalhes no Apêndice C, complexo este usado nos testes práticos de avaliação de todas as metodologias propostas neste trabalho.

Como já exposto, para a aplicação do MCC é preciso conhecer as tensões e correntes harmônicas no PAC, antes da conexão do capacitor. As informações sobre esta situação, nomeada como sendo a condição 1, podem ser consultadas na Tabela C.6 do Apêndice C.

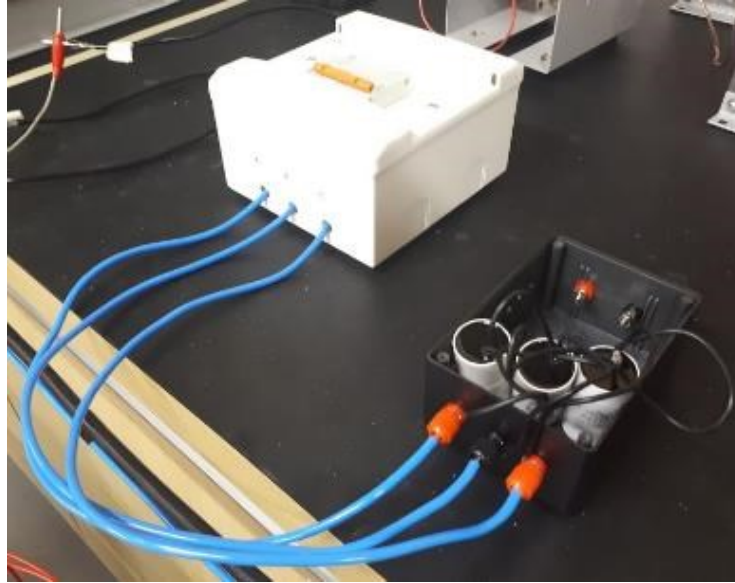
Para obter a condição 2, optou-se por utilizar um capacitor de potência 1,82 kVAr, o qual apresenta as impedâncias harmônicas (\dot{Z}_{cap-h}), referidas para a tensão de 220 V, mostradas na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Impedâncias harmônicas do capacitor chaveado – ensaios MCC.

h	$\dot{Z}_{cap-h} (\Omega)$
5	5,31 \angle -90°
7	3,79 \angle -90°
11	2,41 \angle -90°
13	2,04 \angle -90°

Fonte: Autoria própria.

A Figura 5.5 exibe o esquema montado em laboratório para viabilizar a realização do chaveamento dos capacitores.

Figura 5.5 – Esquema usado para o chaveamento de capacitores nos ensaios laboratoriais.

Fonte: Autoria própria.

É importante ressaltar que os capacitores foram adequadamente posicionados no PAC de forma a propiciar a realização de quatro ensaios, visando à obtenção das informações necessárias para a posterior determinação dos percentuais de responsabilidades das quatro partes do arranjo: concessionária e indústrias 1, 2 e 3.

A Tabela 5.8 mostra as informações obtidas nestes ensaios, em consonância com a nomenclatura definida na Figura 5.4. Os referidos ensaios foram feitos vez a vez, separadamente, mas as medições obtidas neles são organizadas em uma mesma tabela, objetivando maior concisão na exposição dos dados.

Tabela 5.8 – Grandezas obtidas para a análise da condição 2 – ensaios MCC.

Grandeza	<i>h</i>	Indústria 1	Indústria 2	Indústria 3	Concessionária
\dot{V}'_{pac-h} (V)	5	11,12 \angle -15,03°	11,07 \angle -15,15°	11,64 \angle -10,83°	11,09 \angle -15,16°
	7	2,69 \angle -47,34°	2,70 \angle -48,05°	2,90 \angle -47,99°	2,90 \angle -48,00°
	11	0,74 \angle 141,04°	0,73 \angle 140,40°	0,74 \angle 139,17°	0,74 \angle 138,90°
	13	0,49 \angle 144,83°	0,49 \angle 143,41°	0,50 \angle 141,91°	0,50 \angle 141,80°
\dot{i}'_{pac-h} (V)	5	2,32 \angle 78,68°	2,49 \angle 73,07°	2,30 \angle 82,04°	2,33 \angle 80,08°
	7	0,64 \angle 46,12°	0,73 \angle 38,22°	0,67 \angle 45,61°	0,42 \angle 44,17°
	11	0,23 \angle -127,86°	0,30 \angle -137,02°	0,23 \angle -128,18°	0,10 \angle -101,19°
	13	0,17 \angle -125,08°	0,22 \angle -135,84°	0,19 \angle -125,35°	0,06 \angle -90,72°

Fonte: Autoria própria.

Com os dados evidenciados até este ponto é possível seguir a filosofia exposta no item 5.2 para obter o compartilhamento de responsabilidades no PAC pelo MCC. A Tabela 5.9 até a Tabela 5.12 mostram os resultados obtidos para os percentuais cabidos a cada uma das partes

que compõem o sistema. As referidas tabelas também apresentam os valores de gabarito obtidos nos desenvolvimentos exibidos no item C.2, do Apêndice C, e os erros absolutos característicos de cada situação.

Tabela 5.9 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – ensaios MCC.

<i>h</i>	Gabarito (%)	Resultado MCC (%)	Erro absoluto
5	39,94	36,21	3,73
7	40,73	37,69	3,04
11	43,81	40,13	3,68
13	45,31	39,89	5,42

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5.10 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 2 – ensaios MCC.

<i>h</i>	Gabarito (%)	Resultado MCC (%)	Erro absoluto
5	24,78	22,11	2,67
7	26,45	23,32	3,13
11	29,27	21,58	7,69
13	31,44	24,08	7,36

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5.11 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 3 – ensaios MCC.

<i>h</i>	Gabarito (%)	Resultado MCC (%)	Erro absoluto
5	36,83	32,72	4,11
7	36,39	34,01	2,38
11	33,18	35,06	1,88
13	27,11	32,61	5,50

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5.12 – Resultados obtidos para o compartilhamento da concessionária – ensaios MCC.

<i>h</i>	Gabarito (%)	Resultado MCC(%)	Erro absoluto
5	1,51	1,55	1,55
7	3,34	1,21	1,21
11	5,56	1,83	1,83
13	3,59	2,03	2,03

Fonte: Autoria própria.

É importante mencionar que a opção pelo chaveamento de um capacitor com potência elevada, comparativamente ao nível de grandeza das partes constituintes do circuito, justifica-se por questões de ordem prática. Uma vez que o medidor utilizado em laboratório apresenta erros de medição menores para níveis de correntes harmônicas maiores, o chaveamento de capacitor com potência elevada proporcionou resultados mais exatos e precisos.

O erro absoluto máximo constatado nas tabelas anteriores foi de 7,69 unidades percentuais, enquanto que o percentil 95 dos erros foi 7,44 unidades percentuais. Tendo em

mente todos os pontos já discutidos, sobre os desafios peculiares do ambiente laboratorial, conclui-se que o MCC possui coerência confirmada também termos práticos.

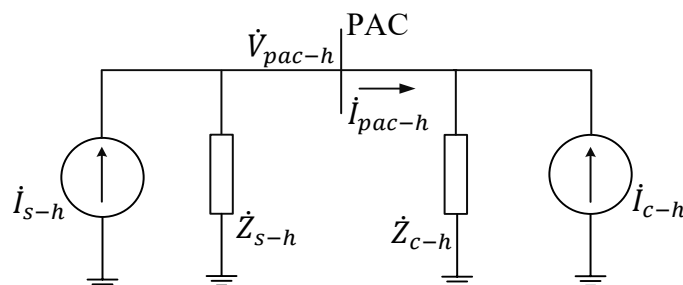
5.5 Extrapolação do compartilhamento em ponto distinto daquele onde se conecta o capacitor (EMCC)

Assim como feito nos capítulos anteriores, também para a filosofia do MCC foi desenvolvida uma derivação procedimental com o objetivo de viabilizar a obtenção do compartilhamento de responsabilidades harmônicas em ponto diferente daquele onde acontece o chaveamento de capacitores. Este procedimento é aqui chamado de Extrapolação do Compartilhamento pelo Método do Chaveamento de Capacitores (EMCC).

Para viabilizar os desenvolvimentos almejados, na sequência são apresentadas Figura 5.6, Figura 5.7 e Figura 5.8, as quais já foram mostradas em capítulos anteriores, quando do estudo do EMID e EMIC, mas são repetidas na sequência para comodidade do leitor quanto à contextualização do assunto.

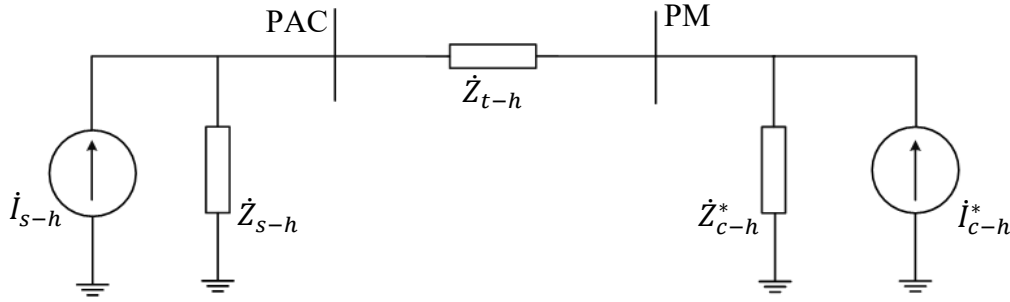
A Figura 5.6 mostra o arranjo genérico com os circuitos equivalentes de Norton da parte do supridor e do consumidor, para uma ordem harmônica h , com relação ao PAC. Na Figura 5.7 considera-se a presença de um transformador de entrada na instalação do consumidor, com impedância \dot{Z}_{t-h} , e é feita a suposição que o chaveamento de capacitores e as medições de tensões e correntes sejam realizadas no Ponto de Medição (PM). Dessa maneira, a Figura 5.8 exhibe um novo circuito simplificado, mas agora com os equivalentes de Norton com relação a PM, e não ao PAC.

Figura 5.6 – Circuito equivalente de Norton das partes envolvidas com relação ao PAC.



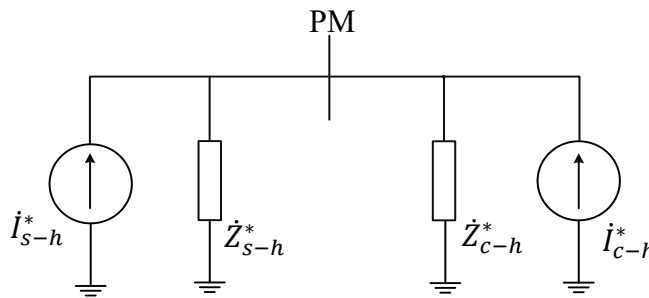
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.7 – Circuito evidenciando o transformador de entrada na instalação do consumidor.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.8 – Circuito equivalente de Norton das partes envolvidas com relação ao PM.



Fonte: Autoria própria.

Lançando mão do Teorema de Norton e sabendo que as configurações da Figura 5.6, Figura 5.7 e Figura 5.8 são equivalentes, podem ser escritas as relações (5.9) a (5.12).

$$\dot{Z}_{s-h}^* = \dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{t-h} \quad (5.9)$$

$$\dot{I}_{s-h}^* = \frac{\dot{Z}_{s-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{t-h}} \cdot \dot{I}_{s-h} \quad (5.10)$$

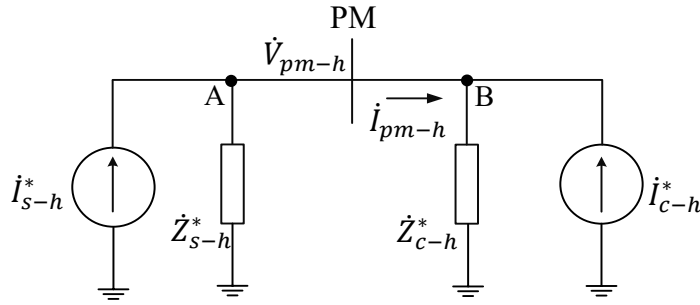
$$\dot{Z}_{c-h} = \dot{Z}_{c-h}^* + \dot{Z}_{t-h} \quad (5.11)$$

$$\dot{I}_{c-h} = \frac{\dot{Z}_{c-h}^*}{\dot{Z}_{c-h} + \dot{Z}_{t-h}} \cdot \dot{I}_{c-h}^* \quad (5.12)$$

Seguindo uma linha de raciocínio semelhante à discutida na apresentação da EMID e EMIC, para aplicação da EMCC é preciso conhecer a impedância harmônica do transformador (\dot{Z}_{t-h}) e realizar medições, no PM, em duas condições de operação diferentes.

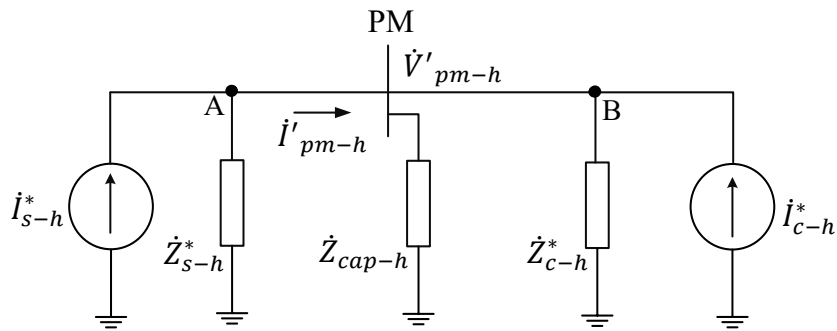
Neste contexto, a Figura 5.9 apresenta a condição 1, sem capacitor conectado ao PM, ao passo que a Figura 5.10 exibe a condição 2, após conexão de um banco de capacitores ao PM. Considera-se o funcionamento do sistema nas duas situações operativas é alterado unicamente pela conexão dos capacitores no PM.

Figura 5.9 – Grandezas que devem ser mensuradas para aplicação da EMCC – condição 1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.10 – Grandezas que devem ser mensuradas para aplicação da EMCC – condição 2.



Fonte: Autoria própria.

Onde:

 \dot{V}_{pm-h} : tensão harmônica de ordem h mensurada no PM, na condição de operação 1; \dot{I}_{pm-h} : corrente harmônica de ordem h mensurada no PM, na condição de operação 1, com sentido do sistema supridor para o consumidor; \dot{Z}_{cap-h} : impedância do capacitor conectada ao PM, na condição de operação 2; \dot{V}'_{pm-h} : tensão harmônica de ordem h mensurada no PM, na condição de operação 2; \dot{I}'_{pm-h} : corrente harmônica de ordem h mensurada no PM, na condição de operação 2, com sentido do sistema supridor para o consumidor;

Procede-se, neste momento, aos desenvolvimentos necessários para encontrar \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} , da Figura 5.6, para ser possível chegar ao compartilhamento de responsabilidades no PAC. Inicia-se o processo explorando os pontos nomeados como A nos arranjos da Figura 5.9 e da Figura 5.10. Desta análise são escritas as equações (5.13) e (5.14).

$$\dot{I}_{s-h}^* = \frac{\dot{V}_{pm-h}}{\dot{Z}_{s-h}^*} + \dot{I}_{pm-h} \quad (5.13)$$

$$\dot{I}_{s-h}^* = \frac{\dot{V}_{pm-h}'}{\dot{Z}_{s-h}^*} + \dot{I}_{pm-h}' \quad (5.14)$$

Isolando \dot{Z}_{s-h}^* nas relações (5.13) e (5.14), são encontradas, respectivamente, as equações (5.15) e (5.16):

$$\dot{Z}_{s-h}^* = \frac{\dot{V}_{pm-h}}{\dot{I}_{s-h}^* - \dot{I}_{pm-h}} \quad (5.15)$$

$$\dot{Z}_{s-h}^* = \frac{\dot{V}_{pm-h}'}{\dot{I}_{s-h}^* - \dot{I}_{pm-h}'} \quad (5.16)$$

Igualando os segundos membros de (5.15) e (5.16) e arranjando a equação de forma a isolar a grandeza \dot{I}_{s-h}^* , tem-se:

$$\dot{I}_{s-h}^* = \frac{\dot{V}_{pm-h}' \cdot \dot{I}_{pm-h} - \dot{V}_{pm-h} \cdot \dot{I}_{pm-h}'}{\dot{V}_{pm-h}' - \dot{V}_{pm-h}} \quad (5.17)$$

Ao substituir a equação (5.17) em (5.15) encontra-se (5.18).

$$\dot{Z}_{s-h}^* = \frac{\dot{V}_{pm-h}' - \dot{V}_{pm-h}}{\dot{I}_{pm-h} - \dot{I}_{pm-h}'} \quad (5.18)$$

Para concluir esta parte do desenvolvimento e obter \dot{I}_{s-h} , substitui-se (5.9), (5.17) e (5.18) em (5.10), de maneira a encontrar (5.19).

$$\dot{I}_{s-h} = \frac{\dot{V}_{pm-h}' \cdot \dot{I}_{pm-h} - \dot{V}_{pm-h} \cdot \dot{I}_{pm-h}'}{\dot{V}_{pm-h}' - \dot{V}_{pm-h} - \dot{Z}_{t-h} \cdot (\dot{I}_{pm-h} - \dot{I}_{pm-h}')} \quad (5.19)$$

Visando à obtenção, neste momento, da grandeza \dot{I}_{c-h} , procede-se à análise dos pontos referenciados como B na Figura 5.9 e na Figura 5.10. São escritas, assim, as equações (5.20) e (5.21).

$$\dot{I}_{c-h}^* = \frac{\dot{V}_{pm-h}}{\dot{Z}_{c-h}^*} - \dot{I}_{pm-h} \quad (5.20)$$

$$\dot{I}_{c-h}^* = \frac{\dot{V}_{pm-h}}{\dot{Z}_{c-h}^*} + \frac{\dot{V}_{pm-h}'}{\dot{Z}_{cap-h}} - \dot{I}_{pm-h}' \quad (5.21)$$

Ao isolar \dot{Z}_{c-h}^* em (5.20) e (5.21) são encontradas (5.22) e (5.23), respectivamente:

$$\dot{Z}_{c-h}^* = \frac{\dot{V}_{pm-h}}{\dot{I}_{c-h}^* + \dot{I}_{pm-h}} \quad (5.22)$$

$$\dot{Z}_{c-h}^* = \frac{\dot{V}_{pm-h}' \cdot \dot{Z}_{cap-h}}{\dot{Z}_{cap-h} \cdot (\dot{I}_{c-h}^* + \dot{I}_{pm-h}') - \dot{V}_{pm-h}'} \quad (5.23)$$

Igualando os segundos membros das equações (5.22) e (5.23), de maneira a isolar \dot{I}_{c-h}^* , chega-se a (5.24):

$$\dot{I}_{c-h}^* = \frac{\dot{Z}_{cap-h} \cdot (\dot{V}_{pm-h}' \cdot \dot{I}_{pm-h} - \dot{V}_{pm-h} \cdot \dot{I}_{pm-h}') + \dot{V}_{pm-h} \cdot \dot{V}_{pm-h}'}{\dot{Z}_{cap-h} \cdot (\dot{V}_{pm-h} - \dot{V}_{pm-h}')} \quad (5.24)$$

Ao substituir (5.24) em (5.22) tem-se:

$$\dot{Z}_{c-h}^* = \frac{\dot{Z}_{cap-h} \cdot (\dot{V}_{pm-h} - \dot{V}_{pm-h}')}{\dot{V}_{pm-h} + \dot{Z}_{cap-h} \cdot (\dot{I}_{pm-h} - \dot{I}_{pm-h}')} \quad (5.25)$$

Agora, substitui-se (5.24) e (5.25) em (5.12) para obter \dot{I}_{c-h} , como mostra (5.26).

$$\dot{I}_{c-h} = \frac{\dot{Z}_{cap-h} \cdot (\dot{V}_{pm-h}' \cdot \dot{I}_{pm-h} - \dot{V}_{pm-h} \cdot \dot{I}_{pm-h}') + \dot{V}_{pm-h} \cdot \dot{V}_{pm-h}'}{\dot{Z}_{cap-h} \cdot (\dot{V}_{pm-h} - \dot{V}_{pm-h}') + \dot{Z}_{t-h} \cdot [\dot{V}_{pm-h}' + \dot{Z}_{cap-h} \cdot (\dot{I}_{pm-h} - \dot{I}_{pm-h}')] } \quad (5.26)$$

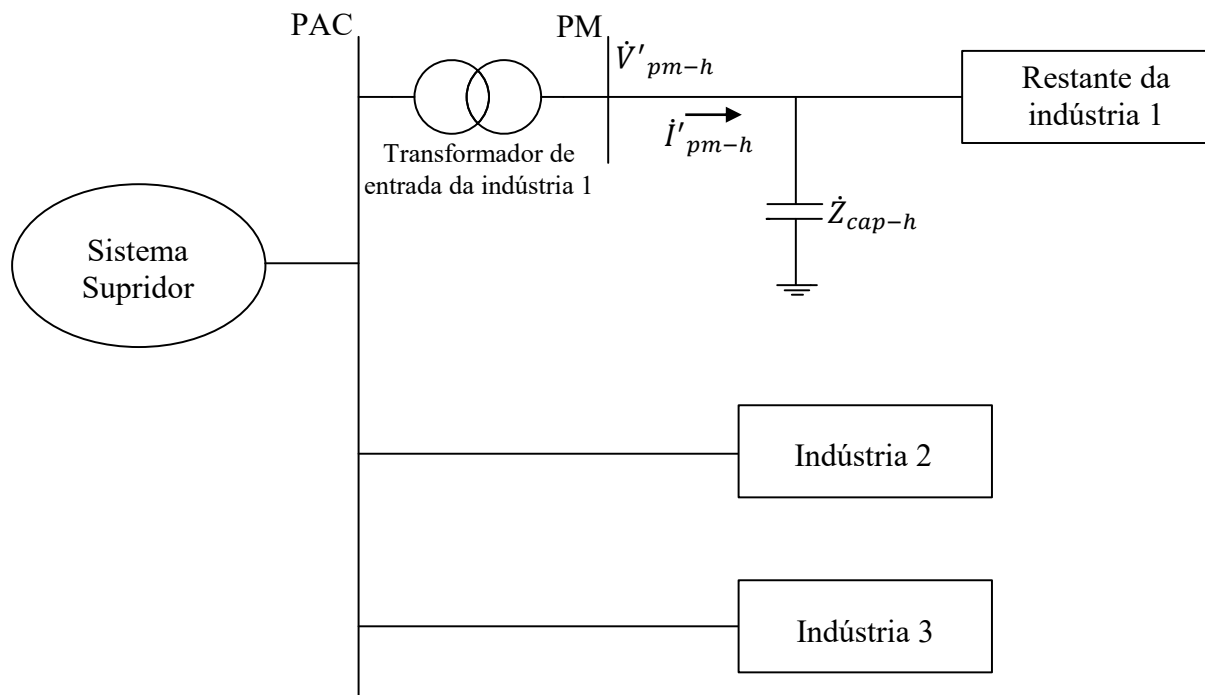
Os desenvolvimentos feitos até este ponto permitem obter as grandezas \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} , por meio das equações (5.19) e (5.26), respectivamente. Como almejado, tais equações estão em função da impedância do transformador (\dot{Z}_{t-h}), da impedância do capacitor chaveado (\dot{Z}_{cap-h}), e das tensões e correntes mensurados no PM nas duas condições operativas: \dot{V}_{pm-h} , \dot{V}'_{pm-h} , \dot{I}_{pm-h} , \dot{I}'_{pm-h} .

Para concluir o procedimento EMCC e encontrar o compartilhamento de responsabilidades no PAC, sugere-se que sejam feitas as projeções de \dot{I}_{s-h} sobre $(\dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h})$ e \dot{I}_{c-h} sobre $(\dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h})$ para obter os percentuais de responsabilidades, respectivamente, do supridor e consumidor. A Figura 5.3, na seção 5.2.2, detalha este processo.

5.6 Avaliação de desempenho da EMCC via simulações computacionais

Para a avaliação computacional da EMCC é utilizado o sistema elétrico descrito no Apêndice B. A aplicação da referida metodologia envolve medições no secundário dos transformadores de entrada das indústrias em duas condições diferentes, sendo que os dados relacionados à primeira situação, indicativa da ausência de capacitores conectados ao PM, são encontrados a partir da análise da Tabela B.11 do Apêndice B. Também as impedâncias harmônicas dos transformadores são descritas na Tabela B.10 do referido apêndice.

Quanto à segunda condição operativa, seguindo a terminologia definida no arranjo simplificado da Figura 5.10, a Figura 5.11 ilustra a conexão de um banco de capacitores no PM da indústria 1. Procedimento semelhante foi também realizado para as análises das demais instalações industriais.

Figura 5.11 – Esquema representativo da aplicação da EMCC para o compartilhamento da indústria 1.**Fonte: Autoria própria.**

O capacitor utilizado em todas as análises retratadas nesta seção apresenta potência de 450 kVar. As impedâncias harmônicas do elemento chaveado, informações estas necessárias para a aplicação da EMCC, são evidenciadas na Tabela 5.13. Nessa tabela as impedâncias encontram-se referidas para a tensão de 440 V.

Tabela 5.13 – Impedâncias harmônicas do capacitor chaveado – simulações EMCC.

h	$\dot{Z}_{cap-h} (\Omega)$
5	$0,0860 \angle -90^\circ$
7	$0,0615 \angle -90^\circ$
11	$0,0391 \angle -90^\circ$
13	$0,0331 \angle -90^\circ$

Fonte: Autoria própria.

São apresentadas na Tabela 5.14 as grandezas referentes a tensões e correntes harmônicas no PM, obtidas por simulação, após a conexão do banco de capacitores no secundário dos transformadores de entrada das indústrias 1, 2 e 3. Observa-se que a nomenclatura usada na tabela está em total acordo com a Figura 5.11. Apesar de a tabela condensar informações sobre diferentes partes do circuito, ressalta-se que as simulações referentes aos estudos de cada indústria foram feitas individualmente, uma por vez.

Tabela 5.14 – Grandezas obtidas para a análise da condição 2 – simulações EMCC.

Grandeza	h	Indústria 1	Indústria 2	Indústria 3
\dot{V}'_{pm-h} (V)	5	18,72 \angle 87,19°	12,85 \angle 69,92°	13,76 \angle 71,69°
	7	9,51 \angle 122,2°	7,06 \angle 108,1°	7,95 \angle 107,6°
	11	8,15 \angle -125,1°	5,75 \angle -149,4°	6,31 \angle -156,9°
	13	8,55 \angle -104,9°	7,39 \angle -111,5°	7,68 \angle -120,8°
\dot{I}'_{pm-h} (V)	5	977,5 \angle -172,5°	372,8 \angle 142,0°	445,0 \angle 151,0°
	7	349,6 \angle -140,9°	170,4 \angle -163,5°	228,0 \angle -163,4°
	11	210,7 \angle -27,08°	152,9 \angle -68,52°	179,9 \angle -76,35°
	13	187,7 \angle -12,11°	185,9 \angle -28,18°	201,9 \angle -37,74°

Fonte: Autoria própria.

Com atenção à metodologia descrita na seção 5.5 e lançando mão das informações expostas até aqui, é possível obter os percentuais de responsabilidades cabidos às indústrias 1, 2 e 3 pela EMCC, como indicam Tabela 5.15, Tabela 5.16 e Tabela 5.17, respectivamente.

Tabela 5.15 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – simulações EMCC.

h	Gabarito (%)	Resultado EMCC (%)	Erro absoluto
5	54,04	52,10	1,94
7	48,83	47,47	1,36
11	44,61	48,47	3,86
13	49,63	56,07	6,44

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5.16 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 2 – simulações EMCC.

h	Gabarito (%)	Resultado EMCC (%)	Erro absoluto
5	20,92	24,02	3,10
7	22,76	25,06	2,30
11	26,34	24,35	1,99
13	24,44	22,20	2,24

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5.17 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 3 – simulações EMCC.

h	Gabarito (%)	Resultado EMCC (%)	Erro absoluto
5	25,02	28,46	3,44
7	28,45	31,00	2,55
11	29,06	26,48	2,58
13	25,81	23,38	2,43

Fonte: Autoria própria.

Os resultados apresentados indicam desempenho acertado da EMCC. O erro absoluto máximo constatado é de 6,44 unidades percentuais para a análise de $h = 13$ na indústria 1. Além do mais, o percentil 95 dos erros absolutos, dentre todas as simulações realizadas, é igual a 5,02 unidades percentuais.

Desta forma, pode-se dizer que este estudo de caso computacional evidenciou a confiabilidade da EMCC como alternativa para realização do compartilhamento de responsabilidades harmônicas.

5.7 Avaliação de desempenho da EMCC via ensaios laboratoriais

A presente seção possui a intenção de testar o procedimento da EMCC no complexo laboratorial descrito no Apêndice C. A indústria 1 foi a parte do sistema elétrico escolhida para protagonizar esta investigação. Sobre a condição de operação 1, caracterizada pela ausência da conexão de capacitores no PM, pode-se consultar na Tabela C.8 as informações referentes a tensões e correntes harmônicas mensuradas no secundário do transformador de entrada da indústria analisada. Já as impedâncias harmônicas do transformador usado nos ensaios são descritas na Tabela C.7

Assim como realizado durante as avaliações do MCC, para conseguir a condição operativa 2 foi utilizado um capacitor de 100 μF , o que representa uma potência reativa igual a 1,82 kVAr na tensão de 220 V. As impedâncias harmônicas deste capacitor (\dot{Z}_{cap-h}) foram mostradas na Tabela 5.7.

Procedendo, então, à conexão do capacitor no secundário do transformador de entrada da indústria 1, de acordo com o esquema mostrado na Figura 5.11, é possível mensurar as grandezas características da condição de operação 2. As medições presentes na Tabela 5.18, seguindo o mesmo padrão adotado em todo o trabalho, representam a média de cinco medições consecutivas, realizadas de cinco em cinco segundos.

Tabela 5.18 – Grandezas mensuradas na análise da condição 2 da indústria 1 – ensaios EMCC.

h	\dot{V}'_{pm-h} (V)	\dot{I}'_{pm-h} (A)
5	5,29 \angle -32,94°	0,90 \angle 68,09°
7	1,59 \angle -45,27°	0,31 \angle 55,74°
11	0,62 \angle 140,01°	0,17 \angle -122,46°
13	0,39 \angle 146,25°	0,12 \angle -115,56°

Fonte: Autoria própria.

Com todas as informações necessárias em mãos, o procedimento da EMCC foi aplicado para obtenção dos percentuais de responsabilidades cabidos à indústria 1, sobre os harmônicos totais presentes no PAC. Os resultados encontrados, bem como os erros absolutos com relação aos valores de referência, são mostrados na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 – Resultados obtidos para o compartilhamento da indústria 1 – ensaios EMCC.

<i>h</i>	Gabarito (%)	Resultado EMCC (%)	Erro absoluto
5	39,94	31,20	8,74
7	40,73	36,85	3,88
11	43,81	48,50	4,69
13	45,31	50,70	5,39

Fonte: Autoria própria.

O erro absoluto máximo constatado na aplicação da EMCC em laboratório foi de 8,74 unidades percentuais, e o percentil 95 dos erros assumiu valor de 8,24 unidades percentuais. Os resultados são motivadores, visto que na configuração ensaiada os capacitores apresentam elevada potência e foram inseridos no mesmo barramento em que a carga não linear da indústria está conectada. Evidentemente, isto ocasiona alterações nas características de operação do sistema como um todo, e os valores fornecidos pela EMCC confirmam que a metodologia é eficiente e robusta.

6 ANÁLISES E CONSIDERAÇÕES COMPLEMENTARES SOBRE AS METODOLOGIAS PARA COMPARTILHAMENTO HARMÔNICO

6.1 Considerações iniciais

Em um primeiro momento, o presente capítulo tem o intuito de sintetizar as metodologias apresentadas ao longo desta tese de doutorado, com o intuito de contribuir para a síntese e melhor organização dos conceitos básicos associados à aplicação de cada procedimento. Também, é desenvolvida uma investigação crítica comparativa dos resultados advindos dos testes de desempenho computacionais e laboratoriais comentados nos capítulos anteriores.

Em seguida, são feitas considerações complementares sobre aspectos fundamentais que inspiram atenção quando se pensa na aplicação prática dos métodos de compartilhamento de responsabilidades harmônicas em sistemas reais.

Do exposto, conclui-se que o presente capítulo visa fornecer uma avaliação geral sobre as metodologias tratadas neste trabalho, de maneira a buscar o levantamento de potencialidades e necessidades de estudos adicionais sobre aspectos associados à implementação sistematizada das mesmas.

6.2 Sumarização das metodologias apresentadas

A seguir é feito um resumo sintetizador sobre as metodologias trabalhadas nesta tese. Nesse contexto, são apresentados: os equivalentes monofásicos caracterizadores da aplicação dos procedimentos, as grandezas que devem ser conhecidas ou mensuradas, e as formulações para obter \dot{I}_{S-h} e \dot{I}_{C-h} em cada caso, que são as correntes harmônicas, de ordem h , representativas das distorções oriundas da parte do supridor e do consumidor, respectivamente.

Seguindo a terminologia usada ao longo do trabalho, PAC representa o ponto de interesse ao compartilhamento, enquanto PM indica o ponto de medição, para os casos em que as

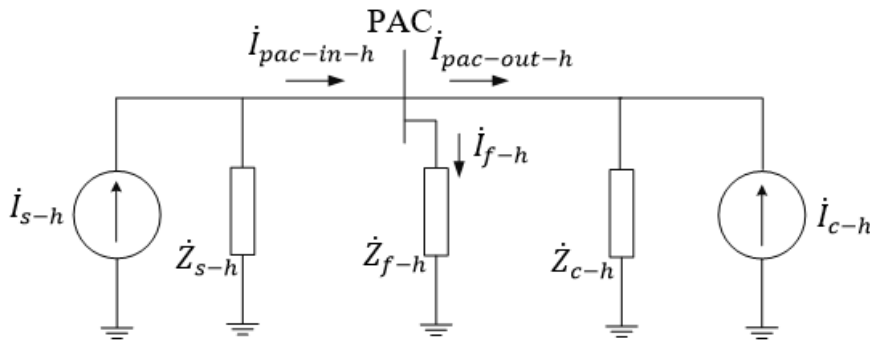
medições não acontecem na mesma barra em que se deseja obter a atribuição de responsabilidades harmônicas.

Para todas as metodologias, após a obtenção das grandezas \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} , foi sugerido o mesmo procedimento para se chegar aos percentuais de compartilhamento propriamente ditos. Neste sentido, a Figura 6.1 apresenta as projeções de \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} sobre $(\dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h})$.

Como ressaltado em momentos anteriores, chamar os agentes envolvidos no processo de compartilhamento de supridor e consumidor foi uma escolha feita com o objetivo de estabelecer um padrão de nomenclatura no trabalho. É importante ter em mente que as metodologias podem ser aplicadas para a realização de compartilhamento de responsabilidades entre concessionária e um consumidor, entre a rede elétrica e uma unidade de geração a partir de fontes renováveis (como parques eólicos e usinas fotovoltaicas), ou entre quaisquer outras duas partes ligadas a uma determinada barra comum.

- **Método da Impedância Dominante (MID):**

A aplicação do MID é caracterizada pelo circuito equivalente:



É preciso mensurar no PAC:

$\dot{I}_{pac-in-h}$: corrente que flui pelo PAC à montante da impedância dominante, com sentido do supridor para o PAC;

$\dot{I}_{pac-out-h}$: corrente que flui pelo PAC à jusante da impedância dominante, com sentido do PAC para o consumidor.

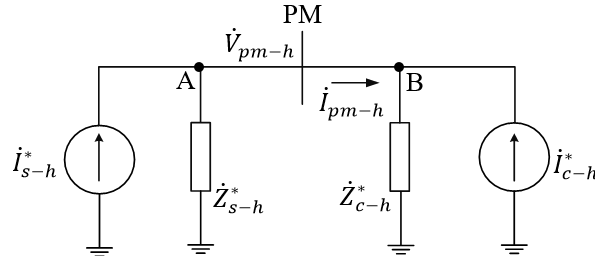
Em acordo com a filosofia do MID, para obter o compartilhamento harmônico no PAC:

$$\begin{aligned}\dot{I}_{s-h} &= \dot{I}_{pac-in-h} \\ \dot{I}_{c-h} &= -\dot{I}_{pac-out-h}\end{aligned}$$

- **Extrapolação pelo Método da Impedância Dominante (EMID):**

A aplicação da EMID requer a existência de duas condições de operação:

Condição de operação 1:

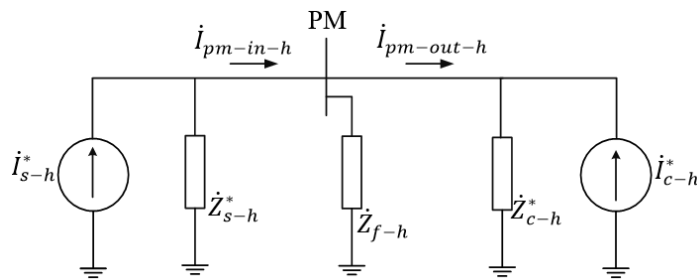


É preciso mensurar no PM na condição 1:

\dot{V}_{pm-h} : tensão no PM, antes da conexão da impedância dominante;

\dot{I}_{pm-h} : corrente que flui pelo PM, antes da conexão da impedância dominante, com sentido do PM para o consumidor.

Condição de operação 2:



É preciso mensurar no PM na condição 2:

$\dot{I}_{pm-in-h}$: corrente que flui pelo PM à montante da impedância dominante, com sentido do sistema supridor para o PM;

$\dot{I}_{pm-out-h}$: corrente que flui pelo PM à jusante da impedância dominante, com sentido do PM para o consumidor.

Além das medições, é preciso conhecer:

\dot{Z}_{t-h} : impedância harmônica do transformador existente entre o PM e o PAC.

Em acordo com a filosofia da EMID, para obter o compartilhamento harmônico no PAC:

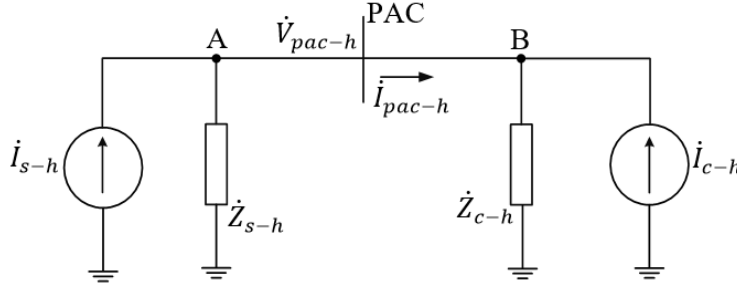
$$\dot{I}_{s-h} = \frac{\dot{V}_{pm-h} \cdot \dot{I}_{pm-in-h}}{\dot{V}_{pm-h} - \dot{Z}_{t-h} \cdot (\dot{I}_{pm-in-h} - \dot{I}_{pm-h})}$$

$$\dot{I}_{c-h} = \frac{-\dot{V}_{pm-h} \cdot \dot{I}_{pm-out-h}}{\dot{V}_{pm-h} + \dot{Z}_{t-h} \cdot (\dot{I}_{pm-h} - \dot{I}_{pm-out-h})}$$

- **Método da Injeção de Corrente Harmônica (MIC):**

A aplicação do MIC requer a existência de duas condições de operação:

Condição de operação 1:

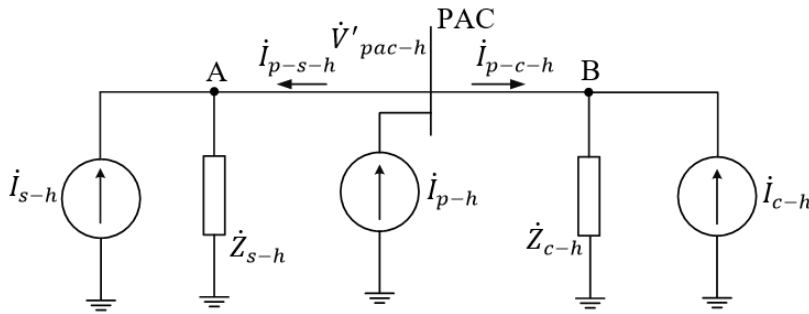


É preciso mensurar no PAC na condição 1:

\dot{V}_{pac-h} : tensão no PAC, antes da injeção de correntes harmônicas;

\dot{I}_{pac-h} : corrente que flui pelo PAC, antes da injeção de correntes harmônicas, com sentido do PAC para o consumidor.

Condição de operação 2:



É preciso mensurar no PAC na condição 2:

\dot{V}'_{pac-h} : tensão no PAC, após a injeção de correntes harmônicas;

\dot{I}_{p-s-h} : corrente que flui pelo PAC à montante da injeção de corrente, com sentido do PAC para o sistema supridor;

\dot{I}_{p-c-h} : corrente que flui pelo PAC à jusante da injeção de corrente, com sentido do PAC para o consumidor.

Em acordo com a filosofia do MIC, para obter o compartilhamento harmônico no PAC:

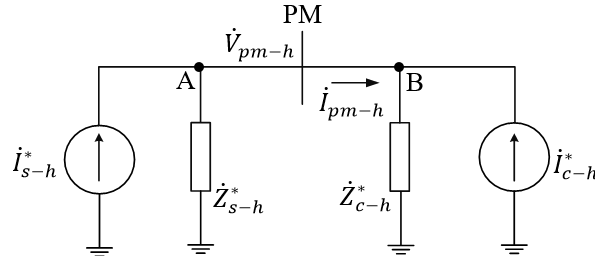
$$\dot{I}_{s-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h} \cdot \dot{I}_{p-s-h} + \dot{V}'_{pac-h} \cdot \dot{I}_{pac-h}}{\dot{V}'_{pac-h} - \dot{V}_{pac-h}}$$

$$\dot{I}_{c-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h} \cdot \dot{I}_{p-c-h} - \dot{V}'_{pac-h} \cdot \dot{I}_{pac-h}}{\dot{V}'_{pac-h} - \dot{V}_{pac-h}}$$

- **Extrapolação pelo Método da Injeção de Corrente Harmônica (EMIC):**

A aplicação da EMIC requer a existência de duas condições de operação:

Condição de operação 1:

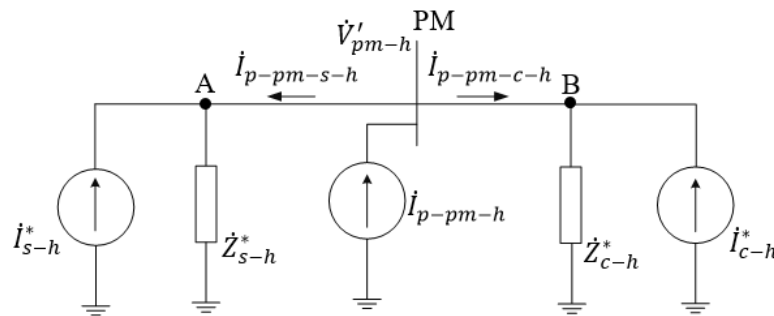


É preciso mensurar no PM na condição 1:

\dot{V}_{pm-h} : tensão no PM, antes da conexão da injeção de correntes harmônicas;

i_{pm-h} : corrente que flui pelo PM, antes da injeção de correntes harmônicas, com sentido do PM para o consumidor.

Condição de operação 2:



É preciso mensurar no PM na condição 2:

\dot{V}'_{pm-h} : tensão no PM, após a injeção de correntes harmônicas;

$i_{p-pm-s-h}$: corrente que flui pelo PM à montante da injeção de correntes, com sentido do PM para o sistema supridor;

$i_{p-pm-c-h}$: corrente que flui pelo PM à jusante da injeção de correntes, com sentido do PM para o consumidor.

Além das medições, é preciso conhecer:

\dot{Z}_{t-h} : impedância harmônica do transformador existente entre o PM e o PAC.

Em acordo com a filosofia da EMIC, para obter o compartilhamento harmônico no PAC:

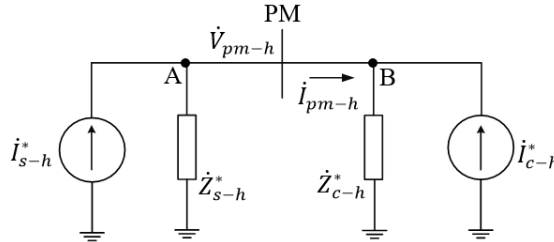
$$i_{s-h} = \frac{\dot{V}'_{pm-h} \cdot i_{pm-h} + \dot{V}_{pm-h} \cdot i_{p-pm-s-h}}{\dot{V}'_{pm-h} - \dot{V}_{pm-h} - \dot{Z}_{t-h} \cdot (i_{p-pm-s-h} + i_{pm-h})}$$

$$i_{c-h} = \frac{\dot{V}'_{pm-h} \cdot i_{pm-h} - \dot{V}_{pm-h} \cdot i_{p-pm-c-h}}{\dot{V}_{pm-h} - \dot{V}'_{pm-h} + \dot{Z}_{t-h} \cdot (i_{pm-h} - i_{p-pm-c-h})}$$

- **Extrapolação do Compartilhamento pelo Método da Injeção de Corrente Harmônica com Monitoramento de Carga (EMIC-MC):**

A aplicação da EMIC-MC requer a existência de duas condições de operação:

Condição de operação 1:

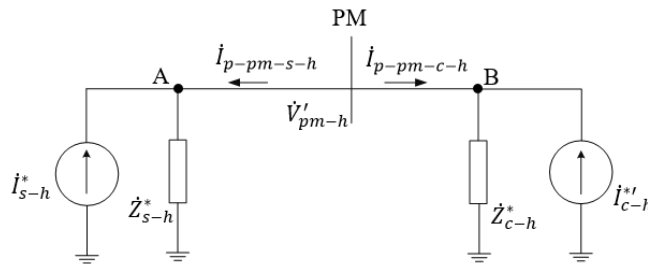


É preciso mensurar no PM na condição 1:

\dot{V}_{pm-h} : tensão no PM, na condição de operação 1;

\dot{I}_{pm-h} : corrente que flui pelo PM, na condição de operação 1, com sentido do PM para o consumidor.

Condição de operação 2:



É preciso mensurar no PM na condição 2:

\dot{V}'_{pm-h} : tensão no PM, na condição de operação 2;

$\dot{I}_{p-pm-s-h}$: corrente que flui pelo PM, com sentido do PM para o sistema supridor;

$\dot{I}_{p-pm-c-h}$: corrente que flui pelo PM, com sentido do PM para o consumidor;

\dot{I}_{c-h}' : corrente harmônica injetada pela carga não linear do consumidor na condição de operação 2.

Além das medições, é preciso conhecer:

\dot{Z}_{t-h} : impedância harmônica do transformador existente entre o PM e o PAC.

Em acordo com a filosofia da EMIC-MC, para obter o compartilhamento harmônico no PAC:

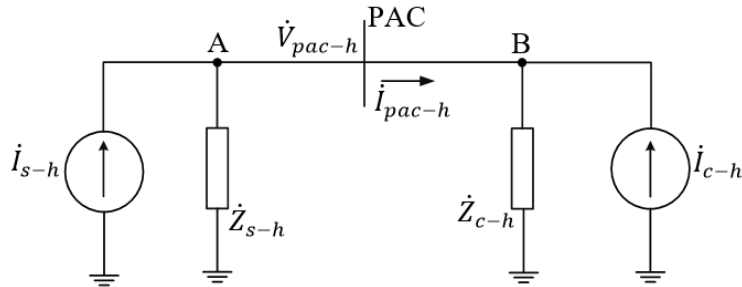
$$\dot{I}_{s-h} = \frac{\dot{V}'_{pm-h} \cdot \dot{I}_{pm-h} + \dot{V}_{pm-h} \cdot \dot{I}_{p-pm-s-h}}{\dot{V}'_{pm-h} - \dot{V}_{pm-h} - \dot{Z}_{t-h} \cdot (\dot{I}_{p-pm-s-h} + \dot{I}_{pm-h})}$$

$$\dot{I}_{c-h} = \frac{\dot{V}'_{pm-h} \cdot \dot{I}_{c-h}'}{\dot{Z}_{t-h} \cdot (\dot{I}_{c-h}' + \dot{I}_{p-pm-c-h}) + \dot{V}'_{pm-h}}$$

- **Método do Chaveamento de Capacitores (MCC):**

A aplicação do MCC requer a existência de duas condições de operação:

Condição de operação 1:

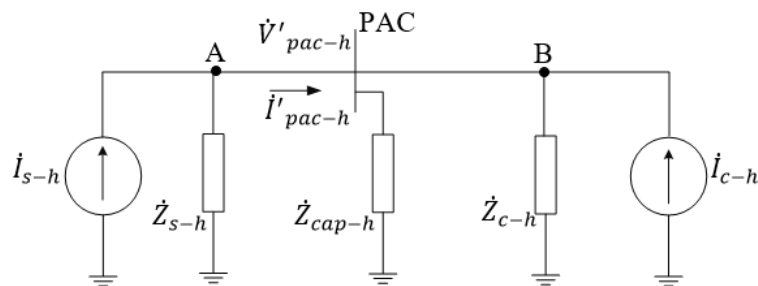


É preciso mensurar no PAC na condição 1:

\dot{V}_{pac-h} : tensão no PAC, antes da conexão do capacitor;

\dot{I}_{pac-h} : corrente que flui pelo PAC, antes da conexão do capacitor, com sentido do PAC para o consumidor.

Condição de operação 2:



É preciso mensurar no PAC na condição 2:

\dot{V}'_{pac-h} : tensão no PAC, após a conexão do capacitor;

\dot{I}'_{pac-h} : corrente que flui pelo PAC, à montante do capacitor, com sentido do PAC para o consumidor.

Além das medições, é preciso conhecer:

\dot{Z}_{cap-h} : impedância harmônica do capacitor conectado no PAC.

Em acordo com a filosofia do MCC, para obter o compartilhamento harmônico no PAC:

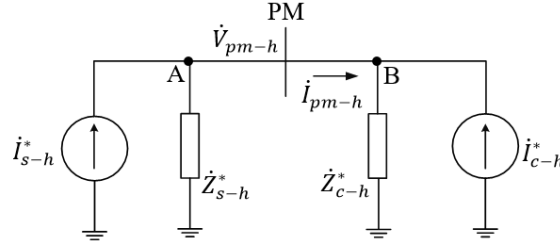
$$\dot{I}_{s-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h} \cdot \dot{I}_{pac-h} - \dot{V}_{pac-h} \cdot \dot{I}'_{pac-h}}{\dot{V}'_{pac-h} - \dot{V}_{pac-h}}$$

$$\dot{I}_{c-h} = \frac{\dot{Z}_{cap-h} \cdot (\dot{V}_{pac-h} \cdot \dot{I}'_{pac-h} - \dot{V}'_{pac-h} \cdot \dot{I}_{pac-h}) - (\dot{V}_{pac-h} \cdot \dot{V}'_{pac-h})}{\dot{Z}_{cap-h} \cdot (\dot{V}'_{pac-h} - \dot{V}_{pac-h})}$$

- **Extrapolação pelo Método do Chaveamento de Capacitores (EMCC):**

A aplicação da EMCC requer a existência de duas condições de operação:

Condição de operação 1:

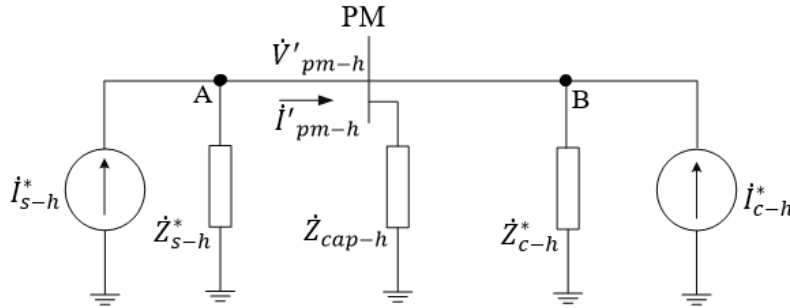


É preciso mensurar no PM na condição 1:

\dot{V}_{pm-h} : tensão no PM, antes da conexão do capacitor;

\dot{I}_{pm-h} : corrente que flui pelo PM, antes da conexão do capacitor, com sentido do PM para o consumidor.

Condição de operação 2:



É preciso mensurar no PM na condição 2:

\dot{V}'_{pm-h} : tensão no PM, após a conexão do capacitor;

\dot{I}'_{pm-h} : corrente que flui pelo PM, à montante do capacitor, com sentido do PM para o consumidor.

Além das medições, é preciso conhecer:

\dot{Z}_{t-h} : impedância harmônica do transformador existente entre o PM e o PAC.

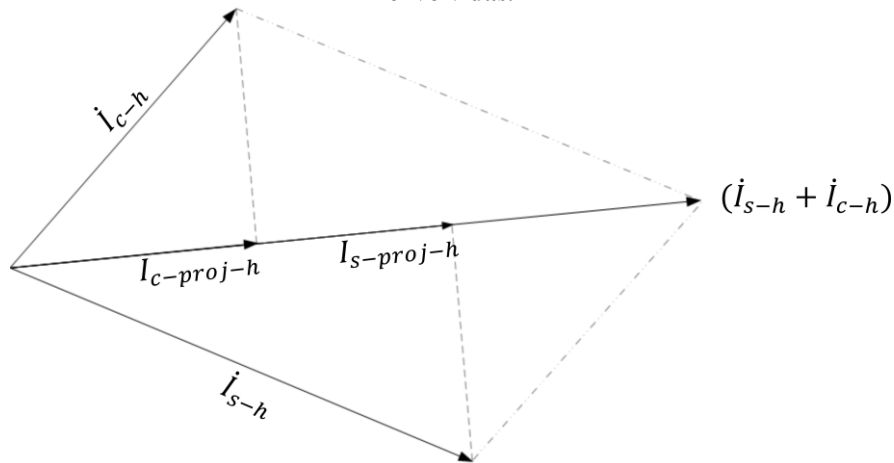
\dot{Z}_{cap-h} : impedância harmônica do capacitor conectado no PM.

Em acordo com a filosofia da EMCC, para obter o compartilhamento harmônico no PAC:

$$\dot{I}_{s-h} = \frac{\dot{V}'_{pm-h} \cdot \dot{I}_{pm-h} - \dot{V}_{pm-h} \cdot \dot{I}'_{pm-h}}{\dot{V}'_{pm-h} - \dot{V}_{pm-h} - \dot{Z}_{t-h} \cdot (\dot{I}_{pm-h} - \dot{I}'_{pm-h})}$$

$$\dot{I}_{c-h} = \frac{\dot{Z}_{cap-h} \cdot (\dot{V}'_{pm-h} \cdot \dot{I}_{pm-h} - \dot{V}_{pm-h} \cdot \dot{I}'_{pm-h}) + \dot{V}_{pm-h} \cdot \dot{V}'_{pm-h}}{\dot{Z}_{cap-h} \cdot (\dot{V}_{pm-h} - \dot{V}'_{pm-h}) + \dot{Z}_{t-h} \cdot [\dot{V}'_{pm-h} + \dot{Z}_{cap-h} \cdot (\dot{I}_{pm-h} - \dot{I}'_{pm-h})]}$$

Figura 6.1 – Projeção de fasores para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas.



Fonte: Autoria própria.

Como descrito ao longo do trabalho $I_{s-proj-h}$ indica um número escalar que define a parcela de responsabilidade do sistema supridor, enquanto $I_{c-proj-h}$ está diretamente relacionado à parcela de responsabilidade do consumidor.

6.3 Análise comparativa de desempenho

Esta seção apresenta a intenção de realizar uma análise comparativa entre os resultados obtidos nas avaliações de desempenho descritas nos capítulos anteriores, considerando a aplicação das metodologias para compartilhamento: MID, EMID, MIC, EMIC, EMIC-MC, MCC e EMCC. As discussões abrangem as investigações feitas nos níveis computacional e laboratorial, as quais foram efetuadas com base nos sistemas elétricos apresentados nos Apêndices B e C, respectivamente.

Para favorecer as análises pretendidas, a Tabela 6.1 e a Tabela 6.2 mostram os erros absolutos máximos e os valores de percentil 95 dos erros encontrados durante a aplicação dos procedimentos, considerando os resultados obtidos para todas as ordens harmônicas estudadas. Nesse cenário, a Tabela 6.1 faz referência às simulações computacionais, enquanto a Tabela 6.2 diz respeito aos ensaios práticos feitos em laboratório.

Tabela 6.1 – Síntese dos erros obtidos durante a avaliação computacional dos métodos.

Método	Erro absoluto máximo	Percentil 95 dos erros absolutos
MID (caso II, PD > 0,9)	5,41	3,85
EMID	6,25	5,80
MIC	1,79	1,57
EMIC	2,58	2,46
EMIC-MC	3,32	3,16
MCC	3,69	2,34
EMCC	6,44	5,02

Fonte: Autoria própria.**Tabela 6.2 – Síntese dos erros obtidos durante a avaliação laboratorial dos métodos.**

Método	Erro absoluto máximo	Percentil 95 dos erros absolutos
MID	7,49	6,58
EMID	10,18	9,73
MIC	8,81	5,94
EMIC	6,32	5,44
EMIC-MC	7,05	6,87
MCC	7,69	7,44
EMCC	8,74	8,24

Fonte: Autoria própria.

A partir da apreciação cuidadosa dos resultados evidenciados na Tabela 6.1 e na Tabela 6.2, as seguintes conclusões podem ser formuladas:

- De forma geral, pode-se dizer que as tabelas corroboram o bom desempenho de todos os métodos para compartilhamento de responsabilidades harmônicas em foco nesta tese. O erro absoluto máximo constatado foi 6,44 unidades percentuais durante as simulações computacionais, e 10,18 durante os ensaios laboratoriais. Já em termos do percentil 95, nota-se o máximo de 5,80 unidades percentuais nas simulações computacionais, e 9,73 nos ensaios;
- Para todas as metodologias é correto dizer que os erros encontrados durante os testes práticos foram mais expressivos do que aqueles constatados nas simulações. Isso já era esperado devido às dificuldades próprias do ambiente laboratorial, relatadas ao longo do trabalho, dentre as quais podem ser citadas: a necessidade de realizar medições em distintos pontos do sistema com a disponibilidade de apenas um medidor, as imprecisões relacionadas ao levantamento de dados necessários para se conseguir valores confiáveis para o gabarito do compartilhamento de responsabilidades, as imprecisões nas medições de tensões e correntes harmônicas relativamente baixas, principalmente nas frequências mais elevadas, entre outros fatores;

- As maiores diferenças entre os níveis de erros obtidos em simulações e em ensaios foram observadas para os métodos baseados em injeção de correntes: MIC e EMIC. Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato de as simulações terem adotado um dispositivo específico para a injeção de correntes harmônicas, o qual foi representado por uma fonte que não alterava em nada o funcionamento do sistema elétrico em termos de frequência fundamental. Por outro lado, dada a inexistência de um equipamento deste tipo em laboratório, para injetar correntes harmônicas foi usado um retificador, que por si só representava uma nova carga responsável por alterar, em certa medida, a estrutura de operação do sistema. Os erros encontrados nesse caso, embora um pouco maiores do que os provenientes das simulações, são animadores ao evidenciar a robustez da metodologia mesmo diante de um arranjo rudimentar para injeção de correntes harmônicas;
- Seguindo este raciocínio, pode-se afirmar que as simulações computacionais realizadas para avaliação das metodologias baseadas na injeção de correntes harmônicas foram as que apresentaram os menores desvios com relação aos valores de referência esperados. Isto ocorre porque nas demais filosofias, a inserção no sistema de impedâncias dominantes ou capacitores ocasionam certas modificações nos moldes de funcionamento do circuito também em frequência fundamental, principalmente em termos do fluxo de potência reativa do sistema. Tal fato pode ocasionar alterações no perfil de distorções geradas pelas cargas não lineares.
- Na forma como os complexos elétricos simulado e laboratorial foram estruturados, as cargas não lineares de todas as indústrias foram representadas por retificadores de elevada potência, ligados em pontos elétricos muito próximos aos barramentos em que as técnicas de compartilhamento foram aplicadas. Assim, o comportamento destes elementos ficou bastante susceptível às alterações feitas na rede. Esse fato foi ainda mais incisivo para as técnicas de extrapolação, uma vez que envolveram intervenções no secundário dos transformadores de entrada dos equivalentes das indústrias. Fica, então, explicado o porquê de os maiores distanciamentos do gabarito terem sido constatados para a EMID e a EMCC, tanto nas simulações quanto nos ensaios;

- Com base no exposto, espera-se que as metodologias para compartilhamento baseadas na inserção de impedâncias dominantes e capacitores apresentem respostas ainda mais exatas em configurações caracterizadas pela presença de diversas cargas não lineares distribuídas pela instalação, e com perfil de distorção não tão diretamente dependente das alterações feitas no barramento onde acontecem as intervenções;
- Finalmente, pode-se concluir que o fato de os resultados de compartilhamento de responsabilidades harmônicas terem sido consistentes e promissores, mesmo diante da configuração desafiadora imposta nos sistemas usados para avaliação de desempenho, deixa claro que as metodologias propostas são coerentes, robustas e eficientes.

6.4 Considerações complementares acerca da aplicação das metodologias em sistemas reais

Nesta seção há a intenção pontuar aspectos que são fundamentais para garantir o emprego seguro das metodologias para compartilhamento, sobretudo quando se pensa na aplicação delas em sistemas elétricos reais. Como destacado no início deste trabalho, o foco da tese é, essencialmente, contribuir com a exposição de filosofias fisicamente consistentes para se chegar ao compartilhamento de responsabilidades, bem como a realização de testes iniciais que ratifiquem a pertinência delas. Contudo, é evidente que o assunto tema do trabalho não fica aqui esgotado, uma vez que diversas questões ainda são merecedoras de atenção e investigações. Na sequência esses aspectos são levantados e brevemente discutidos.

6.4.1 Quanto à sensibilidade dos procedimentos frente às intervenções realizadas

As metodologias em foco na tese envolvem algum tipo de intervenção no sistema elétrico, seja a inserção de uma impedância dominante (capítulo 3), a injeção de correntes harmônicas (capítulo 4), ou o chaveamento de capacitores (capítulo 5). Logo, é natural pensar que a ordem de grandeza das intervenções realizadas ou, em outras palavras, as características dos equipamentos usados podem alterar o desempenho das respostas do compartilhamento.

Quanto ao Método da Impedância Dominante, uma vez que ele foi originalmente concebido em (60), a função do presente trabalho foi justamente contribuir para a consolidação de sua aplicação em termos práticos. Nesse sentido, considera-se que tenham sido aqui solucionadas as incertezas antes existentes com relação ao tipo de configuração adequada e quanto ao teor de dominância necessário para garantir o bom desempenho do processo. Os estudos realizados na seção 3.3, em complemento com o Apêndice A, estabeleceram a necessidade de se utilizar filtros passivos sintonizados em uma frequência, projetados de maneira a proporcionar parâmetros de dominância (PD) adequados aos fins pretendidos.

Já os métodos relacionados à injeção de correntes harmônicas e chaveamento de capacitores são proposições inéditas, e as atenções foram destinadas mais especificamente à apresentação das filosofias propriamente ditas. No que tange à injeção de correntes, nas simulações computacionais foram considerados valores de injeção bastante reduzidos, de no máximo 1% das correntes harmônicas originalmente presentes nos pontos de interesse. Já nos ensaios práticos foram injetadas correntes mais expressivas, as quais tinham magnitudes próximas às correntes harmônicas que fluíam nos pontos de interesse. Essa escolha feita devido às dificuldades associadas à medição de correntes de magnitudes pequenas com o instrumento presente no laboratório. Os resultados do compartilhamento foram favoráveis em ambas as situações analisadas.

Com relação ao chaveamento de capacitores, para evitar impactos significativos na operação dos sistemas em análise, parece ser recomendável a comutação de elementos de baixa potência com relação à ordem de grandeza do sistema, sendo necessárias apenas mudanças bem perceptíveis pelos equipamentos de medição, entre as duas condições operativas consideradas. Este procedimento é adotado nos estudos de caso apresentados nas simulações computacionais. Entretanto, como discutido nos testes laboratoriais, o chaveamento de capacitores de potência relevante também forneceu resultados positivos. É importante dizer que nenhuma avaliação de desempenho desenvolvida na tese considerou a ocorrência de ressonâncias.

Em linhas gerais, apesar de as constatações iniciais advindas das análises feitas nos capítulos 4 e 5 serem animadoras, considera-se necessário ainda elaborar um estudo mais detalhado e abrangente, levando em consideração também os métodos de extrapolação do compartilhamento.

Assim como feito para o MID com o desenvolvimento do PD, para os métodos que envolvem injeção de correntes e chaveamento de capacitores é preciso procurar meios de

relacionar de maneira efetiva o desempenho das respostas de atribuição de responsabilidades com as características da intervenção realizada.

6.4.2 Quanto à realização de estudos de suportabilidade dos equipamentos utilizados no processo de compartilhamento

Ressalta-se, neste ponto, uma atenção especial que deve ser conferida aos procedimentos que envolvem a conexão de filtros harmônicos e capacitores em sistemas elétricos: a suportabilidade dos equipamentos. De fato, caso os limites de suportabilidade sejam ultrapassados, os componentes podem sofrer sérios danos, anulando a eficiência dos procedimentos almejados. Exceder os limites de corrente, por exemplo, pode provocar aquecimento excessivo, o que leva à redução de vida útil, enquanto que sobretensões podem trazer efeitos como o rompimento de isolamentos.

A verificação da suportabilidade no projeto de filtros shunt pode ser feita levando em consideração apenas o capacitor do filtro, que é o componente exposto às condições mais hostis quando da presença de grandezas harmônicas no sistema (136). Dessa forma, ao assegurar que os testes de suportabilidade do capacitor são atendidos, garante-se também que os demais componentes do filtro operam de forma segura.

Considera-se que para garantir a aplicação segura e eficaz do MID, MCC e seus derivados é necessário que sejam satisfeitas as recomendações da norma *IEEE Standard for Shunt Power Capacitors* (140). Tal documento define limites máximos de grandezas elétricas suportáveis por capacitores, como corrente eficaz, corrente de pico, tensão eficaz, tensão de pico e potência reativa média.

6.4.3 Quanto à determinação das impedâncias harmônicas de transformadores

Nos procedimentos destinados à extrapolação do compartilhamento (EMID, EMIC, EMIC-MC e EMCC) é preciso conhecer a impedância harmônica existente entre o ponto onde as medições acontecem e o ponto onde se deseja conhecer a atribuição de responsabilidades. Via de regra, considera-se que o compartilhamento precisa ser obtido no PAC, enquanto as intervenções acontecem no secundário do transformador de entrada de uma unidade consumidora.

Para proceder à aplicação dos métodos é condição necessária saber a impedância harmônica do transformador, a qual foi nomeada ao longo do trabalho de \dot{Z}_{t-h} . Nas avaliações de desempenho computacionais foram usados modelos simples de transformadores e suas impedâncias foram obtidas a partir do próprio *software* de simulação. Já nos ensaios laboratoriais descritos na tese, como ressaltado no Apêndice C, os valores de \dot{Z}_{t-h} foram obtidos a partir de ensaios (141).

Quando se pensa no levantamento de impedâncias de transformadores, são bem conhecidas e consolidadas as técnicas de ensaios à vazio e em curto-circuito para a definição das resistências e indutâncias características do equipamento em frequência fundamental. No entanto, para alcançar maior exatidão nos processos que dependem das impedâncias de frequências múltiplas da fundamental, uma série de aspectos podem ser levados em consideração.

Neste cenário é relevante ressaltar a influência do efeito pelicular, a interferência dos esquemas de ligação do primário e secundário do transformador na propagação de determinadas frequências harmônicas, além da presença de capacitâncias entre bobinas e capacitâncias entre as bobinas e a carcaça do equipamento.

Do exposto, ressalta-se que o objetivo desta seção é estabelecer a necessidade de realização de estudos e ensaios específicos para se encontrar as impedâncias harmônicas de determinado transformador, dada a considerável quantidade de fatores que podem exercer influência sobre tais parâmetros. Ainda, ressalta-se que não foram estudados casos em que o transformador estivesse saturado e, certamente, esse é um tópico que também merece análises adicionais.

6.4.4 Quanto à aplicação das metodologias em sistemas caracterizados por forte dinâmica

Com exceção do MID, todos os outros procedimentos descritos neste trabalho: EMID, MIC, EMIC, EMIC-MC, MCC e EMCC envolvem a filosofia de mudança de estado, ou seja, requerem medições em duas condições de operação distintas. Estas duas condições precisam diferir entre si unicamente pela intervenção relacionada ao processo de compartilhamento aplicado: inserção de impedância dominante, injeção de correntes harmônicas ou chaveamento de capacitores. As demais características de funcionamento do complexo elétrico devem sempre ser mantidas as mesmas.

Por esse motivo, nos desenvolvimentos descritos no capítulos anteriores, as impedâncias harmônicas do supridor e consumidor (\dot{Z}_{s-h} e \dot{Z}_{c-h}) e as correntes representativas das distorções oriundas das duas partes (\dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h}) são consideradas inalteradas nas situações operacionais 1 e 2.

Embora se acredite que essa aproximação seja adequada para um grande número de situações, é legítimo se preocupar com o desempenho das metodologias que envolvem mudanças de estados em sistemas caracterizados pela presença de forte dinamicidade. Sem dúvidas, são necessários estudos investigativos detalhados para elucidar esta questão e estabelecer caminhos para transpor essas eventuais dificuldades.

A partir de uma percepção principiante, conjectura-se que em sistemas dinâmicos os métodos de compartilhamento precisam ser aplicados sucessivas vezes. A cada aplicação, as medições associadas às duas condições operacionais devem acontecer dentro de um curto período de tempo, de modo a evitar mudanças grandes nos moldes de funcionamento das partes envolvidas. Um tratamento estatístico das respostas dadas pelas repetidas aplicações do processo permitirá, desta forma, a obtenção do comportamento do compartilhamento de responsabilidades harmônicas no ponto de estudo ao longo do tempo, e não em um único momento específico.

Neste contexto, fica evidente a necessidade de se estabelecer um protocolo bem definido para a aplicação dos procedimentos de atribuição de responsabilidades. Este tema é discutido na seção seguinte.

6.4.5 Quanto ao desenvolvimento de protocolo para realização do compartilhamento harmônico

Como detalhado no capítulo 2, não são encontrados na literatura documentos normativos que contemplem orientações sobre procedimentos ou protocolos de medição, quando se pensa na realização do compartilhamento de responsabilidades sobre distorções harmônicas.

Para transcender esta lacuna, este trabalho procurou contribuir com o estabelecimento de diferentes metodologias com bases físicas sólidas e consistentes. Contudo, apesar de a concepção dos métodos em si representar um primeiro passo de importância imprescindível, reconhece-se que ainda se fazem necessárias definições de caráter complementar para que os

procedimentos possam ser, de fato, aplicados de maneira sistematizada em sistemas elétricos reais.

Neste contexto, sobre os aspectos que carecem do estabelecimento de definições podem ser citados: o gerenciamento das três fases do sistema elétrico no processo de compartilhamento, o período de duração da campanha de medições, a regularidade com em que os métodos serão aplicados, os tipos de instrumentos de medição que devem ser utilizados, onde e como os medidores precisam ser conectados, os intervalos de integralização dos valores constatados, o tratamento estatístico pelo qual os resultados devem passar, dentre outros fatores de ordem prática.

Fica, pois, claro que esse campo de pesquisa possui várias facetas que demandam atenção, novas proposições e testes para a consolidação de meios funcionais e sistematizados para a obtenção do compartilhamento de responsabilidades em sistemas elétricos reais, a partir das metodologias propostas neste trabalho.

7 CONCLUSÕES

Este capítulo possui o objetivo de apresentar as conclusões do trabalho e sumarizar as perspectivas futuras de pesquisas relacionadas ao assunto aqui em foco. Dessa forma, na sequência é feita a consolidação dos desenvolvimentos conseguidos em cada capítulo, o que viabiliza a observação de um panorama geral sobre os estudos realizados, bem como as suas contribuições.

O capítulo 1, introdutório, procurou apresentar uma visão atualizada sobre as perspectivas associadas ao fenômeno das distorções harmônicas no contexto da qualidade da energia elétrica. Foco foi dado à contextualização da importância do assunto compartilhamento de responsabilidades diante do cenário abordado. Além disso, o capítulo procurou definir os objetivos, as contribuições e a estrutura organizacional do trabalho.

O estado da arte relacionado à temática da tese foi discutido no capítulo 2. O levantamento bibliográfico realizado objetivou descrever, em linhas gerais, as principais produções existentes na literatura de alguma maneira relevantes para o assunto do compartilhamento de responsabilidades. Neste sentido, foram citados livros, normas, recomendações, dissertações de mestrado, teses de doutorado, artigos publicados em âmbito nacional e em âmbito internacional. O conteúdo deste capítulo é, sem dúvidas, essencial para evidenciar a importância e abrangência do tema, além de elucidar as lacunas que careciam de solução a partir de novas pesquisas científicas.

O capítulo 3 teve como foco de análise o Método da Impedância Dominante (MID). Apesar de a metodologia em si ter sido originalmente publicada em 2011, esta tese apresentou contribuições inéditas que visam, sobretudo, à consolidação da aplicação prática do procedimento. Após um estudo detalhado, mostrado no Apêndice A, sobre possíveis configurações de impedâncias dominantes, ficou estabelecido que apenas filtros passivos sintonizados em uma frequência são capazes de fornecer o grau de dominância necessário para os fins almejados.

Com foco nessa configuração de filtro, realizou-se uma investigação pormenorizada sobre a influência de parâmetros de filtragem, como potência do arranjo, fator de qualidade e dessintonias, no desempenho do MID. Foram executadas simulações de estudos de casos envolvendo diversas condições, análises essas que culminaram na definição do Parâmetro de

Dominância (PD). O PD permite associar, de maneira bastante prática, o grau de dominância da impedância usada com a eficiência das respostas obtidas para o compartilhamento de responsabilidades. Foi demonstrado que o valor teórico máximo que PD pode assumir é 1, e quanto mais próximo ele for da unidade, mais preciso é o processo de compartilhamento. Nos testes feitos ficou claro que valores de PD maiores que 0,90 forneceram erros muito pequenos em todos os casos de simulação averiguados.

Também como proposta inédita do capítulo 3 há a apresentação de um procedimento que permite extrapolar os resultados obtidos para o compartilhamento de responsabilidades, para uma barra diferente de onde foi conectada a impedância dominante. Para empregar este processo, aqui chamado EMID, diferentemente do que ocorre no MID, são necessárias medições em duas condições operativas distintas do sistema elétrico: uma situação sem e outra com a impedância dominante conectada.

Tanto o MID, quanto a EMID foram testados por meio de simulações no *software* Matlab / Simulink[®] e em ensaios laboratoriais, levando em consideração os sistemas elétricos descritos nos Apêndices B e C, respectivamente. Os arranjos computacional e prático apresentam estrutura de organização parecida, sendo constituídos pelo equivalente de um supridor que fornece tensão perfeitamente senoidal para três indústrias compostas por cargas lineares e não lineares. Para encontrar os valores de referência, ou gabarito, do compartilhamento de responsabilidades harmônicas, lançou-se mão do clássico Método da Superposição em ambos os casos.

O MID foi aplicado em locais estratégicos do PAC, com o objetivo de obter os percentuais de responsabilidade da concessionária e de cada uma das três indústrias. Já para o estudo da EMID, as impedâncias dominantes foram conectadas ao secundário dos transformadores de entrada das unidades industriais, com o intuito de se chegar ao compartilhamento no PAC.

Para o MID, o máximo erro observado foi de 5,41 unidades percentuais nas simulações que tiveram PD maior que 0,9, enquanto nos ensaios práticos 7,49 unidades percentuais foi o máximo erro absoluto constatado. Já com relação à aplicação da EMID, 6,25 e 10,18 unidades percentuais foram os maiores erros constatados para as avaliações computacionais e práticas, respectivamente.

O capítulo 4 deste trabalho apresentou uma proposta inédita para a realização do compartilhamento de responsabilidades a partir de injeção de correntes harmônicas (MIC). A ideia de injetar correntes e realizar medições em um determinado ponto e, em seguida,

extrapolar o compartilhamento para outro barramento foi desenvolvida na técnica denominada como EMIC. Ainda neste capítulo foi retratada uma segunda possibilidade para a realização da extrapolação, a EMIC-MC. Tal procedimento é possível de ser realizado em unidades consumidoras que apresentam em sua configuração uma expressiva carga não linear, a qual é responsável por praticamente a totalidade das distorções harmônicas geradas na instalação. Assim sendo, a EMIC-MC utiliza as medições de distorções oriundas da própria carga não linear da configuração, não sendo necessário qualquer tipo de dispositivo externo para realizar a injeção. Para aplicação dos três métodos descritos neste capítulo são necessárias medições em duas condições distintas de operação do complexo elétrico estudado.

Resultados satisfatórios foram encontrados para a avaliação de desempenho das metodologias que envolvem a filosofia de injeção de correntes, considerando os mesmos sistemas testes usados nos estudos anteriores do MID e EMID. Os erros absolutos máximos obtidos a partir da aplicação do MIC, EMIC e EMIC-MC foram respectivamente iguais a 1,79, 2,58 e 3,32 unidades percentuais nas simulações computacionais, e 8,81, 6,32 e 7,05 unidades percentuais nos ensaios laboratoriais.

O capítulo 5, por sua vez, traz uma técnica que se compromete a realizar o compartilhamento harmônico a partir do chaveamento de unidades capacitivas. Com o chaveamento são obtidas duas situações operativas diferentes, as quais permitem alcançar o objetivo almejado. Mais uma vez, foram desenvolvidos os procedimentos para realizar o compartilhamento tanto a partir da inserção do capacitor no próprio PAC (MCC), como também considerando a conexão do capacitor em barra distinta do ponto de interesse (EMCC).

As análises de desempenho seguiram, essencialmente, a mesma sistemática dos estudos feitos nos capítulos anteriores. Dentre todos os casos de compartilhamento testados, o MCC ofereceu erro absoluto máximo de 3,69 unidades percentuais em simulações e 7,69 unidades percentuais em experimentos laboratoriais. Já quando da aplicação da EMCC, o maior erro absoluto constatado computacionalmente foi de 6,44 unidades percentuais, e 8,74 unidades percentuais nos ensaios práticos.

No capítulo 6 há uma discussão detalhada acerca da comparação de desempenho das metodologias. Foram levantados os aspectos que explicam o fato de as filosofias de compartilhamento de responsabilidades apresentarem, entre si, diferenças de eficiência. Além disso, discorreu-se sobre os motivos de os experimentos práticos sempre fornecerem níveis de erros maiores do que os constatados a partir das simulações. De maneira geral, é correto afirmar que os testes de avaliação realizados levaram em consideração cenários particularmente

desafiadores e, mesmo assim, bons resultados foram alcançados em todos os casos. Esse fato confirma, de maneira segura, a eficiência das propostas.

O capítulo 6 ainda apresenta um compêndio sintetizador sobre todos os procedimentos tratados no trabalho, em termos de circuitos equivalentes, grandezas que precisam ser conhecidas ou mensuradas, e formulações que conduzem à atribuição de responsabilidades em cada caso. Foram destacados, ainda, pontos que despertam especial atenção ao se considerar o emprego dos procedimentos em sistemas reais.

Vale reafirmar que os desenvolvimentos feitos ao longo dos capítulos 3, 4 e 5 concentraram atenções no compartilhamento entre sistema supridor e uma unidade consumidora. Apesar disso, foi mencionado que todas as técnicas apresentadas podem ser aplicadas a outros casos que requerem a divisão de responsabilidades, entre duas partes, pelas distorções contatadas em um ponto de interesse. Como exemplo de outra possibilidade pode ser citado o compartilhamento entre rede elétrica e determinada unidade de geração não linear, como usinas eólicas ou fotovoltaicas.

Em resumo, pode-se dizer que os avanços conseguidos com o presente trabalho para o tema em análise são importantes em diversos sentidos. Primeiramente são estabelecidas bases consistentes que permitem a obtenção do compartilhamento de responsabilidades a partir da utilização de um arranjo de filtragem passiva, pelo MID, e também por um dispositivo de filtragem ativa, pelo MIC. Uma terceira filosofia permite, ainda, utilizar o chaveamento de um componente passivo e linear como um capacitor, pelo MCC, para se chegar aos objetivos desejados.

A possibilidade de obter o compartilhamento de responsabilidades em um ponto, a partir de ações realizadas em outro barramento do sistema elétrico também é contribuição relevante e inédita desta tese. Assim, as propostas aqui nomeadas como EMID, EMIC, EMIC-MC e EMCC podem receber especial atenção em termos de vantagens operacionais, práticas e financeiras.

Reconhece-se que apesar de este trabalho apresentar desenvolvimentos inovadores e importantes, o tema aqui em foco não foi esgotado, devido à complexidade do mesmo. Como discutido na seção 6.4 do capítulo 6, diversas questões ainda carecem de investigações detalhadas quando se pensa na efetivação da aplicação dos procedimentos voltados ao compartilhamento de responsabilidades harmônicas em sistemas reais.

Nesse sentido, os seguintes pontos podem ser elencados como merecedores de pesquisas futuras:

- O estabelecimento da relação entre a eficiência dos procedimentos e o tamanho das intervenções realizadas, para os métodos que envolvem injeção de correntes e chaveamento de capacitores;
- A aplicabilidade, em sistemas dinâmicos, das metodologias que envolvem mudança controlada de estado;
- O desenvolvimento de um protocolo para a realização do compartilhamento harmônico;
- Os cuidados gerais com requisitos de projeto para assegurar a aplicação segura dos procedimentos, no que diz respeito à suportabilidade dos equipamentos usados;
- A própria definição e parametrização de um dispositivo específico para injeção de correntes harmônicas, com vistas à aplicação dos métodos MIC e EMIC;
- A determinação precisa das impedâncias harmônicas de transformadores, para uso das metodologias de extrapolação do compartilhamento;
- A execução da aplicação, propriamente dita, das metodologias propostas em sistemas elétricos reais e realização de testes conclusivos sobre o desempenho delas.

Uma análise principiante sobre todos os trabalhos de avaliação de desempenho realizados ao longo desta tese revela que os menores desvios, com relação aos valores esperados, foram obtidos a partir da aplicação do MIC, quando se considera a utilização de um dispositivo específico para a injeção controlada de correntes harmônicas. No entanto, como discutido anteriormente, todas as metodologias propostas apresentaram resultados favoravelmente próximos do gabarito. Ao levar em conta aspectos relacionados à aplicação dos procedimentos em campo, buscando o melhor consenso entre confiabilidade e praticidade, parece ser verdade que os processos que envolvem chaveamento de capacitores merecem realce. Eles podem fornecer percentuais de responsabilidade harmônica de forma eficaz e, especialmente, sem demandar grande mobilização de infraestrutura.

Por fim, mesmo que ainda seja necessário o estabelecimento de diretrizes bem definidas para a aplicação sistematizada, em complexos elétricos reais, da atribuição de responsabilidades sobre distorções harmônicas, considera-se que a presente tese de doutorado contribui de forma

relevante nos avanços científicos relacionados ao tema. Foram feitas propostas com fundamentação física consistente e notadamente eficazes, as quais apresentam o potencial de servirem como cerne de sustentação para a resolução da problemática relacionada ao compartilhamento harmônico.

REFERÊNCIAS

1 ACORDO de Paris. **Site do Ministério do Meio Ambiente**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>>. Acesso em: 16 Janeiro 2019.

2 BOLETIM Mensal de Geração Solar Fotovoltaica - Maio/2019. **Acervo Digital do site do ONS**. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/boletins-da-operacao>>. Acesso em: 17 Julho 2019.

3 BOLETIM Mensal de Geração Eólica - Maio/2019. **Acervo digital do site do ONS**. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/boletins-da-operacao>>. Acesso em: 17 Julho 2019.

4 MAPA Geoelétrico - Rede de Operação - Brasil - Horizonte 2023. **Mapas do site do ONS**. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>>. Acesso em: 16 Janeiro 2019.

5 SANTOS, I. N.; SANTOS, A. C. Uma forma de onda cada vez mais distorcida. **O Setor Elétrico**, Espaço SBQEE, Online, Novembro 2018.

6 GERAÇÃO Distribuída - Informações Compiladas e Mapa. **Site da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)**. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiaZjM4NmM0OWYtN2IwZS00YjViLTl1MjItN2E5MzBkN2ZlMzVklwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>>. Acesso em: 18 Outubro 2019.

7 ARRILAGA, J.; WATSON, N. R. **Power System Harmonics**. 2ª. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2004.

8 SANTOS, I. N. et al. Compartilhamento de Responsabilidades sobre Distorções Harmônicas: Estado da Arte, Premissas e Desafios. **Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica**, Curitiba, 2017.

9 DAS, J. C. **Power System Harmonics and Passive Filter Designs**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118887059>.

10 ZOBAA, A. F.; ALEEM, S. H. E. A. **Power Quality in Future Electrical Power Systems**. Institution of Engineering and Technology: IET Digital Library, 2017. doi: <https://doi.org/10.1049/PBPO092E>.

- 11 BUDAK, A. **Circuit Theory Fundamentals and Applications**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1978.
- 12 KIMBARK, E. W. **Direct Current Transmission**. New York: John Wiley & Sons, 1971.
- 13 SINGH, B.; CHANDRA, A.; K, A.-H. **Power quality: Problems and Mitigation Techniques**. Chichester: John Wiley & Sons, 2014. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118922064>.
- 14 AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; M, A. **Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119307181>.
- 15 IEC 61000-3-6. **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems**. IEC (International Electrotechnical Commission). 2008.
- 16 IEEE 519. **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). 2014.
- 17 IEC 61000-3-2. **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)**. IEC (International Electrotechnical Commission). 2009.
- 18 IEC 61000-3-4. **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-4: Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A**. IEC (International Electrotechnical Commission). 1998.
- 19 IEC 61000-3-12. **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-12: Limits - Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current >16 A and ≤ 75 A per phase**. IEC (International Electrotechnical Commission). 2011.
- 20 BARBOSA, M. Análise Comparativa entre as normas IEEE e IEC. **Eletricidade Moderna**, São Paulo, n. 478, p. 68-75, Janeiro 2014.
- 21 UFU / FAU. **Relatório Técnico - Revisão Bibliográfica**, Consultoria para suporte à regulamentação dos fenômenos relacionados à qualidade do produto nas redes de distribuição de energia elétrica, p. 107, 2014. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota%20T%C3%A9cnica

ca_0105_SRD-Anexo%20I%20_Relat%C3%B3rio_1_FINAL.pdf>. Acesso em: 18 Janeiro 2019.

22 EN 50160. **Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, European Committee for Electrotechnical Standardization.** CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization). 2010.

23 NRS 048. **South African Power Quality Standard.** NER (National Electricity Regulator). 2003.

24 AS/NZS 61000-3-6. **Australian/New Zealand Standard.** Joint Technical Committee EL-034. 2001.

25 MÓDULO 8 PRODIST. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional.** Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). 2018.

26 SUBMÓDULO 2.8. **Procedimentos de Rede - Gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia elétrica da Rede Básica.** Operador Nacional do Sistema (ONS). 2017.

27 SUBMÓDULO 3.6. **Procedimentos de Rede - Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão.** Operador Nacional do Sistema (ONS). 2017.

28 NT 009/2016. **Nota Técnica - Instruções para realização de estudos e medições de QEE relacionados aos acessos à rede básica ou nos barramentos de fronteira com a rede básica para parques eólicos, solares, consumidores livres e distribuidoras.** Operador Nacional do Sistema (ONS). 2018.

29 CIGRÉ TECHNICAL BROCHURE 468. **Review of Disturbance Emission Assessment Techniques.** CIGRE/CIRED Working Group C4.109. 2011.

30 CRISTALDI, L.; FERRERO, A. Harmonic Power Flow Analysis for the Measurement of the Electric Power Quality. **IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement**, v. 44, n. 3, 1995. doi: <https://doi.org/10.1109/19.387308>.

31 TANAKA, T.; AKAGI, H. A New Method of Harmonic Power Detection Based on the Instantaneous Active Power in Three-phase Circuits. **IEEE Trans. on Power Delivery**, v. 10, n. 4, 1995. doi: <https://doi.org/10.1109/61.473386>.

32 SWART, P. H.; VAN WYK, J. D.; CASE, M. J. On techniques for localization of sources producing distortion in three-phase networks. **European Transactions on Electrical Power**, v. 6, n. 6, 1996. doi: <https://doi.org/10.1002/etep.4450060605>.

33 LEIRIA, A.; MARCHED, A.; BARROS, M. T. C. Identification of Harmonic Content and their Origin in Power Networks. **IEEE Nolgna PowerTech Conference**, Bologna, 2003.

- 34 XU, W.; LIU, X.; LIU, Y. An Investigation on the Validity of Power-Direction Method for Harmonic Source Determination. **IEEE Trans. on Power Delivery**, v. 18, n. 1, p. 214-219, 2003. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2002.803842>.
- 35 AZOUAOU, R.; RABAHALLAH, S.; LEULMI, S. Study of the Direction of the Harmonic Injections in the Electrical Power Systems. **Universities Power Engineering Conference**, Bristol, 2004.
- 36 LIN, W. M. et al. Multiple Harmonic Source Detection and Equipment Identification With Cascade Correlation Network. **IEEE Trans. on Power Delivery**, v. 20, n. 3, 2005. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.843462>.
- 37 SANTOS, I. N.; OLIVEIRA, J. C.; SILVA, S. F. P. Critical Evaluation of the Performance of the Method of Harmonic Power Flow to Determine the Dominant Source of Distortion. **IEEE Latin America Transaction**, v. 9, n. 5, 2011. doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2011.6030984>.
- 38 SANTOS, I. N.; OLIVEIRA, J. C.; SILVA, S. F. P. Avaliação do Método do Fluxo de Potência Harmônica para a Identificação da Fonte de Distorção Dominante. **Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica**, Cuiabá, 2011.
- 39 SANTOS, I. N.; OLIVEIRA, J. C.; SILVA, S. F. P. Critical Analysis of the Harmonic Power Flow Method to Determine the Dominant Distortion Source. **Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência**, Natal, 2011. doi: <https://doi.org/10.1109/COBEP.2011.6085195>.
- 40 SRINIVASAN, K. On Separating Customer and Supply Side Harmonic Contributions. **IEEE Tans. on Power Delivery**, v. 11, n. 2, 1996. doi: <https://doi.org/10.1109/61.489362>.
- 41 SRINIVASAN, K.; JUTRAS, R. Conforming and Non-Conforming Current for Attributing Steady State Power Quality Problems. **IEEE Tans. on Power Delivery**, v. 13, n. 1, 1998. doi: <https://doi.org/10.1109/61.660880>.
- 42 IPPOLITO, M. G.; MORAN, G.; RUSSO, F. Contribution to Solve the Problem of Attributing Harmonic Distortion Responsibility. **18th International Conference on Electricity Distribution**, Turin, 2005. doi: <https://doi.org/10.1049/cp:20051026>.
- 43 SANTOS, A. C. et al. Avaliação do Método da Corrente Conforme e Não-Conforme para Compartilhamento de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, Foz do Iguaçu, 2014.

44 XU, W.; LIU, Y. A method to determine customer harmonic contributions for incentive-based harmonic control applications. **Panel on Harmonic Measurements and Allocation**, Edmonton, p. 361-366, 1999.

45 XU, W.; LIU, Y. A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 15, n. 2, p. 804-811, Abril 2000. doi: <https://doi.org/10.1109/61.853023>.

46 SILVA, S. F. P. **Uma Proposta para o Compartilhamento das Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia-MG. 2007.

47 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 Systems Research**, v. 78, n. 11, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.04.003>.

48 COSTA, F. H. et al. A Case Study of Sharing the Harmonic Voltage Distortion Responsibility between the Utility and the Consumer. **International Conference on Renewable Energies and Power Quality**, Valencia, 2009. doi: <https://doi.org/10.24084/repqj07.327>.

49 SILVA, S. F. P.; OLIVEIRA, J. C. Uma Proposta de Sistematização da Atribuição de Responsabilidade sobre Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência. **Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica**, Belém, 2005.

50 SILVA, S. F. P.; OLIVEIRA, J. C. Uma Contribuição à Questão do Compartilhamento da Responsabilidade sobre as Distorções Harmônicas em Sistemas Elétricos. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, Campina Grande, 2006.

51 SILVA, S. F. P.; OLIVEIRA, J. C. Avaliação de Desempenho de Metodologia para a Definição das Parcelas de Responsabilidade entre Supridor e Consumidor sobre as Distorções Harmônicas em Sistemas Elétricos. **Conferência Brasileira de Qualidade da Energia Elétrica**, Santos, 2007.

52 SILVA, S. F. P.; OLIVEIRA, J. C.; SANTOS, I. N. Uma Proposta de Separação das Parcelas de Responsabilidades entre Consumidor e Concessionária na Questão das Distorções Harmônicas. **Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Rio de Janeiro, 2007.

53 SILVA, S. F. P. et al. Metodologia para a Atribuição de Responsabilidades sobre Distorções Harmônicas: Análise de um Caso Real. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, Belo Horizonte, 2008.

54 SANTOS, I. N.; OLIVEIRA, J. C. Análise da Metodologia da Superposição para Atribuição de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas via Sobreposições de Correntes e Tensões. **International Conference on Industry Applications**, São Paulo, 2010.

55 SANTOS, I. N.; OLIVEIRA, J. C. Critical Analysis of the Current and Voltage Superposition Approaches at Sharing Harmonic Distortion Responsibility. **IEEE Latin America Transactions**, v. 9, n. 4, 2011. doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2011.5993737>.

56 SANTOS, I. N.; OLIVEIRA, J. C. Avaliação Crítica do Método de Superposição de Correntes com vistas à Atribuição de Responsabilidade sobre as Distorções Harmônicas. **Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica**, Uberlândia, 2010.

57 SANTOS, A. C.; OLIVEIRA, J. C.; SANTOS, I. N. Uma Reflexão sobre o Emprego do Método da Superposição via Tensões ou Correntes para Atribuição de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, Natal, 2016.

58 SANTOS, I. N.; OLIVEIRA, J. C. Análise de Desempenho do Método da Superposição de Correntes para Atribuição de Responsabilidade sobre as Distorções Harmônicas. **Transmission and Distribution Conference IEEE/PES Latin America**, São Paulo, 2010.

59 SANTOS, I. N. et al. Applying the Superposition Procedure for the Harmonic Sharing Responsibility between Renewable Energy Power Plants and the Network. **International Journal of Emerging Electric Power Systems**, v. 15, 2014. doi: <https://doi.org/10.1515/ijeeps-2014-0013>.

60 SANTOS, I. N. **Método da Superposição Modificado como uma Nova Proposta de Atribuição de Responsabilidades sobre Distorções Harmônicas**. 2011. 159 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia-MG. 2011.

61 SANTOS, I. N.; OLIVEIRA, J. C. Avaliação Laboratorial de uma Nova Proposta Metodológica para Atribuição de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas. **9th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission**, Mar del Plata, 2011.

62 SANTOS, I. N.; OLIVEIRA, J. C.; JUNIOR, J. R. M. Modified Superposition Method for Assignment of Responsibilities on Harmonic Distortions. **11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilization**, Lisboa, 2011. doi: <https://doi.org/10.1109/EPQU.2011.6128814>.

63 SANTOS, I. N.; REIS, A.; OLIVEIRA, J. C. Método da Superposição Modificado para Compartilhamento de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas - Estudos no Sistema de 14 Barras do IEEE. **International Conference on Industry Applications**, Fortaleza, 2012. doi: <https://doi.org/10.1590/S0103-17592012000600010>.

64 SANTOS, I. N.; OLIVEIRA, J. C. A Proposal of Methodology for the Assignment of Responsibilities on Harmonic Distortions Using the Superposition Principle. **IEEE Latin America Transactions**, v. 12, n. 8, 2014. doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2014.7014510>.

65 SANTOS, I. N.; OLIVEIRA, J. C. Validação Experimental de Uma Proposta Metodológica para Atribuição de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas. **Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica**, Uberlândia, 2011.

66 SANTOS, I. N.; OLIVEIRA, J. C.; JUNIOR, J. R. M. Uma Proposta de Metodologia para Atribuição de Responsabilidades Sobre as Distorções Harmônicas utilizando o Princípio da Superposição. **Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Florianópolis, 2011.

67 SANTOS, I. N.; REIS, A.; OLIVEIRA, J. C. Estudos Relacionados à Obtenção da Impedância Harmônica Dominante com Vistas à Aplicação do Método da Superposição Modificado. **Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica**, Uberlândia, 2012.

68 SANTOS, I. N.; OLIVEIRA, J. C.; JUNIOR, J. R. M. Método da Superposição Modificado como uma Nova Proposta para Atribuição de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas. **Revista Controle e Automação**, v. 23, n. 6, 2012. doi: <https://doi.org/10.1590/S0103-17592012000600010>.

69 SANTOS, I. N.; REIS, A.; OLIVEIRA, J. C. Avaliação das Estratégias para Obtenção da Impedância Harmônica Dominante com Vistas à Implementação do Método da Superposição Modificado. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, Goiânia, 2012.

70 SANTOS, A. C.; SANTOS, I. N.; OLIVEIRA, J. C. Análise de Desempenho do Método da Superposição Modificado para a Atribuição de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas. **Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica**, Campina Grande, 2015.

71 ANDRADE JR, G. V. **Estimação da Contribuição Harmônica de Tensão em Sistemas Elétricos Trifásicos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande - PB. 2007.

72 GURSOY, E. **Independent Component Analysis for Harmonic Source Identification in Electric Power Systems**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Drexel University. Estados Unidos. 2007.

73 FERNANDES, R. A. S. **Identificação de Fontes de Correntes Harmônicas por Redes Neurais Artificiais**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo. São Carlos - SP. 2009.

74 SOARES, T. M. **Estimação da Contribuição de Múltiplas Fontes Harmônicas utilizando Regressão Não Paramétrica**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Pará. Belém - PA. 2012.

75 MATOS, E. O. **Análise Não Paramétrica para Identificação de Fontes de Distorções Harmônicas em Sistemas de Energia Elétrica: um Estudo Aplicado no Campus Universitário do Guamá da Universidade Federal Do Pará**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Pará. Belém - PA. 2016.

76 PAREDES, H. K. M. **Teoria de Potência Conservativa: uma Nova Abordagem para o Controle Cooperativo de Condicionadores de Energia e Considerações sobre Atribuição de Responsabilidades**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas - SP. 2011.

77 REIS, P. H. F. **Contribuições para o Estudo de Atribuição de Responsabilidades em Circuitos Elétricos de Baixa Tensão**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Bauru - SP. 2015.

78 ANDRADE JR, G. V. et al. Contribuições da Distorção Harmônica de Tensão Entre Concessionária e Consumidor. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, Campina Grande, 2006.

79 REIS, P. H. F. et al. Aplicação da teoria de potência conservativa para atribuição de responsabilidades de circuitos monofásicos em baixa tensão. **Congresso Brasileiro de Automática**, Belo Horizonte, 2014.

80 SANTOS, A. C. et al. Avaliação Crítica do Método do Compartilhamento de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas Baseado na Análise do Espectro de Frequências. **Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica**, Uberlândia, 2014.

81 MANITO, A. R. A. et al. Comparação de Técnicas de Regressão Linear e Rede Neural no Estudo de Estimação da Contribuição de Cargas Não Lineares na Distorção Harmônica de Tensão de um Barramento de Interesse do Sistema Elétrico. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, Natal, 2016.

82 HARTANA, R. K.; RICHARDS, G. G. Harmonic Source Monitoring and Identification Using Neural Networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 5, n. 4, 1990. doi: <https://doi.org/10.1109/59.99358>.

83 MAZUMDAR, J.; HARLEY, R. G.; LAMBERT, F. System and Method for Determining Harmonic Contributions from Non-Linear Loads Using Recurrent Neural Networks. **International Joint Conference on Neural Networks**, 2005. doi: <https://doi.org/10.1109/IECON.2005.1569033>.

84 SRINIVASAN, D.; NG, W. S.; LIEW, A. C. Neural-Network-Based Signature Recognition for Harmonic Source Identification. **IEEE Transactions On Power Delivery**, v. 21, n. 1, 2006. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.852370>.

85 MAZUMDAR, J. et al. Intelligent Tool for Determining the True Harmonic Current Contribution of a Customer in a Power Distribution Network. **IEEE Transactions On Industry Applications**, v. 44, n. 5, 2008. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2008.2002213>.

86 BING-DA, Z.; ZHI-PENG, J. An Identification Method of Load Harmonic Current Based on BP Neural Network. **IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering**, 2012. doi: <https://doi.org/10.1109/CSAE.2012.6272721>.

87 MANITO, A. et al. Evaluating Harmonic Distortions on Grid Voltages Due to Multiple Nonlinear Loads Using Artificial Neural Networks. **Energies**, v. 11, n. 12, 2018. doi: <https://doi.org/10.3390/en11123303>.

88 MA, H.; GIRGIS, A. A. Identification and Tracking of Harmonic Sources in a Power System Using a Kalman Filter. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 11, n. 3, 1996. doi: <https://doi.org/10.1109/61.517531>.

89 YU, K. K. C.; WATSON, N. R.; ARRILAGA, J. An Adaptive Kalman Filter for Dynamic Harmonic State Estimation and Harmonic Injection Tracking. **IEEE Transactions On Power Delivery**, v. 20, n. 2, 2005. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.838643>.

90 ZHAO, Y.; LI, J.; XIA, D. Harmonic source identification and current separation in distribution systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 26, n. 1, 2004. doi: [https://doi.org/10.1016/S0142-0615\(03\)00065-6](https://doi.org/10.1016/S0142-0615(03)00065-6).

91 SHOJAIE, M.; MOKHTARI, H. A Method for Determination of Harmonics Responsibilities at the Point of Common Coupling using Data Correlation Analysis. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 8, n. 1, 2014. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2013.0111>.

92 FEI, Q. I. et al. Research on the Responsibility Partition of Harmonic Pollution and Harmonic Impedance Based on the Total Least-squares Regression Method. **International Conference on Power System Technology**, 2014.

93 DU, Z. P. et al. Identification of Harmonic Sources of Power Systems using State Estimation. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, v. 146, n. 1, 1999. doi: <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19990061>.

94 EISA, A. A.; AZIZ, M. M. A.; YOUSSEF, H. K. M. New Notions Suggested to Power Theory Development Part 2: A concept for sharing the responsibility of harmonics. **IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century**, 2008. doi: <https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596534>.

95 SASDELLI, R.; MUSCAS, C.; PERETTO, L. A VI-Based Measurement System for Sharing the Customer and Supply Responsibility for Harmonic Distortion. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 47, n. 5, 1998. doi: <https://doi.org/10.1109/19.746607>.

96 BERGERON, R.; SLIMANI, K. A Method for the Determination of the Customers Share of the Contribution to the Level of Harmonic Voltage on an Electric Network. **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**, 1999.

97 MOUSTAFA, A. A.; MOUSSA, A. M.; EL-GAMMAL, M. A. Separation of Customer and Supply Harmonics In Electrical Power Distribution Systems. **9th International Conference on Harmonics and Quality of Power**, 2000.

98 BHATTACHARYYA, S. et al. Harmonic Emission Limits and Responsibilities at a Point of Connection. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 6, n. 3, 2012. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2011.0376>.

99 FERNANDEZ, F. M.; CHANDRAMOHANAN NAIR, P. S. Method for Separation of Customer and Utility Contributions of Harmonics at Point of Common Coupling. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 7, n. 4, 2013. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2012.0361>.

100 ABDULLAH, A. R. et al. A New Vector Draft Method for Harmonic Source Detection at Point of Common Coupling. **8th International Power Engineering and Optimization Conference**, 2014. doi: <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2014.6814409>.

101 SANTOS, I. N. **Uma Contribuição à Avaliação de Desempenho dos Principais Métodos para a Atribuição de Responsabilidades Sobre as Distorções Harmônicas**. 2007.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia - MG. 2007.

102 SANTOS, I. N.; OLIVEIRA, J. C.; SILVA, S. F. P. Uma Análise Crítica das Principais Propostas para Atribuição de Responsabilidades na Questão das Distorções Harmônicas. **Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Rio de Janeiro, 2007.

103 SANTOS, A. C.; OLIVEIRA, J. C.; SANTOS, I. N. Análise de Desempenho das Principais Metodologias para o Compartilhamento de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas. **Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Foz do Iguaçu, 2015.

104 BALCI, M. E.; HOCAOGLU, M. H. On the validity of harmonic source detection methods and indices. **14th International Conference on Harmonics and Quality of Power**, 2010. doi: <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2010.5625310>.

105 SANTOS, A. C.; OLIVEIRA, J. C.; SANTOS, I. N. A Comparative Analysis between Methodologies for Responsibility Assignment on Harmonic Distortions. **International Conference on Renewable Energies and Power Quality**, La Coruña, 2015. doi: <https://doi.org/10.24084/repqj13.312>.

106 EMANUEL, A. E. Harmonic Cost Allocation: a Difficult Task. **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**, Edmonton, 1999.

107 PAVAS, A.; STAUDTT, V.; SANCHEZ, G. T. Discussion on Existing Methodologies for the Responsibilities Assignment Problem. **International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation**, Lagow, 2008. doi: <https://doi.org/10.1109/ISNCC.2008.4627491>.

108 PAVAS, A.; STAUDTT, V.; SANCHEZ, G. T. Experimental Investigation of existing Methodologies for the Responsibilities Assignment Problem. **IEEE Bucharest Power Tech Conference**, Bucharest, 2009. doi: <https://doi.org/10.1109/PTC.2009.5281856>.

109 CIESLIK, S. On the Problem of Harmonic Source Detection in Electric Power Networks. **10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering**, Bydgoszcz, 2016. doi: <https://doi.org/10.1109/CPE.2016.7544163>.

110 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. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia - MG. 2009.

111 VARADAN, S.; MAKRAM, E. B. Generalized Load Modeling in the Presence of Harmonics and Distortion. **Twenty-Fifth Southeastern Symposium on System Theory**, 1993.

112 EL ARINI, M. M. M. A Time Domain Load Modeling Technique and Harmonics Analysis. **8th International Conference on Harmonics and Quality of Power**, v. II, 1998.

113 SANTOS, I. N.; COSTA, F. H.; OLIVEIRA, J. C. Avaliação do Desempenho das Metodologias para a Representação de Consumidores Visando o Compartilhamento das Distorções Harmônicas. **Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica**, 2009.

114 COSTA, F. H.; SANTOS, I. N.; OLIVEIRA, J. C. Análise de Desempenho das Principais Estratégias de Modelagem de Cargas para os Estudos do Compartilhamento das Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas. **Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica**, 2009.

115 SANTOS, I. N.; COSTA, F. H.; OLIVEIRA, J. C. Uma Análise Crítica das Estratégias Utilizadas para Caracterização das Impedâncias Harmônicas Equivalentes do Consumidor. **Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, 2009.

116 COSTA, F. H.; SANTOS, I. N.; OLIVEIRA, J. C. Análise de Desempenho das Principais Estratégias de Modelagem de Cargas nos Estudos do Compartilhamento das Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas – Estudo de Caso. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, 2010.

117 SANTOS, A. C. **Uma Contribuição ao Processo do Compartilhamento de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas via Chaveamento de Unidades Capacitivas**. 2015. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia - MG. 2015.

118 OLIVEIRA, A. et al. Practical Approaches for AC System Harmonic Impedance Measurements. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 6, n. 4, 1991. doi: <https://doi.org/10.1109/61.97712>.

119 BRIDGEMAN, M. J.; MORRISON, R. E.; TENAKOON, S. B. Measurement of harmonic impedance on a LV system utilising power capacitor switching and consequent predictions of capacitor induced harmonic distortion. **8th International Conference on Harmonics and Quality of Power**, Athens, 1998.

120 BEATTIE, W. C.; MATTHEWS, S. R. Measurement of harmonic impedance from analysis of transients generated by capacitors. **Proc. IEE 3rd Int. Conf. Advances in Power**

System Control, Operation and Management, Hong Kong, 1995. doi: <https://doi.org/10.1049/cp:19951201>.

121 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. doi: <https://doi.org/10.1109/61.32686>.

122 BALOI, A.; A, P.; MOLNAR-MATEI, F. Contributions on Harmonic Impedance Monitoring in Smart Grids Using Virtual Instruments. **2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies**, 2011. doi: <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2011.6162634>.

123 MOREAU, G. et al. Measurement system for harmonic impedance of the network and validation steps. **Quality and Security of Electric Power Delivery Systems, CIGRE/IEEE PES International Symposium**, p. 69-73, 2003. doi: <https://doi.org/10.1109/QSEPDS.2003.159798>.

124 SUMNER, M. et al. A technique for power supply harmonic impedance estimation using a controlled voltage disturbance. **IEEE Trans. on Power Electron.**, v. 17, n. 2, 2002. doi: <https://doi.org/10.1109/63.988831>.

125 NAGPAL, M.; XU, W.; SAWADA, J. Harmonic impedance measurement using three-phase transients. **IEEE Trans. Power Deliv.**, v. 13, n. 1, p. 272-277, 1998. doi: <https://doi.org/10.1109/61.660889>.

126 MONTEIRO, H. L. M. et al. A real time implementation of an harmonic impedance estimator. **17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)**, 2016. doi: <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2016.7783440>.

127 WANG, W.; NINO, E. E.; XU, W. Harmonic Impedance Measurement Using A Thyristor-Controlled Short Circuit. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 1, n. 5, 2007. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd:20060488>.

128 AREFIFAR, S. A.; XU, W. Online Tracking of Power System Impedance Parameters and Field Experiences. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 24, n. 4, 2009. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2021046>.

129 HUI, J. et al. Assessing Utility Harmonic Impedance Based on the Covariance Characteristic of Random Vectors. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 25, n. 3, 2010. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2046340>.

130 KARIMZADEH, F.; ESMAEILI, S.; HOSSEINIAN, S. H. A Novel Method for Noninvasive Estimation of Utility Harmonic Impedance Based on Complex Independent

Component Analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 30, n. 4, 2015. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2398820>.

131 ZHAO, X.; YANG, H. A New Method to Calculate the Utility Harmonic Impedance Based on FastICA. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 31, n. 1, 2016. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2491644>.

132 ZEBARDAST, A.; MOKHTARI, H. Technique for Online Tracking of a Utility Harmonic Impedance Using by Synchronising the Measured Samples. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 10, n. 5, 2016. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0874>.

133 BOYLESTAD, R. L. **Introdução à Análise de Circuitos**. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012.

134 STANLEY, C. H.; PRICE, J. J.; BREWER, G. L. Design and performance of AC filters for 12 pulse HVDC schemes. **IEE Conf. Publ.**, 1977. 158-161.

135 ALVES, A. C. B. **Análise de Problemas e Procedimentos na Determinação de Filtros Harmônicos**. 1991. 416 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia - MG. 1991.

136 NASCIMENTO, R. 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 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia - MG. 2007.

137 AMETEK Programmable Power. **Site da California Instruments**. Disponível em: http://www.calinst.com/products/CSW/downloads/CSW_User_Manual_M162084-01-RvE.pdf. Acesso em: 03 Janeiro 2019.

138 NEXUS 1500. **Site da Nansen**. Disponível em: <http://www.nansen.com.br/downloads/Nexus1500-Nansen-Catalogo-EN.pdf>. Acesso em: 03 Janeiro 2019.

139 ABNT NBR IEC 61000-4-30. **Compatibilidade eletromagnética Parte 4-30: Técnicas de medição e ensaio - Métodos de medição de qualidade da energia**. ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). 2011.

140 IEEE 18-2012. **IEEE Standard for Shunt Power Capacitors**. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). 2012.

141 NASCIMENTO, R. G. **Estudo para Determinação da Impedância Harmônica em Transformadores de Potência**. 2018. 56p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia - MG. 2018.

APÊNDICES

A ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MID A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE DISTINTOS ARRANJOS DE FILTRAGEM

Este apêndice representa um complemento aos estudos realizados no capítulo 3 e procura traçar aspectos conclusivos sobre a eficiência de diferentes tipos de filtros no processo de aplicação do Método da Impedância Dominante (MID). Para isso, em um primeiro momento são descritos diferentes arranjos de filtragem, no que diz respeito a circuitos característicos, equacionamentos e curvas. Em seguida, as configurações são submetidas a avaliações de desempenho quanto às respostas fornecidas pelo MID, considerando um mesmo sistema elétrico teste. Por fim, são percorridos os aspectos conclusivos finais conseguidos a partir das investigações realizadas.

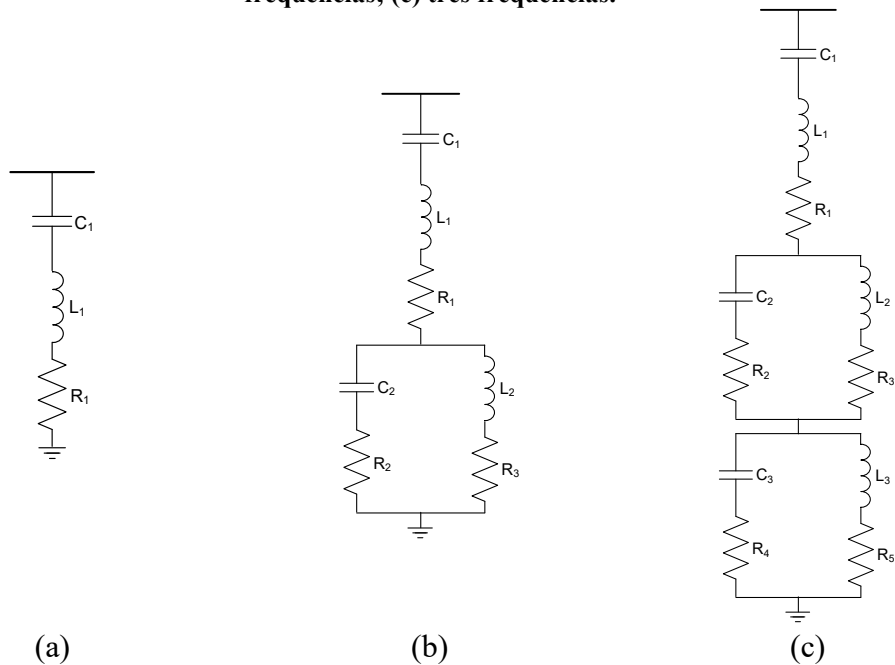
A.1 Tipos de filtros harmônicos passivos

Os filtros harmônicos passivos podem ser classificados basicamente como sintonizados ou amortecidos. Os principais fatores que diferenciam ambos são descritos a seguir (9), (11), (12), (134), (135), (136):

- Filtros passivos sintonizados: são circuitos ressonantes formados por elementos resistivos (R), indutivos (L) e capacitivos (C) em série ou em combinações série/paralela desses componentes. Os elementos L e C são escolhidos de modo que os circuitos apresentem uma, duas ou três frequências de ressonância, nas quais se obtém uma impedância baixa e de caráter essencialmente resistivo;
- Filtros passivos amortecidos: são circuitos formados por elementos R, L e C em diversas combinações. Tais filtros não apresentam uma sintonia de ressonância definida em apenas determinada frequência, mas sim, oferecem uma baixa impedância para uma larga faixa de frequências. Por isso, podem também ser denotados de filtros passa-alta, quando aplicados para elevadas ordens harmônicas.

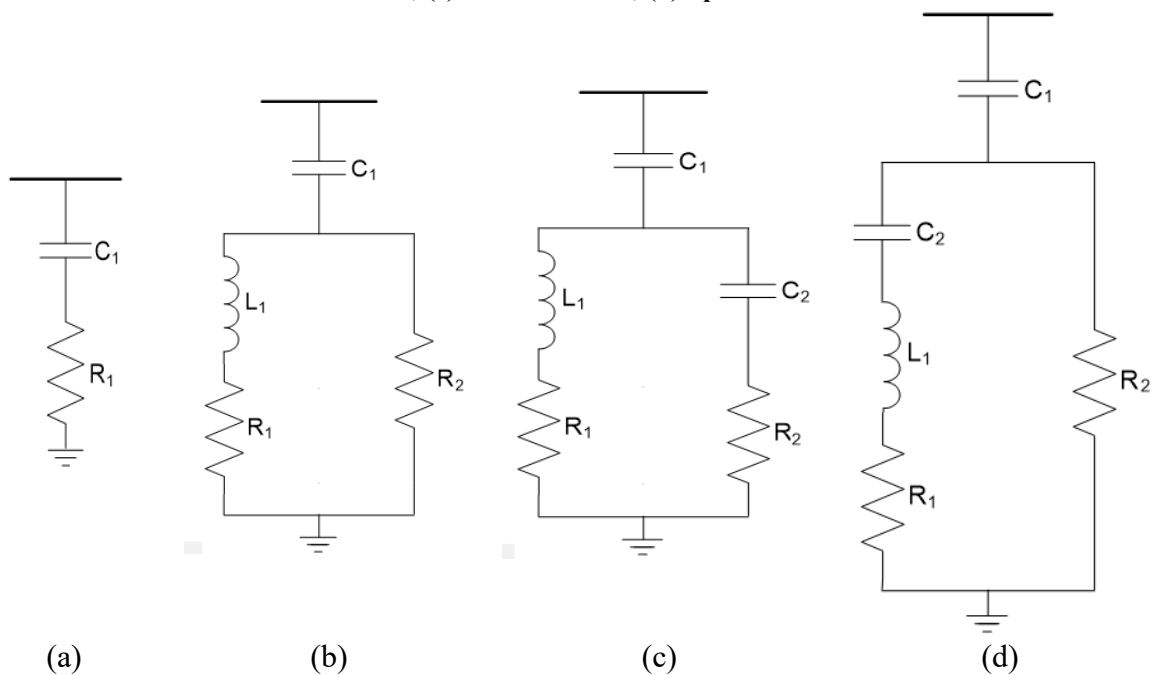
A Figura A.1 e a Figura A.2 apresentam o equivalente monofásico das principais configurações de filtros sintonizados e amortecidos, respectivamente (60).

Figura A.1 – Principais arranjos para filtros passivos sintonizados: (a) uma frequência; (b) duas frequências; (c) três frequências.



Fonte: SANTOS, I. N. (60).

Figura A.2 – Principais arranjos para filtros passivos amortecidos: (a) primeira ordem; (b) segunda ordem; (c) terceira ordem; (d) tipo “C”.



Fonte: SANTOS, I. N. (60).

Vale salientar que é possível a obtenção de filtros sintonizados em múltiplas ordens com arranjos elétricos ligeiramente distintos dos aqui apresentados.

Nos subitens seguintes é feito o detalhamento das propriedades físicas e perfil de comportamento das configurações acima apresentadas.

A.1.1 Filtros sintonizados em uma frequência

Esta é a principal arquitetura de filtro usada em aplicações práticas, devido, essencialmente, à sua simplicidade e custo competitivo. Seguindo a configuração apresentada na Figura A.1 (a), chega-se ao comportamento da impedância do filtro em função da frequência, conforme mostra a equação (A.1) (60).

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

Onde:

ω – frequência angular dada em radianos por segundo;

$\dot{Z}_f(\omega)$ – 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.

A frequência do filtro sintonizado em uma frequência (ω_0) pode ser obtida a partir da equação (A.2).

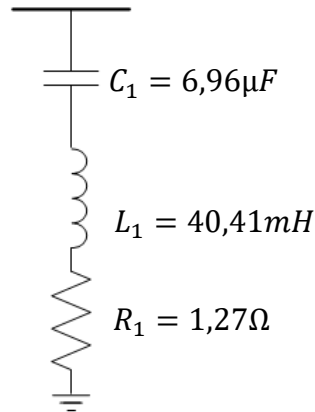
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (A.2)$$

Para valores de frequências menores que a frequência de sintonia (ω_0), a impedância do filtro possui característica capacitiva, enquanto que para valores superiores a ω_0 ela passa a ter caráter indutivo. Exatamente na frequência de ressonância a parte imaginária da impedância é nula e, assim, o arranjo se comporta como um circuito puramente resistivo.

Para elucidar as características relacionadas ao comportamento da impedância do filtro, considera-se o arranjo mostrado na Figura A.3, o qual se encontra sintonizado em 300 Hz. A

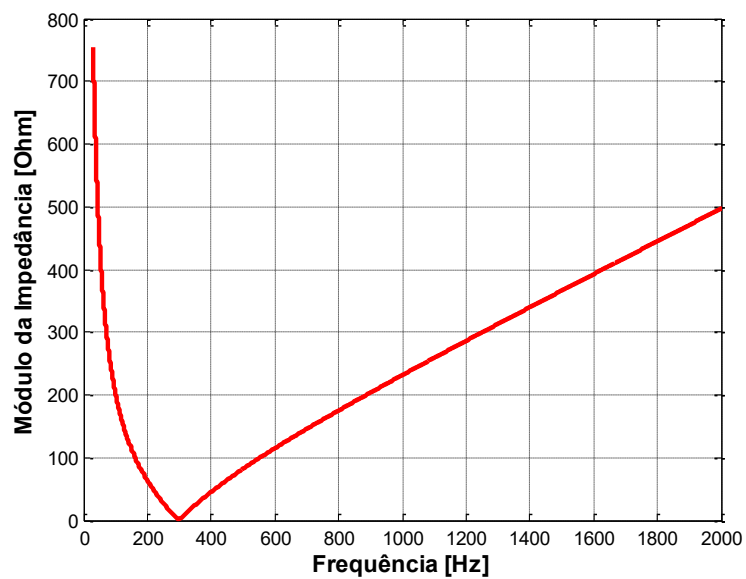
Figura A.4 e a Figura A.5 mostram o módulo e o ângulo da impedância do referido filtro em função da frequência, respectivamente.

Figura A.3 – Projeto de filtro passivo sintonizado em uma frequência.



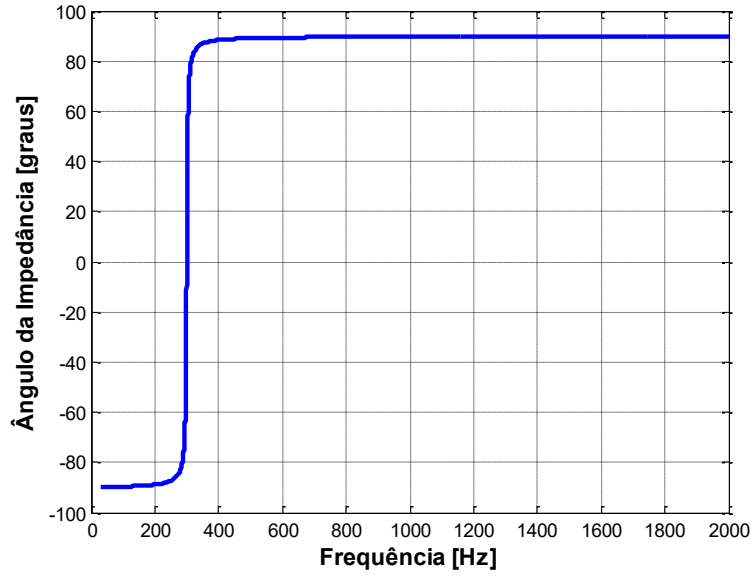
Fonte: Autoria própria.

Figura A.4 – Módulo da impedância, em função da frequência, do filtro de uma sintonia.



Fonte: Autoria própria.

Figura A.5 – Ângulo da impedância, em função da frequência, do filtro de uma sintonia.



Fonte: Autoria própria.

A.1.2 Filtros sintonizados em duas frequências

Esta configuração permite a sintonização em duas frequências, fato que, evidentemente, proporciona a filtragem de duas ordens harmônicas distintas. Com base na configuração apresentada na Figura A.1 (b), a equação (A.3) apresenta o cálculo da impedância desse filtro em função da frequência (60).

$$\begin{aligned} \dot{Z}_f(\omega) = & \left[R_1 + \frac{\left(R_2 R_3 + \frac{L_2}{C_2} \right) (R_2 + R_3) + \left(\omega R_2 L_2 - \frac{R_3}{\omega C_2} \right) \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)}{(R_2 + R_3)^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2} \right] \\ & + j \left[\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) + \frac{\left(\omega R_2 L_2 - \frac{R_3}{\omega C_2} \right) (R_2 + R_3) - \left(R_2 R_3 + \frac{L_2}{C_2} \right) \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)}{(R_2 + R_3)^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2} \right] \quad (A.3) \end{aligned}$$

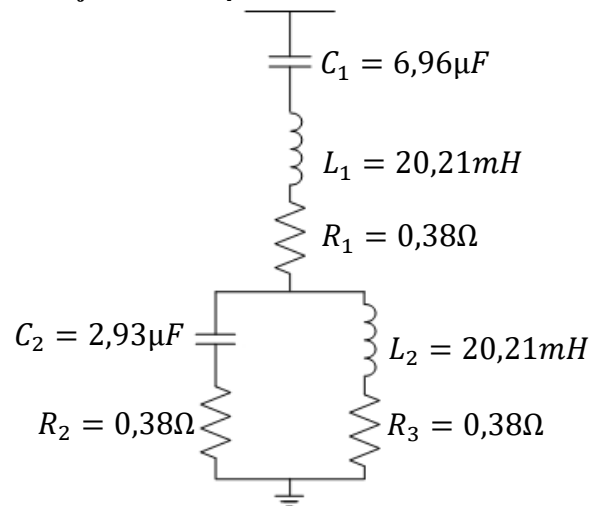
As frequências de ressonância do circuito podem ser obtidas a partir da equação (A.3). As equações (A.4) e (A.5) mostram os valores de ω_{0-1} e ω_{0-2} que representam as frequências aproximadas em que são observados os menores valores de impedâncias possíveis de serem obtidos com o filtro sintonizado em duas frequências.

$$\omega_{0-1} = \frac{1}{\sqrt{(L_1 + L_2)C_1}} \quad (\text{A.4})$$

$$\omega_{0-2} = \sqrt{\frac{1}{L_1} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)} \quad (\text{A.5})$$

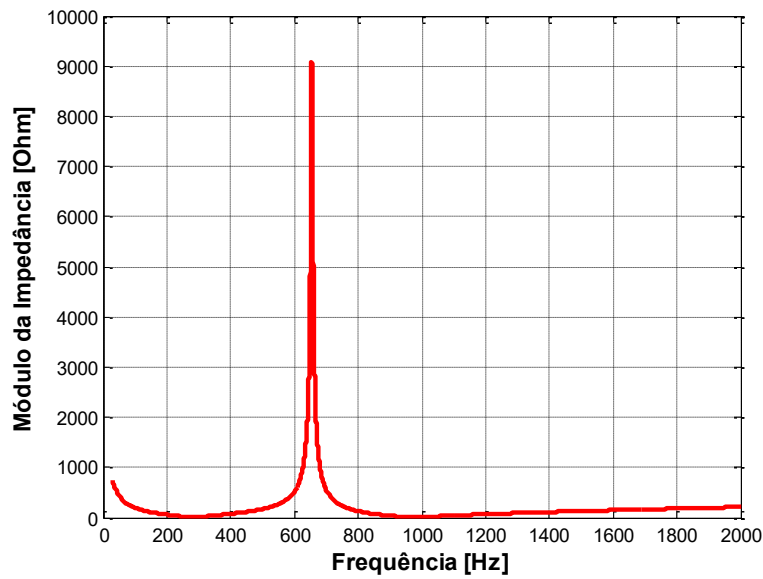
A título de ilustração, utiliza-se o filtro apresentado na Figura A.6 para traçar a Figura A.7 e a Figura A.8, as quais são representativas, respectivamente, da magnitude e do ângulo da impedância do arranjo em função da frequência. As especificações dos elementos R, L e C foram feitas seguindo as equações (A.4) e (A.5), para que as frequências de ressonância ocorressem, aproximadamente, em 300 Hz e 780 Hz.

Figura A.6 – Projeto de filtro passivo sintonizado em duas frequências.



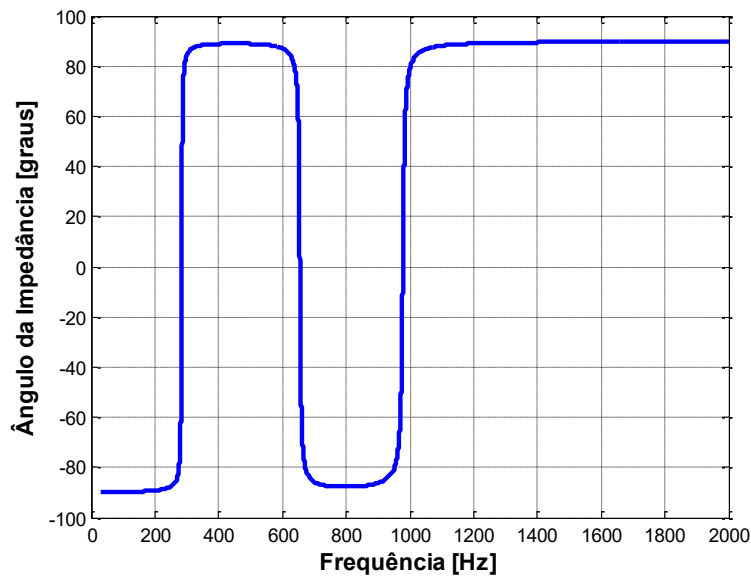
Fonte: Autoria própria.

Figura A.7 – Módulo da impedância, em função da frequência, do filtro de duas sintonias.



Fonte: Autoria própria.

Figura A.8 – Ângulo da impedância, em função da frequência, do filtro de duas sintonias.



Fonte: Autoria própria.

A.1.3 Filtros sintonizados em três frequências

O arranjo do filtro sintonizado em três frequências oferece baixos valores de impedância em três distintas frequências harmônicas. A análise do circuito mostrado na Figura A.1 (c) conduz à equação (A.6), a qual fornece a impedância do filtro em função da frequência (60).

$$\begin{aligned}
\dot{Z}_f(\omega) = & \left[R_1 + \frac{\left(R_2 R_3 + \frac{L_2}{C_2} \right) (R_2 + R_3) + \left(\omega R_2 L_2 - \frac{R_3}{\omega C_2} \right) \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)}{(R_2 + R_3)^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2} \right. \\
& \left. + \frac{\left(R_4 R_5 + \frac{L_3}{C_3} \right) (R_4 + R_5) + \left(\omega R_4 L_3 - \frac{R_5}{\omega C_3} \right) \left(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3} \right)}{(R_4 + R_5)^2 + \left(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3} \right)^2} \right] \\
& + j \left[\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) + \frac{\left(\omega R_2 L_2 - \frac{R_3}{\omega C_2} \right) (R_2 + R_3) - \left(R_2 R_3 + \frac{L_2}{C_2} \right) \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)}{(R_2 + R_3)^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2} \right. \\
& \left. + \frac{\left(\omega R_4 L_3 - \frac{R_5}{\omega C_3} \right) (R_4 + R_5) - \left(R_4 R_5 + \frac{L_3}{C_3} \right) \left(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3} \right)}{(R_4 + R_5)^2 + \left(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3} \right)^2} \right]
\end{aligned} \tag{A.6}$$

A partir da equação (A.6) é possível chegar às equações (A.7), (A.8) e (A.9), as quais indicam os valores aproximados das frequências angulares de ressonância do filtro sintonizado em três frequências.

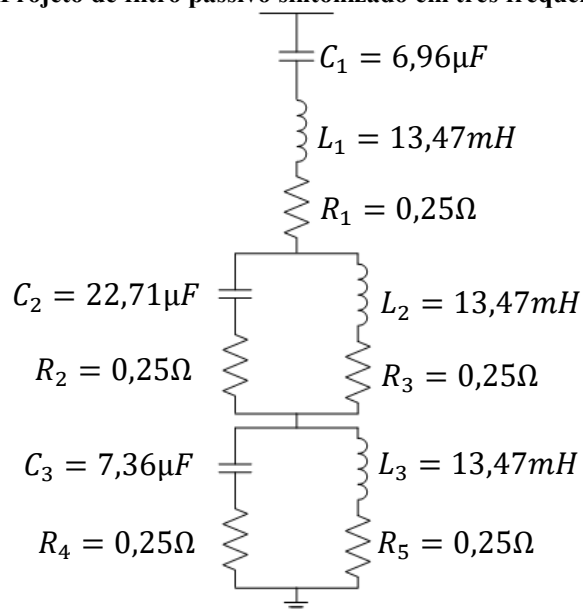
$$\omega_{0-1} = \frac{1}{\sqrt{(L_1 + L_2 + L_3)C_1}} \tag{A.7}$$

$$\omega_{0-2} = \sqrt{\frac{1}{(L_1 + L_3) \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)}} \approx \sqrt{\frac{1}{(L_1 + L_2) \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_3} \right)}} \tag{A.8}$$

$$\omega_{0-3} = \sqrt{\frac{1}{L_1 \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)}} \tag{A.9}$$

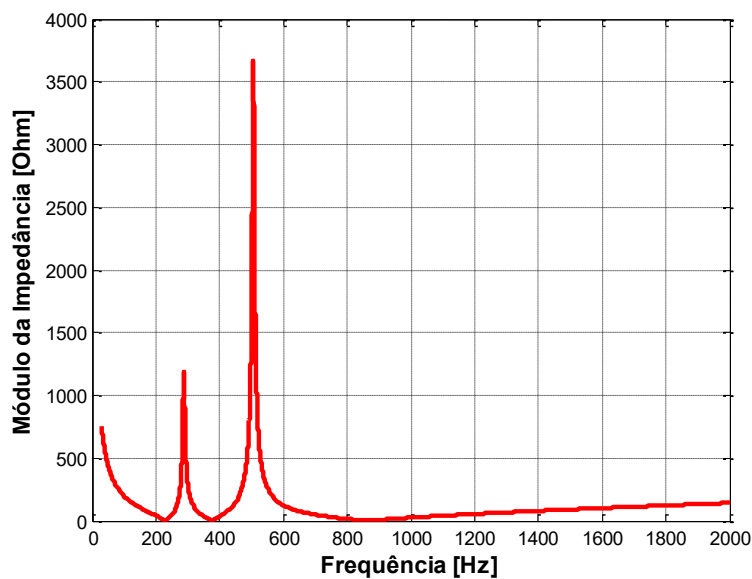
Seguindo a mesma estratégia adotada nos casos anteriores, para ilustrar o comportamento desse tipo de filtro é usado o circuito mostrado na Figura A.9, o qual representa um filtro projetado de forma que as frequências de ressonância ocorram aproximadamente em 300 Hz, 420 Hz e 780 Hz. A Figura A.10 e a Figura A.11 exibem, respectivamente, o traçado do módulo e do ângulo da impedância do arranjo em função da frequência.

Figura A.9 – Projeto de filtro passivo sintonizado em três frequências.

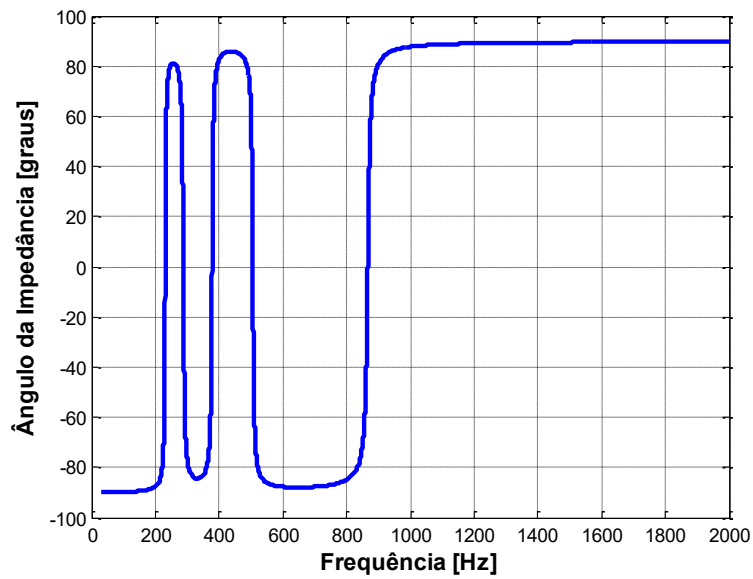


Fonte: Autoria própria.

Figura A.10 – Módulo da impedância, em função da frequência, do filtro de três sintonias.



Fonte: Autoria própria.

Figura A.11 – Ângulo da impedância, em função da frequência, do filtro de três sintonias.**Fonte: Autoria própria.**

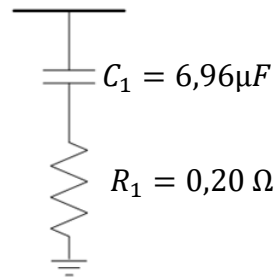
A.1.4 Filtros amortecidos de primeira ordem

O filtro amortecido de primeira ordem é formado por um elemento resistivo em série com um capacitor, como indica a Figura A.2 (a). Na prática, essa configuração não é comumente utilizada pelo motivo de requerer um capacitor muito grande e apresentar elevadas perdas de energia na frequência fundamental (136). A impedância desse tipo de filtro, em função da frequência, é fornecida pela equação (A.10) (60).

$$\dot{Z}_f(\omega) = R_1 - j \frac{1}{\omega C_1} \quad (\text{A.10})$$

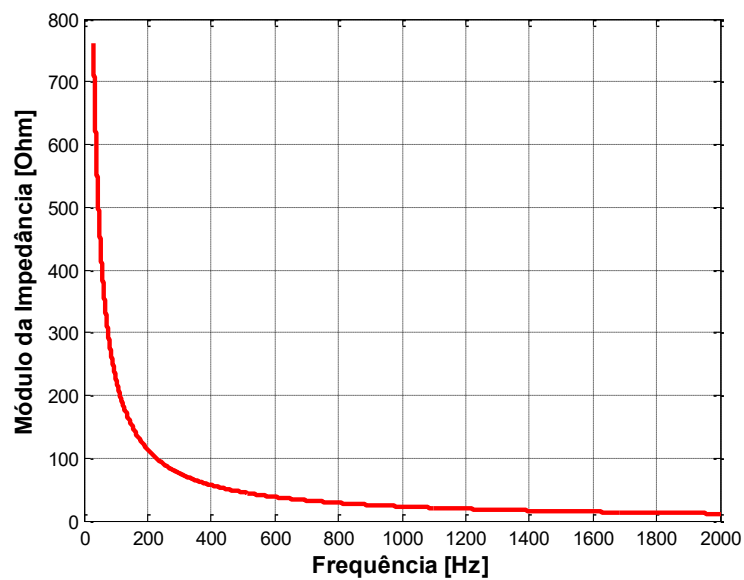
Na sequência, a Figura A.12 ilustra o circuito utilizado para a elaboração dos traçados apresentados na Figura A.13 e na Figura A.14, os quais representam, respectivamente, a característica do módulo e do ângulo da impedância desse circuito em função da frequência.

Figura A.12 – Circuito de filtro passivo amortecido de primeira ordem.

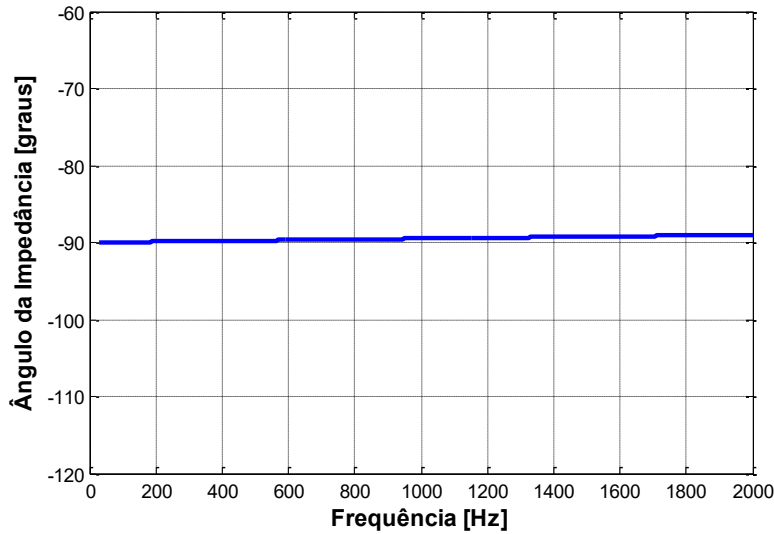


Fonte: Autoria própria.

Figura A.13 – Módulo da impedância, em função da frequência, do filtro amortecido de primeira ordem.



Fonte: Autoria própria.

Figura A.14 – Ângulo da impedância, em função da frequência, do filtro amortecido de primeira ordem.

Fonte: Autoria própria.

Nota-se, a partir da análise da Figura A.13, que a configuração apresenta baixa eficiência de filtragem. Na frequência de terceira ordem harmônica, por exemplo, o módulo da impedância do filtro apresenta alto valor (maior que 100 Ω), fato este que corrobora a afirmação anterior relacionada à necessidade de se usar capacitores de alta potência para melhorar o desempenho da filtragem com essa configuração.

A.1.5 Filtros amortecidos de segunda ordem

Em consonância com os elementos mostrados na Figura A.2 (b), a equação (A.11) descreve a impedância complexa do filtro amortecido de segunda ordem, em função da frequência (60).

$$\dot{Z}_f(\omega) = \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{(R_1 + j\omega L_1)} \right)^{-1} - j \frac{1}{\omega C_1} \quad (\text{A.11})$$

Para essa configuração, as equações (A.12), (A.13) e (A.14) definem, respectivamente, os seguintes parâmetros: frequência característica (ω_0), impedância natural (Z_0) e fator de amortecimento (D).

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_1}} \quad (\text{A.12})$$

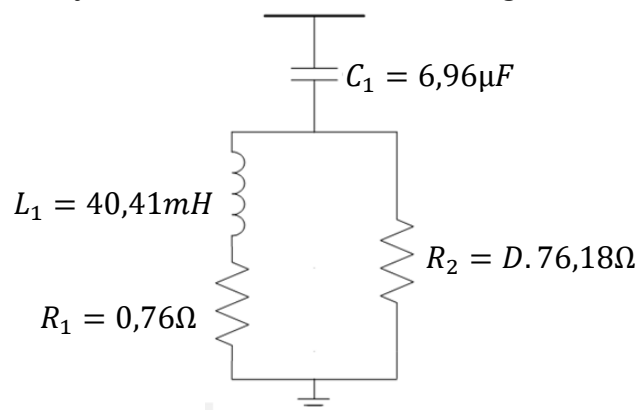
$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad (\text{A.13})$$

$$D = \frac{R_2}{Z_0} \quad (\text{A.14})$$

De acordo com a equação (A.14), o elemento R_2 e o fator de amortecimento (D) guardam entre si uma relação de proporcionalidade direta. É interessante destacar que, mantendo L_1 e C_1 fixos, quanto mais alto for o valor de D , maior será R_2 e, uma vez que esse elemento se encontra em paralelo na configuração do circuito do filtro, mais “aguda” será a sintonia do arranjo (136). Em outras palavras, quanto maior for o valor de D , mais o comportamento do filtro amortecido de segunda ordem se aproxima do comportamento do filtro sintonizado em uma frequência.

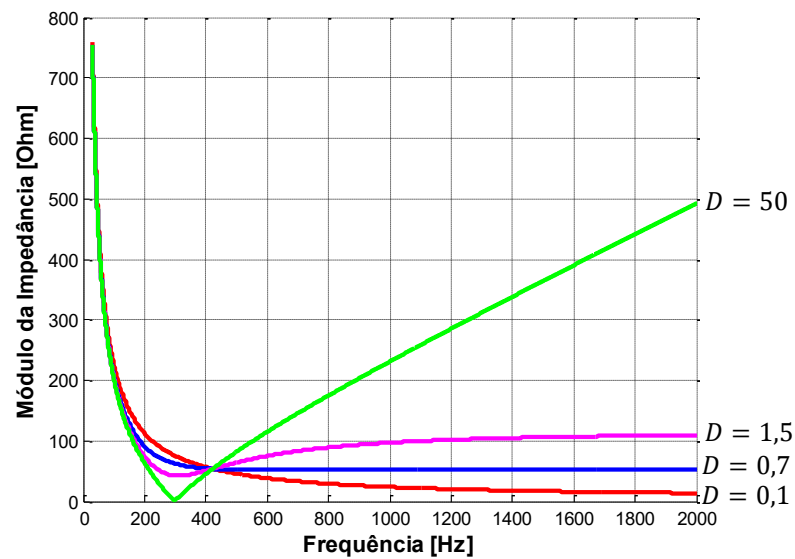
Para ilustrar esses conceitos, utiliza-se um filtro amortecido de segunda ordem de frequência característica de 300 Hz, constituído pelos elementos mostrados na Figura A.15. A Figura A.16 exibe o comportamento do módulo da impedância de tal configuração, em função da frequência, considerando o traçado para diferentes fatores de amortecimento. Por sua vez, a Figura A.17 mostra o ângulo da impedância do filtro em função da frequência.

Figura A.15 – Projeto de filtro passivo amortecido de segunda ordem.



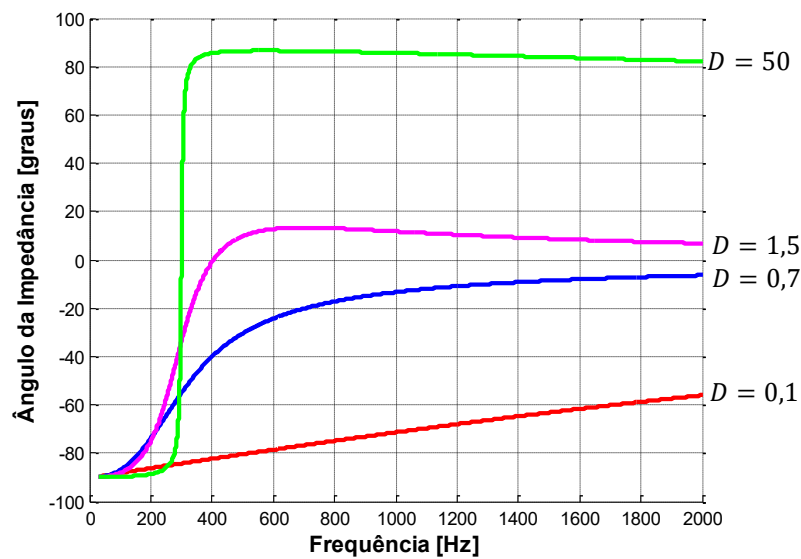
Fonte: Autoria própria.

Figura A.16 – Módulo da impedância, em função da frequência, do filtro amortecido de segunda ordem.



Fonte: Autoria própria.

Figura A.17 – Ângulo da impedância, em função da frequência, para o filtro amortecido de segunda ordem.



Fonte: Autoria própria.

A.1.6 Filtros amortecidos de terceira ordem

Como mostra a Figura A.2 (c), o filtro amortecido de terceira ordem possui dois elementos capacitivos em seu circuito. A impedância complexa do mesmo, em função da frequência, pode ser obtida a partir da equação (A.15) (60).

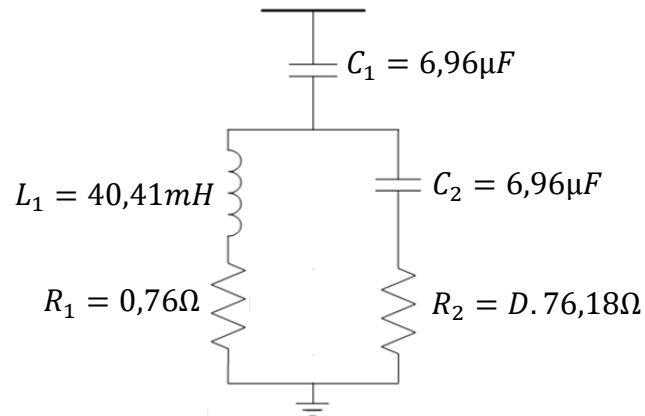
$$\dot{Z}_f(\omega) = \left(\frac{1}{\left(R_2 - j\frac{1}{\omega C_2}\right)} + \frac{1}{(R_1 + j\omega L_1)} \right)^{-1} - j\frac{1}{\omega C_1} \quad (\text{A.15})$$

Nota-se que para frequências muito altas, o valor da impedância do filtro tende a convergir para o valor de R_2 . Exatamente na frequência característica (ω_0) o filtro possui característica puramente resistiva, independentemente do valor do fator de amortecimento D . Observa-se, ainda, que na frequência característica, apesar de a impedância possuir ângulo zero, ela não corresponde necessariamente à impedância mínima do arranjo do filtro.

De maneira geral, o filtro amortecido de terceira ordem apresenta duas frequências características, as quais são distintas exclusivamente no caso de C_1 ser diferente de C_2 . Quando o valor de C_1 é distinto de C_2 , a impedância do filtro é indutiva no intervalo entre as duas frequências características. Na medida em que o valor da capacitância C_1 se aproxima do valor de C_2 , o trecho indutivo da impedância tende a desaparecer até que apenas uma frequência característica passa a existir quando $C_1 = C_2$. Essa situação representa o arranjo mais conveniente, o qual tem impedância capacitiva em uma larga faixa de frequências, inclusive nas proximidades da frequência característica (136).

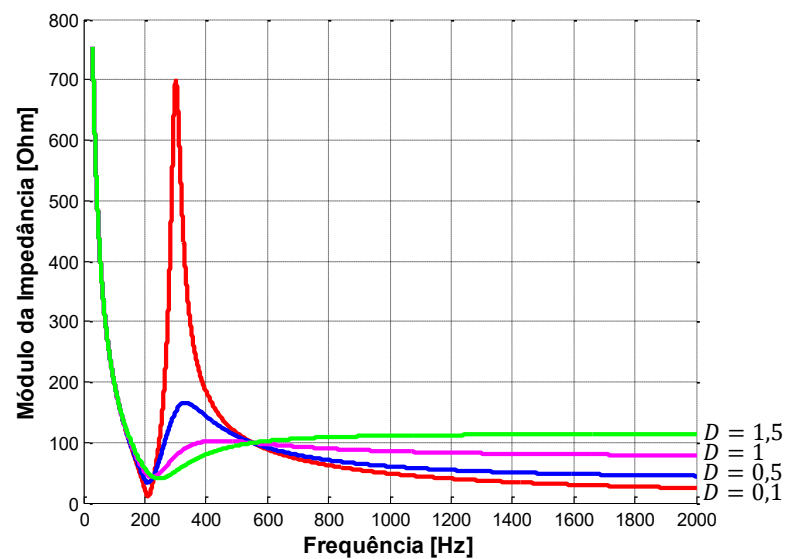
A Figura A.18 apresenta os elementos que constituem um filtro amortecido de terceira ordem, enquanto a Figura A.19 e a Figura A.20 ilustram, respectivamente, o módulo e ângulo da impedância desse circuito, em função da frequência, considerando diferentes fatores de amortecimento D .

Figura A.18 – Projeto de filtro passivo amortecido de terceira ordem.



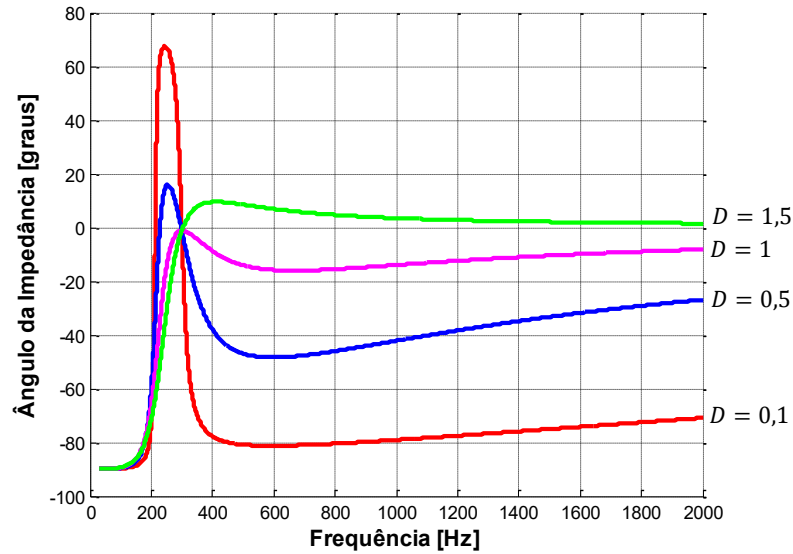
Fonte: Autoria própria.

Figura A.19 – Módulo da impedância, em função da frequência, para o filtro amortecido de terceira ordem.



Fonte: Autoria própria.

Figura A.20 – Ângulo da impedância, em função da frequência, para o filtro amortecido de terceira ordem.



Fonte: Autoria própria.

A.1.7 Filtros amortecidos tipo C

O filtro amortecido tipo C apresenta a configuração exibida na Figura A.2 (d) e sua impedância é definida a partir da equação (A.16) (60).

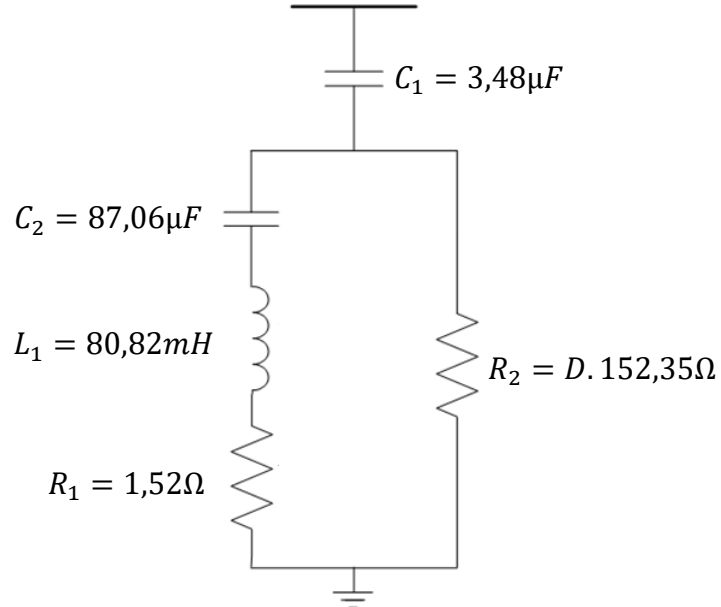
$$\dot{Z}_f(\omega) = \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{\left(R_1 + j\omega L_1 - j \frac{1}{\omega C_2} \right)} \right)^{-1} - j \frac{1}{\omega C_1} \quad (\text{A.16})$$

Esse tipo de filtro possui a característica de apresentar menores perdas de energia na frequência fundamental. Isso ocorre porque o ramo com os elementos R_1 , L_1 e C_2 é projetado de modo que L_1 e C_2 estejam sintonizados em 60 Hz. Dessa maneira, em tal frequência a impedância do referido ramo é igual simplesmente o valor de R_1 e, conseqüentemente, a impedância do filtro é dada pela soma da impedância capacitiva de C_1 com o paralelo entre R_1 e R_2 .

Já para as frequências superiores à frequência fundamental, o filtro amortecido tipo C apresenta comportamento bastante parecido ao filtro amortecido de segunda ordem, dada a semelhança de seus circuitos. Para efeito de ilustração, a Figura A.21 exhibe um filtro projetado com frequência característica de 300 Hz. A Figura A.22 e a Figura A.23 mostram,

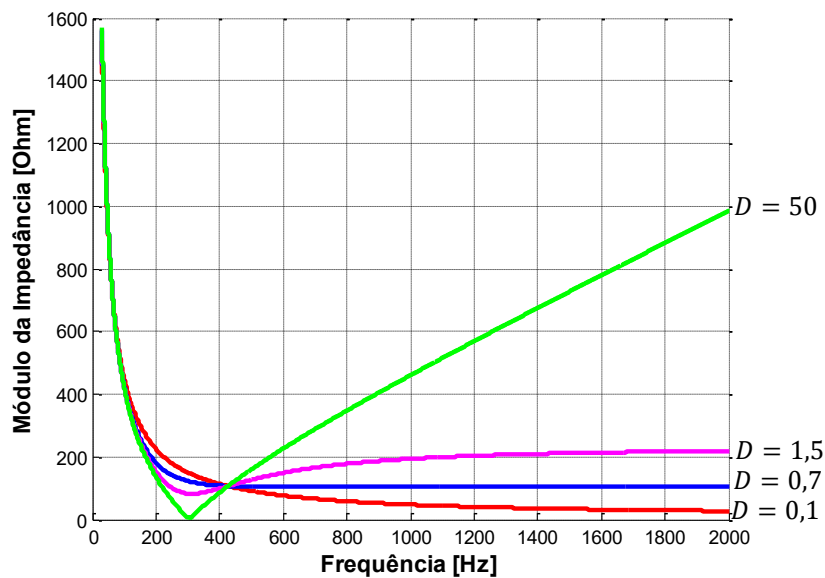
respectivamente, os gráficos do módulo e do ângulo da impedância do circuito em função da frequência. Mais uma vez, são feitos os traçados considerando distintos fatores de amortecimento D .

Figura A.21 – Projeto de filtro passivo amortecido tipo C.



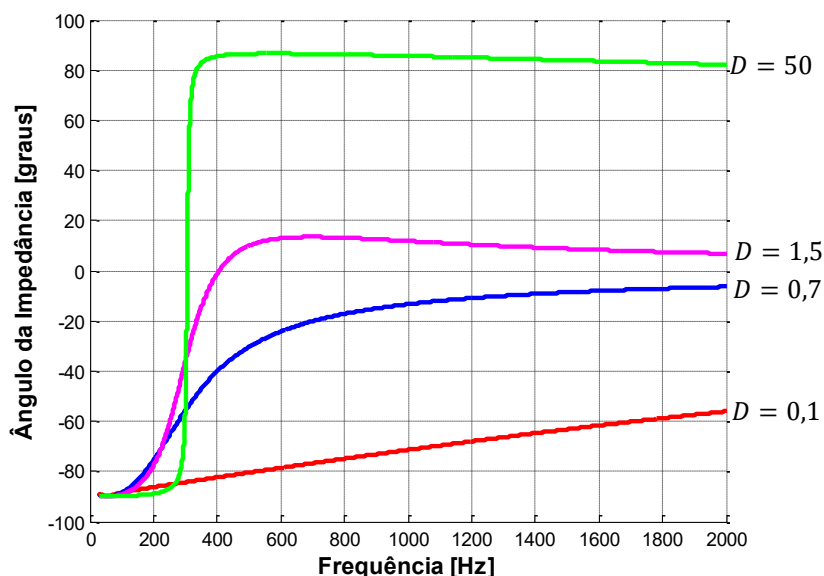
Fonte: Autoria própria.

Figura A.22 – Módulo da impedância, em função da frequência, para o filtro amortecido tipo C.



Fonte: Autoria própria.

Figura A.23 – Ângulo da impedância, em função da frequência, para o filtro amortecido tipo C.



Fonte: Autoria própria.

A.2 Análise de desempenho de distintos arranjos de filtragem com vistas à obtenção da impedância dominante

Uma vez expostos os principais arranjos de filtros passivos existentes na literatura, esta seção se organiza de maneira a avaliar o desempenho de cada um deles na obtenção de uma impedância dominante para fins da obtenção do compartilhamento de responsabilidades.

Assim sendo, em um primeiro momento é apresentado o sistema teste usado para as avaliações propostas. Então, os procedimentos relacionados à aplicação do MID são discutidos e, por fim, são tecidas as conclusões destas investigações.

A.2.1 Sistema teste para a avaliação das estratégias de filtragem

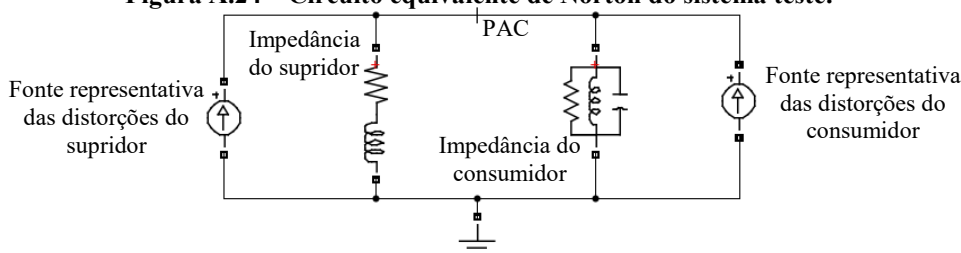
O complexo elétrico utilizado nas avaliações vindouras é constituído por um sistema supridor, que fornece tensão com um padrão já pré-distorcido, e um arranjo representativo de uma unidade consumidora com elementos lineares e não lineares. A Tabela A.1 apresenta as informações essenciais acerca da parametrização do referido sistema.

Tabela A.1 – Parametrização do sistema elétrico usado para avaliação das estratégias de filtragem.

Descrição	Parametrização
Nível de Tensão Base entre Linhas	13,8 kV
Potência Trifásica de Curto-Circuito do Barramento	100 \angle 85° MVA
Potência Ativa Trifásica da Carga	6,32 MW
Potência Reativa Indutiva Trifásica da Carga	2,7 MVar
Potência Reativa Capacitiva Trifásica da Carga	1 MVar

Fonte: Autoria própria.

A Figura A.24 mostra o circuito equivalente de Norton do sistema elétrico em pauta.

Figura A.24 – Circuito equivalente de Norton do sistema teste.**Fonte: Autoria própria.**

Ressalta-se que o circuito elétrico anteriormente evidenciado foi modelado com o auxílio do software Simulink/Matlab®. Esta foi a ferramenta utilizada para realizar as simulações computacionais retratadas neste trabalho, conforme já observado ao longo da tese.

Como mostra a Tabela A.2, as fontes de corrente do sistema supridor e do consumidor são parametrizadas de maneira que ambas as partes originam distorções harmônicas nas seguintes ordens: $h = 3$ (180 Hz), $h = 5$ (300 Hz), $h = 7$ (420 Hz), $h = 11$ (660 Hz) e $h = 13$ (780 Hz). A referida tabela também apresenta os percentuais de Distorções Individuais de Tensão (DIT), em relação à tensão nominal do barramento, observados no PAC a partir da conexão das fontes de distorções.

Tabela A.2 – Parametrização das fontes harmônicas do supridor e consumidor e DIT constatadas no PAC.

Frequência (Hz)	Fonte de Corrente do Supridor (A)	Fonte de Corrente do Consumidor (A)	DIT (%)
180	47,38 \angle 83°	67,88 \angle 32°	7,76
300	21,92 \angle -3°	45,96 \angle 78°	7,59
420	32,53 \angle -20°	28,99 \angle 201°	5,16
660	12,02 \angle 160°	24,75 \angle -11°	4,71
780	13,44 \angle 22°	7,07 \angle 125°	4,02

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que os valores obtidos para DIT se apresentam maiores do que o usualmente constatado em sistemas elétricos reais. Esta opção foi feita de forma proposital, para que os trabalhos de avaliação de desempenho assumam caráter abrangente e possam ser considerados coerentes mesmo diante de um cenário desafiador.

Uma vez que nesse caso hipotético a topologia do sistema é conhecida e as impedâncias harmônicas das partes podem ser facilmente calculadas, torna-se possível empregar, sem dificuldades, o procedimento clássico da Superposição, (44), (45). Com base nessa metodologia, os resultados para o compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções de tensões harmônicas são mostrados na Tabela A.3. Tais respostas servem como valores de referência, ou gabarito, para as subseqüentes avaliações de desempenho do Método da Impedância Dominante.

Tabela A.3 – Gabarito para o compartilhamento de responsabilidades sobre tensões harmônicas.

Frequência (Hz)	Responsabilidade do Supridor (%)	Responsabilidade do Consumidor (%)
180	39,47	60,53
300	22,00	78,00
420	73,03	26,97
660	31,96	68,04
780	84,67	15,33

Fonte: Autoria própria.

Não obstante à aplicação da metodologia entre agentes gerador e consumidor hipotéticos, vale destacar que tal processo pode ser tranquilamente estendido para agentes de geração eólica e a rede interligada, bem como outros pontos de acoplamento do sistema de potência. Trata-se, portanto, apenas de um sistema teste hipotético para avaliação das estratégias de obtenção de impedância harmônica dominante.

A.2.2 Aplicação computacional de distintos tipos de filtros com vistas ao compartilhamento

A seguir são mostrados os resultados da aplicação do Método da Impedância Dominante diante da utilização de diferentes circuitos como impedância dominante. Após apresentação das respostas obtidas, as mesmas são analisadas e discutidas.

I. Obtenção de impedância dominante a partir de filtros sintonizados em uma frequência:

Na Tabela A.4 são evidenciados os parâmetros R, L e C usados para constituir os arranjos de filtros passivos sintonizados nas frequências relacionadas às ordens harmônicas selecionadas para esta análise: 3, 5, 7, 11 e 13.

Tabela A.4 – Parâmetros usados para composição dos filtros sintonizados em uma frequência.

Frequência (Hz)	R (Ω)	L (mH)	C (μ F)
180	1,27	112,26	6,96
300	0,76	40,41	6,96
420	0,54	20,62	6,96
660	0,35	8,35	6,96
780	0,29	5,98	6,96

Fonte: Autoria própria.

Com base nos parâmetros descritos, as simulações do desempenho do sistema com cada um dos filtros e posterior aplicação do Método da Impedância Dominante conduziram aos resultados apresentados na Tabela A.5. Observa-se que a nomenclatura e os procedimentos utilizados para chegar aos valores exibidos nessa tabela estão em consonância com o que foi apresentado na seção 3.2 deste documento.

Tabela A.5 – Resultados do compartilhamento de responsabilidades usando filtros passivos sintonizados em uma frequência como impedância dominante.

h	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-h} (A)	Resp. Supridor (%)	Resp. Consumidor (%)
3	57,76 \angle 104,10°	65,20 \angle 29,07°	97,64 \angle 63,92°	45,20	54,80
5	18,32 \angle 3,23°	44,40 \angle 77,46°	52,43 \angle 57,81°	20,25	79,75
7	33,28 \angle -19,22°	29,32 \angle -159,89°	21,39 \angle -79,52°	77,06	22,94
11	12,09 \angle 159,04°	24,64 \angle -11,63°	12,86 \angle -2,86°	32,06	67,94
13	13,35 \angle 22,60°	6,78 \angle 125,42°	13,57 \angle 51,74°	85,96	14,04

Fonte: Autoria própria.

II. Obtenção de impedância dominante a partir de filtro sintonizado em duas frequências:

Para avaliar a utilização dos filtros sintonizados em duas frequências como impedância dominante, optou-se por um arranjo sintonizado em 300 Hz e 780 Hz, cujos parâmetros são os mesmos daquele circuito discutido na seção anterior, como mostrado na Figura A.6. Assim, reitera-se aqui os valores dos componentes usados para constituição do circuito: $R_1 = R_2 = R_3 = 0,38 \Omega$, $L_1 = L_2 = 20,21$ mH, $C_1 = 6,96 \mu$ F e $C_2 = 2,93 \mu$ F.

Considerando, então, a utilização desse filtro para realização do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas de ordens 5 e 13, chega-se aos resultados exibidos na Tabela A.6.

Tabela A.6 – Resultados do compartilhamento de responsabilidades usando um filtro passivo sintonizado em duas frequências como impedância dominante.

h	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-h} (A)	Resp. Supridor (%)	Resp. Consumidor (%)
5	30,33 \angle -93,10°	66,41 \angle 63,43°	40,44 \angle 46,05°	26,58	73,42
13	28,07 \angle 57,44°	26,16 \angle -125,90°	2,48 \angle 95,39°	52,97	47,03

Fonte: Autoria própria.

III. Obtenção de impedância dominante a partir de filtro amortecido de primeira ordem:

A Tabela A.7 exibe os resultados do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas das ordens 5 e 13, considerando a utilização de duas possibilidades de filtros amortecidos de primeira ordem: o caso 1 com capacitor de potência 500 kVAr, e o caso 2 com capacitor de potência 15 MVar. Nota-se que a opção por mostrar as respostas obtidas para apenas duas frequências visa condensar as informações, de forma a facilitar as futuras análises de desempenho.

Tabela A.7 – Resultados do compartilhamento de responsabilidades usando um filtro passivo amortecido de primeira ordem como impedância dominante.

Caso	h	$\dot{I}_{pac-in-h}$ (A)	$-\dot{I}_{pac-out-h}$ (A)	\dot{I}_{f-h} (A)	Resp. Supridor (%)	Resp. Consumidor (%)
1	5	56,02 \angle -139,91°	47,14 \angle 42,57°	9,16 \angle -152,81°	54,58	45,42
	13	18,79 \angle 43,53°	14,04 \angle -153,35°	6,73 \angle 80,81°	64,52	35,48
2	5	32,68 \angle 28,18°	43,66 \angle 86,36°	66,92 \angle 61,84°	40,65	59,35
	13	13,83 \angle 23,53°	7,07 \angle 133,03°	13,26 \angle 53,70°	90,13	9,87

Fonte: Autoria própria.

IV. Obtenção de impedância dominante a partir de filtro amortecido de segunda ordem:

A aplicação do filtro amortecido de segunda ordem como estratégia para obtenção de impedância dominante é feita a partir de dois casos. O primeiro leva em conta o arranjo analisado na seção anterior, mais especificamente na Figura A.15. Nesse sentido, os seguintes componentes foram usados para composição do circuito: $R_1 = 0,76 \, \Omega$, $L_1 = 40,41 \, \text{mH}$, $C_1 = 6,96 \, \mu\text{F}$ e $R_2 = D.76,18 \, \Omega$. Para avaliar também a influência do fator de amortecimento, são feitas análises com $D = 0,1$ e $D = 50$.

Já no segundo caso, o filtro é projetado de modo a ter um capacitor com maior potência, sendo os seus componentes: $R_1 = 0,13 \, \Omega$, $L_1 = 6,74 \, \text{mH}$, $C_1 = 41,79 \, \mu\text{F}$ e $R_2 = D.12,7 \, \Omega$. Também nessa situação, avalia-se o comportamento do circuito com o fator $D = 0,1$ e $D = 50$.

Os resultados encontrados para as frequências relacionadas às ordens harmônicas 5 e 13, nos dois casos descritos, são apresentados na Tabela A.8.

Tabela A.8 – Resultados do compartilhamento de responsabilidades usando um filtro passivo amortecido de segunda ordem como impedância dominante.

Caso	D	h	$\dot{I}_{pac-in-h} \text{ (A)}$	$-\dot{I}_{pac-out-h} \text{ (A)}$	$\dot{I}_{f-h} \text{ (A)}$	Resp. Supr. (%)	Resp. Cons. (%)
1	0,1	5	78,29 \angle -141,0°	66,00 \angle 42,59°	13,09 \angle -159,41°	54,83	45,17
		13	25,41 \angle 44,89°	17,96 \angle -148,7°	9,00 \angle 72,84°	62,54	37,46
	50	5	94,15 \angle -149,3°	64,80 \angle 35,80°	30,17 \angle -160,31°	59,75	40,25
		13	25,98 \angle 76,92°	31,61 \angle -92,66°	7,67 \angle -54,86°	40,93	59,07
	0,1	5	160,0 \angle 144,5°	20,09 \angle -24,32°	140,35 \angle 142,91°	89,09	10,91
		13	21,23 \angle 29,05°	10,62 \angle 159,6°	16,44 \angle 58,44°	90,00	10,00
2	50	5	28,44 \angle 0,17°	63,85 \angle 77,8°	75,26 \angle 56,14°	21,15	78,85
		13	15,71 \angle 97,13°	29,45 \angle -48,46°	18,73 \angle -20,16°	21,74	78,26

Fonte: Autoria própria.

A.2.3 Análise de desempenho dos resultados do compartilhamento a partir da utilização de diferentes tipos de filtros

Neste subitem é analisado o desempenho de cada uma das configurações anteriormente usadas para realização do compartilhamento de responsabilidades via Método da Impedância Dominante. Mais uma vez, esclarece-se que as avaliações de desempenho são baseadas nos valores de referência, ou gabarito, mostrados na Tabela A.3, os quais foram obtidos a partir da aplicação do princípio clássico da Superposição.

Com o objetivo de facilitar a apreciação pretendida, a Tabela A.9 sintetiza as respostas obtidas para as ordens harmônicas 5 e 13, ao mostrar o gabarito e os percentuais encontrados para o compartilhamento diante de cada uma das situações estudadas.

Tabela A.9 – Síntese das respostas obtidas nas análises envolvendo diferentes tipos de impedâncias dominantes.

Situação		Resp. Supridor (%) $h = 5$	Resp. Consumidor (%) $h = 5$	Resp. Supridor (%) $h = 13$	Resp. Consumidor (%) $h = 13$
Gabarito		22,00	78,00	84,67	15,33
Filtro Sintonizado em Uma Frequência		20,25	79,75	85,96	14,04
Filtro Sintonizado em Duas Frequências		26,58	73,42	52,97	47,03
Filtro Amortecido de 1ª Ordem	Caso 1	54,58	45,42	64,52	35,48
	Caso 2	40,65	59,35	90,13	9,87
Filtro Amortecido de 2ª Ordem	Caso 1 $D = 0,1$	54,83	45,17	62,54	37,46
	$D = 50$	59,75	40,25	40,93	59,07
	Caso 2 $D = 0,1$	89,09	10,91	90,00	10,00
	$D = 50$	21,15	78,85	21,74	78,26

Fonte: Autoria própria.

A partir, então, da análise dos resultados apresentados, as principais constatações estabelecidas são:

- Percebe-se resultados encorajadores quando da utilização de filtros sintonizados em uma frequência. De maneira geral, os arranjos selecionados para teste, em cada uma das frequências harmônicas existentes no sistema elétrico, conduziram a percentuais acertados de compartilhamento cabidos às partes envolvidas. Tal fato inspira a realização de investigações mais detalhadas acerca de características de projeto desses filtros, de forma a obter uma impedância de teor suficientemente dominante para garantir a eficácia do procedimento aqui em foco.
- No que tange ao uso de filtros passivos sintonizados em duas frequências, apesar dos resultados animadores obtidos para a ordem 5, o método não responde bem para a ordem harmônica 13. Isso ocorre porque tal arranjo de filtragem demanda uma escolha de parâmetros muito precisa para que o circuito de fato apresente os dois menores valores de impedância exatamente nas frequências em que se deseja realizar o compartilhamento de responsabilidades. Em outras palavras,

pode-se dizer que a impedância do filtro diminui consideravelmente por volta das ordens de interesse, como indicam a Figura A.7 e a Figura A.8, mas não há garantia de que justamente nessas ordens elas apresentam seus valores mínimos. Assim, uma vez que tal configuração utiliza a mesma quantidade de componentes que seriam usados para construir dois filtros sintonizados em uma frequência, sugere-se que seja dada preferência para a utilização de arranjos com uma única sintonia para realização do compartilhamento de responsabilidades.

- As mesmas observações feitas no item anterior para o filtro sintonizado em duas frequências são válidas também para o filtro sintonizado em três frequências. Por esse motivo, os resultados do compartilhamento advindos do uso do circuito de sintonia tripla foram suprimidos deste trabalho. Ratifica-se, nesse sentido, que para garantir a eficiência do método da Impedância Dominante deve ser dada preferência à utilização de filtros sintonizados em uma frequência.
- Com relação ao filtro amortecido de primeira ordem, as respostas obtidas corroboram a afirmação anteriormente feita de que é necessário um capacitor de potência muito grande para proporcionar boa filtragem. No caso da utilização de um arranjo com 500 kVAr (caso 1) os percentuais encontrados para o compartilhamento apresentaram total discordância com o que era esperado. Ao usar um capacitor de 15 MVar (caso 2), percebe-se que as respostas se aproximaram um pouco mais do gabarito, porém continuaram insatisfatórias. Fica, assim, evidenciada a inadequação desse tipo de filtro para obtenção de impedância dominante.
- No que tange ao filtro amortecido de segunda ordem, nota-se que os resultados se distanciam consideravelmente dos valores de referência. Para o caso 1, com potência capacitiva menor, há uma grande discrepância entre os percentuais obtidos e os valores de referência. O desempenho insatisfatório observado é decorrência do fato de o filtro não apresentar a potência necessária para garantir que sua impedância seja suficientemente baixa nas ordens harmônicas de interesse. Quando se aumenta o capacitor usado no circuito, no caso 2, observa-se que a resposta da ordem 13 se aproxima do esperado para $D = 0,1$, enquanto que a resposta da ordem 5 se aproxima do gabarito para $D = 50$. Isso ocorre porque o parâmetro D está relacionado à seletividade do filtro. Ao analisar a

Figura A.16, percebe-se que quando $D = 0,1$, a impedância do filtro tende a diminuir à medida que a frequência aumenta, fato que justifica o bom teor de dominância do arranjo na frequência de 780 Hz. Por outro lado, quando $D = 50$ o comportamento do circuito se aproxima do filtro de uma sintonia, fazendo o desempenho da metodologia ser eficaz apenas para a frequência característica (300 Hz).

- Com base nos fenômenos destacados sobre o filtro amortecido de segunda ordem, percebe-se que apesar de ele ser capaz de abranger uma larga faixa de frequências, não possui impedância tão baixa quanto aquela necessária para dominar sobre as demais do sistema. Para melhorar o desempenho do processo faz-se necessário usar arranjos com potência reativa capacitiva muito grande, além de ser preciso também manusear o fator de amortecimento D , de modo a obter melhores respostas em frequências mais baixas ou mais altas. Assim, fica claro que o mesmo não se apresenta como uma proposta interessante para utilização no processo de compartilhamento de responsabilidades.
- As constatações feitas anteriormente para o filtro amortecido de segunda ordem são igualmente válidas para o filtro amortecido de terceira ordem e para o filtro amortecido tipo C. Dessa forma, considerou-se desnecessário exibir, neste trabalho, as respostas obtidas para o compartilhamento a partir de tais configurações, uma vez que não se apresentam como boas alternativas para obtenção de impedâncias dominantes.

Tendo em vista que o arranjo mais simples de filtragem harmônica foi também o que ofereceu melhores resultados neste processo de avaliação de desempenho, fica aqui estabelecido que para a aplicação do Método da Impedância Dominante é preciso usar um filtro harmônico passivo sintonizado em uma frequência.

B DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO SIMULADO

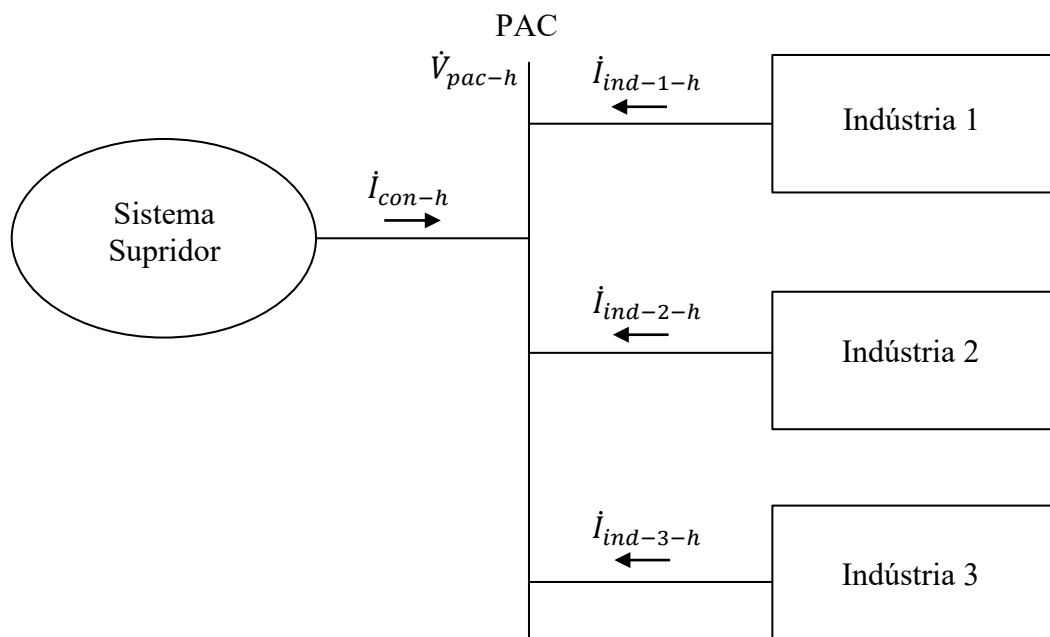
Neste apêndice é apresentado o sistema elétrico teste usado nas simulações computacionais realizadas no presente trabalho, para a avaliação das metodologias em destaque nos capítulos 3, 4 e 5. Além da estrutura e parametrização do arranjo, descrita em B.1, a seção B.2 mostra o procedimento seguido para a obtenção dos valores de referência, ou gabarito, dos percentuais de compartilhamento de responsabilidades sobre tensões harmônicas neste sistema, usando o clássico princípio da superposição de efeitos.

B.1 Estrutura e parametrização

Para a avaliação computacional das metodologias propostas neste trabalho, foi feita a opção por usar um sistema elétrico teste com caracterização correlata a complexos possíveis de serem encontrados na realidade. O software usado em todas as simulações relatadas foi o Matlab / Simulink[®]. O sistema elaborado é trifásico, constituído basicamente por um arranjo supridor responsável por alimentar três distintas unidades consumidoras industriais ligadas a um mesmo barramento, nomeado como PAC, como indica a configuração sintetizadora apresentada na Figura B.1.

Nesta figura, \dot{I}_{con-h} indica a corrente de ordem h que flui da concessionária para o PAC, enquanto $\dot{I}_{ind-1-h}$, $\dot{I}_{ind-2-h}$ e $\dot{I}_{ind-3-h}$ representam as correntes nas entradas das indústrias 1, 2 e 3, respectivamente, com sentido das indústrias para o PAC.

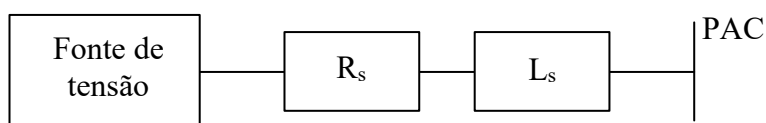
Figura B.1 – Esquema sintetizador do sistema elétrico simulado.



Fonte: Autoria própria.

Pode-se dizer que o sistema supridor é representado a partir de um circuito equivalente de Thévenin constituído por uma fonte de tensão trifásica, perfeitamente senoidal, em série com uma impedância responsável por definir o nível de curto-circuito da configuração. Este arranjo é evidenciado na Figura B.2, na qual R_s e L_s representam, respectivamente, a resistência e a indutância do circuito supridor. A Tabela B.1 exibe a parametrização dos componentes desta parte do circuito.

Figura B.2 – Esquematisação dos elementos que constituem o sistema supridor.



Fonte: Autoria própria.

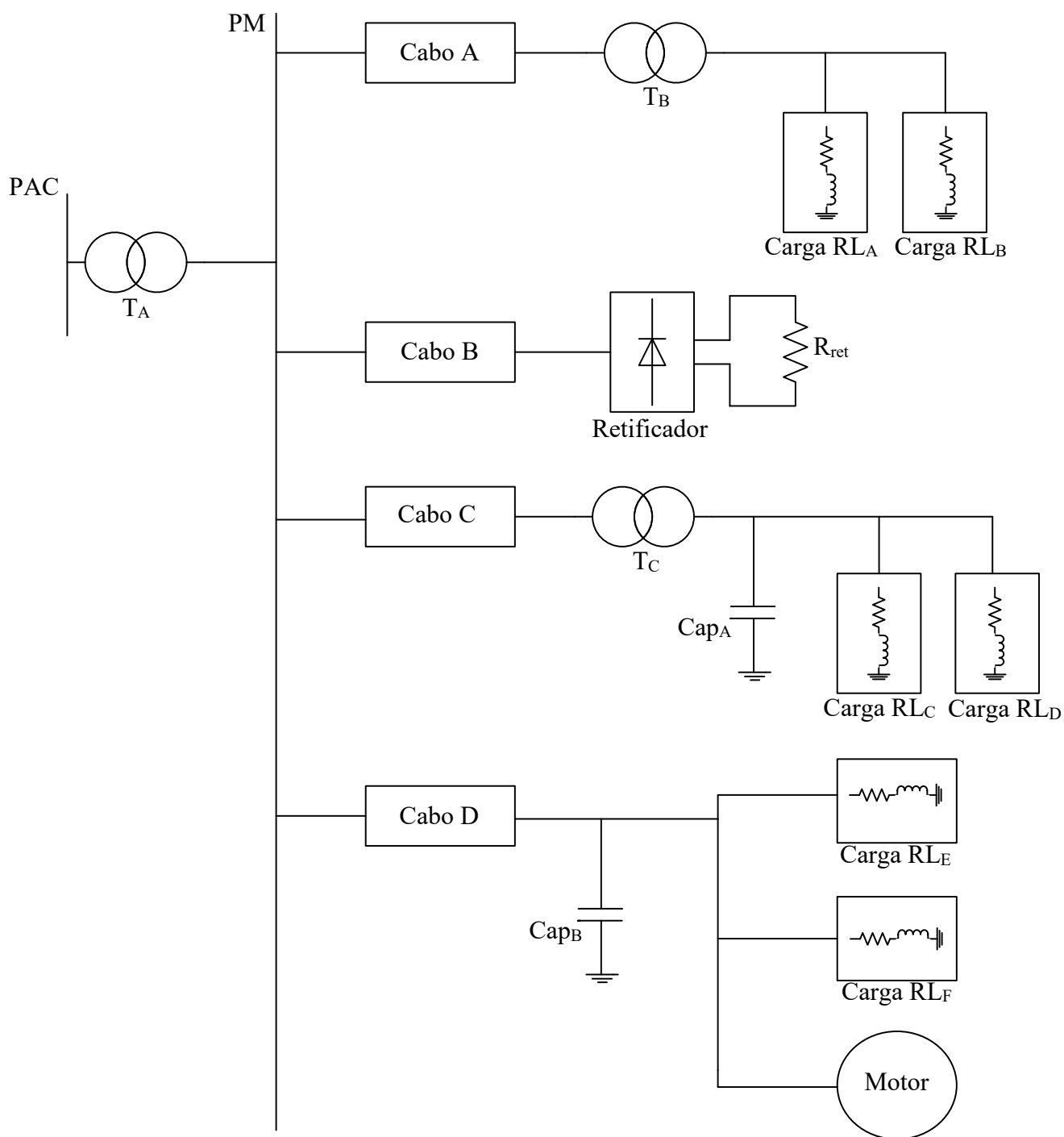
Tabela B.1 – Parametrização do supridor do sistema simulado.

Parâmetro	Valor
Tensão de suprimento (V)	13800
Frequência (Hz)	60
Potência de curto-circuito (MVA)	$150\angle 86^\circ$
R_s (Ω)	0,0886
L_s (mH)	3,3595

Fonte: Autoria própria.

A Figura B.3 exibe a configuração usada para a representação de cada um dos complexos industriais presentes nas simulações.

Figura B.3 – Esquemática da constituição das indústrias no sistema simulado.



Fonte: Autoria própria.

Como mostrado na figura anterior, as cargas consumidoras são modeladas de maneira a indicar a representação de indústrias, com transformadores alimentando motores e elementos lineares resistivos, indutivos e capacitivos, que podem indicar a presença de cabos, aquecedores, bancos de capacitores para correção do fator de potência, entre outros. Além disso, as indústrias possuem retificadores, como representantes da presença de cargas não lineares.

As três indústrias consideradas se encontram conectadas ao PAC e seguem o mesmo molde apresentado na Figura B.3. Já PM indica os barramentos dos secundários dos transformadores de entrada, seguindo a mesma nomenclatura usada ao longo deste trabalho.

A seguir é exposta a parametrização das indústrias. A Tabela B.2 mostra os dados dos transformadores, a Tabela B.3 trata da impedância dos cabos e das cargas dos retificadores, a Tabela B.4 sintetiza as potências das cargas RL, a Tabela B.5 apresenta as potências dos capacitores, e, por fim, a Tabela B.6 explana as informações sobre os motores de indução.

Tabela B.2 – Dados dos transformadores das indústrias do sistema simulado.

Transformador	Parâmetro	Indústria 1	Indústria 2	Indústria 3
T _A	Potência nominal (MVA)	8	8	8
	Resistência percentual (%)	2	2	2
	Reatância percentual (%)	8	8	8
	Tipo de ligação	Δ -Y	Δ -Y	Δ -Y
	Tensão primário/Tensão secundário (V)	13800/440	13800/440	13800/440
T _B	Potência nominal (MVA)	2	2	2
	Resistência percentual (%)	3,5	3,5	3,5
	Reatância percentual (%)	1	1	1
	Tipo de ligação	Δ -Y	Δ -Y	Δ -Y
	Tensão primário/Tensão secundário (V)	440/220	440/220	440/220
T _C	Potência nominal (MVA)	2	2	2
	Resistência percentual (%)	3,5	3,5	3,5
	Reatância percentual (%)	1	1	1
	Tipo de ligação	Δ -Y	Δ -Y	Δ -Y
	Tensão primário/Tensão secundário (V)	440/220	440/220	440/220

Fonte: Autoria própria.

Tabela B.3 – Impedâncias dos cabos e das cargas dos retificadores das indústrias do sistema simulado.

Cabos	Parâmetro	Indústria 1	Indústria 2	Indústria 3
Cabo A	Resistência (m Ω)	1,3852	1,3336	1,4565
	Indutância (mH)	0,1110	0,1100	0,1210
Cabo B	Resistência (m Ω)	1	1	1
	Indutância (mH)	0,0051	0,0250	0,0210
Cabo C	Resistência (m Ω)	1,9420	1,9420	1,9420
	Indutância (mH)	0,0300	0,0950	0,1060
Cabo D	Resistência (m Ω)	0,7768	0,7768	0,7768
	Indutância (mH)	0,0764	0,0800	0,1000
R _{ret}	Resistência (Ω)	0,0110	0,0240	0,0190

Nota: valores referidos para a tensão de 440 V.

Fonte: Autoria própria.

Tabela B.4 – Potências nominais das cargas RL das indústrias do sistema simulado.

Cargas	Parâmetro	Indústria 1	Indústria 2	Indústria 3
RL _A	Potência Ativa (kW)	484	685	514
	Potência Reativa Indutiva (kVAr)	159	215	168,54
RL _B	Potência Ativa (kW)	1153	1002	1008
	Potência Reativa Indutiva (kVAr)	302,65	0	219,75
RL _C	Potência Ativa (kW)	955	960	943,88
	Potência Reativa Indutiva (kVAr)	185	195	171,35
RL _D	Potência Ativa (kW)	990	488	519,52
	Potência Reativa Indutiva (kVAr)	225	205	121,97
RL _E	Potência Ativa (kW)	785,55	1082	952,67
	Potência Reativa Indutiva (kVAr)	0	0	134,53
RL _F	Potência Ativa (kW)	675	982	515,48
	Potência Reativa Indutiva (kVAr)	109	110	102,53

Nota: a tensão nominal das cargas RL_A, RL_B, RL_C e RL_D é 220 V, enquanto das cargas RL_E e RL_F é 440 V.

Fonte: Autoria própria.

Tabela B.5 – Potências nominais dos capacitores das indústrias do sistema simulado.

Capacitor	Parâmetro	Indústria 1	Indústria 2	Indústria 3
Cap _A	Potência Reativa	400	350	330
Cap _B	Capacitiva (kVAr)	700	830	650

Nota: a tensão nominal de Cap_A é 220 V, enquanto de Cap_B é 440 V.

Fonte: Autoria própria.

Tabela B.6 – Dados dos motores de indução das indústrias do sistema simulado.

Parâmetro	Indústria 1	Indústria 2	Indústria 3
Potência nominal (kVA)	160	132,46	100
Resistência percentual do estator (%)	3,0443	3,0443	3,0443
Reatância percentual do estator (%)	6,1419	6,1419	6,1419
Resistência percentual do rotor (%)	0,5865	0,5865	0,5865
Reatância percentual do rotor (%)	6,1419	6,1419	6,1419

Fonte: Autoria própria.

Para proporcionar uma melhor compreensão acerca das características operacionais deste sistema, a Tabela B.7 exibe tensões e correntes de frequência fundamental em vários pontos de uma das fases do circuito, seguindo a nomenclatura na Figura B.1. Nesta tabela, então, $h = 1$.

Tabela B.7 – Tensões e correntes fundamentais no sistema elétrico simulado.

Parâmetro	Valor
\dot{V}_{pac-h} (V)	$7392 \angle -7,2^\circ$
\dot{I}_{con-h} (A)	$883,6 \angle -30,42^\circ$
$\dot{I}_{ind-1-h}$ (A)	$350,0 \angle 150,0^\circ$
$\dot{I}_{ind-2-h}$ (A)	$271,4 \angle 149,2^\circ$
$\dot{I}_{ind-3-h}$ (A)	$262,3 \angle 149,5^\circ$

Fonte: Autoria própria.

De maneira complementar, a Tabela B.8 apresenta os valores de consumo trifásico de potência ativa, reativa e aparente, e fator de potência das indústrias.

Tabela B.8 – Potências consumidas pelas indústrias no sistema simulado.

Parâmetro	Indústria 1	Indústria 2	Indústria 3	Total
Potência Ativa (MW)	7,15	5,52	5,34	18,01
Potência Reativa (MVar)	3,01	2,41	2,30	7,73
Potência Aparente (MVA)	7,76	6,02	5,82	19,59
Fator de Potência	0,92	0,92	0,92	0,92

Fonte: Autoria própria.

Focando, neste momento, nas distorções presentes na configuração, a Tabela B.9 mostra as grandezas de tensões e correntes harmônicas existentes no sistema elétrico, seguindo mais uma vez a terminologia exibida na Figura B.1. Por se tratar de um sistema equilibrado, são mostrados os desenvolvimentos considerando apenas uma das fases do arranjo.

Tabela B.9 – Tensões e correntes harmônicas no PAC do sistema elétrico simulado.

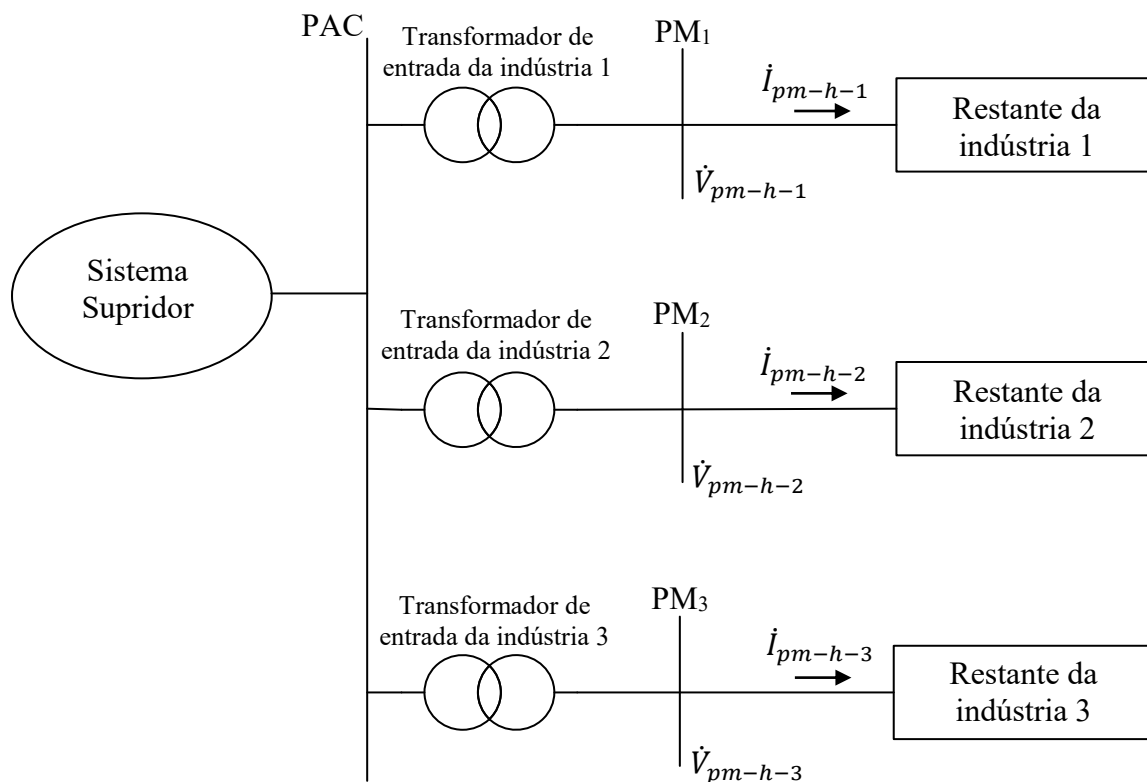
h	\hat{V}_{pac-h} (V)	\hat{I}_{con-h} (A)	$\hat{I}_{ind-1-h}$ (A)	$\hat{I}_{ind-2-h}$ (A)	$\hat{I}_{ind-3-h}$ (A)
5	284,1 \angle 108,9°	44,85 \angle -160,28°	28,47 \angle 36,80°	8,817 \angle -11,70°	10,78 \angle -0,60°
7	129,2 \angle 80,7°	14,58 \angle 171,31°	7,694 \angle -1,30°	2,836 \angle -18,10°	4,185 \angle -16,00°
11	52,82 \angle -85,78°	3,792 \angle 4,50°	2,931 \angle -118,87°	1,422 \angle 138,74°	1,856 \angle 134,28°
13	47,31 \angle -93,47°	2,869 \angle -3,10°	2,431 \angle -129,65°	1,068 \angle 125,42°	1,348 \angle 121,01°

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que no PAC não há distorções de terceira ordem harmônica, pois o sistema se encontra equilibrado, as pontes retificadoras são simétricas e existem transformadores de ligação delta-estrela entre o PAC e as indústrias

Adicionalmente, é importante registrar informações relacionadas aos secundários dos transformadores de entrada das indústrias, uma vez que tais dados são necessários quando da aplicação das metodologias de extrapolação do compartilhamento para pontos distintos de onde ocorrem as medições. Nesse sentido, a Figura B.4 exibe a esquematização do sistema elétrico, com foco de atenção nas tensões e correntes de interesse nos pontos denominados como PM.

Figura B.4 – Esquematização de grandezas de interesse no secundário dos transformadores de entrada das indústrias no sistema simulado.



Fonte: Autoria própria.

Como descrito na Tabela B.2, os transformadores de entrada das três indústrias possuem a mesma parametrização. A Tabela B.10 apresenta as impedâncias harmônicas destes equipamentos. Ainda, com base na terminologia mostrada na figura anterior, a Tabela B.11 mostra os valores de tensões e correntes de frequências harmônicas nos secundários dos transformadores.

Tabela B.10 – Impedâncias harmônicas dos transformadores das indústrias do sistema elétrico simulado.

h	$\dot{Z}_{t-h} (\Omega)$
5	$9,53 \angle 87,14^\circ$
7	$13,34 \angle 87,95^\circ$
11	$20,95 \angle 88,70^\circ$
13	$24,76 \angle 88,90^\circ$

Nota: valores referidos para a tensão de 13,8 kV.

Fonte: Autoria própria.

Tabela B.11 – Tensões e correntes harmônicas no secundário dos transformadores das indústrias do sistema elétrico simulado.

h	\dot{V}_{pm-h-1} (V)	\dot{I}_{pm-h-1} (A)	\dot{V}_{pm-h-2} (V)	\dot{I}_{pm-h-2} (A)	\dot{V}_{pm-h-3} (V)	\dot{I}_{pm-h-3} (A)
5	17,57 \angle 86,24°	893,2 \angle -173,2°	11,39 \angle 71,47°	276,3 \angle 138,5°	12,16 \angle 73,02°	338,1 \angle 149,5°
7	7,38 \angle 113,4°	241,4 \angle -151,2°	5,31 \angle 108,3°	88,93 \angle -167,9°	5,89 \angle 108,1°	131,3 \angle -165,8°
11	3,23 \angle -85,69°	92,10 \angle 31,23°	2,43 \angle -132,2°	44,50 \angle -71,04°	2,64 \angle -137,2°	58,11 \angle -75,55°
13	3,08 \angle -33,74°	76,37 \angle 80,43°	2,13 \angle -81,66°	33,43 \angle -24,34°	2,28 \angle -86,45°	42,21 \angle -28,8°

Fonte: Autoria própria.

B.2 Valores de referência para o compartilhamento

Tendo em mente o conteúdo harmônico presente no PAC do sistema elétrico simulado, como mostra a Tabela B.9, nesta seção são exibidos os procedimentos necessários para se chegar aos valores de compartilhamento de responsabilidades sobre tensões harmônicas nesta barra. Optou-se por adotar os resultados fornecidos pelo Método da Superposição (44), (45) como valores de referência para a avaliação das metodologias apresentadas neste trabalho.

Esta escolha se justifica pelo fato de a referida metodologia ser fundamentada em um clássico princípio da solução de circuitos elétricos e, desta maneira, fornecer resultados indubitavelmente acertados. As dificuldades de aplicação prática da mesma, discutadas no capítulo 2, não existem neste caso, visto que se trata de um sistema teórico modelado em software, que apresenta todos os seus dados de impedâncias harmônicas possíveis de serem calculados. Dessa maneira, a Tabela B.12 mostra as impedâncias da concessionária e das três indústrias para as ordens harmônicas de interesse ao presente estudo: 5, 7, 11 e 13.

Tabela B.12 – Impedâncias harmônicas no sistema elétrico simulado.

h	\dot{Z}_{con-h} (Ω)	$\dot{Z}_{ind-1-h}$ (Ω)	$\dot{Z}_{ind-2-h}$ (Ω)	$\dot{Z}_{ind-3-h}$ (Ω)
5	6,33 \angle 89,20°	68,70 \angle 44,70°	49,37 \angle 58,97°	54,68 \angle 66,59°
7	8,87 \angle 89,43°	41,05 \angle 25,83°	73,45 \angle 82,54°	83,55 \angle 83,51°
11	13,93 \angle 89,64°	79,83 \angle 85,12°	136,34 \angle 87,88°	155,74 \angle 88,37°
13	16,46 \angle 89,69°	104,04 \angle 86,86°	165,79 \angle 88,29°	189,30 \angle 88,56°

Nota: valores referidos para a tensão de 13,8 kV.

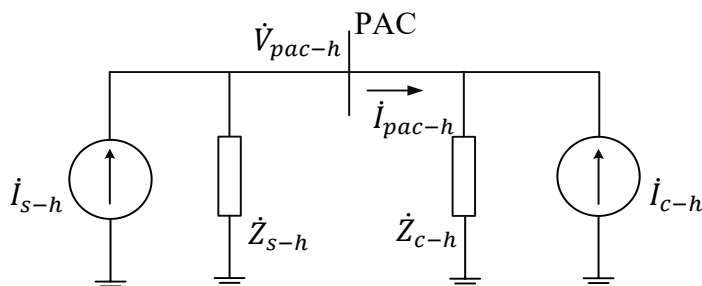
Fonte: Autoria própria.

Na sequência é detalhado o processo de obtenção dos percentuais de responsabilidades da indústria 1, quanto aos harmônicos de tensão de ordem $h = 5$ presentes no PAC.

Neste caso, a Figura B.5 mostra o circuito equivalente de Norton que sintetiza a situação estudada, sendo que a parte do consumidor representa apenas a indústria 1, enquanto a parte do sistema supridor envolve a rede da concessionária e o restante das instalações conectadas ao

PAC (indústrias 2 e 3). A figura segue exatamente o mesmo padrão de nomenclatura usado ao longo de todo este trabalho.

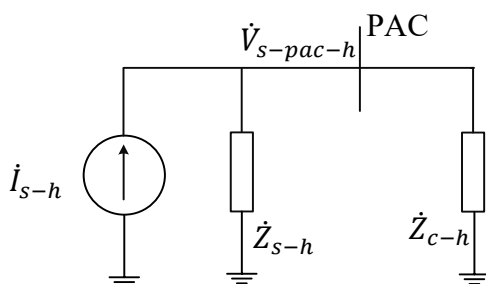
Figura B.5 – Arranjo sintetizador das partes envolvidas na problemática.



Fonte: Adaptado de SANTOS, I. N. (60).

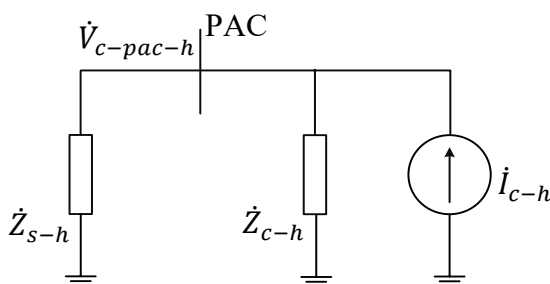
A Figura B.6, por sua vez, exibe o circuito considerando apenas a presença da fonte de corrente representativa das distorções advindas da parte do supridor, o que ocasiona no PAC a presença da tensão $\dot{V}_{s-pac-h}$. Já a Figura B.7 apresenta o arranjo com a fonte de distorções exclusivas do consumidor, que no caso ora analisado é a indústria 1, fato que faz surgir no PAC a tensão $\dot{V}_{c-pac-h}$.

Figura B.6 – Arranjo representativo das distorções advindas apenas do supridor.



Fonte: Adaptado de SANTOS, I. N. (60).

Figura B.7 – Arranjo representativo das distorções advindas apenas do consumidor.



Fonte: Adaptado de SANTOS, I. N. (60).

Com foco na Figura B.5, observa-se que é possível obter as grandezas \dot{Z}_{s-h} e \dot{Z}_{c-h} com auxílio dos dados presentes na Tabela B.12. Já a tensão e a corrente no PAC, \dot{V}_{pac-h} e \dot{I}_{pac-h} , são conseguidas por meio de simulação e podem ser constatadas a partir da observação da Tabela B.9. Dessa forma, torna-se claro que usando mecanismos triviais da solução de circuitos elétricos chega-se às grandezas \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} .

Uma vez obtidas as correntes \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} , por meio da análise das configurações da Figura B.6 e da Figura B.7 é simples também obter os valores das tensões $\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$. A partir deste ponto, procede-se à projeção dos fasores $\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$ sobre a tensão total no PAC (\dot{V}_{pac-h}), para obtenção dos percentuais de responsabilidades do supridor e consumidor, respectivamente.

Neste sentido, a Tabela B.13 apresenta as grandezas relacionadas ao processo supramencionado, bem como os valores de percentuais de responsabilidades encontrados para a indústria 1 (consumidor) e para o restante do sistema (supridor), sobre a tensão de quinta ordem harmônica presente no PAC.

Tabela B.13 – Obtenção do compartilhamento da indústria 1, para $h = 5$, no sistema elétrico simulado.

Parâmetro	Valor
$\dot{Z}_{s-h} (\Omega)$	$5,18 \angle 84,08^\circ$
$\dot{Z}_{c-h} (\Omega)$	$68,70 \angle 44,70^\circ$
$\dot{V}_{pac-h} (V)$	$284,1 \angle 108,9^\circ$
$\dot{I}_{pac-h} (A)$	$28,47 \angle -143,2^\circ$
$\dot{I}_{s-h} (A)$	$27,64 \angle 12,48^\circ$
$\dot{I}_{c-h} (A)$	$32,20 \angle 40,19^\circ$
$\dot{V}_{s-pac-h} (V)$	$135,13 \angle 93,97^\circ$
$\dot{V}_{c-pac-h} (V)$	$157,43 \angle 121,68^\circ$
Responsabilidade do supridor (%)	45,96
Responsabilidade da indústria 1 (%)	54,04

Fonte: Autoria própria.

Procedimento análogo ao relatado até aqui é repetido para a realização do compartilhamento de responsabilidades das indústrias 1, 2 e 3, com relação aos harmônicos de ordens 5, 7, 11 e 13. A Tabela B.14 sintetiza os resultados encontrados após a execução dos referidos cálculos. Os dados mostrados nesta tabela foram usados como valores de referência, ou gabarito, para as análises de avaliação de desempenho feitas neste trabalho.

Tabela B.14 – Valores de referência para o compartilhamento de responsabilidade no PAC do sistema simulado.

<i>h</i>	Responsabilidade da concessionária (%)	Responsabilidade da indústria 1 (%)	Responsabilidade da indústria 2 (%)	Responsabilidade da indústria 3 (%)
5	0,01	54,04	20,92	25,02
7	0,05	48,83	22,76	28,45
11	0,01	44,61	26,34	29,06
13	0,11	49,63	24,44	25,81

Fonte: Autoria própria.

Na tabela anterior são atribuídos percentuais praticamente nulos à concessionária, em todas as ordens harmônicas. Isto era esperado, visto que o sistema supridor fornece tensões perfeitamente senoidais. Além disso, a indústria 1, que possui carga não linear de maior potência, recebeu parcelas de responsabilidade maiores que as demais indústrias, em todas as ordens harmônicas.

Outro aspecto que indica a consistência dos valores apresentados é que, em todas as frequências analisadas, a soma dos percentuais atribuídos às indústrias 1, 2 e 3 resulta em um número bastante próximo de 100%.

C DESCRIÇÃO DO ARRANJO LABORATORIAL ENSAIADO

Neste apêndice é apresentada a descrição do sistema laboratorial usado para os trabalhos de avaliação de desempenho, a partir de ensaios práticos, das metodologias descritas nos capítulos 3, 4 e 5. Seguindo a mesma linha de raciocínio adotada no Apêndice B, em um primeiro momento são mostradas a estrutura e a parametrização do arranjo, na seção C.1, enquanto o item C.2 se preocupa em descrever os procedimentos adotados para se chegar aos valores de referência para o compartilhamento de responsabilidades neste complexo elétrico.

C.1 Estrutura e parametrização

O arranjo laboratorial montado visando à realização de estudos práticos apresenta os mesmos moldes de funcionamento daquele explorado nas simulações computacionais. Em linhas gerais, há um complexo supridor alimentando três circuitos equivalentes de indústrias em escala reduzida, de acordo com a configuração apresentada na Figura B.1. Da mesma forma que anteriormente posto, o supridor fornece tensão perfeitamente senoidal a três unidades consumidoras constituídas por elementos lineares e não lineares.

O arranjo representativo do circuito supridor, seguindo o esquema sintetizador da Figura B.2, é constituído por uma fonte de tensão trifásica em série com uma resistência R_s e uma indutância L_s , conforme mostra a parametrização descrita na Tabela C.1.

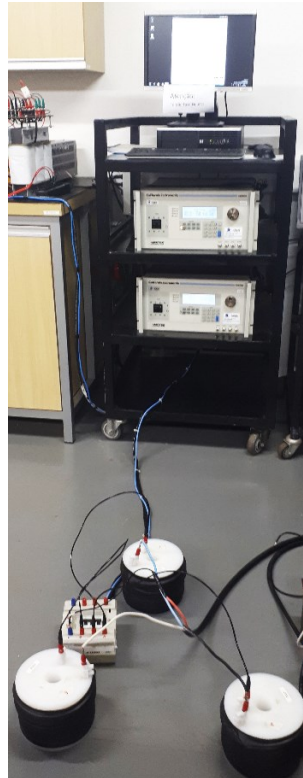
Tabela C.1 – Parametrização do supridor do sistema laboratorial.

Parâmetro	Valor
Tensão de suprimento (V)	220
Frequência (Hz)	60
Potência de curto-circuito (kVA)	$47,86 \angle 82,61^\circ$
R_s (Ω)	0,13
L_s (mH)	2,66

Fonte: Autoria própria.

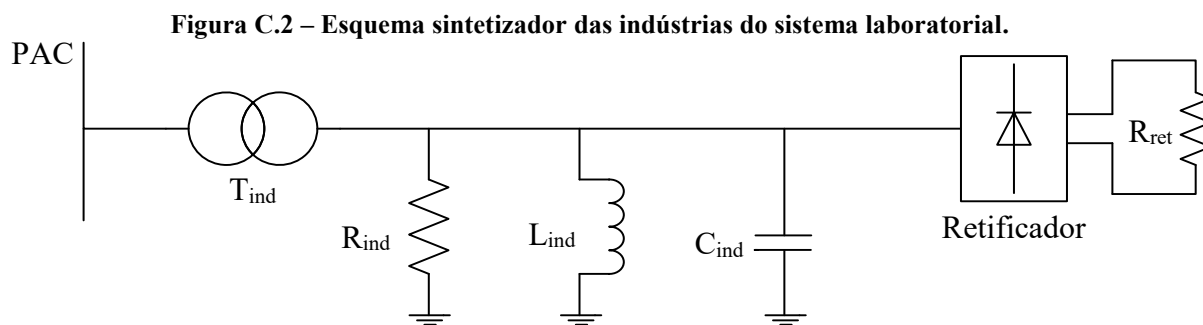
Para garantir o suprimento de tensão totalmente desprovida de distorções, foi utilizada uma fonte trifásica controlada da marca *California Instruments*, modelo CSW5550 (137). A Figura C.1 apresenta a configuração organizada em laboratório para a representação do circuito da concessionária, que abrange a fonte de tensão mencionada em série com indutores de núcleo de ar, os quais serviram para representar a impedância de curto-circuito do sistema. Nota-se que não foram adicionados resistores em série com os indutores, pois as resistências próprias destes últimos já se mostraram suficientes para a representação da configuração pretendida.

Figura C.1 – Esquema sintetizador do sistema elétrico simulado.



Fonte: Autoria própria.

Já as partes associadas às unidades consumidoras 1, 2 e 3 foram modeladas de forma a abranger transformadores de entrada, resistores, indutores com núcleo de ferro, capacitores e retificadores alimentado cargas resistivas. A estrutura interna dos circuitos representantes das indústrias em escala reduzida é apresentada na Figura C.2.



Fonte: Autoria própria.

Em consonância com a caracterização exibida na figura anterior, as tabelas seguintes exibem a parametrização dos componentes do arranjo. Na Tabela C.2 há os dados dos transformadores existentes nas entradas das indústrias, enquanto a Tabela C.3 traz as informações sobre os demais elementos existentes no complexo.

Tabela C.2 – Dados dos transformadores das indústrias do sistema laboratorial.

Parâmetro	Indústria 1	Indústria 2	Indústria 3
Potência nominal (kVA)	3	3	3
Resistência percentual (%)	3,3%	3,3%	3,3%
Reatância percentual (%)	0,6%	0,6%	0,6%
Tipo de ligação	Δ - Δ	Δ - Δ	Δ - Δ
Tensão primário/Tensão secundário (V)	220/220	220/220	220/220

Fonte: Autoria própria.

Tabela C.3 – Parametrização dos componentes das indústrias do sistema laboratorial.

Parâmetro	Indústria 1	Indústria 2	Indústria 3
R_{ind} (Ω)	276,56	70	180
L_{ind} (mH)	325	232	320
C_{ind} (μ F)	8	12	4
R_{rec} (Ω)	170	260	175

Nota: valores referidos para a tensão de 220 V.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura C.3 nota-se uma visão geral do arranjo montado para representação das indústrias em laboratório. Nesta figura é possível observar também o sistema de aquisição de dados formado por um medidor conectado a um notebook. Para os ensaios relatados neste trabalho foi utilizado o medidor trifásico Nexus 1500, classe D, da marca Nansen (138).

Figura C.3 – Configuração laboratorial das três indústrias e sistema de aquisição de dados.

Fonte: Autoria própria.

Sobre o sistema de medição adotado, ressalta-se que o equipamento possui certificação do INMETRO e ABNT NBR IEC 61000-4-30 (139), apresenta capacidade de armazenar até 1024 amostras por ciclo de formas de onda, e fornece informações sobre harmônicas de até 512ª ordem para cada canal de tensão e corrente. O dispositivo tem tensão nominal de 127 V / 220 V, corrente máxima de 20 A, e precisão é igual a 0,1% do fundo de escala utilizado.

Ressalta-se que para a apresentação dos resultados de medições exibidas neste trabalho, optou-se por indicar apenas o resultado da média aritmética de cinco valores obtidos a partir de medições consecutivas, as quais foram captadas respeitando um intervalo de tempo entre elas de cinco segundos.

Para proporcionar uma visão mais clara sobre as características de operação do sistema laboratorial, a Tabela C.4 exibe informações sobre as tensões e correntes de frequência fundamental mensuradas em distintos pontos de uma das fases do arranjo, em acordo com a terminologia adotada na Figura B.1. Complementarmente, as potências trifásicas consumidas pelas unidades industriais e os seus fatores de potência são detalhados na Tabela C.5

Tabela C.4 – Tensões e correntes fundamentais no sistema elétrico laboratorial.

Parâmetro	Valor
\dot{V}_{pac-h} (V)	$123,65 \angle 0^\circ$
\dot{I}_{con-h} (A)	$7,25 \angle -20,60^\circ$
$\dot{I}_{ind-1-h}$ (A)	$2,01 \angle 158,79^\circ$
$\dot{I}_{ind-2-h}$ (A)	$3,07 \angle 160,75^\circ$
$\dot{I}_{ind-3-h}$ (A)	$2,17 \angle 158,05^\circ$

Fonte: Autoria própria.

Tabela C.5 – Potências consumidas pelas indústrias no sistema laboratorial.

Parâmetro	Indústria 1	Indústria 2	Indústria 3	Total
Potência Ativa (W)	703,72	1094,15	749,79	2547,66
Potência Reativa (VAr)	249,38	369,94	311,11	930,43
Potência Aparente (VA)	746,60	1154,99	811,77	2712,24
Fator de Potência	0,94	0,95	0,92	0,94

Fonte: Autoria própria.

Por fim, com relação ao conteúdo harmônico presente no sistema, a Tabela C.6 exibe as grandezas de tensões e correntes de ordens 5, 7, 11 e 13 existentes em distintos pontos do PAC da configuração, mais uma vez de acordo com a nomenclatura definida na Figura B.1. Observa-se que apesar de todo o sistema ter sido montado na forma trifásica, por simplicidade e visando à concisão de resultados, são mostrados as medições e os estudos referentes a apenas uma das fases.

Tabela C.6 – Tensões e correntes harmônicas no PAC do sistema elétrico laboratorial.

h	\dot{V}_{pac-h} (V)	\dot{I}_{con-h} (A)	$\dot{I}_{ind-1-h}$ (A)	$\dot{I}_{ind-2-h}$ (A)	$\dot{I}_{ind-3-h}$ (A)
5	$4,47\angle 57,15^\circ$	$0,89\angle 152,88^\circ$	$0,35\angle -20,70^\circ$	$0,28\angle -40,47^\circ$	$0,27\angle -21,63^\circ$
7	$3,19\angle 56,08^\circ$	$0,46\angle 152,77^\circ$	$0,18\angle -20,80^\circ$	$0,15\angle -31,17^\circ$	$0,13\angle -31,67^\circ$
11	$4,46\angle 143,97^\circ$	$0,42\angle -118,55^\circ$	$0,15\angle 71,56^\circ$	$0,20\angle 43,29^\circ$	$0,08\angle 85,54^\circ$
13	$2,81\angle 125,03^\circ$	$0,22\angle -136,97^\circ$	$0,08\angle 58,09^\circ$	$0,12\angle 18,08^\circ$	$0,04\angle 82,23^\circ$

Fonte: Autoria própria.

Atentando-se, agora, para os transformadores de entrada das indústrias, a Tabela C.7 exibe as impedâncias harmônicas destes equipamentos, que foram obtidas a partir de experimentos práticos. Os ensaios realizados são detalhados no trabalho (141) e envolveram a alimentação dos transformadores com tensões de frequências harmônicas, a partir da utilização de fonte controlada (137).

Seguindo a mesma nomenclatura definida na Figura B.4, a Tabela C.8 apresenta as correntes e tensões harmônicas no secundário do transformador da indústria 1 do sistema ensaiado.

Tabela C.7 – Impedâncias harmônicas dos transformadores das indústrias do sistema laboratorial.

h	\dot{Z}_{t-h} (Ω)
5	$2,98\angle 39,70^\circ$
7	$3,40\angle 48,70^\circ$
11	$4,65\angle 61,50^\circ$
13	$5,24\angle 65,99^\circ$

Nota: valores referidos para a tensão de 220 V.

Fonte: Autoria própria.

Tabela C.8 – Tensões e correntes harmônicas no secundário do transformador da indústria 1 do sistema laboratorial.

h	\dot{V}_{pm-h-1} (V)	\dot{I}_{pm-h-1} (A)
5	$5,16\angle 43,26^\circ$	$0,34\angle 153,81^\circ$
7	$3,29\angle 43,21^\circ$	$0,18\angle 150,94^\circ$
11	$5,17\angle 129,08^\circ$	$0,15\angle 238,72^\circ$
13	$3,21\angle 104,89^\circ$	$0,08\angle 221,49^\circ$

Fonte: Autoria própria.

C.2 Valores de referência para o compartilhamento

Na presente seção utiliza-se o Método da Superposição (44), (45) para se chegar aos valores de referência para o compartilhamento de responsabilidades sobre as tensões harmônicas observadas no PAC do complexo elétrico montado em laboratório. Como é sabido, a aplicação do referido procedimento requer o conhecimento das impedâncias harmônicas das partes constituintes do circuito.

Com relação a este quesito, esclarece-se que foram aplicadas ao sistema tensões harmônicas controladas, com o auxílio da fonte, para a realização de medições de tensões e correntes nas entradas das indústrias, visando à posterior obtenção da impedância a partir do quociente entre tensão e corrente. Para este processo alcançar resultados acertados é preciso garantir que todas as cargas não lineares do arranjo estejam desligadas. Apesar de os retificadores terem sido desligados durante estes ensaios, outros componentes ainda geravam pequenas não linearidades no sistema, como os indutores com núcleo de ferro e os transformadores. Este fato certamente ocasionou algum grau de imprecisão nos valores das impedâncias harmônicas obtidas, as quais são mostradas na Tabela C.9. Apesar disso, considera-se que os resultados encontrados ainda apresentam exatidão suficiente para viabilizar a realização dos desenvolvimentos pretendidos.

Tabela C.9 – Impedâncias harmônicas no sistema elétrico laboratorial.

h	\dot{Z}_{con-h} (Ω)	$\dot{Z}_{ind-1-h}$ (Ω)	$\dot{Z}_{ind-2-h}$ (Ω)	$\dot{Z}_{ind-3-h}$ (Ω)
5	$5,03\angle 86,52^\circ$	$55,66\angle -66,92^\circ$	$29,55\angle -48,96^\circ$	$119,08\angle -34,49^\circ$
7	$7,01\angle 85,53^\circ$	$43,06\angle -76,74^\circ$	$29,86\angle -58,46^\circ$	$92,89\angle -50,84^\circ$
11	$10,86\angle 84,63^\circ$	$24,17\angle -74,77^\circ$	$18,52\angle -65,80^\circ$	$57,04\angle -63,75^\circ$
13	$12,64\angle 84,97^\circ$	$18,86\angle -75,69^\circ$	$15,02\angle -68,41^\circ$	$47,09\angle -64,87^\circ$

Nota: valores referidos para a tensão de 220 V.

Fonte: Autoria própria.

Seguindo, então, à aplicação do princípio da superposição, deve-se ter em mente os circuitos apresentados na seção B.2. Na Figura B.5, os valores das impedâncias \dot{Z}_{s-h} e \dot{Z}_{c-h} são facilmente encontrados a partir das informações presentes na Tabela C.9, enquanto a tensão e a corrente no PAC (\dot{V}_{pac-h} e \dot{I}_{pac-h}) são advindas de medições, as quais foram destacadas na Tabela C.6. Deste ponto é possível chegar aos valores das correntes \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} e, posteriormente, com ajuda de conceitos elementares da resolução de circuitos, encontram-se as tensões $\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$ dos circuitos da Figura B.6 e da Figura B.7, respectivamente. Para conclusão do processo, são feitas as projeções de $\dot{V}_{s-pac-h}$ e $\dot{V}_{c-pac-h}$ sobre \dot{V}_{pac-h} , tendo em vista o alcance das parcelas de responsabilidades cabidas ao supridor e consumidor, nesta ordem.

Para efeito de exemplificação, são mostrados na sequência, de maneira pormenorizada, os desenvolvimentos realizados para a obtenção do percentual de responsabilidades da indústria 1, quanto aos harmônicos de tensão de ordem $h = 5$ no PAC. Assim, as grandezas envolvidas nos cálculos deste caso específico, e os resultados obtidos para o compartilhamento de responsabilidades entre a indústria 1 (consumidor) e o restante do sistema (supridor) são detalhados na Tabela C.10.

Tabela C.10 – Obtenção do compartilhamento da indústria 1, para $h = 5$, no sistema laboratorial.

Parâmetro	Valor
$\dot{Z}_{s-h} (\Omega)$	$5,78 \angle 76,22^\circ$
$\dot{Z}_{c-h} (\Omega)$	$55,66 \angle -66,92^\circ$
$\dot{V}_{pac-h} (V)$	$4,47 \angle 57,15^\circ$
$\dot{I}_{pac-h} (A)$	$0,35 \angle -200,70^\circ$
$\dot{I}_{s-h} (A)$	$0,43 \angle -17,74^\circ$
$\dot{I}_{c-h} (A)$	$0,28 \angle -11,32^\circ$
$\dot{V}_{s-pac-h} (V)$	$2,69 \angle 54,59^\circ$
$\dot{V}_{c-pac-h} (V)$	$1,79 \angle 61,01^\circ$
Responsabilidade do supridor (%)	60,06
Responsabilidade da indústria 1 (%)	39,94

Fonte: Autoria própria.

O processo descrito anteriormente é, então, feito para a obtenção dos percentuais de responsabilidades sobre as tensões harmônicas no PAC de ordens 5, 7, 11 e 13, no que tange às indústrias 1, 2 e 3. As informações mostradas na Tabela C.11 resumem os resultados conseguidos.

Tabela C.11 – Valores de referência para o compartilhamento de responsabilidade no PAC do sistema laboratorial.

<i>h</i>	Responsabilidade da concessionária (%)	Responsabilidade da indústria 1 (%)	Responsabilidade da indústria 2 (%)	Responsabilidade da indústria 3 (%)
5	1,51	39,94	24,78	36,83
7	3,34	40,73	26,45	36,39
11	5,56	43,81	29,27	33,18
13	3,59	45,31	31,44	27,11

Fonte: Autoria própria.

Na tabela anterior constata-se a atribuição de pequenos percentuais de responsabilidades à concessionária (máximo de 5,56% para a ordem $h = 11$). Sabe-se, no entanto, que a contribuição da concessionária deveria ser nula, já que foi usada uma fonte de tensão controlada perfeitamente senoidal para alimentar o circuito. As imprecisões observadas são justificadas por algumas questões de cunho prático, como os desafios mencionados anteriormente quanto à obtenção das impedâncias harmônicas das partes do arranjo. Outro fator que merece ser destacado é que, devido à disponibilidade, naquele momento, de apenas um medidor, as medições em diferentes pontos do sistema não aconteceram de forma sincronizada, o que também certamente contribuiu para o aparecimento de inexatidões.

Apesar das dificuldades citadas, considera-se que os resultados encontrados para o compartilhamento de responsabilidades apresentam coerência e confiabilidade suficientes para servirem como valores de referência para a avaliação de desempenho das metodologias apresentadas neste trabalho nos capítulos 3, 4 e 5. Nota-se que a indústria 1, que possui carga não linear de potência superior às demais indústrias, recebeu as maiores parcelas de responsabilidades. Além disso, a soma dos percentuais atribuídos às indústrias 1, 2 e 3 é próximo de 100% em todas as frequências harmônicas.