



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

BARBARA MORAIS GIANESINI

**Compartilhamento de responsabilidades harmônicas: implementação de *Benchmark* do  
IEEE e aplicação de metodologias**

Uberlândia

2020

BÁRBARA MORAIS GIANESINI

**Compartilhamento de responsabilidades harmônicas: implementação de *Benchmark* do IEEE e aplicação de metodologias**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia Elétrica

Orientador: Dr. Ivan Nunes Santos

Uberlândia

2020

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

G433 2020	<p>Gianesini, Bárbara Morais, 1994- Compartilhamento de responsabilidades harmônicas: implementação de Benchmark do IEEE e aplicação de metodologias [recurso eletrônico] / Bárbara Morais Gianesini. - 2020.</p> <p>Orientador: Ivan Nunes Santos. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: <a href="http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.619">http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.619</a> Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia elétrica. I. Santos, Ivan Nunes, 1979- (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós- graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.3</p>
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

BÁRBARA MORAIS GIANESINI

**Compartilhamento de responsabilidades harmônicas: implementação de *Benchmark* do IEEE e aplicação de metodologias**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia Elétrica

Uberlândia, 25 de agosto de 2020

Banca Examinadora:

---

Ivan Nunes Santos – Prof. Dr. (UFU)

---

José Carlos de Oliveira – Prof. Dr. (UFU)

---

Mateus Duarte Teixeira – Prof. Dr. (UFPR)





**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:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 745, PPGEELT				
Data:	Vinte e cinco de agosto de dois mil e vinte	Hora de início:	09:10	Hora de encerramento:	13:00
Matrícula do Discente:	11822EEL002				
Nome do Discente:	Bárbara Morais Giancesini				
Título do Trabalho:	Compartilhamento de responsabilidades harmônicas: implementação de Benchmark do IEEE e aplicação de metodologias				
Área de concentração:	Sistemas de energia elétrica				
Linha de pesquisa:	Qualidade e racionalização da energia elétrica				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Título: Método Modificado da Superposição para o Compartilhamento de Responsabilidades Harmônicas Agência Financiadora: Grupo Neoenergia através do Programa de P&D ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) Início: 29/07/2016 Término: 29/07/202				

Reuniu-se por meio de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: José Carlos de Oliveira - FEELT/UFU; Mateus Duarte Teixeira - UFPR; 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 Mestre.

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 **Mateus Duarte Teixeira, Usuário Externo**, em 25/08/2020, às 12:59, 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 **Ivan Nunes Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 25/08/2020, às 12:59, 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 25/08/2020, às 12:59, 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](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2216519** e o código CRC **0AEE9549**.

---

*Ao Vinícius.*

---

## AGRADECIMENTOS

---

A Deus, por me dar saúde e guiar meus passos durante toda a trajetória do mestrado.

Ao meu orientador, Professor Dr. Ivan Nunes Santos, por me orientar durante a realização do mestrado de maneira paciente e incentivadora, e por não medir esforços para me auxiliar em todas as etapas da elaboração deste trabalho.

Aos meus pais, Edna Marcia e Gilnei pelo amor incondicional, incentivo, por suportarem a saudade e por não medirem esforços para a concretização deste sonho. A minha irmã Lídia por se fazer presente mesmo longe e ser meu ponto de apoio. A toda a minha família pelo carinho e incentivo.

Ao meu amigo, colega de trabalho e companheiro de vida Vinícius Henrique, pelo amor, paciência, compressão, suporte e por tornar mais leve esta jornada.

A todos os meus amigos, aos companheiros do Núcleo de qualidade da Energia (NQEE), Ábner, Adrian, Andréia, Arthur, Camila, Celso, Fabrício, Giordanni, Leonardo, Luiz, Márcio e Michelly por me acompanharem no dia-a-dia, dividindo conhecimentos e promovendo momentos de descontração, em especial à Raquel e ao Humberto. Aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da UFUe externos, principalmente Antônio Carlos, Arnaldo, José Carlos, José Rubens, José Wilson, Paulo Henrique, Isaque e Hélder pelos ensinamentos durante o curso.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e a Universidade Federal de Uberlândia por proverem meios para a realização deste trabalho. Agradeço também aos técnicos sempre dispostos a nos auxiliar.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Expresso também meus agradecimentos ao grupo Neoenergia por meio do Projeto de P&D PD-7284-0001/2016 pelo suporte concedido a esta pesquisa.

*“If you have built castles in the air, your work  
need not be lost; that is where they should be.  
Now put the foundations under them”.*

*Henry David Thoreau*

---

## RESUMO

---

A intensificação das distorções harmônicas nos últimos anos se deve, sobretudo, à contínua conexão de equipamentos não lineares nos sistemas elétricos. Sabe-se que a distorção harmônica constatada em um ponto de acoplamento comum é o resultado da interação entre as diversas fontes de perturbação existentes na rede. Portanto, surge a necessidade de determinar, a partir de métodos precisos, confiáveis e de prática implementação, as parcelas de responsabilidade dos agentes conectados (supridores e consumidores) sobre as distorções harmônicas constatadas. Muitos avanços foram estabelecidos nesta linha de pesquisa, no entanto, ainda não existe um consenso sobre o melhor procedimento a ser adotado para este fim. Concomitantemente às pesquisas por metodologias capazes de determinar o compartilhamento de responsabilidades harmônicas, torna-se imprescindível o estabelecimento de sistemas-teste de referência para que os diversos métodos de atribuição possam ser verificados e comparados entre si. Neste contexto, a *IEEE-PES Task Force on Harmonics Modeling and Simulation* desenvolveu um sistema teste padrão para avaliação de procedimentos de compartilhamento de responsabilidades. O mesmo é conhecido como *Benchmark IEEE-HCD*, sendo originalmente modelado no software PSCAD. Assim, a presente dissertação visa a cooperar com os avanços da temática, em questão, por meio da implementação deste *Benchmark* no *Simulink/MATLAB*. O *Simulink* foi escolhido por ser a plataforma de modelagem e simulação de sistemas elétricos adotada pelo Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, além de ser amplamente utilizado e aceito pela comunidade científica internacional. Após a implementação do *Benchmark*, os resultados advindos das simulações são comparados com aqueles disponibilizados na publicação original, para verificação do desempenho deste sistema. Complementarmente, são avaliados procedimentos para estimação de impedâncias harmônicas baseados na injeção de sinais de corrente. E, finalmente, as principais metodologias para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas também são analisadas por meio do *Benchmark* implementado.

**Palavras-chave:** Compartilhamento de responsabilidades. Distorções harmônicas. Injeção de correntes. Impedâncias harmônicas. Qualidade da energia. Simulações computacionais. Sistema-teste de referência.

---

## ABSTRACT

---

In recent years, the intensification of harmonic distortions on electric power systems has mainly occurred due to the continuous connection of non-linear devices into the grid. It is well-known that the global harmonic distortion at the point of common coupling arises from the interaction among different disturbance sources connected to the network. Therefore, the need to share the harmonic responsibility among the agents involved emerges as a relevant topic and it should be carried out through accurate, reliable and practical procedures. Even though several achievements have been reached in this line of research, as it currently stands, there is no consensus in the literature on the most reliable procedure to cope with this matter. Along with researches concerning the responsibility sharing methodologies, the establishment of test systems to assess these methods also emerges as a relevant task. In this context, the IEEE-PES Task Force on Harmonics Modelling and Simulation has developed a benchmark test system for assessing harmonic contribution determination procedures, called IEEE-HCD Benchmark, which was originally provided on the PSCAD software. Thus, this thesis aims to cooperate with advances in this matter, through the implementation of the Benchmark test system on Simulink/MATLAB software. Simulink was chosen since this platform is widely used by the international scientific community and also by the Power Quality Research Group of the Federal University of Uberlandia. In this way, in order to verify if the implementation is consistent, the simulation results are compared to the expected results given in the original publication. Moreover, along with procedures for estimating harmonic impedances based on the current injection approach, the most popular methodologies for determining harmonic responsibilities are evaluated using the Benchmark.

**Keywords:** Benchmark test system. Computational simulations. Current injection. Harmonic distortions. Harmonic impedances. Power quality. Sharing of responsibility.

---

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

---

Figura 1 – Arranjo elétrico genérico de um PAC conectando supridor e consumidor.....	37
Figura 2 – Arranjo representando a injeção de corrente no PAC para estimação das impedâncias harmônicas do supridor e consumidor.....	38
Figura 3 – Formas de onda do SGM para a 5 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup> e 25 <sup>a</sup> ordens harmônicas, com duração de 8,33 ms. ....	41
Figura 4 – Esquemático completo da estrutura de estimação de impedância. ....	41
Figura 5 – Sistema-teste de referência para estudos de contribuições harmônicas ( <i>Benchmark IEEE-HCD</i> ). ....	44
Figura 6 – Carga conectada à barra MT – CARGA MT. ....	46
Figura 7 – Banco de capacitores conectado à barra MT – BC MT. ....	46
Figura 8 – Retificador trifásico controlado a tiristor – CARGA 01 e CARGA 02. ....	48
Figura 9 – Banco de capacitores em BT – BC 01 e BC 02. ....	48
Figura 10 – Carga RL – Carga 03. ....	49
Figura 11 – Filtro harmônico passivo dessintonizado – FHP.....	49
Figura 12 – Motor de indução trifásico – CARGA 04. ....	50
Figura 13 – Sistema-teste de referência do IEEE para estudos de contribuições harmônicas ( <i>Benchmark IEEE-HCD</i> ) implementado no <i>Simulink</i> . ....	56
Figura 14 – Modelagem da rede de alta tensão no <i>Simulink</i> . ....	58
Figura 15 – Modelagem dos transformadores no <i>Simulink</i> . ....	59
Figura 16 – Modelagem das linhas/cabos de BT e MT no <i>Simulink</i> . ....	60
Figura 17 – Modelagem dos bancos de capacitores no <i>Simulink</i> . ....	62
Figura 18 – Modelagem do filtro harmônico passivo dessintonizado no <i>Simulink</i> . ....	62
Figura 19 – Modelagem das cargas não lineares no <i>Simulink</i> . ....	64
Figura 20 – Modelagem das cargas RL no <i>Simulink</i> . ....	65
Figura 21 – Motor de indução – CARGA 04. ....	66
Figura 22 – (a) Circuito equivalente do motor de indução adaptado e (b) malha entre as fases A e C. ....	67
Figura 23 – Modelagem do motor de indução no <i>Simulink</i> . ....	70
Figura 24 – Modelagem do bloco “Tensão_Rotor” no <i>Simulink</i> . ....	71
Figura 25 – Medição de potência no <i>Simulink</i> . ....	72
Figura 26 – Medição de tensão e corrente no <i>Simulink</i> . ....	73
Figura 27 – Teste 1 do motor de indução: (a) arranjo simulado no <i>Simulink</i> e (b) detalhes do bloco “Consumo”. ....	77



Figura 28 – Potências ativa, reativa e fator de potência do motor obtidos ao longo do Teste 1 para $TS = 1 \mu s$ .	78
Figura 29 – Teste 2 do motor de indução: arranjo simulado no <i>Simulink</i> .	79
Figura 30 – Potências ativa, reativa e fator de potência do motor obtidos ao longo do Teste 2 para $TS = 1 \mu s$ .	80
Figura 31 – Variação da tensão de suprimento ( <i>VAC</i> ) do motor ao longo do Teste 2 para $TS = 1 \mu s$ .	81
Figura 32 – Comparação dos métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no <i>Benchmark IEEE-HCD</i> e os dados do artigo – PAC 01: (a) impedâncias do sistema supridor e (b) impedâncias do consumidor.	88
Fonte: Autoria própria.Figura 33 – Comparação dos métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no <i>Benchmark IEEE-HCD</i> e os dados do artigo – PAC 02: (a) impedâncias do sistema supridor e (b) impedâncias do consumidor.	88
Figura 34 – Comparação dos métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no <i>Benchmark IEEE-HCD</i> e os dados do artigo – PAC 03: (a) impedâncias do sistema supridor e (b) impedâncias do consumidor.	90
Figura 35 – Comparação dos métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no <i>Benchmark IEEE-HCD</i> e os dados do artigo – PAC 04: (a) impedâncias do sistema supridor e (b) impedâncias do consumidor.	91
Figura 36 – Método da Superposição para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão: comparação entre os métodos para obtenção das impedâncias harmônicas e os dados de impedância informados no artigo – PAC 01.	95
Figura 37 – Método da Superposição para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão: comparação entre os métodos para obtenção das impedâncias harmônicas e os dados de impedância informados no artigo – PAC 02.	96
Figura 38 – Método da Superposição para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão: comparação entre os métodos para obtenção das impedâncias harmônicas e os dados de impedância informados no artigo – PAC 03.	97
Figura 39 – Método da Superposição para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão: comparação entre os métodos para obtenção das impedâncias harmônicas e os dados de impedância informados no artigo – PAC 04.	98
Figura 40 – Filtro harmônico passivo conectado aos PACs do <i>Benchmark</i> para aplicação do MID.	105
Figura 41 – Banco de capacitores conectado aos PACs do <i>Benchmark</i> para aplicação do MCC.	108
Figura 42 – Fontes de correntes harmônicas conectadas aos PAC do <i>Benchmark</i> para aplicação do MIC.	111
Figura 43 – Comparação entre as metodologias de compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão – PAC 01 <i>Benchmark IEEE-HCD</i> .	113
Figura 44 – Comparação entre as metodologias de compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão – PAC 02 <i>Benchmark IEEE-HCD</i> .	114
Figura 45 – Comparação entre as metodologias de compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão – PAC 03 <i>Benchmark IEEE-HCD</i> .	114

Figura 46 – Comparação entre as metodologias de compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão – PAC 04 <i>Benchmark IEEE-HCD</i> . .....	115
Figura 47 – Arranjo elétrico genérico de um PAC conectando supridor e consumidor.....	150
Figura 48 – Circuito equivalente de Norton de um PAC entre supridor e consumidor, para uma dada ordem harmônica $h$ .....	151
Figura 49 – Circuitos equivalentes de Norton, para uma ordem $h$ , considerando (a) a contribuição do supridor e (b) a contribuição do consumidor, para a tensão e corrente no PAC. ....	152
Figura 50 – Decomposição da corrente no PAC em dois escalares obtidos das projeções das contribuições do supridor e consumidor na (a) situação em que as projeções possuem o mesmo sentido e na (b) situação em que apresentam sentidos contrários. ....	153
Figura 51 – Decomposição da tensão no PAC em dois escalares obtidos das projeções das contribuições do supridor e consumidor.....	155
Figura 52 – Circuito equivalente de Norton de um PAC entre supridor e consumidor, para uma dada ordem harmônica $h$ , com a inserção de uma impedância dominante no PAC.....	157
Figura 53 – Circuito equivalente de Norton considerando (a) a contribuição do supridor e (b) a contribuição do consumidor, para a corrente que flui pela impedância dominante. ....	158
Figura 54 – Projeção de fasores sobre a corrente total que flui pela impedância dominante para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas. ....	159
Figura 55 – Circuito equivalente de Norton de um PAC entre supridor e consumidor, para uma dada ordem harmônica $h$ – condição 1. ....	162
Figura 56 – Circuito equivalente de Norton de um PAC entre supridor e consumidor, para uma dada ordem harmônica $h$ , com a conexão do capacitor no PAC – condição 2.....	162
Figura 57 – Projeção de fasores para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas. ....	165
Figura 58 – Circuito equivalente de Norton de um PAC entre supridor e consumidor, para uma dada ordem harmônica $h$ – condição 1. ....	167
Figura 59 – Circuito equivalente de Norton de um PAC entre supridor e consumidor, para uma dada ordem harmônica $h$ , com a injeção de corrente harmônica no PAC – condição 2. ....	167
Figura 60 – Projeção de fasores para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas. ....	170

---

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 1 – Parâmetros do transformador da subestação AT/MT. ....	45
Tabela 2 – Especificações das linhas e cabos de MT. ....	46
Tabela 3 – Especificações dos cabos de BT. ....	47
Tabela 4 – Parâmetros dos transformadores dos consumidores. ....	47
Tabela 5 – Parâmetros do motor de indução – CARGA 04. ....	50
Tabela 6 – Parâmetros para as três condições de operação do <i>Benchmark IEEE-HCD</i> . ....	51
Tabela 7 – Tensões nos PACs do <i>Benchmark IEEE-HCD</i> na condição de operação C. ....	52
Tabela 8 – Correntes nos PACs do <i>Benchmark IEEE-HCD</i> na condição de operação C. ....	52
Tabela 9 – Distorções harmônicas, individuais e totais, de tensão nos PACs do <i>Benchmark IEEE-HCD</i> na condição de operação C. ....	53
Tabela 10 – Distorções harmônicas, individuais e totais, de corrente nos PACs do <i>Benchmark IEEE-HCD</i> na condição de operação C. ....	53
Tabela 11 – Impedâncias observadas a partir dos PACs 01 e 02 do <i>Benchmark IEEE-HCD</i> na condição de operação C. ....	54
Tabela 12 – Impedâncias observadas a partir dos PACs 03 e 04 do <i>Benchmark IEEE-HCD</i> na condição de operação C. ....	54
Tabela 13 – Parâmetros dos blocos que compõem a rede de alta tensão no <i>Simulink</i> . ....	58
Tabela 14 – Parâmetros dos blocos que compõem os transformadores no <i>Simulink</i> . ....	59
Tabela 15 – Parâmetros dos blocos que compõem as linhas/cabos de MT no <i>Simulink</i> . ....	61
Tabela 16 – Parâmetros dos blocos que compõem os cabos de BT no <i>Simulink</i> . ....	61
Tabela 17 – Parâmetros dos blocos que compõem os bancos de capacitores e o filtro harmônico passivo no <i>Simulink</i> . ....	62
Tabela 18 – Parâmetros dos blocos que compõem as cargas não lineares no <i>Simulink</i> . ....	64
Tabela 19 – Parâmetros dos blocos que compõem as cargas RL no <i>Simulink</i> . ....	66
Tabela 20 – Parâmetros dos blocos que compõem o motor de indução no <i>Simulink</i> . ....	70
Tabela 21 – Parâmetros dos blocos que compõem o bloco “Power Meter” no <i>Simulink</i> . ....	73
Tabela 22 – Dados para execução do Teste 1 do motor de indução no <i>Simulink</i> . ....	77
Tabela 23 – Dados para execução do Teste 2 do motor de indução no <i>Simulink</i> . ....	79
Tabela 24 – Comparação dos resultados de tensão e corrente obtidos na simulação com os dados do artigo – PAC 01. ....	82
Tabela 25 – Comparação dos resultados de tensão e corrente obtidos na simulação com os dados do artigo – PAC 02. ....	83

Tabela 26 – Comparação dos resultados de tensão e corrente obtidos na simulação com os dados do artigo – PAC 03. ....	83
Tabela 27 – Comparação dos resultados de tensão e corrente obtidos na simulação com os dados do artigo – PAC 04. ....	84
Tabela 28 – Potências trifásicas obtidas na simulação do <i>Benchmark IEEE-HCD</i> . ....	85
Tabela 29 – Impedâncias harmônicas de referência observadas a partir dos PACs para o <i>Benchmark IEEE-HCD</i> implementado. ....	102
Tabela 30 – Tensões e correntes harmônicas nos PACs – <i>Benchmark IEEE-HCD</i> implementado no <i>Simulink</i> . ....	103
Tabela 31 – Resultados para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão nos PACs do <i>Benchmark IEEE-HCD</i> via o Método da Superposição. ....	103
Tabela 32 – Caracterização das impedâncias dominantes usadas no MID. ....	105
Tabela 33 – Grandezas harmônicas resultantes nos PACs do <i>Benchmark</i> com a conexão das impedâncias dominantes. ....	106
Tabela 34 – Resultados para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão nos PACs do <i>Benchmark IEEE-HCD</i> via o Método da Impedância Dominante. ....	107
Tabela 35 – Variação percentual da tensão fundamental nos PACs e PDs – Método da Impedância Dominante. ....	107
Tabela 36 – Grandezas harmônicas resultantes nos PACs do <i>Benchmark</i> com a conexão dos bancos de capacitores. ....	109
Tabela 37 – Resultados para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão nos PACs do <i>Benchmark IEEE-HCD</i> via o Método do Chaveamento de Capacitores. ....	109
Tabela 38 – Variação percentual da tensão fundamental nos PACs – Método do Chaveamento de Capacitores. ....	110
Tabela 39 – Grandezas harmônicas resultantes nos PACs do <i>Benchmark</i> com a conexão das fontes de corrente harmônicas. ....	111
Tabela 40 – Resultados para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão nos PACs do <i>Benchmark IEEE-HCD</i> via o Método da Injeção de Corrente Harmônica. ....	112
Tabela 41 – Comparação dos resultados de tensão e corrente obtidos na simulação para $TS = 1 \mu s$ e $50 \mu s$ com os dados do artigo – PAC 01. ....	131
Tabela 42 – Comparação dos resultados de tensão e corrente obtidos na simulação para $TS = 1 \mu s$ e $50 \mu s$ com os dados do artigo – PAC 02. ....	132
Tabela 43 – Comparação dos resultados de tensão e corrente obtidos na simulação para $TS = 1 \mu s$ e $50 \mu s$ com os dados do artigo – PAC 03. ....	133
Tabela 44 – Comparação dos resultados de tensão e corrente obtidos na simulação para $TS = 1 \mu s$ e $50 \mu s$ com os dados do artigo – PAC 04. ....	134
Tabela 45 – Resultados dos métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no <i>Benchmark IEEE-HCD</i> – PAC 01: Impedâncias Supridor. ....	137
Tabela 46 – Resultados dos métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no <i>Benchmark IEEE-HCD</i> – PAC 01: Impedâncias Consumidor. ....	138

Tabela 47 – Discrepâncias entre os métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no <i>Benchmark</i> e os dados do artigo – PAC 01. ....	139
Tabela 48 – Resultados dos métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no <i>Benchmark IEEE-HCD</i> – PAC 02: Impedâncias Supridor. ....	140
Tabela 49 – Resultados dos métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no <i>Benchmark IEEE-HCD</i> – PAC 02: Impedâncias Consumidor.....	141
Tabela 50 – Discrepâncias entre os métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no <i>Benchmark IEEE-HCD</i> e os dados do artigo – PAC 02.....	142
Tabela 51 – Resultados dos métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no <i>Benchmark IEEE-HCD</i> – PAC 03: Impedâncias Supridor. ....	143
Tabela 52 – Resultados dos métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no <i>Benchmark IEEE-HCD</i> – PAC 03: Impedâncias Consumidor.....	144
Tabela 53 – Discrepâncias entre os métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no <i>Benchmark</i> e os dados do artigo – PAC 03. ....	145
Tabela 54 – Resultados dos métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no <i>Benchmark IEEE-HCD</i> – PAC 04: Impedâncias Supridor. ....	146
Tabela 55 – Resultados dos métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no <i>Benchmark IEEE-HCD</i> – PAC 04: Impedâncias Consumidor.....	147
Tabela 56 – Discrepâncias entre os métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no <i>Benchmark IEEE-HCD</i> e os dados do artigo – PAC 04.....	148

---

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

---

A	Ampère
AC	Corrente Alternada
AT	Alta Tensão
BC	Banco de Capacitor
BT	Baixa Tensão
C	Capacitância
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CB	Cabo
D	Delta
DCHI <sub>h</sub>	Distorção de corrente harmônica individual de ordem $h$
DTHI <sub>h</sub>	Distorção de tensão harmônica individual de ordem $h$
DCHT	Distorção de corrente harmônica total
DTHT	Distorção de tensão harmônica total
DVR	<i>Dynamic Voltage Restorer</i>
F	Farad
$f$	Frequência
FACTS	<i>Flexible AC Transmission System</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FHP	Filtro Harmônico Passivo
FP	Fator de Potência
H	Henry
h	Ordem harmônica
HCD	<i>Harmonic Contribution Determination</i>
HVDC	<i>High Voltage Direct Current</i>
Hz	Hertz
ICA	<i>Independent Component Analysis</i>
IEC	<i>International Electrotechincal Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
k	Quilo
km	Quilômetro

L	Indutância
LED	Light Emitting Diode
LT	Linha de Transmissão
M	Mega
m	Mili
MCC	Método do Chaveamento de Capacitores
MIC	Método da Injeção de Corrente Harmônica
MID	Método da Impedância Dominante
MT	Média Tensão
NQEE	Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica
NT	Nota Técnica
ONS	Operador Nacional do Sistema
P	Potência Ativa
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PD	Parâmetro de Dominância
PES	<i>Power and Energy Society</i>
PLL	<i>Phase-locked Loop</i>
pu	por unidade
Q	Potência Reativa
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
R	Resistência
RL	Resistivo-Indutivo
RMS	<i>Root Mean Square</i>
s	segundo
S	Potência Aparente
SE	Subestação
SGM	Sinal da Gaussiana Modulada
SIN	Sistema Interligado Nacional
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensator</i>
SVC	<i>Series Var Compensator</i>
SWRDFT	<i>Sliding Window Recursive Discrete Fourier Transform</i>
TBE	<i>Tustin/Backward Euler</i>
TR	Transformador
$T_s$	Passo de integração

UFPR	Universidade Federal do Paraná
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
V	Volt
VA	Volt-Ampère
VAr	Volt-Ampère reativo
W	Watt
X	Reatância
$\alpha$	Ângulo de disparo
$\mu$	Micro
$\Omega$	Ohm



---

# SUMÁRIO

---

## CAPÍTULO I

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
<b>1.1 Contextualização do tema</b>	<b>24</b>
<b>1.2 Objetivos e contribuições do trabalho</b>	<b>27</b>
<b>1.3 Estrutura da dissertação</b>	<b>28</b>

## CAPÍTULO II

<b>2 ESTADO DA ARTE E INTRODUÇÃO AO <i>BENCHMARK IEEE-HCD30</i></b>	
<b>2.1 Métodos destinados ao compartilhamento de responsabilidades harmônicas</b>	<b>32</b>
<b>2.2 Estimação de impedâncias harmônicas</b>	<b>35</b>
2.2.1 Injeção de correntes harmônicas senoidais	37
2.2.2 Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais adjacentes às harmônicas de modo individual	38
2.2.3 Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais adjacentes às harmônicas de modo simultâneo	40
2.2.4 Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais em pacotes	40
2.2.5 Injeção de correntes do tipo Gaussiana Modulada	41
<b>2.3 <i>Benchmark IEEE-HCD</i> para estudos sobre a determinação de contribuições harmônicas</b>	<b>43</b>
2.3.1 Rede AT e subestação AT/MT	45
2.3.2 Linhas, cabos e transformadores dos consumidores	46
2.3.3 Consumidor 01	47
2.3.4 Consumidor 02	48
2.3.5 Consumidor 03	49
2.3.6 Condições de operação do sistema	50
2.3.7 Tensões, correntes e impedâncias para a condição de operação C	52

## CAPÍTULO III

---

### 3 IMPLEMENTAÇÃO DO *BENCHMARK IEEE-HCD* NO *SIMULINK* 55

3.1 Configurações adotadas na simulação	57
3.2 Rede de alta tensão	57
3.3 Transformadores	58
3.4 Linhas e cabos	60
3.5 Bancos de capacitores e filtro harmônico passivo dessintonizado	61
3.6 Cargas	63
3.6.1 Retificadores	63
3.6.2 Cargas RL	65
3.6.3 Motor de indução	66
3.7 Medidores de tensão, corrente e potência	72

## CAPÍTULO IV

---

### 4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO *BENCHMARK* IMPLEMENTADO 75

4.1 Validação do funcionamento do motor de indução	76
4.1.1 Teste 1: Resposta do motor à variação da condição imposta para potência ativa consumida e fator de potência	77
4.1.2 Teste 2: Resposta do motor à variação da tensão da barra de suprimento	79
4.2 Tensões e correntes	81
4.3 Potências	84
4.4 Impedâncias	85
4.5 Aplicação preliminar do Método da Superposição para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas	93

## CAPÍTULO V

---

### 5 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DAS METODOLOGIAS PARA O COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES HARMÔNICAS UTILIZANDO O *BENCHMARK IEEE-HCD* 101

5.1 Aplicação do Método da Superposição no <i>Benchmark</i>	102
5.2 Aplicação do Método da Impedância Dominante (MID) no <i>Benchmark</i>	104
5.3 Aplicação do Método do Chaveamento de Capacitores (MCC) no <i>Benchmark</i>	108
5.4 Aplicação do Método da Injeção de Corrente Harmônica (MIC) no <i>Benchmark</i>	110

5.5 Análise de desempenho das metodologias de compartilhamento de responsabilidades implementadas no <i>Benchmark</i>	113
<b>CAPÍTULO VI</b>	
<b>6 CONCLUSÕES</b>	<b>118</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>122</b>
<b>APÊNDICE A</b>	
<b>A. TENSÕES E CORRENTES OBTIDAS NAS SIMULAÇÕES DO <i>BENCHMARK</i></b>	<b>130</b>
<b>APÊNDICE B</b>	
<b>B. RESULTADOS DOS MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DE IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS UTILIZANDO O <i>BENCHMARK IEEE-HCD</i></b>	<b>135</b>
B.1 PAC 01	137
B.2 PAC 02	140
B.3 PAC 03	143
B.4 PAC 04	146
<b>ANEXO A</b>	
<b>A. APRESENTAÇÃO DAS METODOLOGIAS PARA DETERMINAÇÃO DAS RESPONSABILIDADES SOBRE DISTORÇÕES HARMÔNICAS</b>	<b>149</b>
<b>A.1 Método da Superposição</b>	<b>150</b>
A.1.1 Método da Superposição de Correntes	152
A.1.2 Método da Superposição de Tensões	154
<b>A.2 Método da Impedância Dominante</b>	<b>156</b>
A.2.1 Considerações acerca do grau de dominância da impedância	160
<b>A.3 Método do Chaveamento de Capacitores</b>	<b>161</b>
<b>A.4 Método da Injeção de Corrente Harmônica</b>	<b>166</b>

---

# CAPÍTULO I

---

## 1 INTRODUÇÃO

---

Este trabalho está inserido na área da qualidade da energia elétrica, mais precisamente, na temática do compartilhamento de responsabilidades harmônicas. Assim sendo, este capítulo introdutório tem o propósito de apresentar a contextualização do tema abordado nesta dissertação, definir os objetivos e as contribuições deste trabalho e, por fim, detalhar a estrutura estabelecida para apresentação dos desenvolvimentos científicos.

## 1.1 Contextualização do tema

O fornecimento de energia elétrica com qualidade é uma das premissas norteadoras das agências reguladoras e concessionárias de eletricidade ao redor do mundo. Neste contexto, dentre os fenômenos que impactam a qualidade da energia (QEE) em sistemas elétricos, há de se reconhecer que a intensificação das distorções harmônicas nos últimos anos tem atraído a atenção não somente das agências reguladoras e concessionárias, mas também dos consumidores industriais e comerciais.

Este crescente incremento das distorções harmônicas se deve, principalmente, à contínua conexão de componentes não lineares em todos os níveis dos sistemas elétricos (geração, transmissão e distribuição), a qual se justifica por uma série de fatores. Primeiramente, no contexto das instalações industriais, comerciais e residenciais, a busca por maior eficiência e confiabilidade tem contribuído para a incorporação da eletrônica nos equipamentos elétricos, o que conseqüentemente pode acarretar na distorção das formas de onda de corrente e tensão devido à mudança na natureza da carga [1]. Dentre estes equipamentos, destacam-se os controladores de velocidade (*adjustable-speed drives*) em motores elétricos; fontes eletronicamente chaveadas para computadores, televisores e demais equipamentos eletrônicos; sistemas de iluminação em LED (*light emitting diode*) e lâmpadas fluorescentes [2],[3]. Ainda, reconhece-se que a popularização dos veículos elétricos, no futuro, poderá contribuir, de maneira significativa, na geração de distorções harmônicas nos sistemas de distribuição, haja vista a característica não linear dos carregadores de suas baterias [4].

No tocante à transmissão de energia, encontram-se os FACTS (*Flexible AC Transmission System*), os quais compreendem sistemas de transmissão em corrente alternada que incorporam controladores baseados nas tecnologias de eletrônica de potência. FACTS objetivam aumentar a capacidade de transferência de energia, bem como melhorar o controle do fluxo de potência, no entanto, trazem como consequência a injeção de distorções harmônicas no sistema [5]. Entre os controladores FACTS destacam-se: o SVC (*static var compensator*), o STATCOM (*static synchronous compensator*) e o DVR (*dynamic voltage restorer*). A presença de equipamentos não lineares nas redes de transmissão também é percebida nos sistemas de transmissão em corrente contínua (HVDC – *high voltage direct current*) devido às estações inversoras e retificadoras necessárias para integração com a rede em corrente alternada. Apesar desse ponto desfavorável, os sistemas HVDC possuem uma gama de aplicações, como a interconexão de sistemas em corrente alternada (AC) de diferentes frequências, transmissões via cabos subterrâneos ou subaquáticos, e transmissões em distâncias relativamente longas, que

têm sido adotadas em países como Brasil [6] e China [7], pois nestas situações estes se tornam economicamente vantajosos [8].

Quando se trata da geração de energia, mais uma vez dispositivos não lineares estão presentes, neste caso, nos conversores de potência que provêm a conexão da geração eólica e fotovoltaica com o sistema elétrico interligado. Estes tipos de geração renovável têm se tornado parte significativa da matriz elétrica de diversos países, inclusive do Brasil, que possui 11,8% da sua capacidade instalada no Sistema Interligado Nacional (SIN) proveniente de fontes eólicas e solares (jun./2020) [9]. Além da geração concentrada, os sistemas fotovoltaicos na modalidade de geração distribuída apresentaram crescimentos exponenciais nos últimos anos, atingindo a marca de 3 GW de potência instalada em jun./2020 no Brasil [10]. O crescimento no número de empreendimentos de energia eólica e fotovoltaica justifica-se, entre outros motivos, pelos compromissos assumidos por diversos países em diminuir a utilização de combustíveis fósseis e reduzir as emissões de gases poluentes [11]. Por fim, os sistemas armazenadores de energia via baterias também compreendem elementos de característica não linear com potencial de aplicação em todos os níveis do sistema elétrico, principalmente em decorrência do aumento das fontes de geração intermitentes (eólica e fotovoltaica) [11].

Apesar da situação ter tomado maiores proporções recentemente, a preocupação com harmônicos existe há várias décadas, e isso se justifica, sobretudo, pelos diversos impactos que as distorções de tensão e corrente podem causar em equipamentos diversos existentes nos sistemas elétricos, com destaque a eventos tais como: sobreaquecimentos, sobrecargas, aumento das perdas, operações indevidas e rádio interferências [1],[3],[12]. Estes efeitos podem acometer de forma significativa a confiabilidade, segurança e vida útil dos mais diversos equipamentos elétricos, sobretudo: bancos de capacitores, transformadores, equipamentos eletrônicos, etc.

Neste contexto, objetivando garantir um correto e satisfatório desempenho dos sistemas, documentos normativos nacionais [13],[14] e internacionais [15],[16] têm buscado o estabelecimento de indicadores e limites para as distorções de tensão e/ou corrente. Complementarmente, no caso brasileiro, devido ao crescimento exponencial das solicitações de conexão de sistemas de geração eólica e fotovoltaica na Rede Básica, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), buscando aperfeiçoar os meios para avaliação dos níveis de distorção harmônica, bem como propor soluções para os casos de ultrapassagem dos limites postos para os indicadores de QEE, publicou a NT 009/2016, hoje em sua terceira revisão [17], que visa a esclarecer e detalhar os requisitos referentes aos estudos e campanhas de medição de QEE

indispensáveis ao processo de conexão de agentes perturbadores à Rede Básica, cujas instalações não lineares possam comprometer o desempenho da mesma.

Em geral, uma vez constatados valores superiores aos limites preconizados para as distorções harmônicas, faz-se necessária a proposição de medidas mitigatórias, as quais, via de regra, se baseiam na filtragem harmônica ativa ou passiva, o que pode demandar altos custos de investimento. Entretanto, tendo em mente que a distorção harmônica constatada em um ponto de acoplamento comum (PAC) é o resultado da interação entre as diversas fontes de distorção existentes no sistema elétrico [1],[3], surge o interesse de se determinar, entre os agentes conectados naquele ponto (supridores e consumidores), as parcelas de responsabilidade sobre as distorções harmônicas encontradas, principalmente visando à distribuição dos custos dos procedimentos de mitigação entre os agentes responsáveis. Neste sentido, devido à extrema relevância desta questão para a temática da QEE, a comunidade científica tem buscado, ao longo dos últimos 20 anos, propor, por meio de diferentes estratégias, métodos precisos, confiáveis e de prática implementação em campo, que estabeleçam as parcelas de responsabilidade harmônica entre as partes envolvidas [18]-[23]. Muitos avanços foram estabelecidos ao longo destes anos, no entanto, ainda não existe um consenso sobre o mais adequado procedimento para determinação das responsabilidades harmônicas [18]. Assim, é válido destacar que, atualmente, as normativas nacionais e internacionais, anteriormente citadas, não exigem a determinação destas parcelas de responsabilidade.

Salienta-se que as justificativas da crescente conexão de dispositivos não lineares nos sistemas elétricos, anteriormente elencadas, corroboram as mudanças estruturais que permeiam o setor elétrico mundial: *descentralização, descarbonização e digitalização* [11]. Portanto, pode-se admitir que tais mudanças se tratam, de fato, de uma tendência para os próximos anos e, assim, a temática do compartilhamento de responsabilidades harmônicas se fará ainda mais necessária.

Concomitantemente às pesquisas por metodologias capazes de determinar o compartilhamento de responsabilidades harmônicas, surge a necessidade do estabelecimento de sistemas-teste de referência para que métodos propostos possam ser verificados, bem como para que diferentes metodologias possam ser comparadas [24]. Neste contexto, buscando preencher tal lacuna e auxiliar nos trabalhos desenvolvidos por esta linha de pesquisa, a força tarefa em modelagem harmônica e simulação do IEEE-PES (*Institute of Electrical and Electronics Engineers - Power and Energy Society Task Force on Harmonics Modeling and Simulation*) desenvolveu um sistema teste de referência para avaliação de métodos que visam à determinação de contribuições harmônicas (*Benchmark IEEE-HCD*) [24]. HCD é a sigla para

*harmonic contribution determination*. Este sistema foi concebido para representar, de maneira mais realística, um sistema elétrico suprindo consumidores industriais. O sistema foi originalmente desenvolvido no software de simulação de transitórios eletromagnéticos PSCAD™, entretanto, neste trabalho, o sistema será implementado em um outro ambiente gráfico amplamente utilizado para modelagem e simulação de sistemas elétricos, qual seja: o simulador *Simulink*® do MATLAB®. Portanto, o detalhamento da implementação do sistema teste do IEEE no *Simulink* ainda será foco de estudo deste trabalho em capítulos subsequentes.

A justificativa para o desenvolvimento do *Benchmark* no *Simulink* se sustenta, entre outras razões, pelo fato do ambiente de desenvolvimento MATLAB ter sido adotado como software de modelagem e simulação de sistemas elétricos padrão do Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia (NQEE-UFU), uma vez que o mesmo é amplamente utilizado e aceito pela comunidade acadêmica e, até mesmo, possibilita a integração com sistemas de simulação em tempo real (*OPAL-RT*, *Speedgoat*). Por conseguinte, a partir da implementação do *Benchmark* no *Simulink*, o mesmo poderá ser utilizado em conjunto com os demais modelos já implementados pelo NQEE neste ambiente, os quais incluem modelos de aerogeradores eólicos, filtros ativos, sistemas de armazenamento de energia, conversores fotovoltaicos, veículos elétricos, sistemas HVDC, etc.

## 1.2 Objetivos e contribuições do trabalho

A partir do contexto apresentado, esta dissertação tem como objetivo principal a implementação do *Benchmark IEEE-HCD*, no ambiente gráfico *Simulink*® MATLAB®, para a avaliação computacional de métodos para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas. Este sistema-teste de referência foi desenvolvido pela *IEEE-PES Task Force on Harmonics Modeling and Simulation* e foi originalmente implementado no software PSCAD™. Assim, as seguintes contribuições diretas podem ser elencadas:

- Apresentação do estado da arte atual em que se encontra esta pesquisa no contexto do compartilhamento de responsabilidades harmônicas;
- Implementação, no ambiente gráfico *Simulink*, do *Benchmark IEEE-HCD*.
- Avaliação de desempenho do *Benchmark* implementado no *Simulink* por meio da comparação dos resultados obtidos com aqueles provenientes do arranjo originalmente simulado;



- Implementação no *Simulink*, análise, avaliação crítica e comparação de diferentes procedimentos para obtenção de impedâncias harmônicas baseados na injeção de sinais de corrente;
- Aplicação, análise crítica e comparação das principais metodologias para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas utilizando o *Benchmark* do IEEE.

### 1.3 Estrutura da dissertação

Visando a atingir os objetivos ora expostos, além do presente capítulo introdutório, o conteúdo desta dissertação está organizado conforme se segue:

#### **Capítulo 2 – Estado da arte e introdução ao *Benchmark IEEE-HCD***

No Capítulo 2 encontra-se disposto o estado da arte atual sobre a temática do compartilhamento de responsabilidades harmônicas, no contexto dos objetivos e contribuições propostas por este trabalho. Por fim, tem-se a descrição do sistema-teste de referência desenvolvido pela *IEEE-PES Task Force on Harmonics Modeling and Simulation* para avaliação de métodos que visam à determinação das contribuições harmônicas em sistemas elétricos.

#### **Capítulo 3 – Implementação do *Benchmark IEEE-HCD* no *Simulink***

O Capítulo 3 compreende a apresentação pormenorizada da modelagem computacional do *Benchmark IEEE-HCD* realizada no ambiente gráfico *Simulink* do MATLAB. Neste capítulo cada parte do sistema-teste é detalhada e tem sua parametrização elucidada.

#### **Capítulo 4 – Avaliação de desempenho do *Benchmark* implementado**

Dando sequência ao desenvolvimento do trabalho, o Capítulo 4 apresenta os resultados da simulação do sistema implementado no *Simulink*. Desta maneira, é possível avaliar o desempenho do *Benchmark* frente aos resultados obtidos na publicação original, a qual introduz o sistema à comunidade científica. Este capítulo também contempla a análise das impedâncias harmônicas obtidas, a partir da aplicação dos procedimentos descritos no Capítulo 2, no *Benchmark* implementado.

## **Capítulo 5 – Avaliação de desempenho das metodologias para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas utilizando o *Benchmark IEEE-HCD***

Após avaliado o desempenho do *Benchmark* implementado, o Capítulo 5 inclui a avaliação de desempenho das principais metodologias para compartilhamento de responsabilidades harmônicas empregando o *Benchmark IEEE-HCD*, quais sejam: Método da Superposição, Método da Impedância Dominante, Método do Chaveamento de Capacitores e Método da Injeção de Corrente Harmônica. Neste capítulo, são realizadas comparações e análises críticas dos resultados advindos dos distintos métodos ora selecionados.

## **Capítulo 6 – Conclusões**

O Capítulo 6 sintetiza os avanços realizados neste trabalho, bem como as conclusões alcançadas. Ainda, a partir das contribuições da dissertação, são elencadas sugestões de trabalhos futuros na área de pesquisa.

## **Apêndice A – Tensões e correntes obtidas nas simulações do *Benchmark***

No Apêndice A são incluídos os resultados de tensão e corrente obtidos a partir da simulação do *Benchmark* com diferentes passos de integração, neste caso, 50  $\mu$ s e 1  $\mu$ s, para efeito de comparação da resposta do sistema implementado.

## **Apêndice B – Resultados dos métodos de estimação de impedâncias harmônicas utilizando o *Benchmark IEEE-HCD***

No Apêndice B são apresentados os resultados das impedâncias observadas a partir dos PACs do *Benchmark IEEE-HCD*. Tais resultados são obtidos a partir da aplicação dos métodos de estimação de impedâncias, via implementações e simulações no *Simulink*.

## **Anexo A – Apresentação das metodologias para determinação das responsabilidades sobre distorções harmônicas**

O Anexo A apresenta os fundamentos físicos e os desenvolvimentos matemáticos de cada um dos métodos para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas selecionados para serem avaliados utilizando o *Benchmark IEEE-HCD*.

---

# CAPÍTULO II

---

## 2 ESTADO DA ARTE E INTRODUÇÃO AO *BENCHMARK IEEE-HCD*

---

Este capítulo é composto pela apresentação do estado da arte acerca da temática do compartilhamento de responsabilidades harmônicas, no contexto da presente dissertação. Portanto, contempla-se um levantamento do atual estado de conhecimento sobre os sistemas-teste de referência para estudos nesta linha de pesquisa e os trabalhos relacionados, bem como uma síntese das principais metodologias propostas na literatura para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas. Ademais, percebeu-se, ao longo do desenvolvimento do trabalho, a necessidade de se incluir o detalhamento dos principais métodos para obtenção computacional das impedâncias harmônicas do arranjo implementado. Por fim, tem-se a descrição pormenorizada do *Benchmark IEEE-HCD*, foco deste trabalho.

Segundo o dicionário Cambridge, *benchmark* é um adjetivo usado para caracterizar algo que é adotado como um padrão para comparação ou avaliação de outras coisas. Neste sentido, é fato que, o estabelecimento de diferentes tipos de *benchmarks* é importante, pois trata-se de uma ferramenta muito utilizada em diversas áreas do conhecimento quando se pretende definir situações e/ou condições padrão para análise e avaliação de diferentes metodologias, técnicas ou procedimentos vinculados ao desenvolvimento científico em geral.

No contexto da Engenharia Elétrica, principalmente em se tratando de estudos em sistemas elétricos, foram estabelecidos ao longo dos anos diferentes sistemas-teste de referência (*Benchmark Test Systems*) para estudos de variadas temáticas relacionadas aos sistemas elétricos. Dentre os sistemas-teste consagrados podem ser citados os arranjos para estudos de fluxo de potência pelo IEEE (*IEEE 13 Bus Feeder* [25], *IEEE 14 Bus Test Case* [26], *IEEE 34 Bus Feeder* [25] e *IEEE 57 Bus Test Case* [26]), e aqueles propostos pelo CIGRE para estudos sobre HVDC [27] e para estudos a respeito da integração de recursos energéticos renováveis e distribuídos em sistemas elétricos [28]. Também é proposto em [29] um sistema-teste para estudos sobre microgrids em rede.

Além disso, com relação a estudos sobre distorções harmônicas, a força tarefa em modelagem harmônica e simulação do IEEE – PES (*IEEE-PES Task Force on Harmonics Modeling and Simulation*) propôs, em 1999, três sistemas-teste de referência para auxiliar as pesquisas a respeito de métodos para análise harmônica [30]. Dois destes arranjos compreendem o sistema-teste IEEE 14 barras e o sistema-teste IEEE 13 barras modificados, de maneira a incluir cargas harmônicas modeladas como fontes de corrente. O terceiro arranjo é um sistema de distribuição industrial de 13 barras, no qual as cargas harmônicas também são modeladas por fontes de corrente.

Mais recentemente, no contexto da temática do compartilhamento de responsabilidades harmônicas, frente à demanda por um método confiável, seguro e prático, que determine as contribuições harmônicas dos vários agentes conectados a um mesmo ponto de acoplamento comum, reconhece-se a necessidade do estabelecimento de um ou mais sistemas elétricos de referência para verificação e teste de métodos de compartilhamento, assim como para possibilitar a comparação de diferentes métodos por meio de simulações computacionais. Nesse sentido, de forma a suprir esta demanda e auxiliar nas pesquisas sobre o compartilhamento de responsabilidades harmônicas, a *IEEE-PES Task Force on Harmonics Modeling and Simulation* desenvolveu um sistema-teste de referência para avaliação de metodologias que visam à determinação de contribuições harmônicas.

Este sistema-teste foi apresentado à comunidade científica em 2018 através do artigo intitulado “*A Benchmark Test System to Evaluate Methods of Harmonic Contribution Determination*” [24], e foi inicialmente implementado no software de simulação de transitórios eletromagnéticos PSCAD. Os arquivos necessários para a sua simulação foram disponibilizados no *website* da *IEEE-PES Task Force on Harmonics Modeling and Simulation* [31]. Além disso, também foram disponibilizados no *website* os valores das tensões, correntes e impedâncias, fundamentais e harmônicas, observados nos PACs nas simulações das distintas condições do sistema.

A partir do levantamento bibliográfico realizado, observou-se que, até o presente momento, devido à sua recente publicação, somente cinco trabalhos utilizaram o *Benchmark IEEE-HCD*, na sua forma original ou com algumas modificações, para a realização de simulações e investigações a respeito do compartilhamento de responsabilidades harmônicas [32]-[36]. É válido destacar que não foi identificado na literatura a implementação deste sistema-teste em outro software de simulação de circuitos elétricos, além do PSCAD. Além disso, no tocante à proposição de *benchmark test systems* para estudos de compartilhamento harmônico, não foi encontrado, no levantamento bibliográfico realizado, nenhum outro sistema-teste proposto para este fim.

Assim sendo, em razão da relevância deste *benchmark* para os estudos sobre o compartilhamento de responsabilidades harmônicas, este trabalho se propõe a implementá-lo em outro software de modelagem e simulação de sistemas elétricos largamente reconhecido pela comunidade acadêmica, o *Simulink* do MATLAB.

Como este *Benchmark* é o principal objeto de estudo desta dissertação, a descrição pormenorizada de suas partes constituintes será explorada na sequência. Entretanto, por ser central no desenvolvimento deste trabalho, apresenta-se, primeiramente, uma síntese dos métodos de compartilhamento de responsabilidades harmônicas propostos ao longo destes anos, seguidos das metodologias para estimação de impedâncias harmônicas baseadas na injeção de correntes.

## **2.1 Métodos destinados ao compartilhamento de responsabilidades harmônicas**

Em decorrência das mudanças ocorridas, sobretudo, na operação e na natureza das cargas e dos equipamentos dos sistemas elétricos ao longo dos anos, a temática do compartilhamento de responsabilidades harmônicas se tornou de extrema relevância para a área

de qualidade da energia. Neste sentido, a mesma tem sido alvo de extensas investigações, com o objetivo de, especialmente, estabelecer uma metodologia que seja capaz de estimar, de forma confiável e prática, as contribuições harmônicas dos diferentes agentes conectados em um sistema elétrico.

O primeiro procedimento com foco na atribuição de responsabilidades harmônicas foi publicado ainda nos anos 90 e chama-se Método do Fluxo de Potência Harmônica [37]-[39]. Este procedimento objetiva identificar a fonte de distorção dominante no PAC de interesse, sem determinar percentuais de responsabilidades. Para tanto, o mesmo se fundamenta na análise da direção da potência harmônica ativa. Entretanto, alguns trabalhos publicados demonstraram que a utilização deste método proporciona resultados incorretos e que existem fragilidades na sua formulação, até mesmo para apontamento da dominância [40],[41].

Também nos anos 90 foi proposto o Método da Corrente Conforme e Não Conforme [42],[43], o qual, como o próprio nome sugere, considera que as correntes das cargas podem ser separadas em duas parcelas, uma tratada como linear (conforme) e outra como não linear (não conforme). Esta metodologia foi cuidadosamente avaliada em [44], e chegou-se à conclusão que existem fragilidades nas simplificações adotadas. Além disso, tanto na simulação computacional quanto nos ensaios laboratoriais, esta metodologia atribuiu responsabilidades de forma imprópria.

Em meados dos anos 2000 foi publicado o método para compartilhamento de responsabilidades mais difundido na literatura até os dias atuais. O Método da Superposição [45],[46] se destaca pela sua fundamentação nos princípios básicos de solução de circuitos elétricos. Apesar de proporcionar resultados consistentes e ser utilizado como gabarito em muitos trabalhos [47],[48], este procedimento encontra fortes obstáculos para sua implementação prática. O principal motivo de sua limitação está na necessidade de se conhecer as impedâncias harmônicas dos agentes envolvidos, as quais não se encontram, na grande maioria dos casos, disponíveis e podem ser de difícil estimativa, principalmente em se tratando da impedância do consumidor [49]-[51]. Destaca-se que esta metodologia permite a obtenção das responsabilidades sobre as distorções harmônicas de tensão e de corrente.

A busca por meios para contornar as dificuldades envolvidas na aplicação prática do Método da Superposição culminou na proposição do Método da Impedância Dominante, também conhecido como Método da Superposição Modificado [47]. O princípio norteador desta metodologia está baseado na conexão de uma impedância com característica dominante sobre as demais no PAC, para estimação das parcelas de responsabilidade harmônica de tensão das partes envolvidas no processo. Não havendo, assim, a necessidade do conhecimento das

respectivas impedâncias harmônicas. A impedância dominante a ser conectada pode ser conseguida a partir da utilização de filtros harmônicos passivos, sintonizados na ordem em que se deseja determinar o compartilhamento. Dando continuidade nas pesquisas envolvendo esta metodologia, é proposto em [48] um parâmetro chamado de parâmetro de dominância. A avaliação deste parâmetro permite predizer se o filtro utilizado está sendo efetivo para aplicação da metodologia. Não obstante à fundamentação física consistente e ao desempenho promissor demonstrado por esta metodologia, cabe ressaltar que a mesma é um processo invasivo e, portanto, pode impactar no desempenho do sistema.

Nos últimos anos têm sido propostas algumas metodologias que possuem fundamentações comuns, conhecidas por: métodos baseados na mudança de estado controlada da rede elétrica. Dentre estes procedimentos, se destacam: o Método do Chaveamento de Capacitores [48],[52], o Método da Injeção de Corrente Harmônica [48] e o Método do Isolamento Harmônico [53],[54]. Conforme seus princípios de operação sugerem, estas metodologias utilizam de técnicas de mudança de estado controladas para estabelecerem duas condições operativas distintas, sendo, geralmente, uma correspondente à operação original, e outra ocasionada a partir de alterações controladas. Apesar de partilharem do mesmo princípio, as estratégias adotadas em tais metodologias, para o estabelecimento dos estados necessários, diferem entre si. O Método do Chaveamento de Capacitores, por exemplo, alcança este objetivo a partir da variação de potência ocasionada pela inclusão e/ou remoção de estágios de bancos de capacitores, enquanto que o Método da Injeção de Corrente Harmônica e o Método do Isolamento Harmônico se baseiam na injeção de correntes harmônicas controladas. Estes procedimentos têm se mostrado promissores na obtenção dos percentuais de responsabilidade harmônica de tensão e, além disso, apresentam a vantagem de dispensarem o conhecimento das impedâncias harmônicas e de possuírem características pouco invasivas [55].

Não obstante aos métodos supracitados, reconhece-se também a existência de procedimentos baseados em outros princípios, os quais incluem: métodos de regressão [56],[57], análise de componentes independentes complexos (*complex ICA*) [58], redes neurais [59], Teoria de Potência Conservativa [60], entre outros.

À luz destas considerações, foram escolhidos três métodos para serem avaliados utilizando o *Benchmark* implementado no *Simulink*, sendo eles: o Método da Impedância Dominante, o Método do Chaveamento de Capacitores e o Método da Injeção de Corrente Harmônica. Estes métodos foram escolhidos, neste trabalho, pois têm apresentado, em diversos estudos, resultados consistentes e promissores para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão. Além disso, são de fácil implementação computacional e ainda permitem

a comparação entre diferentes estratégias para a obtenção das parcelas de responsabilidade. Ademais, o Método da Superposição será utilizado para o estabelecimento dos valores de referência do sistema implementado. Assim, visando a melhor orientar a utilização de tais metodologias, tem-se no Anexo A uma descrição pormenorizada dos fundamentos físicos e dos desenvolvimentos matemáticos das quatro metodologias elencadas.

Por fim, pode-se observar que os métodos selecionados têm por foco a determinação das contribuições de tensões harmônicas, em detrimento à investigação de correntes. Este fato se justifica pois, em geral, as normas técnicas internacionais e, sobretudo, nacionais adotam como valores limites de referência, tão somente as tensões harmônicas medidas [13],[14].

## 2.2 Estimação de impedâncias harmônicas

É conhecido na literatura diversos procedimentos para obtenção de impedâncias harmônicas em sistemas elétricos, no entanto, o princípio utilizado por estes métodos é comum, em sua maioria. Basicamente, os métodos utilizam da variação nos valores de tensão e corrente nos arranjos elétricos para cálculo da impedância pela lei de Ohm [61]. A origem da variação das grandezas elétricas permite dividir os métodos para determinação das impedâncias harmônicas em dois grandes grupos: métodos não invasivos e invasivos.

A primeira categoria utiliza as tensões e correntes harmônicas já existentes nos sistemas. Apesar da vantagem de não provocarem distúrbios nos sistemas elétricos e possuírem custo reduzido em comparação com os métodos invasivos, estes métodos, geralmente, apresentam resultados menos eficazes que os invasivos, pois, devido à utilização do conteúdo harmônico pré-existente, pode-se não abranger todo o espectro de frequência de interesse [61]-[63].

Os métodos invasivos, por outro lado, tendem a proporcionar resultados mais precisos, todavia, com a desvantagem dos distúrbios externos aplicados poderem provocar impactos adversos nos sistemas. Por este motivo, pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de propor métodos menos invasivos, mas que atinjam grau de precisão satisfatório.

Os procedimentos invasivos ainda podem ser subdivididos, conforme a natureza da perturbação provocada, em métodos passivos, que compreendem chaveamentos de elementos passivos tais como bancos de capacitores, e métodos ativos, que contemplam a injeção de sinais controlados no sistema [49].

Uma vez que a avaliação do *Benchmark* estudado nesta dissertação contempla a obtenção das impedâncias harmônicas observadas a partir dos PACs do arranjo, tanto para o sistema equivalente do supridor quando do consumidor, percebeu-se a necessidade de estudar



os métodos apresentados na literatura para estimação das impedâncias harmônicas, com foco nos métodos invasivos baseados na injeção de correntes.

Esta escolha foi feita uma vez que as perturbações provocadas por fontes de corrente podem ser totalmente controladas, o que diminui o impacto da perturbação no sistema e aumenta a precisão da estimação [63]. Além disso, como o estudo é computacional, não existem preocupações de ordem prática, como a necessidade de um equipamento preciso e robusto para injeção dos sinais de corrente conforme estabelecido nos procedimentos, ou mesmo dificuldades com relação às medições das grandezas elétricas e cuidados com possíveis ressonâncias. Outro motivo se fundamenta na própria publicação do *Benchmark* utilizar um método baseado na injeção de correntes inter-harmônicas para obtenção das impedâncias do sistema. Portanto, além deste método, outros métodos baseados na injeção de correntes foram selecionados com o intuito de comparar os resultados para a estimação das impedâncias do *Benchmark IEEE-HCD*.

Geralmente, deseja-se obter as impedâncias do sistema para as frequências harmônicas, isto é, aquelas múltiplas da frequência fundamental. Nesse sentido, conforme o nome propõe, a ideia geral dos métodos baseados na injeção de correntes é injetar um sinal de corrente conhecido e controlado, em uma dada frequência de interesse, medir a corrente injetada e a tensão resultante e calcular a impedância, para esta frequência, a partir da lei de Ohm [61]. No entanto, esta metodologia é recomendada somente nas situações em que a tensão no barramento, na situação do consumidor desconectado, não possui componentes harmônicas, isto é, quando o sistema não possui distorções pré-existentes (*background distortions*) nas mesmas ordens em que se deseja obter as impedâncias harmônicas [61],[64]. Assim, caso haja *background distortions* no sistema nas frequências iguais àquelas dos sinais injetados, existem duas possibilidades para contornar essa dificuldade [61]:

- a) injetar sinais de corrente em frequências diferentes daquelas das distorções pré-existentes e utilizar métodos de interpolação para obter as impedâncias nas frequências de interesse;
- b) injetar sinais de correntes em frequências iguais daquelas das distorções pré-existentes no sistema e subtrair os valores prévios destas distorções de tensão e corrente dos valores medidos durante a injeção do sinal.

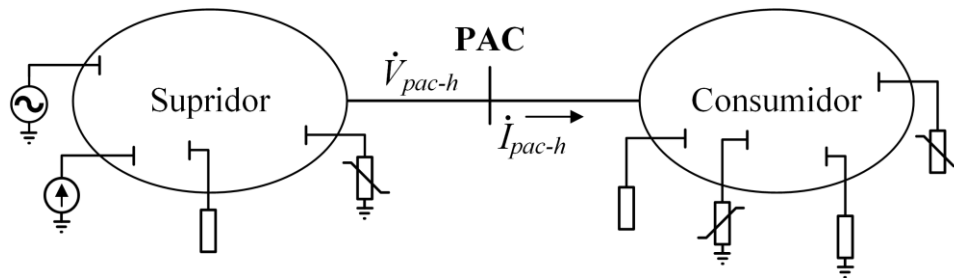
Como o sistema-teste do IEEE compreende um arranjo com dois consumidores que possuem equipamentos não lineares, admite-se a existência de *background distortions* nos PACs de cada consumidor nas frequências harmônicas de injeção característica dos

equipamentos não lineares existentes (5ª, 7ª, 11ª, 13ª, etc.). Portanto, tendo em mente estas duas alternativas, bem como a possibilidade de injetar sinais de diferentes formas, os métodos estudados neste trabalho são apresentados na sequência, os quais também são empregados em análises a serem realizadas quando da validação do *Benchmark* implementado.

### 2.2.1 Injeção de correntes harmônicas senoidais

Para facilitar a explicação deste método, será utilizado o arranjo mostrado na Figura 1, o qual representa o ponto de acoplamento comum em que se deseja obter as impedâncias harmônicas equivalentes do sistema supridor e do consumidor.

Figura 1 – Arranjo elétrico genérico de um PAC conectando supridor e consumidor.



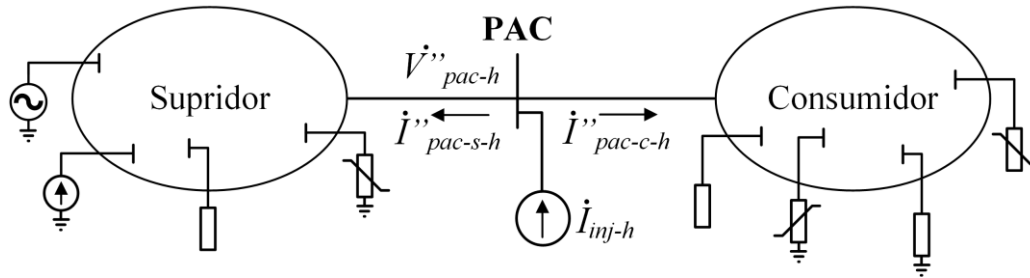
Fonte: Autoria própria.

Conforme mencionado, considera-se a existência de *background distortions* nas frequências harmônicas, portanto, na Figura 1,  $\dot{V}_{pac-h}$  e  $\dot{I}_{pac-h}$  correspondem à tensão e à corrente harmônica, para uma dada ordem  $h$ , presentes no PAC.

Este método consiste em injetar correntes senoidais nas mesmas ordens em que se deseja estimar as impedâncias harmônicas. Para aumentar a precisão do método, recomenda-se que as injeções sejam feitas separadamente, para cada ordem harmônica  $h$  de interesse [62].

A Figura 2 demonstra as grandezas envolvidas na injeção de corrente realizada no PAC, para uma dada ordem  $h$ , sendo  $\dot{V}''_{pac-h}$  a tensão presente no PAC durante a injeção do sinal de corrente  $\dot{I}_{inj-h}$  neste ponto de acoplamento. As correntes  $\dot{I}''_{pac-s-h}$  e  $\dot{I}''_{pac-c-h}$  correspondem as correntes que fluem em direção ao circuito equivalente do supridor e do consumidor, respectivamente, nesta nova condição.

Figura 2 – Arranjo representando a injeção de corrente no PAC para estimação das impedâncias harmônicas do supridor e consumidor.



Fonte: Autoria própria.

Assim sendo, após coletados os dados correspondentes as tensões e correntes nas duas situações apresentadas e calculadas as componentes harmônicas utilizando a transformada rápida de fourier (FFT), pode-se estimar a impedância harmônica observada a partir do PAC, para o sistema supridor e o consumidor, para cada ordem harmônica  $h$ , a partir das equações (1) e (2), respectivamente [49],[61].

$$\dot{Z}_{supridor-h} = \frac{\dot{V}''_{pac-h} - \dot{V}_{pac-h}}{\dot{I}''_{pac-s-h} - (-\dot{I}_{pac-h})} \quad (1)$$

$$\dot{Z}_{consumidor-h} = \frac{\dot{V}''_{pac-h} - \dot{V}_{pac-h}}{\dot{I}''_{pac-c-h} - (\dot{I}_{pac-h})} \quad (2)$$

### 2.2.2 Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais adjacentes às harmônicas de modo individual

Uma outra alternativa para a estimação de impedâncias harmônicas em sistemas com distorções pré-existentes, é injetar correntes senoidais em frequências diferentes daquelas das distorções presentes no sistema, geralmente, inter-harmônicas [61],[65], quando o interesse é a determinação das impedâncias nas ordens harmônicas. Dessa forma, como não existem distorções prévias nas frequências injetadas, não é necessário realizar a subtração das tensões/correntes existentes.

Neste contexto, a literatura contempla injeções de correntes em diferentes frequências inter-harmônicas, sendo apresentada nesta seção a injeção de correntes nas frequências adjacentes às múltiplas da fundamental. Por exemplo, tomando como base um arranjo elétrico com frequência fundamental de 50 Hz, como é o caso do *Benchmark IEEE-HCD*, para o cálculo da 2ª ordem harmônica (100 Hz), deve-se injetar correntes nas frequências 99 Hz ( $f-1$ ) e 101

Hz ( $f+1$ ). Considera-se neste método, que a injeção destes sinais é realizada separadamente, ou seja, uma frequência inter-harmônica de cada vez.

Após injetados os sinais na frequência ( $f-1$ ), é possível calcular as impedâncias, nesta frequência, para o sistema supridor e o consumidor, de acordo com as equações (3) e (4), nesta ordem.

$$\dot{Z}_{supridor-(f-1)} = \frac{\dot{V}''_{pac-(f-1)}}{\dot{I}''_{pac-s-(f-1)}} \quad (3)$$

$$\dot{Z}_{consumidor-(f-1)} = \frac{\dot{V}''_{pac-(f-1)}}{\dot{I}''_{pac-c-(f-1)}} \quad (4)$$

Agora, repete-se o mesmo procedimento para a frequência ( $f+1$ ), e calcula-se as impedâncias do sistema supridor e consumidor, de acordo com as equações (5) e (6), respectivamente.

$$\dot{Z}_{supridor-(f+1)} = \frac{\dot{V}''_{pac-(f+1)}}{\dot{I}''_{pac-s-(f+1)}} \quad (5)$$

$$\dot{Z}_{consumidor-(f+1)} = \frac{\dot{V}''_{pac-(f+1)}}{\dot{I}''_{pac-c-(f+1)}} \quad (6)$$

As variáveis utilizadas nas equações (3) a (6) correspondem àquelas mostradas na Figura 2, entretanto, substituiu-se o índice  $h$ , pelos índices  $f-1$  e  $f+1$ , onde  $f$  corresponde às frequências das ordens harmônicas (50 Hz, 100 Hz, 150 Hz, etc).

Finalmente, as impedâncias nas ordens harmônicas  $h$  são calculadas pela interpolação daquelas obtidas nas frequências  $f-1$  e  $f+1$ , conforme mostrado na equação (7) para a impedância do sistema supridor, e na equação (8) para a impedância do consumidor.

$$\dot{Z}_{supridor-h} = \frac{\dot{Z}_{supridor-(f-1)} + \dot{Z}_{supridor-(f+1)}}{2} \quad (7)$$

$$\dot{Z}_{consumidor-h} = \frac{\dot{Z}_{consumidor-(f-1)} + \dot{Z}_{consumidor-(f+1)}}{2} \quad (8)$$

É importante destacar que para obtenção dos componentes inter-harmônicos das grandezas de tensão e corrente, é necessário aplicar a FFT por um período maior do que 1 ciclo

da frequência fundamental. Nos casos abordados, como utiliza-se dos componentes nas frequências  $f-1$  e  $f+1$ , é necessário ter uma resolução espectral de 1 Hz. Dada a frequência fundamental de 50 Hz, isso significa que são necessários 50 ciclos para obtenção dos componentes inter-harmônicos desejados.

### **2.2.3 Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais adjacentes às harmônicas de modo simultâneo**

Objetivando-se a diminuição do tempo de execução do procedimento, o qual muitas vezes se apresenta como um problema proeminente em diversos estudos, é proposto na literatura que sejam feitas injeções de vários sinais simultaneamente [62].

Trata-se, portanto, da mesma metodologia ressaltada na subseção anterior, todavia, a única diferença é que os sinais senoidais de correntes nas frequências  $f-1$  e  $f+1$  são injetados simultaneamente, para cada frequência harmônica de interesse.

### **2.2.4 Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais em pacotes**

Uma terceira variação do método de injeção de correntes inter-harmônicas é indicada e utilizada no artigo de apresentação do *Benchmark IEEE-HCD* [24]. Este método também segue a mesma metodologia apresentada na seção 2.2.2 para o cálculo das impedâncias, entretanto, são injetados sinais em outras frequências inter-harmônicas simultaneamente, além daqueles utilizados para cálculo da impedância ( $f-1$  e  $f+1$ ).

Isso significa que a injeção é feita em pacotes. O primeiro pacote corresponde à injeção de correntes com frequências entre 1 Hz e 49 Hz, com passo de 1 Hz. Após a injeção, calcula-se as impedâncias das partes para a frequência de 49 Hz, que corresponde a  $f-1$ , para  $f = 50$  Hz, conforme as equações apresentadas. O segundo pacote compreende a injeção de correntes entre as frequências 51 Hz e 99 Hz, com o mesmo passo de 1 Hz. Agora, calcula-se a impedância para as frequências das extremidades, 51 Hz, que corresponde a  $f+1$ , para  $f = 50$  Hz, e para 99 Hz, que corresponde a  $f-1$ , mas agora para  $f = 100$  Hz. Continua-se a realizar a injeção para os demais pacotes, até a frequência final de interesse.

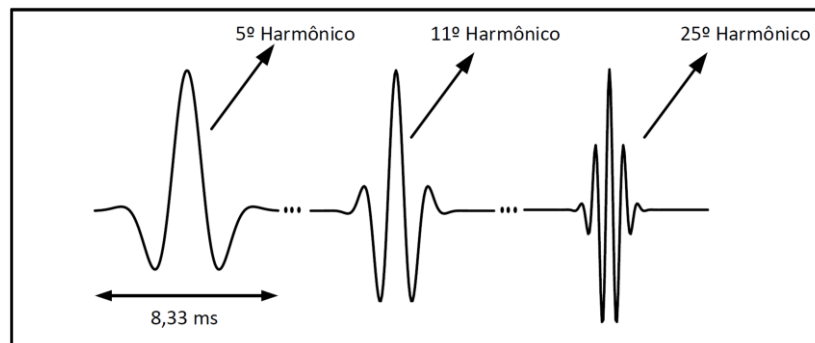
Ao final, em posse de todos os valores de impedância para as frequências  $f-1$  e  $f+1$ , com  $f = 50$  Hz, 100 Hz, 150 Hz.. etc), calcula-se as impedâncias de acordo com as equações (7) e (8), respectivamente para o sistema supridor e consumidor.

### 2.2.5 Injeção de correntes do tipo Gaussiana Modulada

Este último procedimento é proposto em [63],[66]. Em suma, a metodologia emprega a injeção de um sinal de corrente do tipo Gaussiana Modulada (SGM), o qual pode ser chamado de perturbação. Este sinal possui uma frequência de modulação de igual valor daquela em que se deseja estimar a impedância.

Na Figura 3 tem-se um exemplo de sinal de perturbação injetado para estimação das harmônicas de 5ª, 11ª e 25ª ordens.

Figura 3 – Formas de onda do SGM para a 5ª, 11ª e 25ª ordens harmônicas, com duração de 8,33 ms.

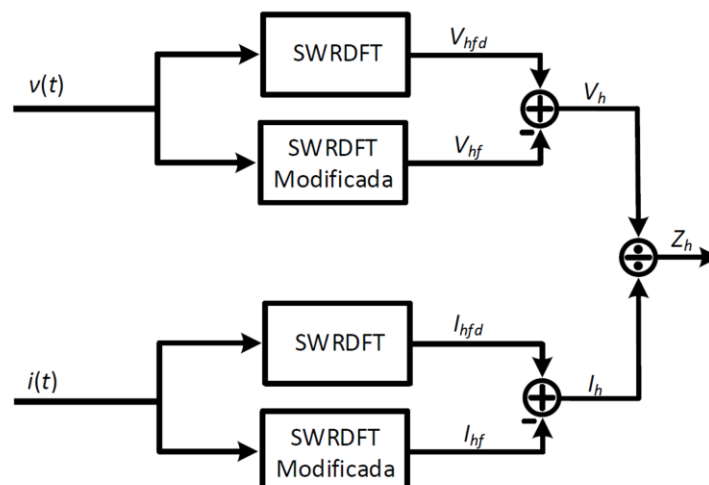


Fonte: [63].

A duração de 8,33 ms corresponde a meio ciclo do componente fundamental, neste caso para sistemas de 60 Hz. Lembrando que, os sinais, para cada ordem harmônica, devem ser injetados separadamente.

O diagrama de blocos ilustrativo desta metodologia é mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Esquemático completo da estrutura de estimação de impedância.



Fonte: Adaptado de [63].

Assim, após a injeção da perturbação, é realizado o processamento dos sinais de corrente e tensão resultantes. Este processamento é feito, basicamente, por filtros do tipo SWRDFT (*sliding window recursive discrete fourier transform*). Como os sinais injetados são modulados nas frequências múltiplas da fundamental, também é necessário considerar, durante o processamento dos sinais, a possibilidade de existência de *background distortions*. Nesse caso, é utilizado um segundo filtro do tipo SWRDFT chamado de filtro SWRDFT Modificado, para eliminação dos harmônicos pré-existentes na barra. Este procedimento é feito tanto para a tensão quanto para a corrente.

Após o processamento dos sinais de tensão e corrente, do lado do consumidor e do supridor, é possível realizar o cálculo das correspondentes impedâncias harmônicas, nas respectivas ordens de avaliação.

Ressalta-se, ainda, que este procedimento tem diversas particularidades no que tange ao estabelecimento do sinal a ser injetado e também em relação ao tratamento dos sinais no momento posterior à injeção da perturbação. Não obstante à breve explanação, enfatiza-se que uma descrição detalhada desta metodologia, com seus respectivos equacionamentos, pode ser verificada na referência [63].

Como todos os procedimentos descritos nesta seção serão aplicados em um estudo computacional, não há dificuldades ou limitações na injeção de sinais com frequências inter-harmônicas próximas às múltiplas da fundamental, bem como na injeção de sinais do tipo Gausiana Modulada, entretanto, reconhece-se que, em situações práticas, são necessárias maiores considerações sobre a aplicação destes procedimentos, tanto com relação à precisão e robustez do equipamento utilizado para a injeção destes sinais, quanto à medição e ao posterior processamento das grandezas medidas.

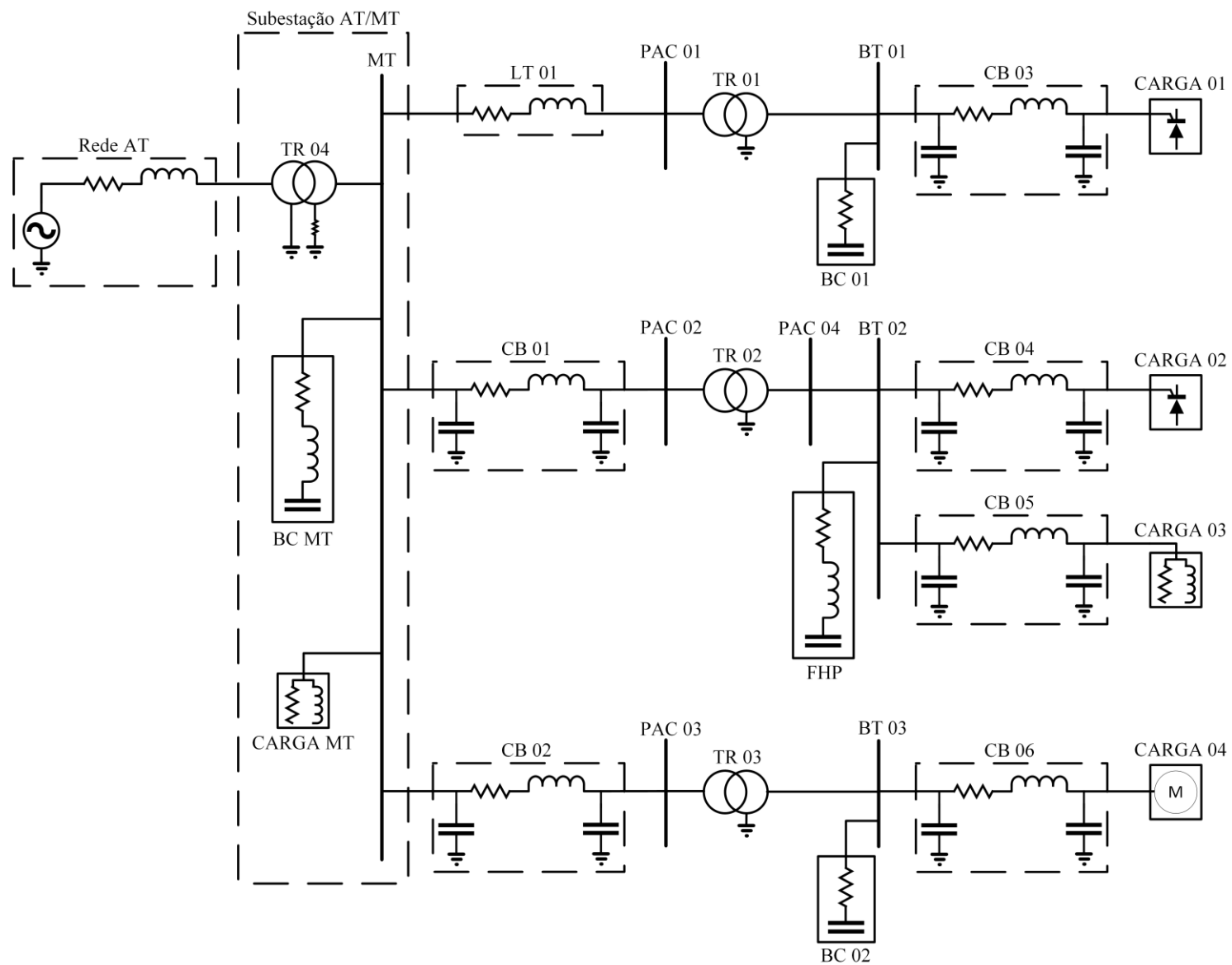
Por fim, com relação à magnitude dos sinais injetados, sugere-se em [24] a injeção de correntes de pequenas magnitudes em comparação com a corrente fundamental daquele barramento, entretanto, não é informado o valor percentual considerado adequado.

## **2.3 Benchmark IEEE-HCD para estudos sobre a determinação de contribuições harmônicas**

O *Benchmark IEEE-HCD* representa uma típica rede elétrica com distintos níveis de tensão: alta tensão (AT), média tensão (MT) e baixa tensão (BT), suprindo cargas industriais [24]. Uma das premissas adotadas é que o sistema seja o mais realístico possível. Portanto, a simulação é trifásica e realizada no domínio do tempo; as fontes de distorções harmônicas também são modeladas no domínio do tempo a partir de seus próprios arranjos e componentes, e não por fontes equivalentes de tensão ou corrente, como foi proposto inicialmente em [30]. O sistema está capacitado para inclusão de cenários que envolvam situações de ressonâncias. O sistema-teste de referência, trifásico e equilibrado, é mostrado na Figura 5.



Figura 5 – Sistema-teste de referência para estudos de contribuições harmônicas (*Benchmark IEEE-HCD*).



Fonte: Adaptado de [24].

O arranjo consiste de uma subestação abaixadora (AT/MT), a qual apresenta um barramento de MT, que, por sua vez, conecta três consumidores industriais, utilizando três distintos alimentadores. Cada consumidor possui seu respectivo PAC, em MT, os quais estão indicados na Figura 5. Além dos consumidores, encontram-se também conectados nesta subestação: um banco de capacitores para correção de fator de potência e uma carga trifásica resistiva-indutiva, pertencentes ao sistema da concessionária. Destaca-se que os consumidores são compostos, via de regra, por cargas lineares e não lineares, além de bancos de capacitores e filtros harmônicos passivos. A frequência nominal do sistema é 50 Hz, a qual será mantida para efeitos de testes neste trabalho dissertativo. A configuração e os parâmetros de cada parte do sistema são detalhados na sequência.

### 2.3.1 Rede AT e subestação AT/MT

O circuito de AT consiste de uma rede equivalente em 110 KV nominais (1 pu), com 3200 MVA de potência de curto-circuito e razão X/R igual a 10. Este circuito alimenta, por sua vez, o transformador abaixador contido na subestação AT/MT. Este transformador está designado por TR 04 na Figura 5. Destaca-se que o neutro, do lado de MT desse transformador, é aterrado por intermédio de um resistor de 80 ohms, com o objetivo de limitar as correntes de faltas fase-terra. As especificações deste transformador foram inseridas na Tabela 1.

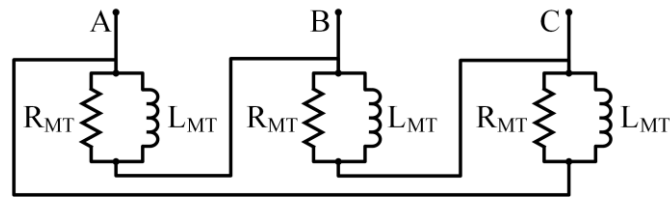
Tabela 1 – Parâmetros do transformador da subestação AT/MT.

<b>Transformador</b>	<b>TR 04</b>
Potência Nominal	20 MVA
Frequência Nominal	50 Hz
Tensão Primária/Secundária	110 kV/21 kV
Conexão dos Enrolamentos	YNyn
Reatância de dispersão (Seq. +)	11%
Perdas a vazio	0 W
Perdas no cobre	0 W
Saturação	-

Fonte: [24].

A carga conectada diretamente na barra MT da subestação (CARGA MT) consiste de um arranjo com um resistor ( $R_{MT}$ ) em paralelo com um indutor ( $L_{MT}$ ), conectados em delta, conforme mostrado na Figura 6. Os parâmetros desta carga podem ser ajustados para atender diferentes condições do sistema.

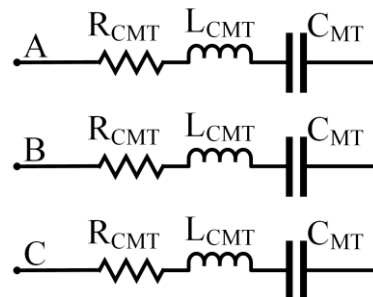
Figura 6 – Carga conectada à barra MT – CARGA MT.



Fonte: Adaptado de [24].

A subestação também possui um banco de capacitores (BC MT). A conexão do banco é mostrada na Figura 7, onde o mesmo é composto por unidades capacitivas ( $C_{MT}$ ) com resistores ( $R_{CMT}$ ) e indutores de *inrush* ( $L_{CMT}$ ) em série, conectados em Y.

Figura 7 – Banco de capacitores conectado à barra MT – BC MT.



Fonte: Adaptado de [24].

Ademais, caso seja desejado, é possível incluir, segundo orientações contidas em [24], distorções pré-existentes na rede (*background distortions*) pela conexão de fontes de tensão harmônicas, nas frequências de interesse, em série com fonte de tensão fundamental em AT.

### 2.3.2 Linhas, cabos e transformadores dos consumidores

As linhas aéreas de MT são modeladas como resistores em série com indutores, enquanto que, para os cabos isolados, utiliza-se o modelo PI. O modelo PI possui, além do resistor em série com o indutor, capacitores em paralelo nas duas extremidades. Todos os parâmetros das linhas e cabos de MT são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Especificações das linhas e cabos de MT.

<b>Tipo de Linha</b>	<b>LT 01</b>	<b>CB 01</b>	<b>CB 02</b>
Nível de Tensão Nominal	20 kV	20 kV	20 kV
Resistência / km	0,57 $\Omega$ /km	0,5 $\Omega$ /km	0,5 $\Omega$ /km
Indutância / km	0,38 mH/km	0,45 mH/km	0,45 mH/km
Capacitância / km	-	0,09 $\mu$ F/km	0,09 $\mu$ F/km
Comprimento	1 km	2 km	1,5 km

Fonte: [24].

Todas as linhas de BT são modeladas como cabos isolados, portanto, utiliza-se também o modelo PI. As especificações de tais cabos são indicadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Especificações dos cabos de BT.

<b>Tipo de Linha</b>	<b>CB 03</b>	<b>CB 04</b>	<b>CB 05</b>	<b>CB 06</b>
Nível de Tensão Nominal	0,4 kV	0,4 kV	0,4 kV	0,4 kV
Resistência	0,006 $\Omega$	0,002 $\Omega$	0,002 $\Omega$	0,0015 $\Omega$
Indutância	0,3 mH	0,1 mH	0,2 mH	0,05 mH
Capacitância	0,0005 $\mu$ F	0,0002 $\mu$ F	0,0003 $\mu$ F	0,0001 $\mu$ F

Fonte: [24].

Os transformadores que alimentam cada consumidor possuem conexão Dyn11, isto é, primário em delta com tensão atrasada  $30^\circ$  do secundário, que possui, por sua vez, conexão Y diretamente aterrado. As informações destes transformadores são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros dos transformadores dos consumidores.

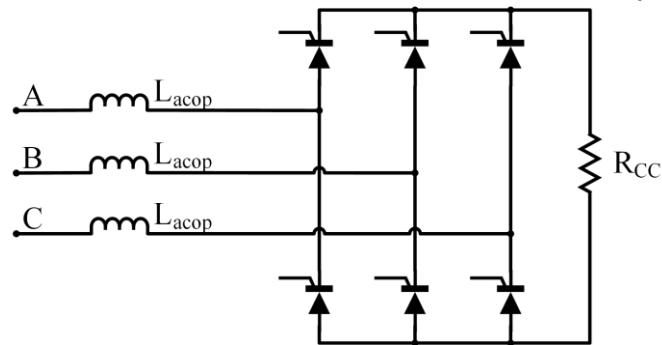
<b>Transformador</b>	<b>TR 01</b>	<b>TR 02 e TR 03</b>
Potência Nominal	0,4 MVA	1 MVA
Frequência Nominal	50 Hz	50 Hz
Tensão Primária/Secundária	21 kV/420 V	21 kV/420 V
Conexão dos Enrolamentos	Dyn11	Dyn11
Reatância de dispersão (Seq. +)	4%	6%
Perdas a vazio	0 W	0 W
Perdas no cobre	0 W	0 W
Saturação	-	-

Fonte: [24].

### 2.3.3 Consumidor 01

O PAC do Consumidor 01 é chamado de PAC 01 e está localizado no lado de MT do TR 01. Este consumidor possui como carga um retificador trifásico controlado a tiristor (CARGA 01), o qual é conectado por meio de cabos (CB 03) à sua barra BT. Sabe-se que um retificador é uma fonte de distorções harmônicas. O retificador é controlado por meio de um ângulo de disparo ( $\alpha$ ), o qual é sincronizado com a tensão de alimentação do retificador por intermédio de uma malha de captura de fase, também chamada de *Phase Locked Loop* (PLL). O arranjo do retificador é detalhado na Figura 8.

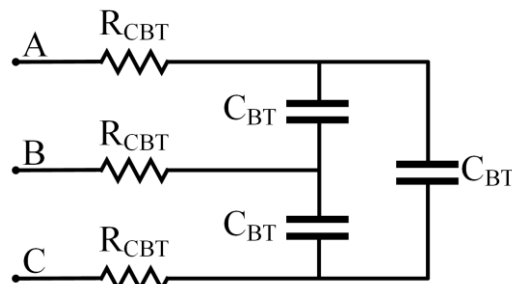
Figura 8 – Retificador trifásico controlado a tiristor – CARGA 01 e CARGA 02.



Fonte: Adaptado de [24].

O Consumidor 01 também possui um banco de capacitores conectado à sua barra BT (BC 01) para correção de fator de potência. Tal banco é modelado pela conexão delta das unidades capacitivas ( $C_{BT}$ ), com resistores série conectados aos terminais de alimentação ( $R_{CBT}$ ), conforme mostrado na Figura 9. Os valores das capacitâncias podem ser ajustados para acomodar diferentes condições do sistema.

Figura 9 – Banco de capacitores em BT – BC 01 e BC 02.



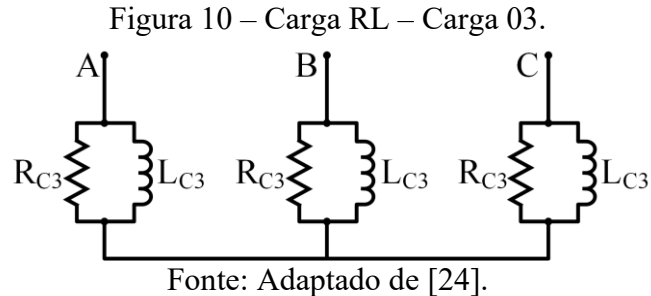
Fonte: Adaptado de [24].

### 2.3.4 Consumidor 02

O PAC do Consumidor 02 é chamado de PAC 02, onde está conectado o TR 02. Além disso, um segundo PAC, interno à instalação do Consumidor 2 foi definido. Este PAC é chamado de PAC 04 e se encontra no lado BT do TR 02.

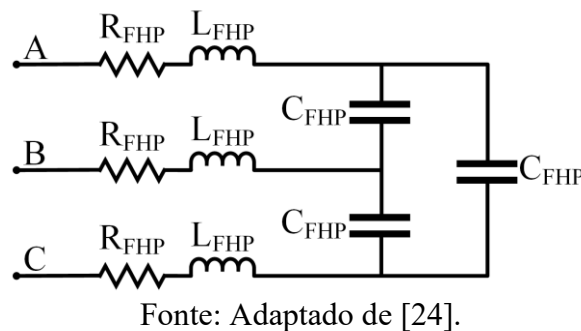
Este consumidor também possui como carga um retificador trifásico controlado a tiristor (CARGA 02) conectado por meio de cabos (CB 04) à sua barra BT. A segunda carga deste consumidor é uma carga trifásica linear (CARGA 03) também conectada por intermédio de cabos (CB 05) à sua barra BT. O retificador possui a mesma estrutura da CARGA 01, mostrada na Figura 8, enquanto que a CARGA 03 é uma carga linear equilibrada que compreende uma resistência ( $R_{C3}$ ) e uma indutância ( $L_{C3}$ ) em paralelo, por fase, conectadas em Y, conforme

apresentado na Figura 10. Os parâmetros da CARGA 03 podem ser ajustados para atender diferentes condições do sistema.



O Consumidor 02 ainda possui um filtro harmônico passivo dessintonizado (FHP) conectado à sua barra BT para correção de fator de potência e também para compensação das correntes harmônicas injetadas pelo retificador. O filtro é composto por unidades capacitivas ( $C_{FHP}$ ) conectadas em delta, com resistores ( $R_{FHP}$ ) e indutores ( $L_{FHP}$ ) série conectados aos terminais de alimentação, conforme indicado na Figura 11. Os parâmetros do filtro podem ser ajustados para acomodar diferentes pontos de ressonância.

Figura 11 – Filtro harmônico passivo dessintonizado – FHP.

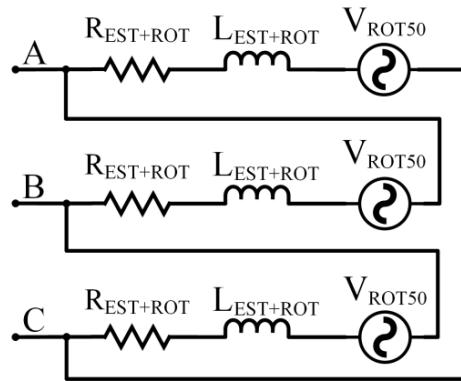


### 2.3.5 Consumidor 03

O PAC do Consumidor 03 é chamado de PAC 03, e está localizado no lado MT do TR 03. Este consumidor possui somente cargas lineares, sendo uma delas um motor de indução trifásico (CARGA 04) conectado por meio de cabos (CB 06) à sua barra BT. O motor de indução opera com torque constante, e conseqüentemente com escorregamento constante, na condição de tensão constante, portanto, pode ser modelado usando um circuito equivalente de rotor bloqueado com uma fonte de tensão ( $V_{ROT50}$ ) para representar a potência do rotor para a carga, conforme mostrado na Figura 12. Esta fonte de tensão pode ser modificada para acomodar diferentes pontos de operação a frequência fundamental de 50 Hz, estando curto-

circuitada para as componentes harmônicas. As resistências e indutâncias do estator e do rotor são combinadas em uma única resistência ( $R_{EST+ROT}$ ) e indutância ( $L_{EST+ROT}$ ). Os parâmetros do motor são indicados na Tabela 5, e destaca-se que o efeito pelicular não foi considerado.

Figura 12 – Motor de indução trifásico – CARGA 04.



Fonte: Adaptado de [24].

Tabela 5 – Parâmetros do motor de indução – CARGA 04.

Potência Nominal	P = 600 kW
Resistência estator + rotor	$R_{EST+ROT} = 0,012 \Omega$
Indutância estator + rotor	$L_{EST+ROT} = 0,133 \text{ mH}$

Fonte: [24].

O Consumidor 03 também possui um banco de capacitores conectado à sua barra BT (BC 02) para correção de fator de potência. Tal banco é modelado conforme o BC 01, apresentado na Figura 9, e os valores das capacitâncias podem ser ajustados para acomodar diferentes condições do sistema.

### 2.3.6 Condições de operação do sistema

O *Benchmark* em questão pode ser operado em 3 diferentes condições, as quais são chamadas de condição A, B e C. As condições A e B são muito similares, com modificações somente nos parâmetros do motor de indução e do banco de capacitores do Consumidor 03. Nestas condições A e B, tanto o filtro harmônico, quanto as cargas do Consumidor 02 estão desligadas, portanto somente o Consumidor 01 possui cargas não lineares.

Na condição C, todos os equipamentos estão conectados, desta maneira existem duas fontes harmônicas – Consumidores 01 e 02. Ainda, os parâmetros para os Consumidores 01 e 03 são os mesmos da condição A. Os parâmetros para as três condições são detalhados na

Tabela 6. Os mesmos foram selecionados de maneira a manter, em todas as condições, uma ressonância no sistema, próxima à 11ª ordem harmônica.

Tabela 6 – Parâmetros para as três condições de operação do *Benchmark IEEE-HCD*.

Elementos do Sistema	Condição A	Condição B	Condição C
<b>Consumidor 01</b>			
Retificador a tiristor (CARGA 01)	$\alpha = 12^\circ$ $L_{acop} = 0,1 \text{ mH}$ $R_{CC} = 1 \Omega$	$\alpha = 12^\circ$ $L_{acop} = 0,1 \text{ mH}$ $R_{CC} = 1 \Omega$	$\alpha = 12^\circ$ $L_{acop} = 0,1 \text{ mH}$ $R_{CC} = 1 \Omega$
Banco de capacitores (CB 01)	$C_{BT} = 597 \text{ uF}$ $R_{CBT} = 0,00533 \Omega$	$C_{BT} = 597 \text{ uF}$ $R_{CBT} = 0,00533 \Omega$	$C_{BT} = 597 \text{ uF}$ $R_{CBT} = 0,00533 \Omega$
<b>Consumidor 02</b>			
Retificador a tiristor (CARGA 02)	desligado	desligado	$\alpha = 12^\circ$ $L_{acop} = 0,1 \text{ mH}$ $R_{CC} = 1 \Omega$
Carga linear (CARGA 03)	desligado	desligado	$R_{C3} = 1 \Omega$ $L_{C3} = 0,01 \text{ H}$
Filtro harmônico passivo (FHP)	desligado	desligado	$C_{FHP} = 786 \text{ uF}$ $L_{FHP} = 0,215 \text{ mH}$ $R_{FHP} = 0,00405 \Omega$
<b>Consumidor 03</b>			
Motor de indução (CARGA 04)	$P = 200 \text{ kW}$ $Q = 96 \text{ kVAr}$ $FP = 0,9$	$P = 600 \text{ kW}$ $Q = 291 \text{ kVAr}$ $FP = 0,9$	$P = 200 \text{ kW}$ $Q = 96 \text{ kVAr}$ $FP = 0,9$
Banco de capacitores (BC 02)	$C_{BT} = 332 \text{ uF}$ $R_{CBT} = 0,00959 \Omega$	$C_{BT} = 995 \text{ uF}$ $R_{CBT} = 0,00320 \Omega$	$C_{BT} = 332 \text{ uF}$ $R_{CBT} = 0,00959 \Omega$
<b>Carga MT</b>			
(CARGA MT)	$L_{MT} = 2 \text{ H}$ $R_{MT} = 180 \Omega$	$L_{MT} = 2 \text{ H}$ $R_{MT} = 180 \Omega$	$L_{MT} = 2 \text{ H}$ $R_{MT} = 180 \Omega$
<b>Banco de capacitores MT</b>			
(BC MT)	desligado	desligado	$C_{MT} = 8,75 \text{ uF}$ $L_{CMT} = 0,5 \text{ mH}$ $R_{CMT} = 0,3638 \Omega$

Fonte: Adaptado de [24].

Conforme já afirmado, a *IEEE-PES Task Force on Harmonics Modeling and Simulation* disponibilizou a modelagem do sistema no software de simulação de transitórios eletromagnéticos PSCAD, havendo, nesta pesquisa, sua devida implementação no simulador *Simulink/MATLAB*, conforme também já justificado no capítulo introdutório desta dissertação. No próximo capítulo tem-se a apresentação da modelagem detalhada *Benchmark* no ambiente gráfico *Simulink* em consonância com a condição de operação C, apresentada na Tabela 6.



Esta condição foi escolhida pois inclui todos os componentes do sistema-teste, o que facilita a avaliação de desempenho do sistema completo. Além disto, esta condição permite avaliar o compartilhamento de responsabilidade harmônicas de forma mais ampla, pois compreende dois consumidores que possuem cargas lineares e não lineares, e um consumidor apenas com cargas lineares. Portanto, a próxima seção inclui a apresentação dos valores informados para as tensões, correntes e impedâncias harmônicas observadas nos PACs do *Benchmark IEEE-HCD* na condição escolhida (condição C), disponibilizados em [31].

### 2.3.7 Tensões, correntes e impedâncias para a condição de operação C

Os valores das tensões e correntes, fundamentais e harmônicas, presentes em cada um dos PACs do sistema-teste, são dispostos na Tabela 7 e na Tabela 8, respectivamente.

Tabela 7 – Tensões nos PACs do *Benchmark IEEE-HCD* na condição de operação C.

Ordem Harmônica	$V_{pac-h}$ (V)	
	PAC 01	PAC 02
1 <sup>a</sup> (50 Hz)	12033,74∠- 92,71°	12025∠- 92,72°
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	39,53∠- 3,80°	39,91∠- 1,66°
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	36,13∠- 88,20°	35,92∠- 86,69°
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	38,99∠- 116,97°	39,51∠- 119,77°
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	16,90∠112,44°	17,72∠113,31°
Ordem Harmônica		
	PAC 03	PAC 04
1 <sup>a</sup> (50 Hz)	12032,88∠- 92,71°	239,86∠- 64,21°
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	38,30∠- 2,09°	2,96∠3,79°
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	35,05∠- 87,50°	2,09∠- 15,91°
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	38,77∠- 118,71°	2,57∠- 168,94°
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	17,28∠111,24°	1,74∠- 164,90°

Fonte: Adaptado de [31].

Tabela 8 – Correntes nos PACs do *Benchmark IEEE-HCD* na condição de operação C.

Ordem Harmônica	$I_{pac-h}$ (A)	
	PAC 01	PAC 02
1 <sup>a</sup> (50 Hz)	6,10∠- 104,31°	11,83∠- 99,61°
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	1,96∠86,78°	0,90∠137,58°
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	1,10∠14,39°	0,43∠63,12°
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	0,83∠73,45°	0,31∠- 53,38°
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	0,28∠- 3,86°	0,20∠- 95,51°

<b>Ordem Harmônica</b>	<b>PAC 03</b>	<b>PAC 04</b>
<b>1ª (50 Hz)</b>	5,73∠- 106,70°	591,20∠- 69,61°
<b>5ª (250 Hz)</b>	0,06∠- 88,95°	45,01∠107,59°
<b>7ª (350 Hz)</b>	0,03∠- 173,47°	21,42∠93,16°
<b>11ª (550 Hz)</b>	0,01∠- 59,00°	15,54∠- 83,36°
<b>13ª (650 Hz)</b>	0,01∠- 166,25°	9,45∠- 62,72°

Fonte: Adaptado de [31].

Com o intuito de facilitar a visualização das ordens de grandeza das distorções harmônicas presentes no arranjo, a Tabela 9 sintetiza os valores dos indicadores de distorção de tensão harmônica individuais ( $DTHI_h$ ) e totais ( $DTHT$ ) para os quatro PACs, enquanto que a Tabela 10 inclui os valores dos indicadores de distorção de corrente harmônica individuais ( $DCHI_h$ ) e totais ( $DCHT$ ), calculados conforme estabelecido em [13].

Tabela 9 – Distorções harmônicas, individuais e totais, de tensão nos PACs do *Benchmark IEEE-HCD* na condição de operação C

<b>Ordem Harmônica</b>	<b>PAC 01</b>	<b>PAC 02</b>	<b>PAC 03</b>	<b>PAC 04</b>
	<b><math>DTHI_h</math>(%)</b>			
<b>5ª (250 Hz)</b>	0,328	0,332	0,318	1,234
<b>7ª (350 Hz)</b>	0,300	0,299	0,291	0,871
<b>11ª (550 Hz)</b>	0,324	0,329	0,322	1,071
<b>13ª (650 Hz)</b>	0,140	0,147	0,144	0,725
<b><math>DTHT</math>(%)</b>	0,568	0,574	0,557	1,989

Fonte: Adaptado de [31].

Tabela 10 – Distorções harmônicas, individuais e totais, de corrente nos PACs do *Benchmark IEEE-HCD* na condição de operação C

<b>Ordem Harmônica</b>	<b>PAC 01</b>	<b>PAC 02</b>	<b>PAC 03</b>	<b>PAC 04</b>
	<b><math>DCHI_h</math>(%)</b>			
<b>5ª (250 Hz)</b>	32,131	7,608	1,047	7,613
<b>7ª (350 Hz)</b>	18,033	3,635	0,524	3,623
<b>11ª (550 Hz)</b>	13,607	2,620	0,175	2,629
<b>13ª (650 Hz)</b>	4,590	1,691	0,175	1,598
<b><math>DCHT</math>(%)</b>	39,545	8,990	1,196	8,975

Fonte: Adaptado de [31].

Finalmente, destaca-se na Tabela 11 e na Tabela 12, as impedâncias equivalentes do sistema supridor e do consumidor, observadas a partir dos PACs deste *Benchmark*, na frequência fundamental e demais ordens harmônicas.

Tabela 11 – Impedâncias observadas a partir dos PACs 01 e 02 do *Benchmark IEEE-HCD* na condição de operação C

Ordem Harmônica	PAC 01		PAC 02	
	$Z_{supridor-h} (\Omega)$	$Z_{consumidor-h} (\Omega)$	$Z_{supridor-h} (\Omega)$	$Z_{consumidor-h} (\Omega)$
1ª (50 Hz)	2,69∠74,93°	1916,80∠- 21,73°	2,99∠67,81°	1110,44∠- 9,88°
2ª (200 Hz)	5,39∠78,77°	1813,31∠- 32,21°	5,79∠75,10°	847,80∠- 37,94°
3ª (150 Hz)	8,39∠78,10°	1520,31∠- 47,75°	8,90∠76,35°	545,82∠- 53,22°
4ª (200 Hz)	12,91∠70,68°	1154,12∠- 58,25°	12,42∠75,36°	74,06∠- 59,93°
5ª (250 Hz)	14,66∠74,32°	915,01∠- 67,49°	16,46∠72,83°	289,50∠83,84°
6ª (300 Hz)	19,22∠70,29°	652,85∠- 73,11°	21,50∠69,01°	525,68∠79,60°
7ª (350 Hz)	24,76∠65,09°	438,46∠- 77,08°	27,92∠63,08°	688,60∠75,12°
8ª (400 Hz)	31,68∠57,71°	281,56∠- 76,06°	36,67∠52,92°	810,33∠74,61°
9ª (450 Hz)	40,27∠47,22°	158,65∠- 71,88°	46,70∠33,13°	928,27∠73,53°
10ª (500 Hz)	49,76∠32,13°	56,33∠- 49,56°	34,75∠- 2,29°	1042,32∠74,02°
11ª (550 Hz)	56,43∠12,18°	60,54∠60,72°	35,64∠36,72°	1124,95∠73,16°
12ª (600 Hz)	55,67∠- 8,96°	141,45∠79,40°	54,23∠11,78°	1205,82∠74,30°
13ª (650 Hz)	48,90∠- 26,54°	219,12∠83,62°	52,32∠- 13,94°	1303,59∠74,22°
14ª (700 Hz)	40,83∠- 39,12°	291,22∠85,19°	43,25∠- 31,03°	1395,14∠75,41°
15ª (750 Hz)	33,81∠- 47,69°	358,62∠86,32°	34,69∠- 41,55°	1495,09∠75,50°

Fonte: Adaptado de [31].

Tabela 12 – Impedâncias observadas a partir dos PACs 03 e 04 do *Benchmark IEEE-HCD* na condição de operação C

Ordem Harmônica	PAC 03		PAC 04	
	$Z_{supridor-h} (\Omega)$	$Z_{consumidor-h} (\Omega)$	$Z_{supridor-h} (\Omega)$	$Z_{consumidor-h} (\Omega)$
1ª (50 Hz)	2,90∠72,32°	102,02∠81,29°	0,01∠87,61°	0,45∠- 9,04°
2ª (200 Hz)	5,75∠77,34°	207,24∠85,29°	0,02∠- 89,00°	0,38∠- 28,61°
3ª (150 Hz)	8,92∠77,12°	322,12∠86,58°	0,04∠89,98°	0,25∠- 56,31°
4ª (200 Hz)	13,77∠69,81°	454,30∠87,11°	0,05∠88,78°	0,07∠- 74,05°
5ª (250 Hz)	15,66∠73,45°	614,70∠87,16°	0,06∠89,22°	0,06∠80,54°
6ª (300 Hz)	20,72∠69,19°	826,57∠86,92°	0,07∠88,41°	0,15∠74,05°
7ª (350 Hz)	26,96∠63,03°	1135,94∠86,17°	0,08∠85,91°	0,20∠69,78°
8ª (400 Hz)	35,32∠52,97°	1668,04∠84,49°	0,01∠51,34°	0,25∠68,63°
9ª (450 Hz)	45,04∠33,81°	2892,17∠79,62°	0,10∠80,35°	0,28∠67,07°
10ª (500 Hz)	34,45∠- 1,83°	8551,11∠52,60°	0,11∠83,26°	0,31∠69,23°
11ª (550 Hz)	34,22∠37,33°	5540,89∠- 62,00°	0,13∠84,29°	0,34∠67,25°
12ª (600 Hz)	53,00∠14,46°	2243,99∠- 75,94°	0,13∠80,82°	0,36∠69,08°
13ª (650 Hz)	53,42∠- 10,67°	1322,04∠- 79,00°	0,13∠80,39°	0,40∠69,27°
14ª (700 Hz)	45,83∠- 28,53°	880,44∠- 79,72°	0,14∠83,88°	0,41∠70,25°
15ª (750 Hz)	37,82∠- 40,04°	614,08∠- 79,31°	0,15∠86,19°	0,45∠70,35°

Fonte: Adaptado de [31].

As grandezas dispostas nesta seção, a partir deste ponto, são citadas no decorrer desta dissertação como sendo os dados informados no artigo de apresentação do *Benchmark*.

---

# CAPÍTULO III

---

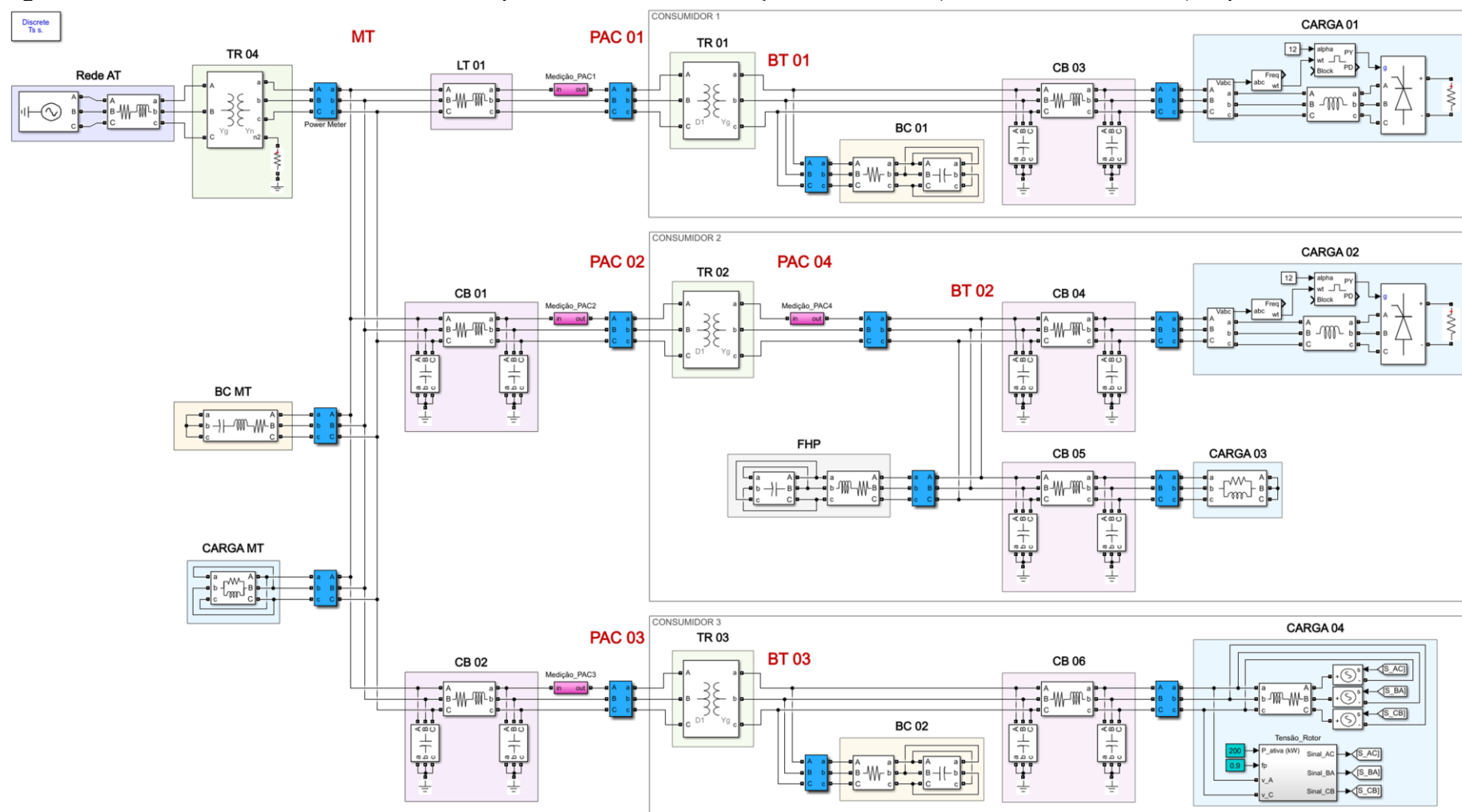
## 3 IMPLEMENTAÇÃO DO *BENCHMARK IEEE-HCD* NO *SIMULINK*

---

Este capítulo contempla a apresentação pormenorizada da implementação do *Benchmark IEEE-HCD* realizada no ambiente gráfico do MATLAB, o *Simulink*.

O sistema completo implementado no *Simulink* é mostrado na Figura 13. Percebe-se que a estrutura geral de disposição dos elementos constituintes do sistema encontra-se de acordo com aquela mostrada no capítulo anterior.

Figura 13 – Sistema-teste de referência do IEEE para estudos de contribuições harmônicas (*Benchmark IEEE-HCD*) implementado no *Simulink*.



Fonte: Autoria própria.

No presente trabalho, optou-se por realizar, conforme já mencionada, a implementação do sistema em consonância com a condição de operação C.

A exposição das partes constituintes do sistema será dividida de acordo com os tipos de componentes utilizados, conforme os blocos coloridos indicados na Figura 13. Entretanto, primeiramente, as configurações adotadas na simulação são apresentadas.

### 3.1 Configurações adotadas na simulação

Para a implementação do *Benchmark* utilizou-se o ambiente de programação gráfica *Simulink*, na versão 2017b do ambiente de desenvolvimento MATLAB, em conjunto com as *toolboxes Simscape e Simscape Power Systems* (atualmente *Simscape Electrical*).

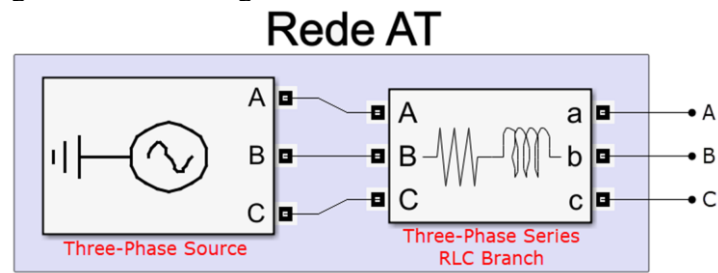
Com relação aos parâmetros de configuração do modelo (*Model Configuration Parameters*), selecionou-se o *solver discrete (no continuous states)* do tipo *Fixed-step*. Além disso, adotou-se um passo de integração fixo (*Fixed-step size – fundamental sample time*) e, neste caso, utilizou-se a variável  $T_S$  para representar o tamanho do passo, uma vez que pode ser desejado pelo usuário modificar este parâmetro. Ainda, incluiu-se no modelo o bloco *powergui*, no qual também foi selecionado o tipo de simulação como *discrete*, o *sample time* como  $T_S$  e o *discrete solver* foi mantido como o padrão *Tustin/Backward Euler* (TBE).

Estas configurações foram escolhidas, pois permitem a solução do modelo de forma discretizada em passos fixos ( $T_S$ ) ao longo de todo período de simulação. Além disso, sabe-se que, geralmente, a precisão dos resultados aumenta com a diminuição do passo/tempo de amostragem utilizado [67]. Como será apresentado adiante, dois passos de integração diferentes foram testados na avaliação dos resultados da simulação, sendo eles:  $1 \mu\text{s}$  e  $50 \mu\text{s}$ . O tempo de simulação adotado, via de regra, foi de 3 segundos.

É importante que tais premissas, correlatas à simulação, sejam evidenciadas pelo fato de que os resultados obtidos podem se mostrar discrepantes, caso haja significativas alterações das mesmas.

### 3.2 Rede de alta tensão

O equivalente da rede de alta tensão corresponde a uma fonte de tensão em série com uma impedância, que por sua vez representa a potência de curto-circuito do sistema equivalente. Deste modo, modelou-se o equivalente no *Simulink* conforme mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Modelagem da rede de alta tensão no *Simulink*.

Fonte: Autoria própria.

Os nomes dos blocos utilizados estão indicados em vermelho na Figura 14. Os parâmetros em cada um dos blocos foram preenchidos conforme apresentado na Tabela 13.

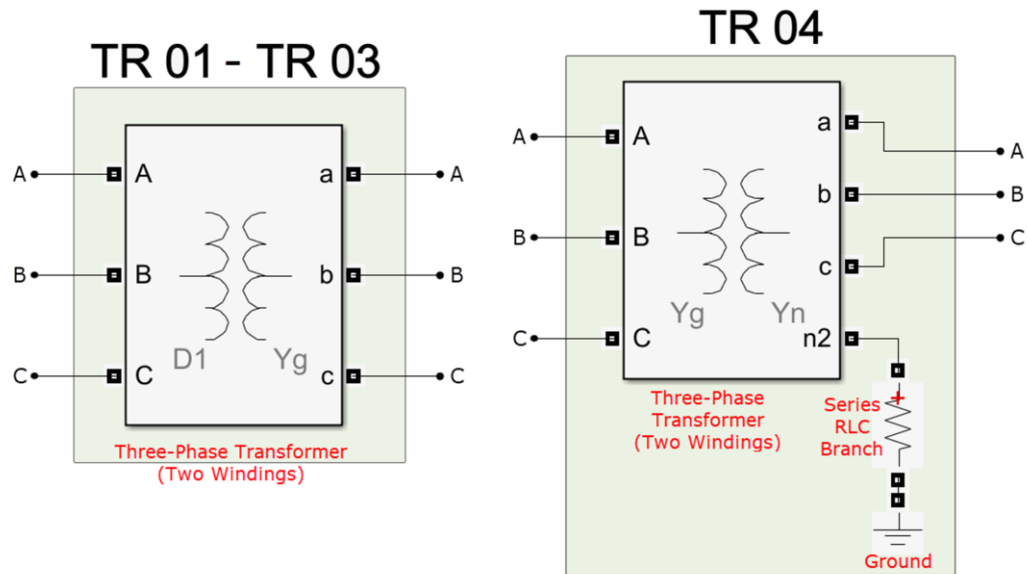
Tabela 13 – Parâmetros dos blocos que compõem a rede de alta tensão no *Simulink*.

<b>Three-Phase Source</b>	
Parameters – Configuration	Yg
Parameters – Source: Specify internal voltages for each phase	desmarcado
Parameters – Source: Phase-to-phase voltage (Vrms)	110000
Parameters – Source: Phase angle of phase A (degrees)	0
Parameters – Source: Frequency (Hz)	50
Parameters – Impedance: Internal	desmarcado
Load Flow – Generator type	swing
<b>Three-Phase Series RLC Branch</b>	
Parameters – Branch type	RL
Parameters – Resistance R (Ohms)	0.376
Parameters – Inductance L (H)	11.98e-3
Parameters – Measurements	None

Fonte: Autoria própria.

### 3.3 Transformadores

Para a implementação dos quatro transformadores utilizou-se o bloco chamado *Three-Phase Transformer (Two Windings)*, conforme indicado na Figura 15.

Figura 15 – Modelagem dos transformadores no *Simulink*.

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 14 são indicados os parâmetros atribuídos a cada um dos transformadores.

Tabela 14 – Parâmetros dos blocos que compõem os transformadores no *Simulink*.

Three-Phase Transformer (Two Windings)	TR 01	TR 02	TR 03	TR 04
Configuration – Winding 1 connection (ABC terminals)	Delta (D1)	Delta (D1)	Delta (D1)	Yg
Configuration – Winding 2 connection (abc terminals)	Yg	Yg	Yg	Yn
Configuration – Core: Type	Three single-phase transformers			
Configuration – Core: Simulate saturation	desmarcado			
Configuration – Measurements	None	None	None	None
Parameters – Units	pu	pu	pu	pu
Parameters – Nominal power and frequency [Pn(VA), fn(Hz)]	[4e5, 50]	[1e6, 50]	[1e6, 50]	[20e6, 50]
Parameters – Winding 1 parameters [V1 Ph-Ph(Vrms), R1(pu), L1(pu)]	[21e3, 0, 0.02]	[21e3, 0, 0.03]	[21e3, 0, 0.03]	[110e3, 0, 0.055]
Parameters – Winding 2 parameters [V2 Ph-Ph(Vrms), R2(pu), L2(pu)]	[420, 0, 0.02]	[420, 0, 0.03]	[420, 0, 0.03]	[21e3, 0, 0.055]
Parameters – Magnetization resistance Rm (pu)	1e6	1e6	1e6	1e6
Parameters – Magnetization inductance Lm (pu)	1e6	1e6	1e6	1e6
Advanced – Break Algebraic loop in discrete saturation model	desmarcado			
Advanced – Discrete solver model	Trapezoidal iterative			



Series RLC Branch	TR 01	TR 02	TR 03	TR 04
Parameters – Branch type	-	-	-	R
Parameters – Resistance R (Ohms)	-	-	-	80
Parameters – Measurements	-	-	-	None

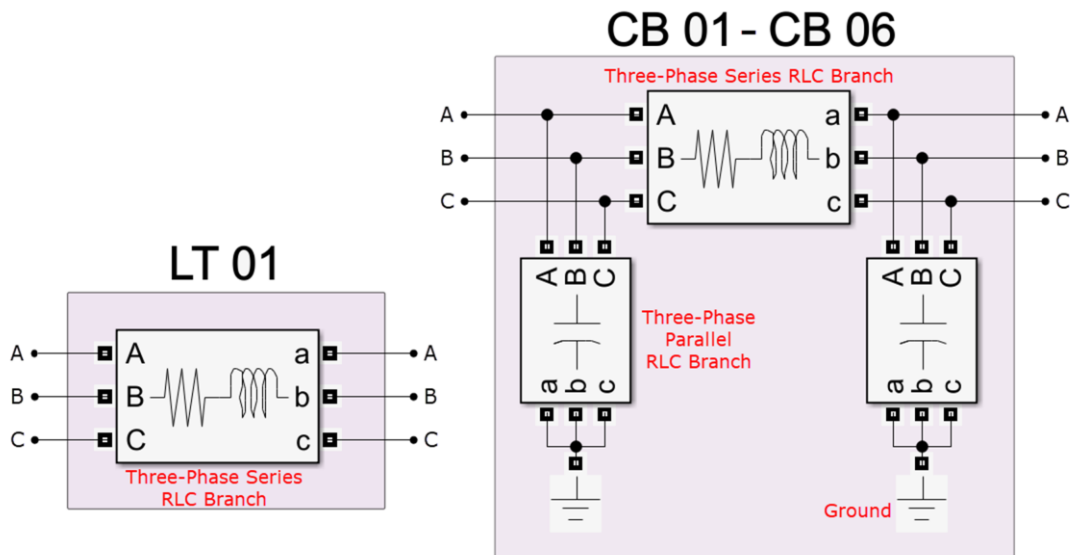
Fonte: Autoria própria.

Segundo as informações apresentadas na Tabela 1 e na Tabela 4, as perdas a vazio e no cobre são nulas em todos os transformadores do arranjo, portanto, utilizou-se um elevado valor para as resistências e indutâncias de magnetização, bem como um valor igual a zero para as resistências do enrolamento. Além disso, com relação ao parâmetro reatância de dispersão, o seu valor total, em pu, foi dividido igualmente entre os enrolamentos do primário e do secundário, conforme mostrado pelos parâmetros L1 e L2 na Tabela 14, respectivamente.

### 3.4 Linhas e cabos

As linhas e os cabos de média e baixa tensão também foram implementados em concordância com os parâmetros listados na Tabela 2 e na Tabela 3. Os blocos utilizados para modelagem destes componentes e suas respectivas conexões são evidenciados na Figura 16.

Figura 16 – Modelagem das linhas/cabos de BT e MT no *Simulink*.



Fonte: Autoria própria.

Inclui-se, na Tabela 15 e na Tabela 16, os parâmetros preenchidos no *Simulink* para cada bloco correspondente às linhas/cabos de média e baixa tensão, nesta ordem.

Tabela 15 – Parâmetros dos blocos que compõem as linhas/cabos de MT no *Simulink*.

<b>Three-Phase Series RLC Branch</b>	<b>LT 01</b>	<b>CB 01</b>	<b>CB 02</b>
Parameters – Branch type	RL	RL	RL
Parameters – Resistance R (Ohms)	0.57	1	0.75
Parameters – Inductance L (H)	0.38e-3	0.9e-3	0.675e-3
Parameters – Measurements	None	None	None
<b>Three-Phase Parallel RLC Branch</b>	<b>LT 01</b>	<b>CB 01</b>	<b>CB 02</b>
Parameters – Branch type	-	C	C
Parameters – Capacitance C (F)	-	0.09e-6	0.0675e-6
Parameters – Measurements	-	None	None

Fonte: Autoria própria.

Tabela 16 – Parâmetros dos blocos que compõem os cabos de BT no *Simulink*.

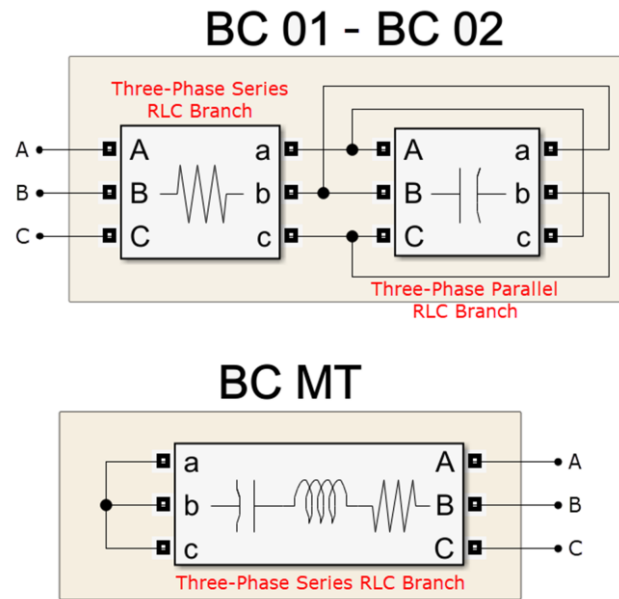
<b>Three-Phase Series RLC Branch</b>	<b>CB 03</b>	<b>CB 04</b>	<b>CB 05</b>	<b>CB 06</b>
Parameters – Branch type	RL	RL	RL	RL
Parameters – Resistance R (Ohms)	0.006	0.002	0.002	0.0015
Parameters – Inductance L (H)	0.3e-3	0.1e-3	0.2e-3	0.05e-3
Parameters – Measurements	None	None	None	None
<b>Three-Phase Parallel RLC Branch</b>	<b>CB 03</b>	<b>CB 04</b>	<b>CB 05</b>	<b>CB 06</b>
Parameters – Branch type	C	C	C	C
Parameters – Capacitance C (F)	0.00025e-6	0.0001e-6	0.00015e-6	0.00005e-6
Parameters – Measurements	None	None	None	None

Fonte: Autoria própria.

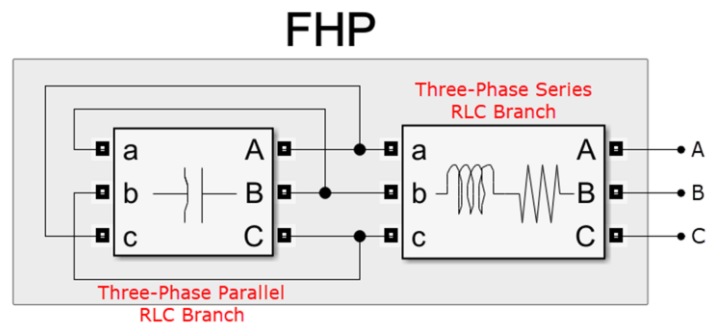
Os valores de capacitância mostrados na Tabela 15 e na Tabela 16 correspondem ao valor inserido em cada um dos dois blocos que compõem os elementos CB 01 ao CB 06, ou seja, o valor corresponde à metade da capacitância total do modelo PI.

### 3.5 Bancos de capacitores e filtro harmônico passivo dessintonizado

As modelagens dos bancos de capacitores no *Simulink* são apresentadas na Figura 17, enquanto que a modelagem do filtro harmônico passivo dessintonizado está na Figura 18.

Figura 17 – Modelagem dos bancos de capacitores no *Simulink*.

Fonte: Autoria própria.

Figura 18 – Modelagem do filtro harmônico passivo dessintonizado no *Simulink*.

Fonte: Autoria própria.

Os parâmetros dos blocos que compõem tanto os bancos de capacitores quanto o filtro harmônico são indicados na Tabela 17, em conformidade com aqueles apresentados para a condição C na Tabela 6.

Tabela 17 – Parâmetros dos blocos que compõem os bancos de capacitores e o filtro harmônico passivo no *Simulink*.

Three-Phase Series RLC Branch	BC 01	BC 02	BC MT	FHP
Parameters – Branch type	R	R	RLC	RL
Parameters – Resistance R (Ohms)	0.00533	0.00959	0.3638	0.00405
Parameters – Inductance L (H)	-	-	0.5e-3	0.215e-3
Parameters – Capacitance C (F)	-	-	8.75e-6	-
Parameters – Measurements	None	None	None	None

<b>Three-Phase Parallel RLC Branch</b>	<b>BC 01</b>	<b>BC 02</b>	<b>BC MT</b>	<b>FHP</b>
Parameters – Branch type	C	C	-	C
Parameters – Capacitance C (F)	597e-6	332e-6	-	786e-6
Parameters – Measurements	None	None	-	None

Fonte: Autoria própria.

Destaca-se a ligação em delta dos elementos capacitivos dos bancos BC 01 e BC 02, e do filtro harmônico FHP. Para estes capacitores, utilizou-se o bloco *Three-Phase Parallel RLC Branch*, no entanto, o bloco *Three-Phase Series RLC Branch* também alcançaria os mesmo resultados.

A respeito do FHP, a partir dos seus parâmetros elétricos apresentados na Tabela 17, é possível calcular a sua frequência de ressonância de acordo com a equação (9) [12].

$$f_{\text{ressonância}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(0,215mH) * (3 * 786\mu F)}} = 223,53 \text{ Hz} \quad (9)$$

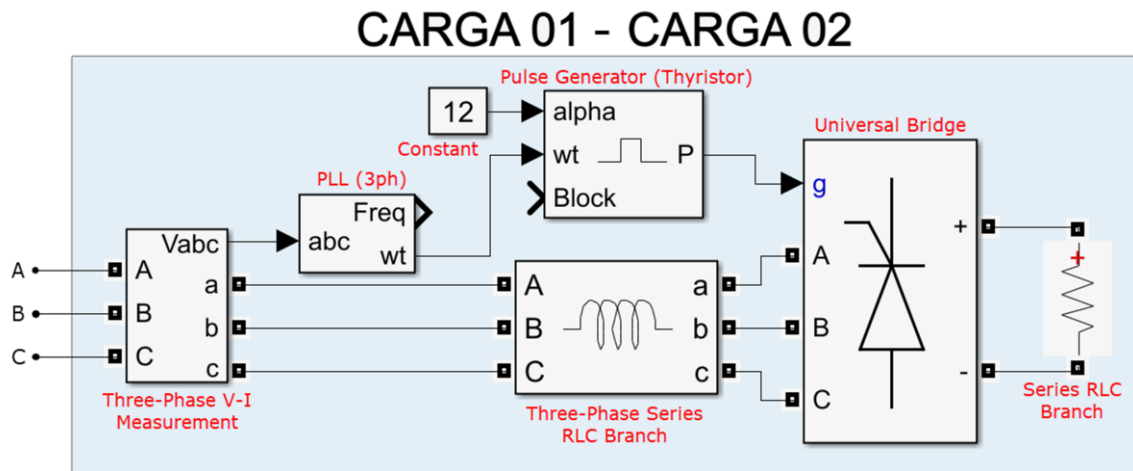
Na equação (9),  $L$  e  $C$  correspondem à indutância e à capacitância do circuito equivalente do filtro em Y, por fase, por isso foi necessário multiplicar por 3 o valor da capacitância, uma vez que os capacitores estão conectados em delta. O resultado da equação (9) demonstra que o filtro está sintonizado entre a 4ª (200 Hz) e a 5ª (250 Hz) ordem harmônica.

## 3.6 Cargas

O *Benchmark IEEE-HCD* apresenta quatro cargas conectadas na baixa tensão, as quais são parte dos circuitos dos consumidores, e também inclui uma carga conectada na barra MT da subestação. O detalhamento das modelagens das cargas será dividido de acordo com os tipos dos dispositivos, podendo ser: retificadores, cargas resistiva-indutiva (RL) ou motor de indução.

### 3.6.1 Retificadores

As cargas não lineares do arranjo são, de fato, retificadores trifásicos de 6 pulsos controlados a tiristores. Os ângulos de disparo ( $\alpha$ ) destes são sincronizados com a tensão de alimentação do retificador por intermédio de um módulo PLL, conforme exibido na Figura 19.

Figura 19 – Modelagem das cargas não lineares no *Simulink*.

Fonte: Autoria própria.

Os parâmetros de cada bloco que compõe o arranjo do retificador são mostrados na Tabela 18, de acordo com os dados da condição C na Tabela 6.

Tabela 18 – Parâmetros dos blocos que compõem as cargas não lineares no *Simulink*.

Three-Phase V-I Measurement	Carga 01 e Carga 02
Parameters – Voltage measurement	Phase-to-ground
Parameters – Use a label	desmarcado
Parameters – voltage in pu	desmarcado
Parameters – Current measurements	no
PLL (3ph)	Carga 01 e Carga 02
Parameters – Minimum frequency (Hz)	45
Parameters – Initial inputs [Phase (degrees), Frequency (Hz)]	[30, 50]
Parameters – Regulator gains [Kp, Ki, Kd]	[180, 3200, 0]
Parameters – Time constant for derivative action (s)	1e-4
Parameters – Maximum rate of change of frequency (Hz/s)	12
Parameters – Filter cut-off frequency for frequency measurement (Hz)	25
Parameters – Sample time	Ts
Parameters – Enable automatic gain control	marcado
Three-Phase Series RLC Branch	Carga 01 e Carga 02
Parameters – Branch type	L
Parameters – Inductance L (H)	0.1e-3
Parameters – Measurements	None

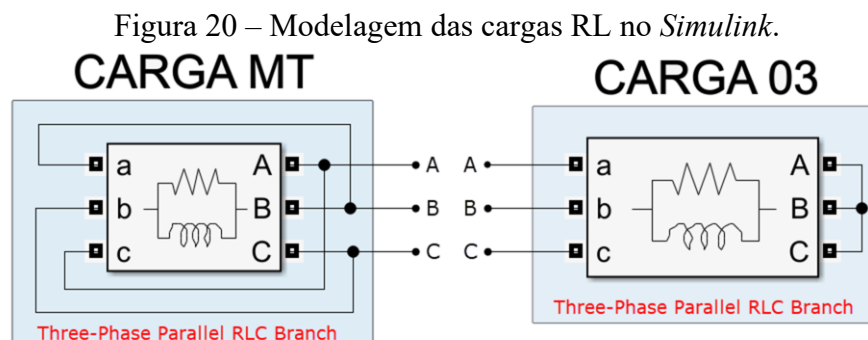
<b>Pulse Generator (Thyristor)</b>	<b>Carga 01 e Carga 02</b>
Parameters – Generator type	6-pulse
Parameters – Pulse width (deg)	60
Parameters – Double pulsing	desmarcado
Parameters – Sample time	Ts
<b>Universal Bridge</b>	<b>Carga 01 e Carga 02</b>
Parameters – Number of bridge arms	3
Parameters – Snubber resistance Rs (Ohms)	1e5
Parameters – Snubber capacitance Cs (F)	inf
Parameters – Power Electronic device	Thyristors
Parameters – Ron (Ohms)	0.01
Parameters – Lon (H)	0
Parameters – Forward voltage Vf (V)	0
Parameters – Measurements	None
<b>Series RLC Branch</b>	<b>Carga 01 e Carga 02</b>
Parameters – Branch type	R
Parameters – Resistance R (Ohms)	1
Parameters – Measurements	None

Fonte: Autoria própria.

Entretanto, para preenchimento de alguns parâmetros foi necessário consultar a modelagem original do *Benchmark* implementada no PSCAD [31]. Tais parâmetros incluem o ângulo inicial do módulo PLL (*phase*), o ganho derivativo do controlador do módulo PLL (*Kd*), a resistência do tiristor no estado ON (*Ron*) e a queda de tensão direta sobre o tiristor em condução (*Vf*). Os demais parâmetros foram mantidos com os valores padrão do *Simulink*.

### 3.6.2 Cargas RL

Com relação às cargas RL, passivas e lineares, suas implementações são apresentadas na Figura 20.



Fonte: Autoria própria.

As formas de ligação das duas cargas diferem entre si, uma vez que a CARGA 03 é conectada em Y, enquanto a CARGA MT é ligada em delta. Os respectivos parâmetros das duas cargas foram incluídos na Tabela 19, em conformidade com aqueles apresentados para a condição C na Tabela 6.

Tabela 19 – Parâmetros dos blocos que compõem as cargas RL no *Simulink*.

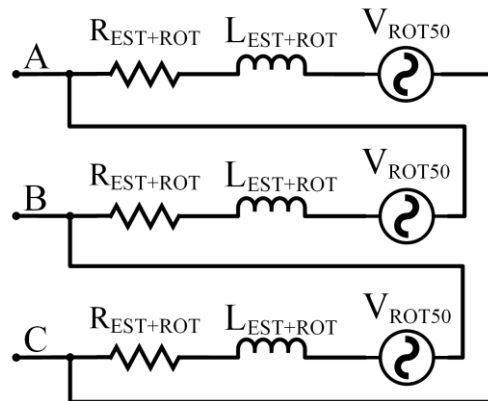
Three-Phase Parallel RLC Branch	CARGA 03	CARGA MT
Parameters – Branch type	RL	RL
Parameters – Resistance R (Ohms)	1	180
Parameters – Inductance L (H)	0.01	2
Parameters – Measurements	None	None

Fonte: Autoria própria.

### 3.6.3 Motor de indução

Por fim, também existe um motor de indução trifásico no sistema – CARGA 4. O circuito equivalente do motor, mostrado na Figura 12, foi repetido na Figura 21 para facilitar a compreensão.

Figura 21 – Motor de indução – CARGA 04.



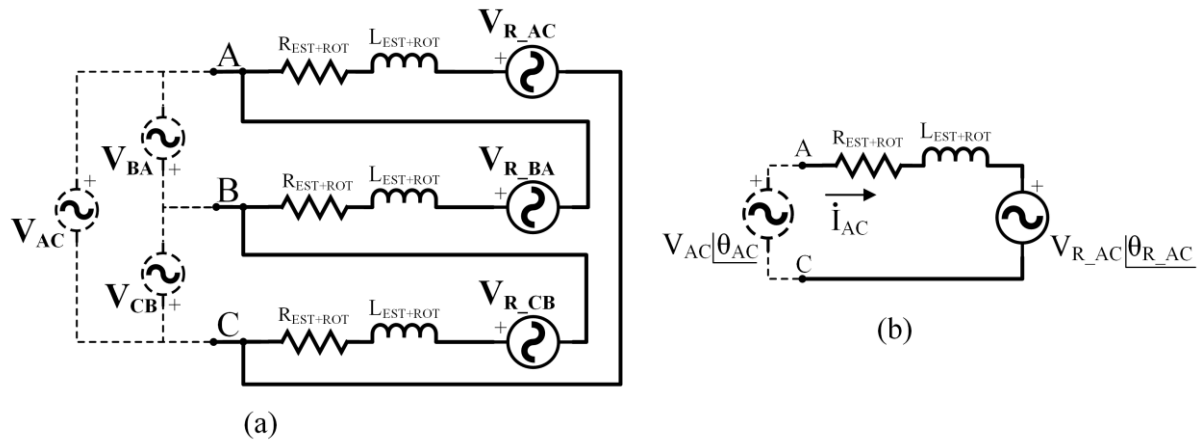
Fonte: Adaptado de [24].

De maneira a entender a estratégia adotada para definição dos valores de módulo e ângulo das fontes de tensão  $V_{ROT50}$ , consultou-se novamente a modelagem original do *Benchmark* [31]. Desta forma, observou-se que esta representação do motor de indução se fundamenta no equacionamento da potência transmitida entre barras para determinação da potência ativa e reativa consumida pelo motor. Para tanto, os valores (módulo e ângulo) das fontes de tensão  $V_{ROT50}$  são calculados a partir do valor da tensão do barramento onde o motor

é conectado e dos valores de impedância do motor, de maneira a proporcionar um fluxo de potência que represente a potência consumida pelo mesmo.

A partir do circuito mostrado na Figura 21, entende-se que existem fontes de tensão entre as fases A, B e C, as quais representam as tensões da barra de conexão do motor, conforme mostrado na Figura 22(a). Tomando a malha mais externa como referência, ou seja, a malha entre as fases A e C (Figura 22(b)), será demonstrado, na sequência, o equacionamento empregado para a determinação das tensões no rotor ( $V_{ROT50} = V_R$ ), seus respectivos módulos e ângulos.

Figura 22 – (a) Circuito equivalente do motor de indução adaptado e (b) malha entre as fases A e C.



Fonte: Autoria própria.

Partindo da malha apresentada na Figura 22(b), sabe-se que a potência no circuito do motor entre os pontos A e C pode ser calculada pela equação (10):

$$\dot{S}_{AC} = \dot{V}_{AC} \cdot \dot{I}_{AC}^* \quad (10)$$

Além disso, a impedância equivalente do conjunto rotor e estator pode ser representada por (11).

$$Z_{EST+ROT} \angle \theta_{EST+ROT} = R_{EST+ROT} + j2\pi \cdot f_{50HZ} \cdot L_{EST+ROT} \quad (11)$$

A corrente  $\dot{I}_{AC}$  é calculada por:



$$\dot{I}_{AC} = \frac{V_{AC} \angle \theta_{AC} - V_{R\_AC} \angle \theta_{R\_AC}}{Z_{EST+ROT} \angle \theta_{EST+ROT}} \quad (12)$$

Complementarmente, sabe-se que a potência desta malha corresponde a um terço da potência total consumida pelo motor. Colocando em evidência a potência ativa trifásica ( $P_{3\phi}$ ) e o fator de potência (FP), tem-se:

$$\dot{S}_{AC} = \frac{1}{3} \frac{P_{3\phi}}{FP} \angle \cos^{-1}(fp) \quad (13)$$

Assim sendo, substituindo (13) e (12) em (10) e aplicando o conjugado sobre a corrente  $\dot{I}_{AC}$ , obtém-se:

$$\frac{P_{3\phi}}{3 \cdot FP} \angle \cos^{-1}(FP) = V_{AC} \angle \theta_{AC} \left( \frac{(V_{AC} \angle -\theta_{AC}) - (V_{R\_AC} \angle -\theta_{R\_AC})}{Z_{EST+ROT} \angle -\theta_{EST+ROT}} \right) \quad (14)$$

Manuseando matematicamente a equação (14), de maneira a se isolar a variável que representa a tensão no rotor, chega-se a equação (15).

$$V_{R\_AC} \angle -\theta_{R\_AC} = (V_{AC} \angle -\theta_{AC}) - \left( \frac{P_{3\phi} \cdot Z_{EST+ROT}}{3 \cdot FP \cdot V_{AC}} \angle \cos^{-1}(FP) - \theta_{AC} - \theta_{EST+ROT} \right) \quad (15)$$

Aplicando conjugado em ambos os termos da equação (15), encontra-se:

$$V_{R\_AC} \angle \theta_{R\_AC} = (V_{AC} \angle \theta_{AC}) - \left( \frac{P_{3\phi} \cdot Z_{EST+ROT}}{3 \cdot FP \cdot V_{AC}} \angle -\cos^{-1}(FP) + \theta_{AC} + \theta_{EST+ROT} \right) \quad (16)$$

Transformando a equação (16) para a forma retangular, e separando-a em suas partes real e imaginária, obtém-se:

$$V_{R\_AC} \cdot \cos \theta_{R\_AC} = V_{AC} \cdot \cos \theta_{AC} - \frac{P_{3\phi} \cdot Z_{EST+ROT}}{3 \cdot FP \cdot V_{AC}} \cos(-\cos^{-1}(FP) + \theta_{AC} + \theta_{EST+ROT}) \quad (17)$$

$$V_{R\_AC} \cdot \sin \theta_{R\_AC} = V_{AC} \cdot \sin \theta_{AC} - \frac{P_{3\phi} \cdot Z_{EST+ROT}}{3 \cdot FP \cdot V_{AC}} \sin(-\cos^{-1}(FP) + \theta_{AC} + \theta_{EST+ROT}) \quad (18)$$

Com o intuito de facilitar os desenvolvimentos, define-se a variável  $\Delta V$  como sendo:

$$\Delta V = \frac{P_{3\phi} \cdot Z_{EST+ROT}}{3 \cdot FP \cdot V_{AC}} \quad (19)$$

Em seguida, também objetivando facilitar o equacionamento, considera-se que o ângulo da tensão da barra de conexão do motor ( $\theta_{AC}$ ) é igual a zero. Este ângulo será adicionado ao final do desenvolvimento.

$$V_{R_{AC}} \cdot \cos \theta_{R_{AC}} = V_{AC} - \Delta V \cdot \cos(-\cos^{-1}(FP) + \theta_{EST+ROT}) \quad (20)$$

$$V_{R_{AC}} \cdot \sin \theta_{R_{AC}} = -\Delta V \cdot \sin(-\cos^{-1}(FP) + \theta_{EST+ROT}) \quad (21)$$

Observa-se que as equações (20) e (21) definem as partes real e imaginária da tensão do rotor, respectivamente. Portanto, para calcular o módulo da tensão do rotor basta elevar ambas as partes ao quadrado e aplicar raiz quadrada, conforme mostrado na equação (22).

$$V_{R_{AC}} = \sqrt{V_{AC}^2 + \Delta V^2 - V_{AC} \cdot \Delta V \cdot \cos(\theta_{EST+ROT} - \cos^{-1}(FP))} \quad (22)$$

Agora, para calcular o ângulo da tensão do rotor, basta isolar o ângulo  $\theta_{R_{AC}}$  na equação (21) e adicionar o ângulo da tensão da barra onde o motor é conectado ( $\theta_{AC}$ ).

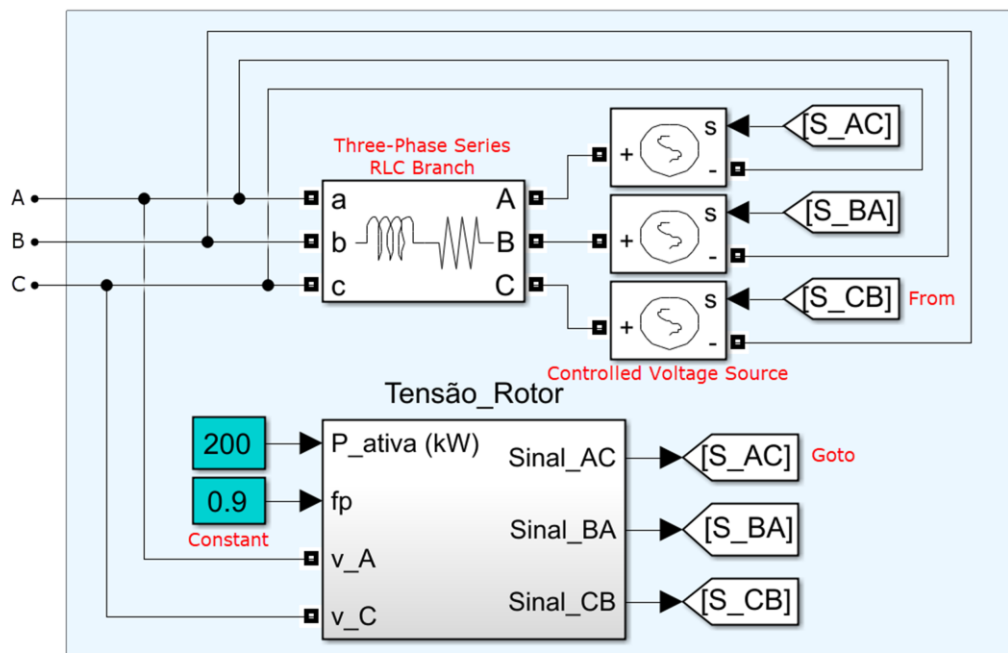
$$\theta_{R_{AC}} = -\sin\left(\frac{\Delta V}{V_{R_{AC}}} \cdot \sin(-\cos^{-1}(FP) + \theta_{EST+ROT})\right) + \theta_{AC} \quad (23)$$

Logo, a partir das equações (22) e (23), encontram-se os valores do módulo e do ângulo da tensão do rotor em função dos parâmetros conhecidos, quais sejam: impedância equivalente rotor e estator; potência ativa trifásica do motor e fator de potência; e tensão da barra de conexão do motor (módulo e ângulo). Para as fontes entre as fases BA e CB o módulo será o mesmo, no entanto, para encontrar os ângulos, basta adicionar a defasagem angular de  $\pm 120^\circ$ :

$$V_{R_{BA}} = V_{R_{AC}} \text{ e } \theta_{R_{BA}} = \theta_{R_{AC}} - 120 \quad (24)$$

$$V_{R_{CB}} = V_{R_{AC}} \text{ e } \theta_{R_{CB}} = \theta_{R_{AC}} + 120 \quad (25)$$

A implementação do motor de indução no *Simulink* é mostrada na Figura 23.

Figura 23 – Modelagem do motor de indução no *Simulink*.**CARGA 04**

Fonte: Autoria própria.

O bloco *Three-Phase Series RLC Branch* representa a impedância do conjunto rotor e estator, e as fontes do tipo *Controlled Voltage Source* representam a tensão do rotor. Os parâmetros de tais blocos são apresentados na Tabela 20.

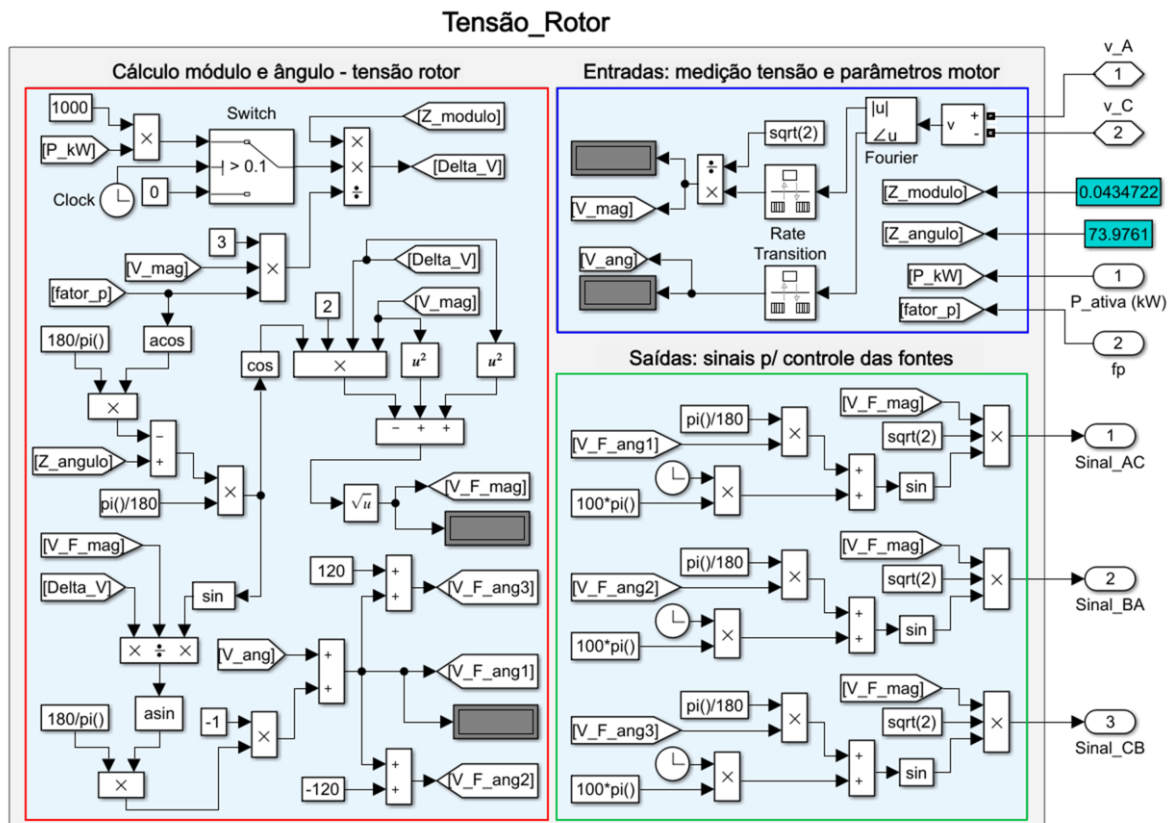
Tabela 20 – Parâmetros dos blocos que compõem o motor de indução no *Simulink*.

<b>Three-Phase Series RLC Branch</b>	
Parameters – Branch type	RL
Parameters – Resistance R (Ohms)	0.012
Parameters – Inductance L (H)	0.133e-3
Parameters – Measurements	None
<b>Controlled Voltage Source</b>	
Parameters – Initialize	desmarcado
Parameters – Measurements	None

Fonte: Autoria própria.

A Figura 23 ainda inclui o bloco chamado “Tensão\_Rotor”. Este bloco contempla o equacionamento para cálculo da tensão no rotor, o qual, conforme a condição C da Tabela 6, possui um consumo de 200 kW com fator de potência de 0,9. Exibe-se, na Figura 24, a composição do bloco “Tensão\_Rotor”.

Figura 24 – Modelagem do bloco “Tensão\_Rotor” no *Simulink*.



Fonte: Autoria própria.

O bloco “Tensão\_Rotor” possui como entradas o valor da tensão  $V_{AC}$ , referente ao barramento de conexão do motor; os dados da potência consumida pelo motor (potência ativa e fator de potência); e o valor da impedância do conjunto rotor e estator (módulo e ângulo), na frequência fundamental (50 Hz), conforme os parâmetros estabelecidos na Tabela 5.

Com relação às entradas do bloco (parte destacada em azul na Figura 24) utilizou-se o bloco *Fourier* para obtenção do módulo e ângulo da tensão  $V_{AC}$  a frequência fundamental (50 Hz). Vale citar que para o correto funcionamento do modelo, no bloco *Fourier* a condição inicial foi parametrizada como [1,0] e o parâmetro *Sample time* foi preenchido com o valor de  $2T_s$ .

Dessa maneira, devido à diferença de taxa de amostragem entre o bloco *Fourier* e o restante do sistema, foi preciso, como consequência, incluir os blocos *Rate Transition* nas saídas do bloco *Fourier*. Nos blocos *Rate Transition* o parâmetro *Output port sample time* foi mantido com o valor padrão (-1), uma vez que este valor determina que este bloco herde a taxa de amostragem do bloco conectado à sua saída. A condição inicial foi preenchida como 1.

Ao lado esquerdo – destacado em vermelho na Figura 24 – encontra-se o cálculo para obtenção dos módulos e ângulos das fontes de tensão controladas conforme as equações (22) à

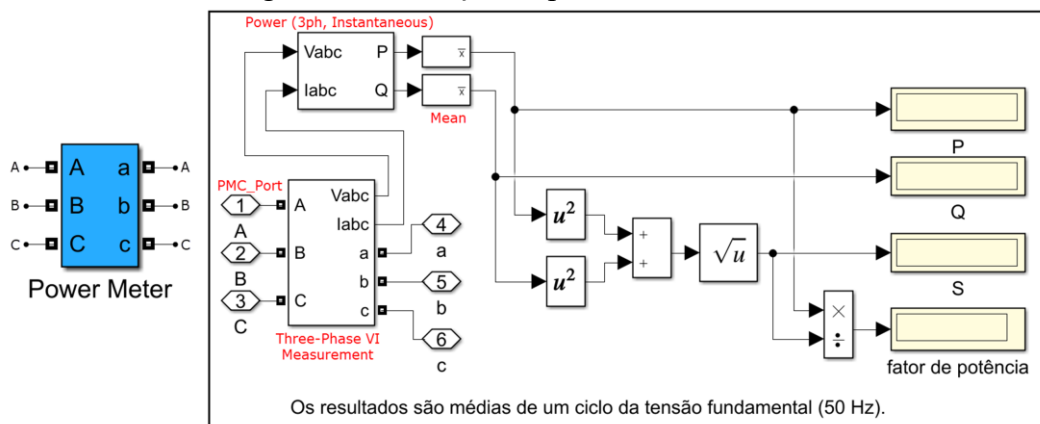
(25). Destaca-se que, conforme adotado no sistema implementado no PSCAD [31], o motor é acionado aos 0,1 segundos de simulação. Portanto, neste instante, a potência ativa do mesmo passa de zero para o valor escolhido, neste caso, 200 kW. Esta transição foi realizada utilizando o bloco *Switch* configurado para alternar sua entrada aos 0,1 segundos.

Por fim, destacadas em verde, encontram-se as composições dos sinais que irão controlar as fontes de tensão  $V_{ROT50}$ . Os sinais correspondem a formas de onda senoidais, na frequência fundamental (50 Hz), com os módulos e ângulos calculados conforme o equacionamento destacado em vermelho.

### 3.7 Medidores de tensão, corrente e potência

Complementarmente, foram incluídos medidores para avaliar os parâmetros elétricos durante da simulação do sistema. Na Figura 13, os blocos de medição de potência são mostrados em azul escuro. Estes blocos utilizam o arranjo detalhado na Figura 25, no qual a média dos valores das potências instantâneas define as potências ativa (P), reativa (Q) e aparente (S), e o fator de potência, a cada ciclo (50 Hz) de simulação.

Figura 25 – Medição de potência no *Simulink*.



Fonte: Autoria própria.

Incluiu-se, na Tabela 21, os parâmetros preenchidos para os blocos *Three-Phase VI Measurement* e *Mean*. Nos demais blocos, os parâmetros foram mantidos com os valores padrão do *Simulink*.

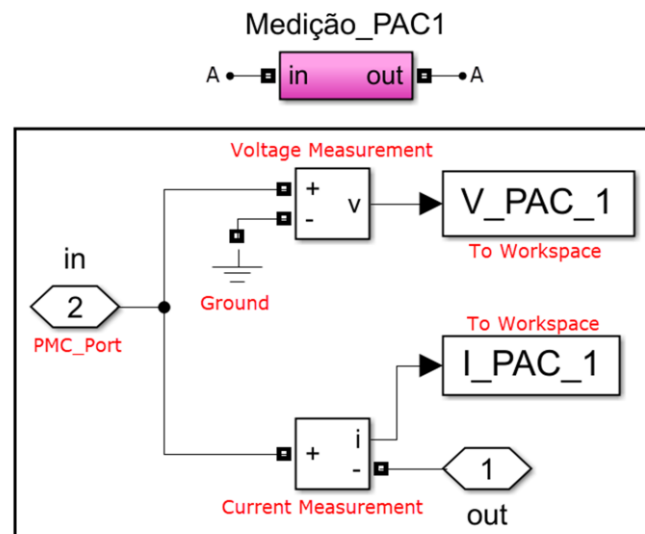
Tabela 21 – Parâmetros dos blocos que compõem o bloco “Power Meter” no *Simulink*.

<b>Three-Phase V-I Measurement</b>	
Parameters – Voltage measurement	Phase-to-ground
Parameters – Use a label	desmarcado
Parameters – voltage in pu	desmarcado
Parameters – Current measurements	no
<b>Mean</b>	
Parameters – Fundamental frequency (Hz)	50
Parameters – Initial input (DC component)	0
Parameters – Sample time	Ts

Fonte: Autoria própria.

Para os medidores de tensão e corrente conectados aos PACs, os quais correspondem aos blocos em rosa na Figura 13, utilizou-se o arranjo detalhado na Figura 26, representado para o PAC 01.

Figura 26 – Medição de tensão e corrente no *Simulink*.



Fonte: Autoria própria.

Os valores de tensão e corrente instantâneos são salvos nas variáveis  $V_{PAC\_1}$  e  $I_{PAC\_1}$ , a cada passo de simulação, para o PAC 01. O sinal de saída (*Output signal*) dos blocos *Voltage Measurement* e *Current Measurement* foram selecionados como sendo do tipo complexo. Observa-se que a medição de tensão e corrente é feita por fase.

Para obter os componentes fundamental e harmônicos destas grandezas, é necessário, ao final da simulação, executar a transformada rápida de Fourier, ou *fast Fourier transform* (FFT). Neste trabalho, implementou-se um código para obtenção dos componentes fundamentais e harmônicos das tensões e correntes nos PACs em um arquivo *script (.m)* a partir

da função *power\_fftscope*, a qual toma como entrada as variáveis da simulação salvas no *workspace*. Para execução da função *power\_fftscope* é necessário definir o número de ciclos utilizados no cálculo, contados a partir do último ciclo de simulação; a frequência fundamental; e a frequência máxima utilizada no cálculo das componentes harmônicas.

---

# CAPÍTULO IV

---

## 4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO *BENCHMARK* IMPLEMENTADO

---

Este capítulo contempla a análise de desempenho do sistema implementado e parametrizado, incluindo a comparação dos resultados da simulação com aqueles apresentados na publicação do *Benchmark* [24],[31]. Também são apresentados os resultados da aplicação dos procedimentos de estimação de impedância nos PACs constituintes do *Benchmark*. Por fim, são comparados os resultados do Método da Superposição para o compartilhamento de responsabilidades sobre as tensões harmônicas utilizando as impedâncias obtidas em cada um dos procedimentos implementados.



Conforme já mencionado no capítulo anterior, adotou-se para as simulações do sistema completo, um tempo de 3 segundos, o qual se mostrou suficiente para que o sistema pudesse atingir o regime permanente. Em verdade, o regime permanente é alcançado um pouco antes de 1 segundo, entretanto, houve o imperativo de um tempo mais longo devido à quantidade de ciclos necessária à aplicação dos métodos para estimação das impedâncias harmônicas, sobretudo aqueles que empregam sinais inter-harmônicos.

Em um primeiro momento, foi realizada a simulação do *Benchmark* utilizando dois passos de integração diferentes (1  $\mu$ s e 50  $\mu$ s). O objetivo foi o de avaliar as respostas do sistema, principalmente os resultados das tensões e correntes, nestas duas condições em comparação com os resultados informados no artigo de apresentação do *Benchmark* [24],[31], para, posteriormente, definir o passo de integração a ser adotado como padrão no restante deste trabalho. Esta comparação se fez necessária uma vez que o artigo de publicação do *Benchmark* não informa o passo de integração utilizado na simulação. Entretanto, sabe-se que a modificação deste parâmetro em simulações computacionais pode, dependendo das características e natureza do sistema simulado, propiciar resultados diferentes.

Os parâmetros avaliados incluem as tensões e correntes medidas nos PACs, bem como as impedâncias fundamentais e harmônicas vistas a partir de cada PAC, para o circuito equivalente do consumidor e o circuito equivalente do sistema supridor. A título de informação, também são apresentados os valores das potências medidas nos PACs, a potência total entregue pela subestação, e as potências das cargas, bancos de capacitores e filtro harmônico.

Ademais, dada a complexidade envolvida na modelagem do equivalente elétrico do motor de indução, teve-se a necessidade de realizar testes para validação do seu correto funcionamento de maneira isolada. Os testes realizados e os resultados obtidos são, na sequência, apresentados e descritos.

## **4.1 Validação do funcionamento do motor de indução**

Foram elaborados dois testes para verificar o correto funcionamento do motor de indução. Ambos os testes foram simulados utilizando os dois passos de integração ( $T_S$ ) citados anteriormente, entretanto, visto que ambas condições proporcionaram resultados convergentes, serão aqui mostrados somente os resultados para a simulação realizada com passo de 1  $\mu$ s. Por se tratar de um teste que não envolve a análise de sinais inter-harmônicos e também pelo fato do sistema ser apenas aquele vinculado à alimentação do motor, o tempo total de simulação pôde ser reduzido para 2 segundos.

#### 4.1.1 Teste 1: Resposta do motor à variação da condição imposta para potência ativa consumida e fator de potência

O objetivo deste teste é avaliar se o consumo do motor varia conforme os valores impostos para potência ativa e fator de potência (FP) em seu bloco “Tensão\_Rotor”. Portanto, para este teste, tais parâmetros foram alterados ao longo do tempo, de acordo com as informações contidas na Tabela 22.

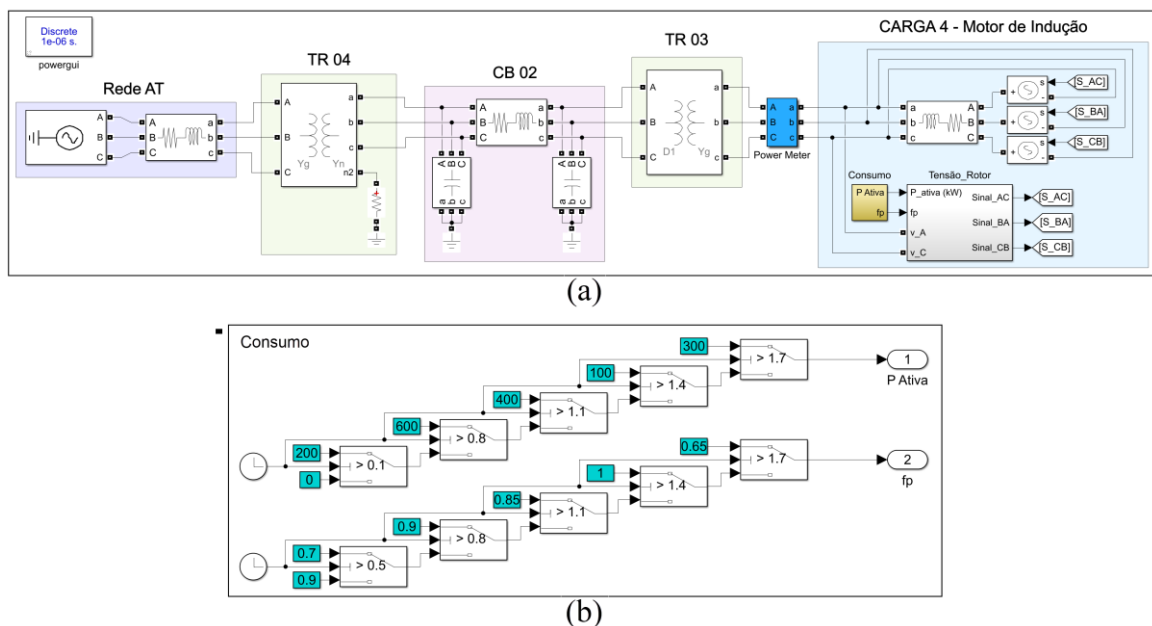
Tabela 22 – Dados para execução do Teste 1 do motor de indução no *Simulink*.

Tempo	Potência Ativa	Fator de Potência	Potência Reativa
0 a 0,1 segundos	0 kW	0,9	0 kVAr
0,1 a 0,5 segundos	200 kW	0,9	96,864 kVAr
0,5 a 0,8 segundos	200 kW	0,7	204,041 kVAr
0,8 a 1,1 segundos	600 kW	0,9	290,593 kVAr
1,1 a 1,4 segundos	400 kW	0,85	247,898 kVAr
1,4 a 1,7 segundos	100 kW	1	0 kVAr
1,7 a 2 segundos	300 kW	0,65	350,738 kVAr

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 22 também inclui o valor de potência reativa correspondente à cada condição. O arranjo simulado é apresentado na Figura 27(a). O bloco em amarelo, “Consumo”, é o responsável pela variação dos valores de potência ativa e fator de potência ao longo da simulação, conforme mostrado em detalhes na Figura 27(b).

Figura 27 – Teste 1 do motor de indução: (a) arranjo simulado no *Simulink* e (b) detalhes do bloco “Consumo”.

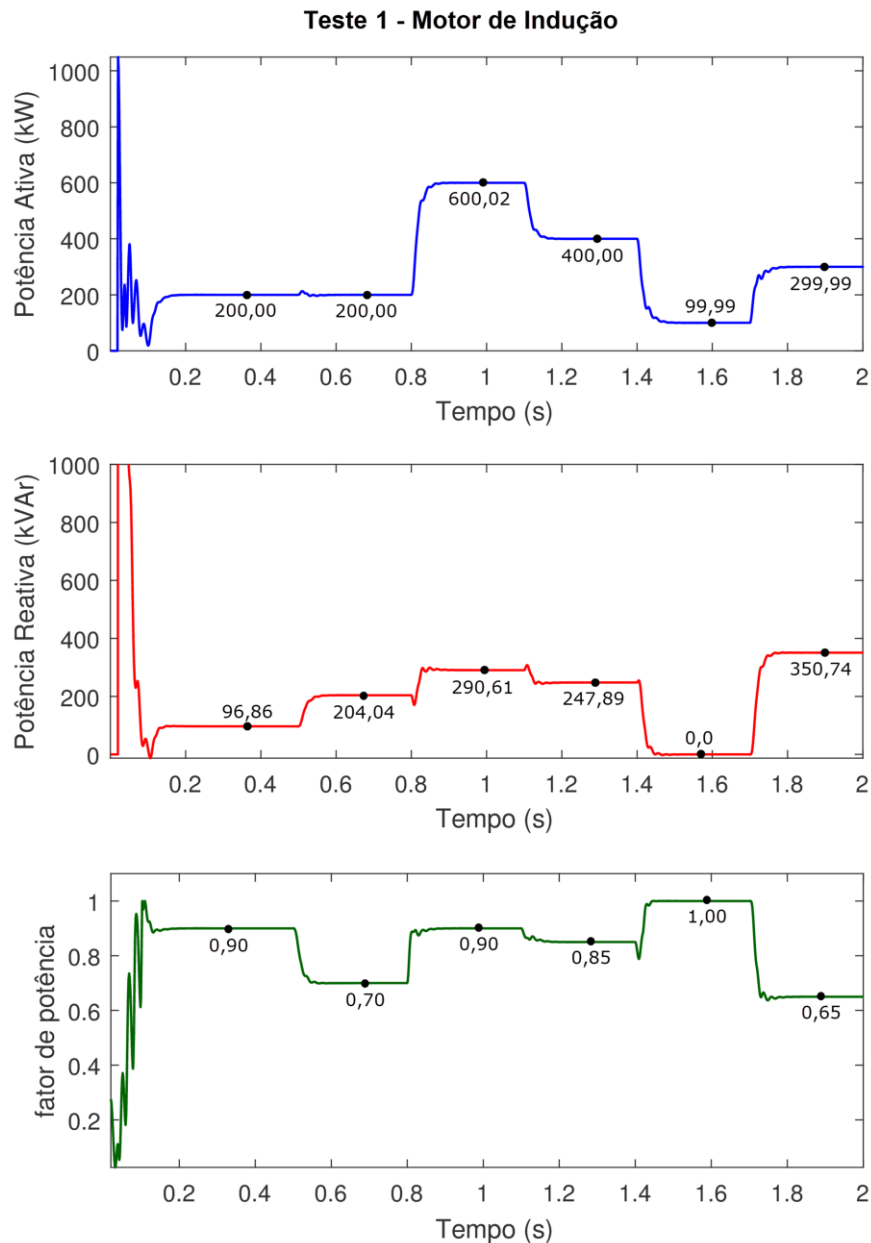


Fonte: Autoria própria.

O consumo do motor foi verificado a partir do medidor de potência correspondente ao bloco azul escuro na Figura 27(a).

A Figura 28 exibe os resultados das potências e fator de potência obtidos na simulação.

Figura 28 – Potências ativa, reativa e fator de potência do motor obtidos ao longo do Teste 1 para  $T_S = 1 \mu s$ .



Fonte: Autoria própria.

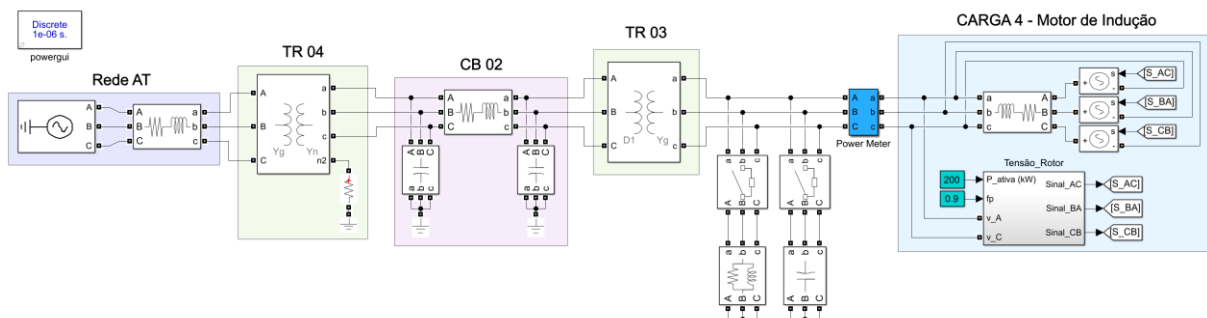
Os resultados obtidos comprovam que a operação do motor responde adequadamente à variação das condições de potência ativa e fator de potência impostas ao bloco “Tensão\_Rotor”. Observa-se que os valores de potência e fator de potência atingiram os resultados esperados, conforme a Tabela 22, após um pequeno transitório a partir da imposição dos valores na entrada

do bloco “Tensão\_Rotor”. O transitório encontrado no período inicial de simulação (de 0 a 0,1 s) foi desconsiderado por se tratar de um período de inicialização do sistema modelado.

#### 4.1.2 Teste 2: Resposta do motor à variação da tensão da barra de suprimento

O objetivo deste teste é averiguar se a potência consumida pelo motor se mantém conforme os valores impostos mesmo nas situações em que a tensão de suprimento do motor sofre variações ao longo do tempo. Na prática, estas variações poderiam ser provocadas, entre outros fatores, pela conexão e/ou desconexão de cargas no sistema, de acordo com suas naturezas – indutiva ou capacitiva. Portanto, para este teste, a potência ativa e o fator de potência impostos na entrada do bloco “Tensão\_Rotor” foram mantidos constantes (200 kW e 0,9), enquanto utilizou-se um banco de capacitores e uma carga RL para variar a tensão no barramento ao longo do tempo. O circuito simulado é mostrado na Figura 29.

Figura 29 – Teste 2 do motor de indução: arranjo simulado no *Simulink*.



Fonte: Autoria própria.

O banco de capacitores possui potência de 150 kVAr, enquanto a Carga RL possui potência ativa de 400 kW e FP igual a 0,85. Apresenta-se na Tabela 23 os instantes de conexão e desconexão, parametrizados nos disjuntores, das cargas durante a simulação.

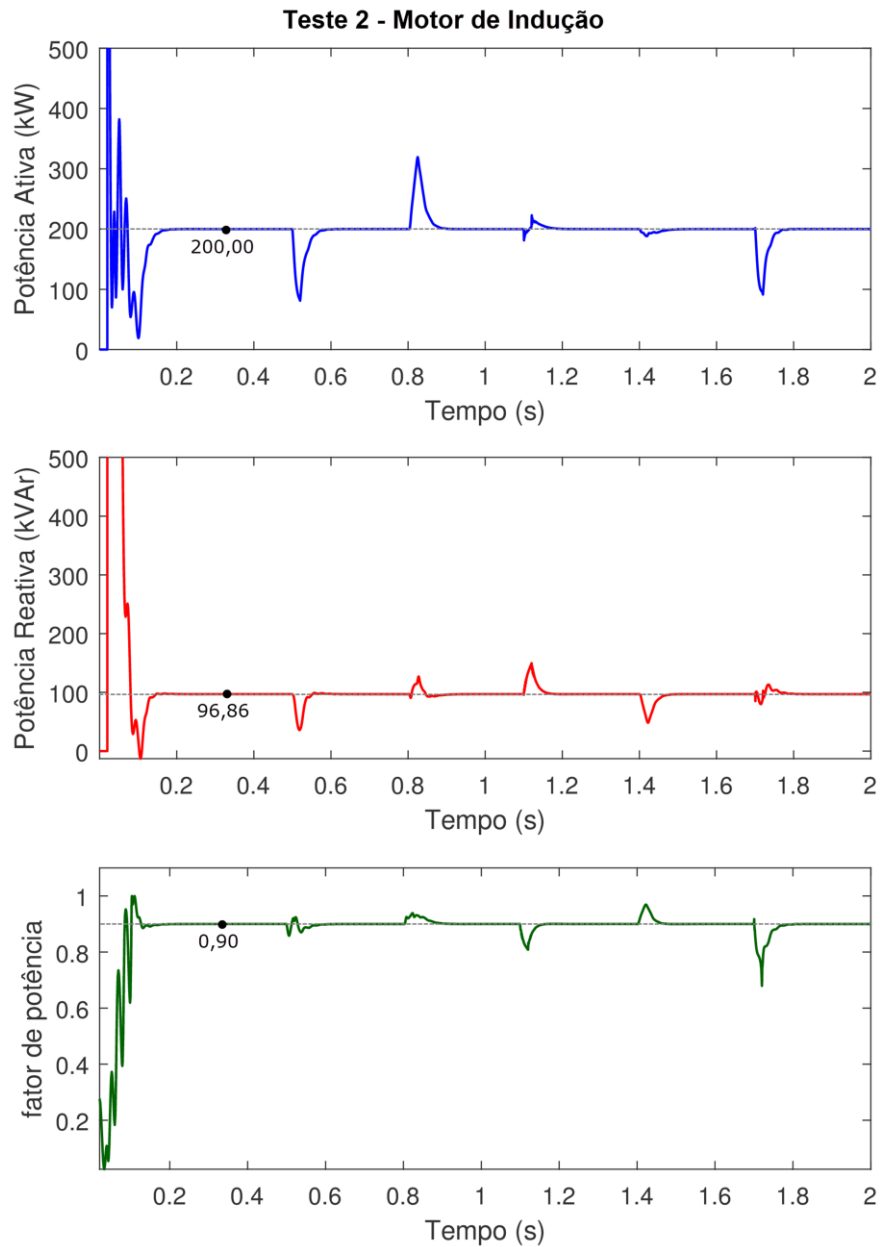
Tabela 23 – Dados para execução do Teste 2 do motor de indução no *Simulink*.

Tempo	Banco de Capacitores	Carga RL
0 a 0,5 segundos	-	-
0,5 a 0,8 segundos	-	Conectada
0,8 a 1,1 segundos	-	-
1,1 a 1,4 segundos	Conectado	-
1,4 a 1,7 segundos	-	-
1,7 a 2 segundos	Conectado	Conectada

Fonte: Autoria própria.

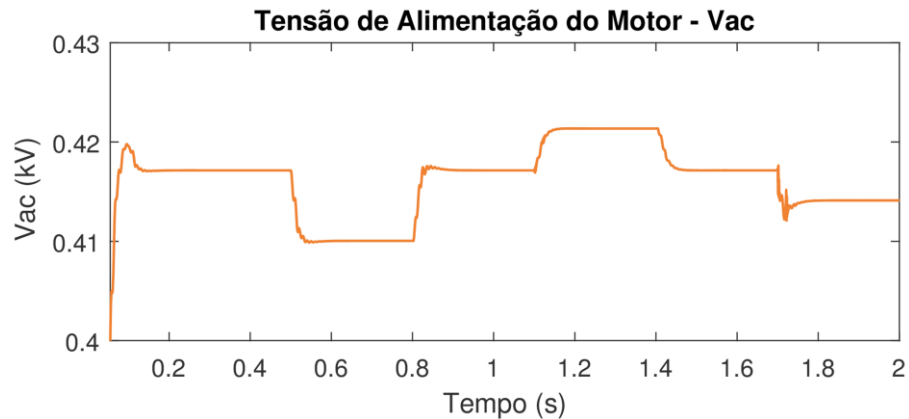
A Figura 30 exibe os resultados das potências e fator de potência obtidos na simulação do Teste 2, enquanto que a Figura 31 mostra a variação da tensão RMS na barra que supre o motor de indução.

Figura 30 – Potências ativa, reativa e fator de potência do motor obtidos ao longo do Teste 2 para  $T_S = 1\mu s$ .



Fonte: Autoria própria.

Figura 31 – Variação da tensão de suprimento ( $V_{AC}$ ) do motor ao longo do Teste 2 para  $T_S = 1 \mu s$ .



Fonte: Autoria própria.

Os resultados demonstram que a operação do motor implementado responde adequadamente à variação da tensão de suprimento. Observa-se que a cada variação da tensão de suprimento, os valores de potência e fator de potência retornam aos valores impostos no bloco “Tensão\_Rotor”, após um pequeno período transitório.

Portanto, a partir dos resultados obtidos, nos dois testes realizados, confirma-se o correto funcionamento do motor de indução implementado no arranjo do *Benchmark* no *Simulink*.

A modelagem do motor de indução adotada pelo *Benchmark IEEE-HCD* pode ser, de fato, questionada por não corresponder à operação real deste equipamento nos sistemas elétricos. Entretanto, acredita-se que esta abordagem foi adotada para facilitar a definição do valor de potência consumida por este equipamento nas três condições de operação do *Benchmark*. Em cada uma das condições apresentadas na Tabela 6, a tensão de operação a qual o motor está submetido varia, moderadamente, devido às alterações nas potências e/ou inclusão/remoção de equipamentos no sistema-teste. Portanto, ao utilizar-se o equacionamento proposto, é necessário apenas informar, como dado de entrada na simulação, o valor da potência ativa e o fator de potência do motor desejado para cada uma das condições de operação, conforme os valores informados na Tabela 6.

## 4.2 Tensões e correntes

A partir da simulação do *Benchmark* utilizando os dois passos de integração selecionados ( $1 \mu s$  e  $50 \mu s$ ), analisa-se, nesta seção, os resultados obtidos frente àqueles apresentados no artigo de apresentação do *Benchmark IEEE-HCD*. A motivação para a comparação entre esses passos de integração, conforme já citado, se baseia na falta desta

informação na publicação do *Benchmark*, apesar da alteração deste parâmetro proporcionar, em certos casos, resultados diferentes.

Os resultados completos obtidos para as tensões e correntes, fundamentais e harmônicas, em cada PAC, estão incluídos no Apêndice A. Vale ressaltar que foram abordadas somente as ordens harmônicas que apresentam maiores valores de distorção, as quais correspondem às frequências de injeção característica dos retificadores de 6 pulsos.

Analisando-se os resultados encontrados, pode-se afirmar que a simulação utilizando  $T_S = 1 \mu s$  evidenciou, no geral, discrepâncias menores com relação aos valores indicados no artigo, conforme pode ser verificado no Apêndice A. Diante disto, decidiu-se por adotar tal passo de integração como padrão para as demais simulações realizadas no presente trabalho.

O valores das tensões e correntes encontrados por meio da simulação, com o passo de integração selecionado ( $T_S = 1 \mu s$ ), e os dados registrados no artigo são apresentados na Tabela 24, na Tabela 25, na Tabela 26 e na Tabela 27, para o PAC 01 ao PAC 04, nesta ordem.

Tabela 24 – Comparação dos resultados de tensão e corrente obtidos na simulação com os dados do artigo – PAC 01.

<b>PAC 01 - Tensões</b>				
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Simulação</b>	<b>Dados Artigo</b>	<b>Discrepância</b>	
	$V_{pac-h} (V)$	$V_{pac-h} (V)$	$V (\%)$	$\theta_V (^\circ)$
<b>1ª (50 Hz)</b>	12034,51∠- 92,69°	12033,74∠- 92,71°	0,01	0,02
<b>5ª (250 Hz)</b>	39,23∠- 2,08°	39,53∠- 3,80°	-0,76	1,72
<b>7ª (350 Hz)</b>	36,06∠- 84,66°	36,13∠- 88,20°	-0,19	3,54
<b>11ª (550 Hz)</b>	40,86∠- 114,32°	38,99∠- 116,97°	4,80	2,65
<b>13ª (650 Hz)</b>	16,96∠116,14°	16,90∠112,44°	0,36	3,70
<b>PAC 01 - Correntes</b>				
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Simulação</b>	<b>Dados Artigo</b>	<b>Discrepância</b>	
	$I_{pac-h} (A)$	$I_{pac-h} (A)$	$I (\%)$	$\theta_I (^\circ)$
<b>1ª (50 Hz)</b>	6,14∠- 104,00°	6,10∠- 104,31°	0,66	0,31
<b>5ª (250 Hz)</b>	1,94∠88,40°	1,96∠86,78°	-1,02	1,62
<b>7ª (350 Hz)</b>	1,10∠17,71°	1,10∠14,39°	0,00	3,32
<b>11ª (550 Hz)</b>	0,84∠75,40°	0,83∠73,45°	1,20	1,95
<b>13ª (650 Hz)</b>	0,28∠1,11°	0,28∠- 3,86°	0,00	4,97

Fonte: Autoria própria.

Tabela 25 – Comparação dos resultados de tensão e corrente obtidos na simulação com os dados do artigo – PAC 02.

<b>PAC 02 - Tensões</b>				
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Simulação</b>	<b>Dados Artigo</b>	<b>Discrepância</b>	
	$V_{pac-h} (V)$	$V_{pac-h} (V)$	$V$ (%)	$\theta_V$ (°)
1ª (50 Hz)	12026,02∠-92,70°	12025,26∠-92,72°	0,01	0,02
5ª (250 Hz)	39,58∠0,13°	39,91∠-1,66°	-0,83	1,79
7ª (350 Hz)	35,85∠-83,17°	35,92∠-86,69°	-0,19	3,52
11ª (550 Hz)	41,37∠-116,92°	39,51∠-119,77°	4,71	2,85
13ª (650 Hz)	17,78∠117,02°	17,72∠113,31°	0,34	3,73
<b>PAC 02 - Correntes</b>				
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Simulação</b>	<b>Dados Artigo</b>	<b>Discrepância</b>	
	$I_{pac-h} (A)$	$I_{pac-h} (A)$	$I$ (%)	$\theta_I$ (°)
1ª (50 Hz)	11,85∠-99,47°	11,83∠-99,61°	0,17	0,14
5ª (250 Hz)	0,89∠139,36°	0,90∠137,58°	-1,11	1,78
7ª (350 Hz)	0,43∠65,45°	0,43∠63,12°	0,00	2,33
11ª (550 Hz)	0,31∠-50,60°	0,31∠-53,38°	0,00	2,78
13ª (650 Hz)	0,20∠-86,76°	0,20∠-95,51°	0,00	<b>8,75</b>

Fonte: Autoria própria.

Tabela 26 – Comparação dos resultados de tensão e corrente obtidos na simulação com os dados do artigo – PAC 03.

<b>PAC 03 - Tensões</b>				
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Simulação</b>	<b>Dados Artigo</b>	<b>Discrepância</b>	
	$V_{pac-h} (V)$	$V_{pac-h} (V)$	$V$ (%)	$\theta_V$ (°)
1ª (50 Hz)	12033,68∠-92,70°	12032,88∠-92,71°	0,01	0,01
5ª (250 Hz)	38,01∠-0,36°	38,30∠-2,09°	-0,76	1,73
7ª (350 Hz)	34,99∠-83,95°	35,05∠-87,50°	-0,17	3,55
11ª (550 Hz)	40,62∠-116,00°	38,77∠-118,71°	4,77	2,71
13ª (650 Hz)	17,33∠115,01°	17,28∠111,24°	0,29	3,77
<b>PAC 03 - Correntes</b>				
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Simulação</b>	<b>Dados Artigo</b>	<b>Discrepância</b>	
	$I_{pac-h} (A)$	$I_{pac-h} (A)$	$I$ (%)	$\theta_I$ (°)
1ª (50 Hz)	5,73∠-106,69°	5,73∠-106,70°	0,00	0,01
5ª (250 Hz)	0,06∠-87,99°	0,06∠-88,95°	0,00	0,96
7ª (350 Hz)	0,03∠-170,79°	0,03∠-173,47°	0,00	2,68
11ª (550 Hz)	0,01∠-51,13°	0,01∠-59,00°	0,00	<b>7,87</b>
13ª (650 Hz)	0,01∠-164,52°	0,01∠-166,25°	0,00	1,73

Fonte: Autoria própria.



Tabela 27 – Comparação dos resultados de tensão e corrente obtidos na simulação com os dados do artigo – PAC 04.

PAC 04 - Tensões				
Ordem Harmônica	Simulação	Dados Artigo	Discrepância	
	$V_{pac-h}$ (V)	$V_{pac-h}$ (V)	V (%)	$\theta_V$ (°)
1ª (50 Hz)	239,86∠- 64,19°	239,86∠- 64,21°	0,00	0,02
5ª (250 Hz)	2,95∠7,59°	2,96∠3,79°	-0,34	3,80
7ª (350 Hz)	2,06∠- 11,87°	2,09∠- 15,91°	-1,44	4,04
11ª (550 Hz)	2,56∠- 163,15°	2,57∠- 168,94°	-0,39	5,79
13ª (650 Hz)	1,57∠- 158,76°	1,74∠- 164,90°	-9,77	6,14
PAC 04 - Correntes				
Ordem Harmônica	Simulação	Dados Artigo	Discrepância	
	$I_{pac-h}$ (A)	$I_{pac-h}$ (A)	I (%)	$\theta_I$ (°)
1ª (50 Hz)	592,35∠- 69,47°	591,20∠- 69,61°	0,19	0,14
5ª (250 Hz)	44,73∠109,36°	45,01∠107,59°	-0,62	1,77
7ª (350 Hz)	21,43∠95,46°	21,42∠93,16°	0,05	2,30
11ª (550 Hz)	15,26∠- 80,57°	15,54∠- 83,36°	-1,80	2,79
13ª (650 Hz)	10,11∠- 56,74°	9,45∠- 62,72°	6,98	5,98

Fonte: Autoria própria.

Devido à característica equilibrada do arranjo implementado, os resultados correspondem aos valores medidos para a fase A. As tabelas também incluem as discrepâncias entre a simulação e os dados do artigo, sendo a discrepância dos módulos calculada percentualmente e a discrepância dos ângulos calculada pelo valor absoluto.

De maneira geral, os resultados encontrados na simulação do *Benchmark* no *Simulink* se aproximaram daqueles informados no artigo. Os valores grifados em amarelo nas tabelas correspondem às situações em que os valores dos ângulos ultrapassaram  $\pm 5^\circ$  de discrepância, as quais ocorreram nas ordens harmônicas mais elevadas, principalmente na 13ª. O valor máximo obtido para a discrepância angular de corrente foi de  $8,75^\circ$  na 13ª ordem do PAC 02, enquanto que, para as tensões, obteve-se a maior discrepância de  $6,14^\circ$  na 13ª ordem do PAC 04. Com relação aos resultados dos módulos, nenhuma situação apresentou discrepância maior que 10%, sendo as maiores discrepâncias encontradas na 13ª ordem do PAC 04, de -9,77% para a tensão e 6,98% para a corrente.

### 4.3 Potências

Os resultados obtidos para as potência, ativas (P) e reativas (Q), no *Benchmark IEEE-HCD* implementado são mostrados na Tabela 28 com o intuito de proporcionar uma visão geral

das ordens de grandeza dos elementos que compõem o sistema. Neste contexto de análise, a única variável que pôde ser comparada com as informações fornecidas no artigo, foi o fator de potência (FP), os quais, conforme pode ser notado, encontram-se com valores muito próximos entre si. Obs.: o FP do PAC 04 não foi disponibilizado.

Tabela 28 – Potências trifásicas obtidas na simulação do *Benchmark IEEE-HCD*.

	<b>P (kW)</b>	<b>Q (kVAr)</b>	<b>FP</b>	<b>FP Artigo</b>
<b>Transformador SE</b>	8089,90	981,42	0,993	0,992
CARGA MT	7246,00	2075,76	-	-
BC MT	1,20	-1195,47	-	-
<b>PAC 01</b>	217,19	43,55	0,981	0,982
CARGA 01	214,45	106,92	-	-
BC 01	0,36	-95,87	-	-
<b>PAC 02</b>	424,34	50,43	0,993	0,993
CARGA 02	257,86	99,70	-	-
CARGA 03	164,69	52,41	-	-
FHP	0,45	-134,96	-	-
<b>PAC 03</b>	200,60	50,00	0,970	0,970
CARGA 04	200,00	96,86	0,900	-
BC 02	0,16	-54,05	-	-

Fonte: Autoria própria.

## 4.4 Impedâncias

De maneira a compreender as metodologias propostas na literatura para obtenção de impedâncias harmônicas, decidiu-se implementar, no *Simulink*, os seguintes métodos de estimação de impedância:

- Método A: injeção de correntes harmônicas senoidais;
- Método B: injeção de correntes inter-harmônicas senoidais adjacentes às harmônicas de modo individual;
- Método C: injeção de correntes inter-harmônicas senoidais adjacentes às harmônicas de modo simultâneo;
- Método D: injeção de correntes inter-harmônicas senoidais em pacotes;
- Método E: injeção de correntes do tipo Gaussiana Modulada.

Tais procedimentos são baseados na injeção de sinais de corrente. Desta forma, torna-se possível a avaliação dos resultados destes métodos, de maneira computacional, utilizando o

*Benchmark*, para a posterior comparação com os resultados mostrados no artigo do *Benchmark*. A fundamentação teórica e o equacionamento destes métodos já foram abordados no Capítulo 2.

Objetivando padronizar os níveis de corrente injetados, adotou-se em todos os métodos e em todas as frequências injetadas, a magnitude do sinal equivalente a 2% da corrente fundamental do respectivo PAC. A única exceção ocorreu no Método A, especificamente para a ordem fundamental, na qual injetou-se um valor correspondente a 10% da corrente de mesma ordem no PAC. A injeção de uma corrente maior, nesta situação, se justifica pela necessidade de criar um distúrbio no sistema de maior intensidade, haja vista que as ordens de grandeza de tensão e corrente, para a fundamental, são de maiores magnitudes quando comparadas às demais ordens harmônicas perturbadas.

Cabe aqui destacar, que o artigo de apresentação do *Benchmark* não trouxe nenhuma informação sobre a magnitude dos sinais injetados, apenas os tratou como “pequenos sinais de corrente”.

Ainda, vale ressaltar que, na aplicação dos métodos, foi considerada a injeção de um único sinal entre duas fases [61], portanto, a tensão utilizada nos cálculos correspondeu à tensão entre estas fases. Nestes termos, para a obtenção do valor final da impedância de sequência positiva por fase, foi necessária a divisão por dois dos resultados das impedâncias harmônicas encontrados com a aplicação das metodologias.

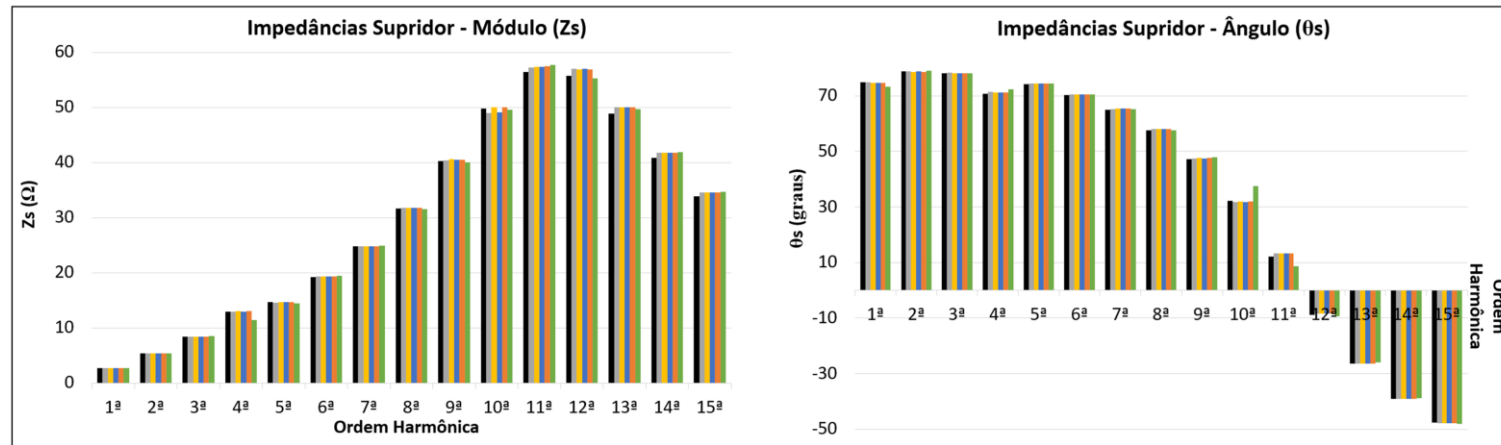
Assim, procedendo-se à aplicação dos métodos de estimação das impedâncias harmônicas, em cada PAC do *Benchmark IEEE-HCD*, obteve-se os resultados para as impedâncias de sequência positiva, por fase, observadas a partir deste ponto, para o circuito equivalente do consumidor ( $Z_C \angle \theta_C$ ) e para o circuito equivalente do sistema supridor ( $Z_S \angle \theta_S$ ). Para facilitar a análise dos resultados, optou-se por apresentar as tabelas com o detalhamento de todos os resultados no Apêndice B desta dissertação. Neste capítulo será feita a apresentação destes resultados, de maneira sintetizada, a partir da exposição de gráficos comparativos.

Antes de se realizar a apresentação dos resultados propriamente ditos, é importante destacar que devido a peculiaridades da modelagem do equivalente elétrico do motor de indução, os valores dos módulos e ângulos das fontes controladas, presentes neste modelo, permaneceram fixos durante a aplicação dos métodos de estimação de impedância, isto é, deixaram de ser dependentes da tensão do barramento. Os valores utilizados para os módulos e os ângulos das tensões destas fontes corresponderam aos valores obtidos na simulação do sistema, sem a inclusão da fonte de corrente para cálculo das impedâncias, após atingido o regime permanente. Esse procedimento foi adotado uma vez que, conforme já mencionado, a

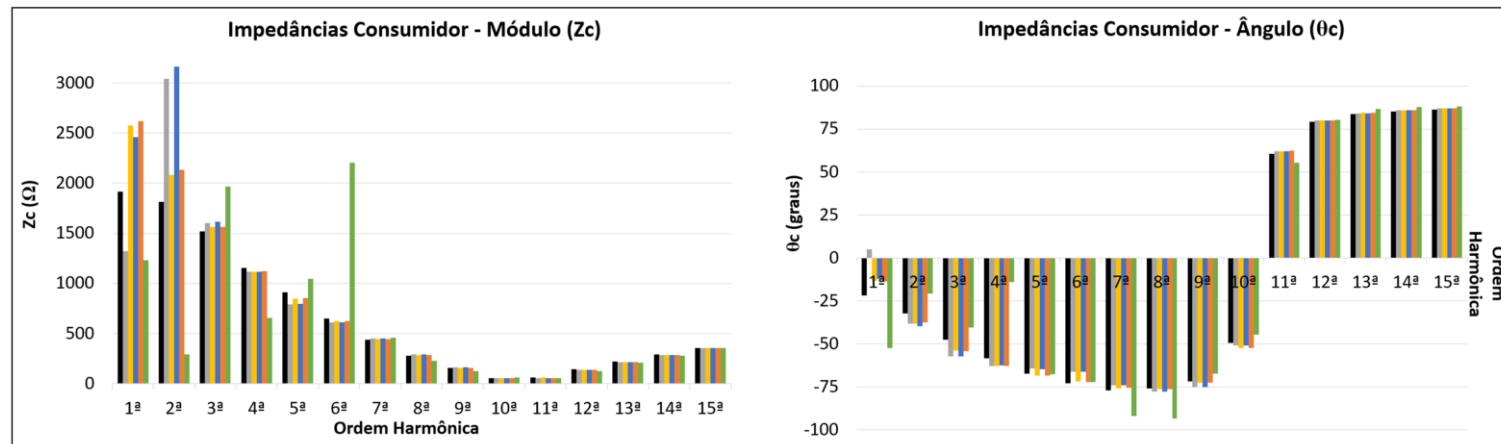
dependência do modelo do motor com a tensão do barramento é importante apenas para definir os valores de potência e, conseqüentemente, os parâmetros das fontes de tensão controladas, para as diferentes condições de operação do sistema, o que deve ser feito, de fato, anteriormente ao momento da estimação das impedâncias.

Dando seqüência aos desenvolvimentos, tem-se na Figura 32, os resultados para o PAC 01 das impedâncias harmônicas do sistema supridor e do consumidor, obtidos através da aplicação dos métodos elencados. E, na seqüência, a Figura 33, a Figura 34 e a Figura 35 apresentam os resultados, respectivamente, para o PAC 02, PAC 03 e PAC 04.

Figura 32 – Comparação dos métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no *Benchmark IEEE-HCD* e os dados do artigo – PAC 01: (a) impedâncias do sistema supridor e (b) impedâncias do consumidor.



(a)

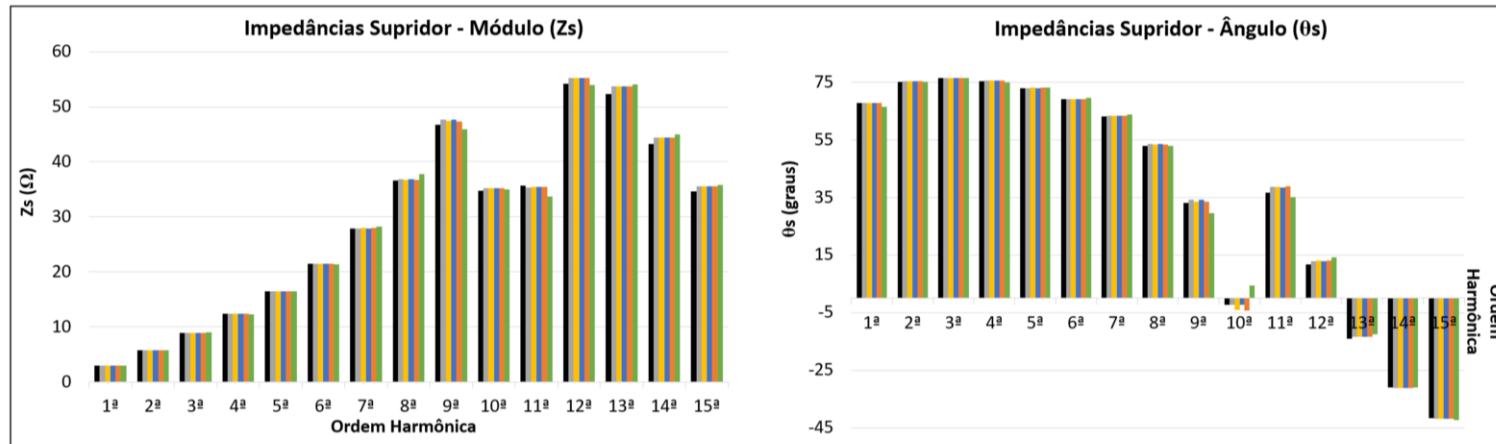


(b)

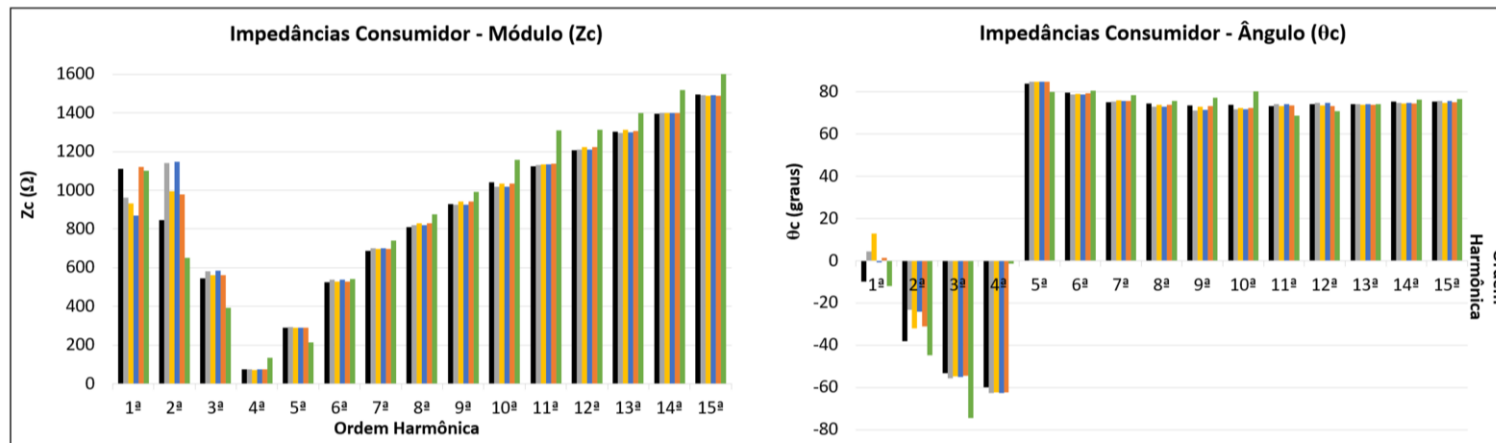
- Dados Artigo
- Método A: Injeção de correntes harmônicas senoidais
- Método B: Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais adjacentes às harmônicas de modo individual
- Método C: Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais adjacentes às harmônicas de modo simultâneo
- Método D: Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais em pacotes
- Método E: Injeção de correntes do tipo Gaussiana Modulada

Fonte: Autoria própria.

Figura 33 – Comparação dos métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no *Benchmark IEEE-HCD* e os dados do artigo – PAC 02: (a) impedâncias do sistema supridor e (b) impedâncias do consumidor.



(a)

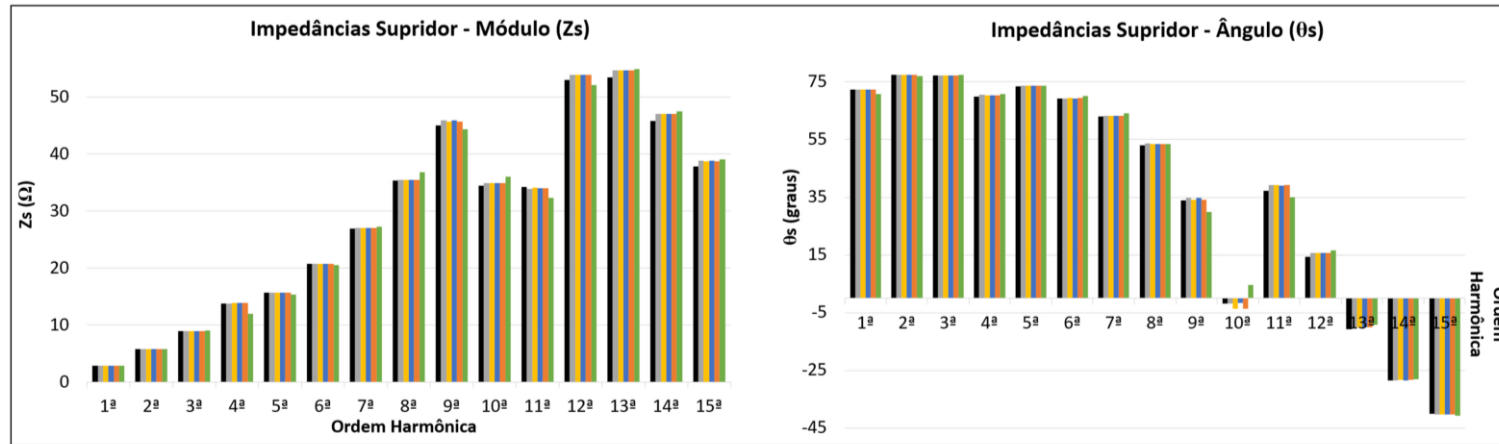


(b)

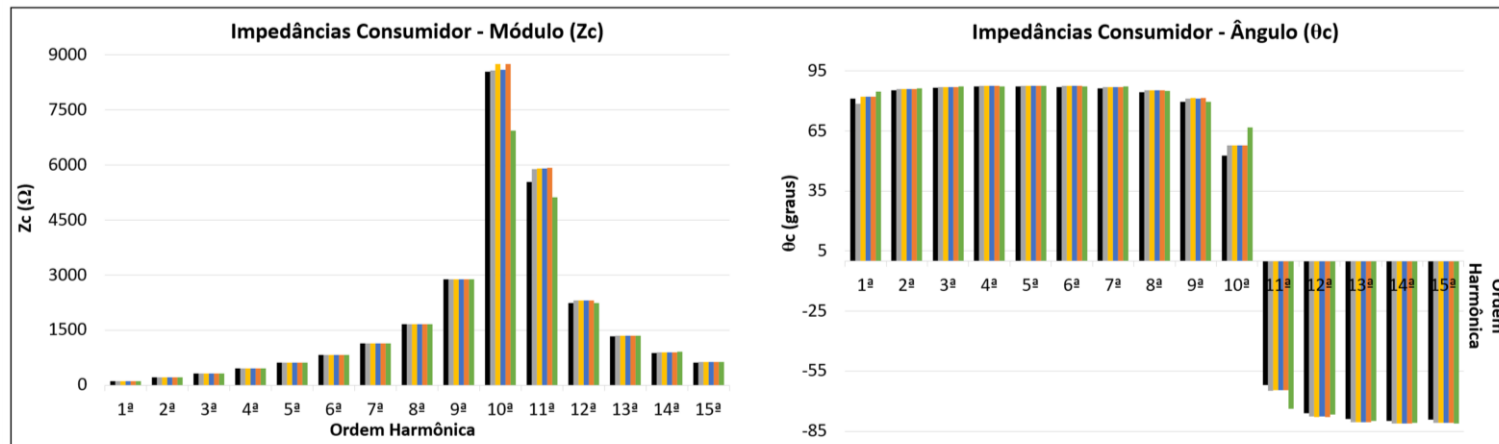
- Dados Artigo
- Método A: Injeção de correntes harmônicas senoidais
- Método B: Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais adjacentes às harmônicas de modo individual
- Método C: Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais adjacentes às harmônicas de modo simultâneo
- Método D: Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais em pacotes
- Método E: Injeção de correntes do tipo Gaussiana Modulada

Fonte: Autoria própria.

Figura 34 – Comparação dos métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no *Benchmark IEEE-HCD* e os dados do artigo – PAC 03: (a) impedâncias do sistema supridor e (b) impedâncias do consumidor.



(a)

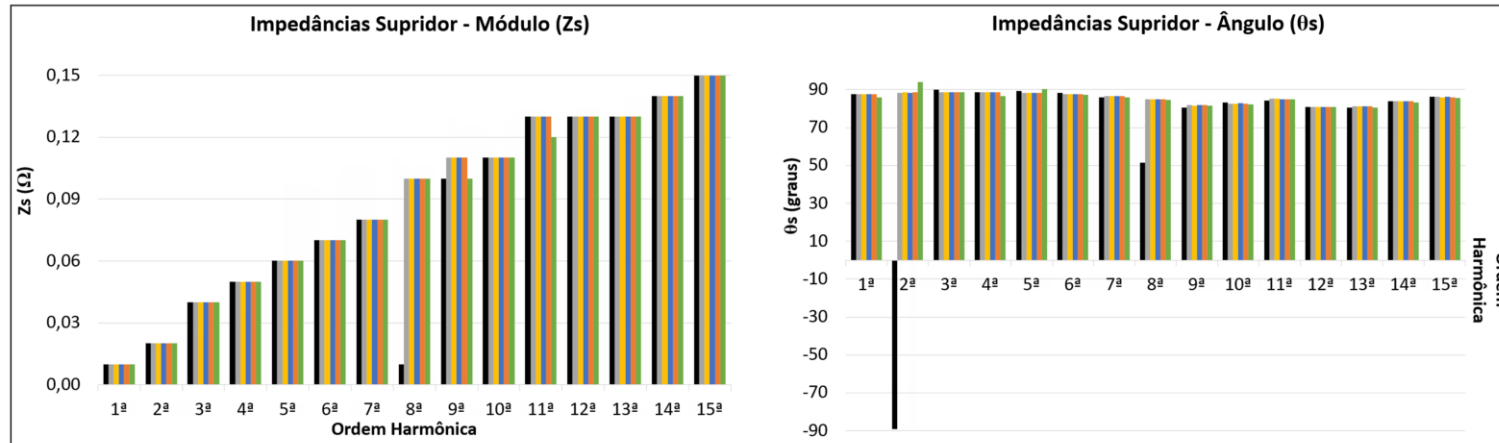


(b)

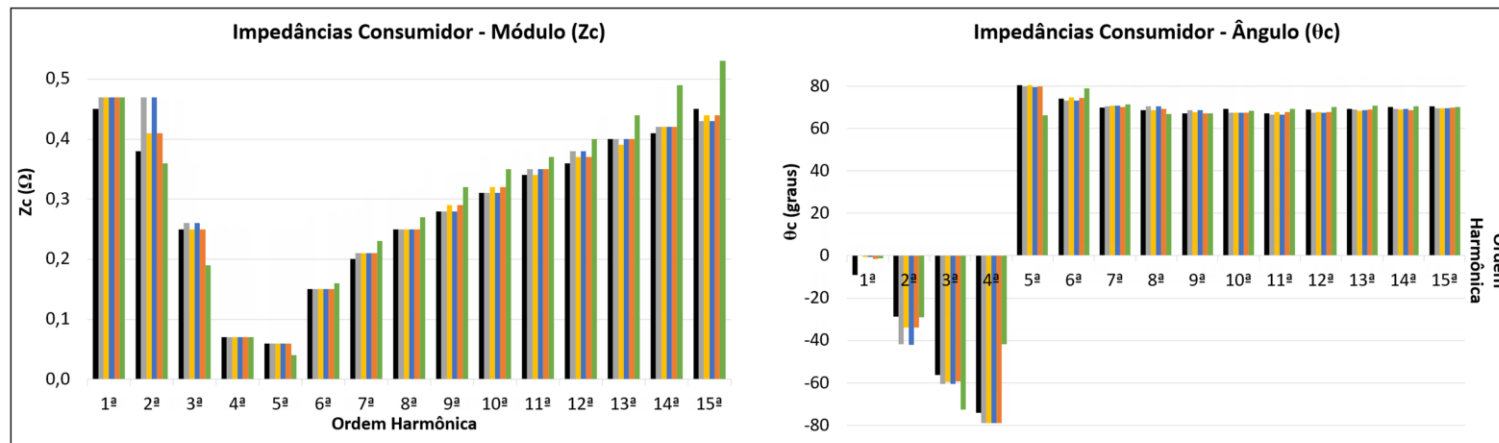
- Dados Artigo
- Método A: Injeção de correntes harmônicas senoidais
- Método B: Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais adjacentes às harmônicas de modo individual
- Método C: Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais adjacentes às harmônicas de modo simultâneo
- Método D: Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais em pacotes
- Método E: Injeção de correntes do tipo Gaussiana Modulada

Fonte: Autoria própria.

Figura 35 – Comparação dos métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no *Benchmark IEEE-HCD* e os dados do artigo – PAC 04: (a) impedâncias do sistema supridor e (b) impedâncias do consumidor.



(a)



(b)

- Dados Artigo
- Método A: Injeção de correntes harmônicas senoidais
- Método B: Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais adjacentes às harmônicas de modo individual
- Método C: Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais adjacentes às harmônicas de modo simultâneo
- Método D: Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais em pacotes
- Método E: Injeção de correntes do tipo Gaussiana Modulada

Fonte: Autoria própria.



Analisando, primeiramente, os resultados para as impedâncias dos circuitos equivalentes do sistema supridor, verifica-se que, de uma forma geral, os resultados dos métodos aplicados na obtenção destas impedâncias, observadas a partir dos quatro PACs, se aproximaram dos resultados apresentados no artigo. De fato, tomando como referência, os resultados apresentados no Apêndice B, somente duas ordens harmônicas – relativas ao PAC 04 – apresentaram resultados de discrepância consideravelmente maiores que os limites, estabelecidos como satisfatórios, de  $\pm 10\%$  para o módulo e  $\pm 5^\circ$  para o ângulo. Tais ordens se tratam da 2ª e da 8ª. Apesar disso, todos os métodos avaliados apresentaram praticamente os mesmos resultados de discrepância, nestas duas ordens destacadas. Essas discrepâncias podem ser visualizadas na Figura 35(a) e também nos resultados em apêndice, na Tabela 56.

A discrepância apresentada no ângulo da impedância do sistema supridor de 2º ordem pode ser justificada pois, nos dados do artigo, a parte resistiva da impedância apresentou sinal negativo. Entretanto, este valor é muito próximo de zero, ( $-0,0004$ ), de maneira que, caso o mesmo seja aproximado para zero, as discrepâncias observadas deixam de existir. Já para o caso da 8ª ordem harmônica, estas elevadas discrepâncias podem ser devido o valor da parte imaginária da impedância do supridor, obtido para todos os métodos avaliados ( $\cong j 0,1 \Omega$ ), ter sido cerca de 10 vezes maior que o valor informado no artigo ( $j 0,01 \Omega$ ).

Considerando agora os resultados para as impedâncias do consumidor, uma maior quantidade de situações apresentou discrepâncias além dos limites estabelecidos. Para o PAC 01, PAC 02 e PAC 04, observa-se que, via de regra, as maiores discrepâncias ocorreram nas ordens harmônicas mais baixas, principalmente na fundamental e na 2ª ordem, conforme mostrado na Figura 32(b), Figura 33(b) e na Figura 35(b), bem como nas tabelas em apêndice (Tabela 47, Tabela 50 e Tabela 56) para os Métodos A, B, C e D.

O Método E, por outro lado, proporcionou resultados para as impedâncias do consumidor com discrepâncias que ultrapassaram os limites postos como satisfatórios, em grande parte das ordens harmônicas sob análise para os PACs 01, 02 e 04. Para se entender os motivos que propiciaram estas discrepâncias mais significativas, maiores investigações devem ser realizadas, principalmente com relação as particularidades da implementação computacional deste método, dada a sua complexidade no processamento dos sinais (tensões e correntes) resultantes. Além disso, sugere-se avaliar a influência da magnitude do sinal injetado no resultado do método através da realização de simulações com valores percentuais diferentes para tal magnitude.

Com relação às impedâncias do consumidor para o PAC 03, em todos os métodos avaliados, as discrepâncias permaneceram abaixo dos  $\pm 10\%$  e  $\pm 5^\circ$  estabelecidos, de acordo com

a Tabela 53 do Apêndice B e a Figura 34(b). No entanto, uma ligeira variação acima dos limites foi observada por volta da 10<sup>a</sup> ordem – lembrando que os parâmetros do sistema foram estabelecidos para manter uma ressonância próxima a 11<sup>a</sup> ordem.

Com exceção do Método E, as maiores discrepâncias observadas nos resultados das impedâncias dos consumidores, ocorreram nas frequências mais próximas à fundamental, principalmente na segunda e na própria frequência fundamental, para os PACs 01, 02 e 04.

Ainda, comparando os valores obtidos nos Métodos A, B, C e D, percebe-se que, de uma maneira geral, os resultados dos Métodos A e C se apresentaram muito próximos entre si, enquanto que o mesmo pôde ser observado para os Métodos B e D.

Por fim, avaliando-se cuidadosamente os resultados de cada um dos métodos apresentados, também se percebe que o Método D foi, de uma maneira geral, o que apresentou resultados mais próximos aos dados fornecidos pelo artigo. De fato, isto é compreensível, uma vez que este corresponde ao método indicado na publicação do *Benchmark*, apesar de ainda faltarem maiores detalhes no artigo sobre a forma de aplicação da metodologia.

## **4.5 Aplicação preliminar do Método da Superposição para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas**

Para avaliação dos resultados fornecidos pelas diferentes metodologias propostas na literatura para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão, utilizando o *Benchmark IEEE-HCD*, optou-se por adotar os resultados obtidos pelo Método da Superposição como os valores de referência. A justificativa por esta escolha se baseia na consistência dos resultados obtidos através dessa metodologia, uma vez que a mesma está muito bem fundamentada sobre os princípios básicos de solução de circuitos elétricos. A dificuldade da sua aplicação prática – conhecimento das impedâncias harmônicas – não existe neste caso, pois dada a natureza computacional dos estudos realizados, os valores de impedâncias já se encontram devidamente estimados conforme apresentado no presente trabalho.

Assim, uma vez apresentada a implementação do arranjo elétrico do *Benchmark* no *Simulink* e realizadas as análises comparativas dos dados obtidos nos testes preliminares com aqueles informados no artigo de introdução do *Benchmark*, pretende-se, nesta seção, concretizar a aplicação desta Metodologia Clássica da Superposição.

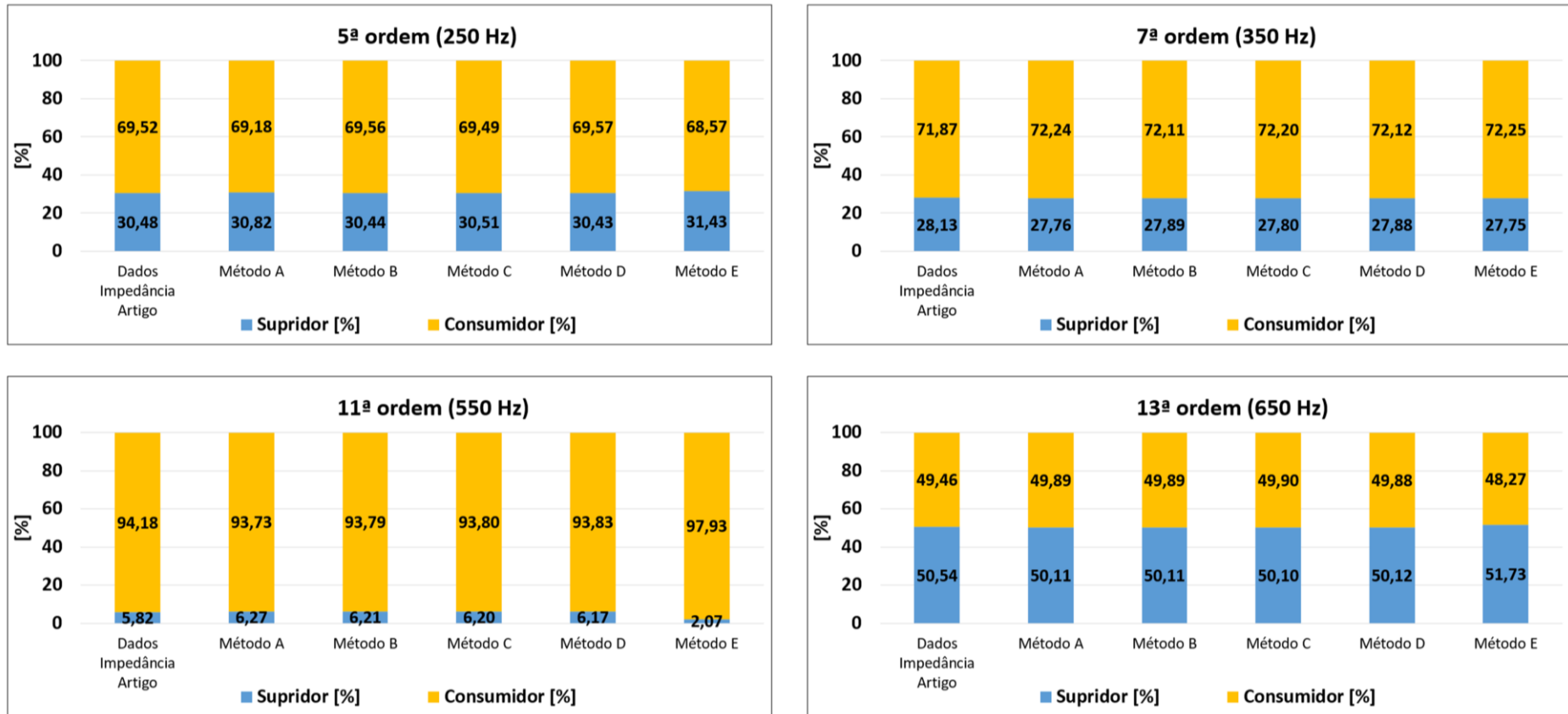
Portanto, tal implementação tem por objetivo dois aspectos centrais, a saber: o estabelecimento de valores de referência para os testes de metodologias de compartilhamento de responsabilidades harmônicas no *Benchmark IEEE-HCD*, os quais serão realizados no

Capítulo 5 deste trabalho dissertativo; e a avaliação da influência dos resultados provenientes das distintas metodologias de estimativa de impedância, nos percentuais de compartilhamento de responsabilidade advindos do emprego do Método da Superposição.

Nestes termos, seguindo as instruções de aplicação do método, introduzidas na seção A.1.2 do Anexo A, calculou-se os percentuais de responsabilidade sobre as tensões harmônicas nos quatro PACs do *Benchmark* a partir dos resultados de tensões e correntes obtidos na simulação para os PACs (Tabela 24 à Tabela 27) e dos valores de impedância alcançados na aplicação de cada um dos métodos (Apêndice B). Também se calculou o compartilhamento utilizando as impedâncias informadas no artigo, a título de comparação com os demais casos.

As ordens harmônicas analisadas foram as mesmas das tensões e correntes (5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup>), por serem aquelas informadas no artigo e também por serem as principais ordens, via de regra, das injeções características dos retificadores de 6 pulsos, que são as cargas não lineares existentes no arranjo. Os resultados do compartilhamento de responsabilidades, para cada um dos PACs, são apresentados na Figura 36, na Figura 37, na Figura 38 e na Figura 39.

Figura 36 – Método da Superposição para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão: comparação entre os métodos para obtenção das impedâncias harmônicas e os dados de impedância informados no artigo – PAC 01.



Método A: Injeção de correntes harmônicas senoidais

Método B: Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais adjacentes às harmônicas de modo individual

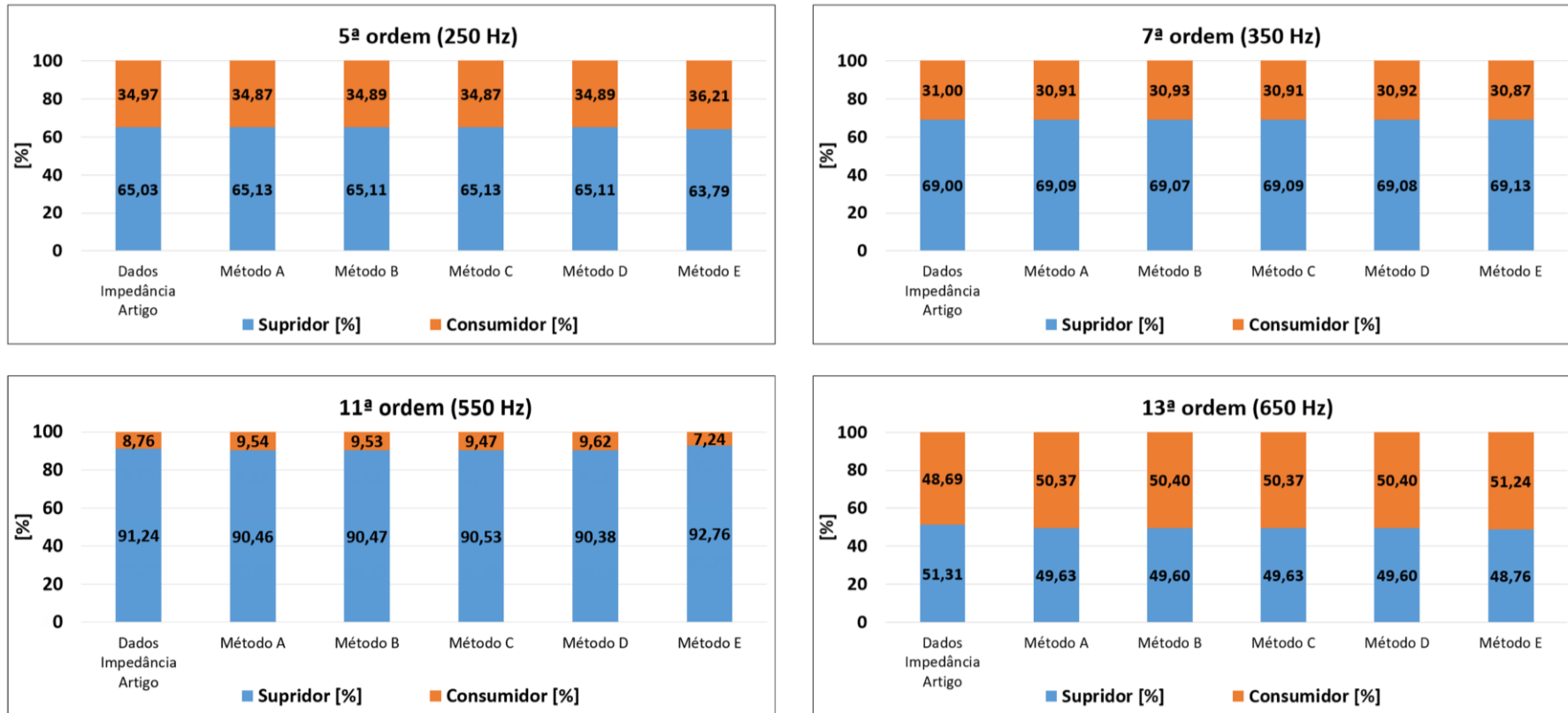
Método C: Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais adjacentes às harmônicas de modo simultâneo

Método D: Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais em pacotes

Método E: Injeção de correntes do tipo Gaussiana Modulada

Fonte: Autoria própria.

Figura 37 – Método da Superposição para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão: comparação entre os métodos para obtenção das impedâncias harmônicas e os dados de impedância informados no artigo – PAC 02.



Método A: Injeção de correntes harmônicas senoidais

Método B: Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais adjacentes às harmônicas de modo individual

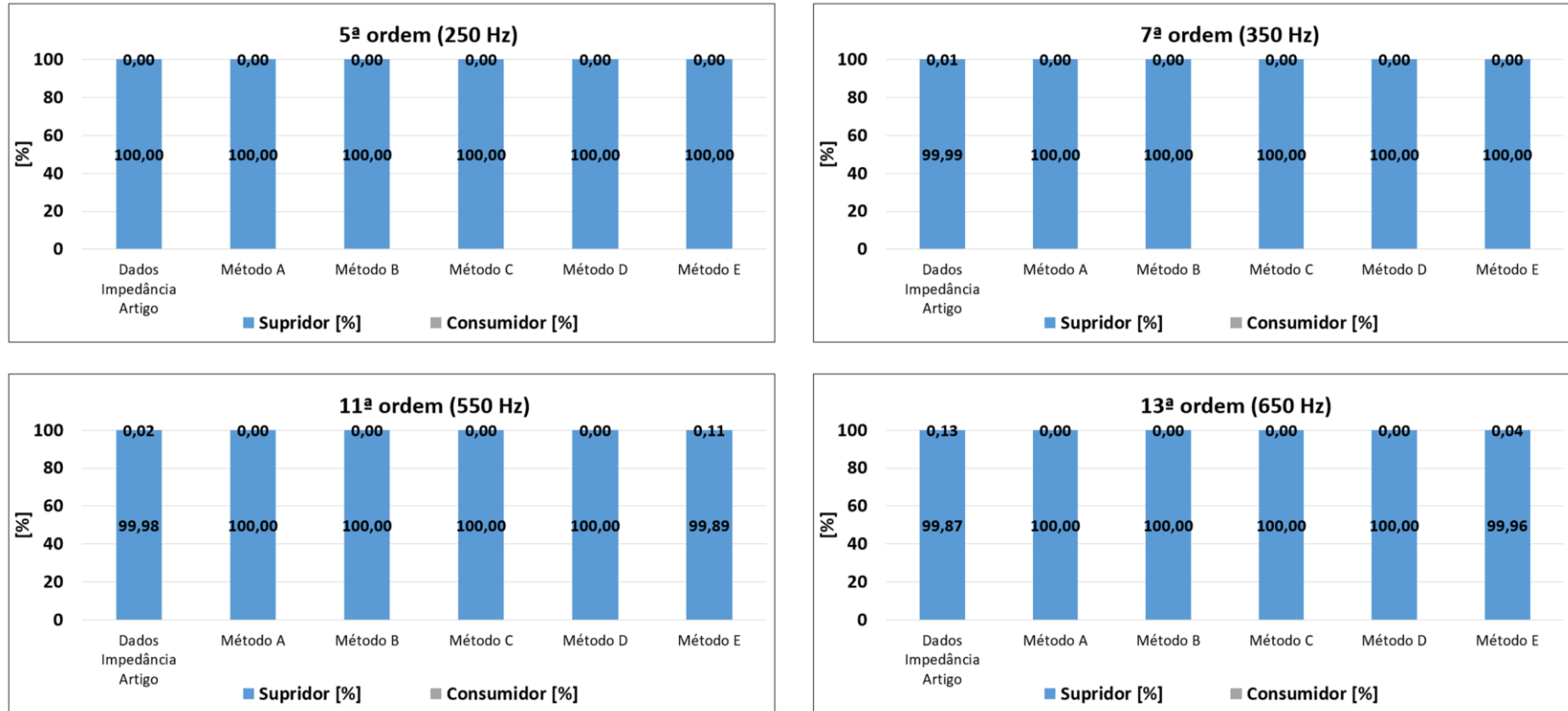
Método C: Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais adjacentes às harmônicas de modo simultâneo

Método D: Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais em pacotes

Método E: Injeção de correntes do tipo Gaussiana Modulada

Fonte: Autoria própria.

Figura 38 – Método da Superposição para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão: comparação entre os métodos para obtenção das impedâncias harmônicas e os dados de impedância informados no artigo – PAC 03.



Método A: Injeção de correntes harmônicas senoidais

Método B: Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais adjacentes às harmônicas de modo individual

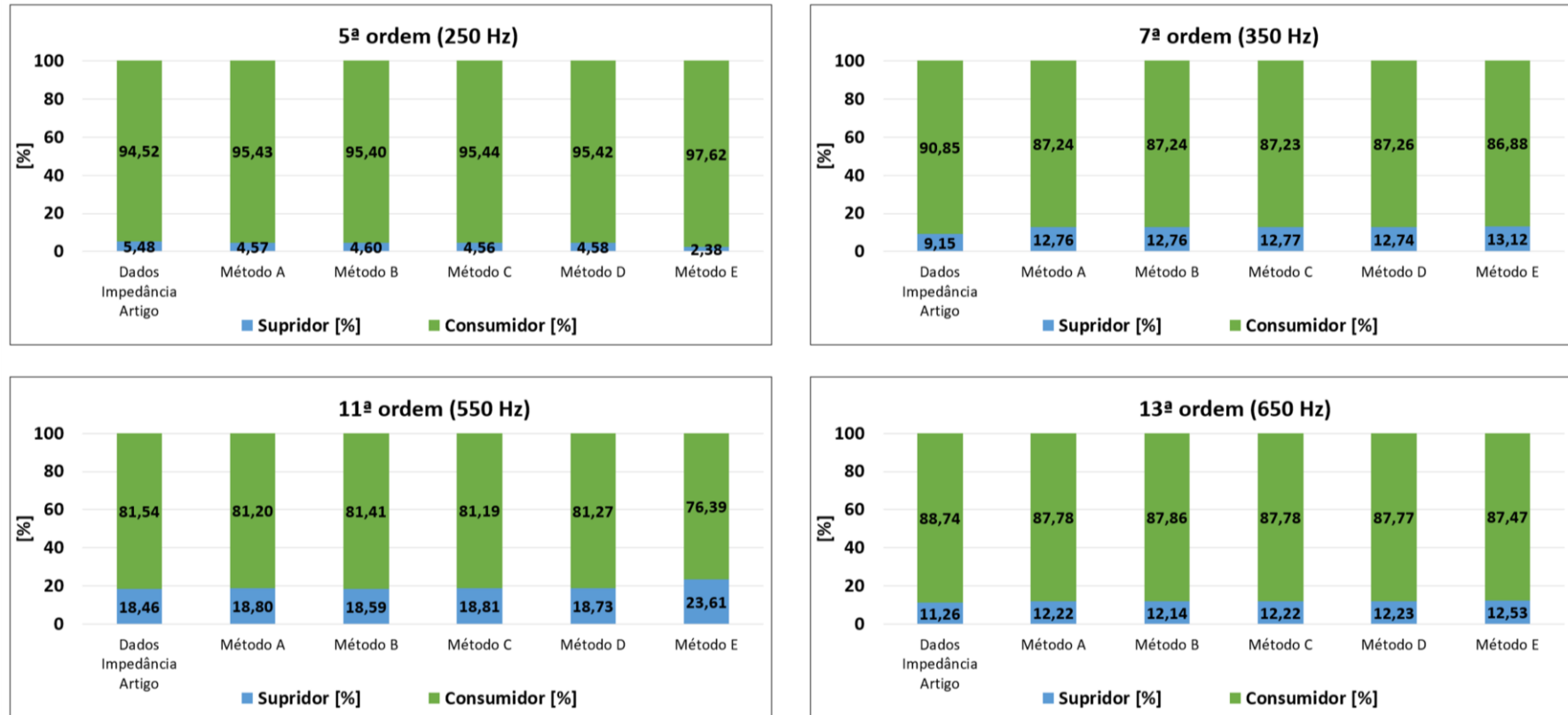
Método C: Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais adjacentes às harmônicas de modo simultâneo

Método D: Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais em pacotes

Método E: Injeção de correntes do tipo Gaussiana Modulada

Fonte: Autoria própria.

Figura 39 – Método da Superposição para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão: comparação entre os métodos para obtenção das impedâncias harmônicas e os dados de impedância informados no artigo – PAC 04.



Método A: Injeção de correntes harmônicas senoidais

Método B: Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais adjacentes às harmônicas de modo individual

Método C: Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais adjacentes às harmônicas de modo simultâneo

Método D: Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais em pacotes

Método E: Injeção de correntes do tipo Gaussiana Modulada

Fonte: Autoria própria.

Tomando como satisfatórios distanciamentos menores que 5 pontos percentuais entre os resultados do compartilhamento advindos do emprego das impedâncias obtidas a partir das metodologias avaliadas e dos dados incluídos no artigo, no que diz respeito ao compartilhamento para o PAC 01, os resultados provenientes das metodologias de estimação de impedância, para todas as ordens harmônicas, apresentaram resultados satisfatórios. Uma maior discrepância foi provida pela aplicação do Método E para a 11ª ordem harmônica, na qual percebe-se uma diferença de 3,75 pontos percentuais com relação aos dados do artigo.

Em se tratando do PAC 02, a utilização das impedâncias advindas das metodologias também se mostrou adequada na determinação das parcelas de responsabilidade harmônica entre as partes. A maior discrepância observada foi também com o Método E, que apresentou, na 13ª ordem, discrepância de 2,55 pontos percentuais.

Continuando a análise para o PAC 03, é possível verificar que a utilização das impedâncias a partir de todas as metodologias de estimação apresentaram resultados apropriados em todas as ordens harmônicas analisadas. Neste cenário, assume-se que 100% das distorções harmônicas são provenientes do sistema supridor. Esse resultado é coerente, haja vista que o Consumidor 3, conectado a este PAC, possui apenas cargas lineares em seu arranjo.

Com relação ao PAC 04, os resultados se mostraram mais uma vez, de um modo geral, aceitáveis. Porém, nesta análise, o Método E proporcionou um resultado acima do valor estabelecido como satisfatório (5 pontos percentuais). Isto foi verificado para a 11ª ordem, onde a discrepância foi de 5,15 pontos percentuais. Além disto, as maiores diferenças nas demais ordens também foram proporcionadas a partir desta metodologia, onde observa-se discrepâncias de 3,1 e 3,97 pontos percentuais para a 5ª e a 7ª ordem, respectivamente.

Por fim, é válido comentar a respeito dos percentuais de responsabilidade obtidos para o PAC 02 e o PAC 04, uma vez que estes PACs estão relacionados ao Consumidor 02, estando o PAC 02 localizado no lado de MT do transformador que supre este consumidor, enquanto que o PAC 04 está localizado no lado BT deste transformador. Isso posto, percebe-se que, no PAC 04, a responsabilidade pelas distorções harmônicas, em todas as ordens, é predominantemente do consumidor. No entanto, ao observar-se os resultados para o PAC 02, percebe-se uma mudança nos percentuais de responsabilidade entre as partes, sendo, neste caso, o sistema supridor responsável por mais de 50% da responsabilidade, em praticamente todas as ordens harmônicas. Assim, ressalta-se que a consideração ou não do transformador de suprimento como parte do circuito equivalente do consumidor influencia consideravelmente nos resultados da distribuição do compartilhamento de responsabilidades harmônicas entre o sistema supridor e o consumidor. Outra importância destes resultados está na observação da propagação do



fenômeno de distorções harmônicas de tensão ao longo dos sistemas elétrico, percebendo-se sua atenuação com o distanciamento elétrico da fonte geradora.

Portanto, conclui-se que, de uma forma global, os resultados para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão, pelo Método da Superposição, advindos da utilização dos valores de impedâncias estimados por intermédio do Método E foram os que apresentaram maiores discrepâncias. Isso se deve ao fato desta mesma metodologia ter proporcionado resultados para impedância com maiores distanciamentos daqueles informados no artigo do *Benchmark*. Não obstante a isso, os resultados para o compartilhamento de responsabilidades se mostram mais convergentes que aqueles evidenciados pela aplicação dos procedimentos de estimação das impedâncias harmônicas.

---

# CAPÍTULO V

---

## 5 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DAS METODOLOGIAS PARA O COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES HARMÔNICAS UTILIZANDO O *BENCHMARK IEEE-HCD*

---

Neste capítulo apresenta-se os resultados obtidos a partir da aplicação, no arranjo elétrico do *Benchmark*, das principais metodologias para compartilhamento de responsabilidades harmônicas, as quais incluem o Método da Superposição, o Método da Impedância Dominante (MID), o Método do Chaveamento de Capacitores (MCC) e o Método da Injeção de Corrente Harmônica (MIC). Os resultados advindos da aplicação destes métodos são apresentados, analisados e comparados entre si.

## 5.1 Aplicação do Método da Superposição no *Benchmark*

No capítulo anterior houve a aplicação do Método da Superposição de Tensões com o intuito de avaliar a influência dos resultados provenientes das distintas metodologias de estimativa de impedância nos percentuais de compartilhamento de responsabilidade. Este método foi selecionado, conforme já justificado, para representar os valores de referência do compartilhamento de responsabilidades na análise das demais metodologias no *Benchmark IEEE-HCD*.

Nesse sentido, tendo em vista os resultados obtidos para as impedâncias harmônicas a partir das distintas metodologias de estimação, bem como os resultados encontrados para o compartilhamento através do Método da Superposição utilizando as impedâncias provenientes de tais metodologias, detalhados no Capítulo 4, adotou-se como referência aqueles resultados obtidos pelo Método D de estimação de impedâncias. Este procedimento (Método D), além de ter apresentado os resultados mais compatíveis com os dados informados no artigo de apresentação do *Benchmark*, trata-se do processo preconizado neste mesmo artigo. Portanto, os resultados de impedâncias harmônicas obtidos por esta metodologia e adotados como referência, para as ordens de interesse do estabelecimento das parcelas de responsabilidade harmônica no *Benchmark*, são novamente apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Impedâncias harmônicas de referência observadas a partir dos PACs para o *Benchmark IEEE-HCD* implementado.

Ordem Harmônica	$\dot{Z}_{supridor-h} (\Omega)$			
	PAC 01	PAC 02	PAC 03	PAC 04
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	14,66∠74,52°	16,47∠73,03°	15,67∠73,64°	0,06∠88,22°
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	24,80∠65,39°	27,95∠63,34°	27,02∠63,27°	0,08∠86,69°
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	57,48∠13,28°	35,47∠38,83°	34,03∠39,26°	0,13∠85,06°
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	49,97∠-26,44°	53,73∠-13,39°	54,74∠-10,00°	0,13∠81,16°
Ordem Harmônica	$\dot{Z}_{consumidor-h} (\Omega)$			
	PAC 01	PAC 02	PAC 03	PAC 04
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	855,84∠-68,47°	289,69∠84,74°	614,34∠87,65°	0,06∠79,96°
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	443,98∠-75,62°	698,68∠75,80°	1134,65∠86,86°	0,21∠70,20°
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	57,95∠62,29°	1137,18∠73,47°	5918,59∠-64,51°	0,35∠67,62°
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	214,59∠84,31°	1308,07∠73,87°	1349,78∠-80,52°	0,40∠68,83°

Fonte: Autoria própria.

Além dos dados de impedância, utilizou-se, para aplicação do Método da Superposição, as tensões e correntes harmônicas presentes nos PACs. Esses valores foram obtidos a partir da

simulação do *Benchmark* avaliada no Capítulo 4 (Tabela 24 à Tabela 27), e são novamente mostrados na Tabela 30.

Tabela 30 – Tensões e correntes harmônicas nos PACs – *Benchmark IEEE-HCD* implementado no *Simulink*.

Ordem Harmônica	$\dot{V}_{pac-h}$ (V)			
	PAC 01	PAC 02	PAC 03	PAC 04
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	39,23∠- 2,08°	39,58∠0,13°	38,01∠- 0,36°	2,95∠7,59°
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	36,06∠- 84,66°	35,85∠- 83,17°	34,99∠- 83,95°	2,06∠- 11,87°
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	40,86∠- 114,32°	41,37∠- 116,92°	40,62∠- 116,00°	2,56∠- 163,15°
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	16,96∠116,14°	17,78∠117,02°	17,33∠115,01°	1,57∠- 158,76°
Ordem Harmônica	$\dot{I}_{pac-h}$ (A)			
	PAC 01	PAC 02	PAC 03	PAC 04
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	1,94∠88,40°	0,89∠139,36°	0,06∠- 87,99°	44,73∠109,36°
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	1,10∠17,71°	0,43∠65,45°	0,03∠- 170,79°	21,43∠95,46°
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	0,84∠75,40°	0,31∠- 50,60°	0,01∠- 51,13°	15,26∠- 80,57°
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	0,28∠1,11°	0,20∠- 86,76°	0,01∠- 164,52°	10,11∠- 56,74°

Fonte: Autoria própria.

Assim, de posse dos valores de tensão e corrente harmônicas nos PACs, bem como dos valores das impedâncias harmônicas, é possível calcular o compartilhamento de responsabilidades de tensão pelo Método da Superposição, conforme as instruções descritas na seção A.1.2 do Anexo A. Os resultados obtidos estão sintetizados na Tabela 31.

Tabela 31 – Resultados para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão nos PACs do *Benchmark IEEE-HCD* via o Método da Superposição.

Ordem Harmônica	PAC 01		PAC 02	
	Supridor (%)	Consumidor (%)	Supridor (%)	Consumidor (%)
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	30,43	69,57	65,11	34,89
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	27,88	72,12	69,08	30,92
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	6,17	93,83	90,38	9,62
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	50,12	49,88	49,60	50,40
Ordem Harmônica	PAC 03		PAC 04	
	Supridor (%)	Consumidor (%)	Supridor (%)	Consumidor (%)
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	100,00	0,00	4,58	95,42
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	100,00	0,00	12,74	87,26
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	100,00	0,00	18,73	81,27
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	100,00	0,00	12,23	87,77

Fonte: Autoria própria.

Dada a característica equilibrada do sistema implementado, os compartilhamentos foram realizados, neste e nos demais métodos, somente para a fase A.

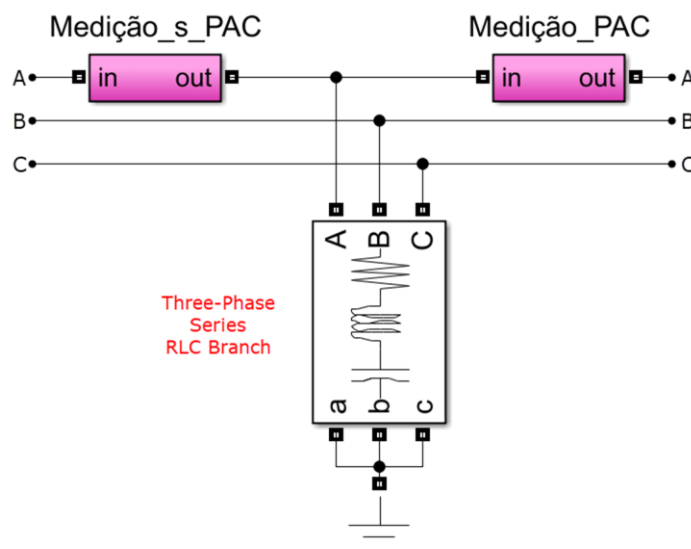
Por fim, conforme já mencionado e devidamente justificado no Capítulo 2, as metodologias selecionadas para este primeiro teste e análise de desempenho no *Benchmark* são: o Método da Impedância Dominante (MID), o Método do Chaveamento de Capacitores (MCC) e o Método da Injeção de Corrente Harmônica (MIC). Enfatiza-se que o Anexo A desta dissertação apresenta uma descrição detalhada dessas metodologias de compartilhamento de responsabilidades harmônicas.

## **5.2 Aplicação do Método da Impedância Dominante (MID) no *Benchmark***

Conforme já apresentado, o MID se baseia na inserção de uma impedância dominante no PAC que viabiliza a determinação das parcelas de responsabilidade harmônica. Assim, para a aplicação deste método utilizando o *Benchmark*, foi necessário conectar um filtro harmônico passivo em cada um dos PACs, separadamente, o que levou a execução de, pelo menos, quatro simulações diferentes. Além disso, como o filtro deve ser sintonizado em cada frequência que se deseja obter o compartilhamento, e são analisadas neste trabalho quatro frequências diferentes (5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup>), foram realizadas um total de sesses sesses simulações. Para facilitar o processo de simulação, as execuções foram automatizadas utilizando um arquivo *script (.m)*. O bloco utilizado para representar o filtro passivo nas simulações, bem como aqueles utilizados para adquirir os valores de tensão e corrente são mostrados na Figura 40.

Na Figura 40, o bloco “Medição\_PAC”, já apresentado no Capítulo 3, é responsável por armazenar os valores instantâneos da tensão fase-neutro no PAC durante a conexão da impedância dominante ( $\dot{V}'_{pac-h}$ ) e da corrente que flui a jusante da impedância dominante ( $\dot{I}_{pac-out-h}$ ), enquanto o bloco “Medição\_s\_PAC” armazena a corrente que flui a montante da impedância dominante ( $\dot{I}_{pac-in-h}$ ). Ao final da simulação, as componentes harmônicas são calculadas a partir da FFT.

Figura 40 – Filtro harmônico passivo conectado aos PACs do *Benchmark* para aplicação do MID.



Fonte: Autoria própria.

As características dos filtros harmônicos usados, em cada um dos PACs, são apresentadas na Tabela 32.

Tabela 32 – Caracterização das impedâncias dominantes usadas no MID.

Ordem Harmônica	PAC 01, PAC 02 e PAC 03				
	Q do Capacitor do Filtro (kVAr)	Fator de Qualidade	R ( $\Omega$ )	L (mH)	C ( $\mu$ F)
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	1108,35	100	0,7958	50,6606	8
7 <sup>a</sup> (350 Hz)			0,5684	25,8472	
11 <sup>a</sup> (550 Hz)			0,3617	10,4671	
13 <sup>a</sup> (650 Hz)			0,3061	7,4942	
Ordem Harmônica	PAC 04				
	Q do Capacitor do Filtro (kVAr)	Fator de Qualidade	R ( $\Omega$ )	L (mH)	C ( $\mu$ F)
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	110,84	100	0,0032	0,2026	2000
7 <sup>a</sup> (350 Hz)			0,0023	0,1034	
11 <sup>a</sup> (550 Hz)			0,0014	0,0419	
13 <sup>a</sup> (650 Hz)			0,0012	0,03	

Fonte: Autoria própria.

A escolha dos parâmetros dos filtros, principalmente com relação ao banco de capacitores, tanto na aplicação do MID quanto do MCC, considerou três requisitos fundamentais: que a conexão do filtro não provocasse uma elevação da tensão fundamental no respectivo PAC superior a 5% [13],[52], que a potência do filtro na frequência fundamental não

fosse maior que 1% da potência de curto-circuito do respectivo PAC [68] e que o parâmetro de dominância apresentasse valores superiores a 0,90 em todas as situações [48].

Destaca-se que os parâmetros dos filtros utilizados no PAC 04 foram diferentes dos demais pois este PAC está localizado na baixa tensão (420 V), enquanto os outros PACs estão na média tensão (21 kV), como consequência, este PAC apresenta uma potência de curto-circuito menor. A título de informação, a potência de curto-circuito nos PACs 01, 02 e 03 está em torno dos 150 MVA, enquanto que no PAC 04 a potência de curto é de aproximadamente 15 MVA.

Dando continuidade aos desenvolvimentos, as grandezas obtidas nas simulações do *Benchmark*, incluindo a conexão das impedâncias dominantes, são exibidas na Tabela 33.

Tabela 33 – Grandezas harmônicas resultantes nos PACs do *Benchmark* com a conexão das impedâncias dominantes.

Ordem Harmônica	$\dot{V}'_{pac-h} (V)$			
	PAC 01	PAC 02	PAC 03	PAC 04
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	2,08∠16,48°	2,00∠18,93°	1,96∠18,41	0,30∠20,02°
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	0,79∠-58,37°	0,76∠-57,25°	0,75∠-57,73°	0,08∠-0,18°
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	0,45∠-61,22°	0,41∠-65,28°	0,42∠-63,48°	0,04∠-153,59°
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	0,09∠-147,20°	0,09∠-146,73°	0,09∠-146,97°	0,02∠-146,75°
Ordem Harmônica	$\dot{I}_{pac-in-h} (A)$			
	PAC 01	PAC 02	PAC 03	PAC 04
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	0,99∠53,66°	1,66∠4,30°	2,46∠18,34°	5,31∠-21,01°
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	0,46∠-24,77°	0,94∠-70,59°	1,32∠-57,76°	5,43∠-59,85°
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	0,33∠-137,65°	1,08∠-48,09°	1,15∠-63,43°	6,42∠-124,90°
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	0,21∠177,99°	0,17∠-102,97°	0,29∠-147,55°	1,58∠-159,56°
Ordem Harmônica	$-\dot{I}_{pac-out-h} (A)$			
	PAC 01	PAC 02	PAC 03	PAC 04
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	1,91∠-1,69°	1,01∠43,52°	0,003∠110,76°	91,00∠22,11°
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	1,04∠-72,45°	0,47∠-30,08°	0,0007∠-35,39°	31,81∠7,16°
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	1,21∠-45,91°	0,34∠-136,78°	7.10 <sup>5</sup> ∠-179,3°	21,21∠-161,43°
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	0,17∠-102,15°	0,21∠178,45°	7.10 <sup>5</sup> ∠112,61°	12,77∠-146,89°

Fonte: Autoria própria.

Uma vez obtidas todas as grandezas necessárias para aplicação do MID, empregou-se os equacionamentos pertinentes para obtenção das parcelas de responsabilidade das partes envolvidas. Os resultados alcançados são mostrados na Tabela 34.

Tabela 34 – Resultados para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão nos PACs do *Benchmark IEEE-HCD* via o Método da Impedância Dominante.

Ordem Harmônica	PAC 01		PAC 02	
	Supridor (%)	Consumidor (%)	Supridor (%)	Consumidor (%)
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	30,32	69,68	63,69	36,31
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	27,41	72,59	68,42	31,58
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	6,20	93,80	90,67	9,33
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	59,06	40,94	41,16	58,84
Ordem Harmônica	PAC 03		PAC 04	
	Supridor (%)	Consumidor (%)	Supridor (%)	Consumidor (%)
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	99,99	0,01	4,22	95,78
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	100,00	0,00	8,24	91,76
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	100,00	0,00	21,22	78,78
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	100,00	0,00	10,81	89,19

Fonte: Autoria própria.

Nas simulações também foram avaliadas as tensões fundamentais nos PACs e comparadas com a tensão fundamental previamente existente nos mesmos, sem a conexão da impedância dominante (Tabela 30), com o intuito de avaliar o percentual de elevação de tensão ocasionado pela conexão do filtro harmônico. Complementarmente, calculou-se os parâmetros de dominância (PD), a partir das variações das tensões harmônicas antes e após a conexão das impedâncias dominantes. Portanto, inclui-se, na Tabela 35, os resultados da variação percentual da tensão fundamental nos PACs ( $\Delta V_{pac-1}$ ) e dos PDs.

Tabela 35 – Variação percentual da tensão fundamental nos PACs e PDs – Método da Impedância Dominante.

Ordem Harmônica	PAC 01		PAC 02	
	$\Delta V_{pac-1}$ (%)	PD	$\Delta V_{pac-1}$ (%)	PD
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	0,70	0,95	0,74	0,95
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	0,69	0,98	0,73	0,98
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	0,68	0,99	0,72	0,99
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	0,68	0,99	0,72	0,99
Ordem Harmônica	PAC 03		PAC 04	
	$\Delta V_{pac-1}$ (%)	PD	$\Delta V_{pac-1}$ (%)	PD
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	0,73	0,95	0,78	0,91
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	0,71	0,98	0,75	0,96
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	0,70	0,99	0,75	0,98
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	0,70	0,99	0,75	0,99

Fonte: Autoria própria.

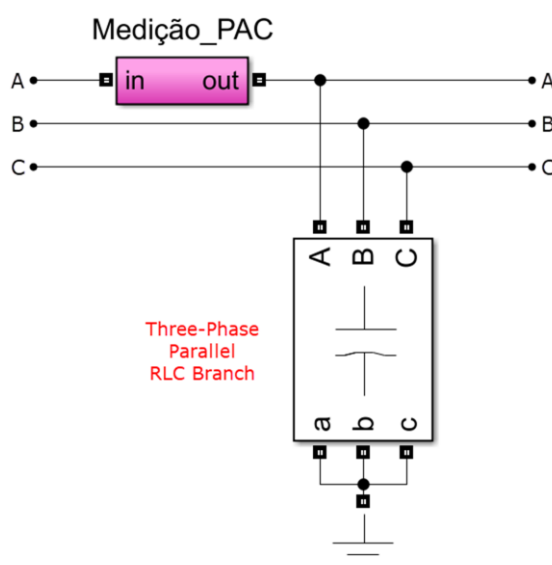


Em consonância com o recomendado na fundamentação teórica do MID, os valores do parâmetro de dominância, em todas as simulações, permaneceram acima do valor de 0,9 estabelecido para assegurar uma boa exatidão nos resultados. Por outro lado, é possível perceber, a partir dos valores das variações da tensão fundamental, que a inserção das impedâncias dominantes não proporcionou alterações significativas na tensão fundamental dos PACs, permanecendo abaixo dos 5% recomendados.

### 5.3 Aplicação do Método do Chaveamento de Capacitores (MCC) no *Benchmark*

Para a aplicação do MCC, deve-se analisar o *Benchmark* em duas situações operativas diferentes. No caso estudado nesta dissertação, a primeira condição correspondeu àquela da operação normal do sistema (Tabela 30), enquanto que a segunda condição incluiu a conexão de bancos de capacitores nos PACs, onde pretendeu-se determinar o compartilhamento de responsabilidades. Como a conexão de bancos de capacitores promove variações das tensões e correntes em todas as ordens harmônicas do sistema sob análise, uma simulação incluindo um banco conectado em cada PAC, separadamente, foi necessária, totalizando quatro simulações. Mesmo com poucas simulações, o processo de execução foi automatizado via programação. Apresenta-se, na Figura 41, o bloco utilizado para representar o banco de capacitores nas simulações e o bloco de aquisição das tensões e correntes.

Figura 41 – Banco de capacitores conectado aos PACs do *Benchmark* para aplicação do MCC.



Fonte: Autoria própria.

O bloco “Medição\_PAC” é responsável por armazenar a tensão fase-neutro ( $\dot{V}'_{pac-h}$ ) e a corrente ( $\dot{I}'_{pac-h}$ ) no PAC durante a conexão do banco de capacitores. Os capacitores utilizados, em cada um dos PACs, possuem os mesmos valores daqueles justificados para aplicação do MID, já apresentados na Tabela 32.

Assim, as grandezas obtidas nas simulações do *Benchmark* incluindo a conexão dos bancos de capacitores são dispostas na Tabela 36.

Tabela 36 – Grandezas harmônicas resultantes nos PACs do *Benchmark* com a conexão dos bancos de capacitores.

Ordem Harmônica	$\dot{V}'_{pac-h}$ (V)			
	PAC 01	PAC 02	PAC 03	PAC 04
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	48,47∠84,17°	49,56∠85,97°	47,29∠85,93°	3,30∠97,11°
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	59,77∠- 13,70°	61,02∠- 13,44°	58,86∠- 13,24°	2,69∠75,64°
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	48,24∠- 81,40°	48,55∠- 89,36°	47,65∠- 87,01°	7,18∠- 92,01°
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	8,00∠148,09°	08,08∠146,72°	7,93∠146,40°	6,94∠- 111,33°
Ordem Harmônica	$\dot{I}'_{pac-h}$ (A)			
	PAC 01	PAC 02	PAC 03	PAC 04
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	2,60∠177,23°	1,35∠- 151,54°	0,52∠175,58°	50,52∠20,36°
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	2,16∠91,58°	1,20∠97,67°	0,98∠76,59°	28,46∠8,66°
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	0,64∠106,14°	1,57∠8,40°	1,32∠2,84°	53,29∠177,97°
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	0,06∠188,16°	0,23∠- 72,29°	0,26∠- 123,81°	50,18∠- 67,29°

Fonte: Autoria própria.

Em posse de todas as grandezas necessárias para o emprego do MCC, aplicou-se os equacionamentos pertinentes para obtenção das parcelas de responsabilidade do sistema supridor e do consumidor. Os resultados encontrados são mostrados na Tabela 37.

Tabela 37 – Resultados para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão nos PACs do *Benchmark IEEE-HCD* via o Método do Chaveamento de Capacitores.

Ordem Harmônica	PAC 01		PAC 02	
	Supridor (%)	Consumidor (%)	Supridor (%)	Consumidor (%)
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	31,55	68,45	64,89	35,11
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	28,64	71,36	68,79	31,21
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	6,22	93,78	91,13	8,87
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	58,68	41,32	41,59	58,41
Ordem Harmônica	PAC 03		PAC 04	
	Supridor (%)	Consumidor (%)	Supridor (%)	Consumidor (%)
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	100,00	0,00	5,63	94,37
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	100,00	0,00	7,18	92,82
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	100,00	0,00	21,71	78,29
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	100,00	0,00	10,42	89,58

Fonte: Autoria própria.

Assim como na aplicação do MID, avaliou-se a tensão fundamental nos PACs na simulação incluindo o banco de capacitores e comparou-se com a tensão fundamental no arranjo antes da conexão do banco (Tabela 30), mais uma vez, com o intuito de avaliar o percentual de elevação de tensão ocasionado pela inclusão deste equipamento no sistema. Os resultados da variação percentual da tensão fundamental em cada PAC ( $\Delta V_{pac-1}$ ) estão indicados na Tabela 38.

Tabela 38 – Variação percentual da tensão fundamental nos PACs – Método do Chaveamento de Capacitores.

$\Delta V_{pac-1}(\%)$			
PAC 01	PAC 02	PAC 03	PAC 04
0,67	0,71	0,70	0,74

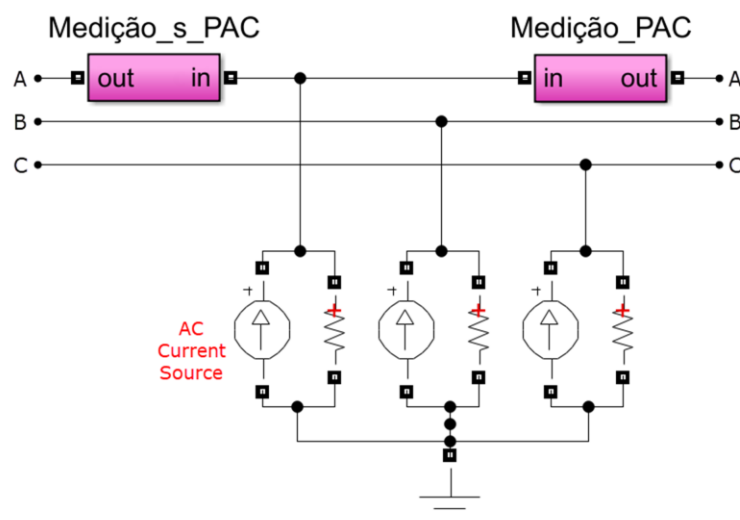
Fonte: Autoria própria.

De acordo com o recomendado na fundamentação teórica do MCC, a elevação de tensão proporcionada pela conexão dos bancos de capacitores permaneceu abaixo do limite de 5%.

## 5.4 Aplicação do Método da Injeção de Corrente Harmônica (MIC) no *Benchmark*

A aplicação do MIC também considera duas situações operativas diferentes para o sistema avaliado. Ao empregar esta metodologia no *Benchmark*, a primeira condição correspondeu àquela da operação normal do sistema (Tabela 30), enquanto que a segunda condição abrangeu a conexão de fontes harmônicas de corrente nos PACs, onde pretendeu-se determinar o compartilhamento de responsabilidades. Como as correntes harmônicas devem ser injetadas nas mesmas ordens em que se deseja avaliar o compartilhamento, necessitou-se de quatro simulações diferentes para cada PAC, abrangendo-se um total de sesses simulações. Assim como nos demais métodos, o processo de simulação foi automatizado via programação. Apresenta-se, na Figura 42, o arranjo conectado aos PAC para injeção das correntes, bem como os blocos de aquisição das tensões e correntes.

Figura 42 – Fontes de correntes harmônicas conectadas aos PAC do *Benchmark* para aplicação do MIC.



Fonte: Autoria própria.

O bloco “Medição\_PAC” é responsável por armazenar a tensão fase-neutro ( $\dot{V}'_{pac-h}$ ) e a parcela da corrente de perturbação que flui em direção do consumidor ( $\dot{i}_{p-c-h}$ ), enquanto o bloco “Medição\_s\_PAC” armazena a parcela da corrente de perturbação que flui em direção ao sistema supridor ( $\dot{i}_{p-s-h}$ ).

As magnitudes das correntes injetadas, para cada ordem, corresponderam a 1% das correntes harmônicas originalmente presentes naquele PAC (Tabela 30), conforme realizado em [48]. Com relação à defasagem angular entre os sinais de corrente injetados, estabeleceu-se como referência fasores de sequência positiva, ou seja  $0^\circ$  para a fase A,  $-120^\circ$  para a fase B e  $120^\circ$  para a fase C. Os resistores conectados em paralelo com as fontes de correntes possuem valores ôhmicos elevados ( $10^6 \Omega$ ) e são utilizados para se evitar erros computacionais durante as simulações.

Assim sendo, as grandezas obtidas nas simulações do *Benchmark* incluindo a conexão das fontes de corrente estão presentes na Tabela 39.

Tabela 39 – Grandezas harmônicas resultantes nos PACs do *Benchmark* com a conexão das fontes de corrente harmônicas.

Ordem Harmônica	$\dot{V}'_{pac-h}$ (V)			
	PAC 01	PAC 02	PAC 03	PAC 04
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	39,51 $\angle$ 87,82°	39,72 $\angle$ 90,07°	38,02 $\angle$ 89,63°	2,96 $\angle$ 97,53°
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	36,21 $\angle$ 5,72°	35,91 $\angle$ 6,98°	25,00 $\angle$ 6,06°	2,07 $\angle$ 78,16°
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	40,98 $\angle$ -23,99°	41,41 $\angle$ -26,79°	40,62 $\angle$ -25,99°	2,54 $\angle$ -73,00°
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	16,84 $\angle$ -153,55°	17,69 $\angle$ -152,75°	17,32 $\angle$ -154,98°	1,56 $\angle$ -68,55°

Ordem Harmônica	$I'_{p-s-h}$ (A)			
	PAC 01	PAC 02	PAC 03	PAC 04
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	1,96∠-1,59°	0,90∠48,95°	0,06∠-177,94°	44,94∠19,24°
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	1,10∠-71,73°	0,43∠-24,32°	0,03∠98,72°	21,58∠5,39°
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	0,84∠-14,40°	0,30∠-140,26°	0,01∠-141,08°	15,15∠-170,47°
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	0,27∠-88,30°	0,20∠-176,76°	0,01∠104,86°	10,05∠-146,48°
Ordem Harmônica	$I'_{p-c-h}$ (A)			
	PAC 01	PAC 02	PAC 03	PAC 04
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	1,94∠178,39°	0,89∠-130,62°	0,06∠2,01°	44,52∠-160,57°
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	1,10∠107,73°	0,43∠155,44°	0,03∠-80,78°	21,37∠-174,56°
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	0,83∠165,46°	0,31∠39,39°	0,007∠38,87°	15,30∠9,44°
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	0,27∠91,12°	0,20∠3,22°	0,01∠-74,50°	10,14∠33,20°

Fonte: Autoria própria.

Uma vez obtidas todas as grandezas necessárias para aplicação do MIC, pôde-se empregar os equacionamentos correlatos para obtenção das parcelas de responsabilidade das partes envolvidas. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 40.

Tabela 40 – Resultados para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão nos PACs do *Benchmark IEEE-HCD* via o Método da Injeção de Corrente Harmônica.

Ordem Harmônica	PAC 01		PAC 02	
	Supridor (%)	Consumidor (%)	Supridor (%)	Consumidor (%)
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	30,44	69,56	65,07	34,93
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	27,88	72,12	69,16	30,84
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	6,08	93,92	90,65	9,35
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	50,06	49,94	49,70	50,30
Ordem Harmônica	PAC 03		PAC 04	
	Supridor (%)	Consumidor (%)	Supridor (%)	Consumidor (%)
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	100,00	0,00	5,35	94,65
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	100,00	0,00	9,44	90,56
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	100,00	0,00	20,66	79,34
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	100,00	0,00	10,08	89,92

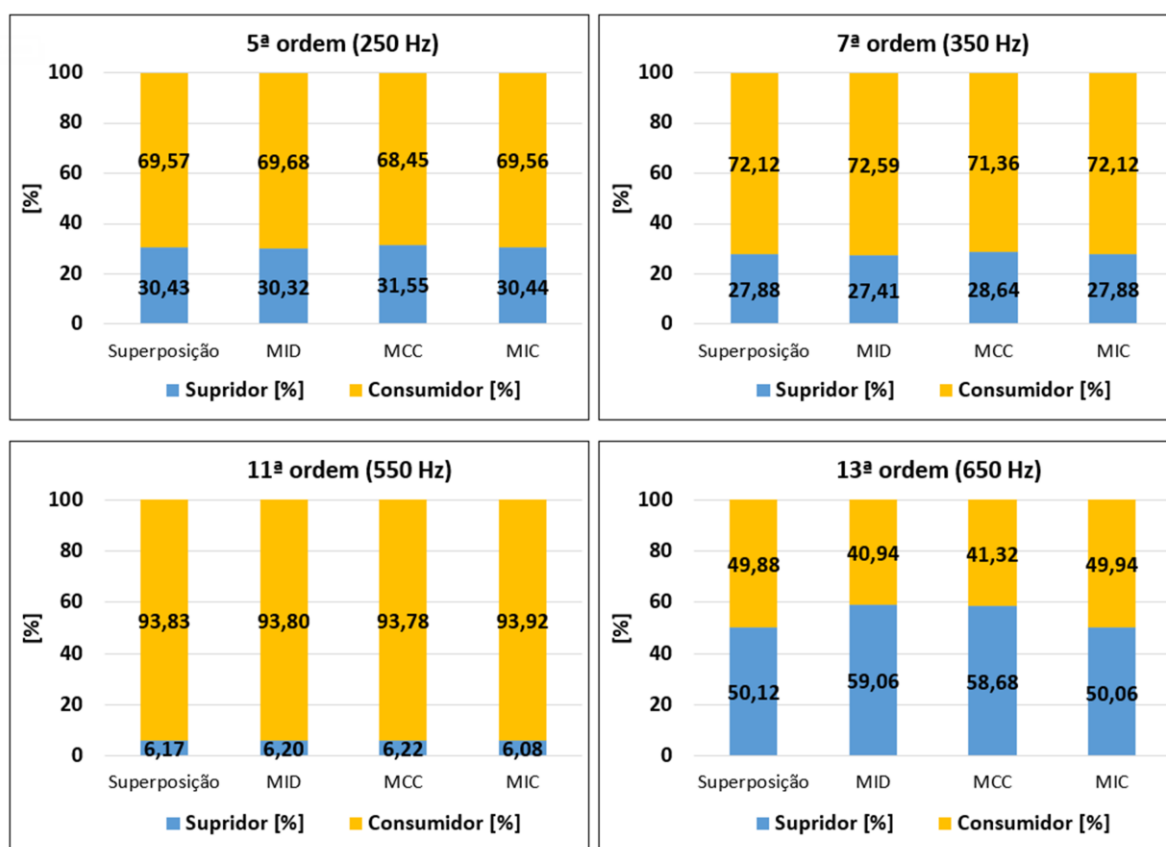
Fonte: Autoria própria.

Neste caso, como as fontes de corrente utilizadas possuem características ideais, as mesmas não modificaram a operação do sistema na frequência fundamental, portanto, não é necessário avaliar a variação da tensão fundamental nos PACs.

## 5.5 Análise de desempenho das metodologias de compartilhamento de responsabilidades implementadas no *Benchmark*

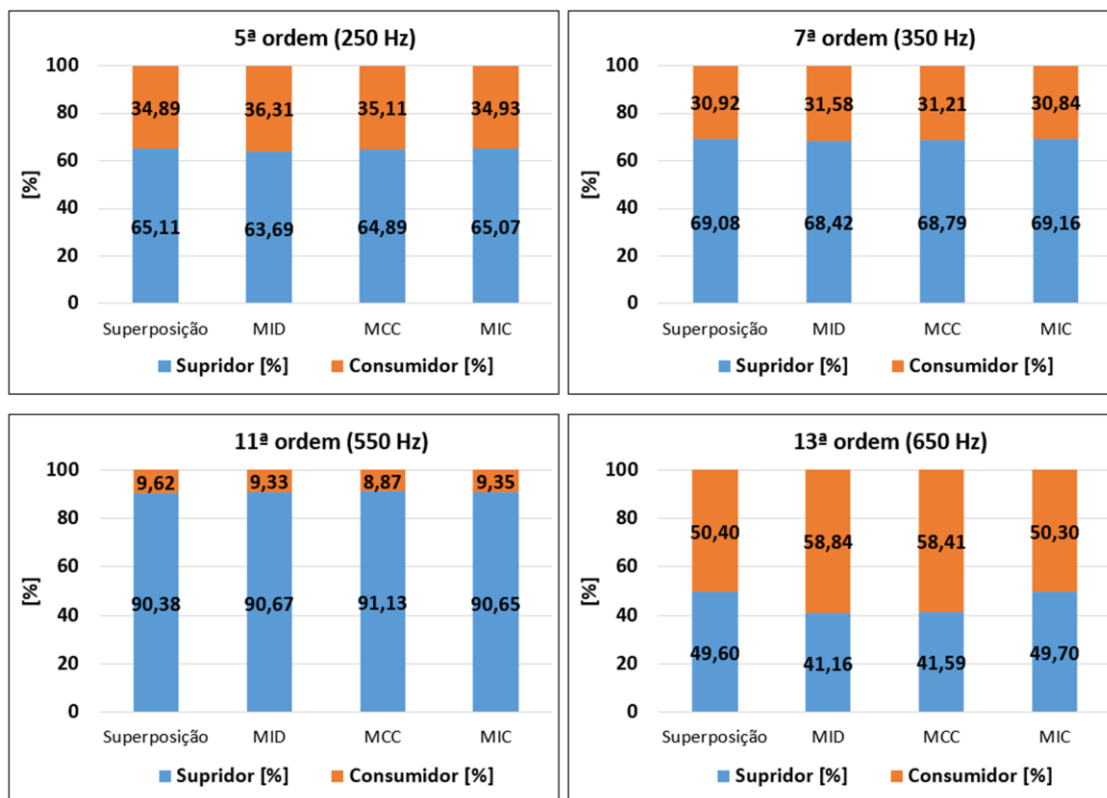
De forma a tornar mais clara a análise os resultados obtidos em cada uma das metodologias aplicadas ao *Benchmark*, os percentuais de responsabilidade apresentados na Tabela 31, na Tabela 34, na Tabela 37 e na Tabela 40 foram reorganizados para permitir a comparação entre os métodos estudados, para cada PAC. Nesse sentido, tem-se na Figura 43, os resultados, para o PAC 01, das parcelas de responsabilidade harmônica de tensão do sistema supridor e do consumidor, obtidos através da aplicação das metodologias elencadas, em cada ordem harmônica avaliada. E, na sequência, a Figura 44, a Figura 45 e a Figura 46 apresentam os resultados, respectivamente, para o PAC 02, PAC 03 e PAC 04.

Figura 43 – Comparação entre as metodologias de compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão – PAC 01 *Benchmark IEEE-HCD*.



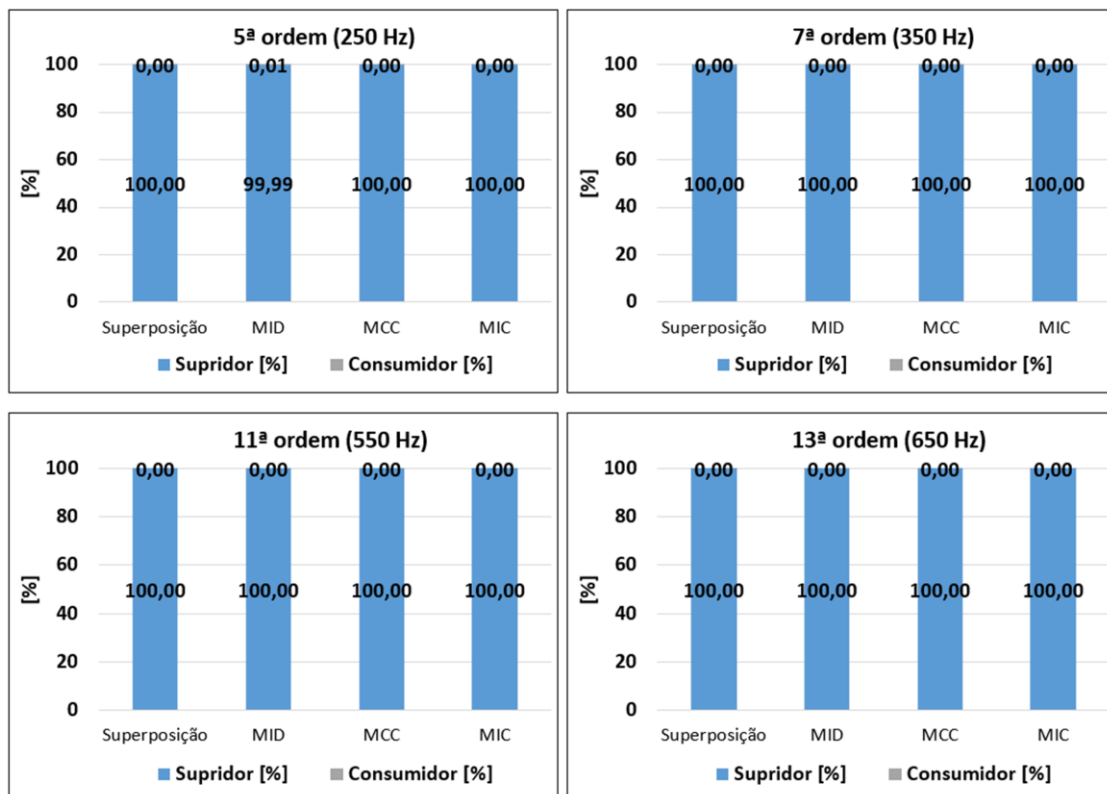
Fonte: Autoria própria.

Figura 44 – Comparação entre as metodologias de compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão – PAC 02 *Benchmark IEEE-HCD*.



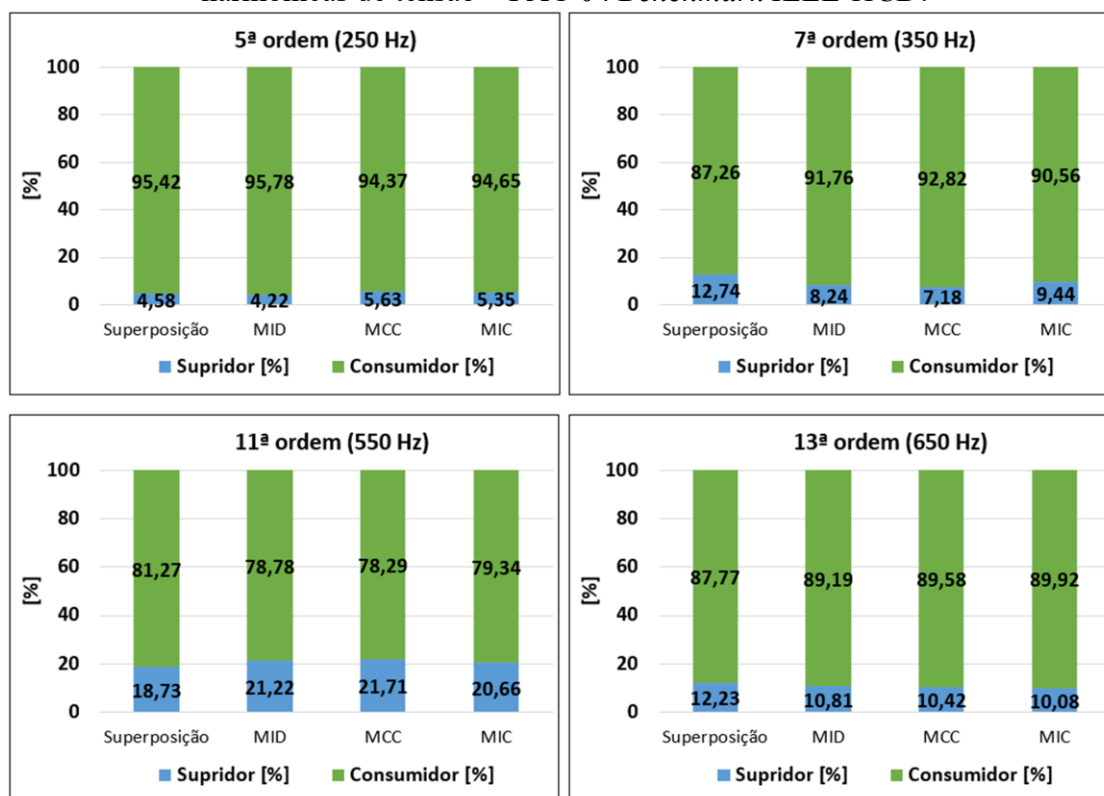
Fonte: Autoria própria.

Figura 45 – Comparação entre as metodologias de compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão – PAC 03 *Benchmark IEEE-HCD*.



Fonte: Autoria própria.

Figura 46 – Comparação entre as metodologias de compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão – PAC 04 *Benchmark IEEE-HCD*.



Fonte: Autoria própria.

Adotando-se, mais uma vez, como satisfatórios os distanciamentos menores que 5 pontos percentuais entre os resultados do compartilhamento advindos do emprego das metodologias avaliadas (MID, MCC e MIC) e aqueles provenientes do Método da Superposição, tem-se, neste momento, uma avaliação geral das metodologias.

Em um primeiro momento, com relação ao PAC 01, as três metodologias apresentaram, em geral, para todas as ordens harmônicas, resultados satisfatórios. A única exceção ocorreu na 13ª ordem, onde somente o Método da Injeção de Correntes proporcionou resultados adequados. Nesta ordem, os Métodos da Impedância Dominante e do Chaveamento de Capacitores tiveram discrepâncias de 8,94 e 8,56 pontos percentuais, respectivamente, em relação ao Método da Superposição.

Os percentuais de responsabilidades obtidos para o PAC 02, também se mostraram de um modo geral adequados. Entretanto, a observação feita para o PAC 01 se repete neste PAC, pois os Métodos da Impedância Dominante e do Chaveamento de Capacitores também apresentaram distanciamentos maiores que aqueles estabelecidos como satisfatórios (5 pontos percentuais) na 13ª ordem harmônica. A discrepância verificada para o MID correspondeu a



8,44 pontos percentuais, enquanto que para o MCC, teve-se uma variação de 8,01 pontos percentuais em comparação com o Método da Superposição.

Analisando agora o PAC 03, observa-se que todas as metodologias para o compartilhamento harmônico indicaram que a responsabilidade pelas distorções é totalmente do sistema supridor. Conforme já abordado, este resultado se mostra coerente, uma vez que o Consumidor 3 é composto unicamente por cargas lineares.

Por sua vez, em se tratando do PAC 04, os resultados para todas as metodologias, em todas as ordens harmônicas, se mostraram satisfatórios, com exceção para o Método do Chaveamento de Capacitores que, na 11ª ordem harmônica, apresentou uma discrepância ligeiramente superior ao limite estabelecido, sendo de 5,55 pontos percentuais.

A partir dos resultados apresentados, é possível concluir que, nesta primeira avaliação das metodologias, no *Benchmark* implementado, o MIC foi o procedimento que apresentou melhor desempenho quando comparado com os valores de referência.

Tal resultado pode ser justificado, em parte, pelo fato de que a aplicação desta metodologia, nesta implementação computacional, não provoca alterações significativas no estado de operação do *Benchmark* na frequência fundamental, uma vez que as fontes de corrente utilizadas são ideais. No caso de uma aplicação prática, dependendo da estratégia adotada para a injeção de correntes, poderiam ocorrer alterações no arranjo a frequência industrial. Outro fator que contribuiu para os resultados mais precisos nesta metodologia, foram os pequenos sinais de corrente injetados nos PACs, que corresponderam a 1% das correntes harmônicas, as quais, via de regra, já são muito menores que a corrente fundamental do respectivo PAC.

Por outro lado, com relação aos percentuais de responsabilidades obtidos pelo MID e pelo MCC, percebe-se que os resultados obtidos estão muito próximos entre si, mesmo nas situações de maiores discrepâncias com os valores de referência. Sendo que as magnitudes de potências reativas capacitivas utilizadas nestes dois métodos são também similares. Sabe-se que a conexão de bancos de capacitores e de filtros harmônicos pode provocar alterações nas características de impedância do sistema, tanto na frequência fundamental, quanto nas demais ordens, o que pode ter elevado os valores de discrepância em tais situações.

Todavia, não obstante aos resultados superiores aos limites estabelecidos, nas poucas situações observadas, é importante ressaltar que tais discrepâncias não superaram a marca de 9 pontos percentuais, evidenciando-se, então, uma convergência das atribuições de responsabilidades fornecidas pelas quatro metodologias. Ademais, pondera-se que as distorções harmônicas observadas nos PACs encontram-se abaixo dos limites preconizados nas resoluções vigentes. Nestes termos, considera-se que estudos investigativos adicionais, envolvendo estes

procedimentos, no *Benchmark*, são imprescindíveis ao estabelecimento de uma análise de desempenho mais ampla e aprofundada para tais metodologias.

---

# CAPÍTULO VI

---

## 6 CONCLUSÕES

---

Neste capítulo pretende-se sintetizar as principais contribuições do trabalho, apresentar as conclusões alcançadas e apontar pesquisas futuras na temática de compartilhamento de responsabilidades harmônicas.

O Capítulo 1, introdutório, objetivou delimitar o assunto estudado neste trabalho. Para tanto, apresentou-se a importância da temática do compartilhamento de responsabilidades harmônicas no contexto da qualidade de energia em sistemas elétricos, com foco para a problemática em que se concentra esta dissertação, que corresponde ao estabelecimento de sistemas-teste para estudos de metodologias e procedimentos para a determinação das contribuições harmônicas dos agentes conectados a um sistema elétrico. Na sequência, pôde-se elencar os objetivos e as contribuições a serem alcançadas com a realização do trabalho.

No Capítulo 2, abordou-se o estado da arte em que se encontra esta dissertação, incluindo também os avanços registrados na literatura acerca dos métodos propostos para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas. Na pesquisa bibliográfica, identificou-se que o *Benchmark IEEE-HCD* foi o primeiro sistema-teste desenvolvido especificamente para a temática do compartilhamento de responsabilidades harmônicas. Além disso, dada a recente publicação deste sistema-teste, o mesmo foi explorado em poucos trabalhos, não sendo identificada na literatura a sua implementação em outros softwares de simulação de circuitos elétricos, além do próprio PSCAD. Complementarmente, haja vista a necessidade de utilizar métodos para a estimação das impedâncias harmônicas durante a avaliação de desempenho do *Benchmark*, apresentou-se as principais metodologias utilizadas para estimação destas impedâncias. Ainda, neste capítulo, foi feita uma introdução ao *Benchmark IEEE-HCD*, o qual foi o foco de estudo deste trabalho.

Concentrou-se, no Capítulo 3, o cerne desta dissertação, o qual compreendeu a implementação do *Benchmark* no ambiente de desenvolvimento gráfico *Simulink/MATLAB*. Para tanto, foi dedicada especial atenção à apresentação de todos os componentes utilizados na composição do arranjo. A implementação do sistema foi realizada sem maiores dificuldades, dada a natureza intuitiva e visual do ambiente *Simulink*, sendo todos os parâmetros incluídos conforme estabelecido na referência utilizada. No entanto, maior empenho foi empregado na implementação do motor de indução devido à modelagem adotada para o mesmo ser mais complexa que aquela dos demais componentes do sistema. Apesar do modelo dar margem para questionamentos, acredita-se que esta abordagem foi utilizada para facilitar a definição do valor de potência consumida por este equipamento nas três condições de operação do *Benchmark*.

Dando sequência aos desenvolvimentos, o Capítulo 4 objetivou avaliar, de maneira pormenorizada, o desempenho do *Benchmark* implementado. Assim, os resultados obtidos durante as simulações foram confrontados com aqueles informados na publicação do *Benchmark*. Os parâmetros avaliados foram as tensões e correntes, fundamentais e harmônicas, obtidas nos PACs que compõem o arranjo, bem como as impedâncias, fundamentais e

harmônicas, observadas a partir destes PACs para o sistema equivalente do supridor e do consumidor. Uma atenção especial foi dedicada à análise das impedâncias, sendo realizada uma avaliação dos resultados obtidos pelos principais métodos, baseados na injeção de sinais de corrente, para a estimação das impedâncias harmônicas. Essa avaliação foi concluída com a aplicação preliminar do Método da Superposição. De uma maneira geral, os resultados obtidos durante a avaliação de desempenho do *Benchmark* implementado se mostraram coerentes com aqueles dispostos na publicação original, comprovando a correta modelagem e implementação do arranjo. Com relação aos métodos para estimação de impedâncias harmônicas, com exceção do Método E, todos os métodos apresentaram resultados, em geral, satisfatórios, sendo as maiores discrepâncias observadas nas frequências mais próximas à fundamental, principalmente na segunda e na própria frequência fundamental, para os PACs 01, 02 e 04. Observou-se também que o Método D foi o que apresentou resultados mais próximos àqueles fornecidos na publicação original, o que é, de fato, compreensível, uma vez que este corresponde ao método indicado na publicação do *Benchmark*.

Por fim, no Capítulo 5 buscou-se avaliar as principais metodologias para compartilhamento de responsabilidades harmônicas, as quais compreenderam: o Método da Impedância Dominante, o Método do Chaveamento de Capacitores e o Método da Injeção de Corrente Harmônica. O Método da Superposição foi utilizado no estabelecimento dos valores de referência para a análise das demais metodologias. Concluiu-se, a partir dos resultados desta avaliação inicial de metodologias para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas no *Benchmark*, que o Método da Injeção de Corrente foi o procedimento que apresentou melhor desempenho quando comparado aos valores de referência estabelecidos pelo Método da Superposição. O Método do Chaveamento de Capacitores e o Método da Impedância Dominante apresentaram resultados com extrapolação dos limites estabelecidos apenas em algumas poucas situações, de maneira que, os resultados obtidos evidenciaram uma convergência das atribuições de responsabilidades fornecidas pelas quatro metodologias.

Desta feita, reconhece-se que o arranjo do *Benchmark IEEE-HCD* de fato proporciona um importante meio de implementação e testes de metodologias de compartilhamento de responsabilidades harmônicas. E, a partir dos resultados apresentados, conclui-se que o *Benchmark IEEE-HCD* implementado no *Simulink*, principal contribuição desta dissertação, realmente pode ser utilizado como uma ferramenta efetiva para estudos de compartilhamento de responsabilidades harmônicas, além de possibilitar uma ampla gama de estudos com relação à temática, os quais poderão ser explorados, de maneira contínua, nas pesquisas executadas pelo NQEE UFU, sendo, portanto, uma contribuição concreta para esta linha de pesquisa.

Não obstante aos desenvolvimentos apresentados e dos resultados obtidos, os seguintes tópicos podem ser elencados como merecedores de pesquisas futuras:

- Avaliação, no *Benchmark*, das principais metodologias para o compartilhamento de responsabilidades, com o intuito de verificar os fatores de influência destes procedimentos, tentando estabelecer critérios de obtenção de resultados mais convergentes e, assim, apontando possíveis limitações destas metodologias;
- Aplicação de outras metodologias para o compartilhamento, descritas na literatura, utilizando o *Benchmark* ora implementado;
- Implementação e validação das demais condições operativas do *Benchmark* (condições A e B) para realização de testes e avaliações adicionais;
- Implementação de uma versão do *Benchmark* que inclua *background distortions* na rede equivalente em alta tensão, para avaliação das metodologias para o compartilhamento nestas condições;
- Implementação do *Benchmark IEEE-HCD* no software de simulação ATPDraw™. A implementação no ATPDraw é sugerida dada a ampla utilização deste software na simulação de sistemas elétricos devido à sua gratuidade, o que possibilita, assim, a utilização por uma maior quantidade de usuários;
- Estudos adicionais acerca do Método E para estimação das impedâncias harmônicas [63]. Dada a complexidade deste método em comparação com os demais, maiores investigações devem ser realizadas para o aprimoramento da sua implementação computacional.

## REFERÊNCIAS

- [1] R. P. S. Leão, R. F. Sampaio, e F. L. M. Antunes, *Harmônicos em Sistemas Elétricos*, 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- [2] I. N. Santos e A. C. dos Santos, “Uma forma de onda cada vez mais distorcida”, *O Set. Elétrico*, vol. Edição 153, nº Out, 2018.
- [3] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, e H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 2 ed. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [4] J. C. Gómez e M. M. Morcos, “Impact of EV battery chargers on the power quality of distribution systems”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 18, nº 3, p. 975–981, 2003.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.813873>
- [5] Y. Hua e A. T. Johns, *Flexible AC Transmission Systems (FACTS)*. London: Institution of Engineering & Technology, 1999.
- [6] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), “Sistema Interligado Nacional - Rede de Operação - Horizonte 2024”, 2019.
- [7] X. Qin, P. Zeng, Q. Zhou, Q. Dai, e J. Chen, “Study on the development and reliability of HVDC transmission systems in China”, in *2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, 2016.  
<https://doi.org/10.1109/POWERCON.2016.7753862>
- [8] K. R. Padiyar, *HVDC Power Transmission Systems: Technology and System Interactions*. New York: John Wiley & Sons Inc, 1990.
- [9] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), “Capacidade instalada no SIN-2020/2014 - O sistema em número”. [Online]. Available at: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. [Acessado: 25-jul-2020].
- [10] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “Geração distribuída - Informações compiladas e mapa”. [Online]. Available at: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojZjM4NjM0OWYtN2IwZS00YjViLTllMjItN2E5MzBkN2ZlMzVkIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9>. [Acessado: 25-jul-2020].
- [11] M. L. Di Silvestre, S. Favuzza, E. Riva Sanseverino, e G. Zizzo, “How Decarbonization, Digitalization and Decentralization are changing key power infrastructures”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 93, p. 483–498, 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.068>

- [12] J. Arrillaga e N. R. Watson, *Power System Harmonics*, 2<sup>o</sup> ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2003.  
<https://doi.org/10.1002/0470871229>
- [13] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), “Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia elétrica da Rede Básica”, 2017.
- [14] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “Módulo 8 - Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST)”, 2018.
- [15] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), “IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems - IEEE Std 519 2014”, 2014.  
<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6826459>
- [16] International Electrotechnical Commission (IEC), “Electromagnetic compatibility (EMC) – IEC/TR 61000-3-6: Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems”, 2008.
- [17] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), “Instruções para realização de estudos e medições de QEE relacionados aos acessos à rede básica ou aos barramentos de fronteira com a rede básica para parques eólicos, solares, consumidores livres e distribuidoras - ONS NT 009/2016 - REV 03”, 2019.
- [18] I. N. Santos, A. C. Santos, J. C. Oliveira, A. C. Souza, A. F. Bonelli, e F. M. Silva, “Compartilhamento de Responsabilidades sobre Distorções Harmônicas: Estado da Arte, Premissas e Desafios”, in *Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (XI CBQEE)*, 2017.
- [19] S. Xu, X.-Y. Xiao, X. Zheng, e Y. Wang, “Review on harmonic impacts assessment indices and methods of multiple harmonic sources”, in *25<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution*, 2019.  
<http://dx.doi.org/10.34890/380>
- [20] C. Garzón e A. Pavas, “Review of Responsibilities Assignment Methods for Harmonic Emission”, in *2019 IEEE Milan PowerTech*, 2019.  
<https://doi.org/10.1109/PTC.2019.8810742>
- [21] R. Sinvula, K. M. Abo-Al-Ez, e M. T. Kahn, “Harmonic Source Detection Methods: A Systematic Literature Review”, *IEEE Access*, vol. 7, p. 74283–74299, 2019.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2921149>
- [22] F. Safargholi, K. Malekian, e W. Schufft, “On the Dominant Harmonic Source Identification - Part I: Review of Methods”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 33, n<sup>o</sup> 3, p.



- 1268–1277, 2018.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2751663>
- [23] F. Safarholi, K. Malekian, e W. Schufft, “On the Dominant Harmonic Source Identification-Part II: Application and Interpretation of Methods”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 33, n° 3, p. 1278–1287, 2018.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2751673>
- [24] I. Papić *et al.*, “A Benchmark Test System to Evaluate Methods of Harmonic Contribution Determination”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 34, n° 1, p. 23–31, 2019.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2817542>
- [25] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), “IEEE PES AMPS DSAS Test Feeder Working Group”. [Online]. Available at: <https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>. [Acessado: 06-set-2020].
- [26] University of Washington Electrical Engineering, “Power Systems Test Case Archive”. [Online]. Available at: <https://labs.ece.uw.edu/pstca/>. [Acessado: 06-set-2020].
- [27] Conselho Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos (CIGRE) - Working Group 14.02 (Control in HVDC Systems) of Study Committee 14, “The CIGRE HVDC Benchmark Model - A new proposal with revised parameters”, *Electra*, n° 157, p. 61–66, 1994.
- [28] Conselho Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos (CIGRE) - Task Force C6.04, “Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources”, 2014.
- [29] M. N. Alam, S. Chakrabarti, e X. Liang, “A Benchmark Test System for Networked Microgrids”, *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 16, n° 10, p. 6217–6230, 2020.  
<https://doi.org/10.1109/TII.2020.2976893>
- [30] IEEE-PES Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, “Test Systems for Harmonics Modeling and Simulation”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, n° 2, p. 579–587, 1999. <https://doi.org/10.1109/61.754106>
- [31] “IEEE-PES Task Force on Harmonics Modeling and Simulation Website - Benchmark files”. [Online]. Available at: [http://grouper.ieee.org/groups/harmonic/simulate/Download/BM\\_TS\\_HC/](http://grouper.ieee.org/groups/harmonic/simulate/Download/BM_TS_HC/). [Acessado: 01-mar-2020].
- [32] A. Spelko, I. Papić, e S. Z. Djokic, “A voltage-only method for assessing harmonic contribution from a customer installation”, in *2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2018.  
<https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378909>
- [33] A. Špelko, I. Papić, R. Langella, A. Testa, e S. Djokic, “Temporal Variations of System

- Operating Conditions and Continuous Assessment of Low-Order Harmonic Emissions from Customer Installations: Modified IEC Approach”, in *25th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2019)*, 2019.  
<http://dx.doi.org/10.34890/804>
- [34] S. Djokic, R. Langella, I. Papič, A. Špelko, e A. Testa, “Temporal Variations of System Operating Conditions and Continuous Assessment of Low-Order Harmonic Emissions from Customer Installations: Voltage Harmonic Vector Approach”, in *2019 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, 2019, p. 116–122.  
<https://doi.org/10.1109/ICCEP.2019.8890073>
- [35] A. Špelko, I. Papič, e S. Z. Djokic, “A Network-Wide Evaluation of Single-Point Harmonic Contributions from Customer Installations: Comparison of Different Methods”, in *25th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2019)*, 2019.  
<http://dx.doi.org/10.34890/659>
- [36] A. Spelko, I. Papič, A. Testa, R. Langella, e S. Z. Djokic, “Application of Voltage Harmonic Vector Method at the Interface between HV and MV Systems”, in *2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2020.  
<https://doi.org/10.1109/ICHQP46026.2020.9177902>
- [37] L. Cristaldi e A. Ferrero, “Harmonic Power Flow Analysis for the Measurement of the Electric Power Quality”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 44, n° 3, p. 683–685, 1995.  
<https://doi.org/10.1109/19.387308>
- [38] T. Tanaka e H. Akagi, “A New Method of Harmonic Power Detection Based on the Instantaneous Active Power in Three-Phase Circuits”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 10, n° 4, p. 1737–1742, 1995.  
<https://doi.org/10.1109/61.473386>
- [39] P. H. Swart, M. J. Case, e J. D. Van Wyk, “On techniques for localization of sources producing distortion in electric power networks”, *Eur. Trans. Electr. Power*, vol. 4, n° 6, p. 485–489, 1994.  
<https://doi.org/10.1002/etep.4450040611>
- [40] W. Xu, X. Liu, e Y. Liu, “An Investigation on the Validity of Power Direction Method for Harmonic Source Determination”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 18, n° 1, p. 214–219, 2003.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2002.803842>
- [41] I. N. Santos, J. C. de Oliveira, e S. F. D. P. Silva, “Critical evaluation of the performance

- of the method of harmonic power flow to determine the dominant source of distortion”, *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 9, n° 5, p. 740–746, 2011.  
<https://doi.org/10.1109/TLA.2011.6030984>
- [42] K. Srinivasan, “On separating customer and supply side harmonic contributions”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 11, n° 2, p. 1003–1008, 1996.  
<https://doi.org/10.1109/61.489362>
- [43] K. Srinivasan e R. Jutras, “Conforming and non-conforming current for attributing steady state power quality problems”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 13, n° 1, p. 212–217, 1998.  
<https://doi.org/10.1109/61.660880>
- [44] I. N. Santos, “Uma Contribuição à Avaliação de Desempenho dos Principais Métodos para a Atribuição de Responsabilidades Sobre as Distorções Harmônicas”, Universidade Federal de Uberlândia (Dissertação), 2007.
- [45] W. Xu e Y. Liu, “A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling”, *IEEE Trans. POWER Deliv.*, vol. 15, n° 2, p. 804–811, 2000.  
<https://doi.org/10.1109/61.853023>
- [46] W. Xu e Y. Liu, “A Method to Determine Customer Harmonic Contributions for Incentive-Based Harmonic Control Applications”, in *1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.99CH36364)*, 1999, p. 361–366.  
<https://doi.org/10.1109/PESS.1999.784375>
- [47] I. N. Santos, “Método da superposição modificado como uma nova proposta de atribuição de responsabilidades sobre distorções harmônicas”, Universidade Federal de Uberlândia (Tese), 2011.
- [48] A. C. dos Santos, “Compartilhamento de responsabilidades harmônicas: análises, contribuições e proposições”, Universidade Federal de Uberlândia (Tese), 2019.  
<http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2445>
- [49] A. Spelko *et al.*, “CIGRE/CIREN JWG C4.42: Overview of Common Methods for Assessment of Harmonic Contribution from Customer Installation”, in *2017 IEEE Manchester PowerTech*, 2017.  
<https://doi.org/10.1109/PTC.2017.7981195>
- [50] B. Wang, G. Ma, J. Xiong, H. Zhang, L. Zhang, e Z. Li, “Several Sufficient Conditions for Harmonic Source Identification in Power Systems”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol.

- 33, nº 6, p. 3105–3113, 2018.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2870051>
- [51] I. N. Santos e F. H. Costa, “Avaliação do Desempenho das Metodologias para a Representação de Consumidores Visando o Compartilhamento das Distorções Harmônicas”, in *Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (VIII CBQEE)*, 2009.
- [52] A. C. dos Santos, I. N. Santos, e J. C. de Oliveira, “Capacitor switching methodology for responsibility sharing of harmonic voltage distortions”, *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 29, nº 12, p. e12135:1-16, 2019.  
<https://doi.org/10.1002/2050-7038.12135>
- [53] F. C. Véliz, S. L. Varricchio, C. de O. Costa, O. A. da Cunha, e R. C. Amaral, “Metodologia Baseada em Medições e no uso de Filtros Ativos para a Determinação das Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas Relativas à Conexão de Novas Instalações ao SIN”, in *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XXIV SNPTEE)*, 2017.
- [54] F. C. Véliz, S. L. Varricchio, C. de O. Costa, I. F. da Nova, e L. E. D. Santos, “Validação por Meio de Medições da Metodologia que Utiliza Filtros Ativos e Medidores de Tensão e Corrente para a Determinação das Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas no PAC”, in *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XXV SNPTEE)*, 2019.
- [55] I. N. Santos, J. C. de Oliveira, A. C. dos Santos, e B. M. Giancesini, “Compartilhamento de responsabilidades harmônicas via processos de mudança de estado: tendências e desafios”, *O Set. Elétrico*, vol. 171, p. 64–65, 2020.
- [56] E. O. de Matos, T. M. Soares, U. H. Bezerra, M. E. de L. Tostes, A. R. A. Manito, e B. C. Costa, “Using linear and non-parametric regression models to describe the contribution of non-linear loads on the voltage harmonic distortions in the electrical grid”, *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, nº 8, p. 1825–1832, 2016.  
<https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0948>
- [57] Y. Wang, H. E. Mazin, W. Xu, e B. Huang, “Estimating harmonic impact of individual loads using multiple linear regression analysis”, *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 26, nº 4, p. 809–824, 2016.  
<https://doi.org/10.1002/etep.2109>
- [58] F. Karimzadeh, S. Esmaili, e S. H. Hosseinian, “Method for determining utility and consumer harmonic contributions based on complex independent component analysis”,

- IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, nº 2, p. 526–534, 2016.  
<https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0997>
- [59] A. Manito, U. Bezerra, M. Tostes, E. Matos, C. Carvalho, e T. Soares, “Evaluating Harmonic Distortions on Grid Voltages Due to Multiple Nonlinear Loads Using Artificial Neural Networks”, *energies*, vol. 11, 2018.  
<https://doi.org/10.3390/en11123303>
- [60] H. K. M. Paredes, “Teoria de Potência Conservativa: Uma Nova Abordagem para o Controle Cooperativo de Condicionadores de Energia e Considerações sobre Atribuição de Responsabilidades”, Universidade Estadual de Campinas (Tese), 2011.
- [61] A. Robert e T. Deflandre, “Guide for assessing the network harmonic impedance”, *Electra*, nº 167, 1996.
- [62] R. Stiegler, J. Meyer, P. Schegner, e D. Chakravorty, “Measurement of network harmonic impedance in presence of electronic equipment”, in *2015 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS 2015)*, 2015.  
<https://doi.org/10.1109/AMPS.2015.7312737>
- [63] H. L. M. Monteiro, “Método de Estimação de Impedância utilizando Injeção de Pequenos Sinais”, Universidade Federal de Juiz de Fora (Tese), 2018.
- [64] A. de Oliveira, J. C. de Oliveira, J. W. Resende, e M. S. Miskulin, “Practical approaches for AC system harmonic impedance measurements”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 6, nº 4, p. 1721–1726, 1991.  
<https://doi.org/10.1109/61.97712>
- [65] G. Moreau, H. H. Le, G. Croteau, G. Beaulieu, e E. Portales, “Measurement System for Harmonic Impedance of the Network and Validation Steps”, in *CIGRE/IEEE PES International Symposium Quality and Security of Electric Power Delivery Systems, CIGRE/PES 2003*, 2003, nº 9, p. 69–73.  
<https://doi.org/10.1109/QSEPDS.2003.159798>
- [66] H. L. M. Monteiro *et al.*, “Harmonic impedance measurement based on short time current injections”, *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 148, p. 108–116, 2017.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.03.031>
- [67] Mathworks, “Simulink ® User’s Guide R2020a”, 2020. [Online]. Available at: [https://www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/simulink/simulink\\_ug.pdf](https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/simulink/simulink_ug.pdf). [Acessado: 23-jul-2020].
- [68] Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e Fundação de Apoio Universitário (FAU), “Entrega 5.1: Descritivo do Produto a Ser Desenvolvido para Aplicação da Metodologia

- em Instalação em Campo em Baixa Tensão (Relatório Parcial)”, 2017.
- [69] R. L. Boylestad, *Introdução à análise de circuitos*, 10<sup>a</sup> Edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

---

# APÊNDICE A

---

## A. TENSÕES E CORRENTES OBTIDAS NAS SIMULAÇÕES DO *BENCHMARK*

---

Este apêndice expõe os resultados de tensão e corrente obtidos a partir da simulação do *Benchmark* no *Simulink* com diferentes passos de integração, neste caso, 50  $\mu\text{s}$  e 1  $\mu\text{s}$ , para efeito de comparação com os dados informados no artigo de apresentação do sistema-teste [24],[31].

Os resultados das tensões e correntes, fundamentais e harmônicas, obtidos na simulação para os dois passos de integração ( $1 \mu s$  e  $50 \mu s$ ), bem como os dados informados na publicação do *Benchmark IEEE-HCD* são apresentados na Tabela 41, na Tabela 42, na Tabela 43 e na Tabela 44, para o PAC 01 ao PAC 04, nesta ordem. Dada a característica equilibrada do arranjo implementado, os resultados correspondem aos valores para a Fase A. As tabelas também incluem as discrepâncias entre os resultados das simulações e os dados do artigo, sendo a discrepância dos módulos calculada percentualmente e a discrepância dos ângulos calculada pelo valor absoluto. Foram grifados em amarelo os valores das discrepâncias maiores que  $\pm 10\%$  para os módulos e  $\pm 5^\circ$  para os ângulos.

Tabela 41 – Comparação dos resultados de tensão e corrente obtidos na simulação para  $T_S = 1 \mu s$  e  $50 \mu s$  com os dados do artigo – PAC 01.

PAC 01 - Tensões										
Ordem Harmônica	Simulação $1 \mu s$		Simulação $50 \mu s$		Dados Artigo		Discrepância entre Simulação $1 \mu s$ e Artigo		Discrepância entre Simulação $50 \mu s$ e Artigo	
	$V_{rms}$ [V]	$\theta_v$ [°]	$V_{rms}$ [V]	$\theta_v$ [°]	$V_{rms}$ [V]	$\theta_v$ [°]	$V_{rms}$ [%]	$\theta_v$ [°]	$V_{rms}$ [%]	$\theta_v$ [°]
1ª (50 Hz)	12034,51	-92,69	12034,22	-91,82	12033,74	-92,71	0,01	0,02	0,00	0,89
5ª (250 Hz)	39,23	-2,08	41,21	-0,71	39,53	-3,80	-0,76	1,72	4,25	3,09
7ª (350 Hz)	36,06	-84,66	37,95	-80,40	36,13	-88,20	-0,19	3,54	5,04	7,80
11ª (550 Hz)	40,86	-114,32	39,92	-108,34	38,99	-116,97	4,80	2,65	2,39	8,63
13ª (650 Hz)	16,96	116,14	17,35	125,09	16,90	112,44	0,36	3,70	2,66	12,65

PAC 01 - Correntes										
Ordem Harmônica	Simulação $1 \mu s$		Simulação $50 \mu s$		Dados Artigo		Discrepância entre Simulação $1 \mu s$ e Artigo		Discrepância entre Simulação $50 \mu s$ e Artigo	
	$I_{rms}$ [A]	$\theta_i$ [°]	$I_{rms}$ [A]	$\theta_i$ [°]	$I_{rms}$ [A]	$\theta_i$ [°]	$I_{rms}$ [%]	$\theta_i$ [°]	$I_{rms}$ [%]	$\theta_i$ [°]
1ª (50 Hz)	6,14	-104,00	6,09	-103,45	6,10	-104,31	0,66	0,31	-0,16	0,86
5ª (250 Hz)	1,94	88,40	1,96	90,83	1,96	86,78	-1,02	1,62	0,00	4,05
7ª (350 Hz)	1,10	17,71	1,11	20,35	1,10	14,39	0,00	3,32	0,91	5,96
11ª (550 Hz)	0,84	75,40	0,83	83,28	0,83	73,45	1,20	1,95	0,00	9,83
13ª (650 Hz)	0,28	1,11	0,28	6,42	0,28	-3,86	0,00	4,97	0,00	10,28

Fonte: Autoria própria.



Tabela 42 – Comparação dos resultados de tensão e corrente obtidos na simulação para  $T_s = 1 \mu s$  e  $50 \mu s$  com os dados do artigo – PAC 02.

<b>PAC 02 - Tensões</b>										
Ordem Harmônica	Simulação 1 $\mu s$		Simulação 50 $\mu s$		Dados Artigo		Discrepância entre Simulação 1 $\mu s$ e Artigo		Discrepância entre Simulação 50 $\mu s$ e Artigo	
	$V_{rms}$ [V]	$\theta_v$ [°]	$V_{rms}$ [V]	$\theta_v$ [°]	$V_{rms}$ [V]	$\theta_v$ [°]	$V_{rms}$ [%]	$\theta_v$ [°]	$V_{rms}$ [%]	$\theta_v$ [°]
1ª (50 Hz)	12026,02	-92,70	12025,73	-91,83	12025,26	-92,72	0,01	0,02	0,00	0,89
5ª (250 Hz)	39,58	0,13	41,57	1,36	39,91	-1,66	-0,83	1,79	4,16	3,02
7ª (350 Hz)	35,85	-83,17	37,81	-78,98	35,92	-86,69	-0,19	3,52	5,26	7,71
11ª (550 Hz)	41,37	-116,92	40,44	-111,13	39,51	-119,77	4,71	2,85	2,35	8,64
13ª (650 Hz)	17,78	117,04	18,29	125,68	17,72	113,31	0,34	3,73	3,22	12,37

<b>PAC 02 - Correntes</b>										
Ordem Harmônica	Simulação 1 $\mu s$		Simulação 50 $\mu s$		Dados Artigo		Discrepância entre Simulação 1 $\mu s$ e Artigo		Discrepância entre Simulação 50 $\mu s$ e Artigo	
	$I_{rms}$ [A]	$\theta_i$ [°]	$I_{rms}$ [A]	$\theta_i$ [°]	$I_{rms}$ [A]	$\theta_i$ [°]	$I_{rms}$ [%]	$\theta_i$ [°]	$I_{rms}$ [%]	$\theta_i$ [°]
1ª (50 Hz)	11,85	-99,47	11,80	-98,97	11,83	-99,61	0,17	0,14	-0,25	0,64
5ª (250 Hz)	0,89	139,36	0,89	140,90	0,90	137,58	-1,11	1,78	-1,11	3,32
7ª (350 Hz)	0,43	65,45	0,43	65,33	0,43	63,12	0,00	2,33	0,00	2,21
11ª (550 Hz)	0,31	-50,60	0,31	-47,84	0,31	-53,38	0,00	2,78	0,00	5,54
13ª (650 Hz)	0,20	-86,76	0,21	-85,53	0,20	-95,51	0,00	8,75	5,00	9,98

Fonte: Autoria própria.

Tabela 43 – Comparação dos resultados de tensão e corrente obtidos na simulação para  $T_S = 1 \mu s$  e  $50 \mu s$  com os dados do artigo – PAC 03.

<b>PAC 03 - Tensões</b>										
Ordem Harmônica	Simulação 1 $\mu s$		Simulação 50 $\mu s$		Dados Artigo		Discrepância entre Simulação 1 $\mu s$ e Artigo		Discrepância entre Simulação 50 $\mu s$ e Artigo	
	$V_{rms}$ [V]	$\theta_v$ [°]	$V_{rms}$ [V]	$\theta_v$ [°]	$V_{rms}$ [V]	$\theta_v$ [°]	$V_{rms}$ [%]	$\theta_v$ [°]	$V_{rms}$ [%]	$\theta_v$ [°]
1ª (50 Hz)	12033,68	-92,70	12033,33	-91,83	12032,88	-92,71	0,01	0,01	0,00	0,88
5ª (250 Hz)	38,01	-0,36	39,96	0,89	38,30	-2,09	-0,76	1,73	4,33	2,98
7ª (350 Hz)	34,99	-83,95	36,88	-79,67	35,05	-87,50	-0,17	3,55	5,22	7,83
11ª (550 Hz)	40,62	-116,00	39,73	-110,04	38,77	-118,71	4,77	2,71	2,48	8,67
13ª (650 Hz)	17,33	115,01	17,70	123,89	17,28	111,24	0,29	3,77	2,43	12,65
<b>PAC 03 - Correntes</b>										
Ordem Harmônica	Simulação 1 $\mu s$		Simulação 50 $\mu s$		Dados Artigo		Discrepância entre Simulação 1 $\mu s$ e Artigo		Discrepância entre Simulação 50 $\mu s$ e Artigo	
	$I_{rms}$ [A]	$\theta_i$ [°]	$I_{rms}$ [A]	$\theta_i$ [°]	$I_{rms}$ [A]	$\theta_i$ [°]	$I_{rms}$ [%]	$\theta_i$ [°]	$I_{rms}$ [%]	$\theta_i$ [°]
1ª (50 Hz)	5,73	-106,69	5,76	-105,65	5,73	-106,70	0,00	0,01	0,52	1,05
5ª (250 Hz)	0,06	-87,99	0,06	-86,54	0,06	-88,95	0,00	0,96	0,00	2,41
7ª (350 Hz)	0,03	-170,79	0,03	-170,36	0,03	-173,47	0,00	2,68	0,00	3,11
11ª (550 Hz)	0,01	-51,13	0,01	-37,90	0,01	-59,00	0,00	7,87	0,00	21,10
13ª (650 Hz)	0,01	-164,52	0,01	-157,52	0,01	-166,25	0,00	1,73	0,00	8,73

Fonte: Autoria própria.

Tabela 44 – Comparação dos resultados de tensão e corrente obtidos na simulação para  $T_S = 1 \mu s$  e  $50 \mu s$  com os dados do artigo – PAC 04.

PAC 04 - Tensões										
Ordem Harmônica	Simulação 1 $\mu s$		Simulação 50 $\mu s$		Dados Artigo		Discrepância entre Simulação 1 $\mu s$ e Artigo		Discrepância entre Simulação 50 $\mu s$ e Artigo	
	$V_{rms}$ [V]	$\theta_v$ [°]	$V_{rms}$ [V]	$\theta_v$ [°]	$V_{rms}$ [V]	$\theta_v$ [°]	$V_{rms}$ [%]	$\theta_v$ [°]	$V_{rms}$ [%]	$\theta_v$ [°]
1ª (50 Hz)	239,86	-64,19	239,81	-63,33	239,86	-64,21	0,00	0,02	-0,02	0,88
5ª (250 Hz)	2,95	7,59	3,03	6,95	2,96	3,79	-0,34	3,80	2,36	3,16
7ª (350 Hz)	2,06	-11,87	2,19	-11,92	2,09	-15,91	-1,44	4,04	4,78	3,99
11ª (550 Hz)	2,56	-163,15	2,63	-161,87	2,57	-168,94	-0,39	5,79	2,33	7,07
13ª (650 Hz)	1,57	-158,76	1,68	-159,30	1,74	-164,90	-9,77	6,14	-3,45	5,60

PAC 04 - Correntes										
Ordem Harmônica	Simulação 1 $\mu s$		Simulação 50 $\mu s$		Dados Artigo		Discrepância entre Simulação 1 $\mu s$ e Artigo		Discrepância entre Simulação 50 $\mu s$ e Artigo	
	$I_{rms}$ [A]	$\theta_i$ [°]	$I_{rms}$ [A]	$\theta_i$ [°]	$I_{rms}$ [A]	$\theta_i$ [°]	$I_{rms}$ [%]	$\theta_i$ [°]	$I_{rms}$ [%]	$\theta_i$ [°]
1ª (50 Hz)	592,35	-69,47	589,10	-68,97	591,20	-69,61	0,19	0,14	-0,36	0,64
5ª (250 Hz)	44,73	109,36	44,88	110,71	45,01	107,59	-0,62	1,77	-0,29	3,12
7ª (350 Hz)	21,43	95,46	21,11	94,94	21,42	93,16	0,05	2,30	-1,45	1,78
11ª (550 Hz)	15,26	-80,57	15,98	-77,49	15,54	-83,36	-1,80	2,79	2,83	5,87
13ª (650 Hz)	10,11	-56,74	10,11	-55,72	9,45	-62,72	6,98	5,98	6,98	7,00

Fonte: Autoria própria.

---

# APÊNDICE B

---

## B. RESULTADOS DOS MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DE IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS UTILIZANDO O *BENCHMARK IEEE-HCD*

---

São apresentados, neste apêndice, os resultados de impedância observados a partir dos PACs do *Benchmark IEEE-HCD*, obtidos pela aplicação dos métodos para estimação das impedâncias apresentados no Capítulo 2 e modelados no *Simulink*, a saber:

- **Método A:** Injeção de correntes harmônicas senoidais;
- **Método B:** Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais adjacentes às harmônicas de modo individual;
- **Método C:** Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais adjacentes às harmônicas de modo simultâneo;
- **Método D:** Injeção de correntes inter-harmônicas senoidais em pacotes;
- **Método E:** Injeção de correntes do tipo Gaussiana Modulada.

A aplicação dos métodos de estimação das impedâncias harmônicas em cada PAC do *Benchmark IEEE-HCD* proporcionou os resultados para as impedâncias de sequência positiva, por fase, observados a partir deste ponto para o circuito equivalente do consumidor ( $Z_C \angle \theta_C$ ) e o circuito equivalente do sistema supridor ( $Z_S \angle \theta_S$ ).

Os resultados foram organizados por PAC, sendo compostos por três tabelas para cada PAC, e apresentados na sequência do PAC 01 ao PAC 04. A primeira tabela inclui os resultados das impedâncias do sistema supridor para cada um dos métodos aplicados no *Benchmark*, e também para os resultados informados no artigo. Seguindo este raciocínio, a segunda tabela apresenta os resultados para as impedâncias do consumidor e, por fim, a terceira tabela expõe as discrepâncias entre os resultados dos métodos aplicados no sistema implementado no *Simulink* e os dados do artigo. A discrepância dos módulos é calculada percentualmente, enquanto que a discrepância dos ângulos é calculada pelo valor absoluto. Foram grifados em amarelo os valores das discrepâncias maiores que  $\pm 10\%$  para os módulos e  $\pm 5^\circ$  para os ângulos.

## B.1 PAC 01

Conforme a sequência apresentada, primeiramente para o PAC 01, a Tabela 45 inclui as impedâncias do sistema supridor obtidas em cada um dos métodos simulados e os dados do artigo, enquanto a Tabela 46 apresenta os resultados para as impedâncias do consumidor. Na sequência, a Tabela 47 expõe as discrepâncias entre os resultados dos métodos aplicados no sistema implementado no *Simulink* e os informados no artigo.

Tabela 45 – Resultados dos métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no *Benchmark IEEE-HCD* – PAC 01: Impedâncias Supridor.

PAC 01 – Impedâncias do Sistema supridor												
Ordem Harmônica	Dados Artigo		Método A		Método B		Método C		Método D		Método E	
	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]
1 <sup>a</sup> (50 Hz)	2,69	74,93	2,66	75,04	2,70	74,68	2,70	74,65	2,70	74,72	2,70	73,26
2 <sup>a</sup> (100 Hz)	5,39	78,77	5,39	78,91	5,40	78,72	5,40	78,76	5,40	78,71	5,40	79,08
3 <sup>a</sup> (150 Hz)	8,39	78,10	8,38	78,31	8,38	78,15	8,38	78,21	8,38	78,15	8,55	78,27
4 <sup>a</sup> (200 Hz)	12,91	70,68	12,96	71,41	12,98	71,16	12,98	71,18	12,98	71,16	11,35	72,28
5 <sup>a</sup> (250 Hz)	14,66	74,32	14,59	74,50	14,66	74,52	14,65	74,53	14,66	74,52	14,43	74,48
6 <sup>a</sup> (300 Hz)	19,22	70,29	19,28	70,65	19,27	70,59	19,29	70,60	19,27	70,60	19,40	70,50
7 <sup>a</sup> (350 Hz)	24,76	65,09	24,84	65,32	24,80	65,39	24,82	65,36	24,80	65,39	24,85	65,26
8 <sup>a</sup> (400 Hz)	31,68	57,71	31,79	58,08	31,76	58,13	31,80	58,06	31,76	58,14	31,49	57,57
9 <sup>a</sup> (450 Hz)	40,27	47,22	40,42	47,41	40,56	47,74	40,43	47,40	40,54	47,74	40,02	47,83
10 <sup>a</sup> (500 Hz)	49,76	32,13	49,02	31,77	50,00	31,91	49,04	31,77	49,96	31,95	49,53	37,55
11 <sup>a</sup> (550 Hz)	56,43	12,18	57,28	13,23	57,38	13,28	57,38	13,33	57,48	13,28	57,71	8,54
12 <sup>a</sup> (600 Hz)	55,67	-8,96	56,99	-8,36	56,90	-8,51	57,01	-8,37	56,90	-8,51	55,28	-9,36
13 <sup>a</sup> (650 Hz)	48,90	-26,54	49,98	-26,43	49,97	-26,45	49,98	-26,43	49,97	-26,44	49,66	-25,97
14 <sup>a</sup> (700 Hz)	40,83	-39,12	41,73	-39,23	41,74	-39,21	41,74	-39,22	41,74	-39,21	41,89	-38,91
15 <sup>a</sup> (750 Hz)	33,81	-47,69	34,55	-47,99	34,55	-47,97	34,56	-47,98	34,55	-47,97	34,71	-48,23

Fonte: Autoria própria.

Tabela 46 – Resultados dos métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no *Benchmark IEEE-HCD* – PAC 01: Impedâncias Consumidor.

PAC 01 - Impedâncias do Consumidor												
Ordem Harmônica	Dados Artigo		Método A		Método B		Método C		Método D		Método E	
	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]
1ª (50 Hz)	1916,80	-21,73	1324,61	4,87	2576,11	-13,16	2460,15	-12,31	2622,36	-13,66	1234,43	-52,41
2ª (100 Hz)	1813,31	-32,21	3039,66	-38,39	2085,45	-38,19	3162,47	-39,88	2130,75	-37,50	292,94	-20,55
3ª (150 Hz)	1520,31	-47,75	1603,17	-57,16	1563,92	-54,10	1618,56	-57,42	1564,70	-54,10	1966,97	-40,41
4ª (200 Hz)	1154,12	-58,25	1113,82	-63,03	1117,10	-62,95	1114,17	-62,56	1125,07	-62,85	655,94	-13,87
5ª (250 Hz)	915,01	-67,49	788,64	-64,32	845,86	-68,60	797,59	-64,88	855,84	-68,47	1043,86	-67,77
6ª (300 Hz)	652,85	-73,11	613,49	-66,14	623,57	-71,89	613,20	-66,14	625,56	-72,05	2201,48	-72,05
7ª (350 Hz)	438,46	-77,08	448,67	-73,99	442,72	-75,80	448,63	-74,24	443,98	-75,62	456,30	-91,83
8ª (400 Hz)	281,56	-76,06	291,60	-77,95	283,04	-76,34	291,49	-77,91	282,83	-76,42	230,15	-93,58
9ª (450 Hz)	158,65	-71,88	165,98	-75,32	158,34	-72,55	166,09	-75,33	158,00	-72,56	123,53	-67,35
10ª (500 Hz)	56,33	-49,56	57,76	-51,10	55,68	-52,30	57,79	-51,11	55,58	-52,42	59,84	-44,78
11ª (550 Hz)	60,54	60,72	57,60	62,18	58,17	62,20	58,06	62,02	57,95	62,29	52,89	55,30
12ª (600 Hz)	141,45	79,40	139,31	79,87	138,67	80,03	139,32	79,85	138,64	80,03	124,20	80,30
13ª (650 Hz)	219,12	83,62	214,73	84,25	214,62	84,30	214,80	84,24	214,59	84,31	206,90	86,55
14ª (700 Hz)	291,22	85,19	286,51	86,05	286,53	86,04	286,63	86,07	286,50	86,04	280,62	87,79
15ª (750 Hz)	358,62	86,32	353,82	87,04	353,70	87,03	353,82	87,06	353,68	87,03	357,90	88,22

Fonte: Autoria própria.

Tabela 47 – Discrepâncias entre os métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no *Benchmark* e os dados do artigo – PAC 01.**PAC 01 - Impedâncias: Discrepâncias dos métodos aplicados com relação aos dados do artigo**

Ordem Harmônica	Método A				Método B				Método C				Método D				Método E			
	Z		Z		Z		Z		Z		Z		Z		Z		Z			
	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor		
	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]
1ª (50 Hz)	-1,12	0,11	-30,89	26,60	0,37	-0,25	34,40	8,57	0,37	-0,28	28,35	9,42	0,37	-0,21	36,81	8,07	0,37	-1,67	-35,60	-30,68
2ª (100 Hz)	0,00	0,14	67,63	-6,18	0,19	-0,05	15,01	-5,98	0,19	-0,01	74,40	-7,67	0,19	-0,06	17,51	-5,29	0,19	0,31	-83,85	11,66
3ª (150 Hz)	-0,12	0,21	5,45	-9,41	-0,12	0,05	2,87	-6,35	-0,12	0,11	6,46	-9,67	-0,12	0,05	2,92	-6,35	1,91	0,17	29,38	7,34
4ª (200 Hz)	0,39	0,73	-3,49	-4,78	0,54	0,48	-3,21	-4,70	0,54	0,50	-3,46	-4,31	0,54	0,48	-2,52	-4,60	-12,08	1,60	-43,17	44,38
5ª (250 Hz)	-0,48	0,18	-13,81	3,17	0,00	0,20	-7,56	-1,11	-0,07	0,21	-12,83	2,61	0,00	0,20	-6,47	-0,98	-1,57	0,16	14,08	-0,28
6ª (300 Hz)	0,31	0,36	-6,03	6,97	0,26	0,30	-4,48	1,22	0,36	0,31	-6,07	6,97	0,26	0,31	-4,18	1,06	0,94	0,21	237,21	1,06
7ª (350 Hz)	0,32	0,23	2,33	3,09	0,16	0,30	0,97	1,28	0,24	0,27	2,32	2,84	0,16	0,30	1,26	1,46	0,36	0,17	4,07	-14,75
8ª (400 Hz)	0,35	0,37	3,57	-1,89	0,25	0,42	0,53	-0,28	0,38	0,35	3,53	-1,85	0,25	0,43	0,45	-0,36	-0,60	-0,14	-18,26	-17,52
9ª (450 Hz)	0,37	0,19	4,62	-3,44	0,72	0,52	-0,20	-0,67	0,40	0,18	4,69	-3,45	0,67	0,52	-0,41	-0,68	-0,62	0,61	-22,14	4,53
10ª (500 Hz)	-1,49	-0,36	2,54	-1,54	0,48	-0,22	-1,15	-2,74	-1,45	-0,36	2,59	-1,55	0,40	-0,18	-1,33	-2,86	-0,46	5,42	6,23	4,78
11ª (550 Hz)	1,51	1,05	-4,86	1,46	1,68	1,10	-3,91	1,48	1,68	1,15	-4,10	1,30	1,86	1,10	-4,28	1,57	2,27	-3,64	-12,64	-5,42
12ª (600 Hz)	2,37	0,60	-1,51	0,47	2,21	0,45	-1,97	0,63	2,41	0,59	-1,51	0,45	2,21	0,45	-1,99	0,63	-0,70	-0,40	-12,20	0,90
13ª (650 Hz)	2,21	0,11	-2,00	0,63	2,19	0,09	-2,05	0,68	2,21	0,11	-1,97	0,62	2,19	0,10	-2,07	0,69	1,55	0,57	-5,58	2,93
14ª (700 Hz)	2,20	-0,11	-1,62	0,86	2,23	-0,09	-1,61	0,85	2,23	-0,10	-1,58	0,88	2,23	-0,09	-1,62	0,85	2,60	0,21	-3,64	2,60
15ª (750 Hz)	2,19	-0,30	-1,34	0,72	2,19	-0,28	-1,37	0,71	2,22	-0,29	-1,34	0,74	2,19	-0,28	-1,38	0,71	2,66	-0,54	-0,20	1,90

Fonte: Autoria própria.



## B.2 PAC 02

Com relação ao PAC 02, a Tabela 48 inclui as impedâncias do sistema supridor obtidas em cada um dos métodos simulados e os dados informados no artigo, enquanto a Tabela 49 apresenta os resultados para as impedâncias do consumidor. Na sequência, a Tabela 50 expõe as discrepâncias entre os resultados dos métodos aplicados no sistema implementado no *Simulink* e os apresentados no artigo.

Tabela 48 – Resultados dos métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no *Benchmark IEEE-HCD* – PAC 02: Impedâncias Supridor.

PAC 02 – Impedâncias do Sistema supridor												
Ordem Harmônica	Dados Artigo		Método A		Método B		Método C		Método D		Método E	
	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]
1ª (50 Hz)	2,99	67,81	2,99	67,80	2,99	67,81	2,99	67,81	2,99	67,80	3,01	66,45
2ª (100 Hz)	5,79	75,10	5,81	75,44	5,80	75,39	5,81	75,45	5,80	75,40	5,81	75,09
3ª (150 Hz)	8,90	76,35	8,90	76,48	8,90	76,44	8,90	76,48	8,90	76,44	8,97	76,47
4ª (200 Hz)	12,42	75,36	12,36	75,46	12,37	75,48	12,36	75,46	12,37	75,48	12,27	74,94
5ª (250 Hz)	16,46	72,83	16,46	72,94	16,47	73,03	16,46	72,96	16,47	73,03	16,51	73,20
6ª (300 Hz)	21,50	69,01	21,45	69,09	21,48	69,21	21,45	69,09	21,48	69,21	21,39	69,59
7ª (350 Hz)	27,92	63,08	27,93	63,27	27,96	63,34	27,94	63,28	27,95	63,34	28,18	63,69
8ª (400 Hz)	36,67	52,92	36,83	53,57	36,75	53,36	36,83	53,56	36,76	53,37	37,72	52,79
9ª (450 Hz)	46,70	33,13	47,71	34,21	47,43	33,57	47,71	34,21	47,38	33,52	45,97	29,61
10ª (500 Hz)	34,75	-2,29	35,21	-2,24	35,22	-4,02	35,21	-2,21	35,18	-4,21	34,93	4,45
11ª (550 Hz)	35,64	36,72	35,34	38,72	35,50	38,59	35,44	38,52	35,47	38,83	33,68	35,04
12ª (600 Hz)	54,23	11,78	55,24	12,98	55,25	12,99	55,23	12,98	55,26	13,00	53,94	14,31
13ª (650 Hz)	52,32	-13,94	53,71	-13,41	53,73	-13,39	53,71	-13,41	53,73	-13,39	54,13	-12,48
14ª (700 Hz)	43,25	-31,03	44,44	-31,07	44,44	-31,06	44,44	-31,07	44,44	-31,06	44,95	-30,85
15ª (750 Hz)	34,69	-41,55	35,59	-41,92	35,60	-41,91	35,59	-41,91	35,60	-41,91	35,76	-42,27

Fonte: Autoria própria.

Tabela 49 – Resultados dos métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no *Benchmark IEEE-HCD* – PAC 02: Impedâncias Consumidor.

PAC 02 - Impedâncias do Consumidor												
Ordem Harmônica	Dados Artigo		Método A		Método B		Método C		Método D		Método E	
	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]
1ª (50 Hz)	1110,44	-9,88	962,50	4,49	932,29	13,01	868,63	-0,72	1121,39	1,24	1099,98	-11,96
2ª (100 Hz)	847,80	-37,94	1140,32	-23,19	995,71	-31,99	1147,10	-24,07	979,89	-31,12	652,18	-44,75
3ª (150 Hz)	545,82	-53,22	581,87	-55,69	559,86	-54,78	585,74	-55,10	560,60	-54,62	393,79	-74,56
4ª (200 Hz)	74,06	-59,93	73,13	-62,61	72,86	-62,47	73,09	-62,57	72,97	-62,47	133,87	-1,23
5ª (250 Hz)	289,50	83,84	291,95	84,73	289,36	84,80	291,40	84,83	289,69	84,74	214,32	79,82
6ª (300 Hz)	525,68	79,60	538,89	78,82	529,08	79,15	539,13	78,76	529,23	79,24	539,95	80,52
7ª (350 Hz)	688,60	75,12	701,63	75,55	697,76	75,93	701,70	75,73	698,68	75,80	740,61	78,31
8ª (400 Hz)	810,33	74,61	821,17	73,00	831,09	73,93	820,91	72,95	830,71	73,94	877,24	75,62
9ª (450 Hz)	928,27	73,53	924,82	71,29	941,51	73,12	925,75	71,38	940,73	73,14	993,05	77,24
10ª (500 Hz)	1042,32	74,02	1019,61	71,81	1035,97	72,23	1019,25	71,76	1034,64	72,38	1158,87	80,26
11ª (550 Hz)	1124,95	73,16	1130,64	74,09	1135,85	73,34	1135,87	74,22	1137,18	73,47	1308,16	68,65
12ª (600 Hz)	1205,82	74,30	1209,92	74,84	1222,77	73,45	1209,06	74,84	1224,05	73,35	1313,70	70,84
13ª (650 Hz)	1303,59	74,22	1297,81	74,12	1311,95	73,83	1300,84	74,13	1308,07	73,87	1398,16	74,34
14ª (700 Hz)	1395,14	75,41	1399,92	74,75	1397,66	74,45	1398,90	74,75	1397,84	74,42	1519,51	76,43
15ª (750 Hz)	1495,09	75,50	1490,58	75,81	1487,16	74,91	1493,42	75,78	1487,72	74,99	1601,22	76,75

Fonte: Autoria própria.

Tabela 50 – Discrepâncias entre os métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no *Benchmark IEEE-HCD* e os dados do artigo – PAC 02.**PAC 02 - Impedâncias: Discrepâncias dos métodos aplicados com relação aos dados do artigo**

Ordem Harmônica	Método A				Método B				Método C				Método D				Método E			
	Z		Z		Z		Z		Z		Z		Z		Z		Z			
	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor		
	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]
1ª (50 Hz)	0,00	-0,01	-13,32	14,37	0,00	0,00	-16,04	22,89	0,00	0,00	-21,78	9,16	0,00	-0,01	0,99	11,12	0,67	-1,36	-0,94	-2,08
2ª (100 Hz)	0,35	0,34	34,50	14,75	0,17	0,29	17,45	5,95	0,35	0,35	35,30	13,87	0,17	0,30	15,58	6,82	0,35	-0,01	-23,07	-6,81
3ª (150 Hz)	0,00	0,13	6,60	-2,47	0,00	0,09	2,57	-1,56	0,00	0,13	7,31	-1,88	0,00	0,09	2,71	-1,40	0,79	0,12	-27,85	-21,34
4ª (200 Hz)	-0,48	0,10	-1,26	-2,68	-0,40	0,12	-1,62	-2,54	-0,48	0,10	-1,31	-2,64	-0,40	0,12	-1,47	-2,54	-1,21	-0,42	80,76	58,70
5ª (250 Hz)	0,00	0,11	0,85	0,89	0,06	0,20	-0,05	0,96	0,00	0,13	0,66	0,99	0,06	0,20	0,07	0,90	0,30	0,37	-25,97	-4,02
6ª (300 Hz)	-0,23	0,08	2,51	-0,78	-0,09	0,20	0,65	-0,45	-0,23	0,08	2,56	-0,84	-0,09	0,20	0,68	-0,36	-0,51	0,58	2,71	0,92
7ª (350 Hz)	0,04	0,19	1,89	0,43	0,14	0,26	1,33	0,81	0,07	0,20	1,90	0,61	0,11	0,26	1,46	0,68	0,93	0,61	7,55	3,19
8ª (400 Hz)	0,44	0,65	1,34	-1,61	0,22	0,44	2,56	-0,68	0,44	0,64	1,31	-1,66	0,25	0,45	2,52	-0,67	2,86	-0,13	8,26	1,01
9ª (450 Hz)	2,16	1,08	-0,37	-2,24	1,56	0,44	1,43	-0,41	2,16	1,08	-0,27	-2,15	1,46	0,39	1,34	-0,39	-1,56	-3,52	6,98	3,71
10ª (500 Hz)	1,32	0,05	-2,18	-2,21	1,35	-1,73	-0,61	-1,79	1,32	0,08	-2,21	-2,26	1,24	-1,92	-0,74	-1,64	0,52	6,74	11,18	6,24
11ª (550 Hz)	-0,84	2,00	0,51	0,93	-0,39	1,87	0,97	0,18	-0,56	1,80	0,97	1,06	-0,48	2,11	1,09	0,31	-5,50	-1,68	16,29	-4,51
12ª (600 Hz)	1,86	1,20	0,34	0,54	1,88	1,21	1,41	-0,85	1,84	1,20	0,27	0,54	1,90	1,22	1,51	-0,95	-0,53	2,53	8,95	-3,46
13ª (650 Hz)	2,66	0,53	-0,44	-0,10	2,69	0,55	0,64	-0,39	2,66	0,53	-0,21	-0,09	2,69	0,55	0,34	-0,35	3,46	1,46	7,25	0,12
14ª (700 Hz)	2,75	-0,04	0,34	-0,66	2,75	-0,03	0,18	-0,96	2,75	-0,04	0,27	-0,66	2,75	-0,03	0,19	-0,99	3,93	0,18	8,91	1,02
15ª (750 Hz)	2,59	-0,37	-0,30	0,31	2,62	-0,36	-0,53	-0,59	2,59	-0,36	-0,11	0,28	2,62	-0,36	-0,49	-0,51	3,08	-0,72	7,10	1,25

Fonte: Autoria própria.

### B.3 PAC 03

Para o PAC 03, a Tabela 51 inclui as impedâncias do sistema supridor obtidas em cada um dos métodos simulados e os resultado do artigo, enquanto a Tabela 52 apresenta os resultados para as impedâncias do consumidor. Na sequência, a Tabela 53 expõe as discrepâncias entre os resultados dos métodos aplicados no sistema implementado no *Simulink* e os dados do artigo.

Tabela 51 – Resultados dos métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no *Benchmark IEEE-HCD* – PAC 03: Impedâncias Supridor.

PAC 03 – Impedâncias do Sistema supridor												
Ordem Harmônica	Dados Artigo		Método A		Método B		Método C		Método D		Método E	
	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]
1ª (50 Hz)	2,90	72,32	2,89	72,25	2,89	72,24	2,89	72,20	2,89	72,29	2,90	70,77
2ª (100 Hz)	5,75	77,34	5,75	77,49	5,75	77,43	5,75	77,50	5,75	77,40	5,77	76,89
3ª (150 Hz)	8,92	77,12	8,92	77,30	8,92	77,23	8,92	77,30	8,92	77,22	9,08	77,36
4ª (200 Hz)	13,77	69,81	13,82	70,43	13,83	70,24	13,83	70,26	13,83	70,24	12,00	70,85
5ª (250 Hz)	15,66	73,45	15,67	73,56	15,67	73,65	15,67	73,58	15,67	73,64	15,37	73,71
6ª (300 Hz)	20,72	69,19	20,71	69,23	20,73	69,36	20,71	69,22	20,73	69,37	20,48	70,08
7ª (350 Hz)	26,96	63,03	26,99	63,21	27,01	63,29	27,00	63,23	27,02	63,27	27,25	63,99
8ª (400 Hz)	35,32	52,97	35,48	53,56	35,43	53,37	35,48	53,54	35,43	53,38	36,80	53,54
9ª (450 Hz)	45,04	33,81	45,91	34,80	45,73	34,21	45,91	34,81	45,71	34,18	44,37	30,00
10ª (500 Hz)	34,45	-1,83	34,85	-1,75	34,92	-3,55	34,84	-1,72	34,93	-3,64	36,05	4,65
11ª (550 Hz)	34,22	37,33	33,91	39,27	34,07	39,15	34,00	39,12	34,03	39,26	32,34	35,12
12ª (600 Hz)	53,00	14,46	53,88	15,71	53,85	15,67	53,86	15,70	53,84	15,67	52,07	16,61
13ª (650 Hz)	53,42	-10,67	54,73	-10,00	54,73	-10,01	54,73	-10,00	54,74	-10,00	54,87	-9,22
14ª (700 Hz)	45,83	-28,53	47,05	-28,39	47,05	-28,38	47,05	-28,39	47,05	-28,38	47,47	-27,97
15ª (750 Hz)	37,82	-40,04	38,78	-40,24	38,77	-40,23	38,78	-40,24	38,77	-40,23	39,01	-40,64

Fonte: Autoria própria.

Tabela 52 – Resultados dos métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no *Benchmark IEEE-HCD* – PAC 03: Impedâncias Consumidor.

PAC 03 - Impedâncias do Consumidor												
Ordem Harmônica	Dados Artigo		Método A		Método B		Método C		Método D		Método E	
	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]
1ª (50 Hz)	102,02	81,29	111,87	78,45	102,18	82,11	102,17	82,11	102,19	82,11	99,92	84,73
2ª (100 Hz)	207,24	85,29	207,43	85,87	207,22	85,88	207,38	85,88	207,21	85,88	206,91	86,23
3ª (150 Hz)	322,12	86,58	322,06	87,07	322,05	87,05	322,03	87,07	322,05	87,05	325,41	87,27
4ª (200 Hz)	454,30	87,11	453,00	87,57	453,01	87,59	452,92	87,58	453,04	87,60	452,66	87,12
5ª (250 Hz)	614,70	87,16	613,99	87,67	614,37	87,66	613,92	87,67	614,34	87,65	614,50	87,70
6ª (300 Hz)	826,57	86,92	826,13	87,50	825,83	87,48	826,06	87,50	825,83	87,48	827,67	87,26
7ª (350 Hz)	1135,94	86,17	1135,70	86,83	1134,82	86,86	1135,61	86,84	1134,65	86,86	1133,14	87,12
8ª (400 Hz)	1668,04	84,49	1667,38	85,39	1664,71	85,43	1667,57	85,39	1664,68	85,43	1663,52	85,01
9ª (450 Hz)	2892,17	79,62	2879,18	81,18	2887,33	81,47	2881,04	81,19	2886,08	81,46	2893,85	79,53
10ª (500 Hz)	8551,11	52,60	8582,84	57,76	8751,94	57,67	8589,72	57,64	8746,73	57,71	6942,04	66,78
11ª (550 Hz)	5540,89	-62,00	5892,20	-64,67	5909,52	-64,48	5906,17	-64,46	5918,59	-64,51	5116,08	-73,90
12ª (600 Hz)	2243,99	-75,94	2312,82	-77,70	2311,00	-77,79	2313,25	-77,70	2311,16	-77,80	2244,50	-76,81
13ª (650 Hz)	1322,04	-79,00	1349,58	-80,53	1349,83	-80,52	1349,74	-80,52	1349,78	-80,52	1352,75	-79,82
14ª (700 Hz)	880,44	-79,72	898,41	-81,16	898,58	-81,16	898,45	-81,16	898,58	-81,16	903,54	-80,96
15ª (750 Hz)	614,08	-79,31	627,97	-80,87	628,07	-80,88	628,00	-80,87	628,07	-80,88	628,57	-81,09

Fonte: Autoria própria.

Tabela 53 – Discrepâncias entre os métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no *Benchmark* e os dados do artigo – PAC 03.**PAC 03 - Impedâncias: Discrepâncias dos métodos aplicados com relação aos dados do artigo**

Ordem Harmônica	Método A				Método B				Método C				Método D				Método E			
	Z		Z		Z		Z		Z		Z		Z		Z		Z			
	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor		
	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]
1ª (50 Hz)	-0,34	-0,07	9,65	-2,84	-0,34	-0,08	0,16	0,82	-0,34	-0,12	0,15	0,82	-0,34	-0,03	0,17	0,82	0,00	-1,55	-2,06	3,44
2ª (100 Hz)	0,00	0,15	0,09	0,58	0,00	0,09	-0,01	0,59	0,00	0,16	0,07	0,59	0,00	0,06	-0,01	0,59	0,35	-0,45	-0,16	0,94
3ª (150 Hz)	0,00	0,18	-0,02	0,49	0,00	0,11	-0,02	0,47	0,00	0,18	-0,03	0,49	0,00	0,10	-0,02	0,47	1,79	0,24	1,02	0,69
4ª (200 Hz)	0,36	0,62	-0,29	0,46	0,44	0,43	-0,28	0,48	0,44	0,45	-0,30	0,47	0,44	0,43	-0,28	0,49	-12,85	1,04	-0,36	0,01
5ª (250 Hz)	0,06	0,11	-0,12	0,51	0,06	0,20	-0,05	0,50	0,06	0,13	-0,13	0,51	0,06	0,19	-0,06	0,49	-1,85	0,26	-0,03	0,54
6ª (300 Hz)	-0,05	0,04	-0,05	0,58	0,05	0,17	-0,09	0,56	-0,05	0,03	-0,06	0,58	0,05	0,18	-0,09	0,56	-1,16	0,89	0,13	0,34
7ª (350 Hz)	0,11	0,18	-0,02	0,66	0,19	0,26	-0,10	0,69	0,15	0,20	-0,03	0,67	0,22	0,24	-0,11	0,69	1,08	0,96	-0,25	0,95
8ª (400 Hz)	0,45	0,59	-0,04	0,90	0,31	0,40	-0,20	0,94	0,45	0,57	-0,03	0,90	0,31	0,41	-0,20	0,94	4,19	0,57	-0,27	0,52
9ª (450 Hz)	1,93	0,99	-0,45	1,56	1,53	0,40	-0,17	1,85	1,93	1,00	-0,38	1,57	1,49	0,37	-0,21	1,84	-1,49	-3,81	0,06	-0,09
10ª (500 Hz)	1,16	0,08	0,37	5,16	1,36	-1,72	2,35	5,07	1,13	0,11	0,45	5,04	1,39	-1,81	2,29	5,11	4,64	6,48	-18,82	14,18
11ª (550 Hz)	-0,91	1,94	6,34	-2,67	-0,44	1,82	6,65	-2,48	-0,64	1,79	6,59	-2,46	-0,56	1,93	6,82	-2,51	-5,49	-2,21	-7,67	-11,90
12ª (600 Hz)	1,66	1,25	3,07	-1,76	1,60	1,21	2,99	-1,85	1,62	1,24	3,09	-1,76	1,58	1,21	2,99	-1,86	-1,75	2,15	0,02	-0,87
13ª (650 Hz)	2,45	0,67	2,08	-1,53	2,45	0,66	2,10	-1,52	2,45	0,67	2,10	-1,52	2,47	0,67	2,10	-1,52	2,71	1,45	2,32	-0,82
14ª (700 Hz)	2,66	0,14	2,04	-1,44	2,66	0,15	2,06	-1,44	2,66	0,14	2,05	-1,44	2,66	0,15	2,06	-1,44	3,58	0,56	2,62	-1,24
15ª (750 Hz)	2,54	-0,20	2,26	-1,56	2,51	-0,19	2,28	-1,57	2,54	-0,20	2,27	-1,56	2,51	-0,19	2,28	-1,57	3,15	-0,60	2,36	-1,78

Fonte: Autoria própria.

## B.4 PAC 04

Por fim, para o PAC 04, a Tabela 54 inclui as impedâncias do sistema supridor obtidas em cada um dos métodos simulados e os dados informados no artigo, enquanto a Tabela 55 apresenta os resultados para as impedâncias do consumidor. Na sequência, a Tabela 56 expõe as discrepâncias entre os resultados dos métodos aplicados no sistema implementado no *Simulink* e aqueles do artigo.

Tabela 54 – Resultados dos métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no *Benchmark IEEE-HCD* – PAC 04: Impedâncias Supridor.

PAC 04 – Impedâncias do Sistema supridor												
Ordem Harmônica	Dados Artigo		Método A		Método B		Método C		Método D		Método E	
	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]	Zs [ $\Omega$ ]	$\theta_s$ [ $^\circ$ ]
1ª (50 Hz)	0,01	87,61	0,01	87,67	0,01	87,66	0,01	87,66	0,01	87,67	0,01	85,93
2ª (100 Hz)	0,02	-89,00	0,02	88,28	0,02	88,49	0,02	88,28	0,02	88,49	0,02	94,04
3ª (150 Hz)	0,04	89,98	0,04	88,68	0,04	88,55	0,04	88,68	0,04	88,55	0,04	88,67
4ª (200 Hz)	0,05	88,78	0,05	88,46	0,05	88,54	0,05	88,47	0,05	88,55	0,05	86,47
5ª (250 Hz)	0,06	89,22	0,06	88,16	0,06	88,14	0,06	88,20	0,06	88,22	0,06	90,29
6ª (300 Hz)	0,07	88,41	0,07	87,56	0,07	87,59	0,07	87,55	0,07	87,60	0,07	87,34
7ª (350 Hz)	0,08	85,91	0,08	86,73	0,08	86,67	0,08	86,72	0,08	86,69	0,08	86,06
8ª (400 Hz)	0,01	51,34	0,10	84,92	0,10	84,92	0,10	84,92	0,10	84,91	0,10	84,50
9ª (450 Hz)	0,10	80,35	0,11	81,74	0,11	81,68	0,11	81,74	0,11	81,70	0,10	81,39
10ª (500 Hz)	0,11	83,26	0,11	82,70	0,11	82,54	0,11	82,71	0,11	82,54	0,11	82,15
11ª (550 Hz)	0,13	84,29	0,13	85,10	0,13	85,10	0,13	85,06	0,13	85,06	0,12	84,74
12ª (600 Hz)	0,13	80,82	0,13	80,89	0,13	80,92	0,13	80,90	0,13	80,94	0,13	80,91
13ª (650 Hz)	0,13	80,39	0,13	81,22	0,13	81,19	0,13	81,23	0,13	81,16	0,13	80,57
14ª (700 Hz)	0,14	83,88	0,14	83,90	0,14	83,86	0,14	83,89	0,14	83,88	0,14	83,23
15ª (750 Hz)	0,15	86,19	0,15	86,09	0,15	86,04	0,15	86,09	0,15	86,03	0,15	85,57

Fonte: Autoria própria.

Tabela 55 – Resultados dos métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no *Benchmark IEEE-HCD* – PAC 04: Impedâncias Consumidor.

<b>PAC 04 - Impedâncias do Consumidor</b>												
<b>Ordem Harmônica</b>	<b>Dados Artigo</b>		<b>Método A</b>		<b>Método B</b>		<b>Método C</b>		<b>Método D</b>		<b>Método E</b>	
	<b>Zs [<math>\Omega</math>]</b>	<b><math>\theta_s</math> [<math>^\circ</math>]</b>	<b>Zs [<math>\Omega</math>]</b>	<b><math>\theta_s</math> [<math>^\circ</math>]</b>	<b>Zs [<math>\Omega</math>]</b>	<b><math>\theta_s</math> [<math>^\circ</math>]</b>	<b>Zs [<math>\Omega</math>]</b>	<b><math>\theta_s</math> [<math>^\circ</math>]</b>	<b>Zs [<math>\Omega</math>]</b>	<b><math>\theta_s</math> [<math>^\circ</math>]</b>	<b>Zs [<math>\Omega</math>]</b>	<b><math>\theta_s</math> [<math>^\circ</math>]</b>
<b>1ª (50 Hz)</b>	0,45	-9,04	0,47	0,34	0,47	-0,59	0,47	-0,67	0,47	-1,60	0,47	-1,18
<b>2ª (100 Hz)</b>	0,38	-28,61	0,47	-41,80	0,41	-33,70	0,47	-41,94	0,41	-33,77	0,36	-28,92
<b>3ª (150 Hz)</b>	0,25	-56,31	0,26	-60,54	0,25	-59,52	0,26	-60,50	0,25	-59,28	0,19	-72,64
<b>4ª (200 Hz)</b>	0,07	-74,05	0,07	-78,84	0,07	-78,79	0,07	-78,82	0,07	-78,76	0,07	-41,59
<b>5ª (250 Hz)</b>	0,06	80,54	0,06	79,80	0,06	80,32	0,06	79,60	0,06	79,96	0,04	66,24
<b>6ª (300 Hz)</b>	0,15	74,05	0,15	73,33	0,15	74,59	0,15	73,31	0,15	74,53	0,16	78,87
<b>7ª (350 Hz)</b>	0,20	69,78	0,21	70,57	0,21	70,67	0,21	70,66	0,21	70,20	0,23	71,36
<b>8ª (400 Hz)</b>	0,25	68,63	0,25	70,37	0,25	68,74	0,25	70,37	0,25	69,12	0,27	66,84
<b>9ª (450 Hz)</b>	0,28	67,07	0,28	68,69	0,29	67,62	0,28	68,70	0,29	67,28	0,32	67,08
<b>10ª (500 Hz)</b>	0,31	69,23	0,31	67,38	0,32	67,47	0,31	67,39	0,32	67,34	0,35	68,35
<b>11ª (550 Hz)</b>	0,34	67,25	0,35	66,44	0,34	67,64	0,35	66,53	0,35	67,62	0,37	69,36
<b>12ª (600 Hz)</b>	0,36	69,08	0,38	67,54	0,37	67,89	0,38	67,54	0,37	67,87	0,40	70,17
<b>13ª (650 Hz)</b>	0,40	69,27	0,40	68,83	0,39	68,45	0,40	68,81	0,40	68,83	0,44	70,83
<b>14ª (700 Hz)</b>	0,41	70,25	0,42	69,28	0,42	69,01	0,42	69,27	0,42	68,68	0,49	70,56
<b>15ª (750 Hz)</b>	0,45	70,35	0,43	69,68	0,44	69,67	0,43	69,66	0,44	69,84	0,53	70,26

Fonte: Autoria própria.



Tabela 56 – Discrepâncias entre os métodos para obtenção das impedâncias harmônicas aplicados no *Benchmark IEEE-HCD* e os dados do artigo – PAC 04.**PAC 04 - Impedâncias: Discrepâncias dos métodos aplicados com relação aos dados do artigo**

Ordem Harmônica	Método A				Método B				Método C				Método D				Método E			
	Z		Z		Z		Z		Z		Z		Z		Z		Z			
	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor	Supridor	Consumidor		
	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]	Z [%]	$\theta$ [°]
1ª (50 Hz)	0,00	0,06	4,44	9,38	0,00	0,05	4,44	8,45	0,00	0,05	4,44	8,37	0,00	0,06	4,44	7,44	0,00	-1,68	4,44	7,86
2ª (100 Hz)	0,00	177,28	23,68	-13,19	0,00	177,49	7,89	-5,09	0,00	177,28	23,68	-13,33	0,00	177,49	7,89	-5,16	0,00	183,04	-5,26	-0,31
3ª (150 Hz)	0,00	-1,30	4,00	-4,23	0,00	-1,43	0,00	-3,21	0,00	-1,30	4,00	-4,19	0,00	-1,43	0,00	-2,97	0,00	-1,31	-24,00	-16,33
4ª (200 Hz)	0,00	-0,32	0,00	-4,79	0,00	-0,24	0,00	-4,74	0,00	-0,31	0,00	-4,77	0,00	-0,23	0,00	-4,71	0,00	-2,31	0,00	32,46
5ª (250 Hz)	0,00	-1,06	0,00	-0,74	0,00	-1,08	0,00	-0,22	0,00	-1,02	0,00	-0,94	0,00	-1,00	0,00	-0,58	0,00	1,07	-33,33	-14,30
6ª (300 Hz)	0,00	-0,85	0,00	-0,72	0,00	-0,82	0,00	0,54	0,00	-0,86	0,00	-0,74	0,00	-0,81	0,00	0,48	0,00	-1,07	6,67	4,82
7ª (350 Hz)	0,00	0,82	5,00	0,79	0,00	0,76	5,00	0,89	0,00	0,81	5,00	0,88	0,00	0,78	5,00	0,42	0,00	0,15	15,00	1,58
8ª (400 Hz)	900,00	33,58	0,00	1,74	900,00	33,58	0,00	0,11	900,00	33,58	0,00	1,74	900,00	33,57	0,00	0,49	900,00	33,16	8,00	-1,79
9ª (450 Hz)	10,00	1,39	0,00	1,62	10,00	1,33	3,57	0,55	10,00	1,39	0,00	1,63	10,00	1,35	3,57	0,21	0,00	1,04	14,29	0,01
10ª (500 Hz)	0,00	-0,56	0,00	-1,85	0,00	-0,72	3,23	-1,76	0,00	-0,55	0,00	-1,84	0,00	-0,72	3,23	-1,89	0,00	-1,11	12,90	-0,88
11ª (550 Hz)	0,00	0,81	2,94	-0,81	0,00	0,81	0,00	0,39	0,00	0,77	2,94	-0,72	0,00	0,77	2,94	0,37	-7,69	0,45	8,82	2,11
12ª (600 Hz)	0,00	0,07	5,56	-1,54	0,00	0,10	2,78	-1,19	0,00	0,08	5,56	-1,54	0,00	0,12	2,78	-1,21	0,00	0,09	11,11	1,09
13ª (650 Hz)	0,00	0,83	0,00	-0,44	0,00	0,80	-2,50	-0,82	0,00	0,84	0,00	-0,46	0,00	0,77	0,00	-0,44	0,00	0,18	10,00	1,56
14ª (700 Hz)	0,00	0,02	2,44	-0,97	0,00	-0,02	2,44	-1,24	0,00	0,01	2,44	-0,98	0,00	0,00	2,44	-1,57	0,00	-0,65	19,51	0,31
15ª (750 Hz)	0,00	-0,10	-4,44	-0,67	0,00	-0,15	-2,22	-0,68	0,00	-0,10	-4,44	-0,69	0,00	-0,16	-2,22	-0,51	0,00	-0,62	17,78	-0,09

Fonte: Autoria própria.

---

# ANEXO A

---

## A. APRESENTAÇÃO DAS METODOLOGIAS PARA DETERMINAÇÃO DAS RESPONSABILIDADES SOBRE DISTORÇÕES HARMÔNICAS

---

Este anexo objetiva introduzir cada uma das metodologias que são avaliadas por meio da utilização do *Benchmark IEEE-HCD*. Para tanto, nas seções seguintes são apresentados os fundamentos físicos e matemáticos de tais metodologias, que são aqui nominalmente citadas:

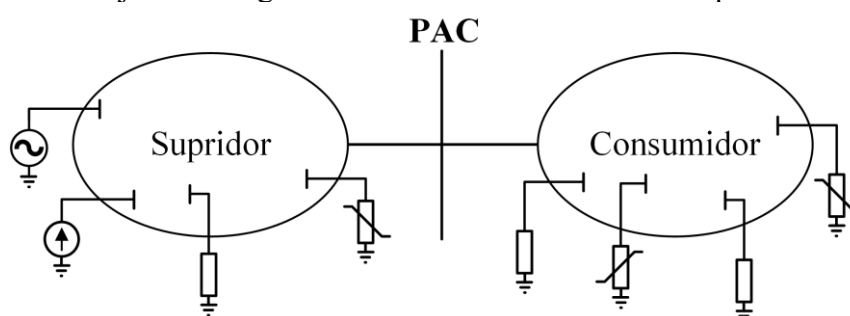
- Método da Superposição;
- Método da Impedância Dominante;
- Método do Chaveamento de Capacitores;
- Método da Injeção de Corrente Harmônica.

## A.1 Método da Superposição

O Método da Superposição, proposto no início dos anos 2000, objetiva determinar as contribuições harmônicas da concessionária e do consumidor, em um dado barramento do sistema elétrico [45],[46]. Esta metodologia é amplamente aceita, pois fundamenta-se nos conceitos de análise de circuitos elétricos e no teorema da superposição para determinação das responsabilidades harmônicas, fornecendo, portanto, resultados muito bem fundamentados.

O embasamento teórico do procedimento abrange a determinação das responsabilidades de tensões e correntes harmônicas entre duas partes conectadas a um ponto de acoplamento comum (PAC), quais sejam, a rede elétrica e um acessante. Tal acessante pode ser uma carga consumidora ou uma unidade geradora a partir de fontes renováveis ou outro. De forma a padronizar a nomenclatura, as partes constituintes do sistema serão aqui chamadas de supridor e consumidor. A Figura 47 exibe o PAC entre o sistema equivalente da concessionária (supridor) e um determinado consumidor, na forma de um arranjo elétrico genérico.

Figura 47 – Arranjo elétrico genérico de um PAC conectando supridor e consumidor.

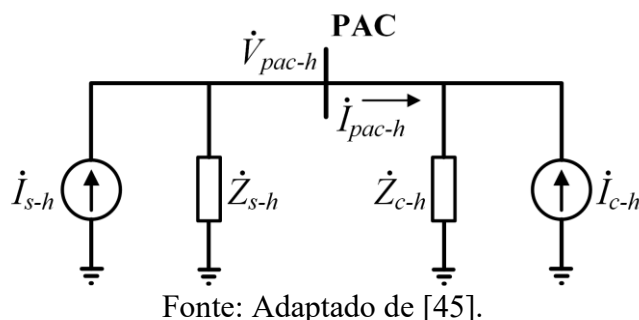


Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Figura 47, é adequado considerar que a rede elétrica possui tensão pré-distorcida, pois existe uma diversidade de cargas e equipamentos causadores de distorções conectados a ela. Ainda, considera-se que a unidade consumidora em destaque é constituída por cargas e equipamentos lineares e não lineares. Portanto, é evidente que as distorções harmônicas verificadas no PAC são provenientes da contribuição de ambas as partes.

Na Figura 48, exibe-se o circuito equivalente de Norton, para uma determinada ordem harmônica  $h$ , do arranjo mostrado na Figura 47.

Figura 48 – Circuito equivalente de Norton de um PAC entre supridor e consumidor, para uma dada ordem harmônica  $h$ .



A corrente  $\dot{I}_{s-h}$  representa as distorções harmônicas originadas do circuito equivalente do supridor, enquanto  $\dot{I}_{c-h}$  é a corrente indicativa das distorções advindas do circuito do consumidor. Ainda,  $\dot{Z}_{s-h}$  e  $\dot{Z}_{c-h}$  são as impedâncias harmônicas dos circuitos do supridor e do consumidor, respectivamente. A representação pelo circuito equivalente de Norton esclarece o fato da corrente ( $\dot{I}_{pac-h}$ ) e a tensão ( $\dot{V}_{pac-h}$ ), presentes no PAC, serem decorrentes da superposição dos efeitos das fontes de corrente representativas das distorções advindas das partes ( $\dot{I}_{s-h}$  e  $\dot{I}_{c-h}$ ).

A partir do circuito equivalente de Norton da Figura 48, obtém-se as equações (26) e (27). Tais equações determinam as correntes harmônicas geradas por cada uma das fontes de corrente representativas das cargas não lineares presentes nas instalações do supridor e consumidor, nesta ordem.

$$\dot{I}_{s-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{s-h}} + \dot{I}_{pac-h} \quad (26)$$

$$\dot{I}_{c-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{c-h}} - \dot{I}_{pac-h} \quad (27)$$

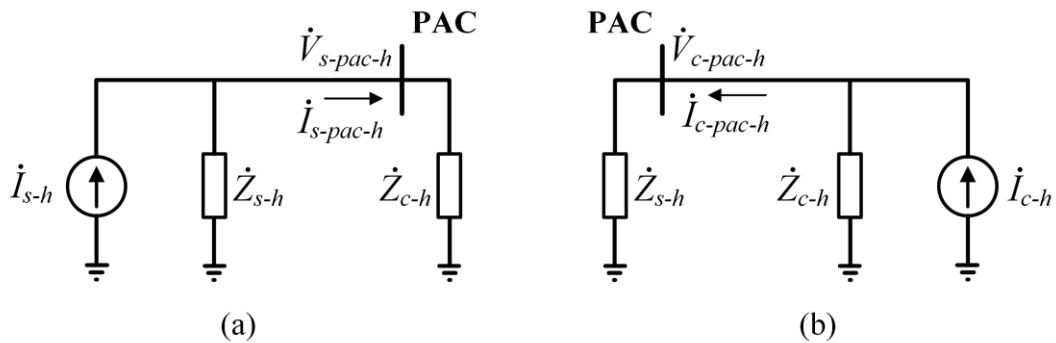
Por intermédio do clássico teorema da superposição de efeitos para a solução de circuitos [69], é possível calcular as contribuições individuais de cada uma das partes na corrente e na tensão total observadas no PAC, para uma ordem harmônica  $h$ .

Neste ponto, é importante destacar que o teorema da superposição é aplicável somente a circuitos com características lineares. No entanto, o mesmo ainda pode ser aplicado na temática do compartilhamento de responsabilidades harmônicas, apesar da sua natureza não linear, desde que separadamente considerado para cada ordem harmônica. Isso ocorre pois os

circuitos representativos de cada frequência envolvida são lineares, conforme já ilustrado na Figura 48.

Assim, as contribuições do supridor e consumidor, para a corrente total ( $\dot{I}_{pac-h}$ ) e tensão total ( $\dot{V}_{pac-h}$ ) no PAC, são apresentadas nos circuitos equivalentes da Figura 49(a) e Figura 49(b), respectivamente.

Figura 49 – Circuitos equivalentes de Norton, para uma ordem  $h$ , considerando (a) a contribuição do supridor e (b) a contribuição do consumidor, para a tensão e corrente no PAC.



Fonte: Adaptado de [45].

$\dot{I}_{s-pac-h}$  representa a contribuição de corrente harmônica de ordem  $h$  do supridor para a corrente total no PAC e  $\dot{I}_{c-pac-h}$  representa a contribuição do consumidor para a corrente total no PAC. Ainda,  $\dot{V}_{s-pac-h}$  e  $\dot{V}_{c-pac-h}$  são, nesta ordem, a contribuição de tensão harmônica de ordem  $h$  do supridor e do consumidor para a tensão total no PAC.

Aplicando, mais uma vez, os princípios de análise de circuitos elétricos, pode-se determinar as contribuições tanto para as correntes quanto para as tensões harmônicas no PAC, conforme abordado a seguir.

### A.1.1 Método da Superposição de Correntes

As contribuições de cada parte para a corrente total no PAC são determinadas a partir da análise dos circuitos apresentados na Figura 49, e compreendem as equações (28) e (29).

$$\dot{I}_{s-pac-h} = \left( \frac{\dot{Z}_{s-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{c-h}} \right) \cdot \dot{I}_{s-h} \quad (28)$$

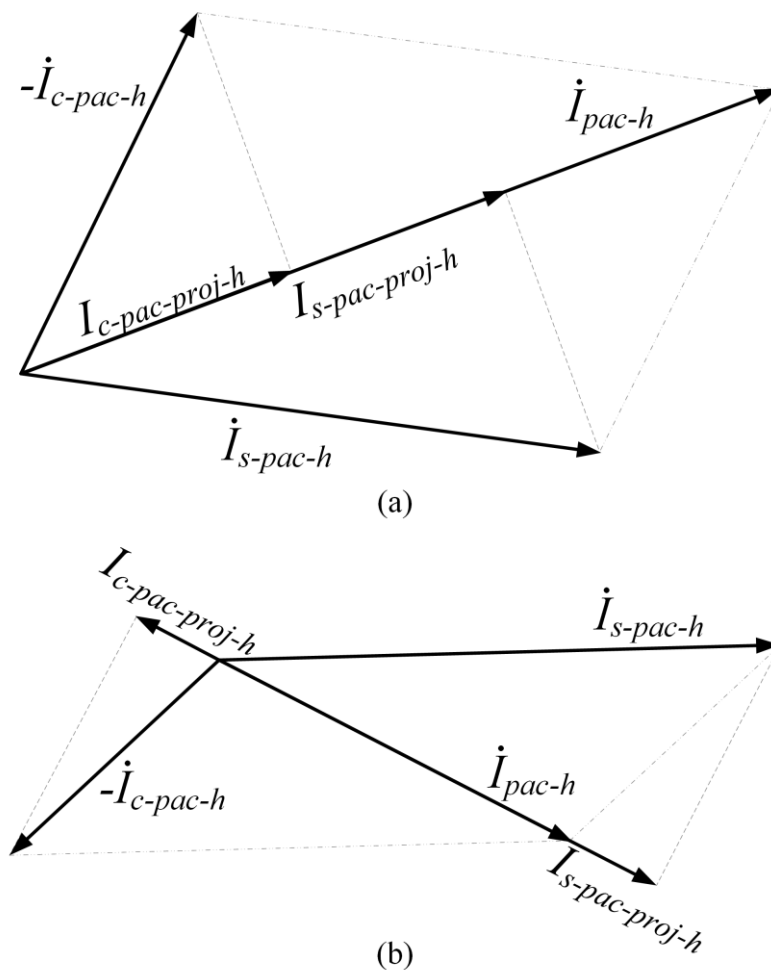
$$\dot{i}_{c-pac-h} = \left( \frac{\dot{Z}_{c-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{c-h}} \right) \cdot \dot{i}_{c-h} \quad (29)$$

Conseqüentemente, a corrente total no PAC é obtida pela superposição dessas componentes, sendo:

$$\dot{i}_{pac-h} = \dot{i}_{s-pac-h} + (-\dot{i}_{c-pac-h}) \quad (30)$$

Assim posto, o Método da Superposição de Correntes [45],[46] define que o compartilhamento de responsabilidades entre as partes deve ser feito por meio da avaliação das projeções dos fasores individuais de contribuição  $\dot{i}_{s-pac-h}$  e  $-\dot{i}_{c-pac-h}$  sobre o fasor da corrente total  $\dot{i}_{pac-h}$ , conforme demonstrado na Figura 50.

Figura 50 – Decomposição da corrente no PAC em dois escalares obtidos das projeções das contribuições do supridor e consumidor na (a) situação em que as projeções possuem o mesmo sentido e na (b) situação em que apresentam sentidos contrários.



Fonte: Adaptado de [45].

Na Figura 50,  $I_{s-pac-proj-h}$  e  $I_{c-pac-proj-h}$  são, respectivamente, as projeções de  $\dot{I}_{s-pac-h}$  e  $-\dot{I}_{c-pac-h}$  sobre  $\dot{I}_{pac-h}$ . Observa-se que existem duas situações possíveis: as projeções dos fasores individuais de contribuição do supridor e do consumidor apresentarem o mesmo sentido e, portanto, se somarem (Figura 50(a)), ou se subtraírem, por possuírem sentidos opostos (Figura 50(b)). Isto significa que quando as projeções possuem o mesmo sinal, elas se somam para formar  $\dot{I}_{pac-h}$ , entretanto, caso apresentem sinais contrários, a projeção negativa possui o efeito de reduzir a corrente total no PAC.

Entretanto, mesmo que as projeções negativas atuem no sentido de diminuir a corrente total no PAC, os seus efeitos também devem ser considerados no cálculo do compartilhamento de responsabilidades.

Em geral, as contribuições das partes envolvidas são representadas em termos percentuais, de maneira que os percentuais de responsabilidade atribuídos a cada parte sejam proporcionais às magnitudes das projeções anteriormente calculadas. Dessa forma, dada a problemática das projeções positivas e negativas, utiliza os módulos das projeções no cálculo dos percentuais de responsabilidades, de forma que, a totalidade, 100%, passa a ser a soma absoluta das projeções ( $|I_{s-pac-proj-h}| + |I_{c-pac-proj-h}|$ ) ao invés da soma algébrica ( $\dot{I}_{pac-h}$ ). Assim, os percentuais de responsabilidade sobre as correntes harmônicas do supridor e do consumidor são calculados a partir das equações (31) e (32), nesta ordem.

$$\%I_{pac-supridor-h} = \left( \frac{|I_{s-pac-proj-h}|}{|I_{s-pac-proj-h}| + |I_{c-pac-proj-h}|} \right) \cdot 100\% \quad (31)$$

$$\%I_{pac-consumidor-h} = \left( \frac{|I_{c-pac-proj-h}|}{|I_{s-pac-proj-h}| + |I_{c-pac-proj-h}|} \right) \cdot 100\% \quad (32)$$

### A.1.2 Método da Superposição de Tensões

As contribuições advindas do supridor e do consumidor para a tensão harmônica total no PAC são determinadas pelas equações (33) e (34), respectivamente.

$$\dot{V}_{s-pac-h} = \frac{\dot{Z}_{s-h} \cdot \dot{Z}_{c-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{c-h}} \cdot \dot{I}_{s-h} \quad (33)$$

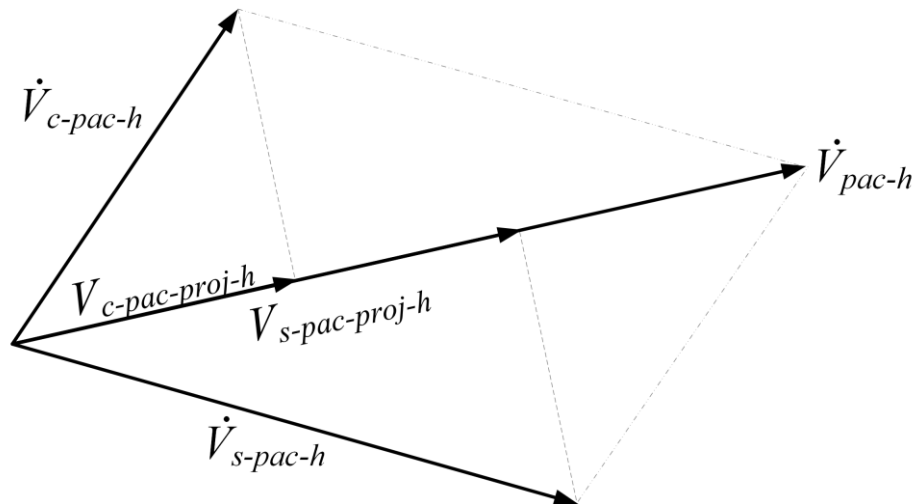
$$\dot{V}_{c-pac-h} = \frac{\dot{Z}_{s-h} \cdot \dot{Z}_{c-h}}{\dot{Z}_{s-h} + \dot{Z}_{c-h}} \cdot \dot{i}_{c-h} \quad (34)$$

A tensão harmônica no PAC é, portanto:

$$\dot{V}_{pac-h} = \dot{V}_{s-pac-h} + \dot{V}_{c-pac-h} \quad (35)$$

Nestes termos, nota-se que o Método da Superposição de Tensões segue a mesma estratégia do Método de Superposição de Correntes. Portanto, o princípio para o compartilhamento de responsabilidades entre supridor e consumidor pode ser realizado pelos valores das projeções dos fasores representativos das contribuições individuais de tensão ( $\dot{V}_{s-pac-h}$  e  $\dot{V}_{c-pac-h}$ ) sobre o fasor total da tensão no PAC ( $\dot{V}_{pac-h}$ ), como mostrado na Figura 51.

Figura 51 – Decomposição da tensão no PAC em dois escalares obtidos das projeções das contribuições do supridor e consumidor.



Fonte: Adaptado de [47].

Na Figura 51,  $V_{s-pac-proj-h}$  e  $V_{c-pac-proj-h}$  são, nesta ordem, as projeções de  $\dot{V}_{s-pac-h}$  e  $\dot{V}_{c-pac-h}$  sobre  $\dot{V}_{pac-h}$ . Por simplicidade, optou-se por não mostrar na Figura 51 a situação em que as projeções possuem sentidos contrários. Seguindo o mesmo raciocínio discutido para os percentuais de corrente, os percentuais de responsabilidade sobre as tensões harmônicas do supridor e do consumidor são calculados a partir das equações (36) e (37), respectivamente.



$$\%V_{pac-supridor-h} = \left( \frac{|V_{s-pac-proj-h}|}{|V_{s-pac-proj-h}| + |V_{c-pac-proj-h}|} \right) \cdot 100\% \quad (36)$$

$$\%V_{pac-consumidor-h} = \left( \frac{|V_{c-pac-proj-h}|}{|V_{s-pac-proj-h}| + |V_{c-pac-proj-h}|} \right) \cdot 100\% \quad (37)$$

A partir das equações apresentadas para determinação das contribuições de corrente e tensão do supridor e consumidor, observa-se a necessidade de se conhecer as medições de tensões e correntes harmônicas no PAC, e os valores das impedâncias harmônicas das partes envolvidas. Então, apesar da simplicidade do método, a necessidade do conhecimento das impedâncias harmônicas se torna um ponto complexo, uma vez que, em aplicações práticas, estas informações são de difícil conhecimento e estimativa [49]-[51], principalmente quando se considera a dinâmica natural de sistemas elétricos.

## A.2 Método da Impedância Dominante

O Método da Impedância Dominante (MID) [47] objetiva a determinação das contribuições harmônicas de tensão constatadas em um dado barramento. Embora o procedimento tenha sido originalmente publicado como Método da Superposição Modificado, por questão de maior adequação ao seu princípio de funcionamento, o mesmo passou a ser nomeado como Método da Impedância Dominante em [48]. Os princípios físicos desta metodologia se baseiam nos mesmos princípios do Método da Superposição, entretanto, visa-se, por meio da conexão de uma impedância harmônica dominante no PAC, a contornar a necessidade de conhecimento das impedâncias harmônicas das partes envolvidas.

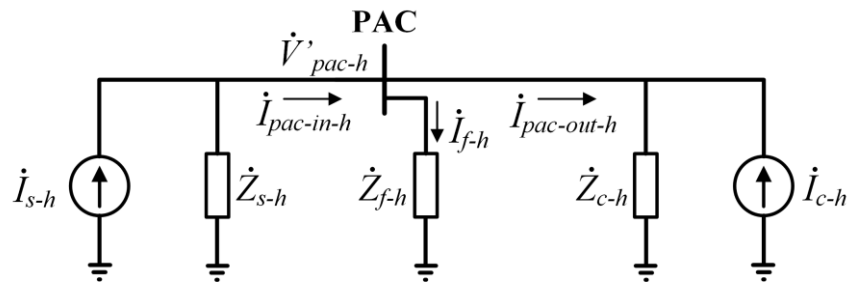
Os desenvolvimentos matemáticos deste procedimento se baseiam no princípio da superposição de tensões harmônicas, conforme determinado pelas equações (33) e (34), as quais determinam as contribuições advindas do supridor e do consumidor para a tensão harmônica total no PAC a partir do Método da Superposição.

Pode-se observar nas equações (33) e (34), que  $\dot{V}_{s-pac-h}$  e  $\dot{V}_{c-pac-h}$  são determinadas 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, conclui-se que para a obtenção das parcelas de responsabilidades do supridor e do consumidor, é suficiente o conhecimento de tais

correntes. Entretanto, percebe-se nas equações (26) e (27), que a determinação de tais correntes também depende do conhecimento prévio das impedâncias harmônicas das partes envolvidas.

Com o objetivo de identificar tais correntes sem a necessidade de se conhecer as impedâncias harmônicas das partes, este procedimento sugere a conexão de uma impedância, no PAC, com baixo valor na frequência de análise. Dado o seu baixo valor, esta impedância será dominante sobre as demais impedâncias desconhecidas presentes no arranjo elétrico ( $\dot{Z}_{s-h}$  e  $\dot{Z}_{c-h}$ ), se tornando um caminho preferencial para as harmônicas de corrente. Observa-se claramente que esta impedância de caráter dominante pode ser caracterizada como um filtro harmônico passivo sintonizado na frequência de análise. O circuito equivalente de Norton do arranjo genérico considerando a conexão de um filtro harmônico no PAC é mostrado na Figura 52.

Figura 52 – Circuito equivalente de Norton de um PAC entre supridor e consumidor, para uma dada ordem harmônica  $h$ , com a inserção de uma impedância dominante no PAC.

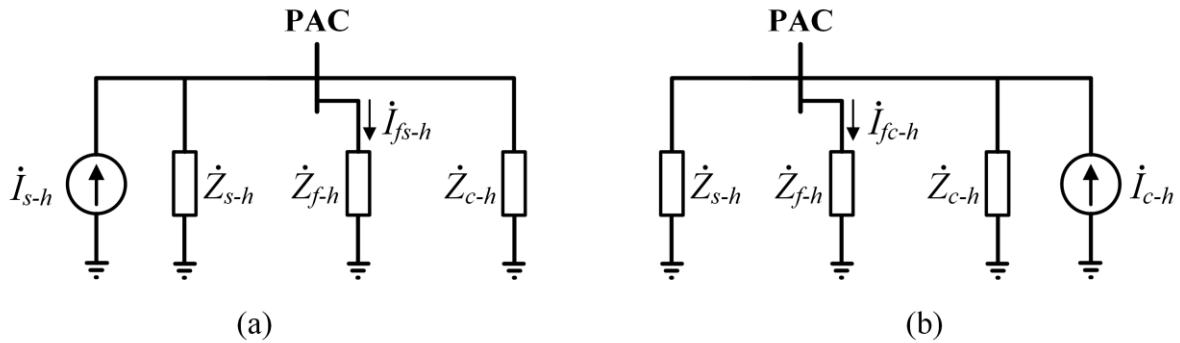


Fonte: Adaptado de [47].

Na Figura 52, para uma dada ordem  $h$ ,  $\dot{Z}_{f-h}$  representa a impedância dominante instalada no PAC, caracterizada por um filtro passivo 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, nesta ordem.

Procedendo à aplicação do teorema da superposição de efeitos ao circuito apresentado na Figura 52, chega-se aos circuitos apresentados na Figura 53(a) e na Figura 53(b).

Figura 53 – Circuito equivalente de Norton considerando (a) a contribuição do supridor e (b) a contribuição do consumidor, para a corrente que flui pela impedância dominante.



Fonte: Adaptado de [47].

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 da contribuição do supridor, e apenas do consumidor, respectivamente.

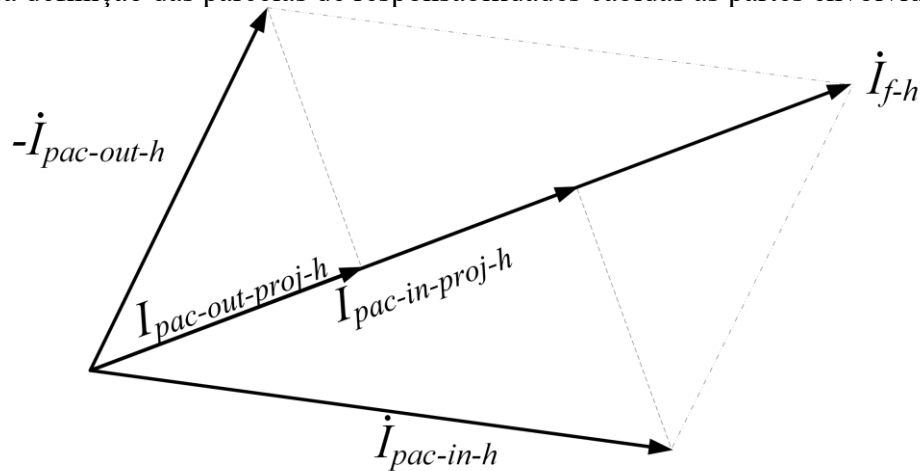
Como a impedância  $\dot{Z}_{f-h}$  apresenta valor significativamente menor comparado ao valor das impedâncias harmônicas do supridor e do consumidor, a mesma é, portanto, predominante sobre as demais. Assim sendo, considera-se que a corrente  $\dot{I}_{fs-h}$  é praticamente igual a  $\dot{I}_{s-h}$ , e que 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 (38).

$$\dot{I}_{f-h} = \dot{I}_{fs-h} + \dot{I}_{fc-h} \cong \dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h} = \dot{I}_{pac-in-h} + (-\dot{I}_{pac-out-h}) \quad (38)$$

Observando a equação (38), percebe-se que é possível mensurar as correntes representativas das fontes harmônicas das partes envolvidas 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.

Portanto, para encontrar os percentuais de responsabilidades cabidos ao supridor e ao consumidor, o método sugere que sejam feitas as projeções dos fasores  $\dot{I}_{pac-in-h}$  e  $-\dot{I}_{pac-out-h}$  sobre o fasor da corrente total de ordem  $h$  que flui pelo filtro ( $\dot{I}_{f-h}$ ). Este procedimento é ilustrado na Figura 54.

Figura 54 – Projeção de fasores sobre a corrente total que flui pela impedância dominante para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas.



Fonte: Adaptado de [47].

Na Figura 54,  $I_{pac-in-proj-h}$  indica a projeção de  $\dot{I}_{pac-in-h}$  sobre  $\dot{I}_{f-h}$ , o que resulta em um número escalar que define a parcela de responsabilidade do supridor. Já  $I_{pac-out-proj-h}$  indica a projeção de  $-\dot{I}_{pac-out-h}$  sobre  $\dot{I}_{f-h}$ , o que fornece a parcela de responsabilidade do consumidor. Seguindo a mesma lógica anteriormente apresentada para o Método da Superposição, os módulos de  $I_{pac-in-proj-h}$  e  $I_{pac-out-proj-h}$  representam as parcelas indicativas do percentual que cada parte contribui para a corrente total que flui pela impedância dominante, enquanto que a soma dos módulos das projeções é tida como sendo a totalidade, ou 100%, conforme demonstrado nas equações (39) e (40), as quais definem os percentuais de responsabilidade sobre as tensões harmônicas do supridor e do consumidor, nesta ordem.

$$\%V_{pac-supridor-h} = \left( \frac{|I_{pac-in-proj-h}|}{|I_{pac-in-proj-h}| + |I_{pac-out-proj-h}|} \right) \cdot 100\% \quad (39)$$

$$\%V_{pac-consumidor-h} = \left( \frac{|I_{pac-out-proj-h}|}{|I_{pac-in-proj-h}| + |I_{pac-out-proj-h}|} \right) \cdot 100\% \quad (40)$$

Conforme apresentado no início do desenvolvimento, destaca-se que embora o procedimento descrito empregue grandezas associadas a medição de correntes, o mesmo proporciona o compartilhamento de responsabilidades quanto aos harmônicos de tensão presentes no PAC.

### A.2.1 Considerações acerca do grau de dominância da impedância

A partir dos desenvolvimentos matemáticos do Método da Impedância Dominante, evidencia-se que o grau de dominância da impedância conectada ao PAC sobre as impedâncias harmônicas das partes envolvidas influencia diretamente no sucesso da metodologia. Como já mencionado, associa-se tal impedância dominante a um dispositivo passivo de filtragem harmônica ou, em outras palavras, a um filtro harmônico.

Investigações realizadas em [48] estabeleceram que o filtro passivo sintonizado em uma frequência deve ser a configuração adotada para aplicação do Método da Impedância Dominante. Essa justificativa ocorre, pois, dentre os arranjos avaliados – filtros amortecidos de primeira e segunda ordem e filtros sintonizados em uma e em duas frequências – a configuração de filtro passivo sintonizado em uma frequência foi a única que apresentou teor de dominância satisfatório. Dessa forma, necessita-se de um filtro passivo sintonizado em cada frequência que se deseja obter o compartilhamento de responsabilidades.

Após a definição do arranjo recomendado para aplicação da metodologia, [48] ainda analisou três características deste tipo de filtro que podem impactar no desempenho da metodologia: o fator de qualidade, a dessintonia e a multissintonia. Após avaliação metódica de tais características, percebeu-se que filtros com maior potência, maior fator de qualidade e com ausência de dessintonia ocasionaram resultados mais exatos [48].

De forma a contribuir com a definição se a aplicação de um determinado filtro apresenta, ou não, impedância suficientemente dominante sobre as demais presentes em um sistema, no qual se deseja aplicar o Método da Impedância Dominante, a referência [48] estabeleceu um indicador, chamado de parâmetro de dominância (PD), definido pela equação (41).

$$PD = \frac{DTHI_{h\_antes}}{DTHI_{h\_antes} + DTHI_{h\_após}} \quad (41)$$

Na equação (41),  $DTHI_{h\_antes}$  corresponde à distorção individual de tensão de ordem  $h$ , no PAC, antes da inserção do filtro, enquanto que  $DTHI_{h\_após}$  corresponde à distorção individual de tensão de ordem  $h$ , no PAC, após a inserção do filtro.

Uma vez que tal parâmetro depende simplesmente do conhecimento dos valores de tensões harmônicas observadas no PAC antes e após a conexão dos filtros, a determinação do PD é evidentemente factível em termos práticos.

Os resultados obtidos para o compartilhamento de responsabilidades melhoram quanto mais próximo PD for da unidade. Essa afirmação pode ser verificada no caso hipotético em que a conexão do filtro origina tensão harmônica nula no barramento ( $DTHI_{h\_após} = 0$ ). Neste caso, tem-se a situação de máxima dominância possível do arranjo, e PD apresenta o seu máximo valor admissível: 1.

A partir de extensas análises realizadas em [48], estabeleceu-se que impedâncias dominantes capazes de proporcionar PDs maiores que 0,9 asseguram boa exatidão nos resultados dos percentuais de responsabilidade a partir da aplicação do Método da Impedância Dominante.

O Método da Impedância Dominante é considerado invasivo pois a conexão do filtro passivo modifica as características do sistema elétrico sob análise. Dessa forma, sugere-se, se possível for, que sejam utilizados filtros harmônicos com pequena potência em relação à ordem de grandeza do complexo como um todo.

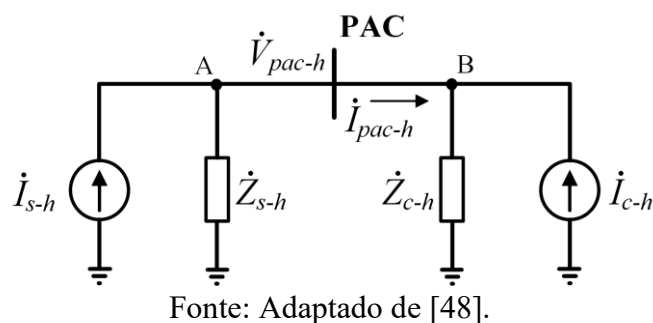
### **A.3 Método do Chaveamento de Capacitores**

Os princípios teóricos do Método do Chaveamento de Capacitores (MCC) [48],[52] compreendem a análise do sistema elétrico de interesse em duas distintas situações operativas, as quais se distinguem exclusivamente pela conexão de unidades capacitivas no PAC onde se pretende obter o compartilhamento de responsabilidades harmônicas. A proposta fundamenta-se na união entre consistência física e facilidade de aplicação em campo [48]. Dessa forma, o procedimento determina os percentuais das contribuições harmônicas das partes envolvidas no processo de compartilhamento sem a necessidade de conhecer, ou estimar, as impedâncias harmônicas. Este objetivo é alcançado a partir de medições de tensões e correntes harmônicas no PAC, antes e após o chaveamento de capacitores.

Apesar da particularização da utilização de unidades capacitivas, é destacado em [48] que sob o ponto de vista teórico, o chaveamento de qualquer outro componente passivo e linear – resistor ou reator – seria capaz de oferecer os recursos físicos necessários à aplicação do processo. A utilização de capacitores se justifica por tais componente serem encontrados frequentemente em instalações elétricas reais. Outra vantagem se encontra no fato de bancos de capacitores serem, geralmente, manobrados em pequenas quantidades – estágios. Isso é importante pois uma variação mínima nas tensões e correntes do barramento analisado, ocasionada pelo chaveamento de um estágio capacitivo, já é suficiente para a determinação das responsabilidades harmônicas.

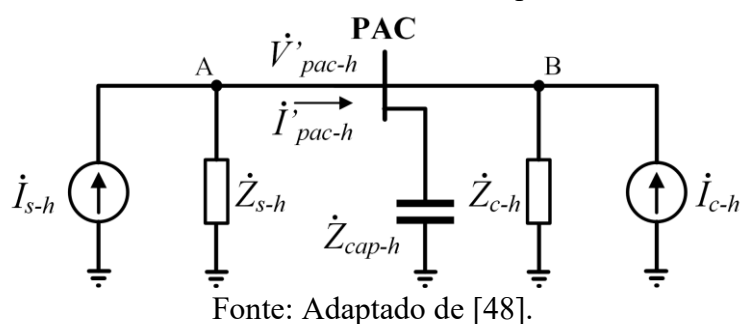
Os desenvolvimentos relacionados à fundamentação física do Método do Chaveamento de Capacitores também utilizam os mesmos princípios empregados na apresentação do Método da Superposição. A Figura 55 relembra o circuito equivalente de Norton.

Figura 55 – Circuito equivalente de Norton de um PAC entre supridor e consumidor, para uma dada ordem harmônica  $h$  – condição 1.



Na Figura 56, por sua vez, considera-se a conexão de um banco de capacitores ao PAC de modo que  $\dot{Z}_{cap-h}$  indica a impedância capacitiva conectada para uma dada ordem  $h$ , enquanto  $\dot{V}'_{pac-h}$  e  $\dot{I}'_{pac-h}$  representam, respectivamente, a tensão e a corrente harmônicas no PAC nesta nova condição.

Figura 56 – Circuito equivalente de Norton de um PAC entre supridor e consumidor, para uma dada ordem harmônica  $h$ , com a conexão do capacitor no PAC – condição 2.



Para aplicação da Metodologia do Chaveamento de Capacitores, considera-se que a Figura 55 representa a primeira condição de operação, sem capacitores, enquanto que a Figura 56 indica a segunda condição operativa, após conexão do banco de capacitores ao PAC. Ressalta-se que a metodologia considera, em sua formulação, 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.

Além disso, destaca-se que não é impositivo que em uma das condições operativas não exista um capacitor conectado ao PAC e que na outra exista. Se faz necessário, unicamente, a

existência de uma diferença conhecida entre os valores de impedâncias capacitivas conectadas ao PAC nas duas condições de operação.

Relembrando as equações (33) e (34) do Método da Superposição para determinação das contribuições de tensão harmônica no PAC, percebe-se que o conhecimento de  $\dot{I}_{s-h}$  e  $\dot{I}_{c-h}$  é condição suficiente para a obtenção das parcelas de responsabilidades do supridor ( $\dot{V}_{s-pac-h}$ ) e do consumidor ( $\dot{V}_{c-pac-h}$ ), respectivamente.

Então, o Método do Chaveamento de Capacitores objetiva determinar as correntes  $\dot{I}_{s-h}$  e  $\dot{I}_{c-h}$  a partir de grandezas conhecidas ou facilmente mensuradas na prática. Para tanto, os desenvolvimentos necessários para se alcançar esse objetivo são descritos na sequência.

Analisando os circuitos mostrados na Figura 55 e na Figura 56, e aplicando da Lei de Kirchoff das correntes aos pontos nomeados como A nas referidas figuras, chega-se às equações (42) e (43), respectivamente.

$$\dot{I}_{s-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{s-h}} + \dot{I}_{pac-h} \quad (42)$$

$$\dot{I}_{s-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{\dot{Z}_{s-h}} + \dot{I}'_{pac-h} \quad (43)$$

Observa-se que em (43) é possível isolar a grandeza  $\dot{Z}_{s-h}$ , obtendo-se (44).

$$\dot{Z}_{s-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{(\dot{I}_{s-h} - \dot{I}'_{pac-h})} \quad (44)$$

Sendo a corrente  $\dot{I}_{s-h}$ , conforme já estabelecido, a mesma nas duas condições operativas, é possível substituir (44) em (42) e realizar os desenvolvimentos matemáticos para isolar a grandeza  $\dot{I}_{s-h}$ :

$$\dot{I}_{s-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h} \cdot \dot{I}_{pac-h} - \dot{V}_{pac-h} \cdot \dot{I}'_{pac-h}}{\dot{V}'_{pac-h} - \dot{V}_{pac-h}} \quad (45)$$

Seguindo a mesma linha de raciocínio, mas analisando o ponto referenciado como B na Figura 55 e na Figura 56, respectivamente, é possível encontrar as equações (46) e (47).



$$\dot{i}_{c-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{Z}_{c-h}} - \dot{i}_{pac-h} \quad (46)$$

$$\dot{i}_{c-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{\dot{Z}_{c-h}} + \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{\dot{Z}_{cap-h}} - \dot{i}'_{pac-h} \quad (47)$$

Isolando a impedância  $\dot{Z}_{c-h}$  na equação (47), obtém-se a equação (48).

$$\dot{Z}_{c-h} = \frac{\dot{Z}_{cap-h} \cdot \dot{V}'_{pac-h}}{\dot{Z}_{cap-h} \cdot (\dot{i}_{c-h} + \dot{i}'_{pac-h}) - \dot{V}'_{pac-h}} \quad (48)$$

Da mesma forma, como  $\dot{i}_{c-h}$  não sofre alterações entre as duas condições operativas, é possível substituir (48) em (46) e realizar os desenvolvimentos matemáticos para obter a equação para o cálculo de  $\dot{i}_{c-h}$ :

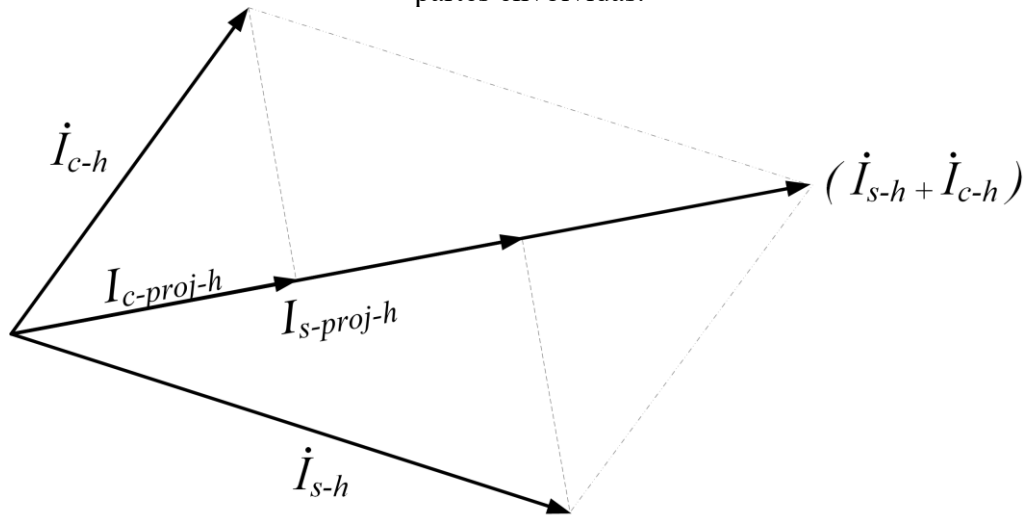
$$\dot{i}_{c-h} = \frac{\dot{Z}_{cap-h} \cdot (\dot{V}_{pac-h} \cdot \dot{i}'_{pac-h} - \dot{V}'_{pac-h} \cdot \dot{i}_{pac-h}) - (\dot{V}_{pac-h} \cdot \dot{V}'_{pac-h})}{\dot{Z}_{cap-h} \cdot (\dot{V}'_{pac-h} - \dot{V}_{pac-h})} \quad (49)$$

Percebe-se que as equações (45) e (49) permitem determinar as grandezas  $\dot{I}_{s-h}$  e  $\dot{I}_{c-h}$  a partir de informações facilmente obtidas em situações práticas. Isto é, basta 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.

Portanto, a partir das formulações desenvolvidas, para encontrar os percentuais de responsabilidades sobre tensões cabidos ao supridor e ao consumidor em uma dada ordem harmônica  $h$ , o método sugere que seja feita a projeção dos fasores  $\dot{I}_{s-h}$  e  $\dot{I}_{c-h}$  sobre o fasor da soma total das correntes harmônicas oriundas do supridor e do consumidor ( $\dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h}$ ). Estas projeções resultam em números escalares que quantificam a responsabilidade do supridor e do consumidor, respectivamente, sobre as distorções totais no PAC.

Esse processo é mostrado na Figura 57, onde percebe-se 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 57 – Projeção de fasores para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas.



Fonte: Adaptado de [48].

Por fim, as equações (50) e (51) definem os percentuais de responsabilidade sobre as tensões harmônicas do supridor e do consumidor, nesta ordem.

$$\%V_{pac-supridor-h} = \left( \frac{|I_{s-proj-h}|}{|I_{s-proj-h}| + |I_{c-proj-h}|} \right) \cdot 100\% \quad (50)$$

$$\%V_{pac-consumidor-h} = \left( \frac{|I_{c-proj-h}|}{|I_{s-proj-h}| + |I_{c-proj-h}|} \right) \cdot 100\% \quad (51)$$

Da mesma maneira que no Método da Impedância Dominante, atenta-se para o fato de as projeções de  $I_{s-h}$  e  $I_{c-h}$  sobre  $(I_{s-h} + I_{c-h})$  estarem fisicamente relacionadas à contribuição sobre a tensão harmônica total presente no PAC, do sistema supridor e do consumidor, respectivamente, e não sobre a corrente total presente no PAC.

Mais uma vez, reforça-se que o chaveamento no PAC de qualquer dispositivo passivo e linear, com impedância conhecida, é suficiente para obtenção dos dados necessários para a aplicação do procedimento. Neste caso, basta substituir a impedância capacitiva  $\hat{Z}_{cap-h}$ , na equação (49), pela impedância do elemento chaveado.

O procedimento do chaveamento de capacitores é considerado invasivo, dessa forma, sugere-se que sejam realizados chaveamentos de elementos com pequena potência em relação à ordem de grandeza do complexo como um todo. Inclusive, em [52] recomenda-se que o capacitor conectado seja capaz de modificar as tensões e correntes na ordem harmônica de

interesse, mas que ao mesmo tempo não altere a tensão fundamental no PAC em mais de 5%. Em verdade, chaveamentos que ocasionam mínimas alterações no complexo elétrico, desde que percebidas pelos equipamentos de medição, já são suficientes para o sucesso da aplicação do método. Percebe-se também que a aplicação da metodologia pode ocorrer simultaneamente para vários harmônicos de interesse, uma vez que a conexão de um banco de capacitores – ou qualquer outro equipamento linear – ocasiona alteração do sistema em todas as ordens harmônicas.

#### **A.4 Método da Injeção de Corrente Harmônica**

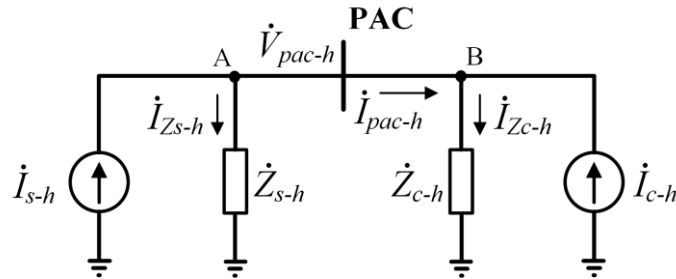
O Método da Injeção de Corrente Harmônica (MIC) [48] baseia-se na inserção de pequenas correntes harmônicas no ponto de interesse, com o intuito de se obter os percentuais de responsabilidades sobre as distorções de tensão das partes envolvidas.

Assim como no Método do Chaveamento de Capacitores, a fundamentação física desta metodologia impõe a necessidade de duas condições distintas, no tocante à injeção de correntes harmônicas no PAC. Estas condições podem compreender um primeiro caso sem nenhuma injeção e um segundo com a inserção de determinada corrente harmônica, ou ainda, dois casos que apresentem injeções de correntes diferentes entre si.

Esta metodologia também realiza o compartilhamento de responsabilidades sem a necessidade de conhecer ou estimar os valores das impedâncias harmônicas do supridor e do consumidor. Para tanto, basta o estabelecimento destas duas situações operativas e a medição de grandezas elétricas – tensão e corrente – durante estas distintas condições.

Mais uma vez, para orientar os desenvolvimentos relacionados ao método proposto, segue-se a ideia apresentada no Método da Superposição pelo circuito equivalente de Norton mostrado na Figura 48, imaginando um ponto de acoplamento comum entre um supridor e um consumidor. A configuração é adaptada e mostrada na Figura 58 para facilitar as análises subsequentes.

Figura 58 – Circuito equivalente de Norton de um PAC entre supridor e consumidor, para uma dada ordem harmônica  $h$  – condição 1.

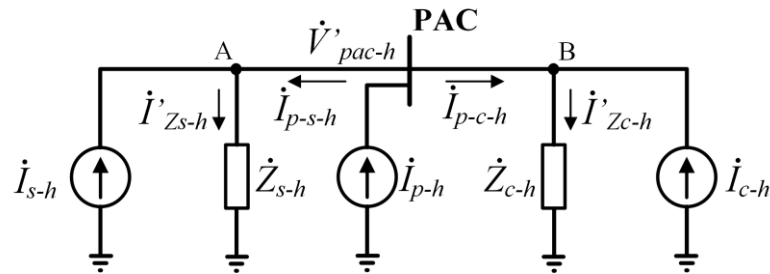


Fonte: Adaptado de [48].

Seguindo a mesma filosofia tanto do Método da Impedância Dominante, quanto do Chaveamento de Capacitores, o Método da Injeção de Corrente Harmônica também pretende determinar as correntes  $\dot{I}_{s-h}$  e  $\dot{I}_{c-h}$  a partir de grandezas possíveis de serem medidas na prática.

O circuito mostrado na Figura 58 estabelece a condição de operação 1. Além das grandezas já apresentadas neste anexo,  $\dot{I}_{Zs-h}$  e  $\dot{I}_{Zc-h}$  representam as correntes que fluem por  $\dot{Z}_{s-h}$  e  $\dot{Z}_{c-h}$ , respectivamente. Na Figura 59, por sua vez, exibe-se a condição de operação 2, a qual considera a injeção de corrente no PAC.

Figura 59 – Circuito equivalente de Norton de um PAC entre supridor e consumidor, para uma dada ordem harmônica  $h$ , com a injeção de corrente harmônica no PAC – condição 2.



Fonte: Adaptado de [48].

Nesta Figura 59, para uma dada ordem  $h$ ,  $\dot{V}'_{pac-h}$  é a tensão harmônica no PAC na condição 2,  $\dot{I}_{p-h}$  representa a corrente de perturbação injetada, sendo  $\dot{I}_{p-s-h}$  e  $\dot{I}_{p-c-h}$  as parcelas desta corrente que fluem em direção ao sistema supridor e ao consumidor, nesta ordem. Ainda, as grandezas  $\dot{I}'_{Zs-h}$  e  $\dot{I}'_{Zc-h}$  referem-se as correntes que fluem pelas impedâncias representativas do sistema supridor e do consumidor, respectivamente.

Assim como no Método do Chaveamento de Capacitores, considera-se que não ocorreram alterações nas impedâncias  $\dot{Z}_{s-h}$  e  $\dot{Z}_{c-h}$  e nas correntes  $\dot{I}_{s-h}$  e  $\dot{I}_{c-h}$ , entre as condições de operação 1 e 2. Desta forma, a inserção da corrente  $\dot{I}_{p-h}$  no PAC é o único fator que difere tais condições.

Seguindo o desenvolvimento do método, aplica-se a Lei de Kirchhoff das correntes, nos pontos referenciados como A na Figura 58 e na Figura 59, de maneira a obter as equações (52) e (53), respectivamente:

$$\dot{I}_{s-h} - \dot{I}_{Zs-h} - \dot{I}_{pac-h} = 0 \quad (52)$$

$$\dot{I}_{s-h} - \dot{I}'_{Zs-h} + \dot{I}_{p-s-h} = 0 \quad (53)$$

Seguindo a análise dos circuitos representativos das condições operativas 1 e 2, estabelece-se as relações indicadas em (54) e (55):

$$\dot{Z}_{s-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{I}_{Zs-h}} \quad (54)$$

$$\dot{Z}_{s-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{\dot{I}'_{Zs-h}} \quad (55)$$

Como a impedância  $\dot{Z}_{s-h}$  é considerada a mesma nas duas condições de operação, os segundos termos de (54) e (55) podem ser igualados. Obtém-se então a equação (56), quando isolada a grandeza  $\dot{I}'_{Zs-h}$ .

$$\dot{I}'_{Zs-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{\dot{V}_{pac-h}} \cdot \dot{I}_{Zs-h} \quad (56)$$

Agora, com o objetivo de isolar  $\dot{I}_{Zs-h}$ , basta substituir a equação (56) em (53):

$$\dot{I}_{Zs-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{V}'_{pac-h}} \cdot (\dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{p-s-h}) \quad (57)$$

Por fim, ao substituir (57) em (52) e realizar operações matemáticas para isolar  $\dot{I}_{s-h}$ , estabelece-se a equação (58).

$$\dot{I}_{s-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h} \cdot \dot{I}_{p-s-h} + \dot{V}'_{pac-h} \cdot \dot{I}_{pac-h}}{\dot{V}'_{pac-h} - \dot{V}_{pac-h}} \quad (58)$$

Na sequência, procede-se ao desenvolvimento da formulação de  $\dot{I}_{c-h}$ , todavia, analisando-se agora os pontos referenciados como B na Figura 58 e na Figura 59. Então, obtêm-se as equações (59) e (60).

$$\dot{I}_{pac-h} - \dot{I}_{Zc-h} + \dot{I}_{c-h} = 0 \quad (59)$$

$$\dot{I}_{p-c-h} - \dot{I}'_{Zc-h} + \dot{I}_{c-h} = 0 \quad (60)$$

A impedância  $\dot{Z}_{c-h}$  também é definida a partir das análises dos circuitos, conforme indicado nas equações (61) e (62).

$$\dot{Z}_{c-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{I}_{Zc-h}} \quad (61)$$

$$\dot{Z}_{c-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{\dot{I}'_{Zc-h}} \quad (62)$$

Mais uma vez, como a impedância  $\dot{Z}_{c-h}$  não varia nas duas condições operativas, iguale-se os segundos membros das equações (61) e (62) e isola-se  $\dot{I}'_{Zc-h}$ , de forma a obter a equação (63).

$$\dot{I}'_{Zc-h} = \frac{\dot{V}'_{pac-h}}{\dot{V}_{pac-h}} \cdot \dot{I}_{Zc-h} \quad (63)$$

A equação (64) é definida ao substituir-se (63) em (60), com o objetivo de se isolar a variável  $\dot{I}_{Zc-h}$ .

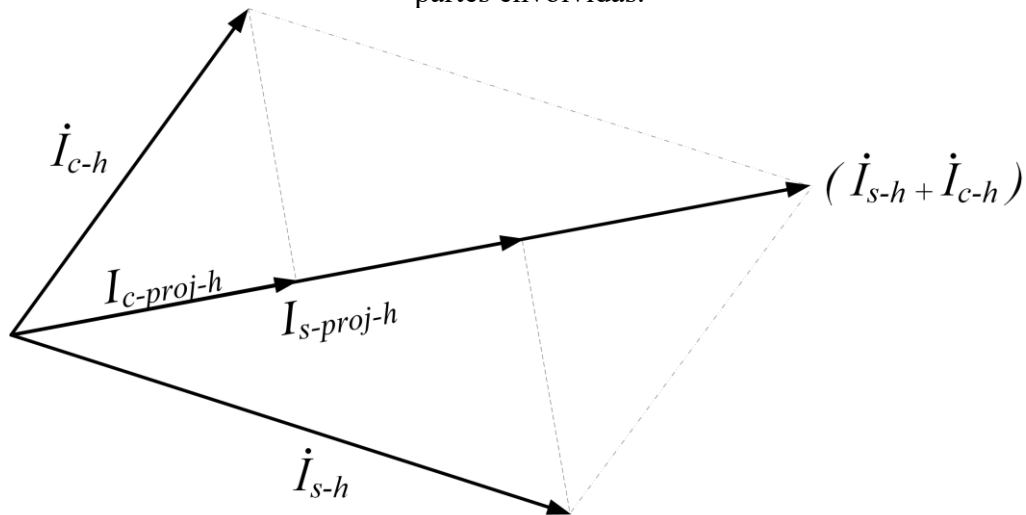
$$\dot{I}_{Zc-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{\dot{V}'_{pac-h}} \cdot (\dot{I}_{c-h} + \dot{I}_{p-c-h}) \quad (64)$$

Por fim, substituindo (64) em (59) e manuseando matematicamente a equação, pode-se estabelecer a formulação para cálculo de  $\dot{I}_{c-h}$ , como apresentado em (65).

$$\dot{i}_{c-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h} \cdot \dot{i}_{p-c-h} - \dot{V}'_{pac-h} \cdot \dot{i}_{pac-h}}{\dot{V}'_{pac-h} - \dot{V}_{pac-h}} \quad (65)$$

A partir da obtenção das grandezas  $\dot{i}_{s-h}$  e  $\dot{i}_{c-h}$  conforme as equações (58) e (65), respectivamente, esta metodologia 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  $h$  ( $\dot{i}_{s-h} + \dot{i}_{c-h}$ ). Este procedimento está ilustrado na Figura 60.

Figura 60 – Projeção de fasores para definição das parcelas de responsabilidades cabidas às partes envolvidas.



Fonte: Adaptado de [48].

O compartilhamento, mais uma vez, é baseado nas projeções de  $\dot{i}_{s-h}$  e  $\dot{i}_{c-h}$  sobre  $(\dot{i}_{s-h} + \dot{i}_{c-h})$ , o que conduz exatamente ao mesmo resultado do compartilhamento realizado pelas projeções das grandezas  $\dot{V}_{s-pac-h}$  e  $\dot{V}_{c-pac-h}$  sobre  $\dot{V}_{pac-h}$ .

Por fim, utiliza-se os módulos de  $I_{s-proj-h}$  e  $I_{c-proj-h}$  para estabelecer os percentuais que cada parte contribui para a tensão total no PAC, enquanto que a soma dos módulos das projeções é tida como sendo 100%, conforme demonstrado nas equações (66) e (67), que definem os percentuais de responsabilidade sobre as tensões harmônicas do supridor e do consumidor, respectivamente.

$$\%V_{pac-supridor-h} = \left( \frac{|I_{s-proj-h}|}{|I_{s-proj-h}| + |I_{c-proj-h}|} \right) \cdot 100\% \quad (66)$$

$$\%V_{pac-consumidor-h} = \left( \frac{|I_{c-proj-h}|}{|I_{s-proj-h}| + |I_{c-proj-h}|} \right) \cdot 100\% \quad (67)$$

O fato de ser feita uma injeção de correntes no barramento de interesse torna o procedimento invasivo, entretanto a injeção de pequenos valores de corrente harmônica visa a minimizar os impactos no sistema. Pequenos valores de corrente injetados no PAC ( $I_{p-h}$ ) já forneceram bons resultados para a metodologia em [48], onde foram considerados valores de injeção de corrente de no máximo 1% das correntes harmônicas originalmente presentes nos pontos de interesse, nos estudos computacionais. Desta forma, basta que a corrente injetada ocasione uma perturbação mínima perceptível pelos aparelhos de medição na ordem harmônica  $h$  de interesse.

Além disso, não é impositivo que em uma das condições operativas não exista injeção de corrente e que na outra exista. Em verdade, o procedimento pode ser aplicado para quaisquer duas situações de operação, desde que seja verificada uma variação na corrente injetada no PAC entre as duas situações. A injeção de tais correntes pode ser conseguida pela utilização de um instrumento de controle eletrônico desenvolvido de maneira especial para este objetivo ou pela utilização de um dispositivo ativo de filtragem harmônica. A aplicação da metodologia pode ocorrer simultaneamente para vários harmônicos de interesse, desde que o equipamento utilizado viabilize a injeção de correntes de diferentes ordens harmônicas concomitantemente.