

Desenvolvimento de software para compartilhamento de responsabilidades sobre distorções de tensões e correntes harmônicas: proposição de procedimento, análise de sentido físico e estudo de caso

Development of software for responsibility sharing of harmonic voltage and current distortions: procedure proposition, physical analysis and case study

Desarrollo de software para compartir responsabilidades por distorsiones de tensiones y corrientes armónicas: propuesta de procedimiento, análisis de sentido físico y estudio de caso

Mateus Rosa Machado Júnior¹
Andréia Crico dos Santos²

Resumo: O presente trabalho apresenta uma pesquisa aplicada que objetiva lançar mão do Método de Chaveamento de Capacitores para desenvolver um procedimento inédito visando ao compartilhamento de responsabilidades sobre correntes harmônicas. A partir disso, é feito um estudo pormenorizado com o intuito de levantar características e peculiaridades acerca da atribuição de responsabilidades sobre tensões e correntes. Neste contexto, é apresentado um *software* elaborado com a intenção de oportunizar análises de qualidade de energia, o qual foi usado em um estudo de caso de um sistema elétrico simulado. Os resultados expostos no artigo permitem validar a eficiência do procedimento proposto e, ainda, análises críticas minuciosas são descritas sobre pontos desafiadores acerca do tema compartilhamento de responsabilidades harmônicas.

Palavras-chave: Chaveamento de capacitores. Compartilhamento de responsabilidades. Desenvolvimento de *software*. Harmônicas. Qualidade da energia.

Abstract: This work presents applied research that aims to use the Capacitor Switching Method to develop an unprecedented procedure aimed at sharing responsibilities for harmonic currents. From this, a detailed study is carried out with the aim of identifying characteristics and peculiarities regarding the attribution of responsibilities for voltages and currents. In this context, software was developed with the intention of providing power quality analysis, which was used in a case study of a simulated electrical system. The results presented in the article allow validating the efficiency of the proposed procedure and, in addition, detailed critical analyzes are described on challenging points regarding the topic of sharing harmonic responsibilities.

Keywords: Switching of capacitors. Sharing of responsibility. Software development. Harmonics. Power Quality.

¹ Estudante. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9927-3912>. E-mail: mateus.junior@estudante.iftm.edu.br

² Doutora. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4536-716X>. E-mail: andreiaticrico@iftm.edu.br

Resumen: El presente trabajo presenta una investigación aplicada que tiene como objetivo utilizar el Método de Conmutación de Capacitores para desarrollar un procedimiento sin precedentes destinado a compartir responsabilidades por corrientes armónicas. A partir de esto se realiza un estudio detallado con el objetivo de identificar características y peculiaridades en cuanto a la atribución de responsabilidades sobre tensiones y corrientes. En este contexto, se presenta un software diseñado con la intención de brindar análisis de calidad energética, el cual fue utilizado en un caso de estudio de un sistema eléctrico simulado. Los resultados presentados en el artículo permiten validar la eficiencia del procedimiento propuesto y, además, se describen análisis críticos detallados sobre puntos desafiantes en torno al tema de compartir responsabilidades armoniosas.

Palabras-clave: Conmutación de Capacitores. Compartir responsabilidades. Desarrollo de software. Armónicos. Calidad de energía.

Submetido 02/12/2023

Aceito 05/03/2024

Publicado 05/07/2024

Introdução

A distorção harmônica consiste em um distúrbio de qualidade da energia que inspira atenção, quando são analisadas as características de funcionamento de um sistema elétrico. Tendo em mente uma perspectiva geral, nas últimas décadas nota-se um aumento progressivo dos níveis de distorção constatados nos complexos elétricos – devido, sobretudo, à intensificação do uso de dispositivos não lineares, sejam em cargas ou em equipamentos associados à operação da própria rede (Santos; Santos, 2018).

Uma das maiores dificuldades nesse contexto refere-se à problemática do compartilhamento de responsabilidades harmônicas. Ao constatar níveis de distorções superiores aos limites estabelecidos por normas ou recomendações, o desafio reside em definir as parcelas de responsabilidade cabidas às partes envolvidas, uma vez que o conteúdo harmônico mensurado em um determinado barramento é resultado da contribuição concomitante de vários consumidores ou outros agentes causadores de distorções.

Diversas propostas de metodologia, seguindo linhas de pesquisa e estratégias diferentes, foram já publicadas no intuito de colaborar com o tema do compartilhamento harmônico (Xu; Liu, 1999; Xu; Liu, 2000; Manito *et al.*, 2018; Shojaie; Mokhtari, 2014; Santos; Santos, 2020; Santos; Oliveira; Santos, 2021; Pereira; Silva; Santos, 2021). Contudo, trabalhos demonstram que há ainda grandes lacunas relacionadas à eficácia e à viabilidade prática de aplicação desses métodos (Santos; Oliveira; Santos, 2015; Pavas; Staudt; Sanchez, 2009; Santos *et al.*, 2020). Dentre os procedimentos desenvolvidos para o compartilhamento de responsabilidades, o presente trabalho enfatiza o Método do Chaveamento de Capacitores (MCC), o qual merece destaque por unir características prósperas, quais sejam: facilidade de aplicação e resultados preliminares promissores (Santos; Santos; Oliveira, 2019).

Com base no cenário exposto, este artigo tem por objetivo apresentar uma análise crítica comparativa entre a utilização do MCC para compartilhamento de tensões harmônicas e de correntes harmônicas. Vale desde já ressaltar que o compartilhamento de tensões pelo MCC já foi publicado (Santos; Santos; Oliveira, 2019) e que os desenvolvimentos necessários para a realização do compartilhamento de correntes a partir de chaveamento de capacitores são contribuições feitas neste trabalho, visando expandir a aplicação do procedimento e tendo em mente um objetivo de investigação diferente.

Para alcançar o intendo mencionado, o estudo encontra-se estruturado de maneira que, além desta seção introdutória, temas específicos sejam tratados nas próximas seções. Assim sendo, tece-se uma argumentação sobre o significado de compartilhar tensões e correntes harmônicas, investigando-se cuidadosamente a natureza, a diferença de filosofias e as particularidades dos processos. Fundamenta-se teoricamente o MCC para atribuição de responsabilidades harmônicas, levando em consideração ambas as grandezas e descreve-se o *software* desenvolvido para realização de compartilhamento, o qual recebe dados de formas de onda, que podem ser advindos de simulações ou medições. Realiza-se, então, um estudo de caso, usando dados de simulação de um sistema elétrico de características similares a sistemas reais, realiza-se uma discussão crítica sobre os resultados obtidos e são estabelecidas as conclusões.

O Sentido Físico de Compartilhar Tensões e Correntes Harmônicas

Em nível nacional, os documentos elaborados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) – cada qual dentro de suas atribuições – estabelecem patamares de limites para níveis de distorções harmônicas de tensão (ANEEL, 2021; ONS, 2022). Em nível internacional, a maior parte das normas e recomendações seguem essa mesma decisão (IEC, 2008; EN, 2022).

Todavia, a norma IEEE 519-2022 (IEEE, 2022), elaborada pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), apresenta valores limítrofes também para distorções de correntes, sendo, para isso, levada em consideração a relação entre a capacidade do sistema (corrente de curto-circuito da rede) e a capacidade do consumidor (corrente nominal da carga). Assim, o consumidor apresenta uma maior tolerância quanto à injeção de correntes harmônicas se estiver conectado a um sistema com alto nível de curto-circuito, pois, nesse caso, as tensões harmônicas que surgem no ponto de acoplamento comum (PAC) são menores do que quando esse mesmo consumidor é conectado a um sistema de baixo nível de curto-circuito.

O estabelecimento simultâneo de valores de referência para o conteúdo harmônico de tensão e de corrente pode indicar um caminho capaz de unir esforços entre concessionária e consumidores para a manutenção da qualidade da energia. Nesse sentido, uma vez que todas as cargas ligadas a determinado PAC se enquadrem nos limites de distorção de corrente, poder-

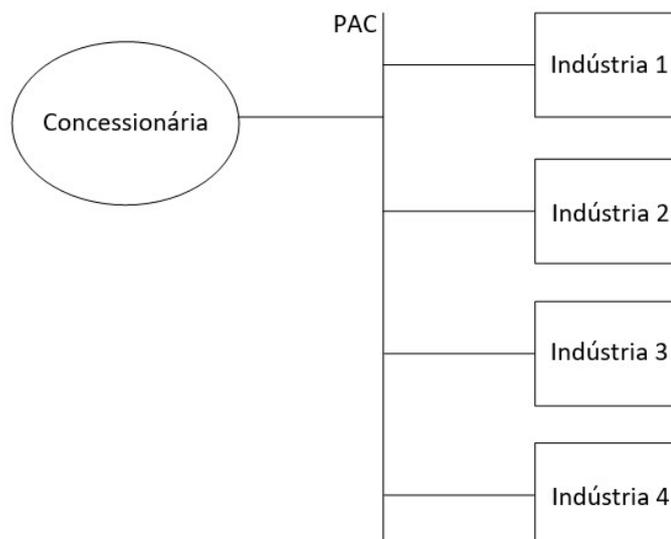
se-ia recair sobre a concessionária o dever de adequar os níveis de distorção de tensão no barramento (Barbosa, 2014).

Os documentos normativos referenciados anteriormente, apesar de indicarem patamares de limite para as distorções, não fazem qualquer menção acerca de técnicas para realização de compartilhamento harmônico. O dever de compartilhar surge, sobretudo, quando se deseja definir a parte que deve ser encarregada de implementar medidas mitigatórias – ou, até mesmo, diante da necessidade de ratear os custos de tais medidas entre os agentes responsáveis, na justa medida de suas contribuições individuais.

Os processos de compartilhamento de responsabilidades que levam em consideração a análise da grandeza tensão e a análise da grandeza corrente conduzem a resultados diferentes. Isso acontece porque as naturezas físicas de tais grandezas são distintas e, apesar de estarem relacionadas, guardam suas particularidades (Santos; Oliveira, 2011).

Para melhor ilustrar a questão, a Figura 1 apresenta o esquema representativo de um PAC genérico, com as partes que estão a ele conectadas: a rede de alimentação da concessionária de energia e diferentes cargas, representadas pelas unidades industriais 1, 2, 3 e 4.

Figura 1 – Esquema representativo de um sistema elétrico composto por concessionária e quatro consumidores industriais



Fonte: elaborado pelos autores (2023).

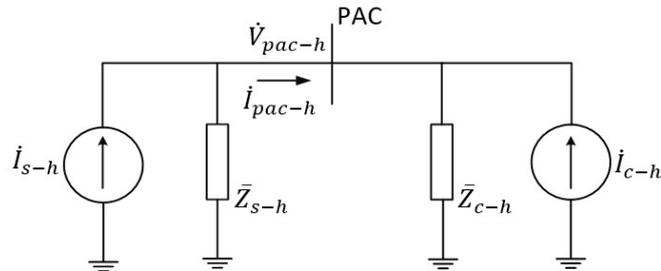
Na Figura 1 é possível perceber que o arranjo indica a existência de uma mesma tensão em toda a extensão do PAC, uma vez que se trata de um mesmo nó (ou barramento) elétrico. Assim, é preciso compartilhar responsabilidades sobre uma única grandeza de tensão e as parcelas que cabem às partes quantificam sua contribuição para o nível harmônico do ponto ao qual todas estão conectadas.

Por outro lado, quando se deseja aplicar o compartilhamento de correntes, nota-se que não existe uma corrente única característica do PAC. Cada ramo do circuito apresenta sua própria corrente e, então, ao fazer a análise de compartilhamento de corrente no ramal de entrada da Indústria 1, toma-se uma corrente diferente daquela que seria usada para análise da Indústria 2, por exemplo. Isso torna mais intrincado o processo de obter uma visão global sobre as contribuições das partes, considerando o sistema como um todo. Além disso, os resultados do compartilhamento de responsabilidades sobre correntes harmônicas sofrem mais influência do nível de curto-circuito da rede do que os resultados do compartilhamento de tensões, como é retratado na sequência.

Compartilhamento de Tensões Harmônicas via Chaveamento de Capacitores

Para desenvolver a Metodologia de Chaveamento de Capacitores (MCC), considera-se que o arranjo da Figura 1 seja representado por um circuito simplificado, na forma de equivalente de Norton referente a uma ordem harmônica h de interesse, conforme ilustra a Figura 2. Essa figura apresenta o esquema particularizado para a análise de uma única indústria, para uma frequência específica. A título de exemplo, na investigação sobre as responsabilidades harmônicas da Indústria 3, considera-se que a parte do consumidor é representada unicamente pela Indústria 3, enquanto a parte do supridor engloba o equivalente do restante do sistema: Concessionária e Indústrias 1, 2 e 4. Fica demonstrado, assim, que a investigação de cada unidade industrial, em cada frequência harmônica de interesse, requer a elaboração de um equivalente específico para o estudo de compartilhamento desejado.

Figura 2 – Circuito equivalente de Norton evidenciando as grandezas envolvidas na problemática do compartilhamento harmônico

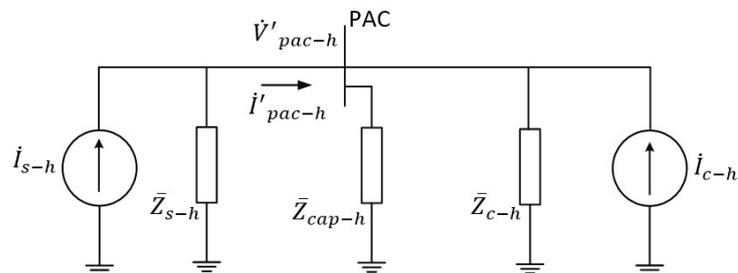


Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Na Figura 2, as fontes de corrente indicadas por \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} representam as distorções harmônicas originárias do circuito equivalente do supridor e do consumidor, nessa ordem. As impedâncias harmônicas dos equivalentes do supridor e do consumidor são, respectivamente, \bar{Z}_{s-h} e \bar{Z}_{c-h} . A grandeza \dot{V}_{pac-h} indica a tensão harmônica no ponto de acoplamento, enquanto \dot{I}_{pac} faz referência à corrente harmônica da entrada do consumidor analisado.

Para compartilhar tensões harmônicas de acordo com o Método do Chaveamento de Capacitores, faz-se necessária a conexão de um banco de capacitores de impedância conhecida no PAC, de modo a ser possível chegar aos percentuais de responsabilidade cabidos às partes a partir de medições de tensões e correntes harmônicas, antes e após a conexão dos capacitores (Santos; Santos; Oliveira, 2019). A Figura 3 apresenta o mesmo equivalente mostrado na Figura 2, com a diferença de contar com a conexão de unidades capacitivas no PAC.

Figura 3 – Circuito equivalente de Norton evidenciando as grandezas após conexão de banco de capacitores, para aplicação do MCC



Fonte: elaborado pelos autores (2023).

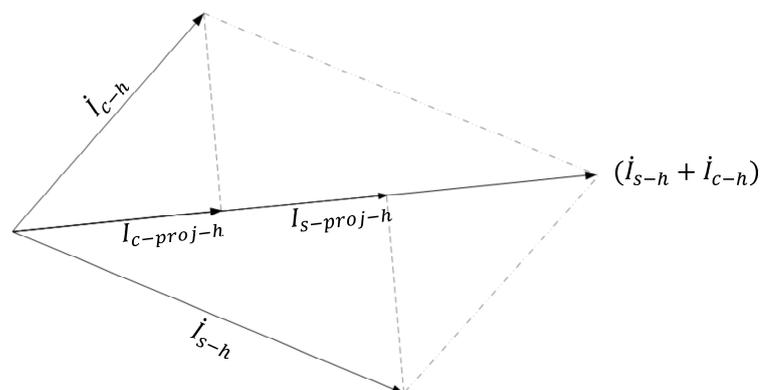
A partir do conhecimento das tensões e correntes harmônicas antes (\dot{V}_{pac-h} e \dot{I}_{pac-h}) e após (\dot{V}'_{pac-h} e \dot{I}'_{pac-h}) a conexão dos capacitores, unicamente, além da própria impedância harmônica chaveada (\dot{Z}_{cap-h}), é possível aplicar conceitos elementares de resolução de circuitos elétricos para se chegar às expressões de \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} , conforme descrito nas Equações (1) e (2), respectivamente (Santos; Santos; Oliveira, 2019).

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

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

Nota-se que nas Equações (1) e (2) são usadas apenas grandezas de medição simples ou calculadas em campo. Tal fato representa uma grande vantagem do MCC, uma vez que sua aplicação não demanda o conhecimento das impedâncias harmônicas das partes que constituem o sistema elétrico, informações normalmente desconhecidas e de estimativa difícil em casos reais (Santos, 2019). Para finalmente ser possível chegar aos percentuais de responsabilidades sobre distorções harmônicas de tensão, a metodologia propõe a realização da projeção fasorial de \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} sobre a soma total das correntes harmônicas oriundas do supridor e do consumidor ($\dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h}$). A Figura 4 ilustra esse procedimento.

Figura 4 – Projeção de fasores para definição das parcelas de responsabilidade referentes ao compartilhamento de tensões harmônicas



Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Na Figura 4, $I_{s-proj-h}$ e $I_{c-proj-h}$ representam, respectivamente, números escalares resultantes da projeção de \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} sobre $(\dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h})$. Nesse processo, nota-se que o módulo da soma $(\dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h})$ indica a totalidade, ou 100%, enquanto as projeções $I_{s-proj-h}$ e $I_{c-proj-h}$ representam as parcelas referentes aos percentuais das partes. Cabe ressaltar que apesar do manuseio de grandezas de correntes, todo o processo descrito possui como objetivo a realização do compartilhamento de tensões harmônicas – e não correntes (Santos, 2019).

Compartilhamento de Correntes Harmônicas via Chaveamento de Capacitores

Nesta seção é apresentada a contribuição do presente trabalho no sentido de expandir a utilização da filosofia de chaveamento de capacitores para desenvolver um procedimento de atribuição de responsabilidades sobre correntes harmônicas. Considera-se que o processo possui uma nova perspectiva de abordagem na aplicação do MCC, pois, após realização de uma pesquisa de estado da arte nas principais plataformas de busca de periódicos relacionados ao tema, não foram encontradas publicações que apresentam conteúdo similar ao que é aqui proposto.

Na explanação do raciocínio, considera-se mais uma vez as configurações de circuitos equivalentes apresentadas nas Figuras 2 e 3, de maneira que agora é preciso levar em consideração as impedâncias harmônicas das partes envolvidas, pois elas influenciam diretamente o compartilhamento de correntes.

A análise clássica de nós no circuito da Figura 2 permite obter as expressões das impedâncias harmônicas do supridor (\bar{Z}_{s-h}) e do consumidor (\bar{Z}_{c-h}), como mostram as Equações (3) e (4).

$$\bar{Z}_{s-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{(\dot{I}_{s-h} - \dot{I}_{pac-h})} \quad (3)$$

$$\bar{Z}_{c-h} = \frac{\dot{V}_{pac-h}}{(\dot{I}_{c-h} + \dot{I}_{pac-h})} \quad (4)$$

Com o objetivo de proceder à análise das contribuições individuais de supridor e consumidor sobre a corrente harmônica constatada no PAC, pode-se aplicar o clássico Teorema

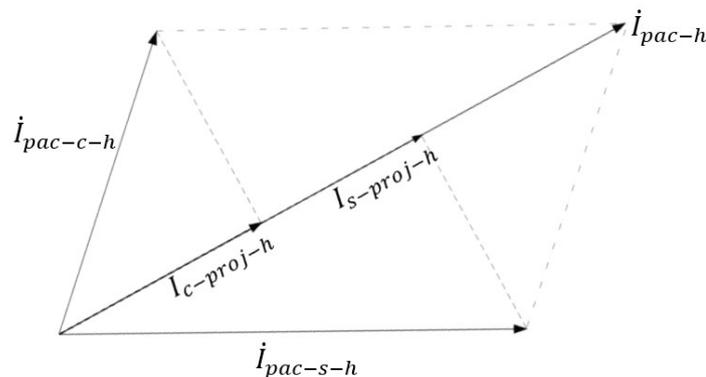
da Superposição de Efeitos (Alexander; Sadiku, 2013) na configuração da Figura 2, de forma a obter as Equações (5) e (6). De acordo com a nomenclatura adotada, $\dot{I}_{pac-s-h}$ é um fasor que indica o efeito apenas da fonte \dot{I}_{s-h} sobre a corrente total \dot{I}_{pac-} , enquanto $\dot{I}_{pac-c-h}$ representa unicamente o efeito de \dot{I}_{c-h} sobre a grandeza \dot{I}_{pac-h} .

$$\dot{I}_{pac-s-h} = \frac{\bar{Z}_{s-h}}{(\bar{Z}_{s-h} + \bar{Z}_{c-h})} \cdot \dot{I}_{s-h} \quad (5)$$

$$\dot{I}_{pac-c-h} = -\frac{\bar{Z}_{c-h}}{(\bar{Z}_{s-h} + \bar{Z}_{c-h})} \cdot \dot{I}_{c-h} \quad (6)$$

Nas Equações (5) e (6), as grandezas \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} podem ser obtidas a partir das Equações (1) e (2), tendo sido determinadas pelo procedimento de chaveamento de capacitores. Por fim, para se chegar aos resultados de compartilhamento sobre distorções harmônicas de corrente, em consonância com o processo mostrado na Figura 5, é proposta aqui a realização da projeção de \dot{I}_{pac-s} sobre a corrente total \dot{I}_{pac-h} , para obtenção de $I_{s-proj-h}$, número escalar que define a parcela de responsabilidade do supridor. Analogamente, a parcela de responsabilidade do consumidor, $I_{c-proj-h}$, pode ser calculada a partir da projeção de $\dot{I}_{pac-c-h}$ sobre \dot{I}_{pac-} .

Figura 5 – Projeção de fasores para definição das parcelas de responsabilidade referentes ao compartilhamento de correntes harmônicas



Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Os percentuais finais, propriamente ditos, podem então ser calculados ao considerar o módulo de I_{pac-} como a totalidade, enquanto $I_{s-proj-h}$ e $I_{c-proj-h}$ representam as porcentagens de responsabilidade das partes.

Desenvolvimento do *Software* para Análise de Sinais Distorcidos e Realização de Compartilhamento Harmônico

Sendo contribuição do presente trabalho de pesquisa, foi desenvolvido um programa que permite a realização de investigações relacionadas ao tema de compartilhamento harmônico. O *software* foi elaborado utilizando-se a linguagem de programação *Python* e recebe como informação de entrada sinais discretos de tensões e correntes, os quais podem ser originados de simulações computacionais, de medições feitas em ensaios laboratoriais ou de medições realizadas em sistemas elétricos reais. Essa característica confere uma abrangente gama de possíveis aplicações do programa quando se pensa em análises de qualidade da energia elétrica provenientes de diferentes demandas.

Em um primeiro momento, foi feita a implementação da Transformada Rápida de Fourier (Rao; Kim; Hwang, 2010) com o intuito de obter o detalhamento sobre o conteúdo harmônico das formas de onda de interesse. Em seguida, procedeu-se à programação do equacionamento do Método do Chaveamento de Capacitores, com vistas ao compartilhamento de responsabilidades de tensões e de corrente harmônicas.

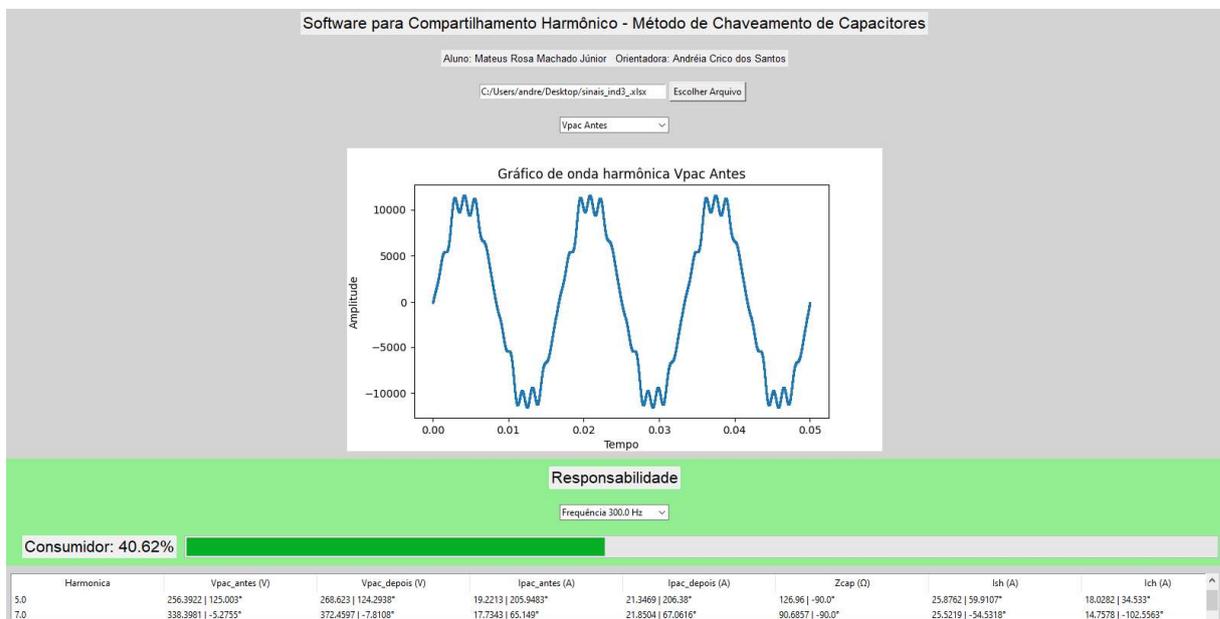
Para otimizar o trabalho e reduzir o tamanho do código em *Python*, foram utilizadas bibliotecas, que são conjuntos de módulos de programação já bem estabelecidos no cenário do desenvolvimento e capazes de oferecer funcionalidades específicas. Merecem destaque as bibliotecas *Matplotlib* e *Tkinter*, as quais foram facilitadoras no processo de elaboração de uma interface gráfica para o *software*. Para usar o programa, o usuário precisa apenas inserir (por meio de planilhas) as informações discretas sobre os sinais de tensão e corrente no PAC, antes e após o chaveamento do banco de capacitores, além de informar o valor da impedância capacitiva chaveada.

A Figura 6 mostra a interface gráfica da aplicação. O usuário pode escolher visualizar a forma de onda de um sinal inserido, efetuando seleção em um menu suspenso com um clique (*dropdown*). De uma forma geral, nota-se que podem ser bastante parecidos os sinais, antes e após a conexão dos capacitores, pois para aplicação da metodologia não é necessário o

chaveamento de grandes potências capacitivas – ou seja, não é preciso ocasionar substanciais mudanças operativas na rede, já é suficiente apenas uma alteração capaz de ser percebida adequadamente pelos equipamentos de medição.

A interface também permite observar as grandezas relacionadas à aplicação do MCC, para uma frequência harmônica de interesse e os percentuais resultantes ao término da execução do compartilhamento de responsabilidades.

Figura 6 – Interface gráfica do programa desenvolvido para análise de sinais distorcidos e aplicação do MCC para compartilhamento harmônico



Fonte: produzida pelos autores (2023).

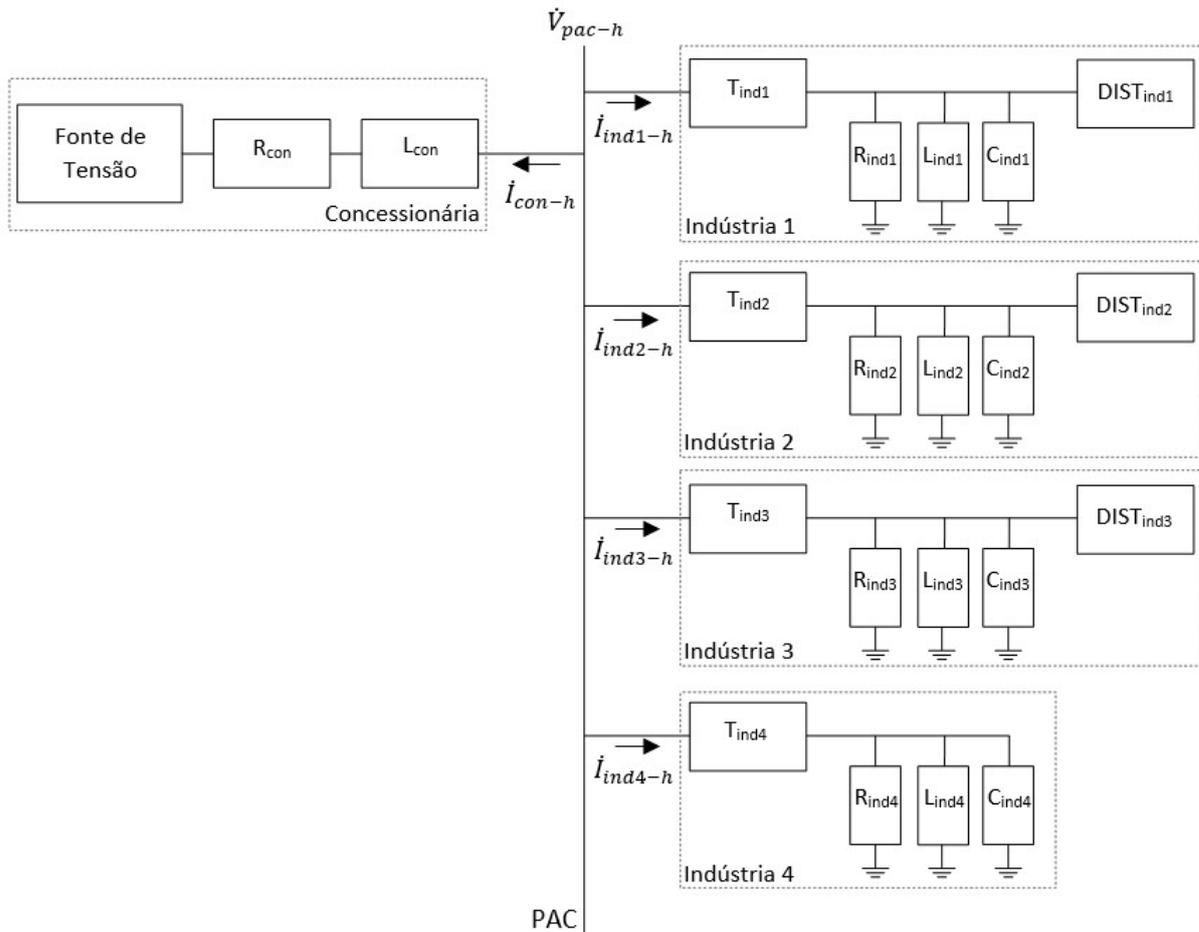
A seção apresentada a seguir exibe um estudo de caso conduzido a partir da utilização do programa desenvolvido. As investigações envolvem dados provenientes da simulação de um sistema elétrico com características operativas consoantes a complexos reais.

Aplicação do MCC para Compartilhamento de Tensões e Correntes Harmônicas via MCC tendo em vista Análise de um Sistema Elétrico

O sistema elétrico escolhido para o estudo de caso doravante apresentado possui o molde operativo do esquema mostrado na Figura 1. Para viabilizar a exposição dos dados referentes à parametrização da configuração, o referido esquema é reapresentado na Figura 7 com maior

nível de detalhamento acerca da constituição das partes envolvidas no estudo de caso pretendido.

Figura 7 – Constituição do sistema elétrico usado para estudo de caso



Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Na Figura 7, R_{con} e L_{con} representam, respectivamente, a resistência e a indutância do equivalente de Thévenin do sistema da concessionária. Sobre a constituição das indústrias, nota-se que T_{ind} indica o transformador de entrada, enquanto R_{ind} , L_{ind} e C_{ind} são os equivalentes resistivos, indutivos e capacitivos, nessa ordem, que compõem a unidade industrial, sendo responsáveis por caracterizar cargas lineares como cabos, aquecedores, motores, banco de capacitores para correção do fator de potência, dentre outros elementos.

Por outro lado, o elemento $DIST_{ind}$ serve para sinalizar a presença de cargas não lineares causadoras de distorções, e para retratar este efeito no circuito optou-se por usar fontes de corrente, as quais são capazes de injetar correntes de frequências harmônicas na configuração.

No que tange às grandezas elétricas de ordem h no PAC, a tensão é indicada como \dot{V}_{pac-h} , a corrente na entrada da Concessionária é \dot{I}_{con-h} e as correntes na entrada das indústrias são escritas como \dot{I}_{ind-h} .

Considerando a escassez de espaço para disposição adequada dos dados, as informações numéricas sobre a caracterização dos componentes do sistema são apresentadas em tabelas, e não na própria Figura 7.

Acompanhando a nomenclatura apresentada na Figura 7, a seguir são apresentadas as informações de parametrização das cinco partes que constituem o sistema, quais sejam: Concessionária, Indústrias 1, 2, 3 e 4.

A Tabela 1 mostra os dados sobre o sistema da Concessionária, o qual foi representado por meio de um circuito equivalente de Thévenin.

Tabela 1 – Dados sobre o circuito equivalente da Concessionária

| PARÂMETRO | VALOR |
|----------------------------------|-----------------------|
| Fonte de tensão (V) | 13800 |
| Frequência (Hz) | 60 |
| Potência de curto-circuito (MVA) | $170 \angle 85^\circ$ |
| R_{con} (m Ω) | 97,63 |
| L_{con} (mH) | 2,96 |

Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Como se nota na Tabela 1, a configuração simulada possui tensão nominal de linha, em frequência fundamental, de 13,8 kV e potência de curto-circuito de valor condizente com valores possíveis de serem encontrados na realidade, em sistemas com o mesmo porte do simulado aqui.

A Tabela 2 resume a caracterização de quatro transformadores, cada um deles alocado na entrada de uma indústria.

Tabela 2 – Dados sobre os transformadores de entrada das indústrias

| PARÂMETRO | INDÚSTRIA 1 | INDÚSTRIA 2 | INDÚSTRIA 3 | INDÚSTRIA 4 |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Potência (MVA) | 2 | 2 | 3 | 3 |
| Resistência percentual (%) | 3,5 | 3,5 | 3 | 3 |
| Reatância percentual (%) | 1 | 1 | 2 | 2 |
| Tipo de conexão | Δ -Y | Δ -Y | Δ -Y | Δ -Y |
| Relação de transformação | 13800:380 | 13800:380 | 13800:380 | 13800:380 |

Fonte: elaborado pelos autores (2023).

É possível perceber na Tabela 2 que os transformadores de entrada das quatro indústrias apresentam características relativamente semelhantes, o que sugere que todos os consumidores possuem níveis de potência de operação similares. Ainda, em todos os casos, as unidades industriais recebem no primário tensão de 13,8 kV e operam internamente com tensão no secundário de 380 V.

A Tabela 3 compreende as descrições relativas às cargas lineares das indústrias, em termos de resistência, indutância e capacitância, conectadas em configuração *shunt* no secundário dos transformadores.

Tabela 3 – Dados sobre os equivalentes das cargas lineares das indústrias

| PARÂMETRO | INDÚSTRIA 1 | INDÚSTRIA 2 | INDÚSTRIA 3 | INDÚSTRIA 4 |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| R_{ind} (m Ω) | 140 | 90 | 70 | 61 |
| L_{ind} (mH) | 0,766 | 0,520 | 0,348 | 0,290 |
| C_{ind} (mF) | 3,00 | 2,60 | 4,00 | 7,00 |

Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Os dados mostrados na Tabela 3 se encontram referidos para a tensão de 380 V. De antemão, pode-se inferir que a Indústria 4 deve possuir o maior nível de carga linear instalada, já que apresenta os menores valores de R_{ind} , L_{ind} e C_{ind} .

A Tabela 4 contém as informações sobre as cargas não lineares dos quatro consumidores. Como já mencionado anteriormente, a inserção de distorções no sistema é representada por meio da conexão de fontes de correntes harmônicas no barramento do secundário dos transformadores das instalações.

Tabela 4 – Dados sobre a injeção de correntes harmônicas realizada pelas indústrias

| ORDEM HARMÔNICA | CORRENTE INJETADA (A) | | | |
|-----------------|-----------------------|-------------|-------------|-------------|
| | INDÚSTRIA 1 | INDÚSTRIA 2 | INDÚSTRIA 3 | INDÚSTRIA 4 |
| h = 5 | 537,40∠25° | 418,61∠42° | 651,25∠9° | 0 |
| h = 7 | 528,21∠-18° | 391,03∠-25° | 516,19∠-66° | 0 |
| h = 11 | 382,54∠101° | 374,06∠122° | 405,17∠144° | 0 |
| h = 13 | 236,17∠7° | 142,13∠71° | 366,99∠53° | 0 |

Fonte: elaborado pelos autores (2023).

A Tabela 4 mostra que a Indústria 4 é a única modelada de maneira a não apresentar fontes de distorções. Logo, desde já, espera-se que nos futuros estudos de compartilhamento harmônico seja obtida responsabilidade nula para tal consumidor.

Para auxiliar no entendimento da visão geral da operação do sistema em frequência fundamental, a Tabela 5 apresenta as potências consumidas pelas unidades industriais.

Tabela 5 – Dados sobre as potências consumidas pelas indústrias

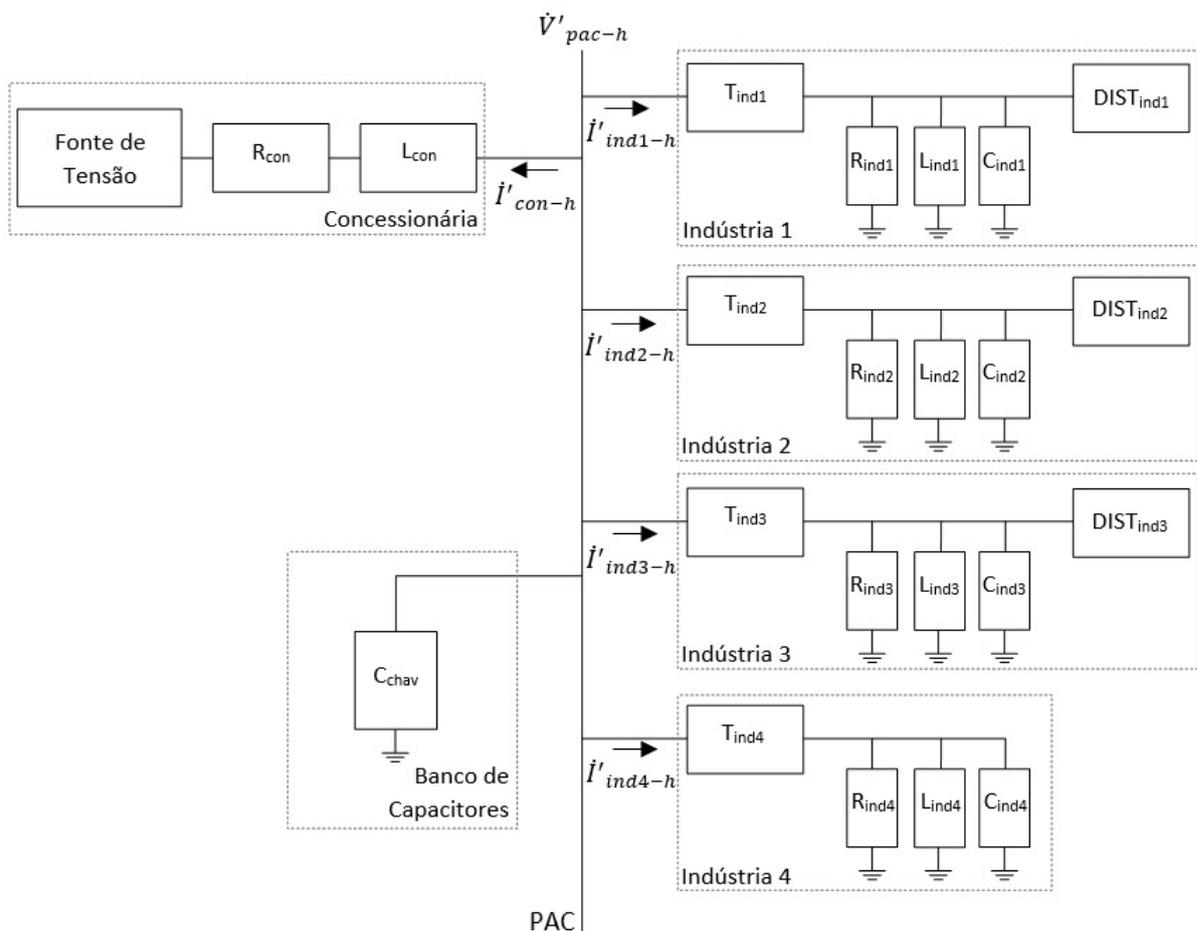
| GRANDEZA | INDÚSTRIA 1 | INDÚSTRIA 2 | INDÚSTRIA 3 | INDÚSTRIA 4 |
|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Potência ativa (kW) | 952,76 | 1.483,75 | 1.922,89 | 2.242,54 |
| Potência reativa (kVAr) | 329,90 | 562,91 | 844,29 | 898,90 |
| Potência aparente (kVA) | 1.008,25 | 1.586,94 | 2.100,08 | 2.415,98 |
| Fator de potência | 0,94 (indutivo) | 0,93 (indutivo) | 0,92 (indutivo) | 0,93 (indutivo) |

Fonte: elaborado pelos autores (2023).

O *software* usado para a simulação computacional do sistema supramencionado foi o Matlab/Simulink[®]. Primeiramente foi realizada a simulação do circuito no molde mostrado na Figura 7 e, em seguida, para viabilizar a aplicação do MCC, foi simulado o caso envolvendo a conexão do capacitor na barra de interesse ao compartilhamento.

A Figura 8 apresenta a condição de operação após conexão do banco de capacitores, sendo que, nesse caso, a tensão de ordem harmônica h no PAC é chamada \dot{V}'_{pac-h} , e as correntes na entrada da Concessionária e das Indústrias são, respectivamente, \dot{I}'_{con-h} e \dot{I}'_{ind-h} .

Figura 8 – Constituição do sistema elétrico usado para estudo de caso após conexão do banco de capacitores no PAC, visando à aplicação do MCC



Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Foi feita a escolha por usar um banco de capacitores de 300 kVAr, o que representa um arranjo com nível de potência compatível com o porte do complexo elétrico estudado, visto que

sua conexão no PAC não causou grandes impactos na operação do sistema e, ao mesmo tempo, foi suficiente para ocasionar alterações capazes de viabilizar a aplicação do MCC. Uma vez definida a potência do banco, o valor da capacitância chaveada (C_{chav}) pode ser encontrado com auxílio da Equação (7) (Alexander; Sadiku, 2013).

$$C_{chav} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot V^2} \quad (7)$$

Na Equação (7), Q indica a potência reativa nominal do banco, f representa a frequência e V designa a tensão nominal do ponto de conexão. Com base no exposto, no presente estudo o valor de C_{chav} é 4,18 μ F.

Os resultados das simulações realizadas no *software* Matlab/Simulink[®] foram colhidos a partir dos valores instantâneos discretos que caracterizam as formas de onda de tensões e correntes de interesse, antes e após a conexão do banco de capacitores no PAC. Os dados foram exportados do Matlab/Simulink[®] para planilhas, as quais foram então usadas como dados de entrada no *software* desenvolvido na presente pesquisa.

Todas as informações e análises feitas a partir desse ponto foram obtidas por meio do programa implementado. Como primeira ação, foi aplicada a Transformada Rápida de Fourier para representação do conteúdo harmônico dos sinais em termos do domínio da frequência. A Tabela 6 mostra os níveis de distorção individual de tensão (DIT) e distorção total de tensão (DTT) no PAC. É evidente que o conteúdo harmônico constatado é resultado da contribuição simultânea das várias indústrias do sistema, que apresentam cargas não lineares.

Tabela 6 – Níveis de distorções harmônicas de tensão no PAC

| GRANDEZA | VALOR |
|-------------------------|-------|
| DIT _(h = 5) | 3,22% |
| DIT _(h = 7) | 4,25% |
| DIT _(h = 11) | 6,60% |
| DIT _(h = 13) | 4,06% |
| DTT | 9,41% |

Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Seguindo a nomenclatura das Figuras 7 e 8, a Tabela 7 apresenta os dados do sistema concernentes às grandezas de tensões e correntes harmônicas antes da conexão do banco de capacitores no PAC.

Tabela 7 – Grandezas elétricas no sistema antes da conexão do banco de capacitores no PAC

| GRANDEZA | h = 5 | h = 7 | h = 11 | h = 13 |
|------------------------|----------------|---------------|----------------|---------------|
| \dot{V}_{pac-h} (V) | 256,39∠124,95° | 338,40∠-5,35° | 525,95∠174,40° | 323,62∠6,31° |
| \dot{I}_{con-h} (A) | 45,94∠35,95° | 43,32∠-94,64° | 42,84∠84,86° | 22,31∠-83,31° |
| \dot{I}_{ind1-h} (A) | 15,30∠-133,38° | 15,00∠118,38° | 14,04∠-79,41° | 8,77∠119,73° |
| \dot{I}_{ind2-h} (A) | 10,88∠-122,26° | 10,62∠103,30° | 10,00∠-70,26° | 1,03∠119,27° |
| \dot{I}_{ind3-h} (A) | 19,22∠-154,11° | 17,73∠65,07° | 9,70∠-66,89° | 7,95∠155,40° |
| \dot{I}_{ind4-h} (A) | 3,98∠154,04° | 6,64∠32,47° | 17,21∠-142,25° | 14,02∠47,47° |

Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Em virtude das características operacionais dos tipos mais usados de cargas não lineares em sistemas elétricos, as tensões harmônicas constatadas em barramentos frequentemente apresentam valores decrescentes à medida que a frequência aumenta. Na Tabela 7, no entanto, percebe-se que a tensão de ordem 11 possui magnitude maior que as tensões de ordem 5 e 7. Esse fato é um indicativo da ocorrência de uma ressonância, fenômeno bastante comum de ser constatado em estudos harmônicos.

Seguindo a mesma organização da Tabela 7, a Tabela 8 mostra tensões e correntes harmônicas constatadas no PAC, após a conexão do banco de capacitores.

Tabela 8 – Grandezas elétricas no sistema após a conexão do banco de capacitores no PAC

| GRANDEZA | $h = 5$ | $h = 7$ | $h = 11$ | $h = 13$ |
|-------------------------|----------------|---------------|----------------|----------------|
| \dot{V}'_{pac-h} (V) | 268,62∠124,24° | 372,46∠-7,89° | 585,10∠159,24° | 318,34∠-10,62° |
| \dot{I}'_{con-h} (A) | 48,13∠35,24° | 47,68∠-97,17° | 47,66∠69,70° | 21,94∠-100,23° |
| \dot{I}'_{ind1-h} (A) | 15,31∠-133,69° | 14,91∠117,28° | 13,00∠-85,75° | 7,58∠116,05° |
| \dot{I}'_{ind2-h} (A) | 10,84∠-122,80° | 10,50∠101,45° | 8,31∠-75,79° | 0,28∠-37,27° |
| \dot{I}'_{ind3-h} (A) | 19,25∠-154,54° | 17,92∠63,56° | 7,06∠-75,86° | 6,27∠165,79° |
| \dot{I}'_{ind4-h} (A) | 4,17∠153,33° | 7,30∠29,94° | 19,14∠-157,42° | 13,79∠30,55° |

Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Ao comparar os dados mostrados nas Tabelas 7 e 8, verifica-se que não há alterações expressivas nos valores de tensões e correntes harmônicas antes e após a conexão do banco de capacitores. Essa conduta está de acordo com a filosofia do MCC, que não exige grandes alterações na rede, apenas uma mudança detectável pelos instrumentos de medição já é suficiente para garantir a aplicação da metodologia (Santos, 2019).

Com base nos dados apresentados, é possível agora proceder à aplicação do Método de Chaveamento de Capacitores para realização do compartilhamento de responsabilidades harmônicas. Vale ressaltar que, conforme explicado anteriormente, para executar a análise de cada parte constituinte do complexo elétrico é preciso ter em mente o sistema na forma dos equivalentes de Norton apresentados nas Figuras 2 e 3.

A Tabela 9 mostra os resultados fornecidos pelo programa a partir do emprego do MCC para realização do compartilhamento de responsabilidades de tensões harmônicas.

Tabela 9 – Resultados fornecidos pelo MCC para compartilhamento de responsabilidades sobre tensões harmônicas

| RESPONSABILIDADE SOBRE TENSÃO HARMÔNICA (MCC) | h = 5 | h = 7 | h = 11 | h = 13 |
|--|--------------|--------------|---------------|---------------|
| Concessionária (%) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Indústria 1 (%) | 34,43 | 37,43 | 31,74 | 28,18 |
| Indústria 2 (%) | 24,94 | 28,36 | 32,00 | 16,25 |
| Indústria 3 (%) | 40,62 | 34,21 | 36,25 | 55,57 |
| Indústria 4 (%) | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: elaborado pelos autores (2023).

A Tabela 10, a seguir, exibe as respostas encontradas para o compartilhamento harmônico, levando em consideração a grandeza corrente.

Uma percepção inicial das informações presentes nas Tabelas 9 e 10 revela que ambas atribuem responsabilidade nula para duas partes do sistema: Concessionária e Indústria 4. Para o restante das unidades industriais, os valores constatados para compartilhamento de tensões e correntes são bastante distintos.

Tabela 10 – Resultados fornecidos pelo MCC para compartilhamento de responsabilidades sobre correntes harmônicas

| RESPONSABILIDADE SOBRE CORRENTE HARMÔNICA (MCC) | h = 5 | h = 7 | h = 11 | h = 13 |
|--|--------------|--------------|---------------|---------------|
| Concessionária (%) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Indústria 1 (%) | 97,62 | 99,31 | 78,07 | 72,75 |
| Indústria 2 (%) | 96,67 | 99,60 | 92,02 | 38,17 |
| Indústria 3 (%) | 94,17 | 84,09 | 97,53 | 85,62 |
| Indústria 4 (%) | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Neste ponto surge o anseio de validar a eficácia e a consistência física dos resultados alcançados, principalmente aqueles provenientes da aplicação do novo procedimento proposto neste trabalho, referente ao uso do MCC para realização do compartilhamento harmônico de correntes. Para corresponder a esse intento, o Método da Superposição (Xu; Liu, 1999; Xu; Liu, 2000) foi usado a fim de obter os valores de gabarito, ou referência. O Método da Superposição é um procedimento clássico, amplamente aceito na literatura científica como confiável, porém sua aplicação prática é inviabilizada por ser necessário o conhecimento prévio das impedâncias harmônicas das partes envolvidas, informações usualmente difíceis de serem medidas ou estimadas em casos reais (Santos, 2019). Contudo, como aqui a análise se trata de um sistema simulado, com todos os parâmetros bem conhecidos, é possível aplicar a metodologia da Superposição sem maiores dificuldades.

Tendo esses aspectos em mente, os valores considerados como referência para os resultados de compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensões são mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados fornecidos pelo clássico Método da Superposição para compartilhamento de responsabilidades sobre tensões harmônicas

| RESPONSABILIDADE SOBRE TENSÃO HARMÔNICA (REFERÊNCIA) | h = 5 | h = 7 | h = 11 | h = 13 |
|---|--------------|--------------|---------------|---------------|
| Concessionária (%) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Indústria 1 (%) | 34,44 | 37,43 | 31,75 | 28,19 |
| Indústria 2 (%) | 24,94 | 28,36 | 32,01 | 16,25 |
| Indústria 3 (%) | 40,63 | 34,22 | 36,26 | 55,58 |
| Indústria 4 (%) | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: elaborado pelos autores (2023).

A Tabela 12, por sua vez, exhibe as respostas consideradas gabarito para o compartilhamento de responsabilidades sobre correntes harmônicas.

Os resultados fornecidos pelo clássico Método da Superposição, mostrados nas Tabelas 11 e 12, possuem as mesmas características que chamaram atenção quando da comparação entre as Tabelas 9 e 10: atribuição nula para Concessionária e Indústria 4 e percentuais de responsabilidade bastante diferentes ao considerar as grandezas tensão e corrente.

Tabela 12 – Resultados fornecidos pelo clássico Método da Superposição para compartilhamento de responsabilidades sobre correntes harmônicas

| RESPONSABILIDADE SOBRE CORRENTE HARMÔNICA (REFERÊNCIA) | h = 5 | h = 7 | h = 11 | h = 13 |
|---|--------------|--------------|---------------|---------------|
| Concessionária (%) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Indústria 1 (%) | 97,62 | 99,31 | 78,06 | 72,74 |
| Indústria 2 (%) | 96,68 | 99,60 | 92,01 | 38,08 |
| Indústria 3 (%) | 94,17 | 84,09 | 97,54 | 85,64 |
| Indústria 4 (%) | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: elaborado pelos autores (2023).

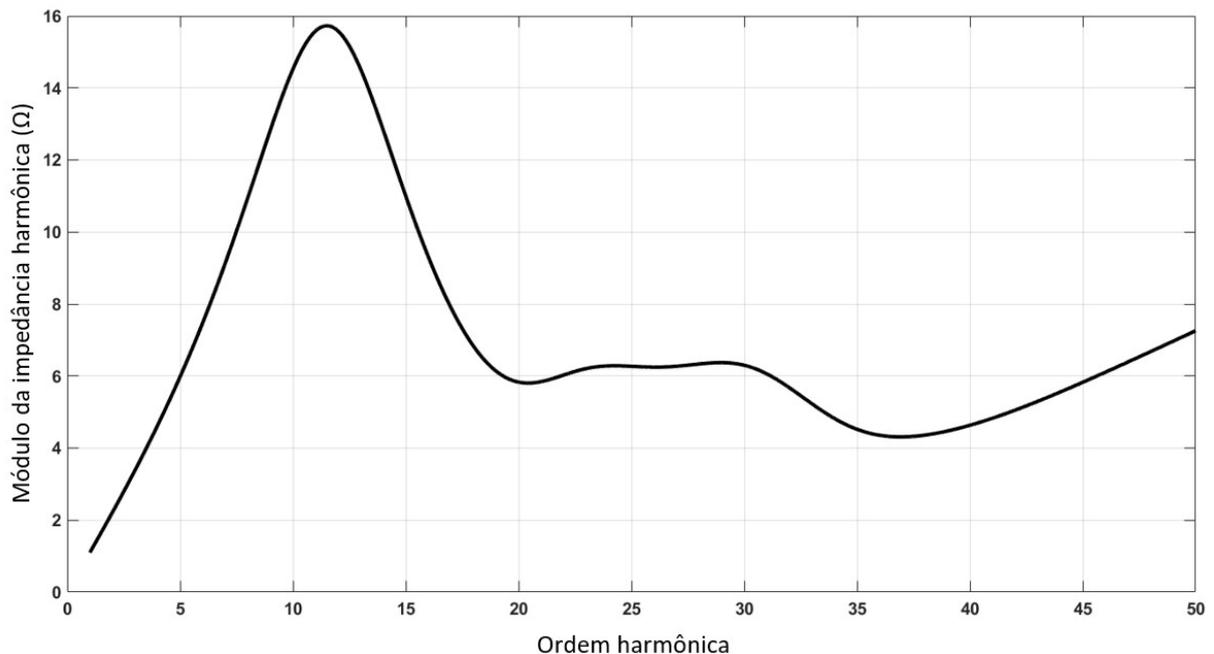
Uma análise inicial das informações apresentadas nas Tabelas 9 a 12 corrobora o entendimento de que a natureza do compartilhamento de tensões e correntes harmônicas é diferente e, portanto, conduzem a resultados que não guardam relação direta entre si. Além disso, é notório que as respostas fornecidas pelo MCC e pelo Método da Superposição estão alinhadas, o que sugere a robustez da pesquisa realizada. O erro absoluto máximo constatado foi de 0,09 unidade percentual e aconteceu para o compartilhamento de correntes referente à Indústria 2, para a ordem harmônica $h = 13$: 38,17% de responsabilidade, segundo o MCC, e 38,08% de acordo com o Método da Superposição. Todos os demais casos tiveram correspondência exata ou erro absoluto menor que 0,03 unidade percentual.

Pormenorizando as investigações sobre os resultados obtidos no estudo, o item seguinte sumariza uma discussão crítica sobre pontos que merecem atenção.

Discussão Crítica sobre os Resultados de Compartilhamento de Tensões e Correntes Harmônicas via MCC

O sistema elétrico usado para o estudo de caso apresentado possui características de operação similares a configurações que podem ser encontradas em casos reais. Na Tabela 4 percebe-se que, para cada indústria, as correntes harmônicas injetadas possuem característica decrescente à medida que a frequência aumenta, ou seja, para as menores ordens harmônicas, correntes de magnitudes maiores são injetadas. Apesar disso, na Tabela 6 é fácil notar que o maior nível de distorção individual de tensão no PAC foi constatado para a ordem $h = 11$, e não para $h = 5$, como poderia ser esperado à princípio. Tal fato decorre de uma ressonância que acontece próxima à frequência de 660 Hz, como pode ser observado no gráfico de impedância harmônica vista pelo PAC, em função da frequência, presente na Figura 9. Neste trabalho, foi escolhida propositalmente analisar uma situação que envolve ressonância, já que é um fenômeno de ocorrência comum na prática e, por isso, entende-se ser necessário investigar o desempenho do MCC também diante dessa condição especial.

Figura 9 – Impedância harmônica vista pelo PAC em função da frequência



Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Sobre os resultados fornecidos pelo MCC para o compartilhamento de responsabilidades harmônicas nas Tabelas 9 e 10, uma primeira observação que já sugere a consistência do método diz respeito às responsabilidades nulas atribuídas a duas partes do sistema: Concessionária e Indústria 4. Isso era esperado porque a concessionária é representada unicamente por uma fonte de tensão perfeitamente senoidal em série com a impedância equivalente de Thévenin, enquanto a Indústria 4 foi modelada de forma a contar apenas com componentes lineares. Em outras palavras, na unidade industrial 4 não se considerou a presença de elementos causadores de distorções harmônicas, como pode ser conferido na Figura 7 e na Tabela 4. Assim, é seguro afirmar que as responsabilidades sobre as distorções devem ser divididas apenas entre as Indústrias 1, 2 e 3.

Ao comparar as respostas fornecidas pelo Método de Chaveamento de Capacitores (Tabelas 9 e 10) com as fornecidas pelo clássico Método da Superposição (Tabelas 11 e 12), nota-se uma excelente correspondência. O maior erro absoluto constatado entre os dois procedimentos foi de 0,09 unidade percentual, fato que legitima a eficácia e robustez do MCC para o compartilhamento de tensões e correntes harmônicas, sendo que o processo para se atribuir responsabilidades sobre a grandeza corrente a partir do MCC é uma proposição original deste trabalho. Vale ainda ressaltar que o método se mostrou confiável inclusive para a análise de frequências nas quais são observadas a ocorrência de ressonâncias.

Focando especificamente a Tabela 9, que apresenta os resultados de compartilhamento pelo MCC sobre as tensões harmônicas no PAC, observa-se que cabe à Indústria 3 os maiores percentuais de responsabilidade nas ordens 5, 11 e 13. Quando se analisa cada frequência separadamente, é interessante perceber que a soma das contribuições das partes envolvidas conduz à totalidade (ou 100%). Por exemplo, para $h = 5$, a soma das parcelas da Concessionária (0%), Indústria 1 (34,43%), Indústria 2 (24,94%), Indústria 3 (40,62%) e Indústria 4 (0%) resulta em 99,99%, o que imprime sentido físico consistente ao processo.

Por outro lado, ao analisar as respostas fornecidas pelo MCC para compartilhamento de responsabilidades sobre harmônicas de corrente, na Tabela 10 é imediata a percepção de que os percentuais atribuídos às partes não guardam qualquer relação direta com a análise da grandeza tensão. Isso já era esperado, pois são processos distintos que levam em consideração grandezas elétricas de naturezas diferentes.

Ademais, outro ponto que chama atenção é fato de o somatório das contribuições individuais das partes, para determinada frequência, não resultar 100%. Tomando novamente o exemplo para $h = 5$, a soma das parcelas da concessionária (0%), indústria 1 (97,62%), indústria 2 (96,67%), indústria 3 (94,17%) e indústria 4 (0%) não perfaz 100%. Aqui, pensar em realizar tal somatório não apresenta sentido físico, pois, diferentemente do caso da tensão que se mantém a mesma em toda a extensão do barramento do PAC, não existe uma única corrente característica do ponto de acoplamento comum. Como se observa na Figura 7, há diferentes correntes de ramo no PAC, ou seja, na atribuição de responsabilidades para a Indústria 1, toma-se a corrente de entrada dessa unidade industrial que, evidentemente, é diferente das correntes de entrada usadas nas análises das demais.

Como já observado desde a seção de equacionamento, o compartilhamento de correntes harmônicas apresenta uma clara dependência das impedâncias harmônicas das partes. Em síntese, tendo em mente o circuito simplificador da Figura 2, pode-se afirmar que a atribuição de responsabilidades sobre a corrente harmônica na entrada de uma instalação fornece meios para concluir sobre a relação entre as impedâncias de supridor e consumidor, e como o fluxo de corrente proveniente das fontes de distorção do sistema se comportam, a partir disto, naquele ramo de entrada específico.

Sob outra perspectiva, tendo em mente a tensão no PAC, o compartilhamento permite obter a parcela de responsabilidade de uma unidade industrial específica sobre o conteúdo harmônico existente em uma grandeza de tensão – a mesma que alimenta e sofre influência direta de diversos outros consumidores. Isso propicia uma visão mais geral acerca da influência de cada parte conectada ao ponto de interesse sobre as distorções do sistema como um todo.

Pensando em termos de aplicação prática, como comentado anteriormente, ainda não existem protocolos sobre procedimentos para a realização do compartilhamento de responsabilidades harmônicas. Os desafios que se apresentam são relevantes para diversos ramos do setor elétrico, principalmente ante a falta de consenso sobre filosofias e procedimentos a serem seguidos. Vale ponderar, o trabalho apresentado aqui é importante no sentido de auxiliar a consolidação de um método, o MCC, como procedimento confiável para a atribuição de responsabilidades e, ainda, discutir sentido físico e características dos processos envolvendo grandezas de tensão e de corrente harmônicas.

Ficou demonstrado que o compartilhamento de tensões propicia uma visão de âmbito mais abrangente, pois pode fornecer a contribuição individual de um determinado consumidor em relação ao conteúdo harmônico de um barramento, o qual pode conter diversas outras cargas a ele conectadas. Já o compartilhamento de correntes entrega uma perspectiva mais restrita ao ramo de entrada do consumidor analisado, sendo útil para explorar as relações entre as impedâncias harmônicas do consumidor e do sistema supridor, bem como o sentido de fluxo das correntes de distorção no sistema. Ter compreensão sobre a natureza de tais procedimentos é fundamental para levar em consideração as potencialidades e limitações destes em futuras discussões relacionadas ao estabelecimento de eventuais processos de sistematização de metodologias para atribuição de responsabilidades.

Considerações Finais

O presente trabalho alcançou êxito no objetivo de apresentar uma proposição para realização do compartilhamento harmônico de correntes, além de traçar detalhadas investigações sobre as particularidades do sentido físico de levar em consideração as grandezas de tensão ou corrente no processo de atribuição de responsabilidades harmônicas. A relevância deste tema é notável, especialmente no contexto de intensificação da utilização de elementos não lineares em diversos níveis dos sistemas elétricos nas últimas décadas.

A condução dos estudos foi viabilizada pelo desenvolvimento de um *software* capaz de receber informações de sinais discretos provenientes de simulações computacionais, ensaios laboratoriais ou medições reais para, a partir daí, realizar análises importantes no que tange à qualidade da energia elétrica. Além de detalhar o conteúdo harmônico dos dados de entrada, o programa permite a aplicação do Método de Chaveamento de Capacitores para compartilhamento de responsabilidades sobre tensões e correntes harmônicas.

A utilização do MCC em um novo desdobramento visando à atribuição de responsabilidades sobre distorções de corrente foi aplicada em um estudo de caso abrangente, que envolveu a investigação de um complexo elétrico com diferentes partes causadoras de distorções. Os resultados alcançados foram acertadamente validados por meio da comparação com aqueles fornecidos por uma metodologia clássica e bem estabelecida na literatura.

As análises feitas conduziram a importantes constatações sobre significado físico, fundamentação teórica, aplicação, características e particularidades referentes aos processos de

compartilhamento de tensões e correntes. Em linhas gerais, nota-se que o processo de atribuição de responsabilidades sobre correntes harmônicas depende de maneira muito decisiva das impedâncias harmônicas das partes do sistema elétrico, diferentemente do que acontece no compartilhamento de tensões. Ademais, um ponto de acoplamento caracterizado por uma única tensão em toda a sua extensão pode apresentar várias correntes de ramos. Com isso, uma análise abrangente de compartilhamento de responsabilidades torna-se mais intrincada ao considerar apenas grandezas de corrente.

As apurações resultantes deste estudo podem abrir caminhos para futuras discussões relacionadas à sistematização de protocolos para atribuição de responsabilidades harmônicas em sistemas elétricos. A depender dos objetivos de investigação, pode-se optar pelo compartilhamento de tensões ou correntes – ou, ainda, uma associação entre ambas as técnicas. Contudo, o estabelecimento de protocolos propriamente ditos é um vasto assunto, a ser considerado em pesquisas futuras.

Referências

ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M, N. O. **Fundamentos de circuitos elétricos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**. Módulo 8 – Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica. Brasília: ANEEL, 2021.

BARBOSA, M. Análise Comparativa entre as normas IEEE e IEC. **Eletricidade Moderna**, São Paulo, n. 478, p. 68-75, 2014.

CENELEC. EN 50160. **Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, European Committee for Electrotechnical Standardization**. Bruxelas: CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization), 2022.

IEC. IEC 61000-3-6. **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems**. Genebra: IEC (International Electrotechnical Commission), 2008.

IEEE. IEEE 519. **IEEE Harmonic Control in Electric Power Systems**. Nova York: IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), 2022.

MANITO, A. et al. Evaluating Harmonic Distortions on Grid Voltages Due to Multiple Nonlinear Loads Using Artificial Neural Networks. **Energies**, Basileia, v. 11, n. 12, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/en1123303>.

ONS. **Procedimentos de Rede – Submódulo 2.9:** Requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à Rede Básica. Brasília: Operador Nacional do Sistema, 2022.

PAVAS, A.; STAUDTT, V.; SANCHEZ, G. T. Experimental Investigation of existing Methodologies for the Responsibilities Assignment Problem. **IEEE Bucharest Power Tech Conference**, Bucareste, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/PTC.2009.5281856>.

PEREIRA, F. A.; SILVA, S. F. P.; SANTOS, I. N. Blind source separation methods applied to evaluate harmonic contribution. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, Londres, v. 31, p. 1-18, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13149>.

RAO, K. R.; KIM, D. N.; HWANG, J.J. **Fast Fourier Transform: Algorithms and Applications**. 1. ed. Dordrecht: Springer, 2010.

SANTOS, A. C. **Compartilhamento de Responsabilidades Harmônicas:** Análises, Contribuições e Proposições. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

SANTOS, A. C.; OLIVEIRA, J. C.; SANTOS, I. N. A comparative analysis between methodologies for responsibility assignment on harmonic distortions. **Renewable Energy & Power Quality Journal (RE&PQJ)**, Vigo, v. 1, p. 312, 2015. DOI: <https://doi.org/10.24084/repqj13.312>.

SANTOS, A. C.; SANTOS, I. N. Assignment of harmonic voltage contributions using the harmonic current injection method. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, Londres, v. 31, n. 1, p. e12608, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12608>.

SANTOS, A. C.; SANTOS, I. N.; OLIVEIRA, J. C. Capacitor switching methodology for responsibility sharing of harmonic voltage distortions. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, Londres, v. 29, n. 12, p. e12135, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12135>.

SANTOS, I. N.; OLIVEIRA, J. C. Critical Analysis of the Current and Voltage Superposition Approaches at Sharing Harmonic Distortion Responsibility. **IEEE Latin America Transactions**, Nova York, v. 9, n. 4, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1109/TLA.2011.5993737>.

SANTOS, I. N.; OLIVEIRA, J. C.; SANTOS, A. C. Dominant impedance method to assign harmonic voltage contributions at a point of common coupling. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, Londres, v. 31, n. 6, p. e12895, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12895>.

SANTOS, I. N.; OLIVEIRA, J. C.; SANTOS, A. C.; GIANESINI, B. M. Compartilhamento de responsabilidades harmônicas via processos de mudança de estado: tendências e desafios. **O Setor Elétrico**, São Paulo, v. 171, p. 64-65, 2020.

SANTOS, I. N.; SANTOS, A. C. Uma forma de onda cada vez mais distorcida. **O Setor Elétrico**, São Paulo, v. 153, p. 86-87, 2018.

SHOJAIE, M.; MOKHTARI, H. A Method for Determination of Harmonics Responsibilities at the Point of Common Coupling using Data Correlation Analysis. **IET Generation, Transmission & Distribution**, Stevenage, v. 8, n. 1, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2013.0111>.

XU, W.; LIU, Y. A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Nova York, v. 15, n. 2, p. 804-811, Abril 2000. DOI: <https://doi.org/10.1109/61.853023>.

XU, W.; LIU, Y. A method to determine customer harmonic contributions for incentive-based harmonic control applications. **1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**, Edmonton, p. 361-366, 1999.