

Aplicação e Avaliação do Método da Impedância Dominante para Compartilhamento de Responsabilidade Harmônica em um Sistema Industrial

Luiz F. S. Souza*, Ivan N. Santos**

Patrick R. Almeida*, Flávio R. Garcia*

*BREE Eficiência Energética, Quatro Barras, Paraná, 83420-000

Brasil; (Tel: +55 41 3167-4021, +55 41 3167-4029, +55 41 3167-4001)

(e-mail: luiz.souza@bree.com.br, patrick.almeida@bree.com.br, flavio@bree.com.br)

**Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica, Uberlândia, Minas Gerais, 38408-100

Brasil (Tel +55 34 3239-4563); e-mail: ivan@ufu.br

Abstract: Faced with the growing use of non-linear electrical loads, which are potential sources of harmonic distortions, interest in the topic of sharing responsibility for harmonics has increased in electrical system. It is known that harmonics can generate several problems for the electrical network and for the loads connected to it, so mitigating measures, when required, should be shared between those responsible for the disturbances, in proportions correlated to the contribution of each consumer and supplier agent. In these terms, the present work aims to analyze the results of the application of the Dominant Impedance Method (MID) of harmonic responsibility sharing in a Brazilian industrial system.

Resumo: Diante do crescente emprego de cargas elétricas não lineares, as quais são potenciais fontes de distorções harmônicas, tem-se aumentado o interesse pela temática do compartilhamento de responsabilidade sobre os harmônicos presentes em um dado ponto do sistema elétrico. Sabe-se que os harmônicos podem gerar diversos problemas para a rede elétrica e para as cargas nela conectadas. Assim, medidas mitigatórias quando requeridas, deveriam ter seus custos compartilhados entre os responsáveis pelos distúrbios, em proporções correlatas à contribuição de cada agente consumidor e supridor. Nestes termos, o presente trabalho tem por objetivo analisar os resultados da aplicação Método da Impedância Dominante (MID) para compartilhamento de responsabilidade harmônica em um típico sistema industrial brasileiro.

Keywords: Responsibility Sharing; Harmonic Distortion; Dominant Impedance Method; Power Quality.

Palavras-chaves: Compartilhamento de Responsabilidade; Distorção Harmônica; Método da Impedância Dominante; Qualidade da Energia Elétrica.

1. INTRODUÇÃO

Desde a década de 90, as cargas não-lineares começaram a ser comumente utilizadas em ambientes residenciais, comerciais e industriais, devido ao fato de que estas cargas geram mais economia e produtividade, principalmente em sistemas industriais, em conformidade com Campos et al. (1992), Guerreiro et al. (2013) e Almeida et al (2019). Todavia, este tipo de carga, via de regra, injeta harmônicos de corrente na rede, sendo, portanto, potencial geradora de efeitos danosos aos equipamentos conectados ao sistema, podendo causar aumento das perdas elétricas, atuação indevida da proteção e até mesmo mau funcionamento e/ou queima de equipamentos, em consonância com Deckmann et al (2017).

Além disso, percebe-se um aumento da demanda de energia elétrica, a qual vem em conjunto com a necessidade de fornecê-la com um alto grau de confiabilidade e qualidade (Cossi, 2008 e Souza, 2021), respeitando os requisitos de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) de normas que tratam no âmbito nacional (ANEEL, 2010) quanto internacional (IEC, 1996 e IEEE, 1992). Tal aumento de demanda tem sido, nos últimos anos, suprido, em boa parcela, por gerações também de características não lineares, tais como geração

eólica e fotovoltaica. Neste contexto, e tendo em vista o aumento dos níveis de harmônicos em todos os segmentos do sistema elétrico brasileiro, tem-se um aumento da importância de investigações científicas voltadas para detecção dos responsáveis pela injeção de harmônicos no sistema elétrico, conforme destacado em Silva, S. F. P. (2007) e Rodrigues et al (2020). Esta temática encontra-se contemplada como estudos de compartilhamento de responsabilidade harmônica e, mesmo que ainda não exista um consenso na literatura acerca da responsabilidade harmônica na rede, vários trabalhos avançaram no desenvolvimento de metodologias para o compartilhamento de responsabilidade harmônica, conforme Xu et al (2002), Costa et al (2009), Silva e Oliveira (2008), Santos, I. N. (2011b) e Santos, A. C. (2019). Dentre as metodologias propostas, pode-se citar algumas como o método da corrente conforme e não-conforme (Srinivasan, K. et al, 1998), apresentando simplificações físicas e matemáticas que afetam sua adequação em termos práticos, conforme verifica Santos, A.C (2015). Outros métodos, como o método do fluxo de potência harmônica (Tanak, T. e Akagi, H. 1995) e o método da superposição de efeitos foram sugeridos, contudo alguns trabalhos, tais como os de Santos et al (2011a) e Santos, I.N. e Oliveira. J.C (2010), mostraram as fragilidades e

inconsistências, respectivamente, dos dois métodos supracitados. Pode-se também citar o Método da Impedância Dominante (MID), o qual atribui a responsabilidade da corrente harmônica, de ordem h , com a utilização de um filtro harmônico passivo sintonizado em ordem h no ponto de observação. Tal método trouxe resultados satisfatórios com possibilidade em implementação em campo, de acordo com investigações de Santos et al (2012).

Diante do cenário apresentado, este trabalho visa abordar um estudo de caso real, objetivando-se a obtenção de um compartilhamento de responsabilidades harmônicas entre um consumidor e um supridor, via aplicação de metodologia de compartilhamento. Para tanto, será empregado um estudo de caso no âmbito de uma indústria de papel brasileira, com a utilização do Método da Impedância Dominante (MID). Além disso, pretende-se também empregar o procedimento Extrapolção do Método da Impedância Dominante (EMID), para a obtenção do compartilhamento de responsabilidade em um ponto diferente de onde está se aplicando a metodologia.

Assim, o artigo encontra-se com a seguinte estrutura organizacional: introdução ao MID e ao EMID; apresentação das principais características da indústria a ser estudada e; avaliação e ponderações acerca dos resultados obtidos dos métodos.

2. FUNDAMENTAÇÃO DOS MÉTODOS

Segundo Santos. I. N (2011) podemos, de modo sucinto, afirmar que o MID permite relacionar o compartilhamento harmônico entre as partes envolvidas de um sistema utilizando filtros passivos instalados no local em questão, ou por meio da instalação de um dispositivo móvel de filtragem, voltado para tal finalidade. Ainda, é possível utilizar a EMID para estimar o compartilhamento de responsabilidades no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), desde que seja conhecido as impedâncias harmônicas do transformador. A Extrapolção do Método da Impedância Dominante se aplica em situações onde o ponto de aplicação da metodologia é distinto do local em que o compartilhamento precisa ser avaliado. Ressalta-se, ainda, que embora o trabalho de Santos. I. N (2011) tenha sido publicado como Método da Superposição modificado, o mesmo foi renomeado como Método da Impedância Dominantes devido ao seu princípio de funcionamento. Por fim, será apresentado a fundamentação teórica dos métodos abordados.

2.1 Método da Impedância Dominante (MID)

De maneira simplificada, pode-se sintetizar os sistemas elétricos do consumidor e do supridor como sendo conjuntos de cargas lineares e não lineares. Dito isto e uma vez que os estudos de harmônicos devem ser modelados no domínio da frequência, a Figura 1 ilustra um equivalente elétrico de Norton de um sistema elétrico genérico. No lado do consumidor existe uma fonte de corrente harmônica que representa a injeção harmônica advinda de suas cargas não lineares, em paralelo com a impedância equivalente desta rede. Por outro lado, no supridor, a fonte de corrente harmônica representa as pré-distorções existentes no PAC, estando em paralelo com a impedância representativa deste sistema.

O MID é aplicado quando é instalado, no ponto de interesse para o compartilhamento harmônico, uma impedância que, em uma determinada frequência (ou ordem h), apresente baixo valor. Via de regra, podemos utilizar para tal fim, um filtro harmônico passivo sintonizado nesta frequência de interesse, o que produzirá a impedância dominante necessária para aplicação da metodologia. A Figura 2 ilustra um arranjo elétrico, após a inserção de um filtro sintonizado em uma ordem h no PAC. A corrente \dot{I}_{f-h} representa a corrente que flui pelo filtro, enquanto \dot{I}_{pac-in} e $\dot{I}_{pac-out}$ indicam correntes que fluem pelo PAC à montante e à jusante do filtro, respectivamente.

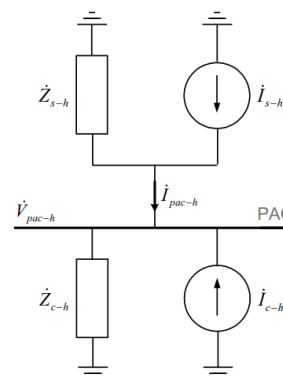


Fig. 1. Equivalente de Norton para o equivalente do sistema de concessionária e consumidor.

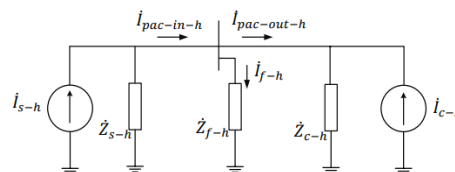


Fig. 2. Circuito elétrico equivalente com a inserção de um filtro sintonizado

Ao aplicar o teorema da Superposição de Efeitos ao sistema apresentado na Figura 2 e sabendo que a impedância \dot{Z}_f tem predominância em sua ordem h de sintonização, então é possível escrever a Equação 1, conforme metodologia.

$$\dot{I}_{f-h} = \dot{I}_{fs-h} + \dot{I}_{fc-h} \cong \dot{I}_{pac-in-h} + (-\dot{I}_{pac-out-h}) \quad (1)$$

Onde:

\dot{I}_{f-h} : Corrente harmônica total, de ordem h , que flui pelo filtro;

\dot{I}_{fs-h} : Parcela da corrente harmônica do supridor, de ordem h , que flui pelo filtro;

\dot{I}_{fc-h} : Parcela da corrente harmônica do consumidor, de ordem h , que flui pelo filtro;

$\dot{I}_{pac-in-h}$ e $\dot{I}_{pac-out-h}$: Correntes harmônicas, de ordem h , que fluem à montante e à jusante do ponto PM e da impedância dominante, respectivamente, considerando o filtro conectado.

Por fim, conhecendo-se as correntes \dot{I}_{f-h} , $\dot{I}_{pac-in-h}$ e $\dot{I}_{pac-out-h}$, é possível realizar a projeção dos fasores de corrente sobre o fasor de corrente total de ordem h da impedância dominante \dot{I}_{f-h} , conforme o MID sugere. Tal

projeção dos fasores é ilustrado na Figura 3. Para determinar a responsabilidade entre o supridor e o consumidor, basta determinar os percentuais dos números escalares encontrados nas projeções com relação ao módulo de I_{f-h} , onde este é tido como a totalidade, ou seja, 100%.

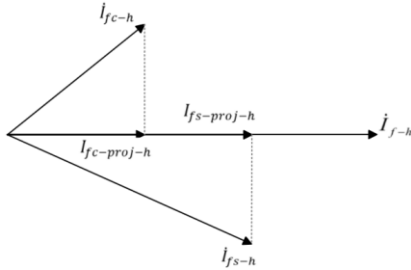


Fig. 3. Diagrama fasorial do Método da Impedância Dominante (MID) para a ordem harmônica h .

Além disso, para comprovação dos resultados, é necessário definir se a impedância inserida é suficientemente dominante no sistema. Para isto, segundo Santos, C. A. (2019), define-se o Parâmetro de Dominância (PD) conforme indica a Equação 2. Este parâmetro permite avaliar o nível de dominância do filtro inserido. Quanto mais próximo PD for da unidade, a impedância é mais dominante na ordem de sintonia h .

$$PD = \frac{DIT_{h\text{antes}}}{DIT_{h\text{antes}} + DIT_{h\text{após}}} \quad (2)$$

2.2 Extrapolação do Método da Impedância Dominante

Com o intuito de obter o compartilhamento de responsabilidades em um ponto distinto daquele conectado o filtro, este método viabiliza tal propósito, bastando apenas conhecer a impedância harmônica do transformador e realizar medições de correntes com e sem filtro inserido. Considere o circuito da Figura 4, onde PM representa o Ponto de Medição que será instalado a impedância dominante.

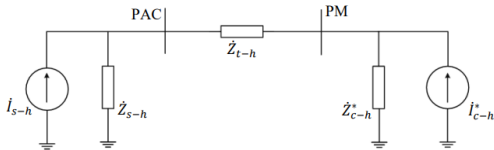


Fig. 4. Circuito elétrico equivalente considerando a impedância harmônica do transformador.

Uma vez que, para este método, as medições agora serão realizadas na barra PM (ao invés do PAC), então é conveniente reescrever o circuito da Figura 4 pelo arranjo da Figura 5. Os termos I_{c-h}^* e I_{s-h}^* indicam as novas correntes harmônicas de ordem h nesse novo arranjo. A partir da Figura 5, pode-se dividir o circuito em duas condições: com o filtro desligado e com o filtro ligado. As grandezas a serem medidas são:

V_{pm-h} : Tensão harmônica, de ordem h , a ser medida no ponto PM, considerando o filtro desconectado;

I_{pm-h} : Corrente harmônica, de ordem h , a ser medida no ponto PM, considerando o filtro desconectado;

Z_{f-h} : Impedância dominante, na ordem h , instada no ponto PM, considerando o filtro conectado;

$I_{pm-in-h}$ e $I_{pm-out-h}$: Correntes harmônicas, de ordem h , que fluem à montante e à jusante do ponto PM e da impedância dominante, respectivamente, considerando o filtro conectado;

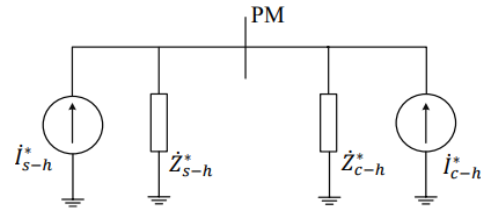


Fig. 5. Circuito elétrico equivalente considerando o ponto de medição PM.

Após realizado as medições e encontrado as grandezas, é possível então combinar as obter as correntes i_{s-h} e i_{c-h} , conforme mostra as equações (3) e (4).

$$i_{s-h} = \frac{V_{pm-h} \cdot I_{pm-in-h}}{V_{pm-h} - Z_{t-h} \cdot (I_{pm-in-h} - I_{pm-h})} \quad (3)$$

$$i_{c-h} = \frac{-V_{pm-h} \cdot I_{pm-out-h}}{V_{pm-h} + Z_{t-h} \cdot (I_{pm-h} - I_{pm-out-h})} \quad (4)$$

Assim, de maneira semelhante ao realizado no desenvolvimento do MID, é sugerido que, para a obtenção dos percentuais de responsabilidade do PAC, com relação ao consumidor e ao supridor, sejam feitos as projeções das correntes do consumidor e supridor em relação à soma das mesmas, conforme ilustra a Figura 6, onde $I_{s-proj-h}$ indica a projeção da corrente do supridor sobre a soma fasorial de $(I_{s-h} + I_{c-h})$, fornecendo a parcela de responsabilidade para o supridor, enquanto $I_{c-proj-h}$ indica a projeção da corrente do consumidor sobre a soma fasorial de $(I_{s-h} + I_{c-h})$ e resultado na parcela de responsabilidade para o consumidor.

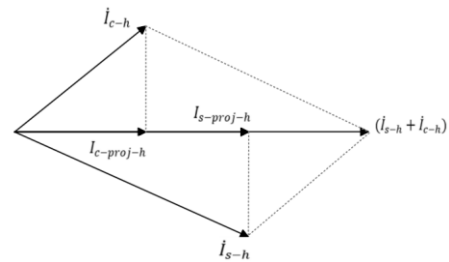


Fig. 6. Diagrama fasorial da Extrapolação do Método da Impedância Dominante (EMID) para a ordem harmônica h .

3. CASO REAL AVALIADO

Para aplicação prática da metodologia selecionada, foram utilizados os dados provenientes da instalação feita, pela

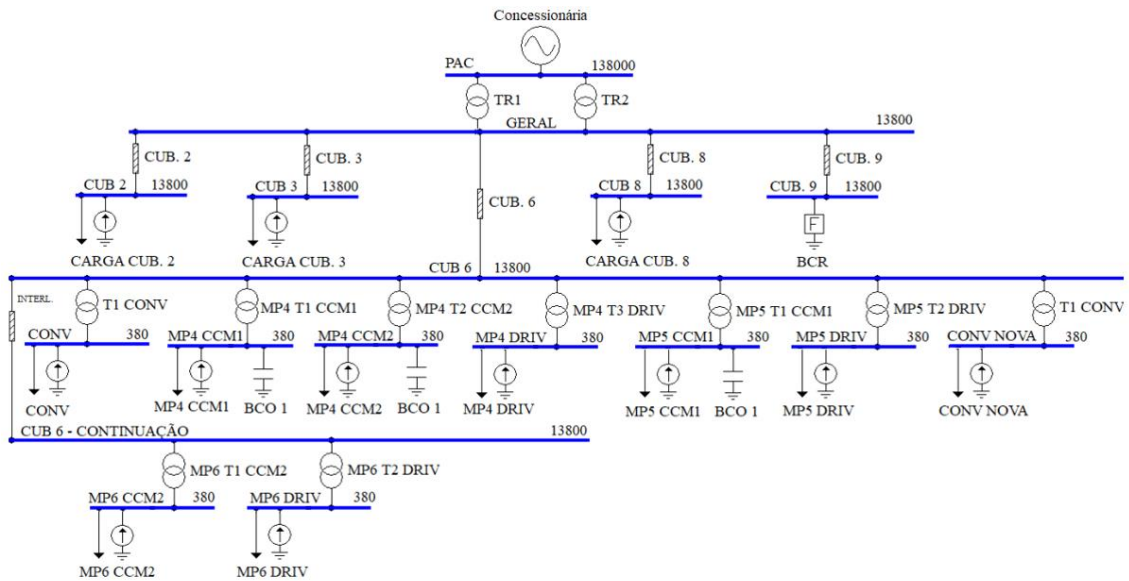


Fig. 7. Diagrama unifilar da indústria de papel utilizada no estudo de caso.

empresa BREE Eficiência Energética S.A, de um filtro harmônico passivo sintonizado em uma indústria de papel brasileira. Diante disso, foram feitas medições comprobatórias para a *start up* do filtro. A Figura 7 mostra o diagrama unifilar da indústria de papel em questão. O filtro foi instalado na baixa tensão (BT) do transformador MP6 e os medidores de qualidade da energia foram conectados no ponto de conexão filtro harmônico de 5ª ordem (FH) e no lado de BT do transformador supracitado. A Figura 8 mostra sucintamente os pontos de medição de correntes e a nomenclatura adotada em cada um destes pontos.

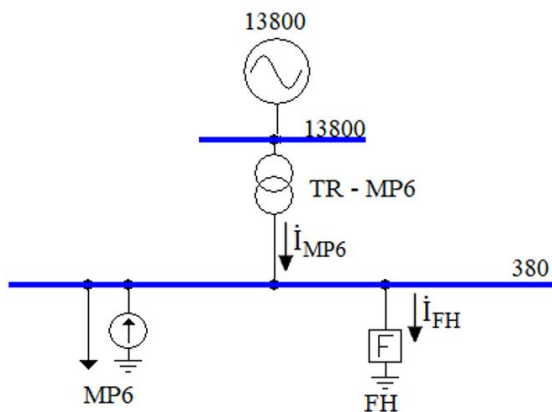


Fig. 8. Pontos de medição de corrente para aplicação do MID e EMID.

Neste estudo de caso, tem-se que o compartilhamento será realizado entre as cargas conectadas neste barramento de BT – consideradas como consumidor – e o restante do sistema à montante do transformador MP6 – considerado como sendo sistema supridor.

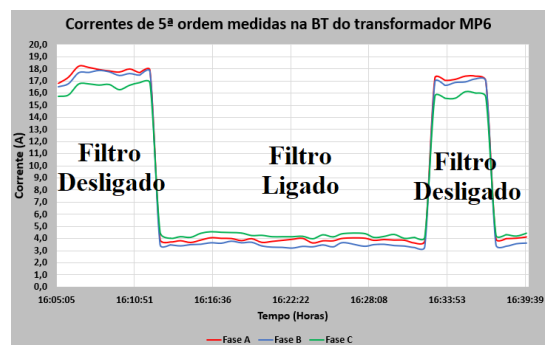


Fig. 9. Distorção harmônica total de corrente medida no secundário do transformador (MP6).

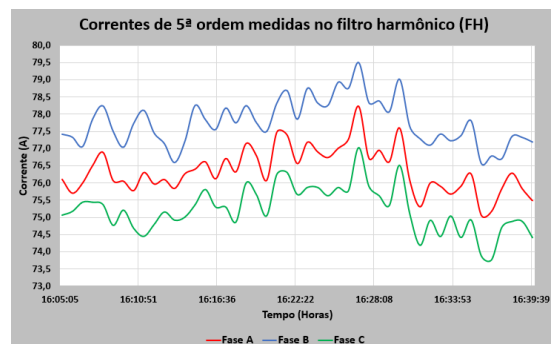


Fig. 10. Distorção harmônica total de corrente medida no ponto de conexão do filtro sintonizado (FH).

Por fim, as Figuras 9 e 10 mostram as correntes no transformador (MP6) e no filtro harmônico (FH), respectivamente, obtidas pelos medidores de energia instalados. Desta forma, pode-se então aplicar as metodologias MID e EMID para a obtenção do compartilhamento de responsabilidade, conforme já discutido.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 11 a 14 mostram os resultados obtidos para o compartilhamento harmônico entre o consumidor e o supridor, diante da aplicação do MID. De acordo com as Figuras 11 e

12, nota-se que os resultados de compartilhamento de responsabilidade harmônica são predominantes para o consumidor. Isto pode ser justificado devido à predominância dos harmônicos de 5ª ordem gerados pelas cargas conectadas neste barramento de BT sob análise (consumidor). A Figura 13 ilustra a composição fasorial, em um determinado instante de análise, das correntes de 5ª ordem em cada ponto de interesse do sistema para efeitos da aplicação do MID.

Ao longo do período de compartilhamento, percebe-se que os valores atribuídos para as três fases do sistema ABC são similares, quando levados em conta seus valores absolutos. Apesar da predominância dos harmônicos provenientes do consumidor, percebe-se que existe uma variação, ao longo do período de análise, que varia desde 80% até, aproximadamente, 100%. Em cada instante, o somatório do compartilhamento de responsabilidade entre o consumidor e o supridor deve ser de 100%, conforme já esperado. Observa-se também que, diante da Figura 13, a soma fasorial de $-I_{pac-out-h}$ e de I_{f-h} , resulta em $I_{pac-in-h}$, conforme a equação (1) apresentada e correlata ao MID.

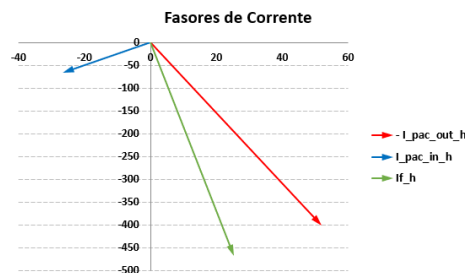


Fig. 13. Diagrama fasorial das correntes em um dos momentos do compartilhamento (16h13min30s).

Na sequência, a Tabela 1 mostra os parâmetros de dominância obtidos nos instantes em que o filtro é ligado e desligado. Para a aplicação deste método, foi necessário o chaveamento do filtro no sistema, o qual ocorreu em três momentos distintos, gerando as situações 1, 2 e 3. Diante das medições realizadas, foi possível obter o parâmetro de dominância (PD) para estes três casos.

Tabela 1. Parâmetros de dominância obtidos para o estudo em questão.

Parâmetro de Dominância	Situação 1	Situação 2	Situação 3
Fase A	82,04%	82,03%	81,08%
Fase B	83,60%	83,67%	83,05%
Fase C	78,88%	79,35%	78,54%

As Figuras 14 e 15 mostram os resultados obtidos do compartilhamento de responsabilidade harmônica do consumidor e supridor, respectivamente, ao aplicar a EMID. Nota-se que, para o compartilhamento do consumidor, os valores das situações 1, 2 e 3 se situaram entre 80% a 95%, enquanto o compartilhamento do supridor ficou entre cerca de 5% e, aproximadamente, 20%, valores estes que estão em consonância com os encontrados pelo MID.

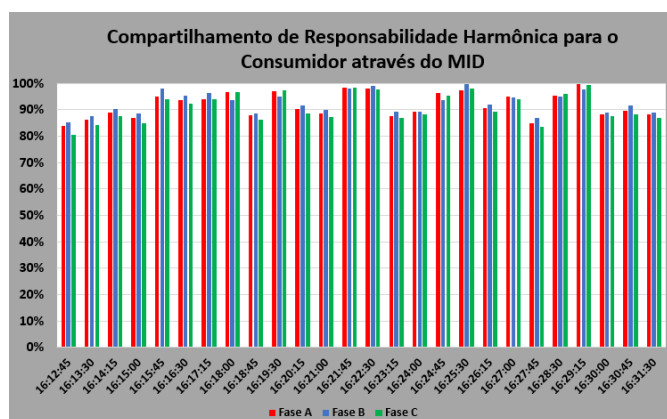


Fig. 11. Resultados obtidos para as parcelas de responsabilidade do consumidor, utilizando o MID.

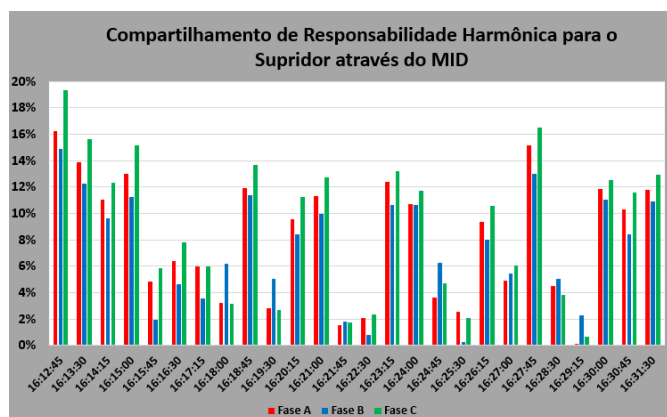


Fig. 12. Resultados obtidos para as parcelas de responsabilidade do supridor, utilizando o MID.

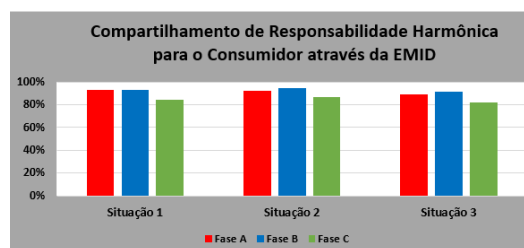


Fig. 14. Resultados obtidos para as parcelas de responsabilidade do consumidor, utilizando a EMID.

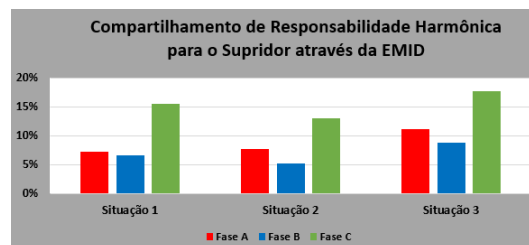


Fig. 15. Resultados obtidos para as parcelas de responsabilidade do supridor, utilizando a EMID.

Assim, percebe-se que os resultados da aplicação do MID na BT e do EMID na MT (extrapolação) foram muito semelhantes em termos percentuais.

6. CONCLUSÕES

A metodologia avaliada neste trabalho trouxe resultados coerentes com a realidade da instalação elétrica avaliada. Este trabalho mostrou, de forma pioneira, uma aplicação da metodologia a partir de medições realizadas provenientes da *start up* de um equipamento de filtragem harmônica, não sendo exclusivas à aplicação do MID e da EMID. Ademais, foram realizadas medições adicionais para a aplicação para a determinação dos fatores de dominância, o que também se mostrou em consonância com os valores tipicamente necessários à aplicação da metodologia de compartilhamento. Por fim, os resultados apresentados para a extrapolação foram satisfatórios e se mostraram condizentes com aqueles encontrados na aplicação direta do MID.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho demonstram seus sinceros agradecimentos ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia e à BREE Eficiência Energética pelo apoio estrutural.

REFERÊNCIAS

- Almeida, P.R., Garcia, F.R., Silva, A.M. e Lemes, M.I. (2019). Aplicação de Equipamentos de Compensação Reativa em Sistemas Industriais sob os Aspectos de Harmônicos e Transitórios de Manobra: Estudo de Casos Reais. *Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (CBQEEE)*, 29ago-01set, São Caetano do Sul, SP.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2010). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Brasília.
- Campos A., Joss G., Ziogas P. e Lindsay J. (1992). Analysis and design of a series voltage compensator for three-phase unbalanced sources. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 159-167, vol. 39. doi: 10.1109/41.166737.
- Cossi, A.M. (2008). Planejamento de redes de distribuição de energia elétrica de média e baixa tensão. 232 p. Tese UNESP, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.
- Costa, F.H., Silva, S.F.P., Santos, I.N., Oliveira, J.C. (2009). A Case Study of Sharing the Harmonic Voltage Distortion Responsibility Between the Utility and the Consumer. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Valencia (Spain).
- Deckmann, S.M. e Pomilio, J.A. (2017). Avaliação da qualidade da energia elétrica. 15 p. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. UNICAMP.
- Guerrero, J.M., Chandokar, M., Lee, T-L e Loh. P.C. (2013). Advanced control architectures for intelligent microgrids – part I: decentralized and hierarchical control. *IEEE Trans. Ind. Electron.* Vol 60, pp. 1254–1262.
- IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (1996). IEC 61000-3-6 – *Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3: Limits – Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems – Basic EMC*. Paris.
- IEEE – INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (1992). Std. 519-1992 – *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. New York, 1992
- Rodrigues, D. T., Arcadepani, M. B., Paredes, H. K., Moreira, A. C., & Bonaldo, J. P. (2020). Aplicação da Teoria de Potência Conservativa para Compartilhamento de Responsabilidade Devido à Distorções Harmônicas de Tensão. *Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*. 23-26 nov.
- Santos, A. C. (2015). Uma contribuição ao processo do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas via chaveamento de unidades capacitivas. 101 f. Dissertação, UFU, Uberlândia.
- Santos, A. C. (2019). Compartilhamento de responsabilidades harmônicas: análises, contribuições e proposições. 266 f. Tese, UFU, Uberlândia.
- Tanak, T. e Akagi, H. (1995). A new method of harmonic power detection based on the instantaneous active power in three-phase circuits. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 10, No. 4, pp 1737-1742, Out. 1995.
- Santos, I.N. e Oliveira, J.C. (2010). Avaliação Crítica do Método de Superposição de Correntes com vistas à Atribuição de Responsabilidade sobre as Distorções Harmônicas. *Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (CEEL)*, Uberlândia.
- Santos, I. N., Oliveira, J.C., Silva, S.F.P. (2011a). Avaliação do método do fluxo de potência harmônica para a identificação da fonte de distorção dominante. *Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (CBQEEE)*, Cuiabá.
- Santos, I. N. (2011b). Método da Superposição Modificado como uma Nova Proposta de Atribuição de Responsabilidades sobre Distorções Harmônicas. 2011. 159 p. Tese, UFU, Uberlândia.
- Santos, I.N., Reis, A.; Oliveira, J.C. (2012). Estudos Relacionados à Obtenção da Impedância Harmônica Dominante com Vistas à Aplicação do Método da Superposição Modificado. *Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (CEEL)*, Uberlândia.
- Silva, S. F. P. (2007). Uma proposta para o compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas. 106 p. Tese, UFU, Uberlândia.
- Silva, S.F.P. e Oliveira, J.C. (2008). The sharing of responsibility between the supplier and the consumer for harmonic voltage distortion: A case study. *Electric Power System*, v. 78, 11 p.
- Souza, L. F. S. (2021). Modelagem e análise eletromagnética e térmica de um transformador de distribuição a seco utilizando o método dos elementos finitos. 65 p. TCC, UFU, Uberlândia.
- Srinivasan, K. e Jutras, R. (1998). Conforming and nonconforming current for attributing steady state power quality problems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. vol. 13, pp 212–217.
- Xu, W., Liu, X. e Liu, Y. (2003). An investigation on the validity of power-direction method for harmonic source determination. *IEEE Transactions on Power Delivery*. vol. 18, pp 214–219.