

Investigação da Análise das Componentes Independentes na Determinação de Contribuições Harmônicas

Bárbara Morais Giancesini
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
barbara.giancesini@ufu.br

Vinicius Henrique Farias Brito
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
viniciushfb2@gmail.com

Ivan Nunes Santos
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
ivan.ufu@gmail.com

Resumo—As distorções harmônicas em sistemas elétricos de potência têm se tornado cada vez mais relevantes devido à presença crescente de cargas não lineares, resultando em efeitos adversos na qualidade da energia. Nesse contexto, a correta identificação das parcelas de responsabilidade entre os agentes da rede é fundamental para mitigar conflitos e estabelecer soluções técnicas justas. Dentre os procedimentos para quantificação das contribuições individuais, destaca-se o Método da Superposição. Todavia, sua aplicação prática requer o conhecimento das impedâncias harmônicas dos agentes, cuja obtenção em campo é um desafio. Diante dessa limitação, surge o Método de Análise de Componentes Independentes Complexas, do inglês *Method of Complex Independent Component Analysis* (MCICA), que, por meio de uma abordagem estatística e não invasiva, tem se demonstrado como uma alternativa aos métodos invasivos na estimação das impedâncias harmônicas. Assim, o presente artigo objetiva avaliar a eficácia do MCICA através de simulações computacionais utilizando o sistema teste de referência proposto pela *Task Force on Harmonics Modeling and Simulation da IEEE Power and Energy Society (IEEE-PES)*. Os resultados revelam que, quando tanto o supridor quanto o consumidor apresentam fontes harmônicas, o MCICA se mostra adequado. Entretanto, em situações em que apenas um dos agentes contribui para a distorção no ponto de acoplamento comum, o método pode apresentar resultados inconsistentes.

Palavras-chave—distorções harmônicas, análise de componentes independentes, método da superposição, impedância harmônica, compartilhamento de responsabilidade.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos atuais, em todo o mundo, contemplam um número expressivo de componentes com características não lineares em níveis de geração, transmissão e distribuição, bem como nas unidades consumidoras residenciais, comerciais e industriais. A crescente proliferação desses equipamentos não lineares tem elevado significativamente os níveis de distorção harmônica em todos os segmentos dos sistemas elétricos, tornando os problemas ocasionados pelas distorções harmônicas mais frequentes e críticos [1], [2], [3], [4], [5], [6].

A preocupação com o aumento dos níveis de harmônicos justifica-se pelos impactos potencialmente prejudiciais que as distorções de tensão e corrente podem causar à confiabilidade, segurança e vida útil de equipamentos conectados às redes [7], [8], [9]. Diante deste cenário, uma vez constatadas violações

dos limites normativos, torna-se necessária a adoção de medidas mitigatórias para controle dos níveis harmônicos. Contudo, as soluções técnicas requeridas podem implicar em custos elevados, gerando conflitos entre os agentes quanto à responsabilidade pela implementação dessas soluções.

Como ilustrado na Fig. 1, a tensão harmônica no ponto de acoplamento comum (PAC) surge da combinação entre contribuições do sistema supridor (a montante) e do consumidor (a jusante), ou seja, resultam da interação das emissões harmônicas das diversas instalações existentes no sistema elétrico. Nesse contexto, a determinação das contribuições de cada agente para a distorção total do PAC constitui um tema relevante. Essa temática, normalmente denominada de compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas, é fundamental para a definição de métodos que permitam quantificar as parcelas individuais de cada agente e assim conduzir a uma divisão justa das responsabilidades técnicas e respectivas implicações econômicas correlatas à solução dos problemas de distorções harmônicas.

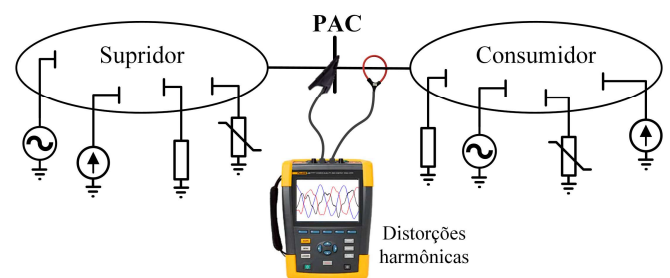


Fig. 1. Distorções harmônicas de tensão e corrente medidas em um ponto de acoplamento comum (PAC) conectando um consumidor a um sistema supridor.

A literatura recente evidencia um grande número de publicações e pesquisas nessa área com a proposição de diversos métodos para o compartilhamento de responsabilidade sobre as distorções harmônicas [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16]. Dentre os procedimentos existentes, o Método da Superposição (MS) [17] se destaca por ser fundamentado em princípios consolidados de análise de circuitos, permitindo a estimação adequada das contribuições harmônicas por meio de medições de tensão e corrente, e também da informação das impedâncias

harmônicas equivalentes dos agentes supridor e consumidor. Apesar da consistência teórica do MS, existem desafios para sua aplicação em ambiente prático, principalmente relacionados à determinação das impedâncias dos agentes que, muitas vezes, não se mantêm constantes devido à dinâmica de operação dos sistemas elétricos.

Para contornar essa limitação, são propostos métodos para determinação das impedâncias harmônicas dos agentes, os quais podem ser classificados em duas categorias: invasivos e não invasivos. Os métodos invasivos são baseados na injeção de perturbações controladas na rede para estimar as impedâncias. Embora sejam reconhecidos pela alta precisão nas estimativas, a necessidade de injeção de sinais que podem causar distúrbios limita a aplicação desses métodos [18]. Além disso, métodos invasivos não podem ser utilizados em aplicações em tempo real. Em contrapartida, os métodos não invasivos aproveitam as variações naturais da rede para determinar as impedâncias dos agentes e assim calcular as contribuições harmônicas.

Este artigo concentra-se nos métodos não invasivos, com ênfase no Método de Análise de Componentes Independentes Complexas, do inglês *Method of Complex Independent Component Analysis* (MCICA). O MCICA baseia-se na independência estatística e na natureza não gaussiana das correntes harmônicas de variação rápida dos agentes, apresentando resultados consistentes em estudos comparativos com demais métodos não invasivos [19].

Portanto esse artigo tem como objetivo uma avaliação do MCICA utilizando simulações computacionais em um sistema teste de referência proposto pela *Task Force on Harmonics Modeling and Simulation da IEEE Power and Energy Society (IEEE-PES)*. Em particular, são consideradas diferentes condições de operação para investigar o desempenho do Método de Análise de Componentes Independentes Complexas em comparação com o Método da Superposição.

II. MÉTODO DE ANÁLISE DE COMPONENTES INDEPENDENTES COMPLEXAS PARA DETERMINAÇÃO DE CONTRIBUIÇÕES HARMÔNICAS

Métodos baseados em técnicas de separação cega de fontes vêm ganhando relevância em estudos de determinação de contribuições harmônicas, com destaque para aplicações da Análise de Componentes Independentes Complexos, do inglês *complex independent component analysis* (CICA) [19], [20], [21], [22], [23], [24]. Os métodos baseados na técnica CICA permitem estimar estatisticamente as impedâncias harmônicas dos agentes, viabilizando a aplicação do Método da Superposição para determinação das contribuições harmônicas do supridor e do consumidor conectados ao PAC. Portanto, será abordado, primeiramente, os conceitos referentes à técnica CICA, na sequência serão apresentados os fundamentos da técnica CICA, a metodologia para estimação das impedâncias, e a aplicação do Método da Superposição.

A. Fundamentos da Análise de Componentes Independentes Complexas (CICA)

A CICA é uma técnica estatística de processamento de sinais utilizada para recuperar sinais de fontes independentes a partir de sinais medidos. Esta aplicação é usada quando não se conhece a maneira como os sinais das fontes independentes

foram misturados [25], ou seja, é uma técnica de separação cega de fontes. Seu modelo matemático é descrito por:

$$X(t) = A.S(t) \quad (1)$$

Sendo t o tempo discreto ($t = 1, 2, \dots, k$), $S(t) = [S_1(t), S_2(t), \dots, S_n(t)]^T$ corresponde à matriz dos sinais das fontes, de dimensão $n \times k$ (componentes independentes); $X(t) = [X_1(t), X_2(t), \dots, X_m(t)]^T$ é a matriz com os sinais medidos, de dimensão $m \times k$; e A é a matriz de mistura dos sinais, de ordem $m \times n$.

O objetivo da técnica CICA é estimar a matriz de mistura (A) conhecendo apenas os sinais medidos (X), permitindo a recuperação dos sinais das fontes independentes (S). Para isso, três premissas principais devem ser satisfeitas [26]:

- Os sinais das fontes devem ser estatisticamente independentes entre si;
- No máximo um dos sinais das fontes da matriz S pode ter distribuição gaussiana;
- O número de sinais das fontes (n) deve ser menor ou igual ao número de sinais medidos (m).

Assim, conhecendo a matriz dos sinais medidos e aplicando a técnica CICA, determina-se uma matriz de separação (W^H), que corresponde a uma estimativa da matriz inversa de A , o que possibilita recuperar os sinais das fontes utilizando (2):

$$\hat{S} = W^H.X \quad (2)$$

Onde: $\hat{S}$ corresponde à matriz dos sinais das fontes estimados, e W^H é a matriz de separação. O índice H especifica que a matriz W é Hermitiana, isso significa que W é igual à sua própria transposta conjugada.

A técnica CICA se baseia em propriedades estatísticas para determinação da matriz W^H , buscando soluções por meio da maximização da independência e da não-gaussianidade dos sinais das fontes. Diversos algoritmos podem ser empregados para esse fim, mas, antes de sua aplicação, é necessário um pré-processamento dos dados medidos para simplificar e otimizar o problema. Esse pré-processamento envolve duas etapas: centralização e branqueamento [25]. Com a matriz dos sinais medidos centralizados e branqueados, aplica-se então o algoritmo CICA para estimar a matriz W^H . Por fim, obtêm-se as estimativas dos sinais das fontes independentes por:

$$\hat{S} = (W^H.Q).X = U.X \quad (3)$$

Sendo $U = W^H.Q$, onde Q corresponde à matriz de branqueamento utilizada na etapa de pré-processamento [25].

B. Aplicação da Técnica CICA para Determinação das Impedâncias Harmônicas

Com base nos conceitos associados à técnica CICA, em [19] é descrito um método para estimar as impedâncias harmônicas do supridor e do consumidor, denominado de *Method of Complex Independent Component Analysis* (MCICA). O MCICA utiliza o algoritmo FastICA para maximizar a não-gaussianidade dos sinais das fontes por meio da aplicação da teoria de iteração do ponto-fixa, usando como função objetivo uma aproximação da negentropia [27]. Nesse trabalho, não serão detalhados os fundamentos do FastICA,

todavia, em [28] é disponibilizado o algoritmo para diferentes linguagens de programação.

Para aplicar o MCICA, adota-se o modelo equivalente de Norton apresentado na Fig. 2, que representa o comportamento dos agentes conectados ao PAC.

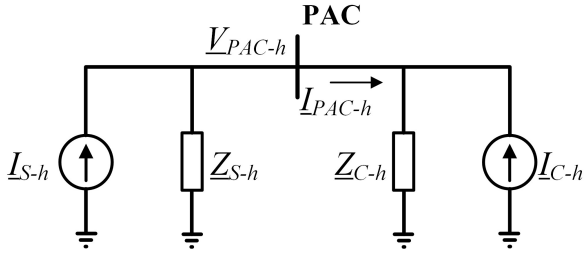


Fig. 2. Circuito equivalente de Norton.

Onde: V_{PAC-h} e I_{PAC-h} correspondem à tensão e corrente harmônica de ordem h medidas no PAC, I_{S-h} e I_{C-h} representam as fontes de correntes harmônicas advindas do supridor e do consumidor, respectivamente, e Z_{S-h} e Z_{C-h} são as impedâncias harmônicas dos agentes.

Utilizando como referência o circuito elétrico da Fig. 2 pode-se encontrar a equação matricial definida em (4).

$$\begin{bmatrix} V_{PAC-h}(t) \\ I_{PAC-h}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{Z_{S-h}Z_{C-h}}{Z_{S-h}+Z_{C-h}} \right) & \left(\frac{Z_{S-h}Z_{C-h}}{Z_{S-h}+Z_{C-h}} \right) \\ \left(\frac{Z_{S-h}}{Z_{S-h}+Z_{C-h}} \right) & \left(\frac{-Z_{C-h}}{Z_{S-h}+Z_{C-h}} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{S-h}(t) \\ I_{C-h}(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Ou, de maneira simplificada: $M = ZI$

Vale destacar que a matriz M possui dimensão $2 \times k$, enquanto Z é uma matriz 2×2 e I tem dimensão $2 \times k$, sendo k a quantidade de amostras consideradas para aplicação do MCICA. Ressalta-se que o método em questão considera que as impedâncias dos agentes são mantidas constantes ao longo do período de análise.

Observa-se que o modelo matemático da CICA (2) pode ser relacionado com a equação (4) do seguinte modo:

- os sinais de tensão e corrente medidos no PAC (M) correspondem aos sinais medidos (X);
- a matriz de impedâncias (Z) corresponde à matriz de mistura (A); e
- as fontes harmônicas de corrente dos sistemas supridor e consumidor (I) correspondem aos sinais das fontes independentes (S).

Portanto, ao aplicar a CICA, pode-se determinar a matriz de impedâncias tendo como dados de entrada somente as grandezas elétricas medidas no PAC. Antes, contudo, é necessário verificar se as premissas da técnica são atendidas. Neste contexto, nota-se que o número de sinais das fontes é igual ao número de sinais medidos, satisfazendo uma das condições. Entretanto, a premissa de que os sinais das fontes (I_{S-h} e I_{C-h}) sejam estatisticamente independentes e não-gaussianas normalmente não se verificam em sistemas elétricos reais, pois fatores como condições climáticas, hora do dia, dia da semana e estação do ano podem introduzir correlação entre as correntes harmônicas.

Para contornar esse problema, os autores em [19] sugerem utilizar como dados de entrada para aplicação do MCICA as componentes de variação rápida dos sinais medidos. Essa abordagem possibilita a aplicação da técnica CICA, pois, segundo os autores, as componentes de variação rápida das correntes das cargas harmônicas ($I_{S-h-fast}$ e $I_{C-h-fast}$) possuem distribuição não-gaussiana e são estatisticamente independentes. A componente de variação rápida pode ser obtida através da aplicação de um filtro de média móvel na matriz M . Assim, visando as componentes de variação rápida, a equação (4) torna-se:

$$\begin{bmatrix} V_{PAC-h-fast}(t) \\ I_{PAC-h-fast}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{Z_{S-h}Z_{C-h}}{Z_{S-h}+Z_{C-h}} \right) & \left(\frac{Z_{S-h}Z_{C-h}}{Z_{S-h}+Z_{C-h}} \right) \\ \left(\frac{Z_{S-h}}{Z_{S-h}+Z_{C-h}} \right) & \left(\frac{-Z_{C-h}}{Z_{S-h}+Z_{C-h}} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{S-h-fast}(t) \\ I_{C-h-fast}(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Ou, de maneira simplificada: $M_{fast} = Z \cdot I_{fast}$

A partir das componentes de variação rápida dos sinais de tensão e corrente medidos no PAC (M_{fast}) e aplicando a técnica CICA, obtém-se a matriz de separação W^H e, posteriormente, a matriz U , definida por $U = W^H \cdot Q$.

O MCICA utiliza os elementos da matriz U , de dimensão 2×2 , na determinação de duas impedâncias harmônicas:

$$Z_1 = \frac{u_{12}}{u_{11}} \quad (6)$$

$$Z_2 = -\frac{u_{22}}{u_{21}} \quad (7)$$

Onde u_{ij} é o elemento da linha i e coluna j da matriz U .

Para identificar qual das duas impedâncias (Z_1 e Z_2) são relativas ao supridor e ao consumidor, assume-se que a parte real da impedância (resistência) do sistema supridor é sempre positiva.

Assim, se $\Re(Z_1) > 0$, então $\begin{cases} Z_{S-h} = Z_1 \\ Z_{C-h} = Z_2 \end{cases}$

No entanto, se $\Re(Z_1) \leq 0$, então $\begin{cases} Z_{S-h} = -Z_2 \\ Z_{C-h} = -Z_1 \end{cases}$

Como a CICA é uma ferramenta matemática que pode ser aplicada a diversos tipos de sinais (acústica, processamento de imagens, etc), pode ser coerente que tais sistemas apresentem parâmetros negativos para a matriz de mistura. No caso dos sistemas elétricos, não se espera que existam resistências negativas para o agente supridor, por isso faz-se a inversão de sinais das impedâncias neste caso.

C. Cálculo das Contribuições pelo Método da Superposição

Para determinar as tensões individuais de responsabilidade do supridor e do consumidor, aplica-se o Teorema da Superposição ao circuito equivalente de Norton da Fig. 2. Dessa forma, obtém-se as equações (8) e (9), respectivamente.

$$V_{S-PAC} = \left(\frac{Z_{S-h}Z_{C-h}}{Z_{S-h}+Z_{C-h}} \right) \cdot \left(\frac{V_{PAC-h}}{Z_{S-h}} + I_{PAC-h} \right) \quad (8)$$

$$V_{C-PAC} = \left(\frac{Z_{S-h}Z_{C-h}}{Z_{S-h}+Z_{C-h}} \right) \cdot \left(\frac{V_{PAC-h}}{Z_{C-h}} - I_{PAC-h} \right) \quad (9)$$

Onde:

$$\underline{V}_{PAC-h} = \underline{V}_{S-PAC} + \underline{V}_{C-PAC} \quad (10)$$

Portanto, para determinar as tensões de responsabilidade dos agentes, é necessário conhecer as impedâncias harmônicas, bem como a tensão e corrente harmônica no PAC. Desse modo, considerando um período de medição com k amostras de tensões e correntes harmônicas, pode-se empregar a técnica CICA para estimar as impedâncias dos agentes e, em seguida, calcular as tensões de responsabilidade de cada um. Ressalta-se que as equações estabelecidas devem ser aplicadas para cada amostra obtida durante o período de análise.

Na sequência, calcula-se a contribuição de cada agente para a tensão total no PAC por meio da projeção dos fasores $\underline{V}_{S-PAC-h}$ e $\underline{V}_{C-PAC}$ sobre $\underline{V}_{PAC-h}$, conforme ilustrado na Fig. 3. As respectivas projeções são denotadas como $V_{S-PAC-pj-h}$ e $V_{C-PAC-pj-h}$.

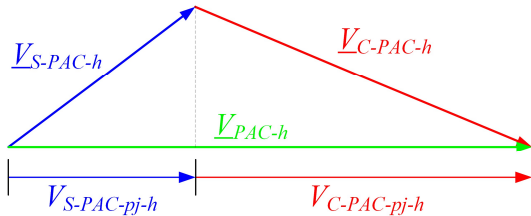


Fig. 3. Diagrama fasorial das contribuições de tensão e projeções.

O Método da Superposição indica que os índices de contribuição das partes envolvidas podem ser expressos em termos percentuais, a partir das projeções obtidas [29]. Entretanto, para fins de avaliação do MCICA neste artigo, serão analisados diretamente os valores de $V_{S-PAC-pj-h}$ e $V_{C-PAC-pj-h}$, o que permite uma análise objetiva da eficiência do método em questão.

III. SISTEMA TESTE DE REFERÊNCIA PARA ESTUDOS SOBRE A DETERMINAÇÃO DAS CONTRIBUIÇÕES HARMÔNICAS DO IEEE

Com o objetivo de investigar métodos e procedimentos para determinação das contribuições harmônicas dos diversos agentes conectados aos sistemas elétricos de potência, a *Task Force on Harmonics Modeling and Simulation da IEEE Power and Energy Society (IEEE-PES)* desenvolveu um sistema elétrico de referência destinado à aplicação e análise de tais métodos, possibilitando a avaliação e comparação por meio de simulações computacionais padronizadas [30]. O diagrama unifilar desse sistema é mostrado na Fig. 4.

O sistema teste representa uma rede elétrica com diferentes níveis de tensão: alta tensão (AT), média tensão (MT) e baixa tensão (BT), suprido três consumidores industriais, cada um com o seu respectivo PAC em MT. Esses consumidores são compostos por cargas lineares (resistivas-indutivas e motores), cargas não lineares (retificadores), bancos de capacitores e filtros harmônicos passivos. Além dos consumidores, também se encontram conectados à subestação um banco de capacitores e uma carga trifásica resistiva-indutiva pertencentes à rede da concessionária. Todos os componentes do sistema são trifásicos e equilibrados e a frequência nominal é de 50 Hz.

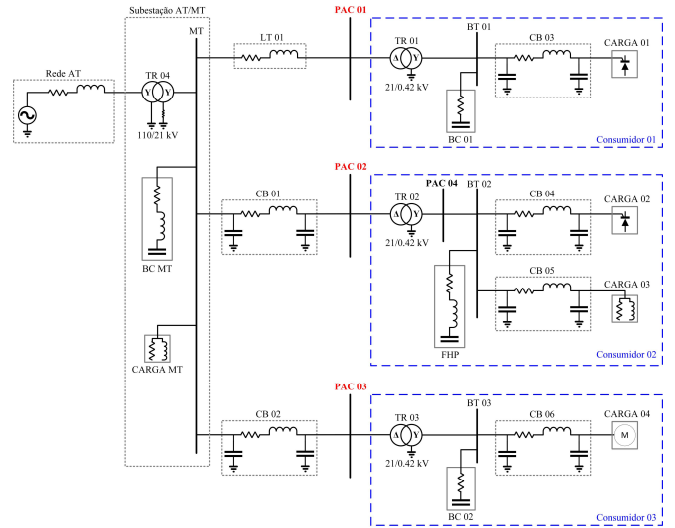


Fig. 4. Sistema teste de referência para estudos sobre a determinação das contribuições harmônicas do IEEE (IEEE-BTS-HCD).

Neste artigo são utilizadas as três diferentes condições (A, B e C) para a rede elétrica em análise. As configurações referentes a cada condição operativa estão detalhadas na Tabela I. As condições A e B são similares, diferenciando-se apenas pelos parâmetros do Consumidor 03. Em ambas, o Consumidor 02 encontra-se desligado, de modo que apenas o Consumidor 01 possui cargas não lineares. Na Condição C, todos os elementos da rede estão conectados, com fontes harmônicas presentes nos Consumidores 01 e 02. É importante mencionar que a Condição B é especial, pois os parâmetros do Consumidor 03 foram ajustados para causar uma ressonância próxima à 11ª ordem. Informações adicionais acerca dos componentes e de suas parametrizações, nas três condições analisadas, podem ser encontradas em [30].

TABELA I
VISÃO GERAL DAS TRÊS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO IEEE-BTS-HCD

Elementos do Sistema	Condição A	Condição B	Condição C
Consumidor 01			
Retificador a tiristor (CARGA 01)	ligado	ligado	ligado
Banco de capacitores (BC 01)	ligado	ligado	ligado
Consumidor 02			
Retificador a tiristor (CARGA 02)	desligado	desligado	ligado
Carga linear (CARGA 03)	desligada	desligada	ligada
Filtro harmônico passivo (FHP)	desligado	desligado	ligado
Consumidor 03			
Motor de indução (CARGA 04)	200 kW, fp 0,9	600 kW, fp 0,9	200 kW, fp 0,9
Banco de capacitores (BC 02)	50 kVAr	150 kVAr	50 kVAr
Carga MT			
(CARGA MT)	ligada	ligada	ligada
Banco de capacitores MT			
(BC MT)	desligado	desligado	ligado

Neste sistema, as maiores distorções harmônicas encontradas nas simulações foram correlatas às ordens 5ª, 7ª, 11ª e 13ª, conforme já era esperado pela característica dos

retificadores trifásicos de 6 pulsos presentes nos Consumidores 01 e 02. Desse modo, apenas essas ordens harmônicas serão consideradas na aplicação do MCICA. A Tabela II sintetiza os indicadores de distorção harmônica de tensão individuais (DTHI) e total (DTHT) nas 3 condições de operação do IEEE-BTS-HCD. Para os casos A e B, como o consumidor 2 está desconectado, não foram apresentados os valores das distorções para o PAC 02.

TABELA II DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO, INDIVIDUAIS E TOTAIS, DO IEEE-BTS-HCD.

		Condição A	Condição B	Condição C
DTHI _{5^a}	PAC 01	0,21%	0,21%	0,33%
	PAC 02	-	-	0,33%
	PAC 03	0,20%	0,20%	0,32%
DTHI _{7^a}	PAC 01	0,16%	0,16%	0,30%
	PAC 02	-	-	0,30%
	PAC 03	0,15%	0,15%	0,29%
DTHI _{11^a}	PAC 01	0,19%	0,24%	0,34%
	PAC 02	-	-	0,34%
	PAC 03	0,18%	0,23%	0,34%
DTHI _{13^a}	PAC 01	0,05%	0,04%	0,14%
	PAC 02	-	-	0,15%
	PAC 03	0,04%	0,03%	0,14%
DTHT	PAC 01	0,33%	0,36%	0,58%
	PAC 02	-	-	0,58%
	PAC 03	0,31%	0,34%	0,57%

Vale destacar que ao aplicar o MCICA em um PAC que conecta um agente consumidor à rede, os demais agentes conectados passam a fazer parte do circuito equivalente do supridor. No PAC 01 da Fig. 4, por exemplo, o consumidor considerado é o Consumidor 01, enquanto o supridor compreende o restante do sistema elétrico, que inclui o Consumidor 02, o Consumidor 03, a subestação e a Rede AT. Esse raciocínio é válido para os outros PACs do sistema.

Sabe-se que a aplicação do MCICA se baseia na decomposição dos sinais de tensão e corrente harmônicas em seus componentes rápidos e lentos. Entretanto, o sistema teste é simulado com condições de operação fixas, isto é, sem variações dos valores das tensões e correntes ao longo do tempo. Para possibilitar a aplicação do MCICA, introduziu-se uma variação rápida nas cargas dos três consumidores, resultando, por consequência, em flutuações nos sinais de tensão e corrente dos PACs. Essas variações foram modeladas por meio de uma distribuição de Laplace (super-gaussiana), com média zero e variância de 0,002, totalizando 1440 amostras, conforme proposto em [19].

Com os dados de tensões e correntes harmônicas obtidos nos PACs, aplicou-se o filtro de média móvel para extrair as componentes de variação rápida. Em seguida, seguindo o procedimento descrito na Seção II, foram calculadas as contribuições de cada agente ($V_{S-PAC-pj-h}$ e $V_{C-PAC-pj-}$).

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse tópico são apresentados os valores de contribuição de cada agente para as três condições estabelecidas, e considerando os 3 PACs em MT. No entanto, para os casos A e B, como o consumidor 2 está desconectado, o método não será aplicado no PAC 02. Além dos resultados do MCICA, também são apresentados os resultados para o Método da Superposição (MS), uma vez que através da simulação é possível calcular as impedâncias corretas dos agentes. Assim, o MS será usado como referência para avaliação do MCICA.

A. Condição A

A Tabela III apresenta as projeções dos fasores de contribuição do sistema supridor ($V_{S-PAC-pj-h}$) e do sistema consumidor ($V_{C-PAC-pj-}$) para o MCICA e o MS. As divergências superiores a 5% estão em destaque.

TABELA III RESULTADOS DO MCICA EM COMPARAÇÃO COM O MS - CONDIÇÃO A.

Condição A		PAC 01		PAC 03	
		$V_{S-PAC-pj}$ [V]	$V_{C-PAC-pj}$ [V]	$V_{S-PAC-pj}$ [V]	$V_{C-PAC-pj}$ [V]
5 ^a h	MS	0,0	24,7	23,3	0,0
	MCICA	25,2	-0,4	23,7	-0,3
7 ^a h	MS	0,0	18,9	17,8	0,0
	MCICA	0,2	18,7	0,1	17,7
11 ^a h	MS	0,0	23,3	22,1	0,0
	MCICA	23,1	0,2	-0,3	22,4
13 ^a h	MS	0,0	5,5	5,3	0,0
	MCICA	0,0	5,5	0,1	5,2

Como o Consumidor 02 está desconectado do sistema, sabe-se que o Consumidor 01 é o único que contribui para as distorções harmônicas de tensão verificadas no PAC 01. No PAC 03, por outro lado, todas as contribuições de tensão vêm do sistema supridor, já que o Consumidor 03 não dispõe de fontes harmônicas. Isso é confirmado pelos resultados do MS.

Ao aplicar o MCICA no PAC 01, observam-se inconsistências nas ordens 5^a e 11^a, em que as contribuições foram estimadas de forma invertida. Para o PAC 03, apenas a 5^a ordem foi devidamente computada.

B. Condição B

A Tabela IV sintetiza os resultados obtidos pelos métodos para a condição B.

Apesar das alterações dos parâmetros do Consumidor 03 nessa condição, ele permanece linear, isto é, sem fontes harmônicas. Como na condição A, no PAC 01 toda a distorção decorre do Consumidor 01, enquanto que no PAC 03 o sistema supridor é totalmente responsável pela distorção de tensão. Os resultados do MS confirmam esse cenário.

Em relação ao MCICA, observam-se novamente inversões na alocação das contribuições harmônicas, em especial para a 13^a ordem no PAC 01 e a 5^a ordem no PAC 03, o que sugere a mesma dificuldade de separação identificada na Condição A.

TABELA IV RESULTADOS DO MCICA EM COMPARAÇÃO COM O MS- CONDIÇÃO B.

Condição B		PAC 01		PAC 03	
		$V_{S-PAC-pj}$ [V]	$V_{C-PAC-pj}$ [V]	$V_{S-PAC-pj}$ [V]	$V_{C-PAC-pj}$ [V]
5ª h	MS	0,0	24,9	23,6	0,0
	MCICA	-0,5	25,4	-0,4	24,0
7ª h	MS	0,0	19,3	18,3	0,0
	MCICA	0,1	19,2	18,2	0,1
11ª h	MS	0,0	28,1	28,0	0,1
	MCICA	0,3	27,8	28,5	-0,4
13ª h	MS	0,0	4,4	4,0	0,0
	MCICA	4,3	0,1	3,9	0,0

C. Condição C

Por fim, para a condição C, os resultados para os métodos estão disponibilizados na Tabela V.

TABELA V RESULTADOS DO MCICA EM COMPARAÇÃO COM O MS- CONDIÇÃO C.

Condição C		PAC 01		PAC 02		PAC 03	
		$V_{C-PAC-pj}$ [V]	$V_{S-PAC-pj}$ [V]	$V_{C-PAC-pj}$ [V]	$V_{S-PAC-pj}$ [V]	$V_{C-PAC-pj}$ [V]	$V_{S-PAC-pj}$ [V]
5ª h	MS	11,9	27,3	25,8	13,9	38,0	0,0
	MCICA	12,4	26,8	26,4	13,1	38,8	-0,8
7ª h	MS	10,1	26,0	24,7	11,1	35,0	0,0
	MCICA	10,5	25,5	24,5	11,3	-0,4	35,4
11ª h	MS	2,5	38,3	37,4	4,0	40,6	0,0
	MCICA	2,4	38,5	36,7	4,7	40,5	0,1
13ª h	MS	8,5	8,5	8,8	9,0	17,3	0,0
	MCICA	8,8	8,1	8,6	9,2	18,0	-0,7

Nessa condição, no PAC 01 e no PAC 02, ambas as partes envolvidas (supridor e consumidor) contribuem para a tensão harmônica, pois tanto o Consumidor 01, quanto o Consumidor 02, possuem cargas não lineares. Conforme mostram os resultados do MS, no PAC 01, para a 5ª, 7ª e 11ª ordens, o Consumidor 01 apresenta maior contribuição para a distorção de tensão. O oposto acontece no PAC 02, pois o sistema supridor contribui mais nestas ordens. Para a 13ª ordem, ambas as partes contribuem quase igualmente para a distorção de tensão. A natureza complementar das contribuições do Consumidor 01 e do Consumidor 02 é coerente, pois apenas esses agentes apresentam cargas não lineares nesta condição.

No PAC 03, por sua vez, as fontes harmônicas dos Consumidores 01 e 02 fazem parte do sistema supridor e o Consumidor 03 continua sendo linear, não possuindo fontes harmônicas. Portanto, toda contribuição para a distorção de tensão desse PAC advém do supridor.

Em relação ao MCICA, observa-se que este apresentou resultados convergentes com os do MS para o PAC 01 e PAC 02. Para o PAC 03 houve uma divergência do MCICA em comparação com o MS para a 7ª ordem, onde as contribuições dos sistemas supridor e consumidor foram obtidas de forma trocada, onde, mesmo o Consumidor 03 sendo totalmente linear, praticamente 100% da contribuição foi atribuída a ele.

Além disso, percebe-se, nas três condições de operação, que em alguns casos os resultados do MCICA apresentaram valores negativos. É válido dizer que as projeções negativas representam situações em que o respectivo agente estaria contribuindo para reduzir a distorção de tensão no PAC sob análise.

V. CONCLUSÕES

O artigo em questão realiza um estudo avaliativo do Método de Análise de Componentes Independentes Complexos (MCICA), avaliando sua efetividade sob diferentes cenários de operação de uma rede elétrica. O artigo utiliza simulação computacional da rede elétrica proposta pela *Task Force on Harmonics Modeling and Simulation da IEEE Power and Energy Society (IEEE-PES)*.

Ao analisar os resultados obtidos pelo MCICA e comparar com o Método da Superposição, observa-se que o MCICA forneceu estimativas coerentes das contribuições harmônicas dos agentes em cenários onde ambos os lados (supridor e consumidor) apresentavam fontes não lineares. Contudo, observou-se que, em configurações em que existe apenas um agente com fontes harmônicas, o método pode gerar alocação invertida das contribuições, o que indica uma limitação do método em análise.

Vale destacar que essas inconsistências observadas estão associadas ao fato de que, ao considerar que a corrente de um dos agentes é nula, o cenário de simulação não fica compatível com o modelo matemático que fundamenta o MCICA. O método realiza a maximização da independência estatística dos sinais para identificar as impedâncias dos agentes, de modo que, ao maximizar a independência da fonte do supridor, estima-se a impedância do consumidor, e ao maximizar a independência da fonte do consumidor, determina a impedância do supridor. Quando uma das fontes é nula, tal maximização se torna inviável, o que impossibilita a correta determinação de uma das impedâncias e causa significativos erros nos cálculos das contribuições.

Adicionalmente, vale ressaltar que fatores como a quantidade de medições de tensão e corrente (amostras) e possíveis variações significativas das impedâncias harmônicas ao longo do período avaliado podem ser determinantes para a precisão dos resultados do MCICA. Isto é, caso as impedâncias dos agentes não sejam mantidas constantes ao longo do período de análise, a metodologia pode não obter os resultados corretos. Além disso, esse método fundamenta-se na hipótese de que os sinais harmônicos das fontes são estatisticamente independentes e não-gaussianos. Embora a literatura aponte a validade dessa suposição em diversos sistemas elétricos, situações práticas que envolvem conversores de eletrônica de potência e estratégias de controle mais complexas podem introduzir algum grau de correlação entre as fontes harmônicas, tornando-as estatisticamente dependentes e comprometendo a eficiência do método.

Diante dos resultados alcançados, conclui-se que a utilização do MCICA para determinação das contribuições harmônicas deve ser feita com cautela, pois o método pode levar a resultados errôneos, principalmente para os casos em que existe apenas um agente com fontes harmônicas, e nas situações em que as impedâncias dos agentes não se mantêm constantes ao longo do período de análise devido à dinâmica de operação do sistema.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) e com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Os autores agradecem ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEELT) da Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pelo apoio financeiro concedido à execução deste projeto.

REFERÊNCIAS

- [1] Y. Fan et al., “Harmonic feature of 27.5 kV traction power system in a Chinese high-speed railway,” *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 12, no. 4, pp. 369–379, Dec. 2022.
- [2] H. Eroğlu, E. Cuce, P. M. Cuce, F. Gul, and A. Iskenderoğlu, “Harmonic problems in renewable and sustainable energy systems: A comprehensive review,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 48, p. 101566, 2021.
- [3] University of Wollongong, “Harmonic Study-Large Renewable Energy Generators,” Wollongong, Austrália, 2022. Accessed: Apr. 10, 2024. [Online]. Available: <https://arena.gov.au/assets/2022/05/harmonic-study-large-renewable-energy-generators-report.pdf>
- [4] F. C. Veliz, C. de O. Costa, S. L. Varricchio, and F. A. de Oliveira, “Avaliação do impacto das correntes harmônicas provenientes do SIN no dimensionamento da capacidade de absorção de correntes (‘rating’) de filtros passivos,” in *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XXV SNPTEE)*, Brasília, 2023.
- [5] Y. Wang, J. Yong, Y. Sun, W. Xu, and D. Wong, “Characteristics of Harmonic Distortions in Residential Distribution Systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 3, pp. 1495–1504, Jun. 2017.
- [6] P. A. B. Block, F. S. Retorta, D. B. Dahlke, and M. D. Teixeira, “Estudo comparativo do desempenho harmônico de aerogeradores,” in *Brasil Windpower - Conference & Exhibition*, Rio de Janeiro, 2015.
- [7] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [8] J. Arrillaga and N. R. Watson, *Power System Harmonics*, 2nd ed. West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [9] R. P. S. Leão, R. F. Sampaio, and F. L. M. Antunes, *Harmônicos em Sistemas Elétricos*, 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- [10] F. Safargholi, K. Malekian, and W. Schufft, “On the Dominant Harmonic Source Identification - Part I: Review of Methods,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 3, pp. 1268–1277, 2018.
- [11] F. Safargholi, K. Malekian, and W. Schufft, “On the Dominant Harmonic Source Identification-Part II: Application and Interpretation of Methods,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 3, pp. 1278–1287, 2018.
- [12] R. Sinvala, K. M. Abo-Al-Ez, and M. T. Kahn, “Harmonic Source Detection Methods: A Systematic Literature Review,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 74283–74299, 2019.
- [13] C. Garzón and A. Pavas, “Review of Responsibilities Assignment Methods for Harmonic Emission,” in *2019 IEEE Milan PowerTech*, Milan, 2019.
- [14] S. Xu, X.-Y. Xiao, X. Zheng, and Y. Wang, “Review on harmonic impacts assessment indices and methods of multiple harmonic sources,” in *25th International Conference on Electricity Distribution*, Madrid, 2019, pp. 1–5.
- [15] A. Spelko et al., “CIGRE/CIRE JWG C4.42: Overview of Common Methods for Assessment of Harmonic Contribution from Customer Installation,” in *2017 IEEE Manchester PowerTech*, Manchester, 2017.
- [16] B. M. Ganesini, I. N. Santos, and P. F. Ribeiro, “Comparison of Methods for Determining Harmonic Distortion Contributions Using the IEEE Benchmark Test System,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 38, no. 4, pp. 2398–2407, Aug. 2023.
- [17] Wilsun Xu and Yilu Liu, “A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 2, pp. 804–811, 2000.
- [18] V. H. F. Brito, J. C. d. Oliveira and R. C. F. Gregory, “A Novel Impedance Estimation Method for Determining Voltage Unbalance Contributions Based on an Optimization Algorithm,” in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 145944–145954, 2024.
- [19] F. Karimzadeh, S. Esmaeili, and S. H. Hosseini, “Method for determining utility and consumer harmonic contributions based on complex independent component analysis,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 10, no. 2, pp. 526–534, 2016.
- [20] Y. Wang, W. Xu, J. Yong, and K. L. Chen, “Estimating harmonic impact of individual loads using harmonic phasor data,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 27, no. 10, p. e2384:1–12, 2017.
- [21] F. A. Pereira, S. F. de P. Silva, and I. N. Santos, “Blind source separation methods applied to evaluate harmonic contribution,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 12, Dec. 2021.
- [22] J. Zhao, H. Yang, A. Pan, and F. Xu, “An improved complex ICA based method for wind farm harmonic emission levels evaluation,” *Electric Power Systems Research*, vol. 179, Feb. 2020.
- [23] X. Zheng, X. Xiao, and Y. Wang, “An impedance matrix constrained-based method for harmonic emission level estimation,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 30, no. 9, Sep. 2020.
- [24] Y. Zhang, C. Lin, Z. Shao, and B. Liu, “A Non-Intrusive Identification Method of Harmonic Source Loads for Industrial Users,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 37, no. 5, pp. 4358–4369, Oct. 2022.
- [25] A. Hyvärinen and E. Oja, “Independent component analysis: algorithms and applications,” *Neural Networks*, vol. 13, no. 4–5, pp. 411–430, 2000.
- [26] J. N. Kutz, *Data-Driven Modeling and Scientific Computing: Methods for Complex Systems & Big Data*. Oxford: Oxford University Press, 2013.
- [27] E. Bingham and A. Hyvarinen, “A fast fixed-point algorithm for independent component analysis of complex valued signals,” *Int J Neural Syst*, vol. 10, no. 01, pp. 1–8, Feb. 2000.
- [28] A. Hyvärinen, “Fast Independent Component Analysis (Algorithm).” <https://www.cs.helsinki.fi/u/ahyvarin/software.shtml> (Acessado em 16 de Janeiro de 2025).
- [29] H. E. Mazin, E. E. Nino, W. Xu, and J. Yong, “A study on the harmonic contributions of residential loads,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 3, pp. 1592–1599, 2011.
- [30] I. Papic et al., “A Benchmark Test System to Evaluate Methods of Harmonic Contribution Determination,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 1, pp. 23–31, 2019.