

Further Evaluation of Conservative Power Theory to Determine Voltage Harmonic Contributions

Luciano Jorge Menezes
*Dept. Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica*
Universidade Federal de
Uberlândia
Uberlândia-MG, Brasil
<https://orcid.org/0000-0003-1170-6300>

Bárbara Morais Ganesini
*Dept. Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica*
Universidade Federal de
Uberlândia
Uberlândia-MG, Brasil
<https://orcid.org/0000-0002-0200-7658>

Ivan Nunes Santos
*Dept. Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica*
Universidade Federal de
Uberlândia
Uberlândia-MG, Brasil
<https://orcid.org/0000-0001-8630-1354>

Abstract - The connection of nonlinear equipment in the electrical system has grown exponentially in recent decades. However, despite the benefits of such technological advances, it is known that nonlinear equipment can contribute to power quality degradation, mainly in terms of increasing harmonic distortion levels. In this context, concerns arise regarding sharing the responsibility for this problem among the agents involved, to allow a financial division of mitigating measures' costs. Therefore, this article aims to deepen the studies regarding the Conservative Power Theory (CPT) to determine harmonic contributions. The case studies focus on evaluating, in an unprecedented way, the performance of the CPT methodology in cases in which harmonic distortions are not caused solely by consumer loads, but also by the supply network.

Keywords - Background harmonics; Conservative Power Theory; Harmonic contribution determination; Harmonic distortions.

I. INTRODUÇÃO

As distorções harmônicas são um dos fenômenos de qualidade da energia elétrica (QEE) que têm ganhado maior destaque no âmbito dos sistemas de energia modernos. Estas distorções se caracterizam como a presença de componentes em frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental nas formas de onda de tensão e corrente elétricas. É amplamente conhecido na literatura que esse problema se origina da operação de equipamentos não lineares presentes no sistema elétrico, que injetam correntes elétricas com frequências distintas da fundamental [1]. Como consequência, essas correntes, ao interagir com as impedâncias das redes elétricas, distorcem o sinal de tensão dos diversos pontos de acoplamento comuns (PACs).

O fato é que, com os avanços das tecnologias, tendências de descarbonização e aumento da eficiência energética nos sistemas elétricos, esses tipos de equipamentos estão cada vez mais presentes em todos os níveis do sistema elétrico, seja a nível de geração, como no caso das plantas fotovoltaicas e eólicas [1], [2]; na transmissão, através dos sistemas High Voltage Direct Current (HVDC) [3] e dispositivos FACTS [4]; bem como nos sistemas de distribuição, que englobam equipamentos eletrônicos em geral [1], [5], [6].

Apesar dos avanços tecnológicos e benefícios promovidos pelo emprego dos diversos equipamentos elétricos com características não lineares, a presença de harmônicos pode impactar de forma negativa a confiabilidade, segurança e vida útil de equipamentos diversos existentes nos sistemas elétricos e, ainda, aumentar as perdas [7], [8].

Diante deste cenário, as agências regulamentadoras, sejam nacionais ou internacionais, exercem o papel fundamental de estabelecer limites percentuais para os níveis de distorção harmônica [9], [10], [11]. Caso os limites regulamentados sejam ultrapassados, torna-se imprescindível a adoção de medidas mitigatórias, que podem contemplar a inserção de filtros passivos, filtros ativos ou até mesmo a substituição de equipamentos de modo a minimizar a emissão harmônica [1]. Entretanto, é importante destacar que, a depender da situação encontrada, tais implementações requerem investimentos financeiros consideráveis.

Como consequência, surge então a necessidade de se identificar quais agentes, entre supridores e consumidores, deverão arcar com a responsabilidade financeira de tais ações corretivas, ou até mesmo se essa responsabilidade financeira poderia ser dividida entre os agentes envolvidos. Portanto, o objetivo da temática da determinação das contribuições harmônicas é indicar quanto cada agente contribui com as distorções harmônicas verificadas em um dado barramento. Esse processo visa estabelecer uma divisão mais justa entre os responsáveis para o financiamento de medidas mitigatórias.

Por isso, vários estudos foram e estão sendo conduzidos com a finalidade de estabelecer metodologias que melhor se apliquem na resolução deste problema, dentre as quais destacam-se o Método da Impedância Dominante [12], o Método do Chaveamento de Capacitores [13], o Método da Injeção de Correntes Harmônicas [14] e o Método do Filtro Ativo [15]. Contudo, apesar dos resultados condizentes destas metodologias [16], estas são ditas invasivas e, portanto, de difícil implementação, por isso, busca-se ainda estabelecer metodologias não-invasivas, que têm a principal vantagem de não necessitarem da conexão de componentes auxiliares no sistema a ser avaliado.

Assim, no contexto dos métodos não invasivos, surge a proposta de aplicação da Teoria da Potência Conservativa

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

(CPT), [17] [18], [19], que sugere utilizar somente medições de tensão e corrente harmônicas nos pontos de interesse. No entanto, diante dos poucos trabalhos publicados até a presente data, maiores investigações são necessárias, principalmente no que tange o estudo da CPT aplicada em um número maior de arranjos elétricos, bem como a consideração da existência de *background distortion* no barramento sob análise. Isto é, os estudos de caso têm como foco avaliar, de forma inédita, o desempenho da metodologia da CPT em casos nos quais as distorções harmônicas não são causadas, unicamente, pelas cargas dos consumidores, mas também pela rede de suprimento. Logo, este artigo tem como proposta aprofundar os estudos considerando a metodologia que utiliza conceitos teóricos da CPT para fins do compartilhamento de responsabilidades. Para tanto são realizados estudos de caso computacionais utilizando o software *MATLAB/Simulink*.

II. TEORIA DA POTÊNCIA CONSERVATIVA APLICADA A DETERMINAÇÃO DAS CONTRIBUIÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO.

A. Teoria da Potência Conservativa

As definições de potência ativa, energia reativa e integral imparcial de tensão não serão abordadas neste artigo pois a variável de interesse para a proposta de determinar as responsabilidades sobre as tensões harmônicas é a corrente dispersa. Tais considerações, necessárias para caracterização de cargas em redes elétricas que apresentam distorções de tensão e corrente encontram-se definidas em [17].

Portanto, para a correta compreensão da corrente dispersa, devem ser descritas matematicamente as seguintes grandezas elétricas: corrente ativa, corrente reativa, corrente ativa dispersa e corrente reativa dispersa.

Outra importante observação para a compreensão das equações que seguem, refere-se ao símbolo “ λ ”. Ele representa a fase de interesse, que pode ser nomeada por a, b e c em um sistema trifásico.

Feitas tais considerações, a corrente ativa e a corrente reativa são definidas em (1) e (2):

$$i_{a-\lambda} = \frac{P_{\lambda}}{V_{\lambda}^2} v_{\lambda} \quad (1)$$

$$i_{r-\lambda} = \frac{W_{r-\lambda}}{\hat{V}_{\lambda}^2} \hat{v}_{\lambda} \quad (2)$$

Onde:

v_{λ} é o sinal de tensão instantâneo por fase, medido em relação ao referencial de terra, quando for um sistema trifásico a três fios;

P_{λ} é a potência ativa;

V_{λ} é o valor eficaz de v_{λ} ;

$\hat{v}_{\lambda}$ é a integral imparcial da tensão sem o seu valor médio;

$\hat{V}_{\lambda}$ é o valor eficaz de $\hat{v}_{\lambda}$;

$W_{r-\lambda}$ é a energia reativa.

Dando continuidade, a corrente ativa dispersa e a corrente reativa dispersa são definidas em (3) e (4).

$$i_{as-\lambda} = \sum_{h \in \{K\}} \frac{P_{h-\lambda}}{V_{h-\lambda}^2} v_{h-\lambda} - i_{a-\lambda} \quad (3)$$

$$i_{rs-\lambda} = \sum_{h \in \{K\}} \frac{W_{rh-\lambda}}{\hat{V}_{h-\lambda}^2} \hat{v}_{h-\lambda} - i_{r-\lambda} \quad (4)$$

Onde:

h representa uma ordem harmônica qualquer;

K representa as ordens harmônicas que coexistem os sinais de tensão e corrente;

$v_{h-\lambda}$ é o sinal de tensão instantâneo para uma ordem harmônica h ;

$\hat{v}_{h-\lambda}$ é a integral imparcial de $v_{h-\lambda}$ para uma dada ordem harmônica h ;

$V_{h-\lambda}$ é o valor eficaz de $v_{h-\lambda}$;

$\hat{V}_{h-\lambda}$ é o valor eficaz de $\hat{v}_{h-\lambda}$;

$P_{h-\lambda}$ é a potência ativa em cada ordem harmônica h ;

$W_{rh-\lambda}$ é a energia reativa em cada ordem harmônica h .

Por fim, a corrente dispersa é o resultado da soma da corrente ativa dispersa e da corrente reativa dispersa, de acordo com (5).

$$i_{s-\lambda} = i_{as-\lambda} + i_{rs-\lambda} \quad (5)$$

É importante salientar que a corrente dispersa existe quando tensão e corrente coexistem em uma ordem harmônica específica. Por esse motivo, ela é utilizada no compartilhamento de responsabilidade devido às distorções harmônicas de tensão [18].

B. Corrente Dispersa aplicada ao Compartilhamento de Responsabilidade devido às Distorções Harmônicas de Tensão

A corrente dispersa é determinada no domínio do tempo, por isso, deve-se, a priori, fazer sua decomposição no espectro de frequências, obtendo assim seu valor em magnitude e ângulo de fase, em uma referida ordem harmônica h .

Com a finalidade de um melhor entendimento da situação proposta, a Fig. 1 mostra uma rede elétrica genérica, que possui uma fonte, cargas lineares e cargas não lineares conectadas a um PAC.

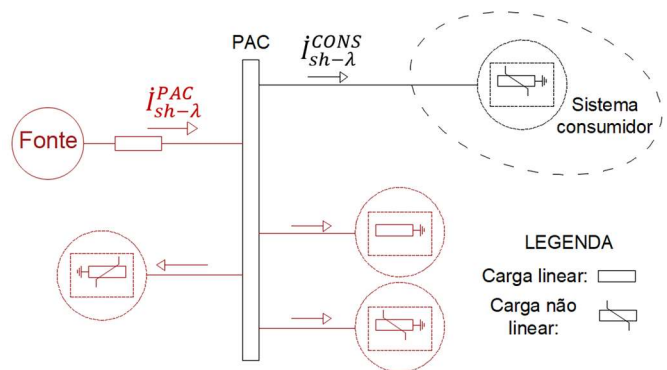


Fig. 1. Diagrama unifilar de um sistema elétrico genérico, com as correntes dispersas no PAC e no consumidor de interesse.

As correntes fasoriais dispersas, por fase, do consumidor em destaque ($i_{sh-\lambda}^{CONS}$) e a corrente total do PAC ($i_{sh-\lambda}^{PAC}$) são utilizadas para realizar o compartilhamento na respectiva

ordem harmônica de interesse. Para tanto, basta realizar a projeção do fasor obtido da corrente do consumidor sobre o fasor da corrente do PAC. Na Fig. 2 tem-se essa representação:

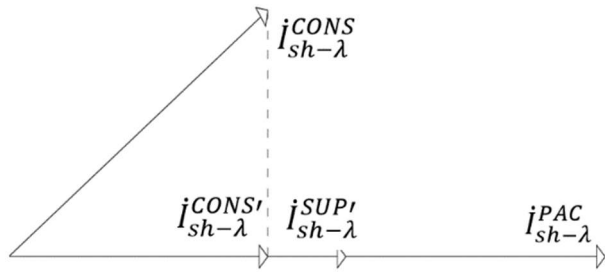


Fig. 2. Fasores da corrente dispersa, utilizados no compartilhamento de responsabilidade devido às distorções harmônicas de tensão, através da CPT.

Onde:

$I_{sh-\lambda}^{CONS'}$ é o resultado da projeção do fasor da corrente dispersa do consumidor ($I_{sh-\lambda}^{CONS}$) sobre o fasor da corrente dispersa total do ponto de acoplamento comum ($I_{sh-\lambda}^{PAC}$);

$I_{sh-\lambda}^{SUP'}$ é o resultado da subtração entre os fasores $I_{sh-\lambda}^{PAC}$ e $I_{sh-\lambda}^{CONS'}$, que também pode ser considerado como a projeção do fasor de corrente dispersa do sistema supridor ($I_{sh-\lambda}^{SUP}$) no fasor ($I_{sh-\lambda}^{PAC}$);

Com essas considerações, o percentual de responsabilidade do consumidor será obtido de acordo com (6).

$$\%V_{pac-cons-h} = \frac{i_{sh-\lambda}^{CONS'}}{i_{sh-\lambda}^{PAC}} \times 100\% \quad (6)$$

E o percentual de responsabilidade do sistema supridor é obtido em (7).

$$\%V_{pac-sup-h} = \frac{i_{sh-\lambda}^{PAC} - i_{sh-\lambda}^{CONS'}}{i_{sh-\lambda}^{PAC}} \times 100\% = \frac{i_{sh-\lambda}^{SUP'}}{i_{sh-\lambda}^{PAC}} \times 100\% \quad (7)$$

Assim, nesse caso da Fig. 1, todas os demais consumidores conectados ao PAC, além do consumidor de interesse, são considerados como parte do sistema supridor. O mesmo procedimento é replicado para determinar as responsabilidades dos demais consumidores.

Finalmente, vale ressaltar que a metodologia exposta nesse item necessita somente da medição dos sinais instantâneos de tensão e corrente no PAC e da corrente instantânea medida em cada consumidor. Portanto, essa metodologia possui a vantagem de ser não invasiva, não existindo a possibilidade de causar qualquer perturbação no sistema sob análise, além de não necessitar da conexão de equipamentos auxiliares no PAC.

III. ESTUDO DE CASOS

Com a finalidade de avaliar a resposta da CPT no compartilhamento de responsabilidade da distorção harmônica de tensão frente a existência de diferentes tipos de consumidores conectados a um PAC, utilizou-se o sistema

elétrico mostrado na Fig. 3 e casos definidos em [20]. Contudo, pretende-se agora avaliar a metodologia com a presença de distorções harmônicas na fonte de suprimento da rede, e não apenas nas cargas dos consumidores. O sistema foi implementado utilizando o software *MATLAB*, através da ferramenta de simulação de sistemas elétricos *Simulink*.

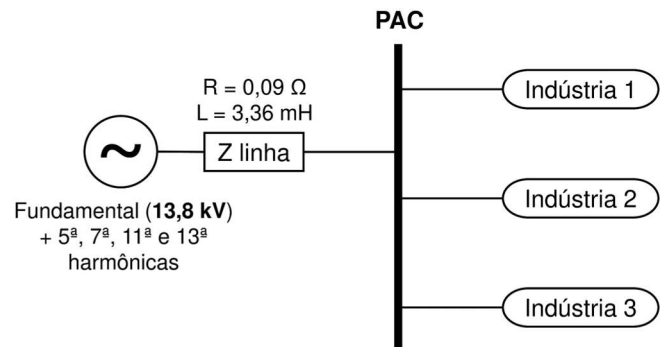


Fig. 3. Diagrama da rede elétrica sob análise.

Os valores definidos para as tensões harmônicas presentes na fonte de suprimento, também chamadas de *background distortions*, são mostrados na Tabela I.

TABELA I
BACKGROUND DISTORTIONS*

Ordem harmônica	Fase A	Fase B	Fase C
5ª	140V $\angle$ -10°	140V $\angle$ 110°	140V $\angle$ 230°
7ª	87V $\angle$ -60°	87V $\angle$ 180°	87V $\angle$ 60°
11ª	48V $\angle$ -10°	48V $\angle$ 110°	48V $\angle$ 230°
13ª	32V $\angle$ -40°	32V $\angle$ -160°	32V $\angle$ 80°

*Valores eficazes por fase

A seguir serão feitas considerações sobre as indústrias. Elas possuem parâmetros distintos para cada um dos quatros casos abordados neste trabalho.

A. Parâmetros das indústrias para o Caso 1

No Caso 1, as três indústrias possuem topologia conforme a Fig. 4.

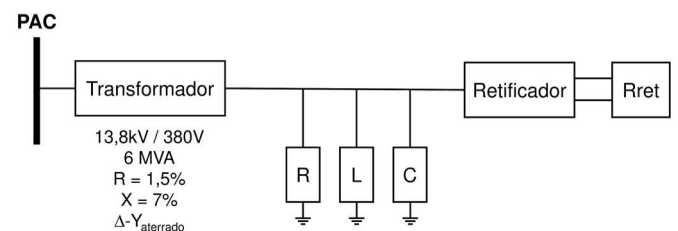


Fig. 4. Disposição dos elementos presentes nas três indústrias, para o Caso 1 [13].

Na Fig. 4, todas as cargas lineares – resistor (R), indutor (L) e capacitor (C) – são trifásicas, equilibradas e ligadas em estrela. Outro detalhe importante refere-se ao retificador, que é caracterizado como não controlado e supre apenas uma resistência (Rret). Na Tabela II são mostrados os parâmetros dos elementos de cada indústria para o Caso 1.

TABELA II
PARÂMETROS DAS INDÚSTRIAS – CASO 1

Parâmetros	Indústria 1	Indústria 2	Indústria 3
R	69,9 Ω	94,96 Ω	50,12 Ω
L	233,43 mH	263,77 mH	224,20 mH
C	6,07 μ F	5,80 μ F	5,03 μ F
Rret	123,97 Ω	120,01 Ω	131,88 Ω

Observação: impedâncias por fase e referidas para 13,8 kV.

O Caso 1 fora anteriormente implementado em [18], [19], porém sem a imposição de *background distortions* na fonte de suprimento.

B. Parâmetros das indústrias para o Caso 2

No Caso 2, a indústria 1 foi substituída por uma carga puramente resistiva de 190,44 Ω por fase, ligada em estrela aterrada e equilibrada e conectada diretamente em 13,8 kV, ou seja, sem a necessidade de transformador abaixador. As indústrias 2 e 3 mantiveram a topologia mostrada na Fig. 4.

C. Parâmetros das indústrias para o Caso 3

Semelhante ao Caso 2, a indústria 1 foi substituída por uma carga linear, agora com característica resistiva-indutiva (RL) em série, ligada em estrela aterrada e equilibrada, também conectada diretamente em 13,8 kV. O valor da resistência adotado foi 152,35 Ω e indutância igual a 303 mH, por fase. As indústrias 2 e 3 mantiveram a topologia mostrada na Fig. 4.

D. Parâmetros das indústrias para o Caso 4

Para o Caso 4, a indústria 1 foi substituída por uma carga resistiva-indutiva-capacitiva (RLC). Nesse caso, a resistência está em série com a indutância, enquanto a parcela capacitiva está em paralelo com a carga RL. A resistência tem valor de 165,28 Ω , a indutância de 249,07 mH e a capacitância de 1,7 μ F, todos por fase. As indústrias 2 e 3 mantiveram a topologia mostrada na Fig. 4.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos pela CPT foram comparados com o Método da Superposição (MS) [21], [22], pois este método é destaque na literatura pela sua forte fundamentação teórica na teoria clássica de circuitos elétricos. Em termos práticos, o Método da Superposição é de difícil aplicação, visto que este requer o conhecimento das impedâncias harmônicas dos agentes, que não são de fácil obtenção [23], [24]. Entretanto, em termos computacionais, torna-se factível a aplicação deste método como referência para avaliação de outras metodologias.

TABELA III
PERCENTUAL DE RESPONSABILIDADE HARMÔNICA: CASO 1

	5ª ordem		7ª ordem	
	MS	CPT	MS	CPT
Supridor	21,30%	0,00%	16,18%	0,00%
Indústria 1	26,73%	34,52%	29,08%	34,80%

Indústria 2	27,91%	36,64%	29,15%	37,04%
Indústria 3	24,06%	28,84%	25,58%	28,16%
	11ª ordem		13ª ordem	
	MS	CPT	MS	CPT
Supridor	11,49%	0,00%	10,62%	0,00%
Indústria 1	29,99%	30,86%	29,89%	29,36%
Indústria 2	35,43%	39,90%	35,95%	37,61%
Indústria 3	23,09%	29,24%	23,54%	33,03%

Para o Caso 1, avaliando a topologia do sistema, percebe-se que as três indústrias possuem fontes harmônicas, nesse caso, na forma de retificadores, que são equipamentos não lineares. O sistema supridor (fonte e impedância de linha) também possui fontes de distorção, mas representadas por fontes de tensão harmônicas. Portanto, é de se esperar que todos os agentes conectados ao PAC contribuam para a distorção do barramento. Essa hipótese é confirmada quando são avaliados os resultados do Método da Superposição na Tabela III.

Contudo, ao comparar estes resultados com o método da CPT são constatadas certas discrepâncias. A principal delas está no fato da metodologia da CPT não atribuir responsabilidade ao sistema supridor. Consequentemente, os percentuais de responsabilidade das indústrias divergem do Método da Superposição, chegando a discrepâncias de quase 10 pontos percentuais, como no caso da 13ª ordem para a Indústria 3.

TABELA IV
PERCENTUAL DE RESPONSABILIDADE HARMÔNICA: CASO 2

	5ª ordem		7ª ordem	
	MS	CPT	MS	CPT
Supridor	27,60%	0,00%	22,75%	0,00%
Indústria 1	0,02%	0,03%	0,09%	0,05%
Indústria 2	38,65%	55,39%	40,46%	56,46%
Indústria 3	33,77%	44,65%	36,69%	43,60%
	11ª ordem		13ª ordem	
	MS	CPT	MS	CPT
Supridor	7,78%	0,00%	9,62%	0,00%
Indústria 1	0,09%	0,10%	0,01%	0,11%
Indústria 2	55,88%	60,25%	54,45%	57,28%
Indústria 3	36,44%	39,85%	35,95%	42,84%

Sobre o Caso 2, a Indústria 1 passa a ter carga totalmente resistiva, ou seja, puramente linear, enquanto as indústrias 2 e 3 continuam com suas fontes harmônicas, assim como o sistema supridor. Com isso, é coerente que a Indústria 1 não contribua para a distorção do PAC, como apresentado na Tabela IV, nos resultados do Método da Superposição.

Com relação ao método da CPT, este novamente indica que o sistema supridor não contribui com as distorções do barramento, mesmo possuindo fontes harmônicas. No entanto, um destaque positivo está no fato dessa metodologia não atribuir percentuais de responsabilidades para a Indústria 1, que como já dito, é sabidamente uma carga linear. Por

outro lado, foram identificadas divergências de resultados nos percentuais de responsabilidade das indústrias 2 e 3, com maiores discrepâncias observadas para a Indústria 2 (na ordem de 16 pontos percentuais).

TABELA V
PERCENTUAL DE RESPONSABILIDADE HARMÔNICA: CASO 3

	5ª ordem		7ª ordem	
	MS	CPT	MS	CPT
Supridor	27,50%	0,00%	22,55%	0,00%
Indústria 1	0,00%	0,45%	0,02%	1,33%
Indústria 2	38,71%	55,21%	40,55%	55,91%
Indústria 3	33,79%	44,33%	36,88%	42,76%
	11ª ordem		13ª ordem	
	MS	CPT	MS	CPT
Supridor	7,49%	0,00%	9,57%	0,00%
Indústria 1	0,02%	3,27%	0,01%	4,02%
Indústria 2	56,11%	58,41%	54,50%	54,86%
Indústria 3	36,42%	38,33%	35,92%	41,11%

Quando uma análise é feita no Caso 3, tem-se que a Indústria 1 passa a ter carga totalmente resistiva-indutiva, ainda puramente linear, enquanto as indústrias 2 e 3 continuam com suas fontes harmônicas, assim como o sistema supridor. Mais uma vez, é esperado que a Indústria 1 não possua responsabilidades para com a distorção do barramento. Esse resultado é confirmado quando são verificados os resultados do Método da Superposição na Tabela V.

Agora, ao avaliar os resultados obtidos pelo método da CPT, é visto que não é atribuída responsabilidade ao sistema supridor. Além disso, pode-se constatar que a CPT atribui percentuais de responsabilidade para a Indústria 1, chegando até 4% para 13ª ordem. Como dito, visto que essa indústria é representada por uma carga linear (RL – série), percentuais de responsabilidades não deveriam ser apurados.

Ainda sobre o Caso 3, os percentuais de responsabilidade das indústrias 2 e 3 divergem do Método da Superposição, também atingindo valores superiores a 15 pontos percentuais para Indústria 2 (5ª ordem e 7ª ordens).

TABELA VI
PERCENTUAL DE RESPONSABILIDADE HARMÔNICA: CASO 4

	5ª ordem		7ª ordem	
	MS	CPT	MS	CPT
Supridor	27,61%	0,00%	22,68%	0,00%
Indústria 1	0,01%	2,25%	0,04%	4,66%
Indústria 2	38,64%	54,24%	40,57%	54,10%
Indústria 3	33,75%	43,51%	36,79%	41,24%
	11ª ordem		13ª ordem	
	MS	CPT	MS	CPT
Supridor	8,04%	0,00%	10,10%	0,00%
Indústria 1	0,10%	9,73%	0,19%	11,33%
Indústria 2	55,72%	54,66%	54,21%	50,62%

Indústria 3	36,13%	35,61%	35,88%	38,05%
-------------	--------	--------	--------	--------

Finalmente, sobre o Caso 4, verificando a topologia do sistema sob análise, as indústrias 2 e 3 e o sistema supridor possuem fontes harmônicas, enquanto a carga da Indústria 1 é puramente linear, com característica RLC. Portanto, por ser linear, mais uma vez a Indústria 1 não deveria contribuir com as distorções do PAC, o que de fato observa-se pelos resultados da Tabela VI, para o Método da Superposição.

Entretanto, a metodologia da CPT imputou percentuais de responsabilidade em até cerca de 11% para a Indústria 1, o que não é coerente dada a natureza das cargas lineares desta indústria. Além disso, mais uma vez essa metodologia afirma que o sistema supridor não contribui com a distorção do barramento. Da mesma maneira que nos demais casos, foram identificadas divergências significativas entre os resultados dos percentuais de responsabilidade da CPT e MS para as indústrias 2 e 3.

A partir dos resultados apresentados, podem ser explorados dois pontos principais. O primeiro é que não é atribuída responsabilidade para o supridor, mesmo quando este possui fontes de não linearidade. Ao analisar os equacionamentos do método da CPT, percebe-se que, para definir os percentuais de responsabilidade, de certa forma, o método divide a corrente total medida no PAC ($I_{sh-\lambda}^{PAC}$) entre os consumidores conectados. Por isso, caso haja alguma fonte de distorção do lado do sistema supridor, a metodologia não é capaz de separar a parcela de contribuição advinda do sistema supridor. Ou seja, a responsabilidade é sempre dividida entre os consumidores mesmo nos casos em que se sabe, com certeza, que existem fontes de distorção no arranjo do sistema supridor, como demonstrado nos estudos deste trabalho. Isso significa que a metodologia da CPT espera que não haja fontes harmônicas do lado do supridor (isto é, que não há *background harmonic*). Portanto, para garantir um resultado satisfatório da aplicação desta metodologia dever-se-ia garantir essa condição. Considerando os sistemas elétricos modernos em que existem altas penetrações de equipamentos não lineares, inclusive nos sistemas de geração de energia, a aplicação dessa metodologia deveria ser analisada com cautela.

O segundo ponto de análise da metodologia da CPT está na atribuição de responsabilidade para consumidores totalmente lineares. Percebe-se nos resultados dos casos 3 e 4, em que as cargas da Indústria 1 foram substituídas por elementos lineares RL e RLC, a CPT passou a atribuir certa responsabilidade para essas cargas, principalmente para o caso da carga RLC. Além disso, verificou-se que as atribuições de responsabilidade aumentavam conforme aumenta a ordem harmônica analisada.

V. CONCLUSÕES

Este artigo primou por aprofundar os estudos com relação à aplicação da Teoria da Potência Conservativa (CPT) para a determinação de contribuições harmônicas. O aprofundamento embasou-se em duas análises: a presença de fontes harmônicas no sistema supridor (*background harmonics*), e a atribuição de responsabilidades para cargas

lineares. Para tanto, definiu-se quatro casos originais para análise de desempenho desta metodologia não invasiva.

De forma geral, os resultados da CPT demonstraram que mesmo quando o sistema supridor possuía fontes harmônicas e, portanto, deveria contribuir com a distorção no PAC, a metodologia não respondeu da forma esperada. Além disso, verificou-se que quando cargas de uma das indústrias foram substituídas por elementos lineares RL e RLC, a CPT passou a atribuir certa responsabilidade para essas cargas, implicando em divergências ao comparar com o método de referência – Método da Superposição.

Diante disso, apesar da CPT apresentar vantagens em relação a outros métodos, por não ser invasivo, necessitando apenas de medições dos sinais de tensão e corrente, a depender da situação, como foi evidenciado no decorrer do artigo, os resultados da CPT aplicada ao compartilhamento de responsabilidades harmônicas de tensão, podem apresentar inconsistências, portanto, essa metodologia deve ser observada com cautela.

Não obstante aos resultados obtidos, em outras análises, quando da não existência de distorções por parte do sistema supridor, o método em questão respondeu, em geral, de forma satisfatória.

REFERÊNCIAS

- [1] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [2] M. Chindris and A. Sudrià-Andreu, "Static Converters and Power Quality," in *Handbook of power quality*, A. Baghini, Ed., London: John Wiley & Sons, 2008, ch. 14. doi: 10.1002/9780470754245.
- [3] K. R. Padiyar, *HVDC Power Transmission Systems: Technology and System Interactions*. New York: John Wiley & Sons Inc, 1990.
- [4] Y. Hua and A. T. Johns, *Flexible AC Transmission Systems (FACTS)*. London: Institution of Engineering & Technology, 1999. doi: 10.1049/PBPO030E.
- [5] G. da S. Troncha, "Uma contribuição à aplicação dos filtros ativos em sistemas elétricos de potência," Master's Thesis, Federal University of Uberlândia, 2019. doi: 10.14393/ufu.di.2019.319.
- [6] A. C. dos Santos, "Compartilhamento de Responsabilidades Harmônicas: Análises, Contribuições e Proposições," Doctoral Dissertation, Federal University of Uberlândia, 2019. doi: dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2445.
- [7] J. Arrillaga and N. R. Watson, *Power System Harmonics*, 2nd ed. West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [8] R. P. S. Leão, R. F. Sampaio, and F. L. M. Antunes, *Harmônicos em Sistemas Elétricos*, 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- [9] Operador Nacional do Sistema Elétrico, "Procedimentos de Rede – Indicadores de qualidade de energia elétrica da Rede Básica. Submódulo 9.7," Rio de Janeiro, Brasil, 2021.
- [10] Operador Nacional do Sistema Elétrico, "Procedimentos de Rede – Requisitos mínimos de qualidade da energia elétrica para acesso ou integração à Rede Básica. Submódulo 2.9," Rio de Janeiro, Brasil, 2022.
- [11] International Electrotechnical Commission, "Electromagnetic compatibility (EMC) – 61000-3-6: Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems," Geneva, Switzerland, 2008.
- [12] I. N. Santos, J. C. de Oliveira, and A. C. dos Santos, "Dominant impedance method to assign harmonic voltage contributions at a point of common coupling," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 6, pp. 1–16, 2021, doi: 10.1002/2050-7038.12895.
- [13] A. C. dos Santos, I. N. Santos, and J. C. de Oliveira, "Capacitor switching methodology for responsibility sharing of harmonic voltage distortions," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 29, no. 12, pp. 1–16, 2019, doi: 10.1002/2050-7038.12135.
- [14] A. C. dos Santos and I. N. Santos, "Assignment of harmonic voltage contributions using the harmonic current injection method," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 1, pp. 1–15, 2021, doi: 10.1002/2050-7038.12608.
- [15] F. Clement Veliz, S. L. Varricchio, and C. de Oliveira Costa, "Determination of harmonic contributions using active filter: Theoretical and experimental results," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 137, no. March 2021, p. 107664, 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107664.
- [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, doi: 10.1109/TPWRD.2023.3242942.
- [17] H. K. M. Paredes, "Teoria de Potência Conservativa: Uma Nova Abordagem para o Controle Cooperativo de Condicionadores de Energia e Considerações sobre Atribuição de Responsabilidades," Doctoral Thesis Dissertation, State University of Campinas, 2011. doi: https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2011.796799.
- [18] D. T. Rodrigues, M. B. Arcadepani, H. K. M. Paredes, A. C. Moreira, and J. P. Bonaldo, "Aplicação da Teoria de Potência Conservativa para Compartilhamento de Responsabilidade Devido à Distorções Harmônicas de Tensão," in *Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Automática*, 2020. doi: 10.48011/asba.v2i1.1613.
- [19] M. B. Arcadepani, D. T. Rodrigues, A. C. Moreira, J. P. Bonaldo, H. Guillardi Júnior, and H. K. M. Paredes, "Conservative Power Theory for Harmonic Voltage Responsibility Assignment," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 20, no. 3, pp. 443–450, 2022, doi: 10.1109/TLA.2022.9667142.
- [20] Luciano J. Menezes, Bárbara M. Ganesini, and Ivan N. Santos, "Teoria da Potência Conservativa Aplicada ao Compartilhamento de Responsabilidades Devido às Distorções Harmônicas de Tensão: Considerações e Estudo de Casos," in *Proceedings IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2022. doi: 10.20906/sbse.v2i1.3093.
- [21] W. Xu and Y. Liu, "A method to determine customer harmonic contributions for incentive-based harmonic control applications," 1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, PES 1999 - Conference Proceedings, vol. 1, pp. 361–366, 1999, doi: 10.1109/PSS.1999.784375.
- [22] W. Xu and Y. 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, doi: 10.1109/61.853023.
- [23] A. F. Zobaa and H. E. A. Aleem, *Power Quality in Future Electrical Power Systems*. London, UK: The Institution of Engineering and Technology, 2017. doi: 10.1049/PBPO092E.
- [24] M. Lamich, J. Balcells, M. Corbalán, and E. Grifol, "Nonlinear Loads Model for Harmonics Flow Prediction, Using Multivariate Regression," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 6, pp. 4820–4837, 2017, doi: 10.1109/TIE.2017.2674596.