

Teoria da Potência Conservativa Aplicada ao Compartilhamento de Responsabilidades Devido às Distorções Harmônicas de Tensão: Considerações e Estudo de Casos.

Luciano J. Menezes*. Bárbara M. Giancesini*. Ivan N. Santos*

*Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil (e-mails: luciano.menezes@ufu.br; barbara.giancesini@ufu.br; ivan@ufu.br)

Abstract: The insertion of equipment with nonlinear characteristics in the electrical system has increased exponentially in the last decades. It is known that despite the benefits of such technological advances, there is the possibility of power quality degradation. In this context, when the limits of harmonic distortions are above the maximum allowed in the regulations, the concern of sharing responsibility among the agents involved in this deterioration of power quality arises, indicating, consequently, the financial division of possible mitigating actions. Therefore, this paper aims to compare the Conservative Power Theory (CPT), in the scenario of responsibility sharing due to voltage harmonic distortions, with the Superposition method. It is important to highlight that the Superposition of Voltages methodology, presents itself as a template for the study of other methods. To fulfill the proposed objective, the MATLAB/Simulink computational tool will be used. In the present work, four cases will be evaluated.

Resumo: A inserção de equipamentos com características não lineares no sistema elétrico tem aumentado exponencialmente nas últimas décadas. Sabe-se que apesar dos benefícios de tais avanços tecnológicos, existe a possibilidade de degradação da qualidade de energia elétrica. Neste contexto, quando os limites de distorções harmônicas de tensão estão acima do máximo permitido nas normativas, surge a preocupação do compartilhamento de responsabilidade entre os agentes envolvidos nessa deterioração da qualidade de energia elétrica, indicando, conseqüentemente, a divisão financeira de possíveis ações mitigatórias. Por isso, este artigo tem o objetivo de comparar a Teoria da Potência Conservativa (CPT), no cenário de compartilhamento de responsabilidade devido às distorções harmônicas de tensão, com o método da Superposição. É importante destacar que a metodologia da Superposição das Tensões, apresenta-se como gabarito para o estudo de outros métodos. Para cumprir o objetivo proposto, a ferramenta computacional MATLAB/Simulink será utilizada. No presente trabalho, quatro casos serão avaliados.

Keywords: Conservative Power Theory; Responsibility Sharing; Voltage Harmonic Distortions

Palavras-chaves: Teoria da Potência Conservativa; Compartilhamento de Responsabilidades; Distorções Harmônicas de Tensão.

1. INTRODUÇÃO

Diante da crescente adoção de cargas não lineares nas mais diversas aplicações, seja na geração (fotovoltaica e eólica), transmissão (elos HVDC's – High Voltage Direct Current) e distribuição de energia elétrica (equipamentos eletrônicos em geral), pode-se verificar, conseqüentemente, um potencial aumento de problemas vinculados aos níveis de distorção de tensão e corrente no sistema elétrico. Nesse contexto, as agências regulamentadoras, sejam nacionais ou internacionais, exercem o papel fundamental de estabelecer valores máximos admissíveis para os indicadores de distorção harmônica. Porém, caso exista uma violação desses limites, surge então a necessidade de instalar soluções para a mitigação das distorções harmônicas, as quais possuem, por

sua vez, custos relevantes. Entretanto, nem sempre está evidente a origem, ou as origens, deste distúrbio.

Por esse motivo, a temática do compartilhamento de responsabilidades devido às distorções harmônicas de tensão, ganha espaço no cenário científico. O objetivo é indicar quanto, em termos percentuais, cada agente, supridor ou consumidor, é responsável pelas distorções harmônicas verificadas em um dado barramento. Assim, é possível estabelecer uma divisão entre os responsáveis para o financiamento de medidas mitigatórias. Portanto, vários estudos foram e são conduzidos com a finalidade de estabelecer a metodologia que melhor se aplica ao problema.

Ao fazer uma análise das principais propostas estabelecidas, basicamente elas podem ser divididas em técnicas não invasivas e invasivas. As técnicas não invasivas procuram,

por meio tão somente de medições de tensão e corrente, estabelecer qual ou quais agentes são responsáveis pela geração das distorções harmônicas, inclusive com percentuais para cada ordem harmônica. Enquanto as técnicas invasivas, agem causando uma perturbação no sistema elétrico através da conexão de equipamentos ou dispositivos, para atingir o mesmo propósito.

Diante desse cenário, o primeiro estudo com esse objetivo foi o Método do Fluxo de Potência Harmônica, que buscava identificar a fonte principal, ou dominante, de distorção harmônica, sem determinar percentuais de responsabilidade (L. Cristaldi e A. Ferrero 1995), (P. H. Swart et al. 1994).

Na sequência, foi proposto o Método da Corrente Conforme e Não Conforme, que separa a corrente em duas parcelas: uma linear – dita conforme – e outra não linear – chamada de não conforme (K. Srinivasan 1996), (K. Srinivasan e R. Justras 1998).

Entretanto, embora tenham a vantagem de serem não invasivos, ambos os métodos mostraram fragilidades. O Método do Fluxo de Potência Harmônica apresentou problemas na sua formulação, no que se refere a indicação da dominância da origem de distorção harmônica (W. Xu et al. 2003). Por outro lado, o Método da Corrente Conforme e Não Conforme apresentou-se insatisfatório, ao ser avaliado por meio de simulações computacionais e ensaios laboratoriais. (I. N. Santos 2007).

Outra metodologia bastante difundida e consolidada no meio científico é o Método da Superposição. Esse método é baseado na teoria clássica de circuitos elétricos, servindo inclusive como referência para avaliação de outras estratégias (W. Xu e Y. Liu 1999), (W. Xu e Y. Liu 2000). Porém, em aplicações práticas, este torna-se inviável, pois é necessário o conhecimento prévio das impedâncias harmônicas dos agentes. Tais grandezas não são de fácil obtenção (A. F. Zobaa e H.E.A. Aleem 2017), (M. Lamich et. al 2017), principalmente quando se trata de equipamentos não lineares e devido à dinâmica de operação dos sistemas elétricos. Por isso, na tentativa de contornar a necessidade da obtenção destas impedâncias harmônicas, outras soluções foram propostas.

Nesse contexto, são destacados o Método da Impedância Dominante (I. N. Santos et. al 2021), o Método do Chaveamento de Capacitores (A. C. dos Santos et al. 2019), o Método da Injeção de Corrente Harmônica (A.C. dos Santos e I. N. Santos 2021), Método que utiliza Filtros Ativos (F. Clement Veliz 2022). Eles apresentam a vantagem de não ser necessário o conhecimento prévio das impedâncias do sistema. Contudo, causam perturbações à rede elétrica (metodologias invasivas), fato que pode dificultar sua aplicação prática.

Em se tratando de propostas não invasivas podem ser citados o uso de métodos de regressão (Y. Wang et.al 2016), (Matos et. al 2016) e a análise de componentes independentes (Karimzadeh et. al 2016), (Zhao e Yang 2016). Além dessas metodologias, foi proposta a aplicação da Teoria da Potência Conservativa (CPT) na atribuição de responsabilidades. Nesse trabalho, a investigação foi baseada nas potências de

distorção, sem apresentar percentuais de responsabilidades por ordens harmônicas (H. K. M. Paredes 2011).

Ainda no contexto da CPT, outro trabalho mais recente, com a finalidade de realizar o compartilhamento de responsabilidades devido às distorções harmônicas de tensão foi proposto. Nele, foram medidas as correntes dispersas de cada consumidor, avaliando a contribuição de cada um em relação à corrente total dispersa, medida em um ponto de acoplamento comum (PAC). Para comparação e validação dos resultados, foi utilizado o Método do Chaveamento de Capacitores (Diego T. Rodrigues et al. 2020).

Diante da apresentação resumida de alguns dos principais métodos de compartilhamento de responsabilidades existentes na literatura, este artigo procura implementar, através de simulações computacionais no ambiente MATLAB/Simulink, uma comparação entre a metodologia que utiliza a Teoria da Potência Conservativa e o método da Superposição, em um sistema elétrico trifásico composto por consumidores com cargas lineares e não lineares.

Vale ressaltar que a chamada corrente dispersa, calculada a partir dos sinais de tensão e corrente instantâneos nos pontos de interesse, que são o PAC e os alimentadores de conexão de cada consumidor, será utilizada como parâmetro para o compartilhamento de responsabilidades no que tange às distorções harmônicas de tensão, através da CPT. Também, faz-se importante deixar claro que a metodologia aplicada neste artigo foi proposta em (Diego T. Rodrigues et al. 2020).

2. MÉTODO DA SUPERPOSIÇÃO

O Método da Superposição é utilizado como referência pela sua consistência física e matemática. Além disso, uma vez que as avaliações são computacionais, a dificuldade de obtenção das impedâncias harmônicas é superada.

Esse método tem como finalidade determinar as contribuições harmônicas de tensão ou corrente, para um determinado PAC da rede elétrica. Visto que a proposta de compartilhamento, através da Teoria da Potência Conservativa, está inserida no contexto de compartilhamento das tensões, as definições e fundamentações matemáticas a seguir serão direcionadas para o Método da Superposição das Tensões.

Para a superposição, basicamente o sistema elétrico é dividido em duas partes, onde a primeira representa o sistema supridor e a segunda o sistema consumidor, de acordo com a Fig. 1.

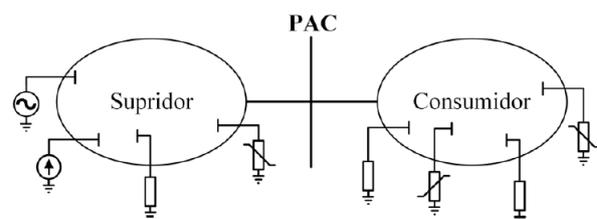


Fig. 1 Representação simplificada de um sistema elétrico utilizado como base para aplicação do Método da Superposição (Gianesini, B. M. 2020).

A partir da Fig. 1, o circuito equivalente de Norton, para uma referida ordem harmônica h , é mostrado na sequência:

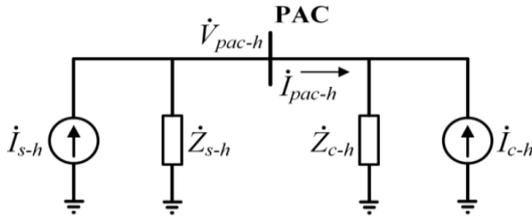


Fig. 2 Equivalente de Norton para o sistema elétrico mostrado na Fig. 1 (Gianesini, B. M. 2020).

Em que:

- \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} representam as distorções harmônicas originadas do circuito equivalente do supridor e do consumidor, respectivamente;
- \dot{Z}_{s-h} e \dot{Z}_{c-h} são as impedâncias harmônicas do sistema supridor e consumidor, respectivamente.

Observando a Fig. 2, verifica-se que a tensão \dot{V}_{pac-h} é resultado da superposição dos efeitos das fontes de corrente, provenientes dos sistemas supridor e consumidor. Assim, as contribuições individuais de cada uma das partes para a tensão total observada no PAC podem ser calculadas aplicando o teorema da superposição (Fig. 3).

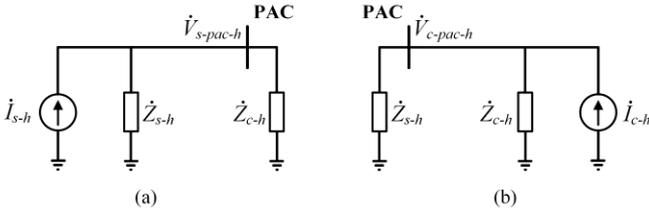


Fig. 3 Circuitos equivalentes de Norton, para uma ordem h , considerando (a) a contribuição do supridor e (b) a contribuição do consumidor, para a tensão no PAC (Gianesini, B. M. 2020).

Com essas considerações, é possível determinar as contribuições de tensão harmônica de ordem h do supridor e do consumidor para a tensão total do PAC, de acordo com (1) e (2), nesta ordem.

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

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

Por fim, para estabelecer os percentuais referentes a responsabilidade de cada um dos agentes, utiliza-se as projeções indicadas na Fig. 4 e as igualdades mostradas em (3) e (4).

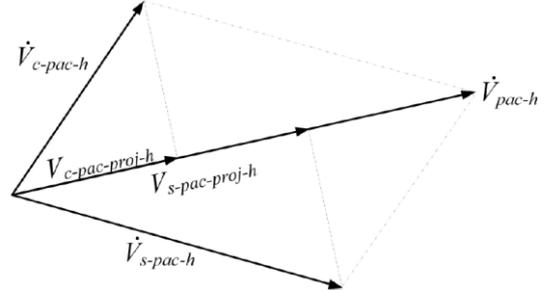


Fig. 4 Projeções das contribuições de tensão do consumidor e do supridor para a tensão total do PAC (Gianesini, B. M. 2020).

$$\%V_{pac-cons-h} = \frac{|V_{c-pac-proj-h}|}{|V_{s-pac-proj-h}| + |V_{c-pac-proj-h}|} \times 100\% \quad (3)$$

$$\%V_{pac-sup-h} = \frac{|V_{s-pac-proj-h}|}{|V_{s-pac-proj-h}| + |V_{c-pac-proj-h}|} \times 100\% \quad (4)$$

3. TEORIA DA POTÊNCIA CONSERVATIVA APLICADA AO COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADES HARMÔNICAS

A. Teoria da Potência Conservativa

Visto que a variável de interesse para a proposta de compartilhamento de responsabilidade de tensões harmônicas é a corrente dispersa, as definições de potência ativa, energia reativa e integral imparcial de tensão, não serão abordadas neste artigo. Tais considerações, necessárias para caracterização de cargas em redes elétricas que apresentam distorções de tensão e corrente encontram-se em (H. K. M. Paredes 2011).

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 (5) e (6):

$$i_{a-\lambda} = \frac{P_{\lambda}}{V_{\lambda}^2} v_{\lambda} \quad (5)$$

$$i_{r-\lambda} = \frac{W_{r-\lambda}}{\hat{V}_{\lambda}^2} \hat{v}_{\lambda} \quad (6)$$

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 a tensão eficaz de v_{λ} ;

- \hat{v}_λ é a integral imparcial da tensão sem o seu valor médio;
- \hat{V}_λ é o valor eficaz de \hat{v}_λ ;
- $W_{r-\lambda}$ é a energia reativa.

Dando continuidade, a corrente ativa dispersa e a corrente reativa dispersa são definidas em (7) e (8).

$$i_{as-\lambda} = \sum_{h \in \{K\}} \frac{P_{h-\lambda}}{V_{h-\lambda}^2} v_{h-\lambda} - i_{a-\lambda} \quad (7)$$

$$i_{rs-\lambda} = \sum_{h \in \{K\}} \frac{W_{rh-\lambda}}{\hat{V}_{h-\lambda}^2} \hat{v}_{h-\lambda} - i_{r-\lambda} \quad (8)$$

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 entre a corrente ativa dispersa e a corrente reativa dispersa, de acordo com (9).

$$i_{s-\lambda} = i_{as-\lambda} + i_{rs-\lambda} \quad (9)$$

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 (Diego T. Rodrigues et al. 2020).

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

Visto que a corrente dispersa é determinada no domínio do tempo, para realizar o compartilhamento de responsabilidades devido às distorções harmônicas de tensão, deve-se antes fazer sua decomposição no espectro de frequências, obtendo assim seu valor em módulo e ângulo, em uma referida ordem harmônica h .

Com a finalidade de um melhor entendimento da situação proposta, a Fig. 5 mostra uma rede elétrica genérica, que possui uma fonte, cargas lineares e cargas não lineares, conectadas a um ponto de acoplamento comum.

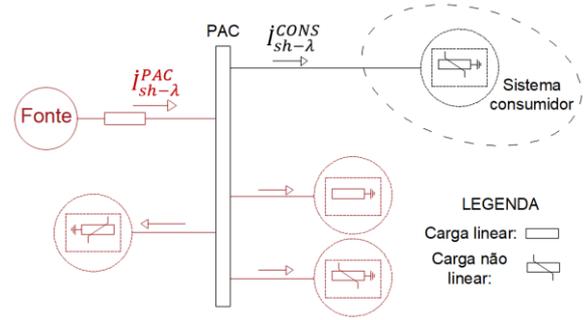


Fig. 5 Diagrama unifilar de um sistema elétrico genérico, com as correntes dispersas no ponto de acoplamento e no consumidor de interesse.

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 fazer 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. 6 tem-se essa representação:

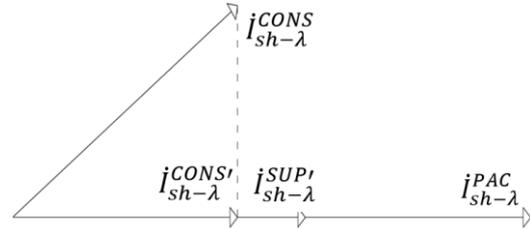


Fig. 6 Fasores da corrente dispersa, utilizados no compartilhamento de responsabilidade devido às distorções harmônicas de tensão, através da CPT.

Com essas considerações, o percentual de responsabilidade do consumidor será obtido de acordo com (10).

$$\%V_{pac-cons-h} = \frac{i_{sh-\lambda}^{CONS}}{i_{sh-\lambda}^{PAC}} \times 100\% \quad (10)$$

E o percentual de responsabilidade do sistema supridor é obtido em (11).

$$\%V_{pac-sup-h} = \frac{i_{sh-\lambda}^{PAC} - i_{sh-\lambda}^{CONS}}{i_{sh-\lambda}^{PAC}} \times 100\% = \frac{i_{sh-\lambda}^{SUP}}{i_{sh-\lambda}^{PAC}} \times 100\% \quad (11)$$

O mesmo procedimento é replicado para determinar as responsabilidades dos demais consumidores ou cargas lineares/não lineares.

Finalmente, vale ressaltar que a metodologia exposta nesse item necessita somente dos sinais instantâneos de tensão e corrente no PAC, e a corrente instantânea de cada consumidor. Portanto, essa metodologia possui a vantagem de ser não invasiva, não existindo a possibilidade de causar qualquer perturbação na rede elétrica.

4. SISTEMA ELÉTRICO E CASOS SIMULADOS

Com a finalidade de avaliar a resposta da CPT no compartilhamento de responsabilidade devido à distorção harmônica de tensão frente a existência de diferentes tipos de

consumidores conectados a um PAC, utilizou-se o sistema elétrico mostrado na Fig. 7. O sistema foi simulado utilizando-se o software MATLAB através da ferramenta de simulação de sistemas elétricos chamada Simulink.

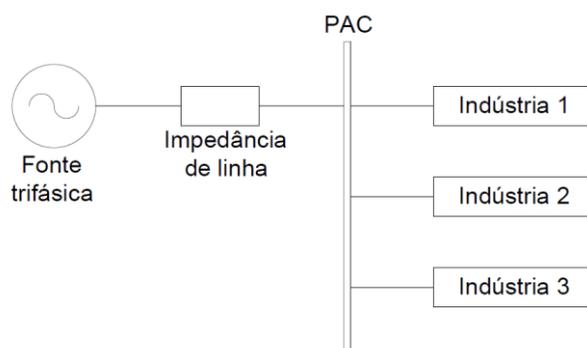


Fig. 7 Diagrama genérico da rede elétrica simulada no software MATLAB/Simulink.

Para a Fig. 7, os dados da fonte trifásica e a impedância de linha são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros da fonte trifásica e da impedância de linha.

Tensão de linha da fonte/frequência	13,8 kV/60 Hz
Resistência da impedância de linha	0,09 Ω
Indutância da impedância de linha	3,36 mH

Definidas as características do sistema de alimentação ligado ao PAC, 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. 8.

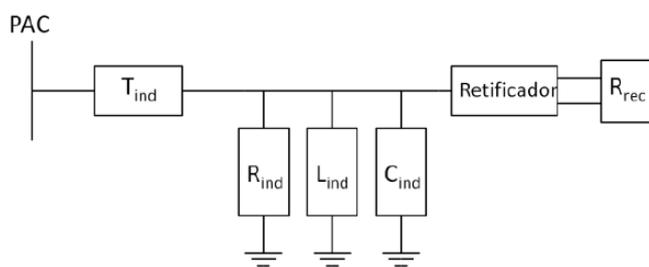


Fig. 8 Disposição dos elementos presentes nas três indústrias, para o caso 1 (Diego T. Rodrigues et al. 2020).

Na Fig. 8, todas as cargas lineares 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 (R_{rec}).

Este caso (caso 1) já fora anteriormente implementado no artigo (Diego T. Rodrigues et al. 2020), porém em outro software de simulação (PSIM) e com a comparação feita com outra metodologia de compartilhamento (Método do Chaveamento Capacitivo). O mesmo foi aqui reavaliado com a intenção de validação do arranjo implementado no

MATLAB e também para ser um balizador comparativo das demais situações analisadas (caso 2, 3 e 4).

Nas Tabelas 2 e 3 são mostrados os parâmetros dos transformadores e dos demais elementos de cada indústria para o caso 1.

Tabela 2. Parâmetros dos transformadores (T_{ind}).

Parâmetros	Indústrias 1, 2 e 3
Potência nominal	6 MVA
Resistência	1,5 %
Reatância	7 %
Conexão	$\Delta - Y$ (aterrado)
Tensão primária/Tensão secundária	13,8 kV/380 V

Tabela 3. Parâmetros das cargas lineares/não lineares.

Parâmetros	Indústria 1	Indústria 2	Indústria 3
R_{ind} (Ω)	69,9	94,96	50,12
L_{ind} (mH)	233,33	263,77	224,20
C_{ind} (μF)	6,07	5,80	5,03
R_{rec} (μF)	123,97	120,01	131,88

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

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. Logo, pode-se concluir que ela foi conectada em 13,8 kV. O restante da rede elétrica mostrada na Fig. 7 foi mantido.

C. Parâmetros das indústrias para o caso 3

Semelhante ao caso 2, a indústria 1 foi substituída por uma carga linear, que agora possui característica RL em paralelo, ligada em estrela aterrada e equilibrada. O valor da resistência adotado foi 152,35 Ω e indutância igual a 303 mH, por fase.

D. Parâmetros das indústrias para o caso 4

Finalmente, para o caso 4, a indústria 1 foi substituída por uma carga RLC. Nesse caso, a resistência está em série com a indutância, enquanto que a parcela capacitiva foi ligada em paralelo com a carga RL série. A resistência tem valor igual a 165,28 Ω , a indutância valor igual a 249,07 mH e a capacitância com valor igual a 1,7 μF , todos por fase.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 4, 5, 6 e 7 são mostrados os resultados do compartilhamento através da CPT para cada um dos casos, comparando-os com o método da Superposição das Tensões.

Tabela 4. Resultados da simulação para o caso 1.

Ordem harmônica	Indústria 1 (%)		Indústria 2 (%)		Indústria 3 (%)	
	Sup.	CPT	Sup.	CPT	Sup.	CPT
5 ^a	33,91	34,47	34,98	36,41	30,78	29,11
7 ^a	35,51	34,96	35,42	36,81	30,77	28,22
11 ^a	33,60	31,77	39,30	40,73	26,03	27,48
13 ^a	33,16	30,22	39,20	39,60	26,77	30,17

Tabela 5. Resultados da simulação para o caso 2.

Ordem harmônica	Indústria 1 (%)		Indústria 2 (%)		Indústria 3 (%)	
	Sup.	CPT	Sup.	CPT	Sup.	CPT
5 ^a	0,03	0,028	53,27	55,05	46,34	44,98
7 ^a	0,07	0,048	53,31	55,78	47,09	44,27
11 ^a	0,14	0,09	61,54	61,21	38,76	38,88
13 ^a	0,02	0,1	59,50	59,89	38,90	40,22

Tabela 6. Resultados da simulação para o caso 3.

Ordem harmônica	Indústria 1 (%)		Indústria 2 (%)		Indústria 3 (%)	
	Sup.	CPT	Sup.	CPT	Sup.	CPT
5 ^a	0,01	0,20	53,14	54,99	46,43	44,79
7 ^a	0,01	0,85	53,15	55,47	47,22	43,67
11 ^a	0,00	2,27	61,64	59,95	38,71	37,77
13 ^a	0,01	2,92	59,42	58,11	38,90	38,96

Tabela 7. Resultados da simulação para o caso 4.

Ordem harmônica	Indústria 1 (%)		Indústria 2 (%)		Indústria 3 (%)	
	Sup.	CPT	Sup.	CPT	Sup.	CPT
5 ^a	0,00	1,69	53,23	54,20	46,33	44,11
7 ^a	0,04	3,72	53,42	53,97	47,01	42,31
11 ^a	0,03	8,02	61,59	56,45	38,51	35,53
13 ^a	0,19	9,94	59,34	53,78	39,07	36,28

Observando a Tabela 4, que se refere ao caso 1, percebe-se que os resultados obtidos através da CPT ficaram próximos aos do método da Superposição. A maior divergência encontrada foi na 13^a harmônica, que foi igual a 3,4 pontos percentuais para a indústria 3. Nessa mesma ordem harmônica é importante destacar que a indústria 1 apresentou discrepância de 2,94 pontos em relação ao método da Superposição. A convergência dos resultados pode ser devido à proximidade entre os arranjos elétricos adotados para as três indústrias, ou seja, são os mesmos dispositivos elétricos com pequenas variações nos valores de seus parâmetros. Além disso, houve coerência dos resultados com aqueles encontrados em (Diego T. Rodrigues et al. 2020).

Para o caso 2, há uma convergência dos resultados, semelhante aos apresentados no caso 1. A maior diferença ocorreu na sétima ordem harmônica, com 2,82 pontos percentuais. Ainda sobre a Tabela 5, pode-se afirmar que não houve parcela de responsabilidade atribuída para a carga puramente resistiva em ambos os métodos (Superposição e CPT), como esperado.

Agora, para o caso 3, pode-se notar percentuais atribuídos para a carga linear RL pela CPT, principalmente para ordens harmônicas mais elevadas, tais como décima primeira e décima terceira, em que se obteve responsabilidades entre 2 e 3%.

No caso 4, que propôs uma carga RLC para a indústria 1, foi percebida uma diferença um pouco maior. Ao analisar a Tabela 7, houve uma maior discrepância dos resultados da CPT apenas para as 11^a e 13^a ordens, porém abaixo do

patamar de 10%. Acredita-se que a presença da capacitância em paralelo, pode ser a causa dos percentuais mais acentuados atribuídos para a carga linear RLC. Não obstante a isto, todos os demais resultados encontram-se com boa convergência.

6. CONCLUSÕES

Este artigo primou por apresentar, num primeiro instante, uma síntese do estado da arte relacionada à temática do compartilhamento de responsabilidades harmônicas. A mesma foi seguida de um detalhamento da Metodologia da Superposição de efeitos para o compartilhamento de responsabilidades, a qual é adotada, neste trabalho, como referência para análise de desempenho do procedimento implementado.

Uma vez estabelecida a fundamentação da Teoria da Potência Conservativa (CPT) e sua formulação matemática para fins do compartilhamento de responsabilidades sobre os harmônicos de tensão, teve-se a proposição de quatro distintos casos para estudo e análise de desempenho desta metodologia não invasiva. As análises realizadas (casos 02, 03 e 04), de forma inédita, trazem como balizador o Método da Superposição.

De um modo geral, a Teoria da Potência Conservativa se mostrou eficaz no sentido de identificar os percentuais de responsabilidades das partes envolvidas, de forma direta e não invasiva, sendo observadas discrepâncias apenas em duas situações de análise, porém inferiores a 10%.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) e ao Projeto P&D UFU/TCE-CEB-Neenergia (PD-05160-1803/2018), pelo suporte concedido à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- A. C. dos Santos, I. N. Santos, e J. C. de Oliveira, "Capacitor switching methodology for responsibility sharing of harmonic voltage distortions", *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 29, n° 12, p. e12135:1-16, 2019. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12135>.
- A. C. dos Santos and I. N. Santos, "Assignment of harmonic voltage contributions using the harmonic current injection method," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 1–15, 2021, doi: 10.1002/2050-7038.12608.
- A. F. Zobaa and H. E. A. Aleem, "Power Quality in Future Electrical Power Systems". London, UK: The Institution of Engineering and Technology, 2017.
- Diego T. Rodrigues, Matheus B. Arcadepani, Helmo K. M. Paredes, Alexandre C. Moreira, Jakson P. Bonaldo, "Aplicação da Teoria de Potência Conservativa para Compartilhamento de Responsabilidade Devido à Distorções

- Harmônicas de Tensão", Congresso Brasileiro de Automática (CBA), 2020. <https://doi.org/10.48011/asba.v2i1.1613>
- F. Clement Veliz, S. L. Varricchio, and C. de Oliveira Costa, "Determination of harmonic contributions using active filter: Theoretical and experimental results," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 137, pp. 107664:1–11, 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107664.
- Gianesini, B. M, "Compartilhamento de responsabilidades harmônicas: implementação de Benchmark do IEEE e aplicação de metodologias", Universidade Federal de Uberlândia (Dissertação), 2020.
- H. K. M. Paredes, "Teoria da Potência Conservativa: Uma Nova Abordagem para o Controle Cooperativo de Condicionadores de Energia e Considerações sobre Atribuição de Responsabilidades", Universidade Estadual de Campinas (Tese), 2011.
- I. N. Santos, "Uma contribuição à avaliação de desempenho dos principais métodos para a atribuição de responsabilidades sobre as distorções harmônicas", Universidade Federal de Uberlândia (Dissertação), 2007.
- 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," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, pp. 1–16, 2021, doi: 10.1002/2050-7038.12895.
- Karimzadeh, F., Esmacili, S., Hosseini, S.H.: 'Method for determining utility and consumer harmonic contributions based on complex independent component analysis', *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2016, 10, (2), pp. 526–534
- K. Srinivasan, "On separating customer and supply side harmonic contributions", *IEE Trans. Power Deliv.*, vol. 11, n°2, p. 1003-1008, 1996. <https://doi.org/10.1109/61.489363>.
- K. Srinivasan e R. Jutras, "Conforming and non-conforming current for attributing steady state power quality problems", *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol.13, n°1, p.212-217, 1998. <https://doi.org/10.1109/61660880>.
- L. Cristaldi e A. Ferrero, "Harmonic power flow analysis for the measurement of the electric power quality", *IEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 44, n°3, p. 683-685, 1995. <https://doi.org/10.1109/19.387308>.
- Matos, E.O., Soares, T.M., Bezerra, U.H., et al.: 'Using linear and non- parametric regression models to describe the contribution of non-linear loads on the voltage harmonic distortions in the electrical grid', *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2016, 10, (8), pp. 1825–1832
- M. Lamich, J. Balcells, M. Corbalán, and E. Griful, "Nonlinear Loads Model for Harmonics Flow Prediction, Using Multivariate Regression," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 6, pp. 4820–4837, 2017, doi: 10.1109/TIE.2017.2674596
- P.H. Swart, M. J. Case, e J. D. Van Wyk, "On techniques for localization of sources producing distortion in electric power networks", *Eur. Trans. Electr. Power*, vol. 4, n°6, p.485-489, 1994. <https://doi.org/10.1002/etep.4450040611>.
- W. Xu e Y. Liu, "A method to determinate customer harmonic contributions for incentive-based harmonic control applications", in 1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.99CH36364), 1999, p. 361-366. <https://doi.org/10.1109/PESS.1999.784375>.
- W. Xu e Y. Liu, "A method to determinate customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling", *IEE Trans. POWER Deliv.*, vol. 15, n°2, p. 804-811, 2000. <https://doi.org/10.1109/61.853023>.
- W. Xu, X. Liu, e Y. Liu, "An Investigation on the validity of power direction method for harmonic source determination", *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 18, n°1, p. 214-219, 2003. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2002.803842>.
- Y. Wang, H. E. Mazin, W. Xu, e B. Huang, "Estimating harmonic impact of individual loads using multiple linear regression analysis", *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 26, no 4, p. 809–824, 2016. <https://doi.org/10.1002/etep.2109>
- Zhao, X., Yang, H.: 'A new method to calculate the utility harmonic impedance based on FastICA', *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2016, 31, (1), pp. 381–388