

Aplicação da Teoria de Potência Conservativa para Compartilhamento de Responsabilidade Devido à Distorções Harmônicas de Tensão

Diego T. Rodrigues*, Matheus B. Arcadepani*, Helmo K. M. Paredes*,
Alexandre C. Moreira**, Jakson P. Bonaldo***.

* Grupo de Automação e Sistemas Integráveis - GASI, Departamento de Controle e Automação, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Sorocaba - SP, Brasil (e-mails: engdiegotr@gmail.com, m.arcadepani@unesp.br, helmo.paredes@unesp.br)

**Departamento das Engenharias de Telecomunicações e Mecatrônica, Universidade Federal de São João del Rei - UFSJ, Ouro Branco - MG, Brasil (e-mail: amoreira@ufsj.edu.br)

*** Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Mato Grosso - UFMT, Cuiabá - MT, Brasil (email: jbonaldo@gmail.com)

Abstract: Due technological advances and increase of power electronics devices, which represent non-linear loads, unwanted phenomena have emerged in the electrical systems, such as, harmonic distortions. Therefore, rules and methodologies about this problem are being studied and discussed. This paper proposes the application of the Conservative Power Theory to assign responsibilities due to harmonic distortions. The electrical system used is a three-phase sine wave with four wires and consists of the supply system and three industries connected at the common coupling point. The analyzes will be proven based on computer simulations made in the PSIM. Additionally, the results obtained with the proposed methodology will be compared to the results of the switched capacitor technique proposed by (Santos et al., 2019).

Resumo: Dado o avanço tecnológico e uso dos dispositivos da eletrônica de potência, conhecidas como cargas não lineares, começaram a surgir fenômenos indesejados na rede elétrica, como por exemplo, as distorções harmônicas. Logo, normas e metodologias referentes a este problema são foco de estudos e discussões. Este trabalho tem como objetivo propor uma metodologia de aplicação da Teoria de Potência Conservativa para atribuição de responsabilidade devido às distorções harmônicas. O sistema elétrico utilizado para análise é composto pelo sistema supridor e três indústrias conectadas ao mesmo ponto de acoplamento comum. A metodologia proposta será validada por meio de simulações computacionais feitas no software PSIM. Adicionalmente, os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta serão comparados com os resultados obtidos pela técnica do Capacitor Chaveado proposto por (Santos et al., 2019).

Keywords: Electronics power devices, nonlinear loads, harmonic distortions, Switched Capacitor, Conservative Power Theory.

Palavras-chave: Eletrônica de potência, carga não linear, distorções harmônicas, Capacitor Chaveado, Teoria da Potência Conservativa.

1. INTRODUÇÃO

Com os avanços tecnológicos dos dispositivos de eletrônica de potência, houve a propagação destes dispositivos em diversos segmentos da sociedade e ainda mais atual, um aumento de seu uso devido a popularização dos recursos energéticos distribuídos (RED), como por exemplo, as fontes renováveis de energia, armazenamento de energia, veículos elétricos entre outros, com isso naturalmente observa-se o aumento no interesse de identificar os efeitos indesejados desses dispositivos nos sistemas elétricos (ANEEL, 2016) (Luiz, 2012) (Marques et al., 2004) (Watson et al., 2009) (Bollen et al., 2017).

Tais dispositivos de eletrônica de potência são conhecidos como cargas não lineares, ou seja, cargas que promovem a distorção da forma de onda da corrente e tensão. Estas cargas presentes individualmente na rede não causam distorções harmônicas significantes, porém um conjunto de cargas

não lineares podem promover uma série de problemas de qualidade de energia na rede da concessionária e, por consequência, afetar os consumidores finais. Logo, com o passar do tempo, o nível de distorção harmônica em sistemas de corrente alternada vem aumentando gradativamente (Paredes et al., 2017) (Dugan et al., 2012) (Watson et al., 2009) (Kallair et al., 2017) (IEEE P519, 2015) (IEEE, 2014).

A presença de harmônicos de tensão e corrente provocados pelas cargas não lineares, causam no sistema o surgimento de diversos problemas, como por exemplo, o fluxo de potência harmônico, que dependendo da direção pode acarretar perdas adicionais no sistema elétrico, diminuição da vida útil dos equipamentos sensíveis, aumento das vibrações em máquinas elétricas dentre outros fatores. Assim, um dos principais desafios quanto à distorção harmônica é adotar normas mais rigorosas quanto às cargas não lineares, entretanto ainda estão em discussão as técnicas e metodologias de

separação de responsabilidades entre os consumidores e a concessionária de energia (Santos, 2015) (Santos, 2007) (Moustafa et al., 2000) (Shojaie, 2014).

Ainda não existe um consenso sobre a atribuição de responsabilidade da distorção harmônica presente na rede, com intuito de direcionar ao responsável o ônus da solução para se adequar às normas vigentes. Ao longo dos anos, algumas metodologias para o compartilhamento de responsabilidades foram apresentadas, como o método da corrente conforme e não-conforme (Srinivasan, 1998), que apresenta simplificações matemáticas que afetam significativamente sua adequação aos termos físicos, como verificado por Santos (Santos, 2015). Também foram propostos o método do fluxo de potência harmônica (Santos, 2007) e o método da análise do espectro de frequências (Santos, 2015).

Neste contexto também se encontra o método da superposição (Santos et al., 2012) que se baseia no modelo matemático clássico de circuitos elétricos. Este método apresenta resultados consistentes, contudo para sua aplicação é necessário conhecer os valores das impedâncias harmônicas do circuito em análise, o que não é trivial, tornando sua aplicação prática bastante complexa.

Em (Santos et al., 2019), foi apresentada uma metodologia baseada na técnica do chaveamento do capacitor para atribuição de responsabilidade. Para a aplicação desta técnica é necessário que seja feita a medição dos parâmetros de tensão e corrente antes e depois da inserção de um capacitor no circuito em análise. Comparado ao método da superposição, a técnica do capacitor chaveado não requer o conhecimento das impedâncias harmônicas para sua aplicação. Contudo, a desvantagem é a necessidade da instalação de um elemento físico (capacitor) no sistema, que embora de pequeno valor, pode causar alterações nos parâmetros do sistema, podendo resultar em possíveis interações com a indutância intrínseca desconhecida do sistema e eventuais ressonâncias.

Visto as lacunas das aplicações acima explanadas, este artigo tem como objetivo apresentar uma metodologia de cálculo baseada na CPT, do inglês *Conservative Power Theory* para atribuir responsabilidades na geração de distorções harmônicas de tensão. Destaca-se que a técnica baseada na CPT não requer o conhecimento prévio das impedâncias harmônicas nem a inserção de um capacitor na rede. O método será discutido e analisado considerando o mesmo cenário estudado e apresentado pela técnica do Capacitor Chaveado demonstrada em (Santos et al., 2019). Além disso, tal método foi reproduzido, com intuito de realizar uma análise comparativa e validar o método proposto neste artigo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão apresentadas as bases teóricas dos métodos do Capacitor Chaveado e da CPT, para realizar os cálculos das atribuições de responsabilidade devido às distorções harmônicas.

2.1 Método do Capacitor Chaveado

Tal método foi proposto em (Santos et al., 2019) e consiste na inserção de um capacitor de pequeno valor no ponto de acoplamento comum (PAC) e a medição de corrente e tensão antes e depois da inserção do capacitor no PAC.

A Figura 1 apresenta o circuito equivalente do sistema sem o capacitor. \dot{I}_{s-h} é a corrente que representa a distorção harmônica do sistema supridor, \dot{I}_{c-h} é a corrente que indica a distorção harmônica do consumidor, e Z_{s-h} e Z_{c-h} são as impedâncias do supridor e do consumidor, respectivamente. A tensão e a corrente das contribuições de ambos os sistemas (supridor e consumidor) são representados por \dot{U}_{pac-h} e \dot{I}_{pac-h} , respectivamente.

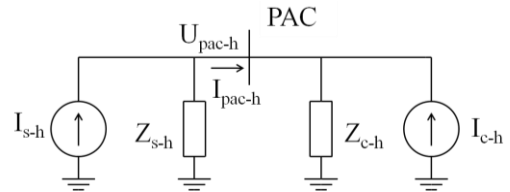


Figura 1. Circuito equivalente sem o capacitor.

A Figura 2 representa o circuito equivalente do sistema com a inserção do capacitor no PAC. Os termos com apóstrofos (\dot{U}'_{pac-h} e \dot{I}'_{pac-h}) são as contribuições harmônicas da tensão e a corrente do supridor e consumidor, porém representam a nova condição no sistema, ou seja, os valores medidos após a conexão do capacitor ao circuito, sendo \dot{Z}_{cap-h} é a impedância capacitiva inserida.

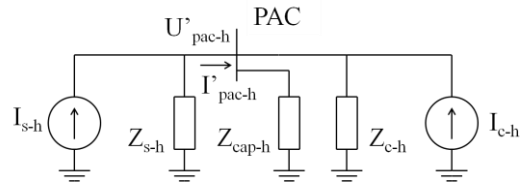


Figura 2. Circuito equivalente com o capacitor inserido.

Analisando as Figuras 1 e 2 e aplicando as leis de Kirchhoff, obtiveram-se as equações (1) e (2) que calculam a magnitude de \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} .

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

$$\dot{I}_{c-h} = \frac{\left[\dot{Z}_{cap-h} (\dot{U}_{pac-h} \cdot \dot{I}'_{pac-h} - \dot{U}'_{pac-h} \cdot \dot{I}_{pac-h}) \right] - (\dot{U}_{pac-h} \cdot \dot{U}'_{pac-h})}{\dot{Z}_{cap-h} (\dot{U}'_{pac-h} - \dot{U}_{pac-h})} \quad (2)$$

Para calcular o compartilhamento de responsabilidade entre o supridor e consumidor, utiliza-se a projeção vetorial, apresentada na Figura 3, e detalhada a seguir.

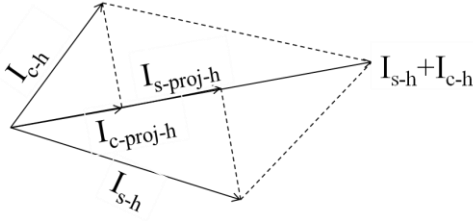


Figura 3. Projeção vetorial das correntes no PAC.

Considerando a soma de \hat{I}_{s-h} e \hat{I}_{c-h} (corrente total), a projeção da corrente \hat{I}_{s-h} em $\hat{I}_{s-h} + \hat{I}_{c-h}$ representa um número escalar que quantifica a parcela de responsabilidade do supridor devido às distorções harmônicas presentes no PAC. Por outro lado, a projeção da corrente \hat{I}_{c-h} em $\hat{I}_{s-h} + \hat{I}_{c-h}$ representa a em grandeza escalar a parcela de responsabilidade do consumidor devido às distorções harmônicas no PAC.

Como o procedimento apresentado por Santos (Santos et al., 2019) envolve projeções de corrente, a princípio, pode-se concluir que os resultados encontrados indiquem o compartilhamento de responsabilidade sobre a distorção harmônica de corrente (\hat{I}_{pac-h}), porém, isto não é verdade, pois ao se observar a Figura 1, pode se notar que a \hat{I}_{pac-h} não é o mesmo que $\hat{I}_{s-h} + \hat{I}_{c-h}$, contudo, a tensão total no ponto de acoplamento (\hat{U}_{pac-h}) pode ser calculada pelo produto ($\hat{I}_{s-h} + \hat{I}_{c-h}$) pela impedância equivalente (\hat{Z}_{s-h} em paralelo com \hat{Z}_{c-h}), neste sentido, no caso em que somente a fonte gera distorção harmônica, \hat{U}_{pac-h} pode ser obtido pelo produto de \hat{I}_{s-h} e a impedância paralela de \hat{Z}_{s-h} e \hat{Z}_{c-h} . Por outro lado se somente o consumidor gerar distorção, a tensão \hat{U}_{pac-h} poderá ser calculada pelo produto de \hat{I}_{c-h} pela impedância paralela de \hat{Z}_{s-h} e \hat{Z}_{c-h} . Então, a projeção de \hat{I}_{s-h} e \hat{I}_{c-h} sobre a soma ($\hat{I}_{s-h} + \hat{I}_{c-h}$) está diretamente ligada a contribuição do supridor e do consumidor, respectivamente, sobre a distorção harmônica total de tensão no barramento PAC e não de corrente.

2.2 Teoria da Potência Conservativa

A CPT foi definida em Tenti et al. (2011a, b) para analisar as redes elétricas genéricas no domínio do tempo sob condição de tensões distorcidas ou não.

Levando em consideração as definições básicas de potência ativa e energia reativa, num sistema trifásico balanceado, decompõem-se a corrente no PAC em: corrente ativa, corrente reativa e corrente residual (harmônicas) como definido em (3).

$$\mathbf{i}_{PAC} = \mathbf{i}_a + \mathbf{i}_r + \mathbf{i}_v \quad (3)$$

tal que:

- \mathbf{i}_a é o vetor contendo as correntes ativas:

$$\mathbf{i}_a = \frac{\langle \mathbf{v}, \mathbf{i} \rangle}{\|\mathbf{v}\|^2} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{P}{V^2} \mathbf{v} = \begin{bmatrix} i_{aa} \\ i_{ab} \\ i_{ac} \end{bmatrix} \quad (4)$$

- \mathbf{i}_r é o vetor contendo as correntes reativas:

$$\mathbf{i}_r = \frac{\langle \hat{\mathbf{v}}, \mathbf{i} \rangle}{\|\hat{\mathbf{v}}\|^2} \begin{bmatrix} \hat{v}_a \\ \hat{v}_b \\ \hat{v}_c \end{bmatrix} = \frac{W_r}{\hat{V}^2} \hat{\mathbf{v}} = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (5)$$

- \mathbf{i}_v é o vetor contendo as correntes residuais (harmônicas)

$$\mathbf{i}_v = \mathbf{i}_{PAC} - \mathbf{i}_a - \mathbf{i}_r \quad (6)$$

onde P é a potência ativa, W_r é a energia reativa, $\hat{\mathbf{v}}$ é a integral sem valor médio da tensão v , $\mathbf{V} = \|\mathbf{v}\| = \sqrt{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2}$ é o valor eficaz coletivo das tensões e $\hat{\mathbf{V}} = \|\hat{\mathbf{v}}\|$ é o valor eficaz coletivo de \hat{v} .

Conforme discutido em (Paredes, 2011), a corrente residual representa as contribuições das correntes harmônicas geradas pela carga não-linear e as correntes harmônicas originadas pelas distorções de tensão no PAC (harmônicas presentes apenas no espectro a tensão), e seu significado físico só pode ser analisado no domínio da frequência. Portanto, com base na interpretação física da corrente \mathbf{i}_v podemos analisar as contribuições harmônicas do supridor e consumidor.

A. Separação das contribuições harmônicas na corrente residual.

Diferente da corrente ativa definida em (4), no domínio da frequência, pode ser calculada individualmente uma componente ativa para cada frequência harmônica conforme (7):

$$\mathbf{i}_{ak} = \frac{\langle \mathbf{v}_k, \mathbf{i}_k \rangle}{\|\mathbf{v}_k\|^2} \begin{bmatrix} v_{ak} \\ v_{bk} \\ v_{ck} \end{bmatrix} = \frac{P_k}{V_k^2} \mathbf{v} = \begin{bmatrix} i_{aka} \\ i_{akb} \\ i_{akc} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Desta forma, o somatório do conjunto das correntes ativas harmônicas \mathbf{i}_{ak} resulta na corrente ativa harmônica total:

$$\mathbf{i}_{ah} = \sum_{k \in \{K\}} \mathbf{i}_{ak} \quad (8)$$

onde $k \in \{K\}$ representa o conjunto das harmônicas comuns das tensões e correntes. Observe que, (8) resulta idêntico a (4) só se as tensões forem senoidais, caso contrário temos:

$$\mathbf{i}_{as} = \mathbf{i}_{ah} - \mathbf{i}_a \quad (9)$$

onde \mathbf{i}_{as} é o vetor contendo as correntes ativas dispersas.

Similarmente para a corrente reativa dispersa temos:

$$\mathbf{i}_{rs} = \mathbf{i}_{rh} - \mathbf{i}_r \quad (10)$$

tal que:

$$\mathbf{i}_{rh} = \sum_{k \in \{K\}} \mathbf{i}_{rk} \quad (11)$$

é a corrente reativa harmônica total, com:

$$\mathbf{i}_{rk} = \frac{\langle \hat{\mathbf{v}}_k, \mathbf{i}_k \rangle}{\|\hat{\mathbf{v}}_k\|^2} \begin{bmatrix} \hat{v}_{ak} \\ \hat{v}_{bk} \\ \hat{v}_{ck} \end{bmatrix} = \frac{W_{rk}}{\hat{V}_k^2} \hat{\mathbf{v}} = \begin{bmatrix} i_{rka} \\ i_{rkb} \\ i_{rkc} \end{bmatrix} \quad (12)$$

sendo a componente reativa para cada frequência harmônica. Observe que (11) resulta idêntico a (5) somente para os casos de tensões senoidais.

De (7), (8), (11) e (12), observa-se que, as componentes \mathbf{i}_{as} e \mathbf{i}_{rs} só existirão quando as tensões forem distorcidas, ou

seja, quando há componentes harmônicas presentes nas tensões. Assim, o vetor contendo as correntes harmônicas geradas (termos harmônicos que existem apenas na corrente e não na tensão) exclusivamente pela carga resulta:

$$\mathbf{i}_g = \mathbf{i}_v - (\mathbf{i}_{as} + \mathbf{i}_{rs}) \quad (13)$$

Portanto, a corrente residual é decomposta conforme (14)

$$\mathbf{i}_v = \mathbf{i}_{as} + \mathbf{i}_{rs} + \mathbf{i}_g = \mathbf{i}_s + \mathbf{i}_g \quad (14)$$

onde, \mathbf{i}_s é a corrente dispersa total. Como todas as componentes em (14) são ortogonais, o valor eficaz coletivo da corrente residual resulta:

$$I_v = \sqrt{I_{as}^2 + I_{rs}^2 + I_g^2} = \sqrt{I_s^2 + I_g^2} \quad (15)$$

Finalmente de (3) e (14), a corrente total é descrita pela equação (16).

$$\mathbf{i}_{PAC} = \mathbf{i}_a + \mathbf{i}_r + \mathbf{i}_s + \mathbf{i}_g \quad (16)$$

Novamente, como todas as componentes são ortogonais, o valor coletivo eficaz da corrente total resulta:

$$I_{PAC} = \sqrt{I_a^2 + I_r^2 + I_s^2 + I_g^2} \quad (17)$$

Como a componente dispersa de corrente ($\mathbf{i}_s = \mathbf{i}_{as} + \mathbf{i}_{rs}$) só aparece quando as tensões apresentam conteúdo harmônico, para atribuir responsabilidade devido às distorções harmônicas, basta fazer a projeção da corrente dispersa de cada consumidor sobre a corrente dispersa total obtida no PAC. Assim, tal projeção indica o percentual de responsabilidade de cada agente (supridor e consumidores) devido às harmônicas de tensão presentes no PAC.

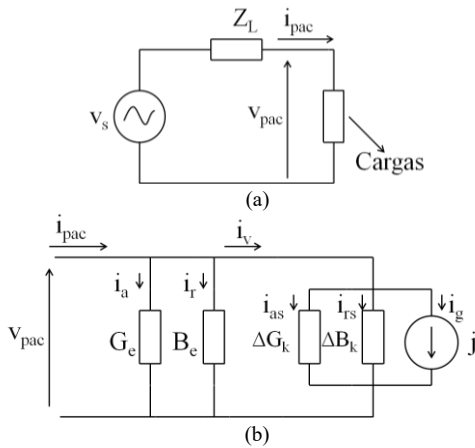


Figura. 4 (a) Circuito genérico por fase (b) Representação do circuito genérico por fase através da CPT.

3. DEFINIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO

A Figura 5 apresenta o circuito utilizado em Santos (Santos et al., 2019), o qual foi implementado no software PSIM para fins de comparação e validação da metodologia proposta neste trabalho. Destaca-se que, para a metodologia proposta baseada na CPT o capacitor (Z_{cap-h}) no PAC não é necessário, sendo então removido das simulações.

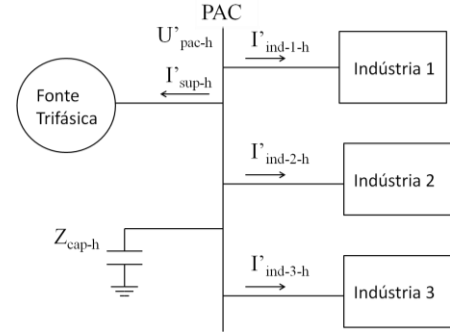


Figura. 5 Diagrama de bloco do sistema elétrico sob análise.

O bloco “Fonte Trifásica” da Figura 5 é composto por uma fonte de alimentação trifásica sem distorção em série com uma impedância de linha que representa o nível de curto-circuito no barramento. Os parâmetros da fonte, bem como os valores da impedância série são apresentados na Tabela 1. A Figura 6 apresenta esse bloco feito no PSIM.

Tabela 1. Parâmetros da fonte de alimentação

Tensão de alimentação (V)	13.800
Frequência (Hz)	60
R_s (Ω)	0,09
L_s (mH)	3,36

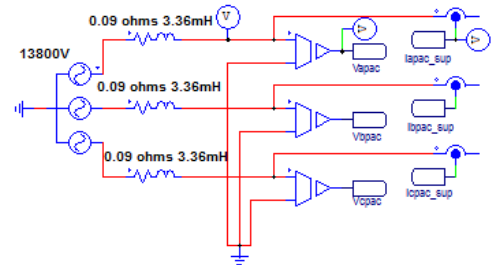


Figura. 6 Bloco "Fonte Trifásica" feito no PSIM.

Os blocos “Indústria” da Figura 5, foram implementados conforme o diagrama de blocos apresentado a Figura 7, para fins de representação de unidades de consumidor industrial. No PSIM, o bloco “Indústria” é representado pela Figura 8.

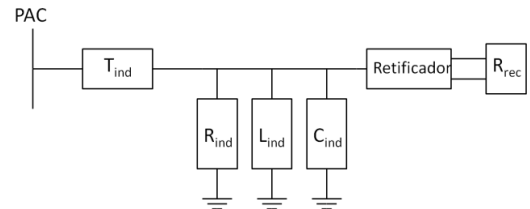


Figura. 7 Constituição interna do bloco "Indústria".

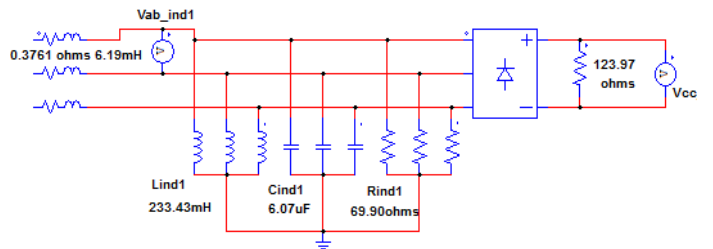


Figura. 8 Bloco "Indústria 1" no PSIM.

Os parâmetros dos transformadores e dos circuitos associados a cada unidade consumidora industrial são apresentados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Parâmetros do transformador (T_{ind})

Parâmetros	Indústrias 1, 2 e 3
Potência Nominal (MVA)	6
Resistência (%)	1,5
Reatância (%)	7
Tipo de conexão	Δ -Y
Tensão primária/Tensão secundária (V)	13.800 / 380

Tabela 3. Parâmetros do circuito

Parâmetros	Indústrias		
	1	2	3
$R_{ind} (\Omega)$	69,9	94,96	50,12
$L_{ind} (mH)$	233,43	263,77	224,20
$C_{ind} (\mu F)$	6,07	5,80	5,03
$R_{rec} (\Omega)$	123,97	120,01	131,88

Nota. Impedância referida para tensão de 13.800 V.

4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

O sistema da Figura 5 (sem capacitor) foi simulado no software PSIM utilizando os parâmetros apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3. Os resultados do método proposto neste trabalho (baseado na CPT) serão apresentados fazendo comparação com os resultados obtidos no trabalho de Santos (Santos et al., 2019) que denominaremos, por conveniência, como método do “Capacitor Chaveado” ou de forma abreviada “Cap.”.

Antes de proceder com a apresentação dos resultados da técnica proposta para atribuição de responsabilidade são apresentadas algumas medições realizadas no sistema da Figura 5. O intuito dessas medições é mostrar que existem pequenas diferenças entre os valores obtidos neste trabalho e os valores mostrados em (Santos et al., 2019). Estas diferenças podem ser atribuídas à configuração da simulação, isto é, ao passo ($Time Step = 1.252E-06$) da simulação e ao tipo de *solver* de equações diferenciais usado nos dois trabalhos. Além disso, pode haver pequenas diferenças entre os modelos de componentes elétricos usados em cada um dos trabalhos, uma vez que o trabalho utilizado como comparativo utilizou a ferramenta Simulink do Matlab em suas simulações. Adicionalmente, as características intrínsecas da CPT, como a quantidade de pontos por ciclos tomadas para a decomposição das correntes, atenuação imposta pelos filtros de média móvel, etc também podem exercer alguma influência nos valores resultantes. Mais detalhes sobre a implementação da CPT e o cálculo das potências estão disponíveis em (Paredes, 2011).

A Tabela 4 traz os valores de potência ativa, reativa e aparente para cada uma das indústrias mostradas na Figura 5. Por outro lado, a Tabela 5 mostra os valores de potências de cada uma das indústrias calculados através da CPT. Nota-se uma ligeira diferença entre os valores (menor que 2%) que pode ser visualizada na Figura 9. A Tabela 6 e Figura 10 apresentam uma comparação entre as medidas de algumas ordens harmônicas e da DHT da tensão do PAC, onde também são notadas pequenas diferenças entre os valores obtidos nos dois trabalhos.

Em geral, verifica-se que os valores obtidos com a CPT são ligeiramente maiores. Assim, como a atribuição de responsabilidade é expressa como uma razão (projeção) entre as medidas tomadas no suprridor e em cada uma das cargas (indústrias) espera-se que os graus de responsabilidades obtidos neste trabalho sejam muito similares àqueles demonstrados em (Santos et al., 2019).

Tabela 4. Potência consumida - método capacitor chaveado

Parâmetros	Indústrias		
	1	2	3
Potência ativa (MW)	4,55	4,03	5,30
Potência reativa (MVAr)	1,99	1,76	2,19
Potência aparente (MVA)	4,96	4,40	5,74

Fonte: (Santos et al., 2019)

Tabela 5. Potência consumida - método CPT

Parâmetros	Indústrias		
	1	2	3
Potência ativa (MW)	4,58	4,06	5,33
Potência reativa (MVAr)	1,99	1,76	2,20
Potência aparente (MVA)	5,05	4,50	5,80

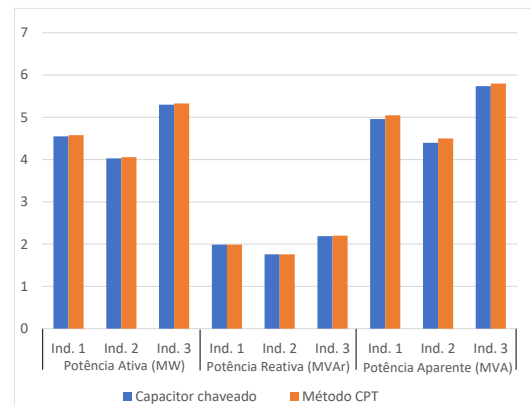


Figura. 9 Gráfico comparativo de consumo de potências entre os dois métodos.

Tabela 6. Comparativo das medidas percentual de harmônicas da tensão e DHT

Ordem Harmônica	Tensão (%)	
	Cap.	CPT
5°	5,71	6,21
7°	3,55	3,85
11°	1,99	2,16
13°	1,33	1,44
DHT	7,14	7,76

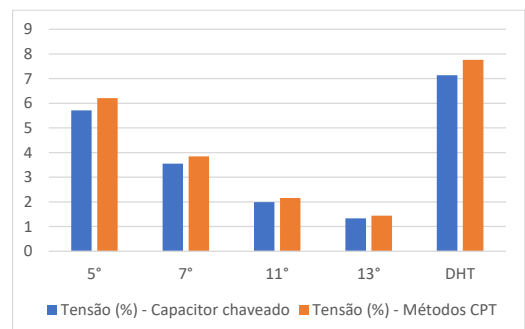


Figura. 10 Gráfico comparativo das medidas percentual de harmônicas da tensão e DHT.

Na sequência são apresentados os resultados da atribuição de responsabilidade usando o método proposto neste trabalho, comparando-os com os resultados do método do Capacitor Chaveado.

Conforme discutido nas seções anteriores, o método do Capacitor Chaveado requer que sejam tomadas medições das correntes harmônicas em cada ponto do sistema da Figura 5 antes e após a inserção do capacitor. Estas medidas são apresentadas nas Tabelas 7 e 8. As Figuras 9 e 10 apresentam a forma de onda das correntes antes e depois da inserção do capacitor, como é de se notar, as figuras aparentam ser iguais, pois o intuito da inserção do capacitor é o de causar a menor variação possível, como discutido por (Santos et al., 2019), para aplicação das equações (1) e (2). Na sequência, apenas a título de exemplo, a Figura 11 apresenta a evolução da magnitude e da fase de da 5ª harmônica da corrente do PAC mostrando que ocorre uma pequena variação após a conexão do capacitor em $t = 3.25$ s.

Tabela 7. Quantidade medidas pelo método do capacitor chaveado antes da conexão do capacitor ao circuito.

h	Grandeza	I_{sup-h}	I_{ind1-h}	I_{ind2-h}	I_{ind3-h}
5°	Magnitude	104,55 A	36,24 A	38,05 A	31,33 A
	Ângulo	74,12°	-105,5°	-98,3°	-118°
7°	Magnitude	46,43 A	16,51 A	17,07 A	13,66 A
	Ângulo	32,58°	-146,1°	-136,5°	-162,8°
11°	Magnitude	16,55 A	5,88 A	8,1 A	2,71 A
	Ângulo	100,3°	72,76°	87,39°	71,75°
13°	Magnitude	9,39 A	3,17 A	5,03 A	1,26 A
	Ângulo	-136,9°	33,3°	47,09°	51,59°

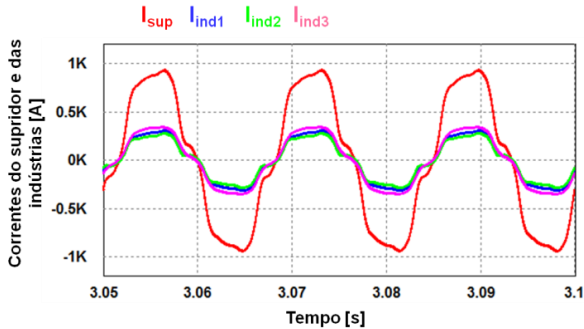


Figura. 9 Forma de onda das correntes antes da inserção do capacitor.

Tabela 8. Quantidade medidas pelo método do capacitor chaveado depois da conexão do capacitor ao circuito

h	Grandeza	I'_{sup-h}	I'_{ind1-h}	I'_{ind2-h}	I'_{ind3-h}
5°	Magnitude	105,19 A	36,23 A	38,06 A	31,29 A
	Ângulo	73,97°	-106,4°	-99,17°	-118,8°
7°	Magnitude	46,81 A	16,46 A	17,04 A	13,58 A
	Ângulo	31,17°	-147,5°	-137,8°	-164,4°
11°	Magnitude	16,6 A	5,73 A	7,95 A	2,57 A
	Ângulo	-102,5°	70,43°	85,25°	69,63°
13°	Magnitude	9,40 A	3,05 A	4,90 A	1,15 A
	Ângulo	-139,4°	30,5°	-44,60°	50,52°

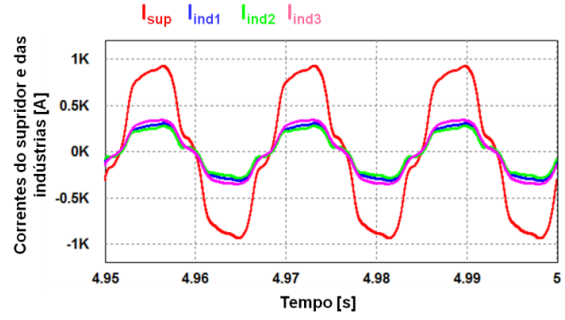


Figura. 10 Forma de onda das correntes depois da inserção do capacitor.

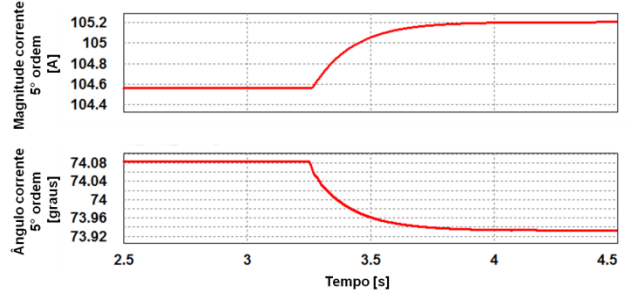


Figura. 11 Magnitude e ângulo (FFT da Harmônica de 5º ordem) da corrente no PAC.

Para o método proposto que faz uso da CPT, a corrente dispersa de cada indústria ($I_{ind1-sh}$, $I_{ind2-sh}$ e $I_{ind3-sh}$) é projetada sobre a corrente dispersa total das indústrias I_{sup-sh} (Figura 5), sendo necessário apenas uma tomada de medidas, conforme apresentado na Tabela 9. Note que, diferentemente do método do capacitor chaveado, o método proposto (CPT) utiliza a corrente dispersa (i_s), por isso os valores de corrente da Tabela 9 são tão diferentes dos valores vistos nas Tabelas 7 e 8. A Figura 12 mostra as formas de onda das correntes dispersas resultantes para o supridor e as três indústrias, as quais são calculadas com base na CPT e como descritas na equação (14).

Tabela 9. Quantidade medidas pelo método da CPT da corrente dispersa

h	Grandeza	I_{sup-sh}	$I_{ind1-sh}$	$I_{ind2-sh}$	$I_{ind3-sh}$
5°	Magnitude	122,3 A	42,16 A	44,53 A	35,67 A
	Ângulo	97,14°	96,78°	99,36°	94,79°
7°	Magnitude	58,95 A	20,61 A	21,68 A	16,68 A
	Ângulo	63,67°	62,52°	65,84°	62,28°
11°	Magnitude	25,47 A	8,14 A	10,5 A	7,40 A
	Ângulo	121,77°	116,25°	112,81°	140,85°
13°	Magnitude	15,82 A	4,81 A	6,47 A	5,14 A
	Ângulo	88,89°	84,50°	74,68°	111,26°

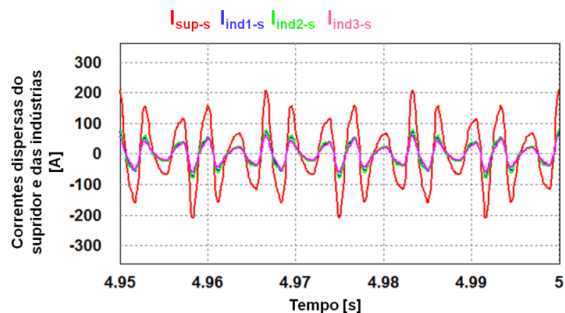


Figura. 12 Formas de ondas das correntes dispersas nos diferentes pontos de análise.

Finalmente, com base nas medições das harmônicas de corrente dispersas tomadas nas três indústrias e na rede, foram calculados os percentuais de responsabilidade devido às distorções harmônicas de cada indústria, fazendo a projeção da corrente dispersa de cada indústria sobre a corrente dispersa do supridor no PAC, sendo os valores dos dois métodos (Capacitor chaveado e CPT) apresentados na Tabela 10 e Figura 13.

Tabela 10. Comparativo do percentual de responsabilidade quanto a distorção harmônica da tensão

h	Indústrias (valores em porcentagem)					
	1		2		3	
	Cap.	CPT	Cap.	CPT	Cap.	CPT
5 ^a	33,54	34,47	34,23	36,38	32,21	29,14
7 ^a	33,75	34,95	33,07	36,75	31,29	28,29
11 ^a	33,78	31,81	36,92	40,72	29,27	27,46
13 ^a	33,21	30,32	38,51	39,65	27,71	30,05

Como visto na Tabela 10 os resultados encontrados pelo método proposto utilizando a CPT, são compatíveis com os alcançados pela aplicação do método do capacitor chaveado. Uma discrepância máxima de 3,80% pode ser verificada entre os dois métodos, o que, dado a presença do capacitor do método do capacitor chaveado, pode levar a um erro não estimado ou incluído nas equações para determinação das responsabilidades, uma vez que o capacitor fica no PAC entre os pontos de medição da corrente total e da corrente de cada indústria, com isso seu efeito é considerado na corrente total do supridor, porém não é computado para nenhuma das indústrias, o que pode levar a uma projeção vetorial errônea.

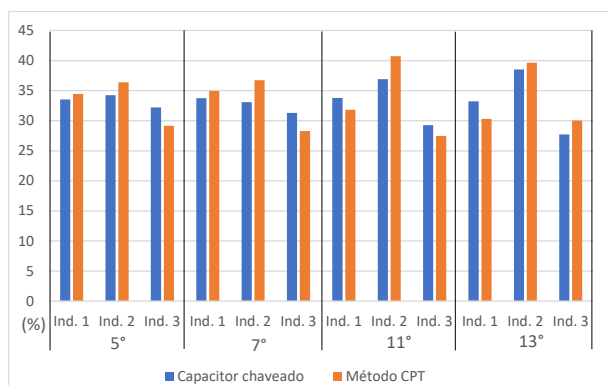


Figura. 13 Gráfico comparativo do percentual de responsabilidade quanto a distorção harmônica da tensão

5. CONCLUSÕES

Este artigo traz uma contribuição científica para o campo da qualidade de energia, apresentando uma nova metodologia baseada na CPT, do inglês *Conservative Power Theory*, a qual é comparada ao método baseado na comutação de um capacitor, ambos métodos empregados para o cálculo do compartilhamento de responsabilidades de distorções harmônicas de tensão.

Embora o método do capacitor tenha resolvido questões práticas que dificultam a implementação de outros métodos,

como no caso do método da superposição, que necessita do conhecimento das impedâncias harmônicas, este método traz como dificuldade a necessidade de inserção de um capacitor físico a um circuito, o que embora de pequeno valor, como apresentado em (Santos et al., 2019), pode gerar ressonâncias e distorções ainda desconhecidas e não tratadas.

A implementação pelo método da CPT, como apresentada, não necessita da inserção do capacitor, reduzindo assim uma variável física do sistema, a qual além de representar um custo físico, também pode provocar perdas elétricas e interações prejudiciais ao sistema caso seu dimensionamento não leve em conta as características do sistema onde este capacitor é inserido.

Portanto, para este determinado sistema e casos estudados, o método da CPT se mostrou mais vantajoso quanto à utilização do método do capacitor chaveado.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq (Processo 311332/2018-8), da FAPESP (Processo 2016/08645-9) e da CAPES, Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- ANEEL (2016). Micro e Minigeração Distribuída: Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Brasília.
- Bollen, M. H. J., Das, R., Djokic, S., Ciufu, P., Meyer, J., Ronnberg, S.K., et al. (2017). Power quality concerns in implementing smart distribution-grid applications. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v8(1), 391–399.
- Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S. and Beaty, H. W. (2012): *Electrical power systems quality*, 3^a ed., McGraw-Hill Education.
- IEEE. (2014). Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992).
- IEEE P519. (2015). IEEE draft guide for applying harmonic limits on power systems. IEEE P519.1/D12, 1-124.
- Kalair, A., Abas, N., Kalair, A. R., Saleem, Z. and Khan, N. (2017). Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1152–1187.
- Luiz, C. M. (2012). Avaliação dos Impactos da Geração Distribuída para Proteção do Sistema Elétrico. Dissertação (mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFMG, Belo Horizonte.
- Marques, F. A. S., Morán, J. A., Abreu, L. V. L, Silva, L. C. P., Freitas, W. (2004). Impactos da expansão da geração distribuída nos sistemas de distribuição de energia elétrica. In *Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural*, Campinas-SP.
- Moustafa, A. A., Moussa, A. M. and El-Gammal, M. A. (2000). Separation of customer and supply harmonics in electrical power distribution systems. *Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power*, vol. 3, 1035–1040.

- Paredes, H. K. M. (2011). Teoria de potência conservativa: uma nova abordagem para o controle cooperativo de condicionadores de energia e considerações sobre atribuição de responsabilidades. Tese (doutorado), Programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC), UNICAMP, Campinas.
- Paredes, H. K. M., Reis, P. H. F. and Deckmann, S. M. (2017). Caracterização de cargas lineares e não lineares em condições de tensões não senoidais. *Eletrônica de Potência*, 22(1), 50–62.
- Santos, I. N. (2007). Uma contribuição à Avaliação de Desempenho dos Principais Métodos para a Atribuição de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas. Dissertação (mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFU, Uberlândia.
- Santos, I. N., Oliveira, J. C., Macedo Jr., J. R. (2012). Método da superposição modificado como uma nova proposta para atribuição de responsabilidades sobre as distorções harmônicas. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática*, 23(6), 782–796.
- Santos, A. C. (2015). Uma Contribuição ao Processo do Compartilhamento de Responsabilidade sobre as distorções Harmônicas via Chaveamento de Unidades Capacitivas. Dissertação (mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFU, Uberlândia.
- Santos, A. C., Santos, I. N. and Oliveira, J. C. (2019). Capacitor switching methodology for responsibility sharing of harmonic voltage distortions. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 29(12).
- Shojaie, M. and Mokhtari, H. (2014). A method for determination of harmonics responsibilities at the point of common coupling using data correlation analysis. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 8(1), 142–150.
- Srinivasan, K. and Jutras, R. (1998). Conforming and non-conforming current for attributing steady state power quality problems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 13(1), 212–217.
- Tenti, P., Paredes, H. K. M., Marafão, F. P. and Matavelli, P. (2011a). Accountability in smart microgrids based on conservative power theory. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(9), 3058–3069.
- Tenti, P., Paredes, H. K. M. and Matavelli, P. (2011b). Conservative power theory, a framework to approach control and accountability issues in smart microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(3), 664–673.
- Watson, N.R., Scott, T.L. and Hirsch, S.J.J. (2009). Implications for distribution networks of high penetration of compact fluorescent lamps. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(3), 1521–1528.