

Conservative Power Theory for Harmonic Voltage Responsibility Assignment

Matheus B. Arcadepani, Diego T. Rodrigues, Alexandre C. Moreira, *Member, IEEE*,
Jakson P. Bonaldo, Hildo G. Junior and Helmo K. Morales-Paredes, *Senior Member, IEEE*

Abstract—Discussions on the different methods for sharing responsibilities regarding harmonic distortions in power grids have received wide attention in the area of power quality. This paper proposes a methodology based on Conservative Power Theory (CPT) for responsibility assignment due to the harmonic voltage distortions present at the point of common coupling. First, a theoretical basis for analyzing the orthogonal current decomposition of CPT under non-sinusoidal conditions is presented. Next, using the frequency domain, a methodology is introduced to separate the contributions of the harmonic voltage distortions in the CPT's orthogonal currents. To illustrate the application of the proposed methodology, it is simulated a real large-scale electrical system composed of an energy utility and three industrial plants connected to the same common coupling point. Finally, the results obtained are compared to other method showing the effectiveness of the proposed approach.

Index Terms—Conservative power theory, harmonic distortion, power quality, sharing of responsibility.

I. INTRODUÇÃO

Com a proliferação dos conversores eletrônicos de potência, amplamente difundidos no mercado industrial e doméstico, a rede elétrica passou a apresentar correntes harmônicas que podem resultar em distorções significativas nas tensões. Tais fontes harmônicas são conhecidas como cargas não lineares e estão distribuídas por toda a rede. Embora estas cargas individualmente produzam quantidades insignificantes de correntes harmônicas, o efeito conjugado de um grande número de tais cargas pode ser significativo [1]-[3], podendo criar uma série de problemas para as concessionárias e para os usuários finais [3], [4].

A presença de componentes harmônicas de tensão e corrente provocados pelas cargas não lineares causa 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.

M. B. Arcadepani, H. K. Morales-Paredes and D. T. Rodrigues are with the São Paulo State University (Unesp), Institute of Science and Technology, Sorocaba, Brazil (e-mails: {m.arcadepani; diego.tardivo; helmo.paredes}@unesp.br).

A. C. Moreira is with the Federal University of São João Del-Rei, Ouro Branco, Minas Gerais, Brazil, amoreira@ufsj.edu.br.

H. G. Junior is with the State University of Campinas, Campinas, São Paulo, Brazil, hildogjr@dsce.fee.unicamp.br.

J. P. Bonaldo is with Department of Electrical Engineering, Federal University of Mato Grosso (UFMT), Cuiabá, Brazil (e-mail: jakson.bonaldo@ufmt.br).

Assim, um dos principais desafios quanto à distorção harmônica é adotar normas mais rigorosas quanto às cargas não lineares. De fato, normas e recomendações têm procurado estabelecer limites para as grandezas que caracterizam os desvios das tensões e correntes, buscando manter os padrões de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) em níveis aceitáveis [5]-[7]. No entanto, estas normas e recomendações não definem de forma clara um método ou procedimento a respeito do compartilhamento de responsabilidades devido às distorções harmônicas entre consumidores e a concessionária de energia [8], [9], bem como não demonstram preocupações sobre a origem das harmônicas.

Neste sentido, com intuito de direcionar ao responsável o ônus da solução de adequação às normas vigentes, verifica-se que na literatura ainda não há um consenso sobre como atribuir a responsabilidade da distorção harmônica presente na rede. Ao longo dos anos, algumas metodologias para o compartilhamento de responsabilidades foram apresentadas, tais como: Método do Fluxo de Potência Harmônico [10], Método da Corrente Conforme e Não-Conforme [11], Superposição [12], Superposição Modificado [13] e Análise do Espectro de Frequências [14].

O método do Fluxo de Potência Harmônico [10] é baseado no fluxo da potência harmônica ativa e sua relação com a potência fundamental. Através da corrente e tensão presentes no ponto de acoplamento comum (PAC) e por meio da Série de Fourier, calcula-se as componentes harmônicas individuais. O ângulo entre a tensão e a corrente de cada ordem harmônica indica o sinal da potência harmônica e sua direção. Segundo este método, se o ângulo está entre -90° e 90° , a potência harmônica é positiva e a direção é do supridor (concessionária) para o consumidor (carga). Caso contrário, a potência harmônica é negativa e a direção é do consumidor para o supridor [10], [15], [16]. No entanto, próximo aos limites de decisão (ângulo de $\pm 90^\circ$), a falta de precisão do sistema de amostragem e dos algoritmos de cálculo do ângulo pode levar a inconsistências na atribuição de responsabilidades devido, principalmente, aos erros na identificação de harmônicas específicas. Além disso, magnitudes reduzidas das potências harmônicas em comparação com a potência ativa fundamental podem acarretar imprecisões nas medidas das grandezas envolvidas e levar a erros de interpretação.

O método da Corrente Conforme e Não-Conforme [11] é baseado na decomposição da corrente no PAC em duas parcelas conhecidas como, “conforme” e “não-conforme”. As cargas nos consumidores são divididas em dois grupos distintos: Grupo 1 composto por cargas que não geram harmônicas adicionais no

sistema; e Grupo 2 composto por cargas que geram harmônicas adicionais no sistema. O Grupo 2 ainda é subdividido em cargas que diminuem as distorções harmônicas e cargas que aumentam as distorções harmônicas no sistema. Assim, a corrente conforme é pertencente ao Grupo 1 e a corrente não-conforme pertence ao Grupo 2 [11], [17]. A principal inconsistência do método ocorre para as cargas do Grupo 1 (cargas lineares), pois considera-se que estas cargas possuem impedância linearmente proporcional à ordem harmônica da tensão. Desta forma, mesmo quando o supridor apresenta tensão senoidal, a conexão de uma carga não linear irá impor tensão harmônica no PAC devido à queda de tensão na impedância de linha. Portanto, o método atribuirá uma parcela de responsabilidade ao supridor, que segundo esta metodologia, estaria impondo distorções de corrente às cargas do Grupo 1, quando se sabe que a distorção é exclusivamente causada pelo consumidor (carga não linear).

Neste contexto também se encontra o Método da Superposição [12], [18] que se baseia no circuito equivalente do sistema obtido pela aplicação do Teorema de Norton. Estabelece-se, então, as contribuições individuais da distorção harmônica entre o supridor e consumidor, mediante dois circuitos equivalentes de Norton. Os efeitos causados por cada componente harmônica são sobrepostos, tornando possível a análise individual das contribuições de cada uma das componentes harmônicas de tensão presentes no PAC. Diferente dos métodos anteriores, o Método da Superposição apresenta uma base sólida e seus resultados são consistentes. Contudo, para sua aplicação é necessário conhecer os valores das impedâncias equivalentes do sistema elétrico em análise (supridor e consumidor) para cada frequência harmônica analisada, tornando sua aplicação prática bastante complexa.

Por outro lado, o método da Superposição Modificado [13] é baseado na inserção de uma impedância harmônica dominante no PAC, possibilitando a determinação de parcelas de responsabilidade apenas com o conhecimento das correntes harmônicas do sistema do supridor e do consumidor [13], minimizando o impacto das impedâncias “harmônicas” equivalentes. No entanto, apesar dos resultados terem coerência aos propósitos estabelecidos, trata-se de um método invasivo que pode trazer efeitos não desejados devido a conexão de filtros sintonizados nas instalações elétricas [19], além de acarretar custos extras devido às unidades de filtragem e a definição dos protocolos de medição.

Com o objetivo de atribuir responsabilidades, o método da Análise do Espectro de Frequências [14] estabelece que cargas puramente resistivas ligadas ao PAC têm formas de onda de tensão e corrente iguais. Logo, caso as formas de onda da tensão e corrente sejam iguais, a responsabilidade é apenas do supridor. Quando houver diferença entre as formas de onda da tensão e corrente, a responsabilidade pode ser exclusiva do consumidor, exclusiva do supridor ou de ambos. Porém conforme demonstrado em [8], este método pode apresentar algumas inconsistências mesmo para carga lineares alimentadas com tensões não senoidais.

Recentemente foi apresentada uma metodologia baseada na técnica do chaveamento de capacitor [20] para atribuição de responsabilidades na geração de tensões harmônicas entre o

supridor e consumidor. De forma similar ao método da superposição modificado, a técnica do capacitor chaveado é invasiva, pois requer a inserção de um capacitor no sistema elétrico. Assim, para a aplicação desta técnica é necessário que seja feita a medição da tensão e corrente do circuito antes e depois da inserção do capacitor. Comparado ao método da superposição, a técnica do capacitor chaveado não requer o conhecimento das impedâncias “harmônicas”. Porém, este método apresenta como desvantagem a necessidade da instalação de um capacitor no PAC, podendo causar efeitos não desejados [21]. Há, ainda, a necessidade de definir protocolos de medição e a manobra do chaveamento do capacitor. Portanto, além do custo do capacitor este método pode resultar em modificações nos modelos dos circuitos, na frequência fundamental e no fluxo de potência reativa do sistema elétrico.

Dadas as lacunas e as limitações para a implementação prática das metodologias acima apresentadas, este artigo propõe uma metodologia não invasiva para atribuição de responsabilidades devido às distorções harmônicas de tensão no PAC. Esta metodologia é baseada na CPT, do inglês *Conservative Power Theory* [22], [23], que é usada para realizar a decomposição ortogonal da corrente drenada pelos consumidores. Em seguida, mediante uma decomposição adicional das correntes da CPT no domínio da frequência, é discutida uma abordagem para identificar a distorção harmônica de tensão no PAC provocada pelos consumidores (cargas). Assim, com base nas medidas da tensão no PAC e das correntes nos consumidores, são identificadas as impedâncias harmônicas equivalentes das cargas. Desta forma, a atribuição de responsabilidades é realizada sem que haja a necessidade de inserir quaisquer elementos ao sistema elétrico sob análise.

A técnica de atribuição de responsabilidades proposta neste trabalho, denominada Método Baseado na CPT (MBCPT) é testada utilizando o mesmo cenário apresentado pelo Método do Capacitor Chaveado (MCC) [20]. Além disso, com intuito de realizar uma análise comparativa e validar o método proposto neste artigo, a técnica do capacitor chaveado é reproduzida e implementada na plataforma de simulação PSIM.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão apresentadas as bases teóricas dos métodos do MCC e MBCPT para realizar a atribuição de responsabilidade devido às distorções harmônicas de tensão no PAC.

A. Método do Capacitor Chaveado (MCC)

Tal método [20] consiste na medição de corrente e tensão antes e depois da inserção de um capacitor no PAC. A Fig. 1 apresenta o circuito equivalente do sistema sem o capacitor. \dot{I}_{s-h} é a corrente que representa a distorção harmônica do supridor, \dot{I}_{c-h} é a corrente que indica a distorção harmônica do consumidor, 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.

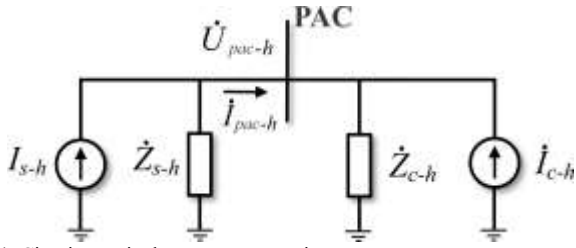


Fig. 1. Circuito equivalente sem o capacitor.

A Fig. 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} a impedância capacitiva inserida.

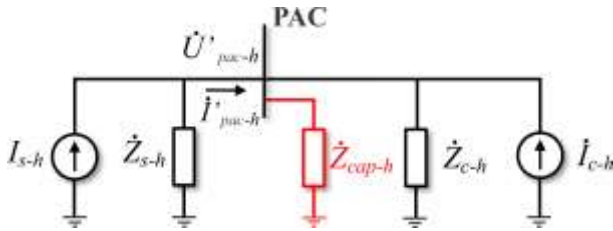


Fig. 2. Circuito equivalente com o capacitor.

Analisando a Fig. 1 e a Fig. 2, e aplicando as leis de Kirchoff, é possível determinar as correntes harmônicas do supridor (1) e do consumidor (2). Tais equações fornecem as magnitudes de \dot{I}_{s-h} e \dot{I}_{c-h} . Mais detalhes sobre o processo de obtenção das equações (1) e (2) podem ser obtidos em [20].

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

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

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

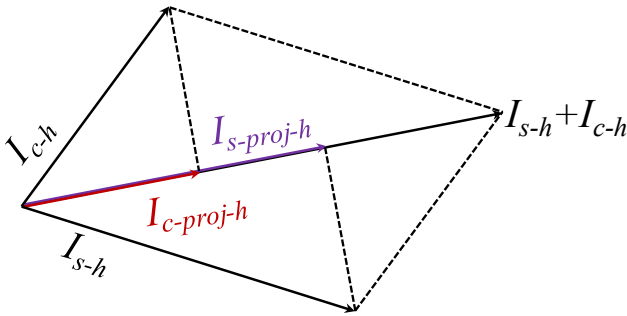


Fig. 3. Projeção vetorial das correntes no PAC.

A projeção da corrente \dot{I}_{c-h} sobre a soma $\dot{I}_{s-h} + \dot{I}_{c-h}$ representa a grandeza escalar que quantifica a parcela de responsabilidade do consumidor devido às distorções harmônicas de tensão no PAC.

B. Metodologia Proposta (MBCPT)

A metodologia proposta neste trabalho baseia-se na CPT. Originalmente a CPT foi proposta para analisar redes elétricas genéricas no domínio do tempo sob condição de tensões senoidais ou distorcidas contendo cargas lineares e não lineares [22], [23].

Em um circuito trifásico balanceado sob condição não senoidal, a corrente no PAC pode ser decomposta em: corrente ativa, corrente reativa e corrente residual (harmônicas) como definido em (3). As variáveis em negrito significam grandezas vetoriais.

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

tal que:

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

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

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

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

- \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, G_e e B_e são a condutância equivalente e reatidade equivalente, e $\hat{\mathbf{v}}$ é a integral sem valor médio da tensão v . Tem-se, ainda, que $V = \|\mathbf{v}\| = \sqrt{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2}$ é o valor eficaz coletivo das tensões e que $\hat{V} = \|\hat{\mathbf{v}}\|$ é o valor eficaz coletivo de \hat{v} .

A integral sem valor médio, ou integral imparcial da tensão, \hat{v} , é a base para o cálculo da energia reativa W_r e, por consequência, para o cálculo da corrente reativa i_r . Esta grandeza é obtida através de:

$$\hat{v} = \int_0^t v(\tau) d\tau - \frac{1}{T_o} \int_0^{T_o} \left(\int_0^t v(\tau) d\tau \right) dt \quad (7)$$

onde τ é uma variável auxiliar e T_o representa o período fundamental da onda de tensão. Informações adicionais a respeito da integral sem valor médio podem ser encontradas em [22].

Análises complementares sobre as parcelas das correntes (4)-(6) e sobre as componentes relacionadas com as potências podem ser encontradas em [22], [23]. Além disso, devido ao desacoplamento dos atributos associados à carga, a CPT tem sido utilizada como uma ferramenta eficaz para caracterizar os diferentes aspectos de operação de uma carga genérica [24], [25], para gerar referências de corrente para compensação em filtros ativos de potência [26], [27] e em sistemas geração distribuída [28], [29], [30].

Por outro lado, as correntes residuais (6) estão relacionadas com as não linearidades presentes nas formas de onda de

tensões e correntes [22], [24] e, portanto, representam as contribuições das correntes harmônicas geradas pela carga não-linear e as correntes harmônicas originadas pelas distorções de tensão presentes no PAC. O significado físico desta parcela de corrente só pode ser analisado no domínio da frequência [31]. Desta forma, as contribuições harmônicas do supridor e consumidor no contexto da atribuição de responsabilidades podem ser analisadas através da inspeção de i_v no domínio da frequência.

1) Separação das Contribuições Harmônicas da Corrente Residual

O significado físico das correntes residuais pode ser explicado expressando as correntes ativa e reativa no domínio de Fourier. Portanto, pode ser calculada individualmente uma componente ativa para cada frequência harmônica conforme:

$$\mathbf{i}_{ak} = \frac{\langle \mathbf{v}_k, \mathbf{i}_k \rangle}{\|\mathbf{v}_k\|^2} \begin{bmatrix} v_{ak} \\ v_{bk} \\ v_{ck} \end{bmatrix} = \frac{P_k}{V_k^2} \mathbf{v} = G_k \cdot \mathbf{v} = \begin{bmatrix} i_{aka} \\ i_{akb} \\ i_{akc} \end{bmatrix} \quad (8)$$

onde G_k é a condutância para cada frequência harmônica.

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

$$\mathbf{i}_{ah} = \sum_{k \in \{K\}} \mathbf{i}_{ak} = \sum_{k \in \{K\}} G_k \mathbf{v} \quad (9)$$

onde $k \in \{K\}$ representa o conjunto das harmônicas comuns às tensões e correntes, sendo que k representa a k -ésima harmônica, incluindo a componente fundamental, e K indica a quantidade de harmônicas que são consideradas na análise. Em condição de tensão não senoidal (9) geralmente não coincide com (4). Portanto, a diferença resulta:

$$\mathbf{i}_{as} = \mathbf{i}_{ah} - \mathbf{i}_a = \sum_{k \in \{K\}} (G_k - G_e) \mathbf{v} \quad (10)$$

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

Similarmente a corrente reativa dispersa resulta em:

$$\mathbf{i}_{rs} = \mathbf{i}_{rh} - \mathbf{i}_r = \sum_{k \in \{K\}} (B_k - B_e) \hat{\mathbf{v}} \quad (11)$$

onde,

$$\mathbf{i}_{rh} = \sum_{k \in \{K\}} \mathbf{i}_{rk} = \sum_{k \in \{K\}} B_k \hat{\mathbf{v}} \quad (12)$$

é a corrente reativa harmônica total, com:

$$\mathbf{i}_{rk} = \frac{\langle \hat{\mathbf{v}}_k, \mathbf{i}_k \rangle}{\|\hat{\mathbf{v}}_k\|^2} \begin{bmatrix} \hat{v}_{ak} \\ \hat{v}_{bk} \\ \hat{v}_{ck} \end{bmatrix} = \frac{W_{rk}}{\hat{V}_k^2} \hat{\mathbf{v}} = B_k \cdot \hat{\mathbf{v}} = \begin{bmatrix} i_{rka} \\ i_{rkb} \\ i_{rkc} \end{bmatrix} \quad (13)$$

A componente reativa para cada frequência harmônica é dada por \mathbf{i}_{rk} , enquanto B_k é a reatividade para cada frequência harmônica. Observe que sob condição não senoidal de tensão (12) não coincide com (5), logo a diferença resulta na corrente reativa dispersa.

Portanto as componentes dispersas (\mathbf{i}_{as} e \mathbf{i}_{rs}) são originadas devido aos diferentes comportamentos que a condutância e a reatividade apresentam em diferentes frequências. Em outras palavras, os termos \mathbf{i}_{as} e \mathbf{i}_{rs} se devem ao fato que, em geral,

$$\sum_{k \in \{K\}} G_k \neq G_e \text{ e } \sum_{k \in \{K\}} B_k \neq B_e.$$

De fato, de (8), (9), (12) e (13) pode ser notado que as componentes \mathbf{i}_{as} e \mathbf{i}_{rs} só existirão quando as tensões forem distorcidas, ou seja, quando houverem componentes harmônicas presentes nas tensões. Assim, o vetor contendo as correntes harmônicas geradas (termos harmônicos que existem apenas na corrente e não na tensão) pela carga pode ser obtido a partir de (6), conforme:

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

Portanto, a decomposição da corrente residual resulta:

$$\mathbf{i}_v = \mathbf{i}_{as} + \mathbf{i}_{rs} + \mathbf{i}_g = \mathbf{i}_s + \mathbf{i}_g \quad (15)$$

onde, \mathbf{i}_s é a corrente dispersa total. Como todas as componentes em (15) são ortogonais, o valor eficaz coletivo da corrente residual resulta:

$$I_v = \sqrt{I_{as}^2 + I_{rs}^2 + I_g^2} = \sqrt{I_s^2 + I_g^2} \quad (16)$$

Finalmente de (3) e (15), a corrente total é descrita em (17). O circuito equivalente com os parâmetros estimados da carga é mostrado na Fig. 4.

$$\mathbf{i}_{PAC} = \mathbf{i}_a + \mathbf{i}_r + \mathbf{i}_s + \mathbf{i}_g \quad (17)$$

O valor coletivo eficaz da corrente total no PAC resulta:

$$I_{PAC} = \sqrt{I_a^2 + I_r^2 + I_v^2} = \sqrt{I_a^2 + I_r^2 + I_s^2 + I_g^2} \quad (18)$$

Como a componente dispersa total ($\mathbf{i}_s = \mathbf{i}_{as} + \mathbf{i}_{rs}$) somente aparece quando as tensões apresentam conteúdo harmônico, do ponto de vista de atribuição de responsabilidades devido às distorções harmônicas, bastaria fazer a projeção da corrente dispersa de cada consumidor sobre a corrente dispersa total obtida no PAC (corrente dispersa do supridor).

Assim, tal projeção indica o percentual de responsabilidade dos consumidores devido às harmônicas de tensão presentes no PAC. Isto é, a responsabilidade (R_c) pela geração de uma determinada harmônica (k) por um n -ésimo consumidor é dada por:

$$R_{cn} = \frac{|i_{cnsk}|}{|i_{ssk}|} \cos(\theta_{cnsk} - \theta_{ssk}) \quad (19)$$

onde $|i_{cnsk}|$ e $|i_{ssk}|$ são as magnitudes da k -ésima harmônica da corrente dispersa do consumidor e do supridor,

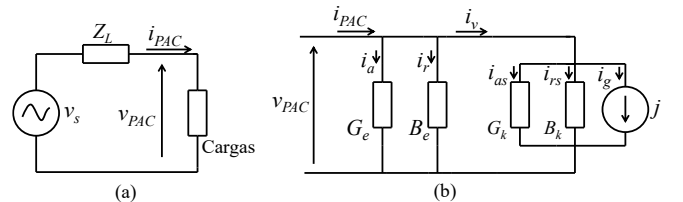


Fig. 4. (a) Circuito genérico por fase (b) Representação do circuito genérico por fase através da CPT.

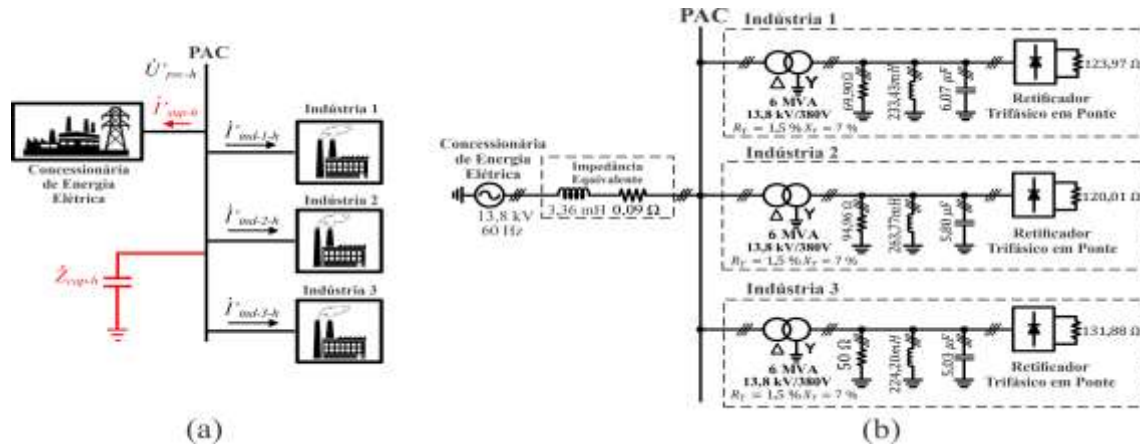


Fig. 5. (a) Diagrama de bloco do sistema elétrico sob análise. (b) Parâmetros do sistema elétrico simulado.

respectivamente. A fase destas correntes em relação às harmônicas de tensão é representada pelos ângulos θ_{csh} e θ_{ssh} .

Deve ser enfatizado que a metodologia proposta permite uma estimativa das responsabilidades na geração de harmônicas pelos consumidores (cargas) sob a premissa de que as distorções da tensão são causadas pelos consumidores. Esta premissa é verdadeira se a potência dos consumidores for considerável quando comparada com a capacidade da rede (alimentador), o que normalmente ocorre com as indústrias de médio e grande porte. Esta suposição corresponde a uma aproximação real da operação da rede, permitindo que o problema de atribuição de responsabilidade seja abordado com base em medições nos terminais de carga, sem a necessidade de modelagens sofisticadas da rede e do consumidor, cujos parâmetros normalmente não são conhecidos ou não estão disponíveis.

III. MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO

Para validar e ilustrar a aplicação da metodologia proposta, simulações computacionais de um sistema elétrico real extraído de [20] foram implementadas no software PSIM. Através dos resultados obtidos, uma análise comparativa entre o MCC [20] e o método proposto neste artigo (MBCPT) foi realizada.

Ressalta-se que o MCC foi escolhido como referência para comparação devido a sua implementação ser mais prática que a implementação do método da superposição, pois o método do capacitor chaveado não depende do conhecimento prévio das impedâncias do sistema analisado. Adicionalmente, o MCC tem boa precisão (cerca de 3%), conforme relatado em [20].

A Fig. 5(a) representa o sistema elétrico sob análise composto por concessionária de energia (supridor) e três indústrias conectadas ao mesmo PAC. A Fig. 5(b) apresenta o diagrama unifilar do sistema elétrico da Fig. 5(a), com os respectivos parâmetros utilizados para cada uma das três indústrias [20] e para o alimentador da concessionária. Deve-se destacar que o MBCPT não requer a conexão do capacitor (Z_{cap-h}) ao PAC para avaliação dos resultados.

O sistema elétrico mostrado da Fig. 5(b) é caracterizado pelos valores de potência apresentados na Tabela I e pelas componentes harmônicas e a distorção harmônica total (DHT)

de tensão, apresentadas na Tabela II. Ressalta-se que a tensão da rede, isto é, do supridor de 13,8 kV, é puramente senoidal.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados do método de atribuição de responsabilidade proposto neste trabalho, os quais são validados através de comparação com os resultados obtidos pelo MCC [20]. Ambos os métodos são simulados no software PSIM. Além disso, embora a análise seja de um sistema trifásico, por simplicidade, os resultados apresentados correspondem a uma única fase, visto que o sistema elétrico da Fig. 5(b) é equilibrado.

TABELA I
POTÊNCIA CONSUMIDA PARA CADA INDÚSTRIA

Potência	Indústria 1	Indústria 2	Indústria 3
P [MW]	4,58	4,06	5,33
Q [Mvar]	1,99	1,76	2,20
S [MVA]	5,05	4,50	5,80
FP	0,91	0,90	0,92

TABELA II
DISTORÇÃO DE TENSÃO MEDIDA NO PAC

Ordem Harmônica	Tensões Harmônicas [% da fundamental]
5 ^a	6,21
7 ^a	3,85
11 ^a	2,16
13 ^a	1,44
DHT_v	7,76

Para implementação do Método Baseado na CPT é usada uma frequência de amostragem dos sinais de tensão e corrente de 400 kHz. Desta forma, para a harmônica mais elevada (13^a) são obtidos 512 pontos por ciclo, garantindo uma boa precisão nos cálculos de fase realizados por meio da aplicação da FFT. Note-se que, para as harmônicas de ordem menor, o número de pontos por ciclo é ainda maior.

Aplicando o método proposto neste trabalho aos sinais de corrente e tensão adquiridos são processados através das equações (3)-(15) e são obtidas as correntes dispersas de cada indústria e da fonte supridora (i_{ind1-s} , i_{ind2-s} , i_{ind3-s} e i_{sup-s}).

Assim, as amplitudes e fases das correntes harmônicas contidas nas formas de onda das correntes dispersas (do

supridor e das indústrias) mostradas na Fig. 6 são apresentadas na Tabela III. É importante destacar que estas correntes são medidas no lado de média tensão, isto é, no primário dos transformadores.

Finalmente, com base nos valores apresentados na Tabela III, foram calculados os percentuais de responsabilidade, fazendo as projeções das harmônicas das correntes dispersas de cada indústria sobre as harmônicas da corrente dispersa do supridor, conforme (19). Os valores obtidos são apresentados na Tabela IV. Nota-se que a responsabilidade da Indústria 3 é menor que a responsabilidade das demais indústrias. O supridor não tem responsabilidade pela geração das harmônicas de tensão no PAC, visto que este cenário de aplicação a tensão do supridor é puramente senoidal. Portanto, quando as porcentagens de responsabilidade das 3 indústrias são somadas, considerando cada uma das harmônicas separadamente, o resultado é 100%.

TABELA III
HARMÔNICAS MEDIDAS PELO MÉTODO DA CPT USANDO A CORRENTE DISPERSA

Ordem Harmônica	Grandeza	I'_{sup-s} [A]	$I'_{ind-1-s}$ [A]	$I'_{ind-2-s}$ [A]	$I'_{ind-3-s}$ [A]
5°	Magnitude	122,30 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	10,50 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°

Para validar os resultados obtidos com a técnica proposta MBCPT, os percentuais de responsabilidade obtidos usando o MCC são incluídos na Tabela IV. A Figura 7 apresenta o comparativo na forma gráfica. A comparação entre os dois métodos indica que os percentuais de responsabilidades das indústrias apresentam uma adequada correspondência, com 3,8% de discrepância máxima entre os valores correspondentes

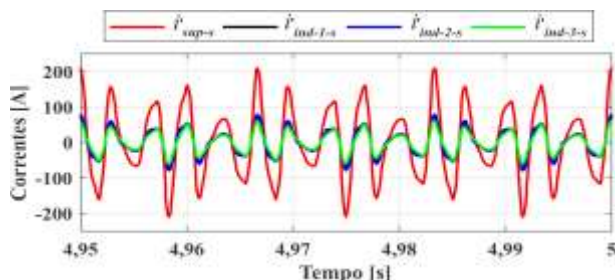


Fig. 6. Formas de ondas das correntes dispersas nos diferentes pontos de análise.

alcançados pelo método da CPT e pelo Método do Capacitor Chaveado. Este fato confirma a consistência do método proposto neste estudo.

TABELA IV
RESULTADOS COMPARATIVOS OBTIDOS DO COMPARTILHAMENTO DE RESPONSABILIDADE

Ordem	Responsabilidade Indústria 1 [%]		Responsabilidade Indústria 2 [%]		Responsabilidade Indústria 3 [%]	
	MCC	MBCPT	MCC	MBCPT	MCC	MBCPT
	(I_h)	(I_s)	(I_h)	(I_s)	(I_h)	(I_s)
5ª	33,54	34,47	34,23	36,38	32,21	29,14
7ª	33,75	34,95	33,07	36,75	31,29	28,29
11ª	33,78	31,81	36,92	40,72	29,27	27,46
13ª	33,21	30,32	38,51	39,65	27,71	30,05

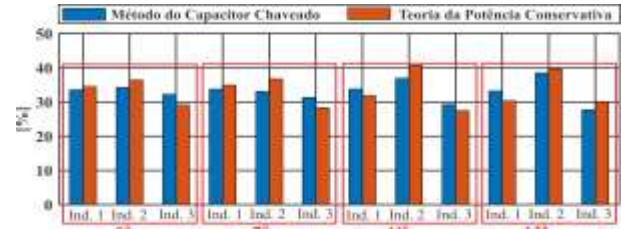


Fig. 7. Comparativo do percentual de responsabilidade quanto a distorção harmônica da tensão.

Embora o método do capacitor chaveado tenha resolvido questões práticas que dificultam a implementação de outros métodos, tal como o método da superposição, que necessita do conhecimento das impedâncias harmônicas, a inserção do capacitor no sistema requer uma definição precisa de protocolos de medição (necessidade de medir a tensão e corrente para duas condições operacionais diferentes).

Por outro lado, diferente dos trabalhos encontrados na literatura, pode-se afirmar que, o método para obtenção de percentuais de atribuição de responsabilidade usando a CPT proposto neste trabalho, usa medições de tensão e corrente tomadas em um único momento, sendo que não requer a determinação das impedâncias do sistema.

A. Consideração Sobre Redes Distorcidas e Desequilibradas

Conforme discutido na introdução, em geral, é difícil a obtenção de uma metodologia genérica que seja capaz de separar a responsabilidade do supridor e do consumidor em termos de distorção harmônica, e que seja válida em todas as condições de operação. Este problema se torna ainda mais complexo ao se adicionar na análise o efeito do desequilíbrio nas tensões.

Por outro lado, é importante destacar que a tensão gerada pela fonte pode ser originalmente considerada senoidal e equilibrada. No entanto, a tensão pode se tornar distorcida e/ou desequilibrada nas proximidades dos pontos de consumo da energia elétrica, devido à interação das correntes demandas pelos consumidores e as impedâncias das linhas de distribuição. O método proposto neste trabalho, de forma similar ao MCC, demonstrou com sucesso a atribuição de responsabilidade em caso de interesse prático, onde a tensão gerada pela fonte de alimentação (supridor) é considerada praticamente ideal (livre de harmônicas e/ou desequilíbrios).

Portanto, para fins de atribuição de responsabilidades entre os consumidores, impõe-se a necessidade de monitorar as tensões no PAC e as correntes drenadas em todos os consumidores conectados ao mesmo ponto.

Como exemplo hipotético podemos considerar que no sistema ilustrado na Figura 5(b) não fosse medida a corrente da terceira indústria, isto é, apenas as indústrias 1 e 2 seriam

analisadas quanto à suas respectivas responsabilidades na geração de harmônicas no PAC. Neste caso, do ponto de vista da responsabilização, ficariam claras as parcelas atribuídas às indústrias 1 e 2, restando a discussão a respeito da parcela remanescente (28 % de distorção), que poderia ser atribuída ao supridor e/ou à indústria 3. No entanto, como citado anteriormente, se considerarmos que a tensão gerada pela fonte de alimentação é naturalmente senoidal e equilibrada, caberia, portanto, a responsabilização da carga desconhecida (indústria 3).

V. CONCLUSÕES

Este artigo concebeu uma metodologia para realizar o compartilhamento de responsabilidades de distorção harmônica de tensão. O método consiste na decomposição da corrente residual (corrente harmônica) da CPT em duas sub componentes, uma devida às distorções harmônicas de tensão e outra associada às harmônicas geradas pela carga. Utilizando a primeira sub componente de corrente, a qual foi denominada de corrente dispersa foram calculados os percentuais de compartilhamento de responsabilidades na geração de harmônicas de tensão no PAC.

As metodologias encontradas na literatura requerem o conhecimento prévio das impedâncias harmônicas equivalentes do sistema, demandam a instalação de elementos passivos (capacitores e filtros sintonizados), ou requerem estabelecimento protocolos de medição precisos, assim como o tratamento das informações decorrentes das aplicações consecutivas dos procedimentos de inserção do capacitor ou dos filtros sintonizados.

Para a metodologia apresentada neste trabalho a definição das responsabilidades é definida apenas com a medição da tensão no PAC e da corrente dos consumidores, sendo que estas medidas são tomadas uma única vez. Portanto, a metodologia proposta poderia servir de base para a realização de um *retrofit* dos monitores de QEE, de forma a torná-los mais robustos e inteligentes. A abordagem proposta foi avaliada através de resultados de simulação provenientes de um sistema elétrico trifásico contendo três consumidores industriais.

As comparações realizadas mostraram que o método proposto (MBCPT) apresenta resultados muito similares ao Método do Capacitor Chaveado (MCC). Desta forma, confirmando que o método proposto é eficaz para a determinação da responsabilidade na geração de tensões harmônicas demonstrando sua atuação em um cenário de interesse prático em que a tensão gerada pela fonte de alimentação não contém conteúdo harmônico relevante.

Adicionalmente, em futuros trabalhos, os autores pretendem estender a metodologia proposta neste artigo para cenários em que a tensão no PAC apresente contribuições de componentes harmônicas devidas tanto à circulação de correntes harmônicas geradas pelos consumidores (cargas) quanto à distorção imposta pela fonte de alimentação (supridor). Além disso, também serão considerados casos em que a tensão no PAC é desequilibrada como resultado de desequilíbrio da própria tensão da fonte e/ou da distribuição das cargas (monofásicas e bifásicas) ao longo do alimentador, bem como validar a

aplicação da metodologia em um protótipo de bancada experimental.

AGRADECIMENTOS

This work was supported by the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) under Grant 311332/2018-8, the São Paulo Research Foundation (FAPESP) under Grants 2016/08645-9, 2017/22629-9, and the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) – finance code 001.

REFERÊNCIAS

- [1] A. E. Emanuel, "Voltage distortion in distribution feeders with nonlinear loads," *IEEE Trans Power Delivery*, vol. 9, no. 1, pp. 79-87, Jan. 1994, DOI: 10.1109/61.277682.
- [2] N. R. Watson, T. L. Scott and S. J. J. Hirsch, "Implications for distribution networks of high penetration of compact fluorescent lamps," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 24, no. 3, pp. 1521-1528, July 2009, DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2014036.
- [3] M. H. J. Bollen, "Power quality concerns in implementing smart distribution-grid applications," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 8, no. 1, pp. 391-399, Jan. 2017, DOI: 10.1109/TSG.2016.2596788.
- [4] A. Kalair, N. Abas, A. R. Kalair, Z. Saleem, N. Khan, "Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 1152-1187, 2017.
- [5] IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers, Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, *IEEE Standard 519-2014* (Revision of IEEE Std 519-1992).
- [6] International Electrotechnical Commission, Electromagnetic Compatibility, (EMC). Part 3: Limits – Section 6: Assessment of Emission Limits for Distorting Loads in MV and HV Power Systems - Basic EMC publication, IEC 61000-3-6, 2008.
- [7] EN 50160. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks, Technical report, EN 50160, 2001.
- [8] A. C. Santos, J. C. Oliveira, I. N. Santos, "A comparative analysis between methodologies for responsibility assignment on harmonic distortions", *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1(13), pp. 305-310, 2015.
- [9] M. Shojaie, H. Mokhtari, "A method for determination of harmonics responsibilities at the point of common coupling using data correlation analysis", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8(1), pp. 142-150, 2014.
- [10] T. Tanaka, H. Akagi, "A new method of harmonic power detection based on the instantaneous active power in three-phase circuits", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 10(4), pp. 1737-1742, 1995.
- [11] K. Srinivasan, "On separating customer and supply side harmonic contributions", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 11(2), pp. 1003-1012, 1996.
- [12] W. Xu, Y. Liu, "A method to determine customer harmonic contributions for incentive-based harmonic control applications", *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 1999.
- [13] I. N. Santos, J. C. Oliveira, J. R. Macedo, "Modified superposition method as a new approach to assigning responsibilities on harmonics distortions", *Controle & Automação*, vol. 23(6), pp. 782-796, 2012.
- [14] F. M. Fernandez, P.S. C. Nair, "Method for separation of customer and utility contributions of harmonics at point of common coupling", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 7(4), pp. 374-381, 2013.
- [15] L. Cristaldi, A. Ferrero, "Harmonic power flow analysis for the measurement of the electric power quality", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 44(3), pp. 683-685, 1995.
- [16] P. H. Swart, M. J. Case, J. D. V. Wyk, "On techniques for localization of sources producing distortion in three-phase networks", *European Transaction on Electrical Power*, vol. 6(6), pp. 391-396, 1996.
- [17] K. Srinivasan, R. Juras, "Conforming and non-conforming current for attributing steady state power quality problems", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 13(1), pp. 212-217, 1998.
- [18] W. Xu, Y. Liu, "A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 15(2), pp. 804-811, 2000.
- [19] J. C. Das, "Passive filters - potentialities and limitations", *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 40(1), pp. 232-241, 2004.

- [20] A. C. Santos, I. N. Santos, J. C. Oliveira, "Capacitor switching methodology for responsibility sharing of harmonic voltage distortions", *Electrical Energy Systems*, vol. 29(12), pp. e12135, 2019.
- [21] N. Locci, C. Muscas, S. Sulis, "Detrimental effects of capacitors in distribution networks in the presence of harmonic pollution", *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 22(1), pp. 311-315, 2007.
- [22] P. Tenti, H. K. M. Paredes and P. Mattavelli, "Conservative Power Theory, a Framework to Approach Control and Accountability Issues in Smart Microgrids," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 3, pp. 664-673, March 2011, doi: 10.1109/TPEL.2010.2093153.
- [23] P. Tenti, H. K. M. Paredes, F. P. Marafão and P. Mattavelli, "Accountability in Smart Microgrids Based on Conservative Power Theory," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, no. 9, pp. 3058-3069, Sept. 2011, doi: 10.1109/TIM.2011.2162351.
- [24] W. A. Souza, E. V. Liberado, L. C. P. Silva, F. P. Marafão, H. K. Morales-Paredes, "Load analyzer using conservative power theory", *Przeglad Elektrotechniczny*, vol. 89(12) pp. 1-6, 2013.
- [25] A. C. Moreira, W. A. de Souza, B. R. P. Conrado, et al. "Disturbing Load Classification Based on the Grey Relational Analysis Method and Load Performance Index". *J Control Autom Electr Syst* 31, 141-152 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40313-019-00511-9>.
- [26] F. P. Marafão, D. I. Brandão, F. A. S. Gonçalves, et al. "Decoupled Reference Generator for Shunt Active Filters Using the Conservative Power Theory". *J Control Autom Electr Syst* 24, 522-534 (2013). <https://doi.org/10.1007/s40313-013-0043-0>.
- [27] C. Burgos-Mellado et al., "Experimental Evaluation of a CPT-Based Four-Leg Active Power Compensator for Distributed Generation," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, no. 2, pp. 747-759, June 2017, doi: 10.1109/JESTPE.2016.2633064.
- [28] F. P. Marafão, D. I. Brandão, A. Costabeber, H. K. Morales Paredes, "Multi-task control strategy for grid-tied inverters based on conservative power theory", *IET Renewable Power Generation*, 2015, 9, (2), pp. 154-165, DOI: 10.1049/iet-rpg.2014.0065.
- [29] J. P. Bonaldo, H. K. Morales Paredes and J. A. Pomilio, "Control of Single-Phase Power Converters Connected to Low-Voltage Distorted Power Systems With Variable Compensation Objectives," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 3, pp. 2039-2052, March 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2440211.
- [30] H. K. M. Paredes, D. T. Rodrigues, J. C. Cebrian and J. P. Bonaldo, "CPT-Based Multi-Objective Strategy for Power Quality Enhancement in Three-Phase Three-Wire Systems Under Distorted and Unbalanced Voltage Conditions," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 53078-53095, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3069832.
- [31] H. K. Morales-Paredes, "Conservative Power Theory: A new approach to cooperative control of power conditioners and considerations regarding to responsibility assignment", PhD thesis, FEEC. UNICAMP, SP, 2011.



Matheus Branco Arcadepani possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM) em 2018. Mestrado em Engenharia Elétrica pela UNESP em 2021. Atualmente é aluno de doutorado em Engenharia Elétrica pela UNESP. Áreas de pesquisa e interesse: Qualidade da Energia Elétrica, Teorias de Potência e Eletrônica

de Potência.



Diego Tardivo Rodrigues possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS) em 2010. Obteve o título de mestre em Engenharia Elétrica pela UNICAMP em 2012. Atualmente é professor do Instituto Federal de São Paulo-campus Birigui e aluno de doutorado em Engenharia Elétrica pela

UNESP. Áreas de interesse: Qualidade de Energia Elétrica, Eletrônica de Potência e Fontes Alternativas de Energia.



Alexandre Candido Moreira possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Goiás em 2003, obteve os títulos de mestre e doutor em Engenharia Elétrica pela UNICAMP em 2006 e 2017, respectivamente. Atualmente é professor na Universidade Federal de São Joao del Rei (UFSJ). Áreas de interesse: Qualidade de Energia Elétrica, Redes Elétricas Inteligentes, Teorias de Potência, Máquinas Elétricas e Eletrônica de Potência.



Jakson Paulo Bonaldo possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Mato Grosso (2008). Mestrado (2010) e doutorado (2015) em Eletrônica de Potência pela UNICAMP. De 2010 a 2011 trabalhou como Engenheiro de Tecnologia na *Padtec Optical Components and Systems* em Campinas SP. De 2013 a 2018 atuou como professor na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Desde 2018 é professor no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT).



Hildo Guillard Junior possui graduação e mestrado em Engenharia Elétrica pela UNESP em 2011 e 2013, respectivamente. Obteve o título de doutor em Engenharia Elétrica pela UNICAMP em 2019. Atualmente realiza Pós-Doutorado no grupo conjunto UNESP+UNICAMP. Áreas de interesse: Eletrônica de Potência, Acionamentos, Medidas Elétricas e Qualidade de Energia Elétrica.



Helmo Kelis Morales Paredes (S'10-M'11-SM'18) possui graduação pela Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Peru (2002), tem mestrado e doutorado pela UNICAMP (2006 e 2011), todos em Engenharia Elétrica.

Em 2009 foi pesquisador visitante na Universidade de Padova, Itália. Em 2014 foi professor visitante na Universidade de Nottingham, Inglaterra. Em 2018 foi professor visitante na *Colorado School of Mines*, Estados Unidos. Desde 2011, é professor da UNESP no Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, e atualmente é Professor Associado e líder do Grupo de Automação e Sistemas Integráveis (GASI). Suas principais áreas de pesquisa incluem: Teorias de Potência, Qualidade da Energia Elétrica, controle local e/ou cooperativo de conversores eletrônicos de potência, bem como aspectos de propagação harmônica, tarifação e atribuição de responsabilidades em ambientes de redes e microrredes inteligentes. Atualmente é Editor Associado do *IEEE Latin America Transactions*. Em 2012, Dr. Morales-Paredes recebeu o *Prize Paper Award in the IEEE Transaction on Power Electronics*.