

Modelagem Harmônica de Cargas Submetidas a Tensões Variáveis

Marcelo Brunoro
Instituto Federal do Espírito Santo
Vitória, Espírito Santo, Brasil
mbrunoro@ifes.edu.br

Lucas F. Encarnação e Jussara F. Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo
Vitória, Espírito Santo, Brasil
lucas.encarnacao@ufes.br, jussara.fardin@ufes.br

Resumo—A modelagem dos componentes inerentes ao sistema elétrico é importante para permitir estudos de regime permanente e de transitórios. Neste contexto, a modelagem de cargas é relevante, sobretudo para análises envolvendo as componentes harmônicas das grandezas elétricas do sistema. Neste trabalho são apresentados os principais modelos para representação harmônica de cargas, bem como uma proposta de modelagem, usando o modelo polinomial associado ao uso de matrizes de admitância cruzada, permitindo o acoplamento harmônico entre as componentes de corrente e tensão. Este trabalho além de mostrar o equacionamento para a determinação dos parâmetros do modelo da carga, pelo método dos mínimos quadrados, utiliza um estudo de caso como exemplo de aplicação. Os resultados obtidos mostram que o modelo harmônico proposto é viável e os parâmetros encontrados fornecem informações sobre o tipo da carga conectada ao sistema.

Palavras Chave—Modelagem de carga, Modelo estático, Modelagem harmônica de carga.

I. INTRODUÇÃO

Diversos estudos sobre o Sistema Elétrico de Potência (SEP) são necessários para avaliar as consequências da inclusão de novos clientes e o estado atual do sistema [1]. Estas análises podem ser utilizadas para o planejamento de melhorias e ampliação da rede atual, além de serem necessárias para projetos visando a correção do fator de potência e para mitigar distorções harmônicas. O posicionamento de medidores e de novas unidades de geração distribuída são outros exemplos de estudos acerca do SEP.

Para que tais estudos sejam efetuados com a exatidão requerida é importante que os diversos componentes do sistema sejam representados satisfatoriamente. A modelagem adotada para cada elemento deve ser compatível com a análise pretendida. Para avaliar o comportamento harmônico da rede, os modelos devem considerar as diversas componentes harmônicas da tensão e da corrente presente no sistema.

Conforme [2] modelos avançados em simulações detalhadas do sistema de alimentação e das cargas podem ser usados para determinar os valores das grandezas elétricas em pontos do sistema onde não seja possível o uso de medidores. Neste contexto, várias abordagens podem ser usadas para a modelagem de cargas. Entre os modelos mais empregados nas análises de regime permanente e de transientes pode-se citar os

modelos estáticos e dinâmicos de cargas [3]. Porém, estas abordagens não permitem a caracterização da carga em relação às suas componentes harmônicas. Para este fim existem abordagens específicas como o modelo de fonte de corrente, modelo de Norton, modelo de Norton Harmonicamente Acoplado e modelo de Matriz de Admitância Cruzada [1, 4].

Como uma proposta de modelagem harmônica de carga, este trabalho sugere a caracterização das várias componentes harmônicas das potências ativa e reativa da carga pelo modelo polinomial, também conhecido como modelo ZIP, combinado com uma matriz de admitância cruzada, possibilitando que as componentes harmônicas de tensão pertençam ao modelo final, melhorando a representação harmônica da carga.

II. MODELAGEM DE CARGA

A. Modelos Tradicionalmente Aplicados

A caracterização de cargas do SEP pode ser efetuada por diversos modelos, sendo o modelo polinomial, ou ZIP, amplamente utilizado para a representação estática de cargas. O modelo ZIP, que é baseado no modelo exponencial, assume que a carga pode ser decomposta nas componentes constantes de impedância, corrente e potência. O modelo polinomial representa satisfatoriamente cargas para diversos estudos de regime permanente e de transientes. Porém, neste último caso, o modelo ZIP deve ser combinado com modelos que representem a parte dinâmica da carga [5-7]. As potências ativa P e reativa Q em função do módulo da tensão da carga $|V|$ estão apresentadas nas Eq. 1 e 2.

$$P = P_0 \left[p_z \left(\frac{|V|}{|V_0|} \right)^2 + p_I \left(\frac{|V|}{|V_0|} \right) + p_P \right] \quad (1)$$

$$Q = Q_0 \left[q_z \left(\frac{|V|}{|V_0|} \right)^2 + q_I \left(\frac{|V|}{|V_0|} \right) + q_P \right] \quad (2)$$

Onde o índice 0 indica o valor inicial de cada grandeza; e os coeficientes p_z , p_I e p_P , cuja soma é igual a 1, definem a proporção de impedância, corrente e potência constante na

carga, respectivamente. O mesmo raciocínio pode ser aplicado para os coeficientes q_Z , q_I e q_P da potência reativa.

De acordo com [8] o modelo ZIP não é capaz de considerar os efeitos harmônicos na representação da carga. Já [9] mostra que, para o caso em que a tensão da carga assume Taxa de Distorção Harmônica (THD) inferior a 5%, é possível representar esta carga, de forma simplificada, como fontes de corrente sincronizadas e dependentes das componentes harmônicas de tensão da carga, baseando-se no modelo ZIP.

Algumas abordagens para modelagem de cargas consideram o uso de uma matriz de admitâncias, como ocorre no modelo de Norton, onde cada componente harmônica da corrente de carga é dependente da componente harmônica de tensão de mesma ordem. Entretanto, no modelo de Matriz de Admitância Cruzada e no modelo de Norton Harmonicamente Acoplado, há dependência das componentes harmônicas de tensão de várias ordens em cada componente harmônica de corrente. Isto melhora a representação da carga em relação ao modelo de Norton [4].

A representação matricial das componentes harmônicas da corrente de carga, para o modelo de Norton, pode ser vista na Eq. 3. Nesta equação foram consideradas somente as componentes harmônicas ímpares até a ordem N .

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L^1 \\ \dot{I}_L^3 \\ \dot{I}_L^5 \\ \vdots \\ \dot{I}_L^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_N^1 \\ \dot{I}_N^3 \\ \dot{I}_N^5 \\ \vdots \\ \dot{I}_N^N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_N^1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Y_N^3 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & Y_N^5 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & Y_N^N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_L^1 \\ \dot{V}_L^3 \\ \dot{V}_L^5 \\ \vdots \\ \dot{V}_L^N \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde $\dot{I}_L^h$ e $\dot{V}_L^h$ são as componentes harmônicas, de ordem h , da corrente e da tensão da carga, respectivamente; e $\dot{I}_N^h$ e Y_N^h são, respectivamente, a componente harmônica da corrente, de ordem h , da fonte de corrente e a admitância submetida à componente harmônica da tensão de ordem h .

A representação matricial das componentes harmônicas da corrente de carga no modelo de Matriz de Admitância Cruzada está mostrada na Eq. 4.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L^1 \\ \dot{I}_L^3 \\ \dot{I}_L^5 \\ \vdots \\ \dot{I}_L^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1^1 & Y_1^3 & Y_1^5 & \dots & Y_1^N \\ Y_3^1 & Y_3^3 & Y_3^5 & \dots & Y_3^N \\ Y_5^1 & Y_5^3 & Y_5^5 & \dots & Y_5^N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_N^1 & Y_N^3 & Y_N^5 & \dots & Y_N^N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_L^1 \\ \dot{V}_L^3 \\ \dot{V}_L^5 \\ \vdots \\ \dot{V}_L^N \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde $\dot{I}_L^h$ e $\dot{V}_L^h$ são as componentes harmônicas, de ordem h , da corrente e da tensão da carga, respectivamente; e Y_h^v é a admitância submetida à componente harmônica da tensão, de ordem v , utilizada para determinar a componente harmônica da corrente de carga de ordem h .

A representação matricial das componentes harmônicas, ímpares até a ordem N , da corrente de carga, para o modelo de Norton Harmonicamente Acoplado, está apresentada na Eq. 5, onde $\dot{I}_L^h$ e $\dot{V}_L^h$ são as componentes harmônicas, de ordem h , da

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L^1 \\ \dot{I}_L^3 \\ \dot{I}_L^5 \\ \vdots \\ \dot{I}_L^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_N^1 \\ \dot{I}_N^3 \\ \dot{I}_N^5 \\ \vdots \\ \dot{I}_N^N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{N,1}^1 & Y_{N,1}^3 & Y_{N,1}^5 & \dots & Y_{N,1}^N \\ Y_{N,3}^1 & Y_{N,3}^3 & Y_{N,3}^5 & \dots & Y_{N,3}^N \\ Y_{N,5}^1 & Y_{N,5}^3 & Y_{N,5}^5 & \dots & Y_{N,5}^N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N,N}^1 & Y_{N,N}^3 & Y_{N,N}^5 & \dots & Y_{N,N}^N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_L^1 \\ \dot{V}_L^3 \\ \dot{V}_L^5 \\ \vdots \\ \dot{V}_L^N \end{bmatrix} \quad (5)$$

corrente e da tensão da carga, respectivamente; $\dot{I}_N^h$ é a componente harmônica, de ordem h , de corrente da fonte de corrente; e $Y_{N,h}^v$ é a admitância submetida à componente harmônica da tensão, de ordem v , utilizada na determinação da componente harmônica, de ordem h , da corrente de carga.

B. Modelo Proposto

Considerando que a abordagem com a carga ZIP não representa com exatidão uma carga submetida a componentes harmônicas de tensão, propõe-se alternativamente que as potências ativa e reativa da carga sejam caracterizadas pela combinação do modelo ZIP com o uso da matriz de admitância cruzada, proporcionando o efeito do acoplamento harmônico. Desta forma, para cada componente harmônica de ordem h pode-se obter a potência aparente da carga pela Eq. 6.

$$S_h = (P_h + jQ_h) + \Delta S_h \quad (6)$$

Sendo P_h e Q_h , obtidos a partir das Eq. 1 e 2, descritos nas Eq. 7 e 8; e ΔS_h , até a ordem N , está apresentado na Eq. 9.

$$P_h = P_{0h} \left[p_Z \left(\frac{|V_h|}{|V_{0h}|} \right)^2 + p_I \left(\frac{|V_h|}{|V_{0h}|} \right) + p_P \right] \quad (7)$$

$$Q_h = Q_{0h} \left[q_Z \left(\frac{|V_h|}{|V_{0h}|} \right)^2 + q_I \left(\frac{|V_h|}{|V_{0h}|} \right) + q_P \right] \quad (8)$$

$$\Delta S_h = \sum_{v=1}^N |V_v|^2 Y_h^v, \text{ com } v \neq h \quad (9)$$

A admitância da Eq. 9 pode ser visualizada na Eq. 10 decomposta em parte real e imaginária.

$$Y_h^v = G_h^v + jB_h^v \quad (10)$$

Onde G_h^v é uma condutância e B_h^v uma susceptância submetidas à componente harmônica da tensão, de ordem v , utilizadas para determinar ΔS de ordem h .

Nesta proposta os coeficientes p_Z , p_I , p_P , q_Z , q_I e q_P do modelo ZIP serão obtidos para h igual a 1, ou seja, a partir dos dados da componente fundamental da corrente e das várias componentes harmônicas da tensão da carga. Estes coeficientes também serão utilizados nas demais ordens harmônicas. Para cada componente harmônica h serão estimados os valores de P_{0h} e Q_{0h} , bem com os diversos valores de Y_h^v .

III. IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS

Para realizar a identificação dos parâmetros do modelo proposto neste trabalho foi utilizado o método dos mínimos quadrados. Neste método os valores medidos devem abranger toda a faixa de valores na qual se pretende modelar o sistema. Para que isto ocorra, é necessário que o sistema receba estímulos. Estes estímulos podem ser provocados de diversas formas como por alterações de carga, mudanças de *tap* de transformador, entre outras [8]. Tais estímulos podem ocorrer naturalmente. Em um sistema de distribuição as mudanças de tensão provocam alterações nas correntes das cargas, que por sua vez modificam a queda de tensão nos condutores, implicando novamente na mudança da tensão da carga.

Visando a determinação dos parâmetros do modelo da carga, é necessário um conjunto de medições que represente diferentes condições de operação e assim garantir que o sistema de equações seja linearmente independente [10].

A identificação dos parâmetros foi dividida em duas etapas. Na primeira etapa os parâmetros do modelo para a componente fundamental são estimados, inclusive os coeficientes do modelo ZIP. Na segunda etapa os parâmetros do modelo são estimados considerando os coeficientes ZIP determinados na primeira etapa.

A medida m das potências ativa e reativa da carga, para a componente fundamental, pode ser escrita a partir da Eq. 6 e da relação entre os coeficientes do modelo ZIP, como mostrado nas Eq. 11 e 12. Neste equacionamento foi considerado somente as componentes harmônicas ímpares até a ordem N .

$$P_1^m = \varphi_1^m \cdot \theta_{p1} + \varepsilon_{p1}^m \quad (11)$$

$$Q_1^m = \varphi_1^m \cdot \theta_{q1} + \varepsilon_{q1}^m \quad (12)$$

Onde φ_1^m é o vetor de medidas mostrado na Eq. 13; θ_{p1} e θ_{q1} os vetores de parâmetros das potências ativa e reativa apresentados nas Eq. 14 e 15, respectivamente; e ε_{p1}^m e ε_{q1}^m representam o erro de modelagem, de medição ou ruído na saída.

$$\varphi_1^m = \begin{bmatrix} \frac{|V_1^m|^2}{|V_{01}^m|^2} - 1 & \frac{|V_1^m|}{|V_{01}^m|} - 1 & 1 & |V_3^m|^2 & |V_5^m|^2 & \dots & |V_N^m|^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\theta_{p1} = [p_Z P_{01} \quad p_I P_{01} \quad P_{01} \quad G_1^3 \quad G_1^5 \quad \dots \quad G_1^N]^T \quad (14)$$

$$\theta_{q1} = [q_Z Q_{01} \quad q_I Q_{01} \quad Q_{01} \quad B_1^3 \quad B_1^5 \quad \dots \quad B_1^N]^T \quad (15)$$

Uma vez definido o vetor de medidas, para a componente fundamental, é possível escrever a matriz de observação ϕ . Para M medidas, a partir das Eq. 11 e 12, é possível escrever o sistema sobredeterminado de acordo com as Eq. 16 e 17, cuja representação matricial pode ser vista nas Eq. 18 e 19.

$$\begin{bmatrix} P_1^1 \\ P_1^2 \\ \vdots \\ P_1^M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1^1 \\ \varphi_1^2 \\ \vdots \\ \varphi_1^M \end{bmatrix} \cdot \theta_{p1} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{p1}^1 \\ \varepsilon_{p1}^2 \\ \vdots \\ \varepsilon_{p1}^M \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} Q_1^1 \\ Q_1^2 \\ \vdots \\ Q_1^M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1^1 \\ \varphi_1^2 \\ \vdots \\ \varphi_1^M \end{bmatrix} \cdot \theta_{q1} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{q1}^1 \\ \varepsilon_{q1}^2 \\ \vdots \\ \varepsilon_{q1}^M \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$P_1' = \phi_1 \cdot \theta_{p1} + E_{p1} \quad (18)$$

$$Q_1' = \phi_1 \cdot \theta_{q1} + E_{q1} \quad (19)$$

As estimativas dos vetores de parâmetros $\hat{\theta}_{p1}$ e $\hat{\theta}_{q1}$ podem ser obtidas pelo método dos mínimos quadrados com descrito nas Eq. 20 e 21 [11]. Desta forma todos os parâmetros do modelo, para a componente fundamental, podem ser encontrados.

$$\hat{\theta}_{p1} = [\phi_1^T \cdot \phi_1]^{-1} \cdot \phi_1^T \cdot P_1' \quad (20)$$

$$\hat{\theta}_{q1} = [\phi_1^T \cdot \phi_1]^{-1} \cdot \phi_1^T \cdot Q_1' \quad (21)$$

A medida m das potências ativa e reativa da carga, para a componente harmônica de ordem h , superior à fundamental, está apresentada nas Eq. 22 e 23. Estas equações podem ser escritas a partir da Eq. 6.

$$P_h^m = \varphi_{ph}^m \cdot \theta_{ph} + \varepsilon_{ph}^m \quad (22)$$

$$Q_h^m = \varphi_{qh}^m \cdot \theta_{qh} + \varepsilon_{qh}^m \quad (23)$$

Onde os vetores de medidas φ_{ph}^m e φ_{qh}^m podem ser escritos, considerando os coeficientes do modelo ZIP já determinados para a componentes fundamental, conforme as Eq. 24 e 25; e os parâmetros do modelo podem ser determinados pelas Eq. 26 e 27.

$$\varphi_{ph}^m = \left[p_Z \left(\frac{|V_h^m|}{|V_{0h}^m|} \right)^2 + p_I \frac{|V_h^m|}{|V_{0h}^m|} + p_P \quad |V_1^m|^2 \dots |V_v^m|^2 \dots |V_N^m|^2 \right] \quad (24)$$

$$\varphi_{qh}^m = \left[q_Z \left(\frac{|V_h^m|}{|V_{0h}^m|} \right)^2 + q_I \frac{|V_h^m|}{|V_{0h}^m|} + q_P \quad |V_1^m|^2 \dots |V_v^m|^2 \dots |V_N^m|^2 \right] \quad (25)$$

$$\theta_{ph} = [P_{0h} \quad G_h^1 \quad \dots \quad G_h^v \quad \dots \quad G_h^N]^T \quad (26)$$

$$\theta_{Qh} = [Q_{0h} \quad B_h^1 \quad \dots \quad B_h^v \quad \dots \quad B_h^N]^T \quad (27)$$

Onde $v \neq h$ e $h > 1$.

Uma vez definido o vetor de medidas é possível representar genericamente a matriz de observação ϕ . Para M medidas, a partir das Eq. 22 e 23, é possível escrever o sistema sobredeterminado de acordo com as Eq. 28 e 29.

$$\begin{bmatrix} P_h^1 \\ P_h^2 \\ \vdots \\ P_h^M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{ph}^1 \\ \phi_{ph}^2 \\ \vdots \\ \phi_{ph}^M \end{bmatrix} \cdot \theta_{ph} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{ph}^1 \\ \varepsilon_{ph}^2 \\ \vdots \\ \varepsilon_{ph}^M \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} Q_h^1 \\ Q_h^2 \\ \vdots \\ Q_h^M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{qh}^1 \\ \phi_{qh}^2 \\ \vdots \\ \phi_{qh}^M \end{bmatrix} \cdot \theta_{qh} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{qh}^1 \\ \varepsilon_{qh}^2 \\ \vdots \\ \varepsilon_{qh}^M \end{bmatrix} \quad (29)$$

A representação matricial das Eq. 28 e 29 pode ser vista nas Eq. 30 e 31.

$$P'_h = \phi_{ph} \cdot \theta_{ph} + E_{ph} \quad (30)$$

$$Q'_h = \phi_{qh} \cdot \theta_{qh} + E_{qh} \quad (31)$$

As estimativas dos vetores de parâmetros podem ser obtidas pelo método dos mínimos quadrados com descrito nas Eq. 32 e 33. Desta forma todos os parâmetros do modelo, para a componente de ordem superior à fundamental, podem ser obtidos.

$$\hat{\theta}_{ph} = [\phi_{ph}^T \cdot \phi_{ph}]^{-1} \cdot \phi_{ph}^T \cdot P'_h \quad (32)$$

$$\hat{\theta}_{qh} = [\phi_{qh}^T \cdot \phi_{qh}]^{-1} \cdot \phi_{qh}^T \cdot Q'_h \quad (33)$$

IV. ESTUDO DE CASO E RESULTADOS

Afim de aplicar o modelo proposto neste trabalho, foi desenvolvido um sistema utilizando o *software* PSCAD para obter valores de modo a realizar os estudos. Um sistema de distribuição foi representado por um circuito equivalente de Thévenin, composto por uma fonte de tensão V_s e uma impedância equivalente do sistema Z_s , conforme mostrado na Fig. 1 [10], sendo V_L e I_L a tensão e a corrente na carga, respectivamente. A impedância Z_s foi considerada como uma resistência em série com uma indutância.

Devido à presença de cargas não lineares no sistema, a tensão V_s contém diversas componentes harmônicas.

Afim de comprovar as afirmações sobre a modelagem proposta de cargas na presença de harmônicas, diferentes testes foram efetuados com uma carga linear e várias cargas não lineares. No primeiro caso foi utilizada uma carga RL e no segundo caso foi utilizado um retificador de onda completa não

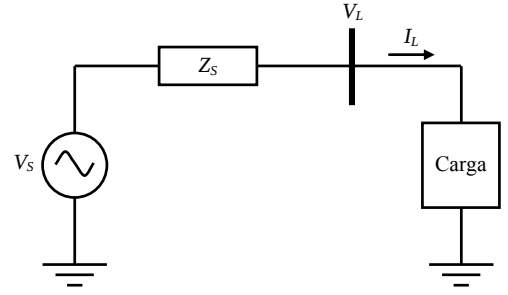


Fig. 1. Sistema para estudo de caso.

controlado com diversos tipos de cargas. As cargas aplicadas ao retificador foram de impedância, corrente e potência constante, além de uma combinação delas.

Neste estudo de caso os distúrbios necessários à identificação dos parâmetros do modelo da carga foram representados por variações aleatórias de tensão da fonte do circuito equivalente de Thévenin (V_s). Tais variações ocorrem tanto na componente fundamental quanto nas componentes harmônicas de ordem superior da tensão da fonte, cada uma dentro de uma faixa que assume valores percentuais distintos para cada ordem harmônica.

Para determinar as componentes harmônicas de tensão e corrente da carga, no simulador, foi utilizada a Transformada Rápida de Fourier (FFT), já disponível no PSCAD. Seguindo as orientações do *software*, em cada variação de tensão foram considerados apenas os dados da FFT fornecidos após um ciclo de captura do sinal de entrada, considerando, assim, a forma de cálculo usada pelo programa. Em cada teste realizado foram coletadas 58 amostras, considerando-se até a 25ª ordem harmônica das medições de tensão e corrente da carga. Aproximadamente 70% dos dados coletados foram utilizados no processo de identificação e os demais dados no processo de validação do método. Os resultados obtidos para diferentes cargas são apresentados a seguir.

A. Carga Linear

Para uma carga linear tipo RL submetida a uma tensão, cuja THD está entre 3,3 e 3,6%, obteve-se os valores dos coeficientes ZIP apresentados na Tabela I. As formas de onda de aproximadamente um período de uma amostra da corrente da carga medida e estimada podem ser vistas na Fig. 2. Os módulos e ângulos medidos e estimados de uma amostra da corrente de carga estão apresentados na Fig. 3. A amostra utilizada nas Fig. 2 e 3 refere-se à corrente que forneceu a maior diferença de THD entre os valores medidos e estimados. As potências ativa e reativa da carga determinadas pelas correntes e tensões medidas, bem como as potências ativa e reativa estimadas, a partir dos dados de validação, podem ser visualizadas na Fig. 4.

A partir dos dados apresentados é possível observar que os valores encontrados para os coeficientes do modelo ZIP são compatíveis com o tipo de carga. Além disso, as Fig. 2 a 4 mostram que os valores estimados são muito próximos dos valores medidos. Considerando os dados de validação, a maior diferença de THD, entre as correntes medidas e estimadas, foi

igual a $5,3 \times 10^{-6}$. Outro resultado importante é que a maioria dos valores dos módulos das admitâncias para a carga linear, obtidos a partir de Y_h^v da Eq. 10 e mostrados na Fig. 5, foram

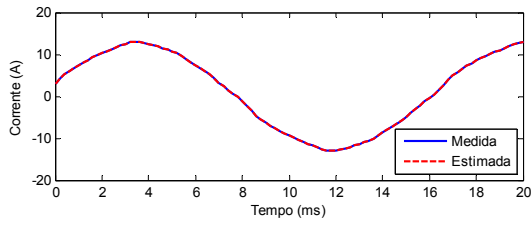


Fig. 2. Formas de onda da corrente de carga linear.

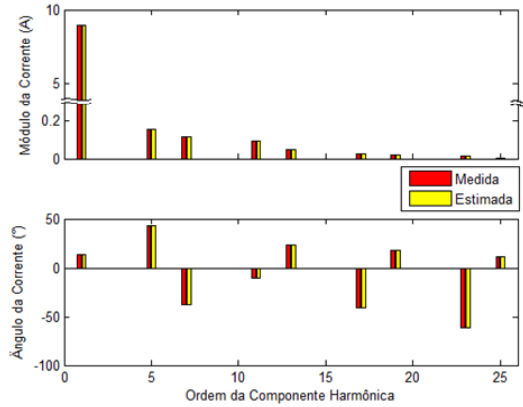


Fig. 3. Corrente medida e estimada da carga linear.

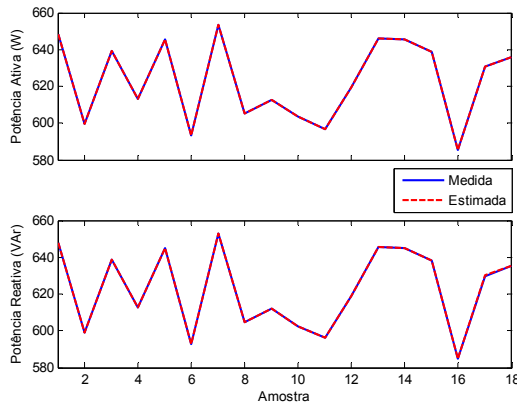


Fig. 4. Potências ativa e reativas medidas e estimadas da carga linear.

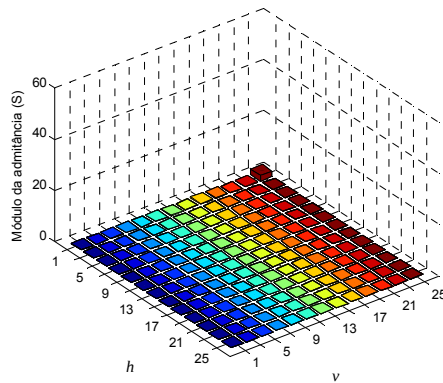


Fig. 5. Módulos das admitâncias para carga linear.

próximos de zero, indicando que somente o modelo ZIP poderia fornecer uma boa representação harmônica para este tipo de carga.

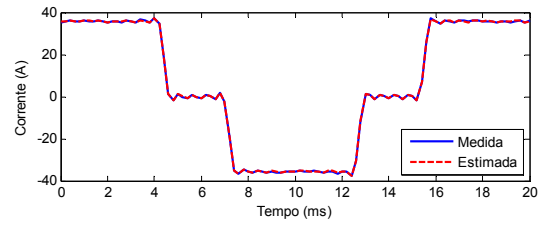


Fig. 6. Formas de onda da corrente de carga não linear.

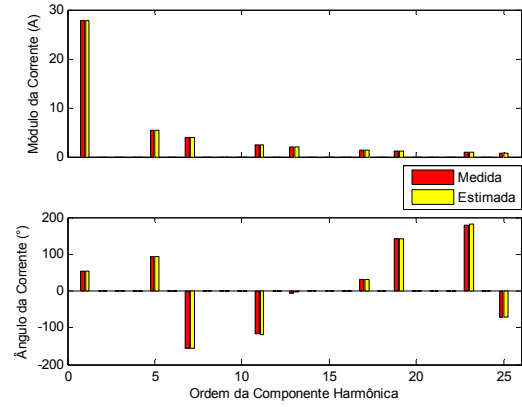


Fig. 7. Corrente medida e estimada da carga não linear.

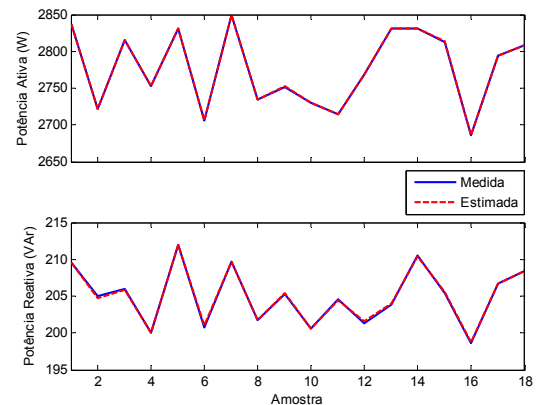


Fig. 8. Potências ativa e reativas medidas e estimadas da carga não linear.

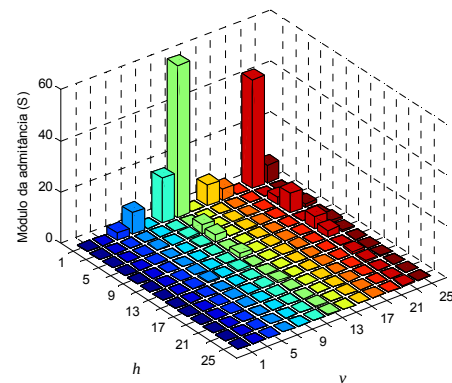


Fig. 9. Módulos das admitâncias para carga não linear.

B. Carga Não Linear

Neste teste foi utilizada uma carga composta por três retificadores de onda completa não controlados, conectados em paralelo e, portanto, submetidos à mesma tensão, cuja THD está entre 3,9 e 4,2%. Cada retificador contém uma carga distinta, sendo o primeiro com carga tipo impedância constante, o segundo com carga tipo corrente constante e o terceiro com carga tipo potência constante. As amplitudes das correntes destes retificadores são aproximadamente iguais.

Após o processo de estimação obteve-se os valores para os coeficientes ZIP apresentados na Tabela I. As formas de onda de aproximadamente um período de uma amostra da corrente da carga medida e estimada podem ser vistas na Fig. 6. Os módulos e ângulos medidos e estimados de uma amostra da corrente de carga estão apresentados na Fig. 7. A amostra utilizada nas Fig. 6 e 7 referem-se à corrente que forneceu a maior diferença de THD entre os valores medidos e estimados.

As potências ativa e reativa da carga determinadas pelas correntes e tensões medidas, bem como as potências ativa e reativa estimadas, para os dados de validação, podem ser visualizadas na Fig. 8.

A partir dos dados apresentados é possível observar que os valores encontrados para os coeficientes do modelo ZIP da potência ativa são divididos em proporções aproximadamente iguais, já que as correntes dos retificadores são próximas. Além disso, as Fig. 6 a 8 mostram que os valores estimados são muito próximos dos valores medidos, sendo a maior diferença de THD entre todas as correntes medidas e estimadas igual a $5,7 \times 10^{-4}$. Outro resultado importante é que os valores das admitâncias para a carga não linear, obtidos a partir de Y_h^v da Eq. 10 e mostrados na Fig. 9, não foram próximos de zero, indicando que somente o modelo ZIP não representaria satisfatoriamente este tipo de carga.

Além dos testes realizados com uma carga linear e com uma carga não linear, outros testes com cargas não lineares foram efetuados aplicando-se, separadamente, cargas do tipo impedância, corrente ou potência constante, em um retificador de onda completa não controlado. Um resumo dos coeficientes ZIP estimados para todas as cargas testadas está apresentado na Tabela I. Os valores em negrito na Tabela I destacam que a estimativa para os coeficientes do modelo ZIP são compatíveis com o tipo de carga analisada.

TABELA I. COEFICIENTES DO MODELO ZIP PARA DIFERENTES CARGAS

Coeficientes ZIP	Carga Linear	Carga Não Linear			
		Retificador de Onda Completa Não Controlado			
	RL	Z constante	I constante	P constante	ZIP
p_Z	1,0108	1,0002	0,0071	− 0,0939	0,3582
p_I	− 0,0216	− 0,0003	1,0087	0,2271	0,3478
p_P	0,0108	0,0001	− 0,0158	0,8668	0,2941
q_Z	0,9854	− 5,1445	− 0,6624	2,4961	0,0813
q_I	0,0297	12,2749	0,6195	− 6,5980	0,6241
q_P	− 0,0151	− 6,1304	1,0429	5,1019	0,2947

V. CONCLUSÃO

Em função da relevância da modelagem de cargas para estudos referentes ao SEP, sobretudo em um cenário crescente de cargas não lineares, o estudo de modelos harmônicos de cargas torna-se importante. Este artigo apresentou uma proposta para a modelagem harmônica de carga que, além de fornecer a informação da proporção de carga com impedância, corrente e potência constante, considera o acoplamento das diversas componentes harmônicas de tensão na corrente da carga, melhorando a exatidão do modelo. Um estudo de caso com diferentes cargas mostrou, comparativamente, a proximidade entre os valores medidos e os resultados fornecidos pelo modelo proposto.

REFERÊNCIAS

- [1] M. E. Balci, D. Ozturk, O. Karacasu, and M. H. Hocaoglu, "Experimental verification of harmonic load models," in *Universities Power Engineering Conference, 2008. UPEC 2008. 43rd International*, 2008, pp. 1-4.
- [2] "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, pp. 1-29, 2014.
- [3] P. Regulski, D. S. Vilchis-Rodriguez, S. Djurovic, and V. Terzija, "Estimation of Composite Load Model Parameters Using an Improved Particle Swarm Optimization Method," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 30, pp. 553-560, 2015.
- [4] A. S. Koch, J. M. A. Myrzik, T. Wiesner, and L. Jendernalik, "Evaluation and validation of Norton approaches for nonlinear harmonic models," in *PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble*, 2013, pp. 1-6.
- [5] P. Ju, C. Qin, F. Wu, H. Xie, and Y. Ning, "Load modeling for wide area power system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 33, pp. 909-917, 5// 2011.
- [6] B.-H. Kim and H. Kim, "Measurement-based estimation of the composite load model parameters," *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 7, pp. 845-851, 2012.
- [7] A. M. Najafabadi and A. T. Alouani, "Real time estimation of sensitive parameters of composite power system load model," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES*, 2012, pp. 1-8.
- [8] R. Bagheri, J. Moghani, G. Gharehpetian, and S. Mirtalaei, "Determination of aggregated load power consumption, under non-sinusoidal supply using an improved load model," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 1563-1569, 2009.
- [9] M. S. Ndiay, J. L. Silva Neto, M. Aredes, A. F. Aquino, and G. Santos Jr, "Modeling Of Non-linear Loads By Synchronized Current Sources And Zip Model," in *9º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência (COBEP 2007)*, 2007, pp. 563-567.
- [10] C. F. ALMEIDA and N. KAGAN, "A novel technique for modeling aggregate harmonic-producing loads," in *CIGRE 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt*, 2011, pp. 6-9.
- [11] G. R. Rey and L. M. Muneta, "Power quality harmonics analysis and real measurements data," ed: InTech, 2011.