

Modelagem Harmônica para Diferentes Cargas Utilizadas no Sistema Elétrico

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—Cargas não lineares, aplicadas ao sistema elétrico, afetam o comportamento senoidal da corrente e das quedas de tensão do sistema, causando perdas de energia e interferências eletromagnéticas. Desta forma, a modelagem de cargas considerando efeitos harmônicos torna-se importante para a representação destas cargas em análises harmônicas. Além da revisão de alguns métodos para representação de cargas harmônicas, uma modelagem é proposta neste trabalho. Esta modelagem inclui o acoplamento entre as componentes harmônicas da tensão e corrente da carga, afim de representá-la com exatidão maior do que a obtida em modelos que não consideram tal efeito. O método dos mínimos quadrados foi empregado para determinar os parâmetros do modelo e um estudo de caso permitiu a aplicação desta proposta. Resultados mostraram a proximidade entre os valores medidos e a resposta do modelo para diferentes tipos de cargas.

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

I. INTRODUÇÃO

O uso de cargas não lineares, pelos diferentes tipos de consumidores, afetam diretamente o comportamento senoidal da corrente e, conseqüentemente, das quedas de tensão no sistema elétrico. Como efeito deste fluxo harmônico de correntes pode-se citar o aumento de perdas e do aquecimento em elementos como motores e transformadores. Mesmo cargas lineares, quando submetidas a tensões com várias componentes de frequências harmônicas, serão percorridas por correntes com distorção harmônica. Além disso, as correntes harmônicas podem causar interferência eletromagnética em equipamentos eletrônicos. Entre as fontes que provocam o fluxo harmônico estão os retificadores, inversores de frequência, cicloconversores, fornos a arco e dispositivos com núcleo magnético saturado [1, 2].

Considerando as implicações do fluxo de correntes harmônicas no sistema elétrico, torna-se relevante a caracterização de cargas para a realização de estudos e simulações. Dentre as abordagens para determinar as características das cargas, no sistema elétrico, uma tem ganhado destaque, que é a abordagem baseada em medições. Nela os dados previamente capturados são utilizados para estimar os parâmetros do modelo da carga, minimizando a diferença entre os valores medidos e a saída do modelo [3, 4].

Onde, diversas estratégias podem ser empregadas para a modelagem e para a determinação dos parâmetros.

Várias abordagens consideram os efeitos harmônicos em estudos do comportamento de cargas. O modelo de fontes de corrente constante, o modelo de Norton, o modelo de matriz de admitância cruzada e o modelo de Norton harmonicamente acoplado estão entre os principais modelos aplicadas [5, 6]. O modelo de Norton não considera o acoplamento entre tensões e correntes de diferentes frequências harmônicas. Entretanto, a exatidão dos resultados do modelo por ser melhorada considerando o efeito de acoplamento como no caso do modelo de Norton harmonicamente acoplado [7].

Neste contexto, este trabalho propõe uma modelagem de carga que considera o acoplamento harmônico entre grandezas elétricas presentes na carga, sendo escolhido o método dos mínimos quadrados para a identificação dos parâmetros do modelo proposto.

II. MODELOS HARMÔNICOS DE CARGAS

Há várias propostas de modelos de cargas envolvendo estudos de suas componentes harmônicas, sendo que a maioria deles considera as variações de tensão em sua caracterização. Entre os principais modelos pode-se citar o modelo de fonte de corrente constante, modelo de Norton, modelo de matriz de admitância cruzada e modelo de Norton harmonicamente acoplado.

A. Modelo de Fonte de Corrente Constante

Na modelagem por fonte de corrente constante cada componente de corrente harmônica da carga é modelada como uma fonte de corrente constante, representada por uma magnitude e um ângulo de fase. Trata-se de uma modelagem simples, porém aplicável somente para cargas pouco sensíveis à variação de tensão ou em casos em que o sistema elétrico apresenta pequenas variações de tensão [6].

A exatidão atingida pela modelagem com fonte de corrente constante pode ficar comprometida pelo fato do modelo não considerar variações de tensão. Além disso, em um alimentador, com diversas fontes harmônicas, poderá existir influência na distorção harmônica de tensão, em um dado barramento, devido à cargas que não estão conectadas diretamente a ele [5].

B. Modelo de Norton

O modelo de Norton é constituído por uma fonte de corrente em paralelo com uma admitância para cada componente harmônica a ser considerada na modelagem. Neste modelo a corrente de uma determinada ordem harmônica é descrita apenas em função da componente de tensão de mesma ordem, porém o modelo não considera que componentes de tensão de outras ordens interfiram em uma dada ordem harmônica. As componentes harmônicas ímpares da corrente de carga para o modelo de Norton, até a ordem N , estão mostradas na Eq. 1 [8].

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

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 os parâmetros do modelo que deverão ser determinados $\dot{I}_N^h$ e Y_N^h são, respectivamente, a componente harmônica de corrente da fonte de corrente e a admitância submetida à componente harmônica da tensão, ambas de ordem h .

C. Modelo de Matriz de Admitância Cruzada

O modelo de matriz de admitância cruzada assume que cada componente harmônica da corrente da carga é representada por uma corrente que é função de várias componentes harmônicas de tensão e de admitâncias constantes, conforme mostrado na Eq. 2 [6].

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L^1 \\ \dot{I}_L^3 \\ \dot{I}_L^5 \\ \vdots \\ \dot{I}_L^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1^1 & Y_1^3 & Y_1^5 & \cdots & Y_1^N \\ Y_3^1 & Y_3^3 & Y_3^5 & \cdots & Y_3^N \\ Y_5^1 & Y_5^3 & Y_5^5 & \cdots & Y_5^N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_N^1 & Y_N^3 & Y_N^5 & \cdots & Y_N^N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_L^1 \\ \dot{V}_L^3 \\ \dot{V}_L^5 \\ \vdots \\ \dot{V}_L^N \end{bmatrix} \quad (2)$$

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 que será multiplicada pela componente harmônica v da tensão, formando uma parcela da componente h da corrente de carga.

D. Modelo de Norton Harmonicamente Acoplado

O modelo de Norton harmonicamente acoplado propõe melhorias em relação ao modelo de Norton, pois considera a influência de várias componentes harmônicas da tensão na composição de uma dada componente harmônica da corrente da carga, como pode ser visto na Eq. 3 [5]. 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; $\dot{I}_N^h$ é a componente harmônica, de ordem h , de corrente da fonte de corrente de

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

Norton; e $Y_{N,h}^v$ é a admitância que será multiplicada pela componente harmônica v da tensão, formando uma parcela da componente h da corrente de carga.

Em situações onde o modelo de Norton harmonicamente acoplado não fornece a exatidão requerida para o estudo em questão, novos graus de liberdade podem ser incorporados adicionando-se outra matriz de admitâncias. Porém, estas admitâncias estarão submetidas ao conjugado das componentes harmônicas de tensão da carga. Segundo [9] esta representação é denominada *full model*. A expressão deste modelo pode ser visualizada pela Eq. 4.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L^1 \\ \dot{I}_L^3 \\ \dot{I}_L^5 \\ \vdots \\ \dot{I}_L^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_N^1 \\ \dot{I}_N^3 \\ \dot{I}_N^5 \\ \vdots \\ \dot{I}_N^N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{N,1}^1 & Y_{N,1}^3 & Y_{N,1}^5 & \cdots & Y_{N,1}^N \\ Y_{N,3}^1 & Y_{N,3}^3 & Y_{N,3}^5 & \cdots & Y_{N,3}^N \\ Y_{N,5}^1 & Y_{N,5}^3 & Y_{N,5}^5 & \cdots & Y_{N,5}^N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N,N}^1 & Y_{N,N}^3 & Y_{N,N}^5 & \cdots & Y_{N,N}^N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_L^1 \\ \dot{V}_L^3 \\ \dot{V}_L^5 \\ \vdots \\ \dot{V}_L^N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{N,1}'^1 & Y_{N,1}'^3 & Y_{N,1}'^5 & \cdots & Y_{N,1}'^N \\ Y_{N,3}'^1 & Y_{N,3}'^3 & Y_{N,3}'^5 & \cdots & Y_{N,3}'^N \\ Y_{N,5}'^1 & Y_{N,5}'^3 & Y_{N,5}'^5 & \cdots & Y_{N,5}'^N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N,N}'^1 & Y_{N,N}'^3 & Y_{N,N}'^5 & \cdots & Y_{N,N}'^N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_L^{1*} \\ \dot{V}_L^{3*} \\ \dot{V}_L^{5*} \\ \vdots \\ \dot{V}_L^{N*} \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde $\dot{V}_L^{h*}$ é o conjugado da componente harmônica, de ordem h , da tensão da carga; e $Y_{N,h}^{v'}$ é a admitância submetida ao conjugado da componente harmônica da tensão, de ordem v , utilizada na determinação da componente harmônica, de ordem h , da corrente de carga. Apesar do modelo descrito pela Eq. 4 melhorar a exatidão, em relação ao modelo apresentado pela Eq. 3, há um aumento significativo da quantidade de parâmetros a serem estimados.

III. MODELAGEM PROPOSTA E DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS

Considerando que há influência das várias componentes harmônicas de tensão em uma dada componente harmônica de corrente da carga, e que os modelos que consideram este fato obtêm melhores resultados em relação aqueles que não consideram tal influência, a modelagem proposta neste trabalho utiliza uma impedância constante Z em paralelo com fontes de correntes harmônicas, cada uma controlada por tensões de diversas ordens harmônicas, além de uma parcela de potência aparente constante para cada ordem harmônica. É importante ressaltar que a parte imaginária da impedância Z é modificada em função da frequência da tensão aplicada.

Supondo que a tensão da carga contenha várias componentes harmônicas, a parte imaginária da impedância será diferente para cada ordem harmônica conforme estabelecido pela Eq. 5.

$$Z_h = \begin{cases} R + jhX & \text{para } X \geq 0 \\ R + jX/h & \text{para } X < 0 \end{cases} \quad (5)$$

A Fig. 1 mostra o circuito equivalente do modelo proposto para a ordem harmônica h , onde V_h e I_{Lh} são componentes harmônicas da tensão e da corrente da carga, respectivamente; Z_h é uma impedância dada pela Eq. 5; I_{S_h} a componente harmônica da corrente, de ordem h , da fonte de corrente; e S_h o termo de potência constante de ordem h . O * indica conjugado da variável.

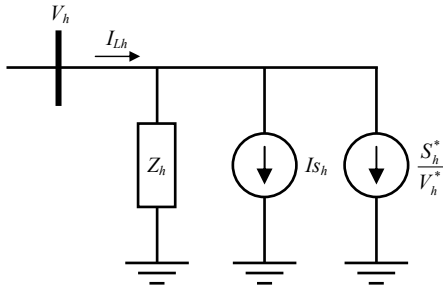


Fig. 1. Modelo proposto de carga de ordem harmônica h .

A Eq. 6 mostra como pode ser obtida a componente harmônica de ordem h da potência aparente da carga.

$$S_{Lh} = V_h I_{Lh}^* = \frac{|V_h|^2}{Z_h^*} + \sum_{v=1}^N |V_v| I_h^v + S_h \quad (6)$$

com h e v ímpares.

Sendo $|V_h|$ e $|V_v|$ as magnitudes das componentes harmônicas da tensão da carga de ordem h e v , respectivamente; Z_h^* é o conjugado da impedância Z_h dada pela Eq. 5; I_h^v é uma corrente com módulo e ângulo constante, sendo o somatório presente na Eq. 6 igual à potência aparente da fonte de corrente I_{S_h} ; e S_h um termo de potência aparente constante para a ordem harmônica h .

Portanto, os parâmetros desta proposta de modelo que deverão ser estimados são R , X , S_h e I_h^v para cada h e v assumindo valores ímpares de 1 até N .

Considerando a estratégia baseada em medições, para identificar os parâmetros do modelo proposto neste trabalho foi utilizado o método dos mínimos quadrados. Sendo necessário um conjunto de medições que represente diferentes condições de operação, as quais se deseja modelar, e assim garantir a independência linear do sistema de equações [5].

Inicialmente foram identificados os parâmetros relacionados à componente fundamental. A representação

matricial da Eq. 6, como um sistema sobredeterminado, para a fundamental com M medidas pode ser vista na Eq. 7.

$$\begin{bmatrix} S_{L1}^1 \\ S_{L1}^2 \\ \vdots \\ S_{L1}^M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |V_1^1|^2 & |V_1^1| & |V_3^1| & \cdots & |V_N^1| & 1 \\ |V_1^2|^2 & |V_1^2| & |V_3^2| & \cdots & |V_N^2| & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ |V_1^M|^2 & |V_1^M| & |V_3^M| & \cdots & |V_N^M| & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1/Z^* \\ I_1^1 \\ I_1^3 \\ \vdots \\ I_1^N \\ S_1 \end{bmatrix} + E_1 \quad (7)$$

onde E_1 é um vetor de erros devido ao processo de medição e de modelagem; e Z é igual a Z_1 . A m -ésima medida da componente fundamental da potência aparente da carga S_{L1}^m foi determinada a partir da medida m da componente fundamental da tensão e da corrente da carga, como mostrado pela Eq. 6.

A Eq. 7 pode ser reescrita como mostrado na Eq. 8.

$$y_1 = \phi_1 \cdot \theta_1 + E_1 \quad (8)$$

onde y_1 é o vetor de potências aparentes; ϕ_1 é a matriz de observação; e θ_1 o vetor de parâmetros. Sendo o equacionamento para a componente fundamental.

A estimativa do vetor de parâmetros é dada pela Eq. 9. O símbolo $\hat{\cdot}$ indica que a variável é uma estimativa.

$$\hat{\theta}_1 = [\phi_1^T \cdot \phi_1]^{-1} \cdot \phi_1^T \cdot y_1 \quad (9)$$

No entanto, para continuar a determinação dos parâmetros do modelo deve-se considerar o valor de Z já encontrado. Com ele é possível determinar R e X , e assim determinar Z_h pela Eq. 5. Para a ordem harmônica h , superior à fundamental, pode-se escrever matricialmente a Eq. 6, para M medidas, como mostrado na Eq. 10.

$$\begin{bmatrix} S_{Lh}^1 - \frac{|V_h^1|^2}{Z_h^*} \\ S_{Lh}^2 - \frac{|V_h^2|^2}{Z_h^*} \\ \vdots \\ S_{Lh}^M - \frac{|V_h^M|^2}{Z_h^*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |V_1^1| & |V_3^1| & \cdots & |V_N^1| & 1 \\ |V_1^2| & |V_3^2| & \cdots & |V_N^2| & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ |V_1^M| & |V_3^M| & \cdots & |V_N^M| & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_h^1 \\ I_h^3 \\ \vdots \\ I_h^N \\ S_h \end{bmatrix} + E_h \quad (10)$$

A Eq. 10 pode ser reescrita como apresentado na Eq. 11.

$$y_h = \phi \cdot \theta_h + E_h \quad (11)$$

A estimativa do vetor de parâmetros é dada pela Eq. 12.

$$\hat{\theta}_h = [\phi^T \cdot \phi]^{-1} \cdot \phi^T \cdot y_h \quad (12)$$

IV. ESTUDO DE CASO E RESULTADOS

Para testar a proposta de modelagem deste trabalho, um sistema foi desenvolvido utilizando o simulador PSCAD. Nestes testes foram consideradas cargas distintas para verificar a resposta do modelo proposto. Desta forma, um estudo considerou apenas um motor de indução e outro estudo utilizou uma carga composta por um motor de indução e cargas eletrônicas. Para cada carga estudada foram coletadas 60 amostras da tensão e corrente da carga até a 25ª ordem harmônica, sendo que 40 amostras foram utilizadas no processo de identificação e 20 amostras na validação do modelo da carga.

A. Resultados para Carga do Tipo Motor de Indução

Com o intuito de avaliar a resposta do modelo proposto para uma carga do tipo motor de indução foram determinados os parâmetros do modelo pelo método dos mínimos quadrados, conforme as Eq. 9 e 12. A parte real e a parte imaginária da impedância Z foi estimada como $R = 0,170 \Omega$ e $X = 1,727 \Omega$. As magnitudes das correntes estimadas I_h^v podem ser visualizadas na Fig. 2 e os valores estimados da potência ativa P_h e reativa Q_h , da potência aparente S_h , podem ser vistos na Tabela I. Todos os valores apresentados foram obtidos para a tensão da carga com Taxa de Distorção Harmônica (THD) entre 2,9 e 3,2%.

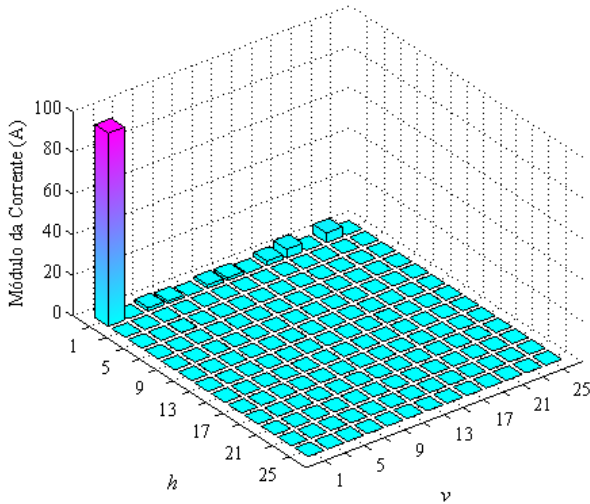


Fig. 2. Magnitude da corrente estimada para carga tipo motor de indução.

A partir da utilização dos parâmetros apresentados no modelo foi possível validar a representação de carga proposta comparando-se os dados de validação com as respostas fornecidas pelo modelo. Para cada amostra dos dados de validação foi determinada a diferença entre o THD dos valores medidos de corrente e o respectivo THD dos valores calculados através do modelo. Esta diferença foi utilizada como um indicador da proximidade entre os valores medidos e os dados fornecidos pelo modelo, sendo o histograma desta diferença mostrado na Fig. 3. Neste histograma é possível observar que a maioria dos valores está entre $\pm 1,0 \times 10^{-5}$.

TABELA I. VALORES DAS POTÊNCIAS CONSTANTES PARA CARGA TIPO MOTOR DE INDUÇÃO

h	P_h (W)	Q_h (Var)
1	1135,978	4172,270
3	0,000	0,000
5	-0,038	0,005
7	0,002	0,000
9	0,000	0,000
11	-0,007	0,002
13	-0,003	-0,003
15	0,000	0,000
17	-0,001	0,000
19	0,000	0,000
21	0,000	0,000
23	0,000	0,000
25	0,000	0,000

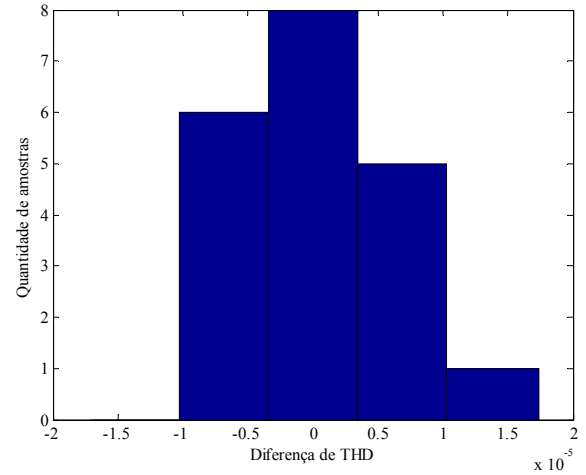


Fig. 3. Histograma da diferença de THD da corrente para carga tipo motor de indução.

Outra maneira de mostrar a proximidade dos valores obtidos é através da superposição das formas de onda da corrente da carga medida e calculada pelo modelo. A amostra que apresentou o maior desvio de THD de corrente foi escolhida para a comparação, que pode ser vista na Fig. 4, contendo aproximadamente um período da corrente. Além disso, a Fig. 5 mostra os valores das potências ativa e reativa estimadas e medidas utilizando as amostras dos dados de validação.

B. Resultados para Carga do Tipo Composta

O modelo proposto também foi testado com uma carga composta do tipo motor de indução em conjunto com cargas eletrônicas, foram determinados os parâmetros do modelo, sendo $R = 0,476 \Omega$ e $X = 1,715 \Omega$. As magnitudes das correntes

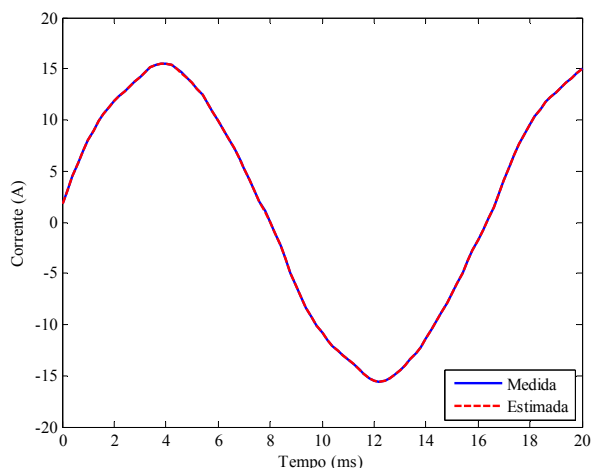


Fig. 4. Forma de onda da corrente medida e estimada para carga tipo motor de indução.

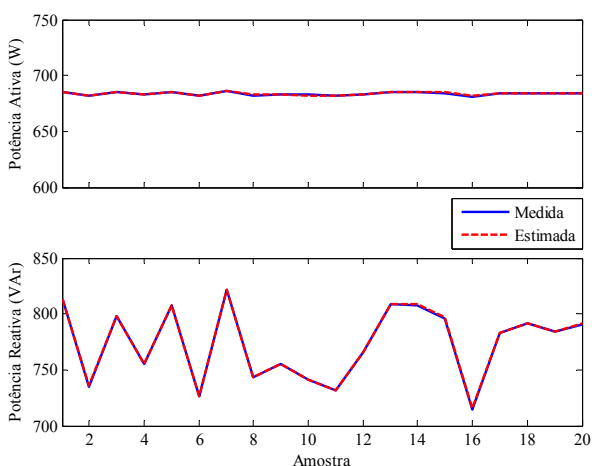


Fig. 5. Potência ativa e reativa medida e estimada para carga tipo motor de indução.

estimadas I_h^v podem ser visualizadas na Fig. 6 e os valores estimados da potência ativa P_h e reativa Q_h , da potência aparente S_h , podem ser vistos na Tabela II. Todos os valores apresentados foram obtidos para a tensão da carga com THD de aproximadamente 6,5%.

Aplicando os parâmetros apresentados no modelo foi possível avaliar a representação de carga comparando-se os dados de validação com as respostas fornecidas pelo modelo. Para cada amostra dos dados de validação foi determinada a diferença entre o THD dos valores medidos de corrente e o respectivo THD dos valores calculados através do modelo. Esta diferença foi utilizada como um indicador da proximidade entre os valores medidos e os dados fornecidos pelo modelo, sendo o histograma desta diferença mostrado na Fig. 7. Neste histograma é possível observar que a maioria dos valores está entre $\pm 9,0 \times 10^{-5}$.

A proximidade dos valores obtidos pelo modelo em relação aos valores medidos também está apresentada na Fig. 8 que mostra as formas de onda de aproximadamente um período da

corrente de carga medida e estimada. A amostra que apresentou o maior desvio de THD de corrente foi escolhida para esta comparação. Além disso, a Fig. 9 mostra a superposição das potências ativa e reativa referentes às amostras de validação.

É possível observar que os valores de potência de ordens superiores à fundamental, apresentados nas Tabelas I e II, são pequenos em relação aos valores de potência para h igual a 1. Porém, outros testes mostraram que este fato não se repete para alguns casos de cargas basicamente constituídas por cargas eletrônicas.

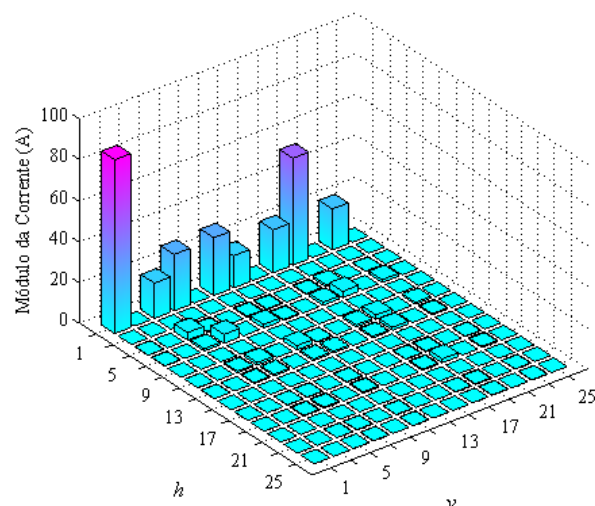


Fig. 6. Magnitude da corrente estimada para carga composta.

TABELA II. VALORES DAS POTÊNCIAS CONSTANTES PARA CARGA COMPOSTA

h	P_h (W)	Q_h (Var)
1	1086,487	3769,552
3	0,000	0,000
5	-2,202	7,025
7	4,114	1,226
9	0,000	0,000
11	1,969	0,992
13	-0,705	0,921
15	0,000	0,000
17	-0,063	0,285
19	0,143	0,203
21	0,000	0,000
23	-0,018	0,073
25	-0,019	0,035

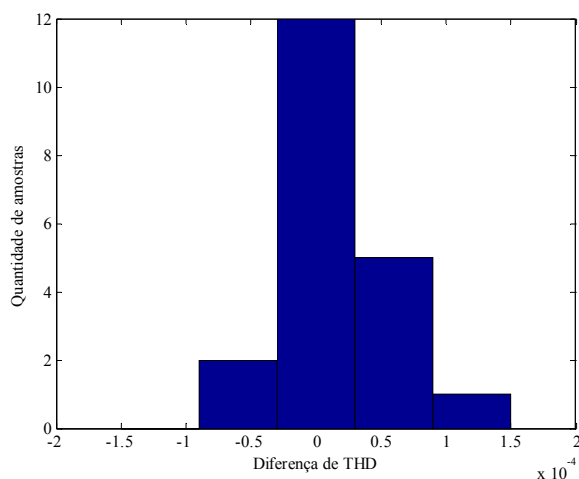


Fig. 7. Histograma da diferença de THD da corrente para carga composta.

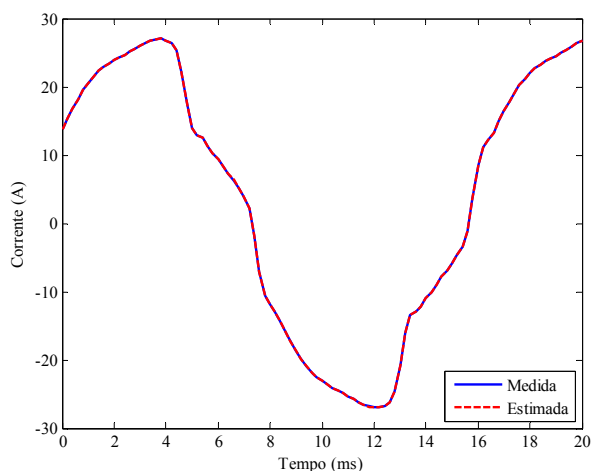


Fig. 8. Forma de onda da corrente medida e estimada para carga composta.

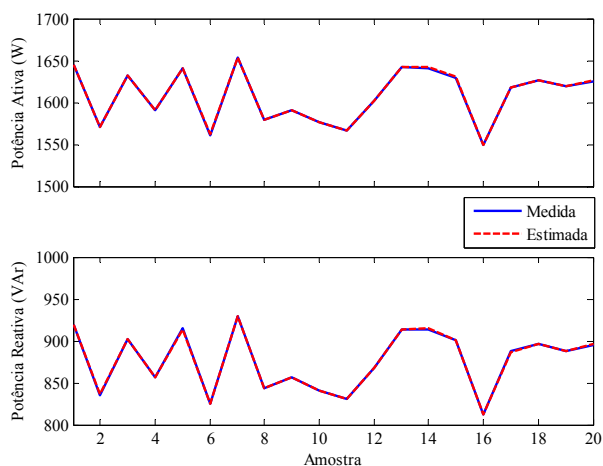


Fig. 9. Potência ativa e reativa medida e estimada para carga composta.

V. CONCLUSÃO

Modelos harmônicos são importantes para a representação de cargas em estudos acerca do sistema elétrico na presença de cargas não lineares. Estes estudos atualmente podem ser significativos uma vez que o uso de cargas não lineares vem sendo ampliado. A distorção harmônica na tensão e na corrente provoca o aumento de perdas e pode causar interferência eletromagnética.

A proposta de modelagem apresentada neste trabalho considerou o acoplamento entre grandezas elétricas de diferentes ordens harmônicas. A partir do equacionamento desenvolvido foi mostrado como os parâmetros podem ser determinados e um estudo de caso permitiu a aplicação do modelo em cargas distintas. Os resultados apresentados mostraram que o modelo é viável devido à proximidade entre os valores de saída do modelo e os valores medidos.

REFERÊNCIAS

- [1] "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.
- [2] Y. Zhao, J. Li, and D. Xia, "Harmonic source identification and current separation in distribution systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 26, pp. 1-7, 1// 2004.
- [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] G. Siming and T. J. Overbye, "Parameter estimation of a complex load model using phasor measurements," in *Power and Energy Conference at Illinois (PECI), 2012 IEEE*, 2012, pp. 1-6.
- [5] C. F. ALMEIDA and N. KAGAN, "A novel technique for modeling aggregate harmonic-producing loads," in *CIREN 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt*, 2011, pp. 6-9.
- [6] 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.
- [7] A. S. Foltin, J. M. A. Myrzik, T. Wiesner, and L. Jendernalik, "Practical implementation of the coupled norton approach for nonlinear harmonic models," in *Power Systems Computation Conference (PSCC), 2014*, 2014, pp. 1-7.
- [8] 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.
- [9] A. B. Nassif, J. Yong, and W. Xu, "Measurement-based approach for constructing harmonic models of electronic home appliances," *Generation, Transmission & Distribution, IET*, vol. 4, pp. 363-375, 2010.