

Dispositivo para Confinamento de Sequência Zero: Dimensionamento e Projeto

R. F. Buzo, L.C.O. de Oliveira e R. R. A. Fortes

Resumo--O emprego de dispositivos eletromagnéticos constitui-se atualmente de uma alternativa promissora para mitigação de correntes harmônicas de sequência zero. São dispositivos robustos que quando utilizados isoladamente ou em conjunto com outros arranjos, podem ser técnica e economicamente atraentes. O filtro eletromagnético é um dispositivo inserido paralelamente ao sistema com baixa impedância de sequência zero e elevadas impedâncias de sequência positiva e negativa. Logo, para um filtro ideal, tem-se o confinamento das correntes harmônicas “triplens” sem que o fluxo de potência do sistema seja comprometido. Apresenta-se neste trabalho diretrizes gerais para dimensionamento e projeto do filtro eletromagnético, tendo como premissas o nível de filtragem desejado. Para tanto os cálculos são baseados em uma metodologia no domínio da frequência baseada nas transmitâncias harmônicas sequenciais do circuito equivalente reduzido ao ponto de acoplamento do filtro. Como apoio utiliza-se o aplicativo computacional PSIM para validar o método proposto e verificar a aderência dos resultados obtidos.

Palavras chave-- Confinamento. Dimensionamento. Filtro eletromagnético. Harmônicas. Projeto. Sequência zero.

I. INTRODUÇÃO

As componentes harmônicas “triplens”, de terceira ordem e suas múltiplas, são encontradas em redes de distribuição, especificamente, ao lado da baixa tensão. São consequentes de cargas conectadas entre fase e neutro e compostas predominantemente por componentes de sequência zero.

Devido as suas propriedades características, em sistemas nos quais são utilizados transformadores conectados em triângulo-estrela, as componentes de sequência zero de cada fase se somam no neutro da rede e não fluem para o lado da média tensão. Logo, provocam diferença de potencial entre os condutores neutro e terra, bem como sobre aquecimento no primário do transformador.

O filtro eletromagnético é um dispositivo utilizado para confinar harmônicas de sequência zero, devido a sua baixa impedância para esta sequência. Não é visto como carga pelo sistema, devido a sua elevada impedância para as sequências positiva e negativa.

Este trabalho teve apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

R. F. Buzo é discente da FEIS – UNESP, Ilha Solteira, SP (e-mail: ricardobuzo00@hotmail.com).

L. C. O. Oliveira é docente da FEIS – UNESP, Ilha Solteira, SP (e-mail: origa@dee.feis.unesp.br).

R. R. A. Fortes é discente da FEIS – UNESP, Ilha Solteira, SP (e-mail: rarisonfortes@hotmail.com).

Alguns trabalhos, como [1] e [2], tratam de assuntos relacionados às características de funcionalidade e equacionamento das reatâncias sequenciais do filtro eletromagnético. Contudo, este artigo contribui com uma metodologia para o seu dimensionamento e projeto, bem como com o desenvolvimento de um equacionamento que represente suas resistências sequenciais, necessárias para a execução do projeto do filtro.

II. FILTRO ELETROMAGNÉTICO

Na Fig. 1 é apresentado o comportamento de um filtro eletromagnético ideal quando inserido a um sistema com a presença de cargas lineares e não lineares alimentadas por um transformador de distribuição conectado em triângulo-estrela.

Verifica-se o confinamento das harmônicas “triplens” pelo filtro e a ausência destas correntes no neutro do sistema e primário do transformador.

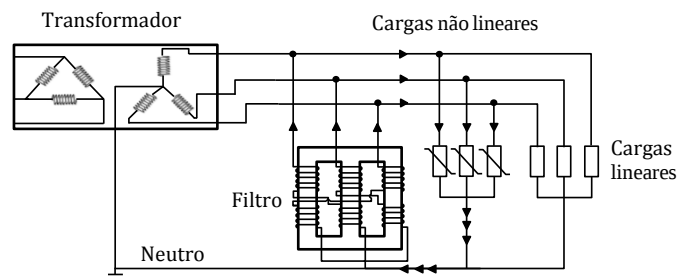


Fig. 1. Filtro eletromagnético inserido a um sistema com cargas lineares e não lineares alimentadas por um transformador de distribuição Triângulo-Estrela.

A. Conexão “Zigue-Zague”

Conforme ilustrado na Fig. 2, tem-se a conexão do filtro eletromagnético.

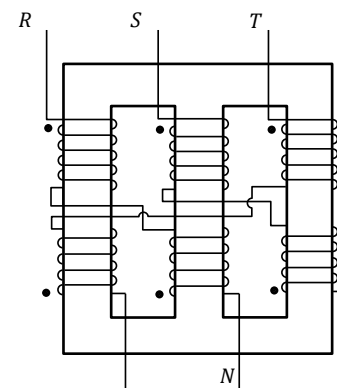


Fig. 2. Conexão aplicada ao filtro eletromagnético.

Os terminais superiores das bobinas principais, de cada fase R, S e T, são conectados à fonte de alimentação, enquanto que

os seus terminais inferiores são conectados aos terminais superiores das bobinas auxiliares das colunas S, T e R, respectivamente. Enfim, curto circuitando os terminais inferiores das três bobinas auxiliares, obtêm-se a conexão “zigue-zague” que pode ser realizada a partir de outra disposição, desde que a polaridade das bobinas seja readaptada.

B. Equacionamento do Filtro Eletromagnético para Análise no Domínio da Frequência

De acordo com [3], são apresentados os equacionamentos das indutâncias sequenciais do filtro eletromagnético. As equações (1) e (2) representam, respectivamente, as indutâncias de sequência zero e de sequência positiva e negativa do filtro.

$$L_{0f} = L_f (1 + \xi_f - 2k_f \sqrt{\xi_f}) \quad (1)$$

$$L_{12f} = L_f (1 + \xi_f + 2,5k_f \sqrt{\xi_f}) \quad (2)$$

Onde, L_{0f} é a indutância de sequência zero, L_{12f} é a indutância de sequência positiva e negativa, ξ_f é o fator de conformidade entre as indutâncias das bobinas principais e auxiliares e k_f é o fator de acoplamento magnético entre os enrolamentos.

Após a conclusão das etapas de dimensionamento e projeto do filtro eletromagnético, o seu desempenho é analisado. Para isto, é necessário que o seu comportamento resistivo seja representado, pois o objetivo é realizar uma análise próxima às condições reais de operação do equipamento. Portanto, as equações (3) e (4) representam, respectivamente, a tensão sobre cada bobina principal e auxiliar, devido à resistência dos enrolamentos.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{P_R}^h \\ \dot{V}_{P_S}^h \\ \dot{V}_{P_T}^h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{P_R}^h & 0 & 0 \\ 0 & R_{P_S}^h & 0 \\ 0 & 0 & R_{P_T}^h \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_R^h \\ \dot{I}_S^h \\ \dot{I}_T^h \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{A_R}^h \\ \dot{V}_{A_S}^h \\ \dot{V}_{A_T}^h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{A_R}^h & 0 & 0 \\ 0 & R_{A_S}^h & 0 \\ 0 & 0 & R_{A_T}^h \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_R^h \\ \dot{I}_S^h \\ \dot{I}_T^h \end{bmatrix} \quad (4)$$

Onde, $R_{P_i}^h$ e $R_{A_i}^h$ são, respectivamente, as resistências da bobina principal e auxiliar, da coluna i, para a h-ésima ordem harmônica; $\dot{I}_R^h$, $\dot{I}_S^h$ e $\dot{I}_T^h$ são, respectivamente, as correntes das fases R, S e T; $\dot{V}_{P_i}^h$ e $\dot{V}_{A_i}^h$ são, respectivamente, as tensões sobre a bobina principal e auxiliar, da coluna i, devido à resistência.

As equações (3) e (4) são apresentadas no domínio da frequência, devido à variação das resistências para diferentes ordens harmônicas, consequente dos efeitos de proximidade e pelicular, considerados neste trabalho.

Em função da conexão “zigue-zague”, as tensões de fase do filtro eletromagnético são representadas conforme (5).

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_R^h \\ \dot{V}_S^h \\ \dot{V}_T^h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{P_R}^h + R_{A_S}^h & 0 & 0 \\ 0 & R_{P_S}^h + R_{A_T}^h & 0 \\ 0 & 0 & R_{P_T}^h + R_{A_R}^h \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_R^h \\ \dot{I}_S^h \\ \dot{I}_T^h \end{bmatrix} \quad (5)$$

Onde, $\dot{V}_i^h$ é a tensão entre a fase i e o neutro.

Aplicando-se o método das componentes simétricas em (5), a matriz resistiva sequencial é obtida em (6).

$$R_{012f}^h = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} R_{00}^h & R_{01}^h & R_{02}^h \\ R_{10}^h & R_{11}^h & R_{12}^h \\ R_{20}^h & R_{21}^h & R_{22}^h \end{bmatrix} \quad (6)$$

Onde, R_{012f}^h representa a resistência de sequência zero, positiva e negativa do filtro, tendo-se os elementos da matriz em (7), (8) e (9).

$$R_{00}^h = R_{11}^h = R_{22}^h = R_{P_R}^h + R_{P_S}^h + R_{P_T}^h + R_{A_R}^h + R_{A_S}^h + R_{A_T}^h \quad (7)$$

$$R_{01}^h = R_{20}^h = R_{12}^h = (R_{P_R}^h + \alpha^2 R_{P_S}^h + \alpha R_{P_T}^h) + (\alpha R_{A_R}^h + R_{A_S}^h + \alpha^2 R_{A_T}^h) \quad (8)$$

$$R_{10}^h = R_{02}^h = R_{21}^h = (R_{P_P}^h + \alpha R_{P_S}^h + \alpha^2 R_{P_T}^h) + (\alpha^2 R_{A_R}^h + R_{A_S}^h + \alpha R_{A_T}^h) \quad (9)$$

Onde, α é o coeficiente de deslocamento ($\alpha = 1 \angle 120^\circ$).

Um fator de conformidade unitário ($\xi_f = 1$) significa obter as indutâncias próprias das bobinas auxiliares iguais às indutâncias próprias produzidas pelas bobinas principais. Esta condição pode ser obtida quando todas as bobinas do filtro forem idênticas. Portanto, a equação (6) pode ser reescrita de acordo com (10), pois, para o caso em que todas as bobinas sejam iguais, obtêm-se as mesmas resistências.

$$R_{012f}^h = \begin{bmatrix} 2R^h & 0 & 0 \\ 0 & 2R^h & 0 \\ 0 & 0 & 2R^h \end{bmatrix} \quad (10)$$

Onde, R^h é a resistência de cada bobina do filtro para a h-ésima ordem harmônica.

Objetivando-se analisar o comportamento do filtro eletromagnético de sequência zero para as diferentes ordens harmônicas, é fundamental que as resistências sejam representadas de tal forma a acondicionar os efeitos de proximidade e pelicular. Logo, a equação (11) ilustra a resistência em função dos efeitos propriamente ditos.

$$R^h = R_{CC} \cdot (1 + Y_S^h + Y_P^h) \quad (11)$$

Onde, Y_S^h e Y_P^h são, respectivamente, os fatores de correção para o efeito pelicular e efeito de proximidade, tendo-se seus cálculos apresentados por meio de [4]. O elemento R_{CC} representa a resistência CC do condutor utilizado para a composição dos enrolamentos.

Conforme a equação (1) sabe-se que a indutância de sequência zero do filtro eletromagnético é nula para a condição em que os fatores de acoplamento e de conformidade

sejam unitários. Isto ocorre devido ao cancelamento das linhas de fluxo magnético para esta sequência. Nestas condições, com a ausência de um campo magnético, a resistência de sequência zero não é submetida aos efeitos em análise. Portanto, a equação (10) é reescrita de acordo com (12), onde a resistência de sequência zero é o dobro do valor da resistência CC do condutor.

$$R_{012f}^h = \begin{bmatrix} 2R_{CC} & 0 & 0 \\ 0 & 2R_{CC} \cdot (1 + Y_S^h + Y_P^h) & 0 \\ 0 & 0 & 2R_{CC} \cdot (1 + Y_S^h + Y_P^h) \end{bmatrix} \quad (12)$$

III. DIMENSIONAMENTO E PROJETO

A. Teoria das Transmitâncias

A teoria das transmitâncias, discutida em [1], é utilizada para analisar circuitos onde o objetivo é encontrar a relação entre correntes de dois pontos distintos do circuito ou entre duas tensões em função da impedância de cada elemento do circuito.

Na Fig. 3, tem-se o circuito da Fig. 1 reescrito na forma sequencial. Uma vez que o objetivo está no dimensionamento do filtro em função das correntes de sequência zero absorvidas pela carga não linear, as cargas lineares são desprezadas. Cada elemento e_n^h , z_{nT}^h , z_{nCabo}^h e z_{nf}^h trata-se, respectivamente, para a sequência n e h -ésima ordem harmônica, da tensão de alimentação do sistema e das impedâncias do transformador, do cabo entre o transformador e o barramento da carga e a impedância do filtro eletromagnético. Tem-se uma fonte de corrente j_n^h , representando as cargas não lineares, i_n^h e i_{nf}^h representando, respectivamente, a corrente do sistema e a corrente confinada pelo filtro, e u_n^h representando a tensão no barramento da carga.

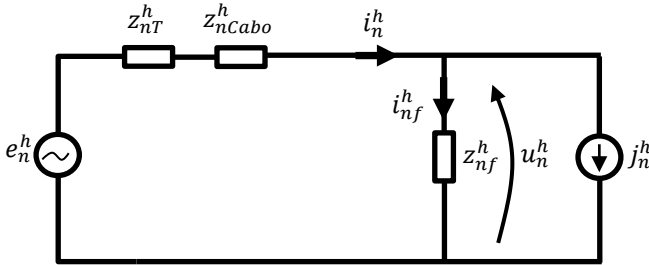


Fig. 3. Sistema elétrico de sequência n e h -ésima ordem harmônica.

No circuito sequencial da Fig. 3, é possível, através do método da superposição, calcular as contribuições que cada fonte exerce sobre as correntes e tensões de diversos pontos do circuito.

De acordo com (13), tem-se a contribuição que as correntes sequenciais da carga não linear têm sobre as correntes confinadas pelo filtro.

$$T_n^h = \frac{i_{nf}^h}{j_n^h} = - \frac{z_{nT}^h + z_{nCabo}^h}{z_{nf}^h + z_{nT}^h + z_{nCabo}^h} \quad (13)$$

Onde, T_n^h é transmitância que relaciona as correntes sequenciais da carga não linear e do filtro eletromagnético.

B. Dimensionamento do Filtro Eletromagnético

A indutância própria de cada bobina principal do filtro eletromagnético (L_f) deve possuir tal valor que, de acordo com o sistema em análise, resulte em uma indutância de sequência zero que proporcione o confinamento desejado para as correntes desta sequência e uma indutância de sequência positiva que proporcione valores admissíveis para queda de tensão e fator de deslocamento.

Inicialmente, devem ser conhecidos os dados do sistema no qual se deseja a instalação do filtro em análise. Assim, a indutância dimensionada deve estar em função das reatâncias do transformador e do condutor até o barramento da carga.

Referindo-se aos dados do filtro, sua resistência somente é conhecida após a determinação da bobina necessária para produzir a indutância encontrada no cálculo.

A partir da indutância de sequência zero apresentada em (1), é possível escrever a equação que represente a reatância de sequência zero do filtro eletromagnético, conforme (14).

$$X_{0f}^h = jh\omega \cdot L_f (1 + \xi_f - 2k_f \sqrt{\xi_f}) \quad (14)$$

A equação (13), que representa a relação entre a corrente mitigada pelo filtro e a corrente da carga não linear, é reescrita percentualmente para a componente de sequência zero, de acordo com (15), em função apenas da reatância dos elementos do sistema. A equação (15) é escrita desprezando-se o sinal negativo presente em (13), pois o objetivo é encontrar a indutância do filtro necessária para mitigar o percentual de corrente de sequência zero da carga não linear desejado.

$$T_0^h (\%) = \frac{X_{0T}^h + X_{0Cabo}^h}{X_{0f}^h + X_{0T}^h + X_{0Cabo}^h} \cdot 100 \quad (15)$$

Portanto, substituindo (14) em (15), obtêm-se a indutância do filtro eletromagnético em função do percentual de filtragem, conforme (16).

$$L_f = \frac{1}{2\pi f \cdot (1 + \xi_f - 2k_f \sqrt{\xi_f})} \left(\frac{X_{0S}^h \cdot 100}{T_0(\%)} - X_{0S}^h \right) \quad (16)$$

Onde, $X_{0S}^h = X_{0T}^h + X_{0Cabo}^h$.

Atribuindo-se valores reais para os parâmetros presentes em (16), é possível analisar o comportamento da indutância do filtro para diferentes percentuais de filtragem. Inicialmente, atribui-se um fator de acoplamento aproximadamente unitário $k_f=0,99998$, o fator de conformidade ξ_f variando entre 0,90 e 1,09 (região que proporciona valores de L_f possíveis de serem aplicados) e $T_0(\%)$ variando entre 75 e 99%, uma vez que a filtragem de 100% trata-se uma condição ideal, que não pode ser aplicada, uma vez que a indutância tenderia a zero.

É adotado um transformador de distribuição de 30(kVA), 13,8k/220(V) e com reatância de dispersão de 0,0571(Ω) referida ao secundário. Em função da corrente nominal do transformador tem-se um alimentador de 35(mm²) com aproximadamente 120 metros de comprimento desde o

transformador até o barramento da carga, logo, resulta em uma reatância de $0,0132(\Omega)$ e em uma resistência de $0,0756(\Omega)$.

Na Fig. 4, são apresentadas varias combinações entre o fator de conformidade e a indutância do filtro para os diversos percentuais de filtragem propriamente impostos, onde, para qualquer uma das curvas apresentadas, tem-se a melhor combinação entre os eixos quando o fator de conformidade é unitário, pois, desta forma, obtém-se maior valor de indutância, logo, maior impedância de sequência positiva.

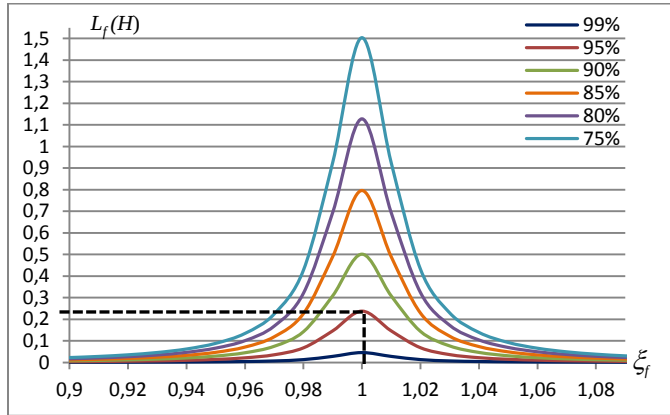


Fig. 4. Gráfico de $[L_f \times \xi_f]$ para diferentes valores de $T_0(\%)$.

Tomando-se como exemplo a filtragem de 95%, esta pode ser obtida através de várias combinações entre L_f e ξ_f . Como identificado no gráfico, para um fator de conformidade unitário, tem-se uma indutância de $0,2375(H)$.

C. Projeto do Filtro Eletromagnético

Como resultado do dimensionamento do filtro, são obtidos a sua indutância, fator de acoplamento e fator de conformidade, necessários para a filtragem desejada. Portanto, torna-se necessário o projeto de um filtro que forneça a indutância resultante do dimensionamento, uma vez que os fatores mencionados são impostos durante a fabricação do dispositivo.

A equação (17) proporciona o cálculo simplificado do número de espiras que cada bobina deve conter, a partir da imposição da indutância desejada [5].

$$N = \sqrt{\frac{g \cdot L_f}{\mu \cdot S}} \quad (17)$$

Onde, N é o número de espiras de cada bobina do filtro; g é o comprimento do circuito magnético [metros, m]; μ (Henry por metro, H/m) é o produto entre a permeabilidade magnética do material ferromagnético μ_r (adimensional) e a permeabilidade do vácuo μ_0 (Henry por metro, H/m); S é a área da seção transversal do núcleo (metros quadrados, m^2).

Adotando-se o núcleo ferromagnético com as dimensões apresentadas na Fig. 5, é possível obter o número de espiras necessário para produzir a indutância de $0,2375(H)$ encontrada durante o dimensionamento do filtro eletromagnético, por meio do subitem “III. B” para uma filtragem de 95%.

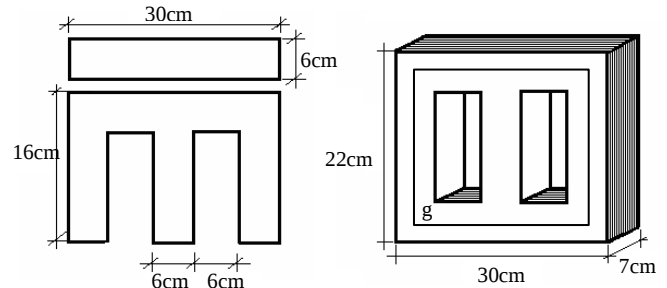


Fig. 5. Estrutura de núcleo envolvido para o projeto do filtro eletromagnético.

De acordo com a Fig. 5, obtém-se o comprimento e a área do núcleo ferromagnético, respectivamente, de $80cm$ e $42cm^2$. Para exemplo de cálculo, o material ferromagnético adotado é o aço-silício, com permeabilidade magnética relativa $\mu_r = 5500$. Destacando-se que a permeabilidade do vácuo é $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (H/m), tem-se em (18) o cálculo do número de espiras.

$$N = \sqrt{\frac{0,80 \cdot 0,2375}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5500 \cdot 0,0042}} = 81 \text{ espiras} \quad (18)$$

Após o cálculo do número de espiras, torna-se necessário encontrar a seção transversal do condutor utilizado para cada bobina do filtro. Algumas empresas fabricantes de transformadores utilizam, para a baixa tensão, condutores esmaltados de cobre com seções desde 6AWG até 25AWG para a composição de enrolamentos, respectivamente, com $13,30mm^2$ e $0,16mm^2$.

Mesmo que as correntes confinadas pelo filtro sejam apenas as componentes de sequência zero, com valores RMS baixos, é necessário que condutores de grandes seções sejam utilizados para a redução da resistência a um valor mínimo possível. Contudo, condutores com elevada seção refletem em núcleos de maior volume.

Buscando-se reduzir ao máximo o valor da resistência do filtro, o cabo utilizado será o 6AWG com diâmetro de $4,115(mm)$. De acordo com a área da seção transversal do núcleo adotado e diâmetro do condutor, conclui-se serem necessárias aproximadamente 3,3 camadas por bobina, onde cada camada possui aproximadamente 24 espiras. Portanto, tem-se o espaço necessário para que cada coluna seja composta por duas bobinas sobrepostas.

Para cada bobina serão necessários 20m de cabo 6AWG com resistência CC de $1,27$ (ohms por quilômetro, Ω/km). Logo, a resistência total de cada bobina será de $0,025(\Omega)$ e a resistência do filtro de $0,050(\Omega)$ para a sequência zero.

IV. ANÁLISE DO MODELO PROPOSTO

A. Desempenho do Filtro Eletromagnético

Para verificar o desempenho do filtro dimensionado e projetado, seus dados e dos elementos do sistema, destacados anteriormente nos subitens “III. B” e “III. C”, são atribuídos a um programa de simulação computacional desenvolvido no Excel®, onde o método das transmitâncias é utilizado como base de cálculo. As tensões de alimentação do circuito são

admitidas senoidais, equilibradas e com valor eficaz de 127 volts, 60 Hz.

As correntes absorvidas pela carga não linear são apresentadas na Fig.6, bem como os seus dados na Tabela I.

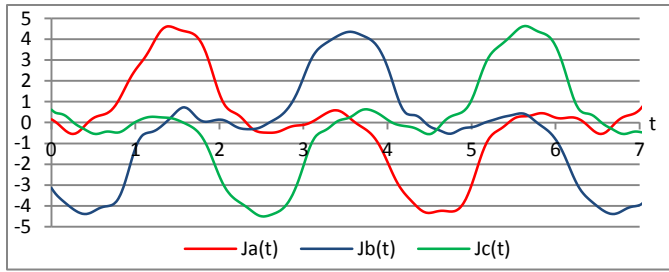


Fig. 6. Correntes da carga não linear.

TABELA I
Dados da carga não linear

Correntes totais da carga não linear						
h	ja	φa	jb	φb	jc	φc
1	1,8376	9,5408	1,8457	-111,6299	1,8630	129,2327
2	0,0414	157,3978	0,0593	145,8963	0,0265	150,7001
3	1,2625	-157,0372	1,2391	-159,3124	1,2839	-158,9128
4	0,0779	57,1176	0,0300	83,8761	0,0073	-2,5464
5	0,1908	23,6315	0,1512	150,2092	0,1773	-88,8521

Na Tabela I são apresentados os módulos e os ângulos de fase (em graus) das principais componentes harmônicas da corrente da carga não linear. Contudo, as simulações foram realizadas considerando-se até a 25ª ordem.

Na Fig. 7 e na Tabela II são ilustradas, respectivamente, as formas de onda e as componentes harmônicas da corrente pelo filtro eletromagnético.

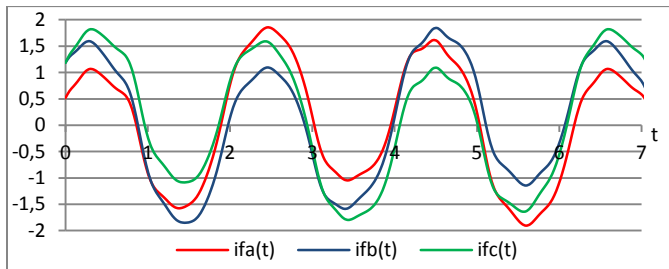


Fig. 7. Correntes no filtro eletromagnético.

TABELA II
Dados das correntes no filtro

Correntes totais do filtro						
h	ifa	φa	ifb	φb	ifc	φc
1	0,3201	-87,8372	0,3017	149,5950	0,3233	28,0903
2	0,0348	-17,2656	0,0348	-17,2719	0,0348	-17,2638
3	1,1096	31,3974	1,1096	31,3971	1,1096	31,3969
4	0,0328	-111,1196	0,0328	-111,1085	0,0328	-111,1108
5	0,0165	158,1476	0,0165	158,1146	0,0165	157,9745

Referindo-se as correntes de sequência zero da carga não linear, aproximadamente 90% são confinadas pelo filtro. O objetivo inicial, durante o dimensionamento, foi obter uma filtragem de 95%. Entretanto, tem-se uma redução de 5% devido à resistência apresentada pelos cabos utilizados na composição dos enrolamentos do filtro. Caso fosse possível desprezar a resistência, o percentual de filtragem desejado seria obtido com precisão.

Na Fig. 8 e na Tabela III têm-se as correntes resultantes no sistema. São verificadas correntes com características

senoidais, porém ainda submetidas a distorções causadas por correntes harmônicas de sequência positiva e negativa, uma vez que o filtro confina apenas correntes de sequência zero.

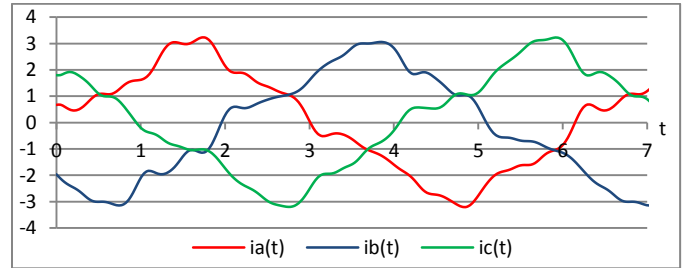


Fig. 8. Correntes resultantes no sistema.

TABELA III
Dados das correntes resultantes no sistema

Correntes totais do sistema						
h	ia	φa	ib	φb	ic	φc
1	1,8243	-0,4799	1,8242	-121,0364	1,8283	119,2429
2	0,0075	131,8055	0,0279	124,7404	0,0104	14,7996
3	0,2317	158,3278	0,2543	146,5064	0,2764	155,1497
4	0,0462	48,7965	0,0087	-174,5132	0,0313	-98,3171
5	0,1796	27,3905	0,1675	150,9835	0,1715	-93,9243

Conforme o ângulo de fase da corrente fundamental da Tabela III é possível identificar que o fator de deslocamento resulta aproximadamente unitário, pois a tensão de alimentação é imposta como referência, com ângulo de fase zero. De acordo com o ângulo de fase da corrente fundamental, identificado na Tabela I, a carga não linear absorve uma corrente com característica capacitiva. Como o filtro eletromagnético confina uma pequena parcela de sequência positiva, o sistema o enxerga como uma pequena indutância paralela que contribui com uma correção do fator de deslocamento.

Caso a carga não linear absorvesse uma corrente com característica indutiva, o filtro, neste caso, agravaria o atraso da corrente do sistema em relação à tensão. Logo, se o fator de deslocamento estivesse abaixo dos limites admissíveis, a indutância de 0,2375(H) para uma filtragem de 95%, escolhida por meio da Fig. 4, deveria ser substituída pela indutância de 0,5013(H) para uma filtragem de 90% (mantendo-se $\xi_f=1$). Desta forma, a corrente de sequência zero confinada pelo filtro reduziria em 5%, porém, a impedância de sequência positiva do filtro aumentaria significativamente.

Concluindo-se as análises, na Fig. 9 e na Tabela IV, respectivamente, têm-se a forma de onda e os dados das tensões resultantes no barramento da carga, obtendo-se aproximadamente 126,8611V (RMS) para as três fases.

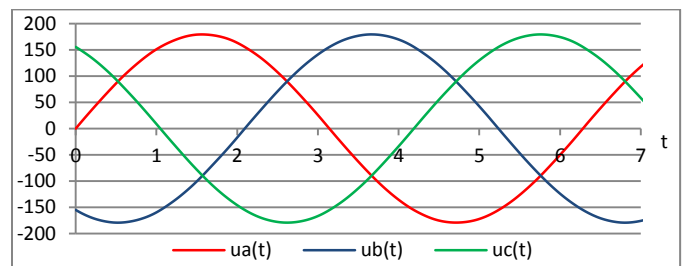


Fig. 9. Tensões resultantes no barramento da carga.

TABELA IV
Dados das tensões no barramento da carga

Tensões totais sobre o barramento da carga						
h	ua	ϕ_a	ub	ϕ_b	uc	ϕ_c
1	126,8611	-0,0574	126,8599	-120,0568	126,8602	119,9427
2	0,0012	13,5524	0,0045	6,4873	0,0017	-103,4535
3	0,0519	48,6173	0,0570	36,7958	0,0619	45,4391
4	0,0135	-56,2433	0,0025	80,4469	0,0091	156,6430
5	0,0646	-74,7410	0,0603	48,8521	0,0617	163,9442

B. Confiabilidade do Método das Transmitâncias

Apenas para uma análise de aderência do modelo proposto, têm-se na Fig. 10 e na Fig. 11, respectivamente, as formas de onda da corrente da fase A resultante no filtro e no sistema. Para avaliar e assegurar os resultados obtidos, o PSIM® foi utilizado como referência, ou seja, as mesmas simulações desenvolvidas no modelo proposto foram realizadas em um simulador bastante difundido e respeitado (PSIM®). Desta forma, quanto mais similares forem os resultados obtidos nas simulações em ambos os programas, maior será a confiabilidade da metodologia de dimensionamento apresentada.

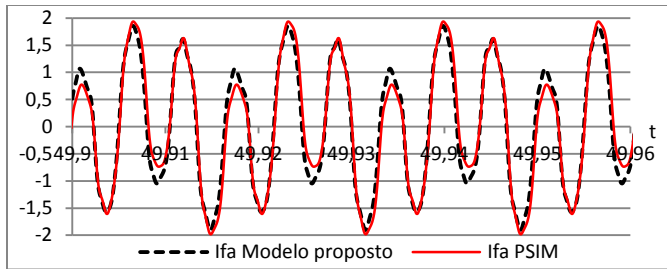


Fig. 10. Corrente da fase A (I_{fa}) confinada pelo filtro eletromagnético.

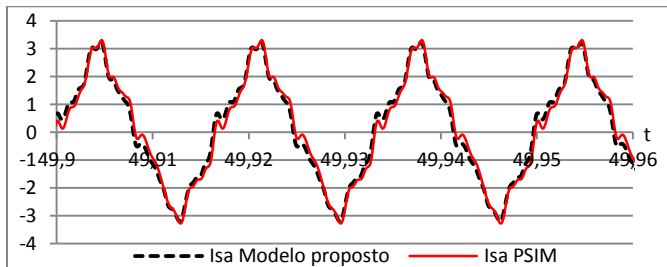


Fig. 11. Corrente da fase A (I_{sa}) resultante no sistema.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresenta matematicamente o comportamento resistivo sequencial do filtro eletromagnético de sequência zero, essencial para que a análise de desempenho do filtro seja obtida com características próximas às suas condições reais de operação.

Por meio das análises de desempenho do filtro eletromagnético, pode-se concluir que o dispositivo dimensionado e projetado atende às condições de filtragem desejadas. O sistema resultou com uma queda de tensão desprezível e com fator de deslocamento aproximadamente unitário.

Tomando-se o PSIM® como referência, os resultados apresentados na Fig. 10 e na Fig. 11 tornam a metodologia de dimensionamento factível, pois os resultados obtidos são significativamente satisfatórios. Portanto, comparando-se os

valores RMS das correntes ilustradas na Fig. 10, tem-se um erro de 0,9377% e analisando-se as correntes da Fig. 11, tem-se um erro de 0,1247%.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] RAVAGNANI, L. L. Sistemas Híbridos para Mitigação de Harmônicos: Modelagem e Estudos Experimentais. 2008. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2008.
- [2] FREITAS, S. C. L. Supressor Eletromagnético de Componentes Harmônicas de Sequência Zero. 2011. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2011.
- [3] BUZO, R. F. Dispositivos Eletromagnéticos para confinamento de Sequência Zero: Projeto e Dimensionamento. 2016. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2016.
- [4] TLEIS, N. D. Power Systems Modelling and Fault Analysis: Theory and Practice. Newnes, 2008. 625 f.
- [5] FITZGERALD, A. E. Máquinas Elétricas: Com Introdução à Eletrônica de Potência. Bookman, 2006.