

MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DE CABOS ISOLADOS: UM ESTUDO COMPARATIVO

Hélder de Paula, Marcelo L. R. Chaves*, André W. Cirino
Laboratório de Aplicações Industriais, Departamento de Engenharia Elétrica, UFMG
Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha / CEP 31.270-901 Belo Horizonte, MG
helder@cpdee.ufmg.br / www.cpdee.ufmg.br/~helder

*Universidade Federal de Uberlândia

Resumo - Simulações computacionais envolvendo problemas de Qualidade da Energia Elétrica, Transitórios Eletromagnéticos e Compatibilidade Eletromagnética, dentre outros, exigem a utilização de modelos de linhas e cabos elétricos apropriados a estudos em alta frequência, que incluam, dentre outras características, a correta representação do efeito pelicular (“*skin effect*”). Em sua maioria, tais modelos requerem, para a sua elaboração, dados de entrada referentes ao valor da resistência e indutância da linha ou cabo em diferentes frequências. Uma vez que a medição desses parâmetros muitas vezes mostra-se inviável, a utilização de formulações para a sua determinação torna-se bastante prática e atrativa. Neste contexto, três diferentes propostas destinadas à determinação de parâmetros de cabos são descritas, avaliadas e comparadas no presente trabalho, utilizando-se como referência a rotina “Cable Constants” do simulador ATP. Com base no estudo desenvolvido, pode-se concluir que tais métodos, apesar de sua formulação simplificada, conduzem a resultados bastante satisfatórios.

Palavras-chave - Efeito pelicular, estimativa de parâmetros de cabos, modelagem de cabos.

Abstract - Computational simulations involving problems of Power Quality, Electromagnetic Transients and Electromagnetic Compatibility, among others, require the application of cable and line models appropriate for high-frequency studies, featuring skin effect accurate representation. Most models that satisfy this condition require, for their elaboration, input data regarding the cable or line resistance and inductance values for different frequencies. Since the measurement of such parameters is oftentimes not feasible, the possibility of their determination from analytical methods arises as a very useful and attractive tool. In this context, three different approaches for cable parameter calculation are described, evaluated and compared in this work, using the ATP “Cable Constants” routine as the reference. Based on the conducted study, it can be

concluded that these methods lead to quite good results, despite their simplicity.

Keywords - Skin effect, Cable parameter estimation, cable modeling.

I. INTRODUÇÃO

No âmbito da Engenharia Elétrica, vários são os problemas cujos fenômenos apresentam frequências diferentes da frequência industrial. Tal, por exemplo, é o caso das questões associadas à área de Qualidade da Energia Elétrica, que contempla estudos de penetração harmônica, análise de ressonâncias em instalações elétricas, efeitos de harmônicos em máquinas e dispositivos elétricos diversos, dentre outros. Normalmente, a análise de tais problemas limita-se a frequências de alguns kHz [1], enquanto que aqueles associados à área de Transitórios e Compatibilidade Eletromagnética podem envolver fenômenos cuja frequência predominante situa-se na faixa de dezenas de Khz ou até mesmo de vários MHz [2, 3, 4].

A título de exemplificação, pode-se citar o fenômeno das sobretensões transitórias e correntes de modo comum em sistemas de acionamento de motores de indução por meio de inversores PWM. Além da frequência fundamental, correspondente à velocidade de operação da máquina, tem-se também a presença das componentes harmônicas provenientes do chaveamento do inversor, em frequências múltiplas à da onda portadora, as quais apresentam valores da ordem de dezenas e até algumas centenas de kHz. Existe, ainda, a frequência das oscilações transitórias da tensão nos terminais do motor, oriunda da propagação e reflexão dos pulsos, que pode atingir a faixa de MHz, dependendo do tamanho do cabo. Por fim, tem-se a frequência equivalente ao tempo de subida dos pulsos da forma de onda PWM, que, no caso dos inversores atuais, atinge o patamar de MHz [5]. Dessa forma, observa-se que a análise desse problema envolve um amplo espectro de frequências, iniciando-se em alguns Hz e chegando até a faixa de MHz.

Assim sendo, em qualquer um dos casos mencionados nos parágrafos anteriores, tem-se que os modelos a serem

utilizados para a representação dos cabos elétricos devem incluir, com boa aproximação, a variação da resistência e indutância com a frequência, possibilitando a obtenção de resultados confiáveis a partir de simulações computacionais. Como exemplo, pode-se citar as modelagens propostas em [6, 7, 8], as quais foram utilizadas com sucesso nos estudos em que foram empregadas. Um ponto em comum entre a maioria delas é a necessidade de se conhecer a resistência e a indutância do cabo em diferentes frequências, informação tal que é utilizada como dado de entrada para a elaboração dos modelos.

Uma vez que a medição de tais parâmetros requer a utilização de equipamentos de alto custo, tem-se que o mesmo muitas vezes encontra-se indisponível ao engenheiro / pesquisador. Além disso, em frequências mais elevadas, as ressonâncias naturais do cabo podem ser excitadas, tornando difícil o processo de medição e resultando em erros nos valores obtidos [9]. Assim sendo, a utilização de métodos analíticos para a determinação dos parâmetros dos cabos apresenta-se como um recurso muito prático e desejável.

Neste contexto, no presente trabalho são descritas e analisadas três diferentes propostas para o cálculo dos parâmetros de cabos isolados. Os resultados obtidos de tais formulações simplificadas são comparados com aqueles provenientes da rotina "Cable Constants" do simulador ATP, que utiliza formulações mais complexas e elaboradas. O objetivo é a verificação dos erros advindos de cada um dos métodos e da viabilidade de sua aplicação nas modelagens de cabos onde a inclusão do efeito pelicular é requerida.

II. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CABOS ELÉTRICOS

Neste item são estudadas três diferentes propostas para a estimativa de parâmetros de cabos, aplicáveis a cabos coaxiais compostos de condutor, isolamento, blindagem e capa externa. Conforme será visto adiante, a impedância série de um cabo é composta de várias parcelas. Dentre elas, pode-se destacar a parcela relativa ao efeito da terra na circulação das correntes, e é justamente neste ponto que as diferentes abordagens divergem entre si, sendo as demais parcelas comuns a todas elas, obtidas de formulações simples e já consagradas [10, 11].

O sistema em análise consiste de n cabos que apresentam uma seção transversal semelhante àquela mostrada na figura 1, onde r_1 é o raio do condutor, r_2 é raio externo da isolação; r_3 é o raio externo da blindagem e r_4 é raio externo da cobertura ou capa externa.

A. Caracterização da Matriz de Impedâncias

A matriz de impedâncias série do cabo é dada por

$$Z = \begin{bmatrix} Z_1 & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_2 & Z_{23} & Z_{24} & Z_{2n} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_3 & Z_{34} & Z_{3n} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{4n} \\ Z_{n1} & Z_{n2} & Z_{n3} & Z_{n4} & Z_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

Reportando-se à expressão (1), tem-se que os elementos

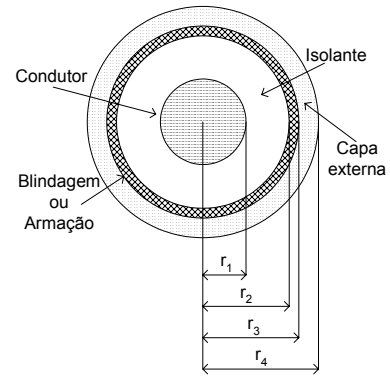


Fig. 1. Representação da seção transversal do tipo de cabo em estudo.

da diagonal principal (Z_i) associam-se à impedância série da malha formada pelo condutor correspondente e a terra. Já os elementos fora da diagonal principal (Z_{ij}) representam a parcela da impedância série associada ao acoplamento mútuo entre condutores, e determinam a tensão induzida longitudinalmente num condutor "i" quando uma corrente elétrica circula num condutor "j", ou vice-versa. Os termos resistivos que aparecem em tais elementos, os quais serão determinados posteriormente, são introduzidos pela presença da terra, que representa um caminho potencial de retorno de corrente.

B. Determinação dos Elementos da Matriz de Impedâncias

A determinação da impedância série de cada cabo envolve a soma de diversas parcelas (z_1 a z_7), a partir das quais se compõe os elementos da diagonal principal da matriz (Z_i), tal como

$$Z_i = z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 + z_6 + z_7 \quad (2)$$

Onde:

- z_1 é a impedância interna do condutor central (o condutor propriamente dito);
- z_2 é a impedância devido à variação do campo magnético na isolação;
- z_3, z_4 e z_5 são, respectivamente, as impedâncias interna, mútua e externa da blindagem ou armação;
- z_6 é a impedância devido à variação do campo magnético na cobertura;
- z_7 é a impedância própria do caminho de retorno pela terra.

Caso o cabo seja composto apenas pelo condutor e isolação, retira-se de (2) as parcelas correspondentes à blindagem e capa externa. Com relação às parcelas z_1 a z_6 , tem-se que as mesmas podem ser calculadas através de equacionamentos tradicionais tais como aqueles encontrados em [10, 11], os quais não foram mostrados aqui devido às limitações de espaço. Todavia, no tocante à z_7 , tem-se que a determinação da mesma é objeto de estudo de vários trabalhos encontrados na literatura, cujo foco concentra-se na correta modelagem da terra como um caminho potencial de circulação de correntes.

O cálculo de z_7 depende da forma de instalação do cabo, isto é, se o mesmo encontra-se enterrado, tocando o solo ou disposto em bandejas aterradas ou ainda instalado a uma certa altura em relação ao solo. Em cada um desses casos são

aplicados equacionamentos específicos, particulares a cada um. Fórmulas para o cálculo de z_7 , assim como para o das parcelas de impedância relacionadas com os acoplamentos mútuos (elementos Z_{ij} de (1)), foram desenvolvidas por Carson e Pollaczek [12]. Estas formulações foram empregadas, inicialmente, em circuitos de telefonia, mas podem ser usadas também para linhas de transmissão. Ambas conduzem a resultados semelhantes para linhas aéreas, porém aquelas propostas por Pollaczek são mais genéricas e podem ser aplicadas também a cabos enterrados.

Uma outra abordagem encontrada na literatura para o cálculo das impedâncias de retorno pela terra foi utilizada por Semlyen et al. [13], a qual, através de equações bastante simplificadas, produz resultados semelhantes aos obtidos com o método de Carson, apresentando discrepâncias nunca superiores a 9 %, para frequências entre 100 Hz e 10 kHz, sendo menores em qualquer outra faixa [12]. Para o caso particular de cabos enterrados, tem-se também a formulação apresentada por Klewe [12], a qual emprega equações bastante simples e fáceis de se implementar, sendo então bastante atrativas.

Desta forma, são apresentados, na seqüência, os equacionamentos propostos por todos os autores supracitados, com exceção de Carson, cuja maior complexidade desestimula a sua utilização.

C. Método de Pollaczek

As expressões de Pollaczek [10, 12] para a determinação de z_7 envolvem uma série infinita, bastante complexa. Todavia, até frequências bastante elevadas, uma simplificação da mesma, proposta por Wedepohl [10], pode ser utilizada, com erros aceitáveis.

Uma vez que a formulação das parcelas da impedância série associadas ao acoplamento mútuo (Z_{ij}) também é baseada na modelagem da terra como um caminho de retorno, as mesmas podem ser calculadas por expressões semelhantes às de z_7 , tal como mostrado na seqüência.

$$z_7 = \frac{j \cdot \omega \cdot \mu_t}{2 \cdot \pi} \cdot [-\ln(\gamma \cdot m_t \cdot r_4 / 2) + 1/2 - 4/3 \cdot m_t \cdot h] \quad (3)$$

$$Z_{ij} = \frac{j \cdot \omega \cdot \mu_t}{2 \cdot \pi} \cdot [-\ln(\gamma \cdot m_t \cdot d_{ij} / 2) + 1/2 - 2/3 \cdot m_t \cdot L] \quad (4)$$

Onde:

- j é o operador complexo;
- ω é a frequência angular da corrente;
- μ_t é a permeabilidade magnética da terra;
- γ é a constante de Euler;
- $m_t = \sqrt{\frac{j \cdot \omega \cdot \mu_t}{\rho_t}}$ (profundidade de penetração skin);
- ρ_t é a resistividade da terra;
- d_{ij} é a distância entre dois condutores genéricos do sistema, “ i ” e “ j ”;
- h é a profundidade do cabo em análise, enquanto L é a soma das profundidades dos condutores “ i ” e “ j ”.

Embora (3) e (4) estejam particularizadas para cabos enterrados, as mesmas podem ser utilizadas também para cabos na altura do solo, ou instalados em bandejas aterradas.

D. Método de Semlyen et al.

As expressões desenvolvidas por esses autores [12, 13] para o cálculo de z_7 e dos elementos Z_{ij} são, respectivamente,

$$z_7 = \frac{j \cdot \omega \cdot \mu_t}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left[\frac{2 \cdot (h_i + \bar{p})}{r_i} \right] \quad (5)$$

$$Z_{ij} = \frac{j \cdot \omega \cdot \mu_t}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left[\frac{\sqrt{(h_i + h_k + 2 \cdot \bar{p})^2 + x_{ij}^2}}{d_{ik}} \right] \quad (6)$$

Onde:

- h_i e h_k são as alturas do condutor “ i ” e “ j ” em relação à terra, respectivamente;
- $\bar{p} = 1/m_t$;
- r_i é o raio do condutor “ i ”;
- x_{ij} é o espaçamento horizontal entre os condutores “ i ” e “ j ” (diferença entre as coordenadas, no eixo horizontal, destes dois condutores, em relação a um mesmo diferencial);
- d_{ij} é a distância entre os condutores “ i ” e “ j ”.

E. Método de Klewe

Da mesma forma que a formulação representada por (3) e (4), o presente método também é direcionado à estimativa de parâmetros de cabos enterrados; todavia, o mesmo pode ser também aplicado a cabos tocando o solo ou dispostos em bandejas aterradas. As expressões para a obtenção de z_7 e Z_{ij} , segundo esta metodologia, são [14] :

$$z_7 = \frac{j \cdot \omega \cdot \mu_t}{2 \cdot \pi} \cdot \left[6.4905 - \ln(r_4 \cdot A) + B - j \cdot \left(\left(\frac{\pi}{4} \right) - B \right) \right] \quad (7)$$

$$Z_{ij} = \frac{j \cdot \omega \cdot \mu_t}{2 \cdot \pi} \cdot \left[6.4905 - \ln(x_{ij} \cdot A) + B' - j \cdot \left(\left(\frac{\pi}{4} \right) - B' \right) \right] \quad (8)$$

Onde:

- r_4 é o raio da cobertura ou capa externa, o qual deve ser substituído por r_2 caso o cabo seja composto apenas de condutor e isolamento (ver figura 1);
- $A = \sqrt{\frac{f}{\rho_t}}$;
- $B = 1.324 \cdot 10^{-3} \cdot A \cdot l$ e $B' = 1.324 \cdot 10^{-3} \cdot A \cdot 2 \cdot l$;
- l = profundidade do cabo.

III. RESULTADOS COMPARATIVOS PROVENIENTES DOS MÉTODOS ANALISADOS

As formulações descritas no item anterior foram implementadas computacionalmente, de forma que seus resultados puderam ser analisados e comparados. Embora os erros advindos das mesmas tenham sido calculados utilizando como referência os resultados de um método

igualmente analítico (ATP “*Cable Constants*”), é importante ressaltar que este último utiliza equacionamentos bem mais complexos e elaborados, constituindo uma ferramenta bastante tradicional e confiável nos estudos de Engenharia Elétrica.

Para este estudo comparativo, delimitou-se o sistema em análise às seguintes características:

- i) seção transversal do condutor entre 4 mm² e 240 mm²,
- ii) arranjos geométricos planar e triangular,
- iii) cabos dispostos sobre o piso ou em bandejas aterradas.

Acredita-se que a maioria das instalações industriais apresente cabeamento com características tais que possa ser inserido no conjunto delineado acima.

Assim sendo, a rotina “*Cable Constants*” do ATP foi utilizada para determinar as resistências e indutâncias, próprias e mútuas, para diversas frequências entre 60 Hz e 3 MHz, de condutores de 4, 25, 95 e 240 mm². Além disso, com relação a cabos dispostos em arranjo planar, considerou-se as distâncias de 0, 5, 10 e 30 cm entre os condutores; no que tange os cabos com geometria triangular, distâncias entre 0 e 10 cm foram avaliadas. Em seguida, todos esses casos foram reproduzidos utilizando-se os três métodos de estimativa citados anteriormente, cujos erros, em relação ao ATP, foram então determinados. Como produto desse estudo, uma grande quantidade de resultados foi obtida, cujo conteúdo, após devidamente organizado, foi utilizado para gerar diversos gráficos. Dentre eles, alguns foram selecionados e encontram-se mostrados a seguir, ilustrados pelas figuras 2 até 5.

Com base nos resultados obtidos, valem os seguintes comentários (sub-itens A até D):

A. Indutância própria

Conforme pode ser observado na figura 2, o método de Klewe produziu os menores erros dentre os métodos analisados, mas tendo o método de Semlyen situado-se bem próximo ao mesmo. O equacionamento de Pollaczek resultou em erros bem maiores que aqueles relativos aos outros dois, mas que ainda podem ser considerados satisfatórios. Somente em situações muito particulares (frequências inferiores a 600 Hz e cabos de 25 e 95 mm²) é que esse último foi mais eficiente que os demais. Nota-se, ainda, que todos os métodos apresentaram erros mais elevados no caso de cabos de bitolas menores e frequências inferiores a 200-300 Hz.

B. Resistência própria

No caso deste parâmetro, os três métodos analisados apresentaram resultados muito próximos entre si, apesar de o método de Pollaczek, para frequências mais elevadas, começar a divergir e produzir erros maiores (figura 3). De qualquer forma, a estimativa da resistência série dos cabos apresentou-se muito eficiente, tendo-se erros máximos de aproximadamente 3,2 % para todos os métodos. A única exceção fica para o cabo de 4 mm², onde um erro de 17,5 % foi obtido na frequência de 50 kHz. Observou-se que, quanto maior o diâmetro do condutor, menor é a frequência onde o máximo erro ocorre.

C. Indutâncias mútuas

No que tange as indutâncias mútuas, percebe-se que, para qualquer um dos métodos avaliados, os erros aumentam tan -

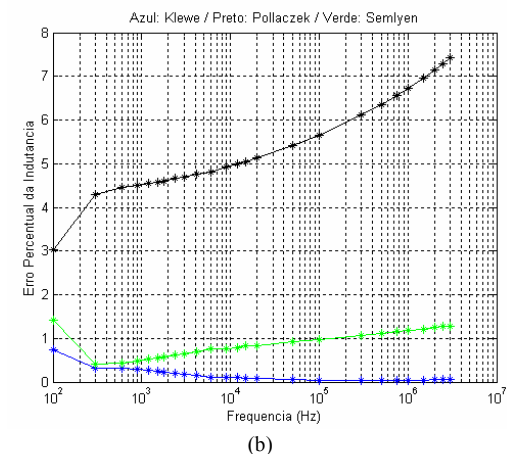
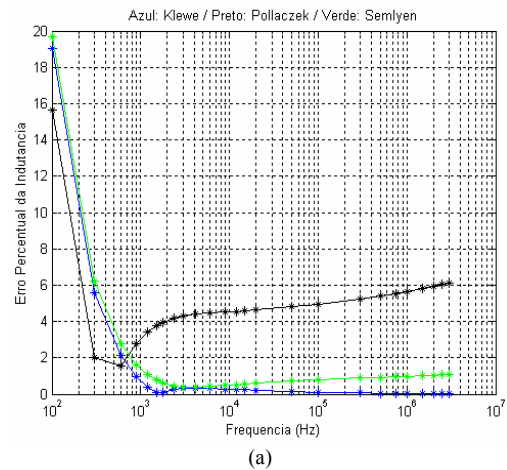


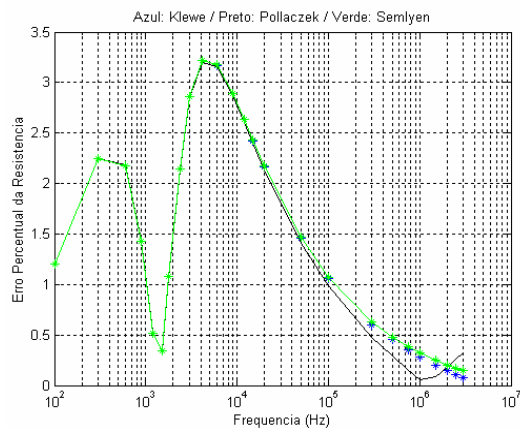
Fig. 2. Erros em função da frequência obtidos na estimativa da indutância própria pelos métodos de Klewe (azul), Pollaczek (preto) e Semlyen (verde). Cabos de (a) 25 mm² e (b) 240 mm².

to com a seção transversal dos condutores como com o espaçamento entre os mesmos. Com exceção de alguns poucos casos, o método de Semlyen mostrou-se muito mais exato que os demais, exibindo erros bem pequenos (aproximadamente 2,5 %), mesmo nas frequências extremas. Na sequência, tem-se o método de Pollaczek, com erros bem maiores, e, por último, o método de Klewe, com os maiores erros, tal como ilustrado pela figura 4.

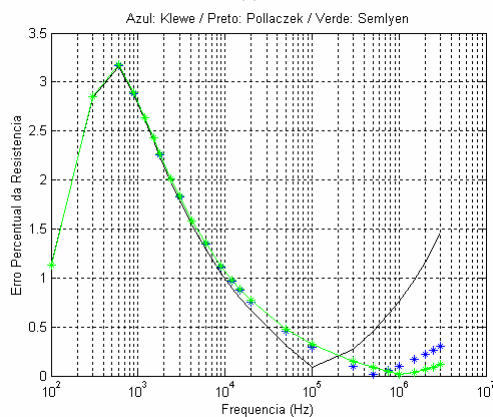
D. Resistências mútuas

No caso deste parâmetro, os erros obtidos foram muito pequenos, independentemente da bitola e do espaçamento entre condutores, assim como do método utilizado. Observou-se que os erros aumentam tanto com o aumento da seção do condutor como com a frequência, mas independem do espaçamento entre os cabos (por essa razão, somente o resultado para distância igual a zero foi mostrado). Além disso, conforme mostrado pela figura 5, os métodos de Klewe e Pollaczek produziram resultados muito próximos entre si, mas com erros bem superiores àqueles provenientes das equações de Semlyen.

De modo a se estabelecer uma classificação dos três métodos avaliados, considerando-se os limites dos casos estudados, pode-se dizer que, de modo geral, a metodologia de Semlyen mostrou-se a mais eficiente dentre todas as avaliadas, sendo, portanto, aquela mais indicada e preferível



(a)



(b)

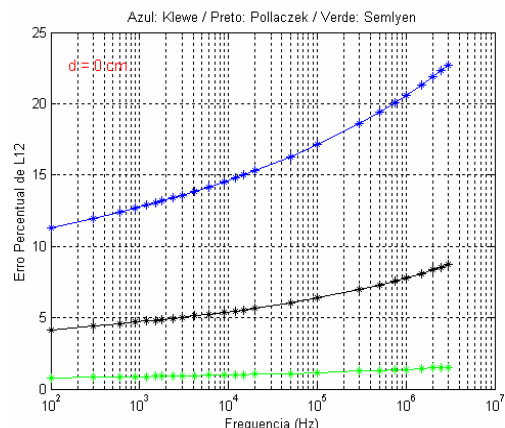
Fig. 3. Erros em função da frequência obtidos na estimativa da resistência própria pelos métodos de Klewe (azul), Pollaczek (preto) e Semlyen (verde). Cabos de (a) 25 mm² e (b) 240 mm².

a ser utilizada. Apesar de tal método apresentar erros ligeiramente maiores que o de Klewe com relação à indutância série, o mesmo é muito mais exato no caso da estimativa das indutâncias mútuas e consideravelmente superior no que se refere às resistências mútuas. Com relação à resistência série, tem-se que ambos são muito próximos.

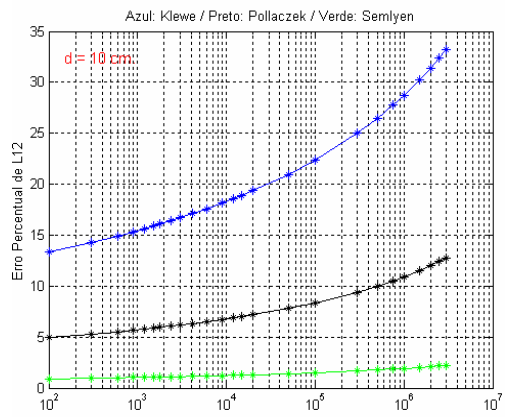
Cabem ainda as seguintes observações:

i) Apesar da resistência em corrente contínua ser inversamente proporcional à área da seção transversal do condutor, notou-se que, para frequências da ordem de algumas centenas de kHz, as resistências dos diversos cabos analisados convergiram para valores muito próximos entre si.

ii) Como a formulação de Semlyen et al. foi desenvolvida para cabos aéreos, é conveniente analisar, mesmo que de maneira superficial, se tal metodologia produz resultados razoáveis quando empregada em cabos subterrâneos, de modo a expandir a sua aplicação. Observou-se que os parâmetros resistivos e indutivos de um cabo, quando enterrado a profundidades pequenas, como 30 ou 50 cm, por exemplo, não divergem muito daqueles relativos ao posicionamento aéreo próximo ao nível do solo. Como exemplo, pode-se citar um arranjo planar de cabos de 95 mm², espaçados de 10 cm: a máxima diferença encontrada nos termos resistivos foi inferior a 7 % para frequências de



(a)



(b)

Fig. 4. Erros em função da frequência obtidos na estimativa da indutância mútua entre os condutores 1 e 2, pelos métodos de Klewe (azul), Pollaczek (preto) e Semlyen (verde). Cabos de 240 mm². Arranjo planar, onde “d” é a distância entre os condutores.

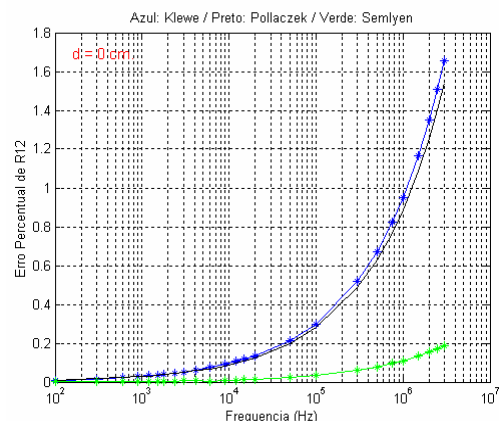


Fig. 5. Erros em função da frequência obtidos na estimativa da resistência mútua entre os condutores 1 e 2, pelos métodos de Klewe (azul), Pollaczek (preto) e Semlyen (verde). Cabos de 240 mm². Arranjo planar, onde “d” é a distância entre os condutores.

até 1 MHz, enquanto que, no caso dos parâmetros indutivos, as discrepâncias observadas foram sempre inferiores a 1,5 %.

iii) Uma vez que o método de Semlyen *et al.* mostrou-se o mais eficiente nas análises realizadas, o mesmo foi então utilizado na modelagem de cabos industriais para a

determinação das correntes de modo comum presentes em sistemas de acionamento de motores através de inversores, onde resultados muito satisfatórios foram obtidos, conforme apresentado em [3]. Além disso, com esta mesma modelagem supracitada, foram determinadas com bastante êxito também as sobretensões transitórias nos terminais do motor, onde resultados praticamente idênticos àqueles mostrados em [6] foram obtidos.

IV. CONCLUSÃO

Neste trabalho, os resultados provenientes de três diferentes formulações para a estimativa de parâmetros de cabos foram comparados. Os métodos analisados apresentam equacionamento bastante simples e conduzem a resultados muito satisfatórios, conforme pôde ser observado. Uma vez que a medição dos seus parâmetros mostra-se muitas vezes inviável, tais equações constituem uma ferramenta muito útil na modelagem de cabos isolados para estudos em alta frequência. Considerando as características do sistema de cabos que foi analisado, o método que produziu menores erros foi aquele proposto por Semlyen *et al.*, o qual recomenda-se então ser empregado na elaboração dos modelos.

AGRADECIMENTO

À Fapemig, pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] Arrilaga, J. e Watson, N. R., *Power System Harmonics*, Editora John Wiley and Sons, Second Edition, 2003.
- [2] Imece, A. F. et al., “Modeling Guidelines for Fast Front Transients – Report Prepared by the Fast Front Transient Task Force of the IEEE Modeling and Analysis of System Transients Working Group”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, p. 493 – 506, vol. 11, n. 1, 1996.
- [3] Paula, H., Chaves, M. L. R., Andrade, D. A., Domingos, J. L. e Freitas, M. A. A., “Circulação de Correntes de Terra em Instalações Industriais devido a Inversores PWM: Uma Proposta para a sua Determinação”, *VII Conferência Internacional de Aplicações Industriais*, Recife, PE, 2006.
- [4] Paul, C. R., *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, Editora John Wiley and Sons, Second Edition, 2006.
- [5] Saunders, L. A., Skibinski, G. L., Evon, S. T. e Kempkes, D. L., “Riding the Reflected Wave – IGBT Drive Technology Demands New Motor and Cable Considerations”, *IEEE 43rd IAS Annual Meeting*, pp. 75-84, September 1996.
- [6] Paula, H., Chaves, M. L. R., Andrade, D. A., Domingos, J. L. e Freitas, M. A. A., “An Efficient Cable Modeling Technique for Transient Overvoltage Studies in PWM Motor Drives”, *VII Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência*, Recife, PE, 2005.
- [7] A. F. Moreira, T. A. Lipo, G. Venkataramanan e Bernet, “S., High frequency Modeling for Cable and Induction Motor Overvoltage Studies in Long Cable Drives”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 38, n. 5, pp. 1297 – 1306, 2002.
- [8] Oliveira, J. C., Paulsen, R. J., Amaral, M. A., Andrade, D. A. e Araújo, S. C. N., “Electrical Transmission System with Variable Frequency Through Long Length Cable”, *Offshore Technology Conference*, Houston, May 1996.
- [9] Vendrusculo, E. A., “Estudo e Implementação de Estratégia para a Minimização de Sobretensões Produzidas por Inversores PWM em Sistemas de Acionamento de Motores Elétricos com Cabos Longos”, *Tese de doutorado*, Universidade Estadual de Campinas, 2001.
- [10] Wedepohl, L.M. e Wilcox, D.J., “Transient Analysis of Underground Power Transmission Systems”, *IEE Procedures*, vol. 120, n.2, p. 253-260, February 1973.
- [11] Ametani, A., “A General Formulation of Impedance and Admittance of Cables”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, p. 902-910, vol. 99, n. 3, May/June 1980.
- [12] ATP Theory Book.
- [13] Semlyen, et al., “The complex Ground Return Plane: a Simplified Model for Homogeneous and Multi-Layer Earth Return”, *IEEE Trans. on Power App. and Systems*, v. 100, 1981
- [14] Indulkar, C. S., Kumar, P. e Kothari, D. P., “Sensitivity Analysis of Modal Quantities for Underground Cables”, *IEE Procedures*, p. 229-234, vol. 128, n. 4, July 1981.

BIOGRAFIAS

Hélder de Paula, nascido em Dezembro de 1975, graduou-se em Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Potência, em 1998, na Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Obteve os títulos de mestrado e doutorado pela mesma instituição, em 2001 e 2005, respectivamente. Atualmente é professor adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e membro do LAI – Laboratório de Aplicações Industriais, deste mesmo departamento. Suas áreas de maior interesse são: acionamentos de máquinas elétricas, transitórios e compatibilidade eletromagnética e qualidade da energia.

Marcelo Lynce Ribeiro Chaves nasceu em Outubro de 1951. Graduou-se em Engenharia Elétrica pela UFU em 1975. Recebeu o diploma de mestre em 1985, pela UFU, e o de doutor em 1995, pela UNICAMP. Atualmente é professor titular na Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU. Suas linhas de pesquisa são principalmente: acionamentos elétricos, transitórios eletromagnéticos, modelagem de transformadores.

André Weber Cirino, nascido em Outubro de 1985, ingressou na Universidade Federal de Minas Gerais em 2005, onde cursa atualmente o 6º período do curso de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Energia. No momento, desenvolve um projeto de iniciação científica relativo à modelagem de cabos isolados através da Análise de Elementos Finitos (FEA).