

Simulação de transitórios em linhas rurais de distribuição utilizando modelo com minimização de oscilações numéricas

Peterson O. Batista*. Breno L. Mello*.
André A. Ferreira*. Afonso J. Prado*

*Faculdade de Engenharia de São João da Boa Vista – FESJ/UNESP,
São João da Boa Vista, Brasil (Tel: 19-36382400; e-mail: afonso.prado@unesp.br).

Abstract: Two versions of numerical routines are applied in order to minimize numerical oscillations in simulations of transient electromagnetic phenomena in systems modeled as transmission lines. These systems are considered as cascading connections of a large number of infinitesimal units of electrical circuits. One of the alternatives is to introduce damping resistors in parallel with the longitudinal branches of the π circuits. Another alternative is to apply damping resistors in series with the transverse branch of the infinitesimal units of the model used. The accuracy of numerical simulations of transient electromagnetic phenomena using the aforementioned alternatives is based on three parameters: the proportionality factor used to determine the damping resistance, the number of infinitesimal units and the simulation time step. The developed model is applied in simulations considering a rural distribution power line. Numerical simulations of lightning and faults are carried out in an example of a rural power line.

Resumo: Duas versões de rotinas numéricas são aplicadas buscando minimizar oscilações numéricas em simulações de fenômenos transitórios eletromagnéticos em sistemas modelados como linhas de transmissão. Esses sistemas são considerados como conexões em cascata de uma grande quantidade de unidades infinitesimais de circuitos elétricos. Uma das alternativas é introduzir resistores de amortecimento em paralelo com os ramos longitudinais dos circuitos π . A outra alternativa é aplicar resistores de amortecimento em série com o ramo transversal das unidades infinitesimais do modelo utilizado. A precisão das simulações numéricas de fenômenos transitórios eletromagnéticos que utilizam as alternativas mencionadas está baseada em três parâmetros: o fator de proporcionalidade utilizado para determinar a resistência de amortecimento, a quantidade de unidades infinitesimais e o passo de tempo da simulação. O modelo desenvolvido é aplicado em simulações considerando uma linha de energia de distribuição rural. São realizadas simulações numéricas de descargas atmosféricas e de falta em um exemplo de linha de rede rural.

Keywords: Eigenvalues and eigenfunctions, linear systems, numerical analysis, power system transients, state space methods, time-domain simulation, transmission line.

Palavras-chaves: Autovalores e autofunções, sistemas lineares, análise numérica, otimização, transitórios eletromagnéticos, métodos de espaço de estado, simulação no domínio do tempo, linha de transmissão.

1. INTRODUÇÃO

Resistores de amortecimento têm sido incluídos em modelos utilizados para simular fenômenos eletromagnéticos transitórios em sistemas elétricos de transmissão. Essa é uma técnica simples que leva a erros numéricos desprezíveis relacionados a métodos de integração numérica aplicados em simulações de fenômenos eletromagnéticos em sistemas de transmissão. De forma geral, métodos numéricos como o método de Euler e a integração têm sido associados a diferentes ferramentas matemáticas para análises de fenômenos transitórios em sistemas elétricos (Nelms et al, 1989; Dommel, 1986, Hoidalen et al, 2019). Nesses casos, tensões e correntes ao longo de linhas de transmissão são consideradas como variáveis de estado dos sistemas de equações que modelam os sistemas de potência analisados

(Dommel et al, 1983; Dommel, 1997; Cervantes et al, 2020; Lafaia et al, 2018). Um dos modelos mais simples de linha de transmissão considera tal sistema representado como cascatas de circuitos π . A inserção de resistores de amortecimento em circuitos π pode ser feita de duas maneiras: o resistor de amortecimento é inserido em paralelo com o ramo longitudinal do circuito π , ou o resistor de amortecimento é inserido em série com o ramo transversal do circuito π . Dessa forma, sistemas de relações diferenciais entre as tensões e as correntes das unidades de circuitos π em cascata e o método de integração trapezoidal são aplicados em simulações de fenômenos transitórios em linhas de transmissão. A integração trapezoidal é o método numérico básico de programas EMTP (Electromagnetic Transient Program) que constituem a referência para simulações de fenômenos transitórios em sistemas de potência (Dommel, 1986;

Hoidalén et al, 2019). Os modelos de linhas de transmissão em programas EMTP consideram que tais sistemas apresentam características resistivas reduzidas. Dessa forma, sistemas que apresentam características resistivas acentuadas não são modelados utilizando os modelos mais complexos de linhas de transmissão dos programas EMTP.

Neste trabalho, o modelo de linha de transmissão baseado em cascatas de circuitos π contendo resistores de amortecimento é aplicado em simulações de descargas atmosféricas e faltas em exemplos de linhas rurais localizadas no estado de Mato Grosso na região central do Brasil. As linhas consideradas apresentam características resistivas mais acentuadas que os sistemas modelados como linhas de transmissão nos programas EMTP. Os resultados obtidos podem ser utilizados para melhorar a proteção e a coordenação dessas linhas rurais, evitando danos às instalações elétricas dos clientes.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

Resistores de amortecimento podem ser aplicados em paralelo a elementos que representam os parâmetros longitudinais da linha de transmissão. Quando linhas de transmissão são representadas por cascatas de circuitos π , cada resistor de amortecimento (R_D) está relacionado à indutância longitudinal dos circuitos π (L) e ao passo de tempo da simulação numérica (Macías et al, 2005; Chrysochos et al, 2015; Prado et, 2017). Os resistores shunt (R_S) são introduzidos nos circuitos π em série com os ramos transversais desses circuitos. A estrutura de circuitos π modificados incluindo resistores R_D é mostrada na Fig. 1 e a inclusão de resistores shunt é mostrada na Fig. 2. O valor da resistência R_S depende da capacitância dos circuitos π e do passo de tempo aplicado na simulação de fenômenos transitórios. As relações que definem R_D e R_S são mostradas em (1) onde k_D e k_S são fatores proporcionais de R_D e R_S , respectivamente.

$$\begin{aligned} R_D &= k_D \frac{2L}{\Delta t} \quad \text{and} \quad G_D = \frac{\Delta t}{2k_D L} \\ R_S &= \frac{\Delta t}{2k_S C} \quad \text{and} \quad G_S = \frac{2k_S C}{\Delta t} \end{aligned} \quad (1)$$

Cascatas de circuitos π podem ser modeladas por sistemas de primeira ordem (2). As variáveis de estados são as correntes longitudinais e as tensões transversais de circuitos π .

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ x &= [i_1 \quad v_1 \quad \dots \quad i_j \quad v_j \quad \dots \quad i_n \quad v_n]^T \end{aligned} \quad (2)$$

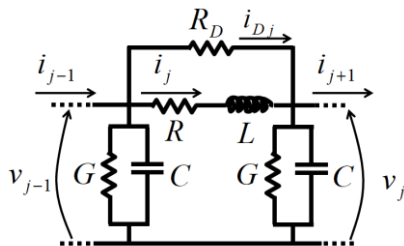


Fig. 1. Circuito π com resistor R_D de amortecimento.

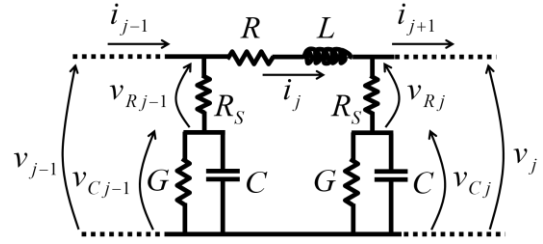


Fig. 2. Circuito π com resistor shunt.

A matriz A é mostrada em (3) considerando os dois tipos de resistores de amortecimento nas Figs. 1 e 2. Para o caso dos resistores em paralelo com o ramo longitudinal do circuito π , os elementos da matriz A são mostrados em (4) e o vetor B está em (5).

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \dot{x} = Ax + Bu \\ x &= [i_1 \quad v_1 \quad \dots \quad i_j \quad v_j \quad \dots \quad i_n \quad v_n]^T \\ A &= \begin{bmatrix} a_1 & -a_2 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ a_3 & a_4 & -a_3 & a_5 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & 0 & a_2 & a_1 & -a_2 & 0 & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & 0 & a_3 & a_3 & a_4 & -a_3 & a_5 & 0 & \dots \\ \vdots & \dots & \dots & 0 & a_2 & a_1 & -a_2 & 0 & \dots \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & a_2 & a_1 & -a_2 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & 2a_5 & 2a_3 & a_4 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

$$a_1 = -\frac{R}{L} \quad a_2 = \frac{1}{L} \quad a_3 = \frac{1}{C} \quad (4)$$

$$a_4 = -\frac{(2G_D + G)}{C} \quad a_5 = \frac{G_D}{C}$$

$$B = \left[\frac{1}{L} \quad G_D/C \quad 0 \quad \dots \quad 0 \right]^T \quad (5)$$

A introdução de resistores shunt em todos os circuitos π da cascata leva à estrutura mostrada na Fig. 2. Em função da introdução de R_S , os elementos alterados da matriz A são mostrados em (6). O vetor B é mostrado em (7).

$$a_3 = \frac{1}{C} \left[1 + R_S \left(G - \frac{RC}{L} \right) \right] \quad a_4 = -\frac{1}{C} \left[G + \frac{2R_S C}{L} \right] \quad (6)$$

$$\begin{aligned} a_5 &= \frac{R_S}{L} \\ B &= \left[\frac{1}{L} \quad 0 \quad \dots \quad 0 \right]^T \end{aligned} \quad (7)$$

A integração trapezoidal é baseada na aproximação da área sob uma curva pela soma das áreas de um grande número de trapézios infinitesimais. No caso de simulações de fenômenos transitórios, são utilizadas as relações em (8).

$$\left[I - \frac{\Delta t}{2} A \right] x_{k+1} = \left[I - \frac{\Delta t}{2} A \right] x_k + \frac{\Delta t}{2} B [u_{k+1} + u_k] \quad (8)$$

Representando para-raios com resistores dependentes de tensão e considerando-os conectados ao terminal receptor, a última linha da matriz A é alterada como mostrado em (9).

Nesse caso, o elemento a_6 é determinado por (10), o elemento a_7 é determinado por (11) e a_8 é determinado por (12).

$$A = \begin{bmatrix} \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \ddots & \ddots & 0 & a_2 & a_1 & -a_2 \\ \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \ddots & \ddots & 0 & a_6 & a_7 & a_8 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$a_6 = \frac{2R_s}{LC[1+2G_{AR}R_s]} \quad (10)$$

$$a_7 = \frac{2\left[1+R_s\left(G-\frac{RC}{L}\right)\right]}{C[1+2G_{AR}R_s]} \quad (11)$$

$$a_8 = -\frac{2\left[G_{AR}(1+GR_s)+\frac{R_sC}{L}+\frac{G}{2}\right]}{C[1+2R_sG_{AR}]} \quad (12)$$

Em (11), (12) e (13), G_{AR} é a condutância dos para-raios que, conectados nos terminais da linha, são esquematizados na Fig. 3. Na Fig. 4, tais equipamentos são conectados a um nó intermediário da linha. Nesse caso, as alterações na matriz A são mostradas em (13) e os novos elementos de A são mostrados em (14), (15) e (16). Se a fonte de transitórios é conectada a um nó intermediário da linha e os para-raios conectados aos terminais da linha, a matriz A e o vetor x são modelados em (17) e (18), respectivamente. Os novos elementos de (18) são mostrados em (19), (20) e (21).

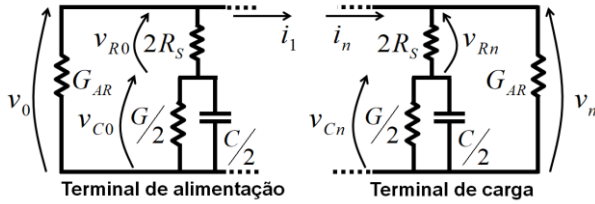


Fig. 3. Representações de para-raios nos terminais da linha.

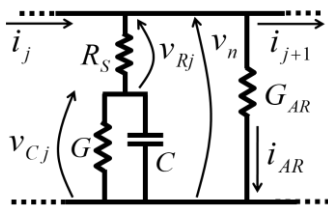


Fig. 4. Representação de para-raios em um nó intermediário da linha de transmissão

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ i_j \\ v_j \\ i_{j+1} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \ddots & a_2 & a_1 & -a_2 & \ddots & \vdots \\ \ddots & a_{12} & a_{13} & a_{14} & -a_{13} & a_{12} & \ddots & \vdots \\ \ddots & \ddots & \ddots & a_2 & a_1 & -a_2 & \ddots & \vdots \\ \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ i_j \\ v_j \\ i_{j+1} \\ \vdots \end{bmatrix} + Bu \quad (13)$$

$$a_{12} = \frac{R_sC}{LC[1-G_{AR}R_s]} \quad (14)$$

$$a_{13} = -\frac{\left[1+R_s\left(G-\frac{RC}{L}\right)\right]}{C[1-G_{AR}R_s]} \quad (15)$$

$$a_{14} = -\frac{\left[G_{AR}(1+GR_s)+\frac{2R_sC}{L}+G\right]}{C[1-G_{AR}R_s]} \quad (16)$$

Se descargas atmosféricas são representadas por fontes de corrente, as conexões dessas fontes são mostradas na Fig. 5. As alterações em B devido às conexões das fontes de corrente ao terminal emissor e aos nós intermediários da linha estão descritas em (22) e (23), respectivamente. O vetor x e a matriz A são mostrados em (17) e (18). O elemento b_1 é descrito em (24).

$$x = [v_0 \quad i_1 \quad v_1 \quad \cdots \quad \cdots \quad i_n \quad v_n]^T \quad (17)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_9 & a_{10} & a_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ a_2 & a_1 & -a_2 & 0 & \ddots & \vdots \\ a_5 & a_3 & a_4 & -a_3 & a_5 & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & 0 & a_2 & a_1 & -a_2 \\ 0 & \cdots & 0 & a_6 & a_7 & a_8 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$a_9 = \frac{2\left[G_{AR}(1+GR_s)-\frac{R_sC}{L}-\frac{G}{2}\right]}{C[1-2G_{AR}R_s]} \quad (19)$$

$$a_{10} = -\frac{2\left[1+R_s\left(G-\frac{RC}{L}\right)\right]}{C[1-2G_{AR}R_s]} \quad (20)$$

$$a_{11} = -\frac{2R_s}{LC[1-2G_{AR}R_s]} \quad (21)$$

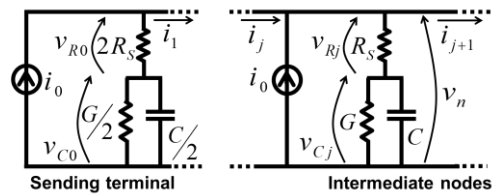


Fig. 5. Fontes de corrente conectadas ao terminal inicial e a um nó intermediário da linha de transmissão.

$$B = [2b_1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0]^T \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ i_j \\ v_j \\ \vdots \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \vdots \\ i_j \\ v_j \\ \vdots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \vdots \\ 0 \\ b_1 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$b_1 = \frac{[1+GR_s]}{C}i_0 + R_s\dot{i}_0 \quad (24)$$

3. LINHA DE DISTRIBUIÇÃO RURAL

Os consumidores rurais de energia da região central do Brasil têm sido abastecidos por energia elétrica usando apenas uma fase de um sistema de distribuição trifásico. Na Fig. 6 é mostrado um esquema elétrico desse sistema de distribuição. A estrutura do ramal monofásico é mostrada na Fig. 7. O ramal rural monofásico é conectado a um transformador especial capaz de gerar um sistema trifásico no lado de baixa tensão. A linha foi considerada com cabo ACSR 4/0 AWG. O valor inicial da resistência é 0,2671 Ω/km (20 °C). O núcleo de aço do cabo ACSR tem diâmetro de 4,77 mm e o cabo

ACSR completo tem diâmetro de 14,31 mm. A altura do condutor é de 15 m na torre e a flecha a meio do vão é de 1,5 m. A resistividade da terra é considerada 1000 $\Omega\cdot\text{m}$ porque essa região possui solo seco. A tensão da distribuição é de 13,8 kV. O nível de tensão do consumidor é 220/127 V.

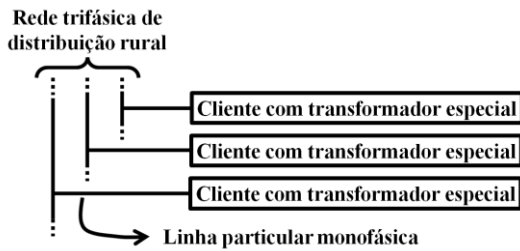


Fig. 6. Sistema de distribuição rural.

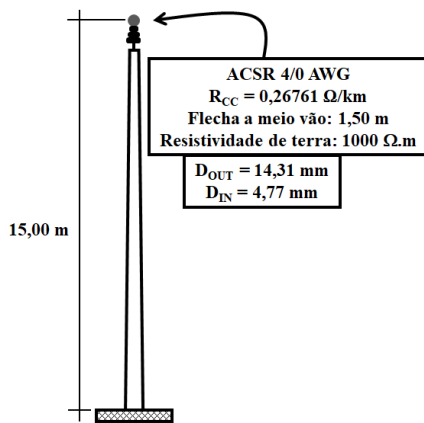


Fig. 7. Linha de distribuição rural monofásica.

A linha de rede rural descrita nas Figs. 6 e 7 é aplicada utilizando uma única fase dos sistemas elétricos trifásicos da concessionária de energia. Uma das regiões onde esse tipo de linha é aplicado é o estado do Mato Grosso. A linha descrita na Fig. 7 é um exemplo fictício desse tipo de linha rural. Tais linhas são utilizadas devido ao menor custo e facilidade na conexão de novos consumidores ao sistema da concessionária de energia. Muitos desses consumidores usavam pequenos geradores elétricos movidos a diesel antes de se conectarem à concessionária de energia. No entanto, fenômenos transitórios podem afetar com maior frequência esses consumidores alimentados por uma linha monofásica. Essa pode ser uma das principais desvantagens desse tipo de conexão entre os consumidores e a concessionária de energia.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Comparações entre os resultados das rotinas numéricas propostas, rotina numérica da transformada de Laplace e ATPDraw são mostradas nas Figuras 8, 9 e 10. Nesses casos, o terminal receptor está em aberto. Com base nas configurações dos parâmetros de simulação, são considerados os valores mencionados anteriormente para simulações transitórias: o número de circuitos π é 5900, o intervalo de tempo é 0,3 μs , o fator k_S é 3 (Prado et al, 2017). Foi considerada uma extensão de 25 km. Para reduzir o tempo computacional, técnicas de matrizes esparsas são aplicadas nas rotinas de simulação (Lessa et, 2020). Os para-raios

foram modelados considerando que, abaixo de 15 kV, esse equipamento era representado por uma resistência de 2 M Ω e, acima de 15 kV, a resistência era de 2 Ω . As rotinas propostas neste artigo e a transformada numérica de Laplace foram implementadas no software MatLab™ (Prado et al, 2017, Lessa et al, 2020). Os resultados obtidos são comparados com os obtidos a partir do software ATPDraw. Os terminais de linha são considerados abertos.

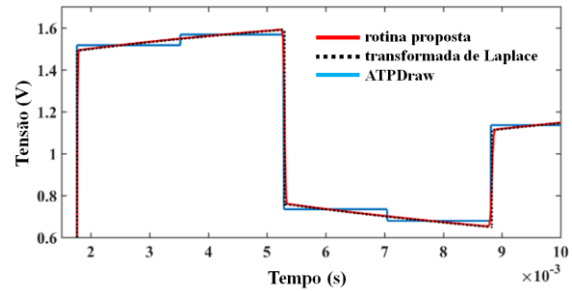


Fig. 8. Tensão no terminal de carga da linha monofásica com a fonte de alimentação de tensão em degrau de 1 pu.

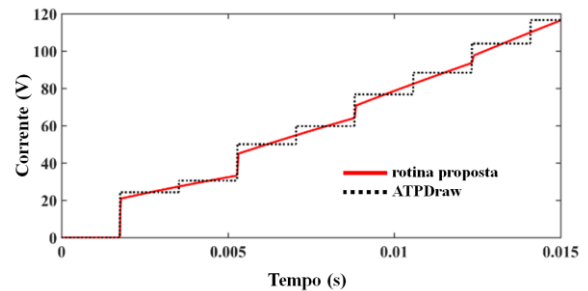


Fig. 9. Corrente no terminal de carga da linha monofásica com a fonte de alimentação de corrente em degrau de 1 pu.

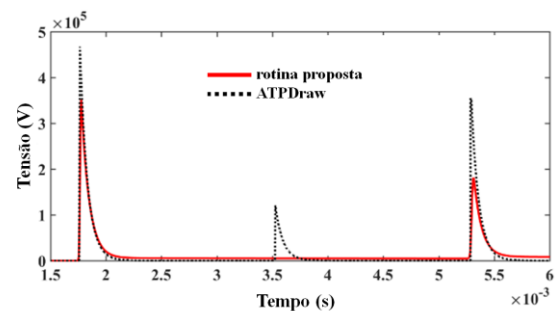


Fig. 10. Tensão no terminal de carga com a fonte de alimentação de corrente de descarga (20 kA; 1,2/50 μs).

Na Fig. 8, a linha é alimentada pela fonte de degrau de tensão com 1 pu. Os resultados obtidos usando as rotinas numéricas propostas e a rotina numérica da transformada de Laplace são semelhantes. Os resultados obtidos do ATPDraw apresentam uma descontinuidade no meio do perfil de tensão após cada reflexão da onda de tensão no terminal receptor em aberto. No modelo aplicado do ATPDraw, a resistência da linha é concentrada no início, meio e fim da linha. A influência da concentração da resistência da linha também pode ser observada nos resultados obtidos quando a linha é alimentada por fonte de corrente em degrau com amplitude de 1 pu (Fig.

9). Com base nas Figs. 8 e 9, a resistência concentrada nas extremidades e na posição intermediária da linha pelo modelo do ATPDraw apresenta pontos de reflexão de fenômenos eletromagnéticos inexistentes nos sistemas reais. Esse modelo não considera a influência da frequência nos parâmetros de linha. No ATPDraw, os modelos que incluem a influência da frequência não trabalham com valores de resistência por unidade de comprimento característicos de linhas de distribuição. Os blocos de resistência concentrada são evitados com a aplicação das rotinas numéricas propostas. Na Fig. 10, uma fonte de corrente de descarga atmosférica é aplicada para obter mais comparações. Essa descarga é modelada por uma função dupla exponencial (20 kA; 1,2/50 μ s) e ocorre no ponto médio da linha. O modelo do ATPDraw apresenta reflexões das ondas de tensão e corrente nas resistências concentradas já mencionadas.

Outras simulações são realizadas com as rotinas propostas e aplicação de para-raios conforme a modelagem apresentada no item 2. A descarga atmosférica (20 kA; 1,2/50 μ s) também é localizada no ponto médio da linha. Os resultados obtidos são apresentados nas Figs. 11 e 12. A Fig. 11 mostra a tensão no terminal de conexão da linha com a entrada do consumidor. Devido à aplicação de para-raios nos terminais da linha, os efeitos da descarga atmosférica são atenuados. A Fig. 12 mostra a comparação da tensão no terminal de carga para os casos com e sem a aplicação de para-raios.

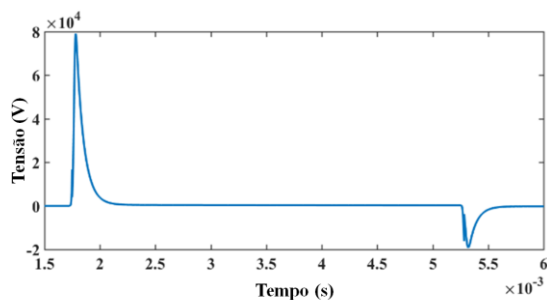


Fig. 11. Tensão no terminal de carga após descarga atmosférica (20 kA; 1,2/50 μ s) e aplicação de para-raios.

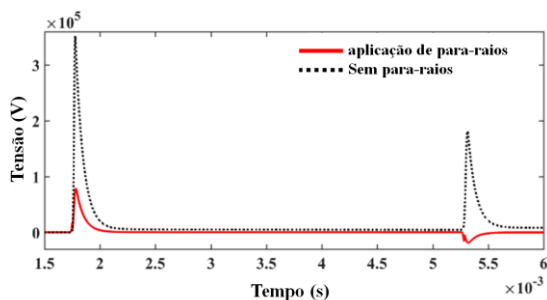


Fig. 12. Comparação da tensão no terminal de carga com e sem aplicação de para-raios após descarga atmosférica.

As simulações de descargas atmosféricas realizadas com as rotinas propostas e aplicação de para-raios também levam a resultados que não são afetados pelos blocos de resistências concentradas existentes no modelo do ATPDraw.

A modelagem matemática relacionada à inclusão de uma

resistência em paralelo ao ramo transversal de circuitos π também foi aplicada considerando um curto-circuito na linha da Fig. 7. O curto-circuito foi modelado por uma resistência de valor constante e baixo em um dos circuitos π da cascata utilizada para modelar a linha considerada. Para as simulações de curto-circuito, o passo de tempo foi de 0,5 μ s, o fator k_D (ou k_S) foi de 3 e quantidade de circuitos π foi de 1200 (Prado et al, 2017, Lessa et, 2020). A Fig. 13 mostra a tensão no terminal de alimentação da linha e no terminal final, que estava em aberto para uma falta localizada a 3 km do terminal de alimentação da linha. A falta ocorreu quando a tensão no ponto de ocorrência atingiu o valor máximo negativo. A resistência de falta foi de 1 m Ω . Utilizando as mesmas características, uma falta no ponto médio da linha foi simulada e os resultados são mostrados na Fig 14.

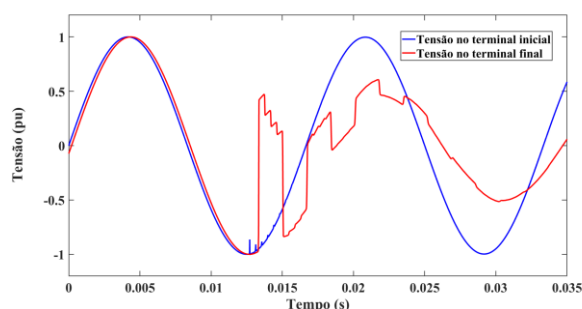


Fig. 13. Tensões nos terminais inicial e de carga durante um curto-circuito a 3 km do terminal inicial.

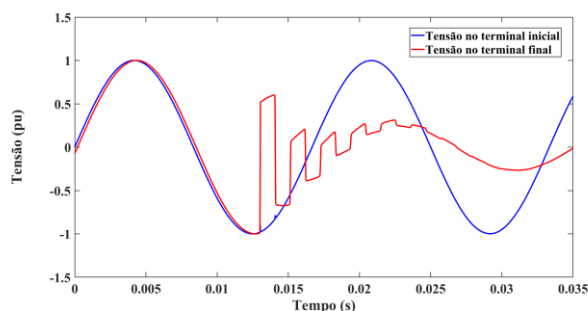


Fig. 14. Tensões nos terminais inicial e de carga durante um curto-circuito no ponto médio da linha.

Na Fig. 13, as simulações de curto-circuito mostram que as ondas de tensão originadas pela falta atingem os terminais da linha em tempos diferentes, pois essa falta está localizada mais próxima do terminal inicial e de alimentação da linha (a 3 km) do que do terminal de carga (a 12 km). Quando o curto-circuito ocorre no ponto médio da linha, as ondas de tensão atingem os dois terminais da linha no mesmo instante de tempo. As rotinas propostas neste artigo consideram parâmetros distribuídos e não consideram a influência da frequência nos parâmetros de linha. Por não incluir a influência da frequência nos parâmetros de linha, os resultados mostrados nas Figs. 13 e 14 não são adequados para serem utilizados em rotinas de localização de falta baseadas em conceitos de ondas viajantes. A modelagem de curto-circuito como uma resistência de valor muito baixo em paralelo com o ramo transversal de um circuito π também não se mostrou precisa em relação ao fenômeno real. A falta cria

uma desconexão entre o terminal de alimentação e o terminal de carga. Portanto, a tensão deveria amortecer rapidamente no terminal final, perdendo também o formato senoidal.

Assim, na sequência do trabalho, é necessário obter uma modelagem de uma unidade de circuito π no ponto de ocorrência de curto-circuito em que a resistência de conexão com o referencial de terra seja incluída isoladamente. Essa modelagem deve representar adequadamente também a desconexão entre as duas divisões da linha criada pela falta. Com esse aprimoramento da modelagem, os resultados tanto para simulações de aplicação de para-raios e de ocorrência de falta serão mais precisos considerando a aplicação para linhas de distribuição. Dessa forma, as rotinas utilizadas poderiam gerar resultados mais adequados, por exemplo, para localização de faltas baseada em impedância, estimação fasorial e métodos de mínimos de quadrados (Lopes et al, 2022; Hung, 2022).

6. CONCLUSÕES

Linhas de distribuição apresentam valores de resistência por unidade de comprimento maiores do que linhas de transmissão típicas. Neste artigo, foi apresentado um modelo que representa linhas de distribuição por meio de parâmetros distribuídos sem considerar a influência da frequência sobre os parâmetros de linha. Esse modelo é aplicado em uma situação particular encontrada em regiões de expansão de redes rurais de energia no Brasil e afastadas de grandes centros urbanos. Utilizando o modelo proposto, são realizadas simulações de descargas atmosféricas e de curto-circuito, dois dos principais problemas que podem afetar linhas de distribuição rural. Os resultados obtidos mostram vantagens em relação ao modelo do ATPDraw baseado em blocos de resistências concentradas. Esses resultados indicam pontos importantes de aprimoramento das rotinas relacionados à inclusão de elementos resistivos que representam equipamentos de proteção contra descargas atmosféricas e condições de ocorrência de faltas.

REFERÊNCIAS

- Cervantes, M., Kocar, I., Mahseredjian, J., Ramirez, A. (2020). Accurate and reduced order identification of propagation function for electromagnetic transient analysis of cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 35 (2), pp. 968-976.
- Chrysochos, I., Tsolaridis, G.P., Papadopoulos, T.A., Papagiannis, G.K. (2015). Damping of oscillations related to lumped-parameter transmission line modeling. *Conference on Power Systems Transients (IPST 2015)*, 7 pp., 15-18 June 2015, Cavtat, Croatia.
- Dommel, H.W., Yan, A., Yan, Ortiz De Marcano, R. J., Miliani, A. B. (1983). *Case Studies for Electromagnetic Transients*. University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Dommel, H.W. (1986). *Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)*. Bonneville Power Administration, Portland.
- Dommel, H.W., (1997). Techniques for analyzing electromagnetic transients. *IEEE Computer Applications on Power*, vol. 10 (3), pp. 18-21.
- Hoidalén, H.K., Prikler, L., Peñaloza, F. (2019). *ATPDRAW version 7.0 for Windows – user’s Manual*. Norwegian University of Technology Trondheim, Norway.
- Hung, T.N (2022). Methods for fault location in high voltage power transmission lines: a comparative analysis. *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 11 (4), pp. 1134-1141.
- Lafaia, I., Mahseredjian, J., Ametani, A., Barros, M.T.C., Kocar, I., Fillion, Y. (2018). Frequency and time domain responses of cross-bonded cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33 (2), pp. 640-648.
- Lessa, L.S., Luca, C.C.S., Pereira, T.G., Grilo, C.V.C., Moreira, A.C., Ronchini, C.M.B., Gennaro, E.M. Agopian, P.G.D., Prado, A.J. (2020). Sparse matrices for transient simulations with computing memory reduction. *Electric Power Systems Research*, vol. 183, pp. 7, DOI 10.1016/j.epsr.2020.106266.
- Lopes, F.V., Leite Jr, E.J.S., Ribeiro, J.P.G., Piardi, A.B., Scheid, A.V., Zat, G., Espinoza, R.G.F. (2022). Single-ended multi-method phasor-based approach for optimized fault location on transmission lines. *Electric Power Systems Research*, vol. 212, 10 pp.
- Macías, J.A.R., Expósito, A.G., Soler, A.B. (2005). A comparison of techniques for state-space transient analysis of transmission lines. *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20 (2), pp. 894-903.
- Nelms, R.M., Sheble, G.B., Newton, S.R., Grigsby, L.L. (1989). Using a personal computer to teach power system transients. *IEEE Trans. on Power Systems*, vol.4 (3), pp. 1293-1294.
- Prado, A.J., Besspalhulk, K.J., Silva, B.F., Conceição, K.O., Cargnin-Stieler, M., Gennaro, E.M., Pissolato Filho, J. (2017). Influences of damping resistances on transient simulations in transmission lines. *Progress in Electromagnetics Research B -PIER B*, vol. 75 (1), pp. 27-39.