

SIMULAÇÃO DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS MONOFÁSICOS. Tiago Machado da Silva, Pedro da Costa Jr, André Nunes de Souza. – Engenharia Elétrica – Engenharia Elétrica - Departamento de Engenharia Elétrica – Faculdade de Engenharia – Campus de Bauru.

A solução numérica de transitórios é muito importante para o planejamento, manutenção e ampliação de sistemas de potência, para que operem de forma segura e econômica.

Programas computacionais de simulação de transitórios podem ser usados para estudar todos os tipos de surtos que possam ocorrer na rede elétrica. O objetivo final do usuário de tais simuladores é dimensionar o menor nível isolamento necessário aos sistemas, sendo aceitas, por razões econômicas, alguma probabilidade de ruptura do isolamento.

No intuito de desenvolver uma rotina foi necessária a utilização de modelos equivalentes para as linhas de transmissão (Zanetta Jr, 2003; Naidu, 1985). Realiza-se essa modelagem através de parâmetros distribuídos, para obtermos a equação de onda. A Fig. 1 ilustra o modelo equivalente da linha de transmissão, sendo que R' , L' e C' , são os parâmetros da linha por unidade de comprimento.

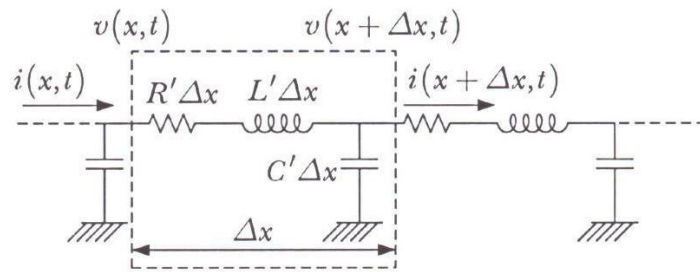


Fig. 1. Representação da linha de transmissão.

Do circuito obtem-se as equações (1) e (2).

$$v(x, t) - v(x + \Delta x, t) = \Delta x R' i(x, t) + \Delta x L' \frac{\partial i}{\partial t}(x, t) \quad (1)$$

$$i(x, t) - i(x + \Delta x, t) = \Delta x C' \frac{\partial v(x + \Delta x, t)}{\partial t} \quad (2)$$

Utilizando-se a Transformada de Laplace, e posteriormente a antitransformada, obtém-se as equações algébricas no domínio do tempo:

$$v(x, t) = v^+ \left(0, t - \frac{x}{v} \right) + v^- \left(0, t + \frac{x}{v} \right) \quad (3)$$

$$i(x, t) = i^+ \left(0, t - \frac{x}{v} \right) + i^- \left(0, t + \frac{x}{v} \right) \quad (4)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{L' C'}} \text{ m/s} \quad (5)$$

Nesse estudo considera-se uma linha sem perdas ($R' = 0$). Nesse caso v é aproximadamente a velocidade da luz no vácuo (300000 km/s).

Analisando as expressões (3) e (4), observa-se que tanto a corrente quanto a tensão são formadas por dois termos. É possível notar que o primeiro termo diz respeito a uma onda que se propaga na direção positiva de x , e que o segundo diz respeito a uma onda que se propaga na direção negativa de x . Portanto um observador que viaje ao longo da linha com velocidade v observa-se sempre os mesmos valores de tensão e corrente.

Para relacionar-se diretamente a tensão com a corrente faz-se o uso da impedância característica, expressa na equação (6):

$$Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \Omega \quad (6)$$

Usando as expressões (3) e (4), e conhecendo as relações entre tensão e corrente obtém-se a expressão (7).

$$v(x,t) + Zi(x,t) = 2v^+ \left(0, t - \frac{x}{v} \right) \quad (7)$$

A expressão (7) mostra que se o argumento $t - \frac{x}{v}$ for mantido constante, a expressão $v(x,t) + Zi(x,t)$ também se mantém constante. A partir dessa propriedade desenvolve-se o circuito equivalente para linhas de transmissão sem perdas.

$$i_{km}(t) = \frac{v_k(t)}{Z} - b_k(t) \quad (9)$$

$$b_k(t) = \frac{v_m(t - \tau) - Zi_{km}(t - \tau)}{Z} \quad (10)$$

Dessa forma $b_k(t)$ é o termo que depende das informações do passado, e portanto o modelo final da linha de transmissão é apresentado na Fig. 3.

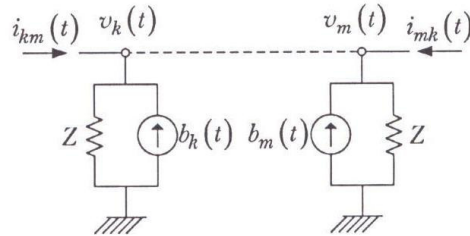


Fig. 3. Circuito equivalente da linha de transmissão monofásica sem perdas.

Sendo que $b_m(t)$ é uma função semelhante a $b_k(t)$, mas que é obtida abordando a figura 3 no sentido do nó “m” para o nó “k”.

Com esse modelo é possível criar rotinas que resolvam problemas envolvendo transitórios em linhas sem perdas. Sendo muito útil nos trabalhos a serem realizados, pois na maioria das vezes o as perdas são desprezíveis.

Utilizando a modelagem sugerida acima foi desenvolvido um algoritmo computacional para a simulação do comportamento de uma linha de transmissão (Costa Jr, 1994; Matsomoto, 2002).

O circuito a seguir foi utilizado para um teste simples do algoritmo:

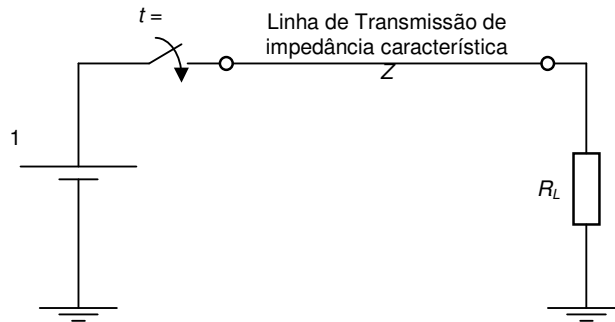


Fig. 4. Simulação com degrau de tensão.

A linha de transmissão tem impedância característica igual a 300Ω , e o tempo que leva para a onda viajar de um extremo a outro da linha (tempo de trânsito) é de $50 \mu s$.

A chave é fechada no instante $t = 0$, e monitora-se a tensão na carga R_L , para três valores diferentes de R_L ($R_L = 300\Omega$, $R_L = 150\Omega$ e $R_L = 600\Omega$).

Obtiveram-se os resultados das figuras 5 e 6.

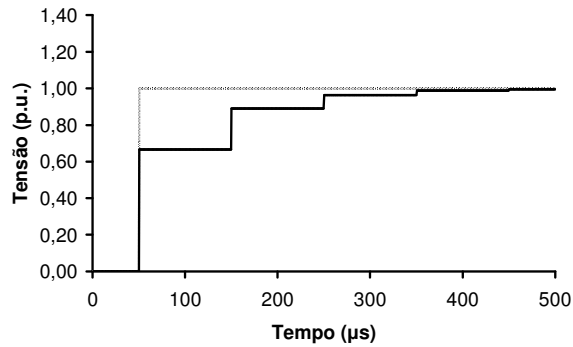


Fig. 5. Tensão em função do tempo, para $R_L = Z$ e $R_L < Z$.

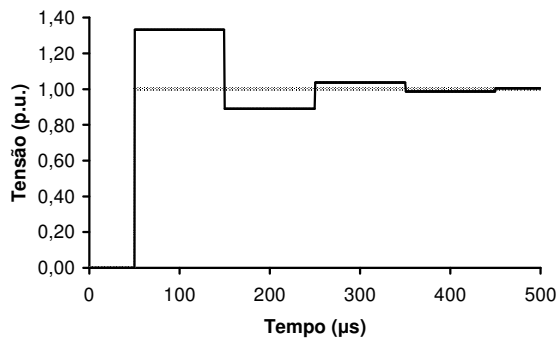


Fig. 6. Tensão em função do tempo, para $R_L = Z$ e $R_L > Z$.

Foi possível observar que quando R_L era igual a Z , a curva mais clara em ambos os gráficos, a tensão na carga assumiu o valor de regime permanente logo após a incidência da onda eletromagnética.

Quando $R_L > Z$ a onda de tensão incidente aumenta em intensidade devido ao fenômeno de reflexão que acontece sempre que existe uma descontinuidade na linha de transmissão.

Os resultados mostraram-se coerentes com a teoria de propagação eletromagnética, evidenciando a eficiência do algoritmo implementado.

O circuito da Fig. 7 foi utilizado para ilustrar uma aplicação do algoritmo desenvolvido.

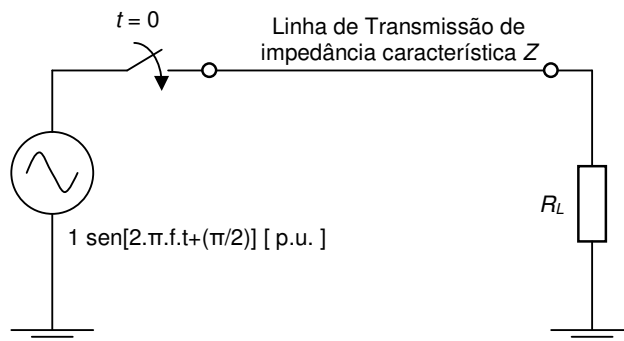


Fig. 7. Simulação com tensão senoidal.

A impedância característica da linha contínua sendo 300Ω , a frequência é de 60Hz e o tempo de trânsito é de 2ms.

Repetiram-se então os testes para R_L diferente de Z , e obtiveram-se os resultados ilustrados nas figuras 8 e 9.

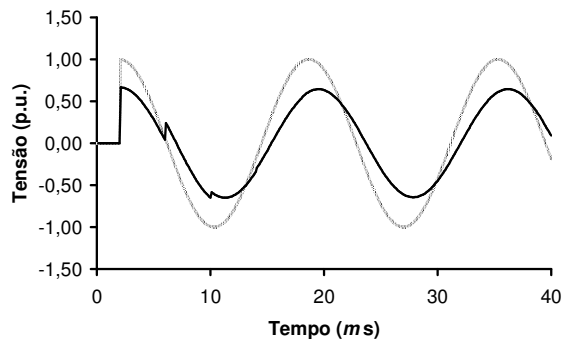


Fig. 8. Tensão em função do tempo, para $R_L = Z$ e $R_L < Z$.

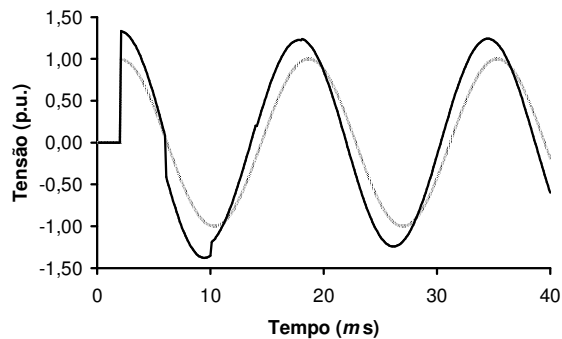


Fig. 9. Tensão em função do tempo, para $R_L = Z$ e $R_L > Z$.

Em ambos os gráficos a forma de onda mais clara representa o caso de $R_L = Z$. Observou-se que quando R_L é diferente de Z , mesmo em regime permanente, a uma diferença na amplitude da tensão na carga.

Foi comprovada a eficiência do algoritmo na aplicação em sistemas monofásicos, tanto em tensão contínua como em tensão alternada. Na simulação com tensão alternada ocorreu uma mudança na amplitude da tensão na carga.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho é possível vislumbrar desdobramentos desta pesquisa no aperfeiçoamento de novos algoritmos para possibilitar simulações mais realísticas. Tais aperfeiçoamentos incluem variação de parâmetros com a frequência, presença de elementos não lineares no sistema (como pára-raios) e sistema trifásicos.

Referências Bibliográficas

- [1] Zanetta Jr, Luiz Cera. Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003. 720 p.
- [2] Naidu, S.R. Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência. Campina Grande: Editora Grafset Ltda, 1985. 316p.
- [3] Costa Jr, Pedro da & Pissolato Filho, Jose. Applying Z- transform on computation of Electromagnetic Transients on Subscriber Lines, "The 1994 International Symposium on Electromagnetic Compatibility", anais, pp. 52-57, São Paulo, S.P., 05 a 09 de dezembro, 1994.
- [4] Matsomoto, Elia Yathie. MATLAB 6.5: Fundamentos de Programação. São Paulo: Editora Erica, 2002. 342 p