

TENSÕES INDUZIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM LINHAS COM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES

Alexandre Piantini

Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE/USP)

Jorge M. Janiszewski

Escola Politécnica (EPUSP - PEE)

Universidade de São Paulo

Resumo: As tensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas constituem importante fator na análise do desempenho de linhas de distribuição. O modelo proposto por Rusck mostra-se adequado ao cálculo dessas tensões, porém apresenta algumas limitações em sua aplicabilidade em função de não permitir que determinadas situações sejam consideradas. O presente trabalho utiliza um modelo desenvolvido a partir dessa teoria, visando a análise da influência do comprimento finito da linha e dos casos de linhas em ângulo e com diferentes condições de terminação. São apresentados resultados de simulações computacionais e também de ensaios realizados em escala reduzida. Tais resultados mostram a validade do modelo desenvolvido e, também, a importância dos fatores analisados no comportamento das tensões induzidas.

1 INTRODUÇÃO

O modelo matemático utilizado neste trabalho para o cálculo das tensões induzidas foi desenvolvido em [1], e tem como base a teoria proposta por Rusck [2]. Em [1] essa teoria foi estudada com profundidade, tendo-se concluído que a mesma conduz a resultados consistentes, que podem ser justificados a partir dos campos eletromagnéticos [3] envolvidos no fenômeno. Estudos posteriores, realizados independentemente, confirmaram essa conclusão [4-6]. Entretanto, as simplificações e limitações contidas na teoria de Rusck motivaram o desenvolvimento de um modelo mais genérico, de forma a permitir o cálculo das tensões induzidas em uma gama muito maior de situações, além de possibilitar a análise da influência de determinados parâmetros que o modelo original adota como constantes. Dessa forma, o modelo desenvolvido representa uma extensão do modelo de Rusck pois, além de evitar algumas aproximações [1], permite que os cálculos sejam efetuados levando-se em consideração:

- o comprimento do canal do "return stroke";
- a ocorrência de descargas em estruturas metálicas próximas à linha [7];
- a ocorrência do "leader" ascendente [8];
- o comprimento da linha;
- linhas com ângulo;
- linhas com diferentes condições de terminação.

A análise das tensões induzidas levando-se em conta as três últimas condições constitui-se no objetivo deste trabalho.

A fim de confirmar a validade do modelo teórico desenvolvido, implementou-se um modelo em escala reduzida [9] de modo a permitir comparações entre tensões induzidas medidas e calculadas. Os resultados obtidos mostraram a adequabilidade do modelo teórico para a descrição do fenômeno. A análise de várias configurações pôde, então, ser feita através de simulações computacionais, complementadas por medições no modelo em escala reduzida.

2 SIMBOLOGIA

Para indicar os valores dos diversos parâmetros, adota-se, ao longo deste trabalho, a seguinte simbologia:

- **b**: relação entre a velocidade de propagação da corrente ao longo do canal do "return stroke" e a velocidade da luz no vácuo;
- **d**: distância entre a linha e o ponto de incidência da descarga;
- **h**: altura da linha;
- **hn**: comprimento do canal do "return stroke";
- **l**: valor de crista da corrente do "return stroke";
- **t**: tempo;
- **tf**: tempo até crista da corrente do "return stroke";
- **tc**: tempo até o meio valor, na cauda, da corrente do "return stroke" (tempo de cauda);
- **U**: tensão induzida na linha;
- **x**: posição ao longo da linha onde se calcula a tensão ($x = 0$ corresponde ao ponto mais próximo ao local de incidência da descarga);
- **x1max** e **x1min**: pontos extremos da linha (Figura 1);
- **y**: comprimento da derivação (Figura 1).

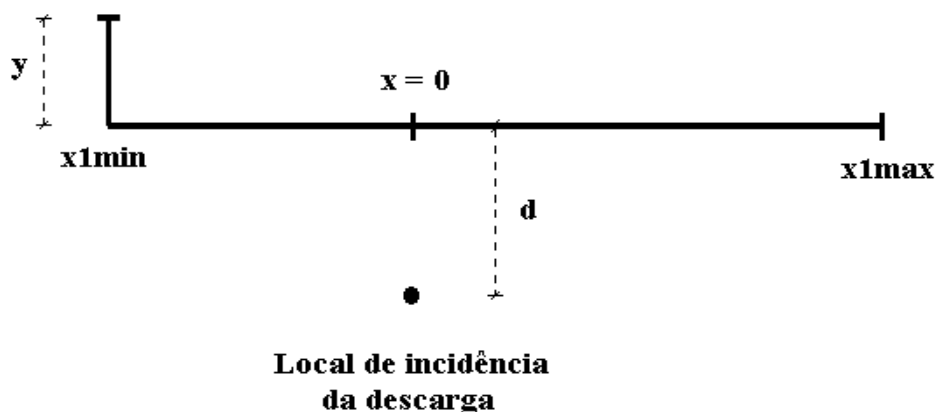


Fig. 1 - Geometria da linha

3 COMPRIMENTO DA LINHA E LINHAS EM ÂNGULO (x_{1max} , x_{1min} , y)

Os resultados apresentados neste item referem-se a simulações computacionais realizadas adotando-se, salvo indicação em contrário, forma de onda triangular para a corrente do "return stroke" e os seguintes valores para os parâmetros (caso base): $b = 0,3$; $d = 50$ m; $h = 10$ m; $h_n = 3$ km; $I = 50$ kA; $t_f = 3$ μ s; $t_c = 50$ μ s; $x = 0$ m; $y = 0$ m $x_{1max} = 2,5$ km; $x_{1min} = - 2,5$ km;. Salvo indicação em contrário, a linha (sem condutor neutro) foi suposta casada em ambas as extremidades, tendo havido simetria entre estas e o ponto de incidência da descarga.

A Figura 2a ilustra o comportamento da tensão induzida considerando-se linhas de diferentes comprimentos. Sendo as extremidades simétricas em relação ao ponto de incidência da descarga, então $x_{1max} = |x_{1min}|$ (Figura 1).

A Figura 2b mostra o comportamento da tensão induzida em função do comprimento da linha e da posição da descarga em relação às suas extremidades. Pode-se verificar que, em relação ao caso de linha infinita, a amplitude da tensão não se altera quando o cálculo é feito em um ponto que esteja a uma distância superior a 500 m de ambas as extremidades, uma vez que nessa situação em geral o efeito do comprimento finito da linha só é sentido após a tensão ter atingido seu valor de crista (considerando-se valores típicos para a velocidade de propagação e para o tempo de frente da corrente).

A título de ilustração, a Figura 3 apresenta resultados de cálculos de tensões induzidas em linhas com ângulo ($y > 0$, Figura 1), tendo em vista a avaliação da influência do comprimento da derivação.

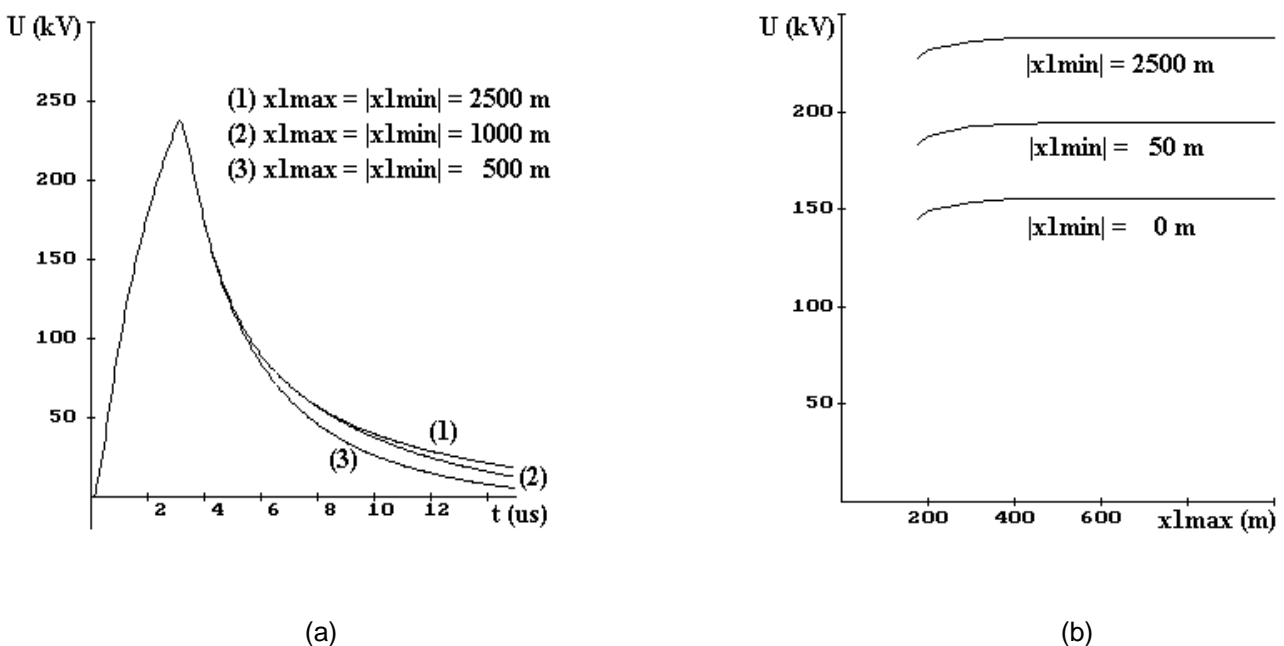


Fig. 2 - Tensões induzidas em função do comprimento da linha
a) formas de onda
b) amplitudes em função de x_{1max} e $|x_{1min}|$

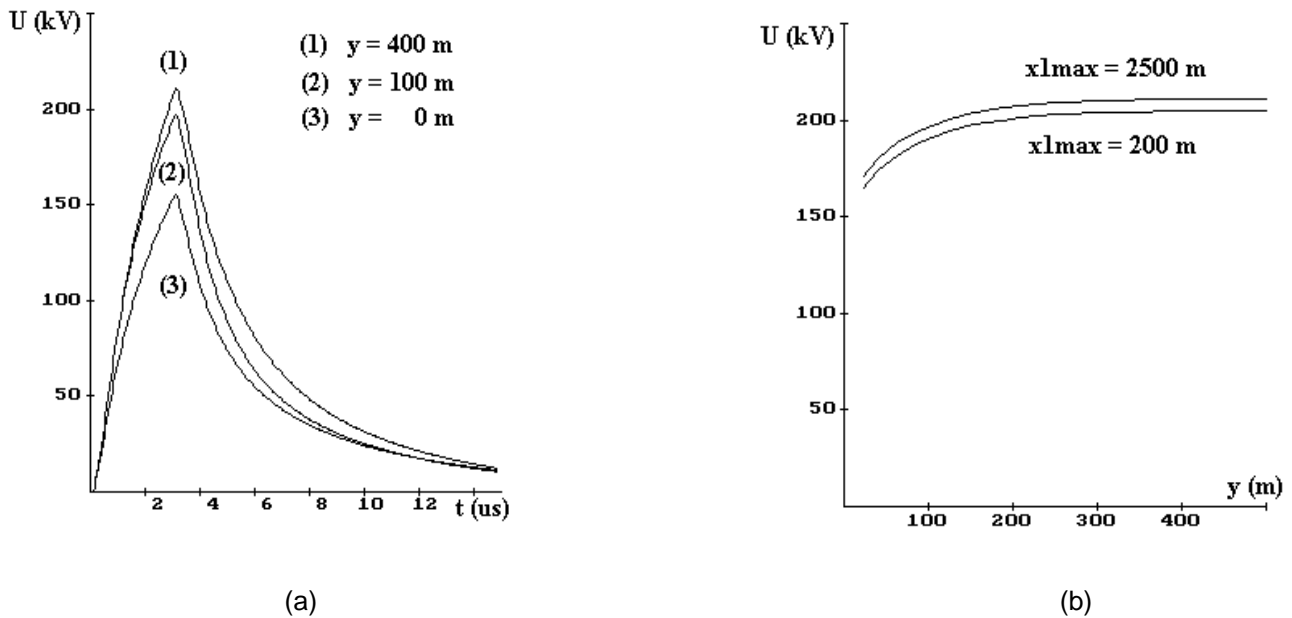


Fig. 3 - Tensões induzidas em função do comprimento da derivação (y)
a) formas de onda ($x1min = 0$)
b) amplitudes em função de y e $x1max$ ($x1min = 0$)

4 TERMINAÇÕES DA LINHA

Até este ponto todos os resultados apresentados foram referentes a linhas casadas em ambas as extremidades. Neste item são analisadas as tensões induzidas em linhas com diferentes condições de terminação.

Assim, seja R o valor da resistência de um resistor colocado na extremidade de uma linha monofásica (por exemplo, no ponto correspondente a $x1max$ da Figura 1). Considere-se também, inicialmente, que a linha seja muito longa ($x1min$ tendendo a infinito) e sem derivações ($y = 0$). Nessas condições, a corrente Iat no resistor pode ser calculada de acordo com a expressão:

$$Iat(t) = \frac{1}{(R + Zcf)} \cdot (2 \cdot V1(x1max, t) + h \cdot \int_t^{\infty} A(x1max, t)) \quad (1),$$

onde Zcf indica a impedância característica do condutor, A representa o potencial vetor no ponto considerado (devido à corrente no canal do "return stroke") e $V1$ representa a contribuição, ao potencial escalar, de todos os elementos da linha situados à esquerda (com referência à Figura 1) do ponto considerado (no caso, $x1max$). Se o resistor estivesse posicionado na extremidade correspondente a $x1min$, a corrente Iat seria calculada da mesma forma, apenas com a substituição de $V1$ por $V2$, que representa a contribuição, ao potencial escalar, de todos os elementos da linha situados à direita (com relação à Figura 1) do ponto $x1min$. Em [1] são apresentados os métodos utilizados para determinação de A , $V1$ e $V2$ para o caso de linhas finitas.

A circulação da corrente **lat** pelo resistor **R** dá origem a uma onda de tensão **Vr(x1max)**, que se propaga em direção à extremidade oposta da linha. Esta tensão pode ser calculada através da expressão:

$$Vr(x1max, t) = \frac{(R - Zcf)}{(R + Zcf)} \cdot V1(x1max, t) - \frac{Zcf}{(R + Zcf)} \cdot h \cdot \frac{\int A}{\int t}(x1max, t) \quad (2).$$

Note-se que a onda de tensão **Vr(x1max)** existirá em qualquer situação, mesmo quando a linha estiver casada, tendo em vista as diferentes naturezas de suas componentes eletrostática e magnética. Uma discussão mais detalhada a respeito do comportamento das componentes eletrostática e magnética da tensão induzida é apresentada em [1].

A tensão resultante **U(x,t)** no instante **t** em um ponto **x** de uma linha terminada no ponto **x1max** com um resistor de resistência **R** pode ser então calculada utilizando-se a expressão:

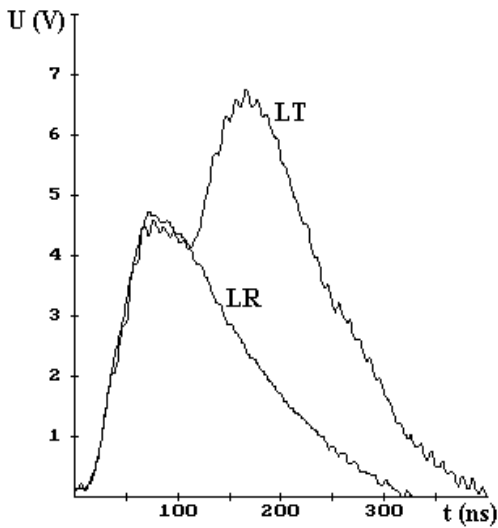
$$U(x, t) = V1(x, t) + V2(x, t) + h \cdot \frac{\int A}{\int t} + Vr(x1max, t - \frac{(x1max - x)}{c}) \quad (3),$$

onde **c** representa a velocidade da luz no vácuo ($3 \cdot 10^8$ m/s). Note-se que, em virtude do tempo necessário para a propagação da onda **Vr(x1max)** até o ponto **x**, o último termo da equação é nulo até o instante $t = (x1max - x) / c$.

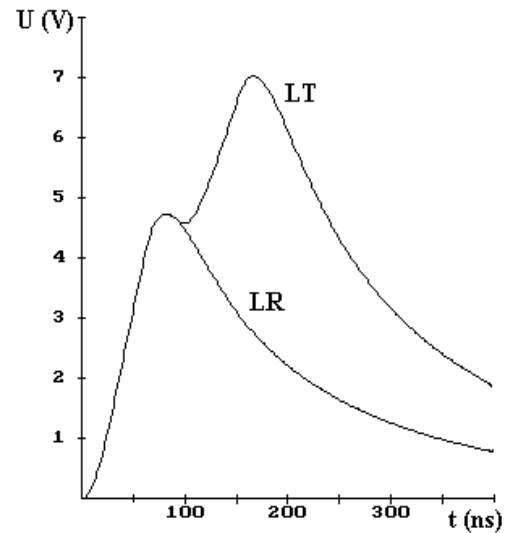
No caso mais geral, que compreende também as linhas curtas, onde os efeitos da extremidade correspondente ao ponto **x1min** necessitam ser considerados, deve-se determinar inicialmente a tensão **Vr(x1min)**, originada pela circulação de corrente pelo resistor que conecta este ponto à terra (**R'**). Essa tensão é calculada de modo análogo a **Vr(x1max)**, substituindo-se, na equação (2), **V1(x1max)** por **V2(x1min)** e **R** por **R'**. Para a determinação da tensão induzida em um ponto **(x,t)** deve-se considerar não só os efeitos das ondas **Vr(x1max)** e **Vr(x1min)**, como também os efeitos das sucessivas reflexões por elas sofridas ao atingirem as extremidades da linha.

A fim de se investigar o efeito da condição de terminação da linha, foram realizados diversos ensaios no modelo em escala reduzida com a linha de teste (LT) terminada de diferentes maneiras. Salvo indicação em contrário, os ensaios foram realizados nas seguintes condições (caso base): **I** = 1,1 A; **tf** = 60 ns; **b** = 0,11; **d** = 1,4 m; **h** = 20 cm; **hn** = 12 m; **x** = 0 m; **x1max** = 14 m; **x1min** = - 14 m; **y** = 0 m. Em todos os ensaios a amplitude da corrente permaneceu praticamente constante por um tempo bastante longo (muito superior ao tempo de estudo do fenômeno), de modo que, em termos práticos, o valor de **tc** pode ser assumido como infinito. Para fins de comparação, posicionou-se uma linha de referência (LR), paralela à LT, à mesma distância que esta em relação ao modelo do canal do "return stroke" (1,4 m). A linha de referência permaneceu sempre com ambas as extremidades casadas.

As Figuras 4 a 8 apresentam os oscilogramas das tensões medidas simultaneamente nas duas linhas, juntamente com as tensões calculadas (através de simulações computacionais) considerando-se os valores dos parâmetros citados anteriormente. Verifica-se, em todos os casos analisados, uma boa concordância entre as tensões medidas e calculadas. Pode-se observar que até o tempo de 95 ns as tensões induzidas são iguais; esse tempo corresponde à chegada, no ponto de medição da linha de teste, das ondas $Vr(x1max)$ e $Vr(x1min)$.



(a)

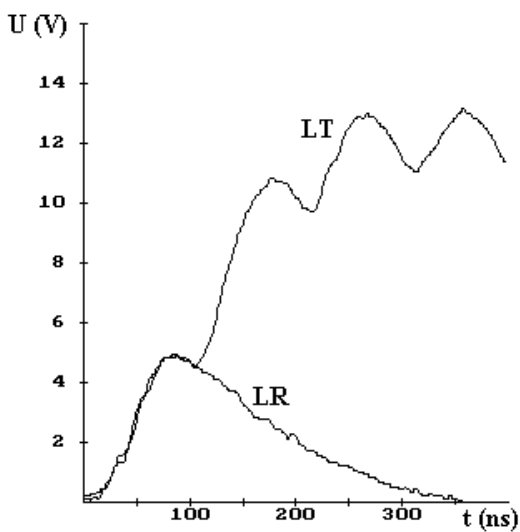


(b)

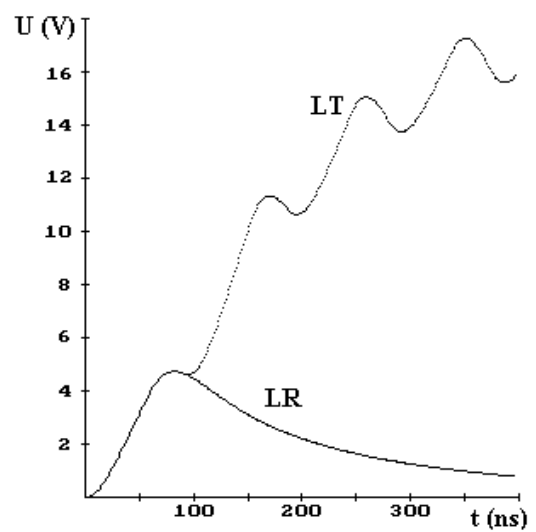
Fig. 4 - Tensões induzidas na linha de teste (LT, uma extremidade casada e outra em aberto) e na linha de referência (LR, ambas as extremidades casadas)

a) tensões medidas

b) tensões calculadas



(a)



(b)

Fig. 5 - Tensões induzidas na linha de teste (LT, ambas as extremidades em aberto) e na linha de referência (LR, ambas as extremidades casadas)

a) tensões medidas

b) tensões calculadas

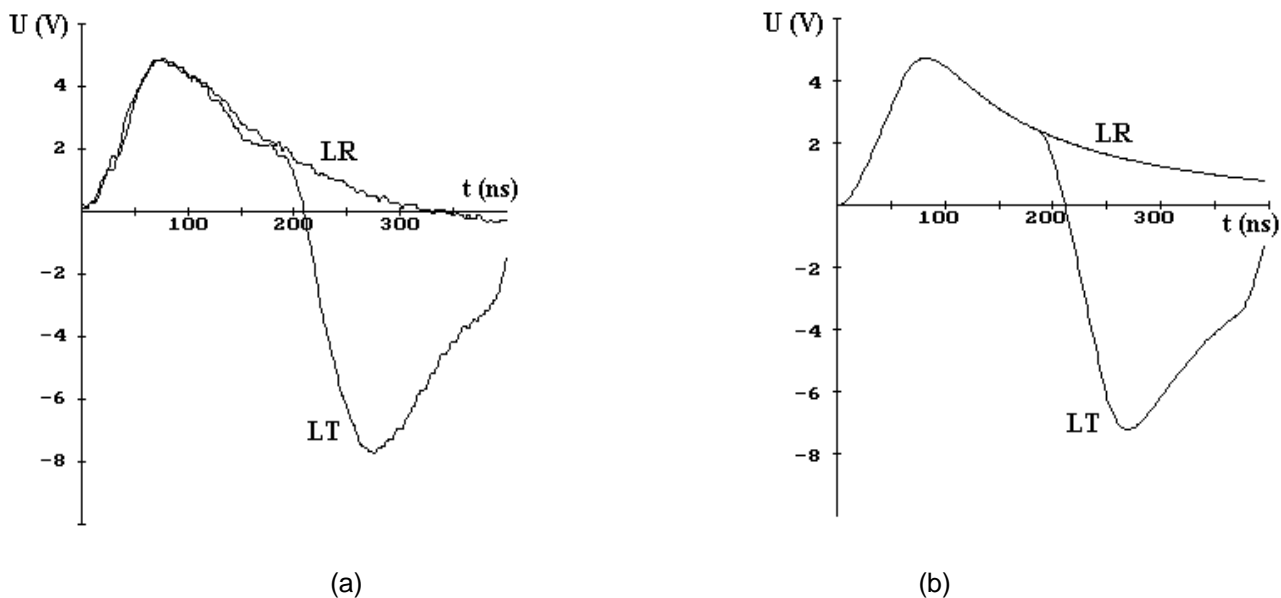


Fig. 8 - Tensões induzidas na linha de teste (LT, uma extremidade em curto-circuito e outra em aberto) e na linha de referência (LR, ambas as extremidades casadas)
a) tensões medidas b) tensões calculadas

A Figura 9 apresenta, a título de ilustração, as tensões resultantes em diferentes pontos de uma linha com uma extremidade casada e a outra em aberto. Os valores dos parâmetros utilizados nas simulações correspondem, a exemplo dos casos apresentados nas Figuras 4 a 8, ao caso base para os ensaios no modelo reduzido.

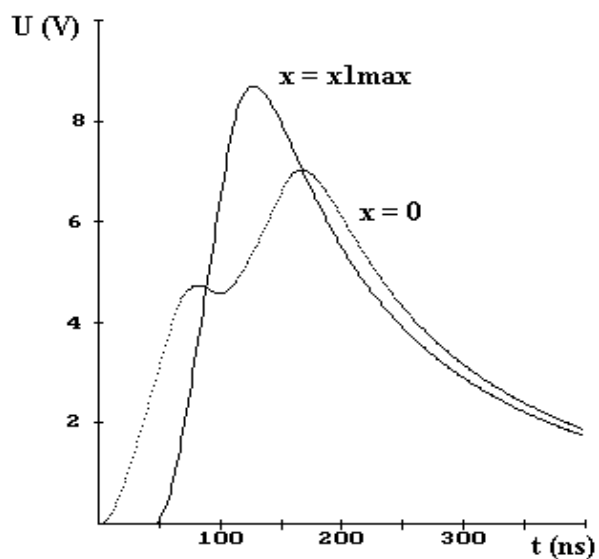


Fig. 9 - Tensões induzidas em diferentes pontos de uma linha casada em $x1min$ e aberta em $x1max$

Conforme mencionado anteriormente, a equação (2) mostra que a componente magnética da onda de tensão $Vr(x1max)$ é diferente de zero mesmo quando a linha está casada. Entretanto, nessas condições, tal componente em geral não tem efeito apreciável na tensão resultante em outro ponto da linha, a não ser em casos em que a descarga ocorre

próxima à extremidade **x1max**. Tal fato se deve principalmente à forte dependência dessa componente em relação à distância do ponto **x1max** ao local de incidência da descarga; a diminuição de amplitude é sensível à medida em que os terminais da linha se afastam do canal do "return stroke". Além do mais, se a distância entre o ponto de interesse para cálculo da tensão e o ponto **x1max** é grande, o efeito da terminação (ou, no caso, o efeito da componente magnética de **Vr(x1max)**) só será sentido após a tensão ter atingido seu valor de crista. Raciocínio análogo se aplica à onda **Vr(x1min)**. A Figura 10 apresenta resultados de cálculo de tensões induzidas em uma linha com ambas as extremidades casadas, considerando-se ou não os efeitos das componentes magnéticas de **Vr(x1max)** e **Vr(x1min)**, para uma dada corrente. Como pode-se observar, as diferenças entre as tensões são bastante pequenas, mesmo para uma distância de apenas 14 m entre o ponto sob análise ($x = 0$) e as extremidades da linha. No caso de linhas mais longas, essas diferenças tendem a ficar ainda menores.

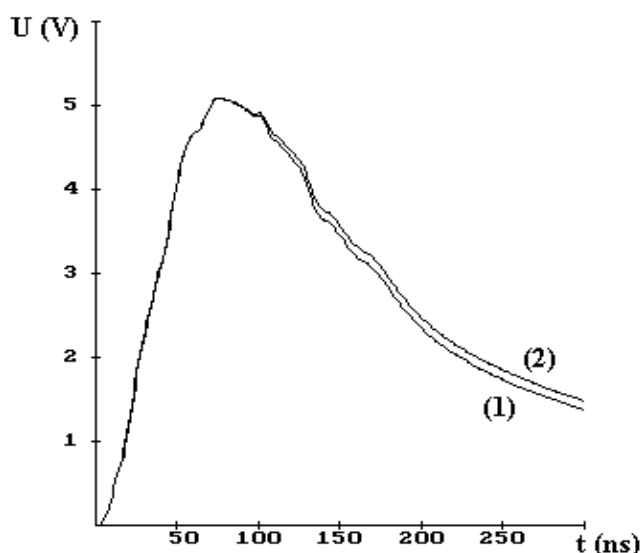


Fig. 10 - Tensões induzidas em linha casada, considerando (1) ou não (2) os efeitos das componentes magnéticas de **Vr(x1max)** e **Vr(x1min)**

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo a análise das tensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas em linhas com diferentes configurações. Para tal foram realizadas simulações computacionais a partir de um modelo desenvolvido com base na teoria de Rusck, bem como ensaios em escala reduzida. Os resultados obtidos mostraram que:

- em geral, os valores máximos das tensões induzidas em linhas cujas extremidades estejam a distâncias superiores a 500 m do ponto mais próximo ao local de incidência da descarga ($x = 0$) são praticamente os mesmos que aqueles referentes a linhas infinitas, considerando-se valores típicos para a velocidade de propagação e para o tempo de frente da corrente;

- as tensões induzidas em linhas com ângulo podem diferir daquelas referentes a linhas retas, principalmente se o ponto de incidência da descarga for próximo a uma derivação;
- tanto as medições como as simulações computacionais conduziram a resultados bastante coerentes, tendo-se verificado que as condições de terminação da linha podem ter influência significativa na forma de onda da tensão induzida. Evidentemente, a importância desse efeito é tanto maior quanto menor for o comprimento da linha;
- o modelo desenvolvido, que representa uma extensão do modelo de Rusck, revelou-se adequado para a análise das tensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas com diferentes configurações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PIANTINI, A. **Contribuição ao estudo das tensões induzidas em linhas de distribuição por descargas atmosféricas indiretas**. São Paulo, 1991. 205 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [2] RUSCK, S. Induced lightning over-voltages on power-transmission lines with special reference to the over-voltage protection of low-voltage networks. **Transactions of the Royal Institute of Technology**, n. 120, p. 1-118, 1958.
- [3] PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. Analysis of lightning electromagnetic fields. **COMPEL - International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering**, v. 13, n.1, p. 203-6, Mar. 1994.
- [4] NUCCI, C.A. et al. Comparision of two coupling models for lightning-induced overvoltages calculations. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 10, n.1, p. 330-9, Jan. 1995.
- [5] COORAY, V. Lightning-induced overvoltages in power lines: validity of various approximations made in overvoltage calculations. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 22., Budapest, 1994. **ICLP: Proceedings**. Budapest, Technical University of Budapest, 1994. p. R 4-04/1-7.
- [6] COORAY, V. Calculating lightning-induced overvoltages in power lines: a comparision of two coupling models. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 36, n.3, p. 179-82, Aug. 1994.
- [7] PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. Induced voltages on distribution lines due to lightning discharges on nearby metallic structures. In: COMPUMAG, Rio de Janeiro, 1997. **COMPUMAG: Proceedings**. Rio de Janeiro, Nov. 1997. [Trabalho submetido à apreciação da Comissão Científica do evento]
- [8] PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. The Influence of the upward leader on lightning induced voltages. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 23., Florence, 1996. **ICLP: Proceedings**. Milan, Associazione Elettrotecnica ed Elettronica Italiana, 1996. v.1, p. 352-7.
- [9] PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. An Experimental study of lightning induced voltages by means of a scale model. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 21., Berlin, 1992. **ICLP: Proceedings**. Berlin, VDE, Sep. 1992. p. 4.08/195-9.