

Sobretensões Induzidas por Descargas Atmosféricas em Redes Secundárias

Acácio Silva Neto e Alexandre Piantini, *Senior Member, IEEE*

Resumo-- Este trabalho apresenta os resultados de um estudo sobre as características das sobretensões ocasionadas por descargas atmosféricas próximas a linhas de distribuição de baixa tensão. As tensões induzidas foram calculadas através do ERM (“Extended Rusck Model”) - modelo de validade comprovada através de centenas de comparações entre resultados teóricos e experimentais. Neste estudo foi analisado o comportamento das tensões induzidas, em termos de amplitude e forma de onda, frente a parâmetros como a altura do condutor fase, posição ao longo da linha, distância entre pontos de aterramento do condutor neutro e comprimento do ramal de ligação. A modelagem das cargas das unidades consumidoras e também do transformador de distribuição são abordadas no trabalho e seus efeitos considerados nos cálculos das tensões induzidas.

Palavras-Chave-- descargas atmosféricas, indução eletromagnética, linhas de distribuição, tensões induzidas.

I. INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas são responsáveis por parcela significativa dos distúrbios nas redes elétricas, podendo ocasionar desligamentos ou queima de equipamentos tanto das concessionárias quanto dos consumidores. Os distúrbios nas redes de distribuição causados por descargas atmosféricas podem ser causados tanto por descargas diretas como indiretas (próximas à rede). As descargas diretas na rede de baixa tensão são raras pelo fato dos condutores estarem posicionados em alturas inferiores à dos condutores da rede primária e pelo fato desta última normalmente estar presente, blindando a rede secundária.

Os surtos ocasionados por descargas diretas na rede primária são transferidos para a rede de baixa tensão através do transformador e também pela atuação dos pára-raios de média tensão [1], [2]. Vários estudos vêm sendo desenvolvidos a respeito das tensões induzidas na rede primária devido a descargas indiretas [3]-[5] e sobre as tensões transferidas para a rede secundária através dos transformadores de distribuição [6], [7]. No caso de uma descarga direta em uma edificação, ocorre um aumento do potencial de terra próximo à instalação, o qual pode ocasionar a transferência de surtos à rede de baixa tensão em decorrência de descargas disruptivas na instalação ou da atuação de dispositivos de proteção.

Por sua vez, as tensões induzidas na rede secundária ainda não foram estudadas em grande profundidade. Esses transitórios ocorrem com frequência e podem atingir amplitudes elevadas. A adoção de novos critérios para a avaliação da qualidade da energia fornecida tem incentivado a realização de pesquisas com o objetivo de se obter informações a respeito das características das sobretensões em redes de baixa tensão. A busca de um melhor entendimento do comportamento das tensões induzidas em relação a diversos parâmetros é de fundamental importância. As formas de onda das tensões induzidas em redes de baixa tensão típicas brasileiras diferem das observadas em [8], onde as tensões induzidas na rede secundária são caracterizadas por oscilações amortecidas de alta frequência em função das simulações terem sido realizadas considerando linhas com espaçamentos da ordem de 250 m a 400 m entre pontos de aterramento do neutro. Entretanto, como no Brasil em geral as distâncias entre os pontos de aterramento são menores, as características das tensões induzidas são diferentes, conforme observado em [6], [7], [9]. Deve-se considerar também que as redes de baixa tensão apresentam ainda grande diversidade de configurações.

Neste trabalho são apresentados resultados referentes às características das sobretensões, nas redes de baixa tensão, causadas por descargas atmosféricas indiretas. O estudo considera diferentes configurações de rede e discute a influência de parâmetros como a altura do condutor fase, o comprimento do ramal de ligação, a distância entre pontos de aterramento do condutor neutro e a posição ao longo da linha. As simulações foram realizadas por meio do modelo matemático ERM (“Extended Rusck Model”) [10], [11], cuja validade foi comprovada por meio de centenas de comparações entre resultados teóricos e experimentais. O trabalho discute também a modelagem das cargas dos consumidores e do transformador de distribuição frente a surtos atmosféricos.

II. TENSÕES INDUZIDAS NA REDE SECUNDÁRIA

A representação adequada das cargas dos consumidores e do transformador de distribuição é fundamental quando se realiza cálculos de tensões induzidas. Em [12] verificou-se que o circuito apresentado na Figura 1 é uma boa aproximação da impedância de entrada de uma instalação consumidora típica na faixa 5 kHz a 2 MHz. Ele foi obtido a partir de medições realizadas em um apartamento de 127 m² consistindo em sete circuitos e alimentado por um sistema de

A. Silva Neto trabalha no Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil (e-mail: acacio@iee.usp.br).

Piantini trabalha no Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo (IEE/USP), São Paulo, Brasil (e-mail: piantini@iee.usp.br).

400 V - 230 V (TN). Uma simplificação, considerada razoável, é ignorar o comportamento da carga em baixa frequência e representá-la por uma indutância de $3,5 \mu\text{H}$. Como esta indutância decai com o número de circuitos da instalação, concluiu-se que, como primeira aproximação, sistemas TN podem ser modelados por uma indutância na faixa de $2 \mu\text{H}$ a $20 \mu\text{H}$ [12]. Nos cálculos das tensões induzidas apresentadas neste trabalho as cargas foram representadas através do circuito mostrado na Figura 1.

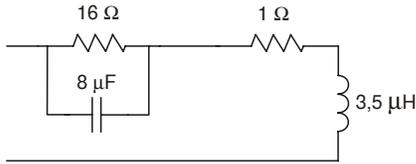


Fig. 1. Aproximação da impedância de entrada de uma instalação de baixa tensão típica (sistema TN) [12].

Em [13] foi apresentado um modelo para a representação de transformadores de distribuição para estudos de transferência de surtos no caso de solicitações impulsivas. O transformador utilizado neste trabalho é típico de distribuição: 30 kVA, 13,8 kV - 220 / 127 V Δ/Y (aterrado). Por meio de simulações preliminares foi mostrado em [6] que este transformador pode ser razoavelmente bem representado, para o cálculo de tensões induzidas, através de um indutor de $50 \mu\text{H}$ em série com o circuito mostrado na Figura 1.

A. Caso Base

As simulações foram realizadas, inicialmente, considerando a configuração mostrada na Figura 2, correspondente ao Caso Base. A linha simulada é monofásica, com 300 m de comprimento e casada em ambas as extremidades. O ponto de instalação do transformador é equidistante às extremidades da linha. As cargas foram conectadas à rede de baixa tensão por meio de ramais de ligação representados por indutâncias de $50 \mu\text{H}$, correspondendo a um ramal com 40 m de comprimento. As alturas dos condutores fase (h) e neutro são 6,8 m e 7,0 m respectivamente. A resistência de terra é igual a 20Ω , a indutância do condutor de descida do aterramento do neutro é igual $17,5 \mu\text{H}$, sendo o condutor neutro aterrado junto ao transformador e nos locais de instalação de cargas. A descarga atmosférica ocorre em frente ao transformador, a uma distância $d = 50 \text{ m}$ da linha. A amplitude da corrente de descarga (I) é 45 kA e sua velocidade de propagação é igual a 30 % da velocidade da luz no vácuo. A forma de onda da corrente é triangular, com tempos de frente e até zero respectivamente iguais a $3,0 \mu\text{s}$ e $150 \mu\text{s}$. O modelo de linha de transmissão (TL) foi usado para determinar a distribuição da corrente ao longo do canal de descarga, suposto com 3 km de comprimento. A menos que indicado em contrário, todas as simulações apresentadas no trabalho foram realizadas com as condições e parâmetros indicados acima.

As tensões induzidas calculadas no ponto P indicado na Figura 2 são mostradas na Figura 3.

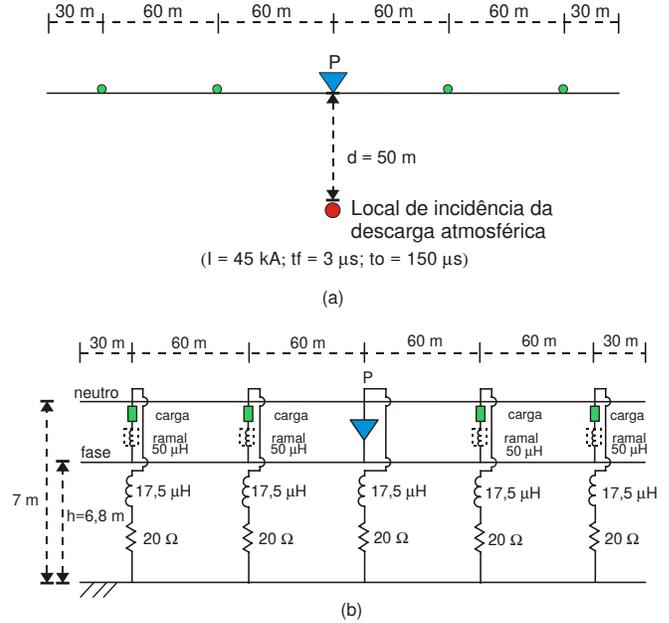


Fig. 2. Configuração da linha e condições relativas ao Caso Base. P: ponto onde são calculadas as tensões induzidas.

∇: transformador de distribuição. • cargas das unidades consumidoras.
a) vista superior b) vista lateral

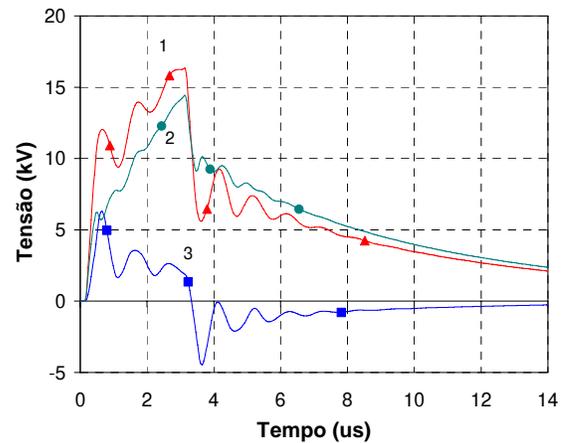


Fig. 3. Tensões induzidas no ponto P indicado na Fig. 2. Caso Base.

1 – tensão fase-terra 2 – tensão neutro-terra 3 – tensão fase-neutro

As formas de onda e as amplitudes das tensões induzidas dependem dos parâmetros da linha, das cargas consumidoras e dos parâmetros das descargas atmosféricas. Como pode-se observar, as tensões induzidas (fase-terra, fase-neutro, neutro-terra) apresentam amplitudes elevadas, variando entre 6 kV e aproximadamente 17 kV, e podem acarretar descargas disruptivas em um ou mais pontos da rede. A tensão induzida fase-terra atinge o seu valor máximo em instante próximo ao instante em que a corrente da descarga atinge a sua máxima amplitude ($3 \mu\text{s}$). Por outro lado, o valor de crista da tensão fase-neutro ocorre em instante inferior ao da tensão induzida fase-terra. Isto se deve à natureza predominantemente indutiva das cargas e do transformador. Observam-se também oscilações nas tensões induzidas na linha devido às diversas reflexões das ondas de tensão e corrente ocasionadas pela presença do transformador e das cargas consumidoras.

B. Altura do condutor fase

Com o objetivo de avaliar a influência da altura do condutor fase, foram realizadas duas simulações da configuração de rede apresentada na Figura 2, uma com $h = 6,8$ m e outra com $h = 6,4$ m. O único parâmetro alterado nas simulações foi a altura h do condutor fase, sendo os restantes iguais aos do Caso Base. As tensões induzidas nesses dois casos são mostradas na Figura 4.

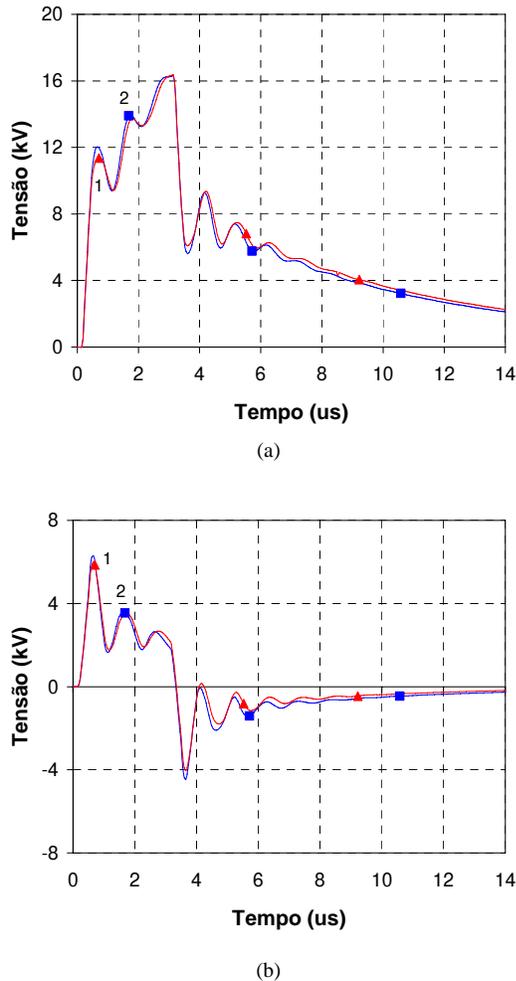


Fig. 4. Comportamento da tensão induzida em função da altura h do condutor fase.

Configuração da linha mostrada na Fig. 2.

1 - $h = 6,4$ m 2 - $h = 6,8$ m (Caso Base)

a) tensões fase-terra b) tensões fase-neutro

A tensão induzida é diretamente proporcional à altura do condutor. Quando um condutor não aterrado (fase) está localizado nas proximidades de um condutor aterrado (neutro), a tensão induzida no condutor fase diminui com a redução da distância entre eles (mantendo-se os demais parâmetros inalterados), devido ao acoplamento entre os condutores. Como na rede secundária convencional os condutores são instalados verticalmente, a mudança do afastamento dos condutores fase em relação ao neutro provoca a alteração da altura h do condutor fase. Assim, a redução na altura do condutor fase de 6,8 m (Caso Base) para 6,4 m pode diminuir ou aumentar a tensão fase-terra, dependendo de qual

dos efeitos é predominante. Embora as diferenças não sejam significativas, observa-se nessas simulações que, para a menor altura do condutor ($h = 6,4$ m) a tensão induzida é maior, o que leva à conclusão que, para essa configuração de linha, o efeito do acoplamento entre os condutores fase e neutro é predominante em relação ao efeito de redução da altura do condutor fase.

C. Posição ao longo da linha

Para essa análise foram realizadas simulações das configurações de linha apresentadas na Figura 5, onde o ponto de cálculo da tensão induzida e o ponto de incidência da descarga atmosférica foram variados. O termo x_d representa distância entre o ponto de cálculo da tensão induzida na linha e o ponto de aterramento do neutro mais próximo, enquanto que x indica distância entre o ponto de cálculo da tensão induzida e o ponto da linha mais próximo ao local de incidência da descarga atmosférica. As tensões induzidas fase-terra e fase-neutro no ponto P da Figura 5, assim como aquelas obtidas para o Caso Base ($x = 0$ m e $x_d = 0$ m), são mostradas na Figura 6.

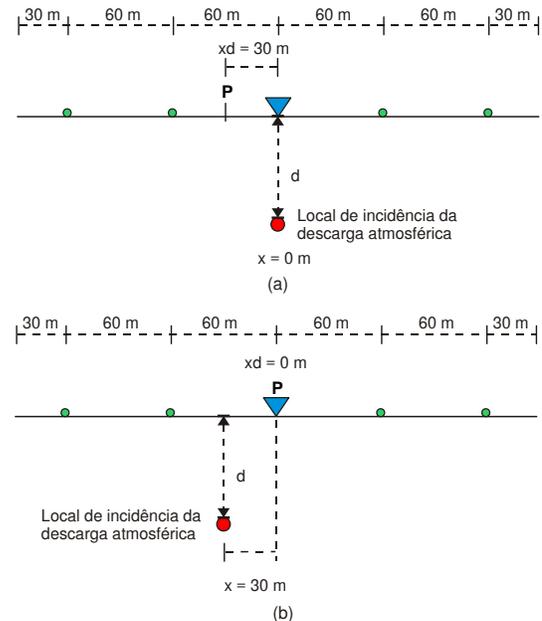


Fig. 5. Configuração da linha: análise das tensões induzidas ao longo na

linha. ∇ - transformador. \bullet - carga.

a) $x = 0$ m e $x_d = 30$ m (vista superior) b) $x = 30$ m e $x_d = 0$ m (vista superior)

Comparando as tensões induzidas fase-terra nas três configurações, verifica-se que a maior amplitude ocorre quando $x_d = 30$ m e $x = 0$ m (curva 1 na Figura 6-a). Neste caso, a amplitude é maior devido à maior distância entre o ponto de cálculo das tensões induzidas ao ponto de aterramento do condutor neutro ($x_d = 30$ m). A menor amplitude da tensão induzida fase-terra ocorre para a situação representada na Figura 5-b, onde $x_d = 0$ m e $x = 30$ m. Isso ocorre porque o ponto de cálculo das tensões induzidas está junto a um ponto de aterramento do condutor neutro e o ponto de incidência da descarga atmosférica está mais afastado ($x = 30$ m) que no Caso Base, em que $x = 0$ m. O

comportamento das tensões induzidas neutro-terra (não mostradas) é análogo ao das tensões fase-terra. Por esse motivo, as diferenças entre as tensões fase-neutro para as situações analisadas não são tão significativas, como pode ser observado na Figura 6-b.

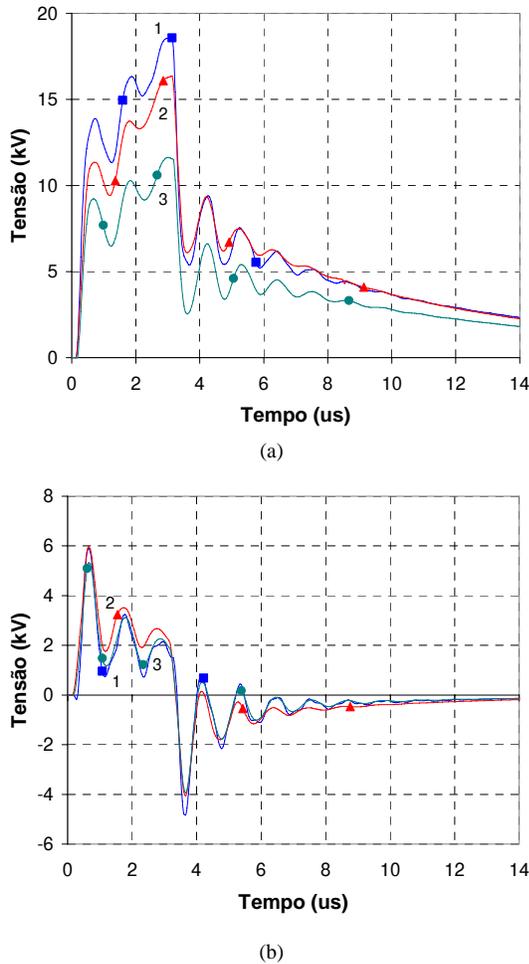


Fig. 6. Comportamento da tensão induzida em função das distâncias x_d e x .
 1) $x_d = 30$ m e $x = 0$ m (Fig 5-a)
 2) $x_d = 0$ m e $x = 0$ m (Fig. 2) – Caso Base
 3) $x_d = 0$ m e $x = 30$ m (Fig. 5-b)
 a) tensões fase-terra b) tensões fase-neutro

D. Distância entre pontos de aterramento do neutro

Neste caso a análise é feita com base na Figura 7, sendo o comprimento da linha igual a 450 m, com distância x_{at} entre pontos de aterramento do condutor neutro. Variou-se então a distância entre os pontos de aterramentos com o objetivo de estudar sua influência na tensão induzida. As distâncias utilizadas foram 30 m, 60 m e 90 m.

As tensões induzidas relativas a essas configurações são mostradas na Figura 8.

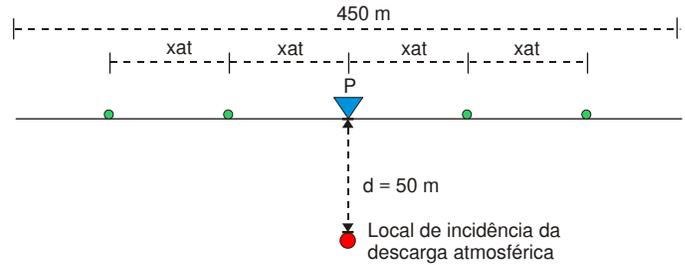


Fig. 7. Configurações de linha para análise da influência da distância entre pontos de aterramento do condutor neutro.
 ▽ - transformador • - carga

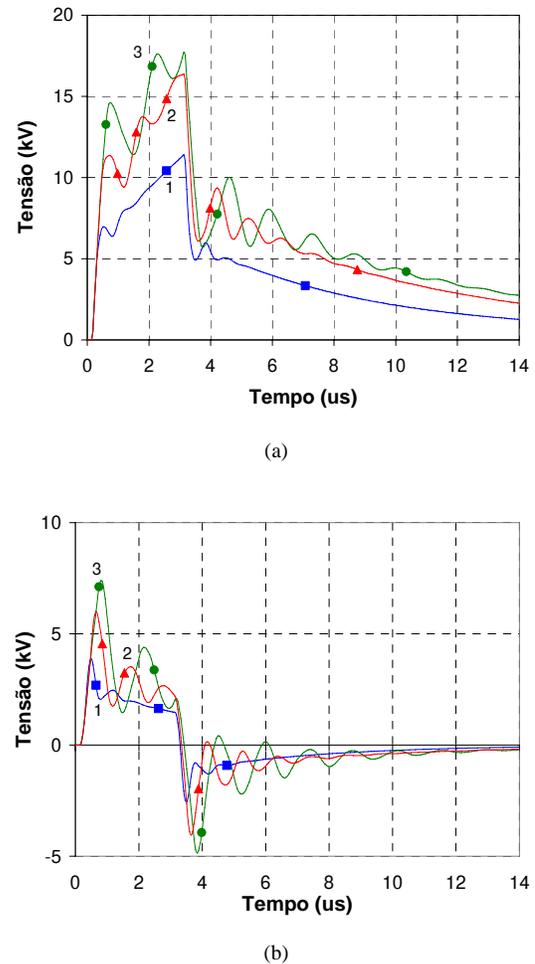


Fig. 8. Variação das tensões induzidas em função do intervalo de aterramento do condutor neutro.
 1) $x_{at} = 30$ m 2) $x_{at} = 60$ m 3) $x_{at} = 90$ m
 a) tensões fase-terra b) tensões fase-neutro

Pode-se observar que para o caso em que x_{at} é igual a 30 m a amplitude de tensão induzida é menor se comparada às das tensões correspondentes às outras distâncias. A diferença entre as tensões fase-terra é de aproximadamente 44 % em relação ao caso de $x_{at} = 60$ m e de aproximadamente 56 % em relação ao caso de $x_{at} = 90$ m. Para as tensões fase-neutro, as diferenças são de aproximadamente 56 % e 96 % em relação aos casos $x_{at} = 60$ m e $x_{at} = 90$ m, respectivamente. Fica evidente assim que, quanto menor o espaçamento entre os pontos de aterramento do condutor neutro, menor a amplitude

da tensão induzida, podendo essa variação ser significativa dependendo dos valores dos demais parâmetros.

E. Comprimento do ramal de ligação

Nas simulações anteriores a impedância do ramal de ligação foi considerada igual a $50 \mu\text{H}$, que corresponde à indutância de um condutor de 10 mm^2 de seção transversal com aproximadamente 40 m de comprimento. Com o objetivo de avaliar o efeito do comprimento l_r do ramal de ligação nas tensões induzidas na linha de BT foram consideradas as duas configurações indicadas na Figura 5, adotando porém o comprimento de 20 m para os ramos de ligação, o que equivale a uma indutância de $25 \mu\text{H}$. As tensões induzidas (fase-terra e fase-neutro) no ponto P das duas configurações mostradas na Figura 5 para os comprimentos de 40 m e 20 m são comparadas nas Figuras 9 e 10. Como observado, as tensões induzidas não apresentam diferenças significativas nessas duas situações, tanto para o caso em que as tensões foram calculadas entre o ramal e o transformador ($x = 0 \text{ m}$ e $x_d = 30 \text{ m}$, Figura 6-a) quanto para o caso em que foram calculadas junto ao transformador ($x = 30 \text{ m}$ e $x_d = 0 \text{ m}$, Figura 6-b).

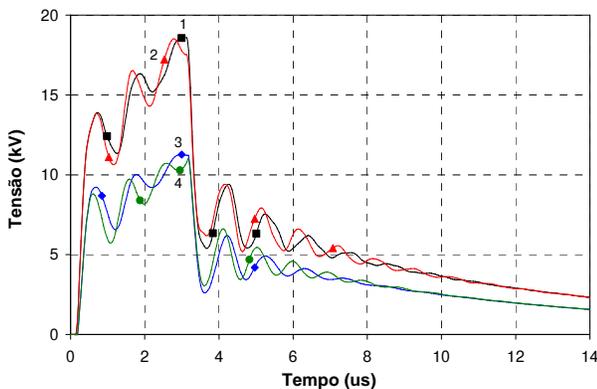
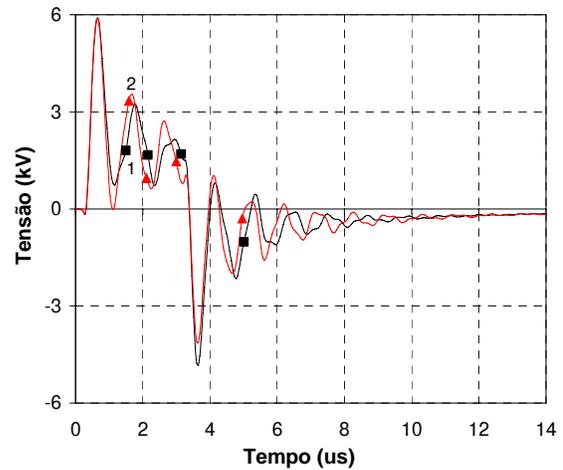
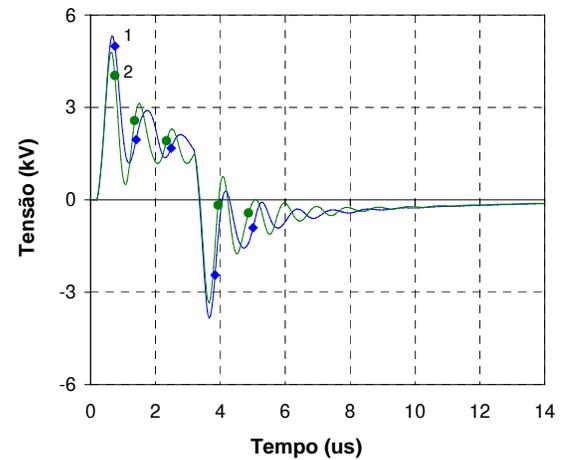


Fig. 9. Tensões induzidas (fase-terra) em diferentes pontos da linha em função do comprimento l_r do ramal de ligação.

- 1) $l_r = 40 \text{ m}$ ($x = 0 \text{ m}$ e $x_d = 30 \text{ m}$, Fig. 5-a)
- 2) $l_r = 20 \text{ m}$ ($x = 0 \text{ m}$ e $x_d = 30 \text{ m}$, Fig. 5-a)
- 3) $l_r = 40 \text{ m}$ ($x = 30 \text{ m}$ e $x_d = 0 \text{ m}$, Fig. 5-b)
- 4) $l_r = 20 \text{ m}$ ($x = 30 \text{ m}$ e $x_d = 0 \text{ m}$, Fig. 5-b)



(a)



(b)

Fig. 10. Variação das tensões induzidas fase-neutro em função do comprimento do ramal de ligação em diferentes pontos da linha.

Onda 1- $l_r = 40 \text{ m}$; onda 2- $l_r = 20 \text{ m}$.

a) $x = 0 \text{ m}$ e $x_d = 30 \text{ m}$ (Fig. 5-a)

b) $x = 30 \text{ m}$ e $x_d = 0 \text{ m}$ (Fig. 5-b)

III. Conclusões

Neste trabalho foram apresentados e discutidos alguns resultados referentes a sobretensões induzidas na rede de baixa tensão por descargas atmosféricas indiretas. As tensões induzidas podem atingir amplitudes elevadas, da ordem de 20 kV e 7 kV para as tensões fase-terra e fase-neutro respectivamente, valores estes que podem causar disrupções na rede ou queima de equipamentos dos consumidores ou do próprio transformador de distribuição. Foram consideradas correntes de descarga com amplitude de 45 kA e tempo de frente de 3 μs . No caso de descargas com amplitudes maiores e/ou tempos de frentes mais curtos as tensões induzidas apresentarão amplitudes mais elevadas. Dos parâmetros considerados, observa-se que o comprimento do ramal de ligação e a altura do condutor fase não influenciam muito as amplitudes das tensões induzidas, embora possam provocar alterações nas formas de onda. As amplitudes das tensões

induzidas são afetadas significativamente pela distância entre pontos de aterramento do neutro e pelo ponto de cálculo. Em geral as tensões induzidas fase-terra apresentam tempos de frente próximos ao tempo de frente da corrente de descarga, bem como oscilações provocadas pelas reflexões das ondas de tensão e corrente nos locais de instalação das cargas. Já as tensões fase-neutro atingem os seus valores máximos antes das tensões fase-terra devido à natureza predominantemente indutiva da carga.

IV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Piantini, A. G. Kanashiro, P. F. Obase, "Lightning surges transferred to the low-voltage network," in Proc. of the VII International Symposium on Lightning Protection, pp. 216-221, Curitiba, Nov. 2003.
- [2] W. Bassi, N. M. Matsuo, A. Piantini, "Currents and charge absorbed by low-voltage SPDs in overhead distribution systems due to lightning," in Proc. of the International Symposium on High Voltage Engineering, vol. 2, pp. 2.349.P1-2.352.P1, Aug. 1999.
- [3] A. Piantini, J. M. Janiszewski, "The effectiveness of surge arrester on the mitigation of Lightning induced voltages on distribution lines," in Proc. of the VIII International Symposium on Lightning Protection, pp. 777-796, São Paulo, Nov. 2005.
- [4] T. O. De Carvalho, A. Piantini A. Silva Neto, J. M. Janiszewski, R. C. Altafim, A. L. T. Nogueira, "Desenvolvimento de Sistema para Estudo de Tensões Induzidas em Linhas de Média Tensão por Descargas Atmosféricas," in VI Seminário Brasileiro sobre a Qualidade da Energia Elétrica (VI SBQEE), pp. 287-292, Belém, Ago. 2005.
- [5] A. Piantini, T. O. De Carvalho, A. Silva Neto, J. M. Janiszewski, R. C. Altafim, A. L. T. Nogueira, "System for simultaneous measurements of lightning induced voltages on lines with and without arresters," in the Proc. of the 27th International Conference on Lightning Protection, v. I. p. 297-302, Avignon, Sep. 2004.
- [6] A. Piantini, A. Silva Neto, "Tensões Induzidas em Linhas de Baixa Tensão por Descargas Atmosféricas," Transmission and Distribution Conference and Exposition IEEE/PES/T&D Latin América, São Paulo, Nov. 2004.
- [7] A. Silva Neto, A. Piantini, "Sobretensões Causadas por Descargas Atmosféricas Próximas a Redes de Baixa Tensão," in XVI Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (SENDI 2004), pp. 1-15, Brasília, Nov. 2004
- [8] C. Mirra, A. Porrino, A. Ardito, C. A. Nucci, "Lightning overvoltages in low voltage networks," in Proc. of the International Conference on Electricity Distribution (CIRED 97), Conference Publication n. 438. pp. 2.19.1 - 2.19.6, Birmingham, June 1997.
- [9] A. Silva Neto, A. Piantini, "Induced Overvoltages on LV lines with Twisted Conductors due to Indirect Strokes," in Proc. of the VIII International Symposium on Lightning Protection, pp. 477-482, São Paulo, Nov. 2005.
- [10] A. Piantini, J. M. Janiszewski "Induced voltages on distribution lines due to lightning discharges on nearby metallic structures," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 34, no. 5, pp. 2799-2802, Sep. 1998.
- [11] A. Piantini, J. M. Janiszewski, "The Extended Rusck Model for calculating lightning induced voltages on overhead lines," in Proc. of the VII International Symposium on Lightning Protection, pp. 151-155, Curitiba, Nov. 2003.
- [12] H. K. Hoidalén, "Lightning-induced voltages in low-voltage systems and its dependency on overhead line terminations," in Proc. of the 24th International Conference on Lightning Protection, pp. 287-292, Birmingham, Sep. 1998.
- [13] A. Piantini, A. G. Kanashiro, "A distribution transformer model for calculating transferred voltages, in Proc. of the 26th International Conference on Lightning Protection," vol II, pp. 429-434, Cracow, Poland, Sep. 2002.

V. BIOGRAFIAS



Acácio Silva Neto nasceu em Ribeirão Preto, Brasil, em 25 de fevereiro de 1977. Formou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista (UNESP) em 2000 e obteve o título de mestre em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 2004. Ingressou na Universidade de São Paulo em 2001 como pesquisador do Instituto de Eletrotécnica e Energia. Suas áreas de interesse envolvem os efeitos de descargas atmosféricas em sistemas elétricos. Atualmente está cursando o Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Energia.



Alexandre Piantini (M'04, SM'04) nasceu em Londrina, Brasil, em 10 de agosto de 1963. Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Paraná em 1985 e obteve os títulos de Mestre e Doutor em Engenharia pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 1991 e em 1997, respectivamente.

Ingressou na Universidade de São Paulo (USP) em 1986, como pesquisador do Instituto de Eletrotécnica e Energia. Atualmente é professor dos programas de pós-graduação em Energia (PIPGE/USP) e da Escola Politécnica (PEA/EPUSP) e coordenador do Centro de Estudos em Descargas Atmosféricas & Alta Tensão - CENDAT. Suas principais áreas de interesse estão relacionadas a descargas atmosféricas e a transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos. É autor ou co-autor de mais de 100 trabalhos científicos apresentados em congressos nacionais e internacionais ou publicados em revistas indexadas.