

A dramatic cityscape at sunset with a bright lightning bolt striking a skyscraper. The sky is a mix of deep red, orange, and dark blue, with a large, bright lightning bolt striking a tall building in the center. The city below is illuminated by the warm glow of the setting sun, with many windows lit up. The overall mood is intense and powerful.

Sobretensões Atmosféricas em Redes de Baixa Tensão

Este trabalho apresenta os principais mecanismos através dos quais as descargas atmosféricas podem gerar distúrbios eletromagnéticos em redes de distribuição de baixa tensão.

I - INTRODUÇÃO

A proliferação de equipamentos e dispositivos eletrônicos sensíveis a interferências, o crescimento do nível de exigência dos consumidores e os prejuízos decorrentes de problemas de qualidade de energia têm enfatizado a importância de se conhecer as características dos distúrbios em redes de baixa tensão. Em função da baixa suportabilidade das isolações dessas redes, uma parcela significativa das perturbações são causadas por descargas atmosféricas.

Os transitórios atmosféricos em sistemas de baixa tensão podem ser produzidos por diversos mecanismos, os quais podem ser classificados conforme as seguintes categorias (PIANTINI, 2010):

- Descargas intranuvem e entre nuvens;
- Descargas diretas no sistema de baixa tensão (tanto nos condutores da rede como nas instalações de uso final, incluindo os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas – SPDAs);
- Transferência da rede primária;
- Descargas indiretas (descargas nuvem-solo, incluindo descargas a árvores e estruturas próximas à rede).

Apresenta-se a seguir, uma discussão a respeito de cada um desses mecanismos de geração de surtos por descargas atmosféricas.

II - DESCARGAS INTRANUVEM E ENTRE NUVENS

As descargas intranuvem, entre nuvens e nuvem-ar (cloud discharges) têm duração típica entre 200ms e 500ms (COORAY, 2003) e representam, globalmente,

aproximadamente 75% das descargas atmosféricas (RAKOV, 2007). Ainda assim, o número de estudos a respeito de tais fenômenos é bem inferior àquele correspondente às descargas nuvem-solo, cujos efeitos deletérios têm impacto bem mais significativo à sociedade de modo geral e ao setor elétrico em particular. O principal interesse prático nas descargas em nuvem está relacionado à proteção de aeronaves, embora o curto intervalo de tempo entre os pulsos das tensões induzidas por tais descargas possa provocar degradação, danos e falhas de componentes eletrônicos de equipamentos sensíveis conectados à rede de baixa tensão.

III - DESCARGAS DIRETAS

Quando uma descarga incide em uma linha de distribuição, a corrente injetada no condutor divide-se no ponto de impacto, dando origem a duas ondas de tensão que se propagam em sentidos contrários. A amplitude prospectiva dessas tensões pode ser estimada através do produto da corrente que flui em cada sentido (metade da corrente da descarga) pela impedância de surto da linha, que normalmente fica na faixa de 400Ω a 550Ω . Assim, considerando uma impedância de 400Ω e uma descarga com corrente de 10 kA, cuja probabilidade de ser excedida é superior a 90% (ANDERSON; ERIKSSON, 1979), a sobretensão correspondente é de 2000 kV, muito acima do nível de suportabilidade da linha. Como consequência, descargas disruptivas ocorrerão entre os condutores e entre estes e a terra em vários pontos da linha, ocasionando diversas reflexões das ondas de tensão e de corrente, assim como uma redução da impedância efetiva de terra. Os consumidores próximos ao local do evento sofrerão um afundamento de tensão durante o curto-circuito e uma interrupção de curta duração quando da atuação do disjuntor para

eliminar a falta (PIANTINI, 2008).

Após a ocorrência das descargas disruptivas, uma estimativa grosseira do nível da sobretensão pode ser obtida, desprezando-se os efeitos de propagação, multiplicando-se a corrente total da descarga pela impedância de terra equivalente. Entretanto, mesmo no caso de um valor baixo da impedância de terra efetiva – 10Ω , por exemplo –, as amplitudes das tensões resultantes – 100kV no exemplo acima –, serão muito superiores ao nível de suportabilidade da linha a impulsos atmosféricos, o que irá provocar novas descargas disruptivas.

Em geral, as redes de baixa tensão não são tão sujeitas a descargas diretas devido aos seus comprimentos relativamente curtos e, principalmente, à blindagem proporcionada pela rede primária, pelas árvores e pelas estruturas localizadas em suas proximidades. Entretanto, em algumas áreas rurais e semiurbanas pode haver linhas de baixa tensão expostas com comprimentos superiores a 1000m e, no caso de descargas diretas, as sobretensões resultantes podem danificar equipamentos não protegidos conectados à rede.

Uma descarga direta no sistema de proteção ou em outras partes de uma instalação de uso final provoca uma elevação do potencial de terra que pode levar à operação dos dispositivos de proteção contra surtos ou a descargas disruptivas entre a estrutura e os condutores da rede elétrica. Em ambas as situações uma parcela da corrente da descarga será injetada na linha, produzindo sobretensões que irão se propagar pela rede. Essa parcela dependerá principalmente da impedância relativa da linha em relação às impedâncias de todos os outros possíveis caminhos para a corrente, como o sistema de aterramento local, tubulações metálicas e linhas telefônicas.

No caso de incidência de descarga

Em geral, as redes de baixa tensão não são tão sujeitas a descargas diretas devido aos seus comprimentos relativamente curtos e, principalmente, à blindagem proporcionada pela rede primária, pelas árvores e pelas estruturas localizadas em suas proximidades.

na rede primária, parte da corrente da descarga será injetada no condutor neutro, ocasionando sobretensões na rede de baixa tensão.

IV - TRANSFERÊNCIA DA REDE PRIMÁRIA

Sobretensões em redes de baixa tensão podem ser originadas no circuito primário em situações envolvendo tanto descargas diretas como indiretas. Em ambos os casos o transformador desempenha um papel importante na transferência dos surtos à rede secundária.

A incidência de descargas diretas nos condutores do circuito primário produz sobretensões na rede de baixa tensão devido à transferência via transformador e à injeção de corrente no neutro. Esta última se deve à elevação do potencial de terra causada pelo fluxo de corrente através da resistência de terra após a operação de para-raios do primário e/ou ocorrência de descargas disruptivas nos isoladores. As características

dos surtos transferidos têm ampla faixa de variação e dependem do local de incidência, ponto de observação, configuração da rede e amplitude e forma de onda da corrente da descarga, além das características do transformador e dos dispositivos de proteção. As sobretensões em redes de baixa tensão decorrentes de descargas diretas no primário foram estudadas, por exemplo, em (PIANTINI; KANASHIRO; PIANTINI, 2010; PIANTINI et al., 2014).

A avaliação das tensões transferidas da rede de média tensão devido a descargas incidentes nas suas proximidades requer o conhecimento das tensões induzidas no primário do transformador e do comportamento deste em função da frequência. Este tópico foi abordado em (PIANTINI, 1997; PIANTINI; MALAGODI, 1999) para o caso de transformadores em vazio; a presença da linha de baixa tensão foi considerada em (De Conti, A.; Visacro; 2005; BORGHETTI et al., 2009; PIANTINI, 2010; PIANTINI et al., 2013).

Um modelo adequado para representação do transformador é essencial para a avaliação de surtos transferidos. Uma forma relativamente comum de se simular o transformador é através do circuito PI puramente capacitivo, no qual são representadas as capacitâncias C1 (entre o primário e o tanque, aterrado), C2 (entre o secundário e o tanque, aterrado), e C12 (entre o primário e o secundário). Esse circuito, no entanto, não é apropriado para a análise de surtos transferidos, uma vez que as tensões previstas são grandemente superestimadas. Conforme mostrado em PIANTINI, 2010, o valor absoluto da relação entre os valores de pico das tensões calculada – usando o circuito PI capacitivo – e medida pode chegar a aproximadamente 20. Além disso, não apenas as amplitudes, mas também as formas de onda das tensões diferem substancialmente, o que destaca a importância de utilização de modelos adequados para a representação de transformadores (PIANTINI e

KANASHIRO, 2002).

V - DESCARGAS INDIRETAS

Quando uma descarga atmosférica atinge o solo ou algum objeto nas proximidades de uma rede de baixa tensão, as tensões que surgem nos condutores podem ser subdivididas de acordo com os seguintes componentes (PIANTINI, 2010):

- Tensões transferidas da rede primária, como mencionado no item IV;
- Tensões associadas à parcela da corrente da descarga interceptada pelos pontos de aterramento do condutor neutro;
- Tensões induzidas “diretamente”, devido ao acoplamento eletromagnético entre a linha e o canal da descarga.

No que tange às tensões associadas à parcela da corrente da descarga interceptada pelos pontos de aterramento do neutro, a partir de experimentos realizados no "International Center for Lightning Research and Testing" (ICLRT) em Camp Blanding, Florida, EUA, utilizando foguetes para provocar descargas, Rakov e Uman (2003) verificaram que, quando a descarga incide a algumas dezenas de metros da linha, uma parcela substancial da corrente total pode entrar no sistema pelos pontos de aterramento do condutor neutro. Em três casos mencionados, nos quais as distâncias entre a linha e o local de impacto foram de 60m, 40m e 19m, os valores de pico das correntes injetadas no sistema a partir das suas ligações à terra variaram na faixa de 5% a 18% do valor de pico da corrente total da descarga.

Por sua vez, as tensões induzidas “diretamente” têm sido objeto de um número crescente de pesquisas, dada a sua importância em termos tanto de amplitudes como de frequência de ocorrência (Clement; Michaud, 1993; HOIDALEN, 1998; PIANTINI; JANISZEWSKI, 1999, 2010; SILVA NETO; PIANTINI, 2005; PIANTINI, 2008, 2010; DE CONTI; SILVEIRA;

VISACRO, 2012; PIANTINI et al., 2013).

Em (Clement; Michaud, 1993), são relatados resultados obtidos em experimentos com descargas provocadas por foguetes e medições simultâneas de tensões induzidas em uma linha aérea de baixa tensão com 210m de comprimento e condutores trançados. Uma das extremidades da linha foi ligada a um transformador, enquanto que a outra foi conectada a um cabo subterrâneo de 60m de comprimento, terminado por para-raios de baixa tensão. O local de incidência da descarga – foram realizados 12 lançamentos – variou entre uma torre próxima à terminação do cabo e a uma distância de 50m desse ponto. As tensões induzidas foram medidas nos terminais de baixa tensão do transformador. As amplitudes das correntes das descargas variaram na faixa de 4kA a 50kA, tendo os valores máximos das tensões fase-terra e neutro-terra correspondentes ficado na faixa de 2kV a 12kV.

Uma investigação sobre o fenômeno foi realizada por Hoidalen (1998), na qual se discutiu o efeito da condutividade finita do solo sobre as tensões induzidas. A análise fez uso do modelo de acoplamento de Agrawal, Price e Gurbaxani (1980) para o cálculo das tensões induzidas em sistemas

de baixa tensão por descargas indiretas. A partir de medidas de resposta em frequência, foram propostos modelos simples para as impedâncias de entrada de instalações de consumidores e transformadores de distribuição típicos e investigadas as suas influências sobre as tensões induzidas em sistemas TN e IT simples. A análise mostrou que as amplitudes das tensões são fortemente dependentes da carga.

As influências de vários parâmetros nas tensões induzidas por descargas indiretas foram avaliadas por Piantini e Janiszewski (1999) para o caso de uma linha monofásica com 300m de comprimento. Em (SILVA NETO; PIANTINI, 2005), foi considerado o caso de uma linha multiplexada. A principal

diferença entre o cabo multiplexado e a rede convencional (“rede aberta”) é que o primeiro é caracterizado por um acoplamento bem mais forte entre os condutores, que estão muito mais próximos. Quanto maior for a impedância de surto mútua entre os condutores fase e o neutro, menores serão as amplitudes das tensões induzidas. Se o cabo é multiplexado os condutores são trançados e a sua impedância varia ao longo da linha. Entretanto, sendo a distância entre os condutores muito menor que suas alturas em relação ao solo, essa variação é pequena e, em casos práticos, pode ser desprezada. As simulações, realizadas por meio do Extended Rusck Model – ERM (Piantini,

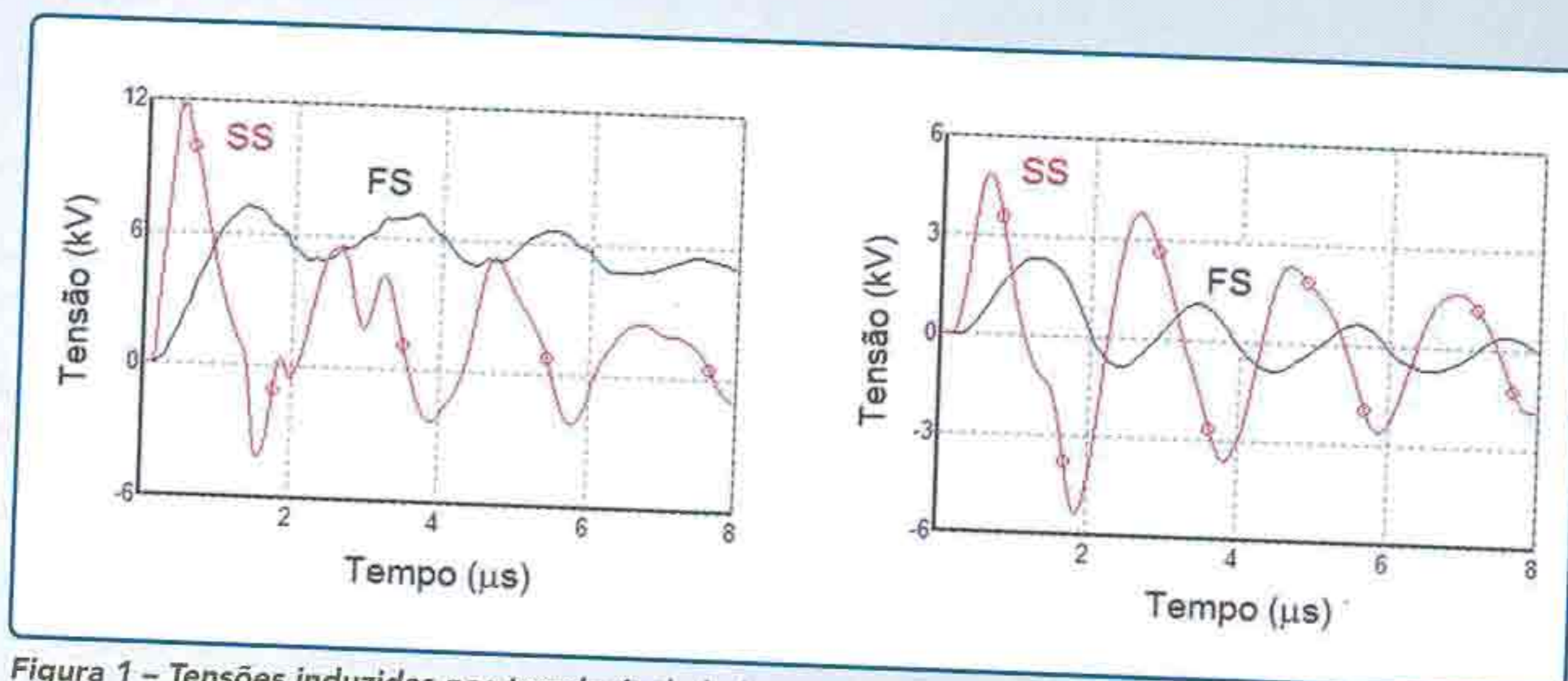


Figura 1 – Tensões induzidas nos terminais de baixa tensão do transformador para correntes típicas da primeira descarga (FS) e de descargas subsequentes (SS). Adaptada de (PIANTINI, 2010). a) fase-terra b) fase-neutro

Rittal – The System.

Faster – better – everywhere.

Primeiro do Mundo - Blue e+ Condicionadores de ar mais eficientes do mundo

- Economia energética de até 75%
- Aplicação mundial com diferentes voltagens
- Vida útil mais longa de todos os componentes do armário e dos condicionadores de ar
- Manuseio intuitivo com display de toque e interfaces inteligentes

Rittal Sistemas Eletromecânicos Ltda.
Cândido Portinari, 1174 • 05114-001 • São Paulo • SP • Brasil
+55 11 3622 2377 • info@rittal.com.br • www.rittal.com.br



1997, PIANTINI; JANISZEWSKI, 1998), mostraram que as tensões induzidas têm grande impacto no desempenho de redes de distribuição de baixa tensão frente a descargas atmosféricas.

A título de ilustração, a Figura 1 apresenta as tensões induzidas fase-terra e fase-neutro nos terminais de baixa tensão de um transformador de distribuição de uma rede de distribuição trifásica típica, considerando correntes representativas da primeira descarga ("first stroke", FS) e de descargas subsequentes ("subsequent strokes", SS). A linha tem 1km de comprimento e a distância entre os pontos de aterramento do neutro é de 200m, como indicado na Figura 2. As amplitudes das correntes são 30kA (FS) e 12kA (SS), as quais apresentam probabilidade de 50% de serem excedidos (ANDERSON; ERIKSSON, 1979). A velocidade de propagação é igual a 60% da velocidade da luz no vácuo. Os tempos de frente equivalentes (tf_{30}) das correntes são de aproximadamente 4,9 μ s e 0,5 μ s para a corrente da primeira descarga e da descarga subsequente, respectivamente. Esse parâmetro é definido como o tempo até a crista de uma corrente com frente linear que tem o mesmo intervalo de tempo entre os pontos correspondentes a 30% e 90% do valor máximo. O solo foi assumido como perfeitamente condutor. Detalhes adicionais das simulações são apresentados em (PIANTINI, 2010).

Na Figura 3 são comparadas as tensões fase-terra e fase-neutro nos terminais de baixa tensão do transformador para correntes com amplitude de 12kA e formas de onda triangulares. São considerados tempos de frente (tf , que para uma forma de onda triangular, correspondem ao tempo até a crista) de 0,5 μ s, 1 μ s e 2 μ s, sendo o tempo até o meio valor, na cauda, igual a 50 μ s em todos os casos. O tempo de frente da corrente influencia significativamente tanto a amplitude quanto a forma de onda da tensão induzida. Tensões induzidas associadas a correntes com tempos de subida mais curtos

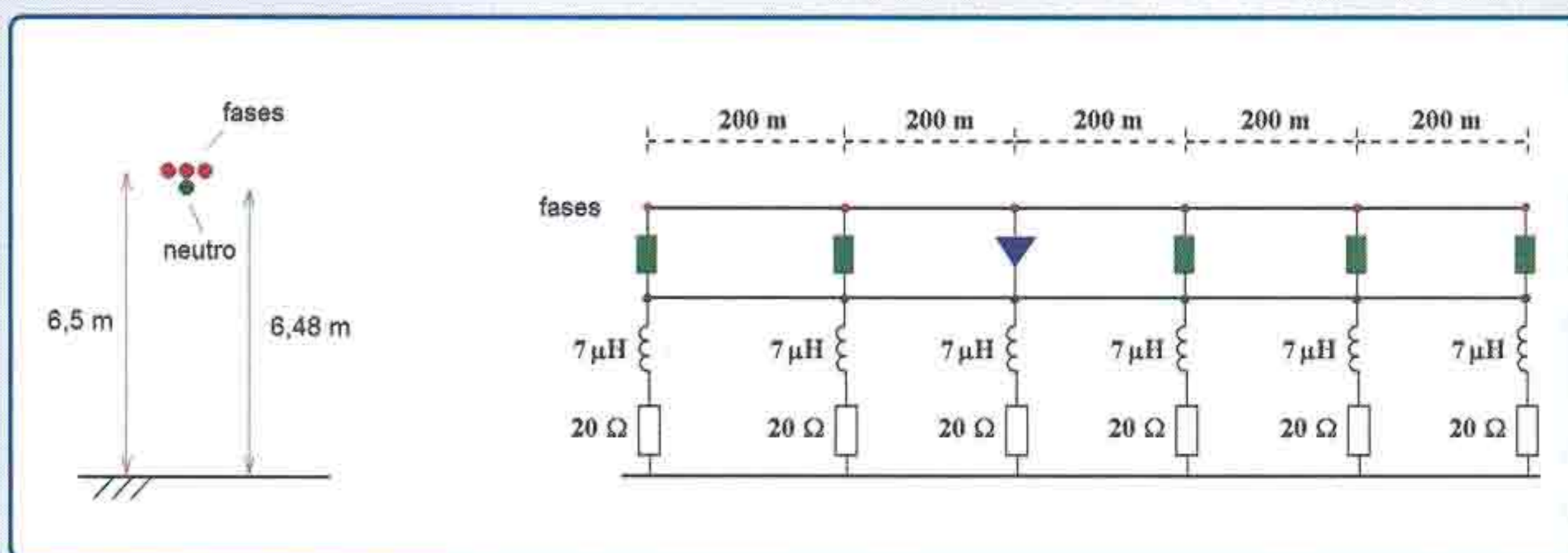


Figura 2 - Configuração da rede de baixa tensão.

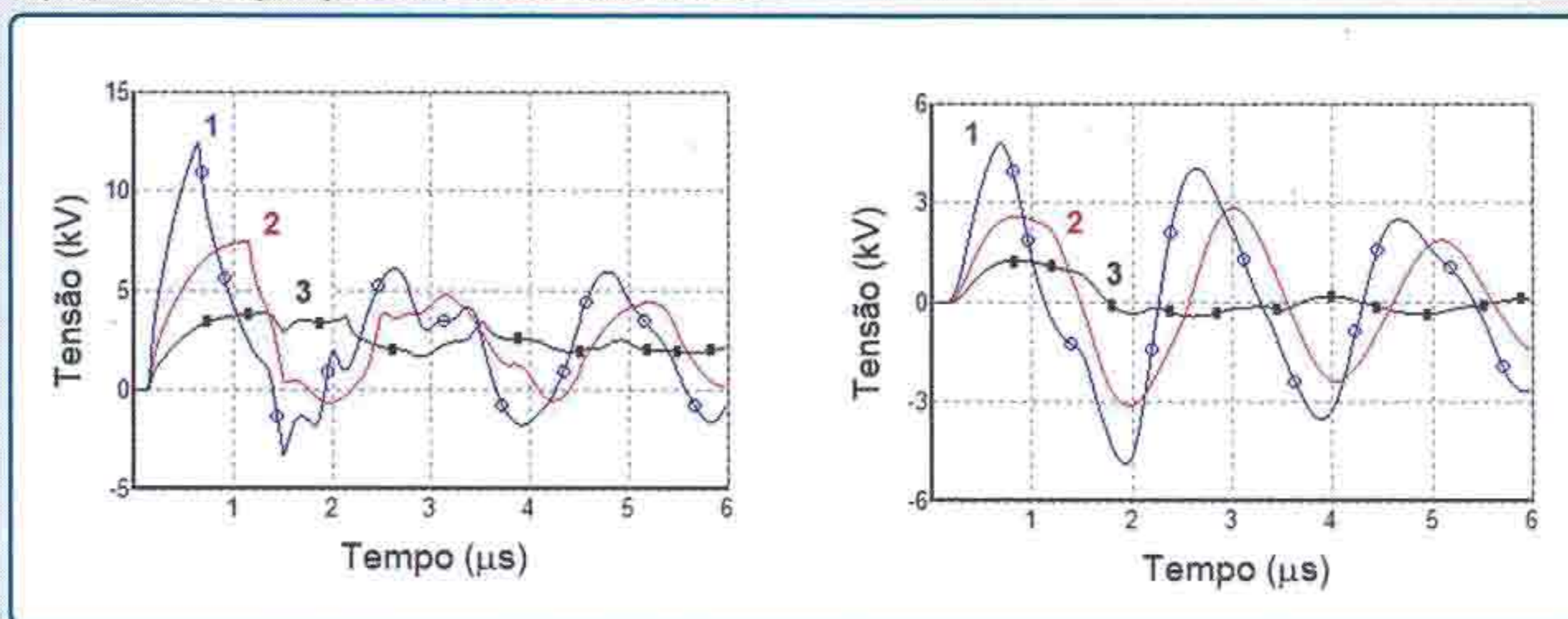


Figura 3 - Tensões induzidas nos terminais de baixa tensão do transformador para correntes com forma de onda triangular com diferentes tempos de frente (tf). Adaptada de (PIANTINI, 2010). Curva 1: $tf = 0.5\mu$ s; curva 2: $tf = 1.0\mu$ s; curva 3: $tf = 2.0\mu$ s. a) fase-terra b) fase-neutro

são caracterizadas por amplitudes maiores, tempos de frente mais curtos e oscilações mais pronunciadas.

As tensões fase-terra e neutro-terra (não mostradas na figura) tendem a atingir seus valores máximos em um instante fortemente relacionado ao tempo da frente da corrente da descarga. No entanto, as reflexões que ocorrem no transformador e nas entradas das instalações de baixa tensão também podem ter um efeito apreciável no tempo de frente das tensões fase-terra, especialmente quando o tempo de frente da corrente é maior que o tempo de propagação das ondas refletidas. Por essa razão, o tempo de crista da tensão correspondente ao caso de $tf = 2\mu$ s (curva 3 da Figura 3a) é menor que o tempo de frente da corrente. A influência do tempo de cauda da corrente é muito pequena e geralmente pode ser desprezada.

VI - CONCLUSÕES

As descargas atmosféricas causam vários problemas de qualidade de energia e geralmente têm impacto considerável no

número de danos e falhas de equipamentos, afundamentos de tensão e interrupções de fornecimento de energia. Devido ao uso generalizado e à crescente dependência da operação contínua de equipamentos eletrônicos sensíveis, tem havido uma crescente conscientização sobre a importância de mitigação desses efeitos.

Neste artigo, foram apresentados e discutidos os principais mecanismos de geração de sobretensões atmosféricas em redes de baixa tensão, com ênfase nos surtos induzidos por descargas indiretas, que são os mais importantes por conta de suas amplitudes e frequências de ocorrência. As magnitudes e formas de onda desses surtos dependem consideravelmente de muitos parâmetros da corrente da descarga e da configuração da rede, bem como das características do solo.

VII - REFERÊNCIAS

AGRAWAL, A. K.; PRICE, H. J.; GURBAXANI, S. *Transient response of a multiconductor transmission line excited by*

- a nonuniform electromagnetic field. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 22, p. 119-129, 1980.
- ANDERSON, R. B.; ERIKSSON, A. J. Lightning parameters for engineering application. *Electra*, 1979, n. 69, p. 65-102.
- BORGHETTI, A.; MORCHED, A. S.; NAPOLITANO, F.; NUCCI, C. A.; PAOLONE, M. Lightning-induced overvoltages transferred through distribution power transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 24, n. 1, p. 360-372, Jan. 2009.
- CLEMENT, M. and MICHAUD, J. Overvoltages on the low voltage distribution networks. Origins and characteristics. Consequences upon the construction of Electricite de France networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 12. Birmingham, Proceedings. CIRED. London: IEE, 1993, p. 2.16.1-2.16.6.
- COORAY, V. The mechanism of the lightning flash. In _____, *The Lightning Flash*. London: IEE, 2003. Cap. 4, p. 127-239. (IEE Power Engineering Series, 34).
- DE CONTI, A.; SILVEIRA, F. H.; VISACRO, S. Lightning overvoltages on complex low-voltage distribution networks. *Electric Power Systems Research*, v. 85, p. 7-15, Apr. 2012.
- DE CONTI, A.; VISACRO, S. Evaluation of lightning surges transferred from medium voltage to low-voltage networks. *IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.*, v. 152, n. 3, p. 351-356, 2005.
- HOIDALEN, H. K. Lightning-induced voltages in low-voltage systems and its dependency on overhead line terminations. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 24., Proceedings. ICLP, Birmingham, 1998, p. 287-292.
- PIANTINI, A. Tensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas aéreas, rurais e urbanas, considerando diferentes métodos de proteção - modelagens teórica e experimental e aplicação ao cálculo de interrupções. São Paulo, 1997. 316 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- PIANTINI, A. Lightning protection of overhead power distribution lines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 29., Uppsala. Proceedings. ICLP. Uppsala., 2008, p. 1-1-1 - 1-1-29. (Invited Lecture 4).
- PIANTINI, A. Lightning protection of low-voltage networks. In: COORAY, V. *Lightning Protection*. London: IET, 2010. Cap. 12, p. 553-634. (IET Power and Energy Series, 58).
- PIANTINI, A.; CARVALHO, T. O.; OBASE, P. F.; JANISZEWSKI, J. M.; SANTOS, G. J. G.; FAGUNDES, D. R. The influence of surge arrester location on over-voltages caused by direct lightning strikes to MV lines. *Journal of Energy and Power Engineering*, v. 8, p. 508-514, 2014.
- PIANTINI, A. et al. Lightning protection of low-voltage networks. Paris: CIGRÉ, 2013. 81 p. CIGRE Working Group C4.408. Technical Brochure 550. Aug. 2013.
- PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. Induced voltages on distribution lines due to lightning discharges on nearby metallic structures. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 34, n. 5, p. 2799-2802, 1998.
- PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. Lightning induced overvoltages on low-voltage lines. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 5., São Paulo. Proceedings. SIPDA. 1999. p. 234-239.
- PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. Lightning induced voltages on low-voltage lines with different configurations. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 30., 2010, Cagliari. Proceedings. ICLP 2010. p. Session 3A paper 1374 /1-7.
- PIANTINI, A.; KANASHIRO, A. G. A distribution transformer model for calculating transferred voltages. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 26., 2002, Cracow. Proceedings. ICLP. Cracow: Association of Polish Electrical Engineers, 2002. p. 430-434.
- PIANTINI, A.; KANASHIRO, A. G.; OBASE, P. F. Lightning surges transferred to the low-voltage network. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 7., 2003, Curitiba. Proceedings. SIPDA. p. 216-221.
- PIANTINI, A.; MALAGODI, C. V. S. Voltages transferred to the low-voltage side of distribution transformers due to lightning discharges close to overhead lines. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 5., São Paulo, 1999. Proceedings. SIPDA. p. 201-205.
- RAKOV, V. A. Lightning phenomenology and parameters important for lightning protection. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 9., Foz do Iguaçu, Proceedings. SIPDA. 2007, p. 541-564.
- RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. Artificial initiation (triggering) of lightning by ground-based activity. In: _____, *Lightning: physics and effects*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. Cap. 7, p. 265-307.
- SILVA NETO, A.; PIANINI, A. Induced overvoltages on LV lines with twisted conductors due to indirect strokes. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 8., 2005, São Paulo. Proceedings. SIPDA. p. 234-239.

*Alexandre Piantini graduou-se em Engenharia Elétrica pela UFPR em 1985 e obteve os títulos de Mestre e Doutor em Engenharia pela Escola Politécnica da USP em 1991 e 1997, respectivamente. Ingressou na USP em 1986, onde atualmente atua como Professor Livre-Docente no Programa de Pós-Graduação em Energia do IEE/USP. Suas principais áreas de interesse estão relacionadas a transitórios eletromagnéticos, qualidade de energia e modelagem de fenômenos associados a descargas atmosféricas e seus impactos em sistemas elétricos. É "Senior Member" do IEEE e coordenador do Centro de Estudos em Descargas Atmosféricas e Alta Tensão (CENDAT/USP). Tem atuado como membro de diversos grupos do CIGRE e do IEEE, tendo coordenado o CIGRE WG C4.408 ("Lightning Protection of Low-Voltage Networks"). Preside o "International Symposium on Lightning Protection" (SIPDA) e integra os comitês científicos de vários eventos internacionais. É membro do "Award Committee of the Sun & Grzybowski IEEE Award". Em 2018 recebeu o "ICLP Rudolf Heinrich Golde Award". É Editor Associado dos periódicos "IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility", "Electric Power Systems Research", "Electrical Engineering" e "High Voltage" e autor ou coautor de 4 CIGRE "Technical Brochures", 4 capítulos de livro e mais de 200 artigos publicados em revistas ou em anais de congressos nacionais e internacionais.