Proteção de Redes Elétricas de Baixa Tensão Contra Descargas Atmosféricas

S. Visacro F., A. R. De Conti, C. S. Pereira, F. H. Silveira[1], J. V. P. Duarte[2]

RESUMO

Neste trabalho, os autores descrevem os aspectos fundamentais da investigação que realizaram no projeto "Proteção de Redes de Distribuição de Baixa Tensão contra Descargas Atmosféricas" (Projeto P&D-ANEEL: CEMIG / LRC) e apresentam os principais resultados alcançados. Tais resultados decorrem de avaliações acerca dos diversos tipos de ocorrência na rede de baixa tensão associados à incidência de descargas sobre a rede ou em suas proximidades. A influência de diversas variáveis no desenvolvimento de surtos transferidos da média para a baixa tensão em redes de distribuição é investigada e, também, os efeitos de incidência e tensão induzida diretamente na rede secundária ou na instalação do consumidor. Tais avaliações foram desenvolvidas na perspectiva de proteção da rede da concessionária e das instalações consumidoras. Os resultados subsidiam a definição de práticas de proteção adequadas à preservação da qualidade da energia fornecida pela empresa.

PALAVRAS-CHAVE

Proteção contra Descargas Atmosféricas, Proteção de Redes de Distribuição de Baixa Tensão, Sobretensões Atmosféricas nos Consumidores, Tensão Induzida, Surtos Transferidos.

I. INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas correspondem a uma das principais causas de interrupções e desligamentos nas redes de energia elétrica no Brasil. Seus efeitos destrutivos freqüentemente se estendem a equipamentos e consumidores conectados. Tal quadro determina a necessidade de definição e avaliação de práticas de proteção que assegurem a manutenção do fornecimento de energia dentro de limites de qualidade desejáveis.

A carência de investigações aprofundadas no tema, que contemplem as condições particulares do sistema de distribuição instalado em Minas Gerais e as específicas condições ambientais locais, motivou a CEMIG a formular o projeto "Proteção de Redes Elétricas de Baixa Tensão contra Descargas Atmosféricas". Este foi contratado ao LRC, com duração aproximada de 2 anos. O presente texto resume as realizações e resultados deste projeto, descritas em detalhe em [1-21].

II. SOBRETENSÕES DE ORIGEM ATMOSFÉRICA EM REDES DE BAIXA TENSÃO: CONSIDERAÇÕES GERAIS

As sobretensões de origem atmosférica podem atingir as redes de baixa tensão e instalações consumidoras fundamentalmente através de quatro diferentes tipos de ocorrência: (i) incidência de descargas diretas na rede elétrica, (ii) tensões induzidas diretamente na baixa tensão, (ii) transferência através do transformador de distribuição de surtos originados na média tensão (por incidência direta ou tensão induzida) e (iv) incidência de descargas diretamente sobre unidades consumidoras.

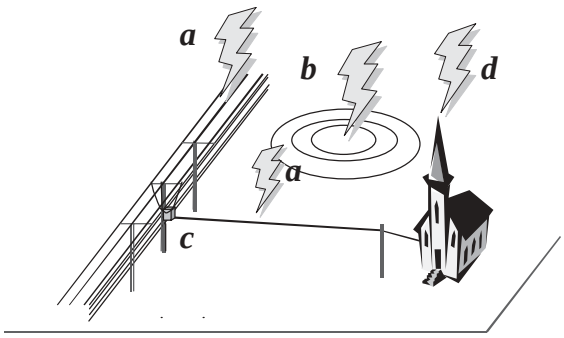

FIGURA 1 – Mecanismos de interação entre as descargas atmosféricas e as redes de distribuição.

As descargas diretas podem ocorrer sobre as redes de média e baixa tensão (figura 1-a), bem como sobre edificações (figura 1-d). Os efeitos da incidência direta de descargas em redes de distribuição são de elevada severidade e podem provocar diversos danos no sistema. Esse evento é mais comum no caso de redes rurais de média tensão ou em regiões periféricas de cidades, sendo mais raro em áreas urbanas, devido à presença de edificações elevadas. É muito pouco freqüente em redes de baixa tensão, instaladas, em sua maior parte, sob redes primárias.

Silvério Visacro F.: pesquisador e coordenador do LRC (UFMG). Email: Lrc@cpdee.ufmg.br

Clever Sebastião Pereira: pesquisador do LRC (UFMG). Email: clever@cpdee.ufmg.br

Alberto R. De Conti: pesquisador associado ao LRC, onde desenvolve tese de doutorado como bolsista do Cnpq. Email:conti@cpdee.ufmg.br

Fernando Henrique Silveira: pesquisador associado ao LRC, onde desenvolve tese de doutorado. Email:silveira@cpdee.ufmg.br

José Vicente P. Duarte: engenheiro da CEMIG - Engenharia de Distribuição . Email: vicente@cemig.com.br

[1] LRC - Lightning Research Center – Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas (UFMG-CEMIG).

[2] Companhia Energética de Minas Gerais.

Descargas que incidem nas proximidades das redes elétricas (figura 1-b) podem originar sobretensões induzidas, tanto nos circuitos de média quanto de baixa tensão. O grau de severidade dos efeitos associados a esse tipo de evento é muito menor do que aquele dos efeitos originados por incidência direta. Entretanto, sua freqüência de ocorrência é muito superior àquela das descargas diretas. Isto torna as sobretensões induzidas o fator crítico de condicionamento do desempenho das redes de distribuição.

A incidência direta na unidade consumidora pode gerar solicitações na rede da concessionária, especialmente se o aterramento de seu sistema de proteção contra descargas for conectado ao aterramento do medidor na entrada de serviço.

A disseminação de um surto na média tensão, gerado por descarga direta ou indireta, pode se estender até a rede de baixa tensão através do transformador de distribuição (figura 1-c). A intensidade e a forma das solicitações associadas a esse processo dependem de muitos fatores. O grau de severidade destas pode alcançar níveis críticos, tanto do ponto de vista dos equipamentos instalados na rede de baixa tensão, quanto dos consumidores a ela conectados.

III. ABRANGÊNCIA DA INVESTIGAÇÃO RELATIVA AO PROJETO

A. Tipos de solicitação

No contexto das possíveis solicitações da rede elétrica por descargas, o projeto realizou avaliações que abordam fundamentalmente três questões, contemplando, em cada caso, a análise de severidade correspondente da solicitação e as possibilidades de proteção associadas:

(i) Transferência de surtos para o circuito de baixa tensão a partir de ocorrências no circuito primário;

(ii) Surtos diretamente gerados na rede de baixa tensão por tensões induzidas;

(iii) Sobretensões resultantes na rede de baixa tensão em decorrência da incidência direta em unidades consumidoras.

Contemplou, ainda, o desenvolvimento de avaliações específicas em tópicos particulares, com destaque para os aterramentos elétricos da rede de distribuição.

Tais avaliações foram implementadas segundo duas perspectivas de proteção: aquela do sistema da concessionária e a dos consumidores.

B. Metodologia adotada

Adotou-se uma abordagem do problema que partiu da análise básica do comportamento do sistema frente às solicitações, através da consideração inicial de configurações simplificadas. Paulatinamente os desenvolvimentos evoluíram em complexidade na medida em que as situações e configurações de sistema mais representativas das aplicações reais passaram a ser consideradas.

As realizações de projeto basearam-se em modelagem e sistemática simulação computacional de condições e configurações consideradas representativas respectivamente de solicitações e de configuração de rede. Nessas simulações foi extensivamente empregado o EMTP (Electromagnetic Transient Program) para os estudos de transferência. Os estudos de *Tensão Induzida* e de *Aterramentos* adotaram modelos computacionais próprios desenvolvidos anteriormente pela equipe do LRC.

Numa primeira etapa do projeto, as avaliações da importância relativa dos diversos mecanismos de solicitação das redes de baixa tensão por descarga indicaram uma grande probabilidade de ocorrência de transferência de surtos para o secundário através do transformador de distribuição. Em decorrência, optou-se por privilegiar a investigação desse fenômeno, ao qual foi dedicada a maior parcela dos desenvolvimentos de projeto. A investigação dos demais mecanismos sucedeu àquela da transferência e, usualmente, tomou os resultados desse processo para referência.

C. Configuração Básica do Sistema Analisado

A primeira realização do projeto consistiu na elaboração de um documento descritivo detalhado do sistema de distribuição da empresa, contemplando sua configuração, componentes, as práticas e metodologias em uso para sua proteção [1, cap. III]. A atividade proporcionou à equipe do projeto um conhecimento detalhado do sistema da empresa.

A rede aérea secundária foi o foco do projeto. Dado o acoplamento desta com a rede primária, a consideração de ambas foi necessária para a realização dos desenvolvimentos. A figura 2 representa simplificadamente a conexão de um transformador de distribuição às cargas instaladas na rede de baixa tensão. Usualmente, dispositivos pára-raios protegem os seus terminais de média tensão e, em alguns casos, também podem ser instalados junto aos seus terminais de baixa tensão. O condutor neutro é multi-aterrado e comum às redes de média e baixa tensão, estando conectado ao tanque do transformador. Os transformadores podem ser trifásicos (Δ-Y) ou monofásicos (secundário com tape central). R_T e R_C representam, respectivamente, os aterramentos do transformador e dos consumidores conectados. C1 a C3 representam as cargas consumidoras conectadas à rede de baixa tensão.

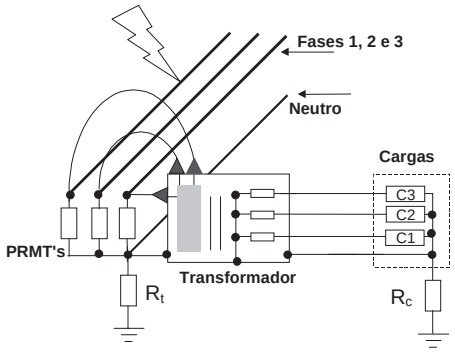

FIGURA 2 - Caracterização simplificada da conexão do transformador de distribuição às cargas consumidoras em redes de baixa tensão.

Os condutores da rede de baixa tensão (RBT) podem ter configuração convencional (verticalmente espaçada) ou multiplexada (condutores fase isolados, entrelaçados em torno do condutor neutro). Em redes rurais, muitas vezes um transformador alimenta um único consumidor ou um pequeno conjunto concentrado de cargas. Em redes urbanas, ramais de até 200 m podem ser derivados a partir do transformador para alimentar diversos consumidores.

Adotou-se inicialmente um modelo específico de transformador [22] e as redes de baixa tensão convencionais e multiplexadas foram representadas por modelos com parâmetros distribuídos e variáveis na freqüência. A resistividade do solo foi mantida fixa em 1000 Ω. R_T e R_C foram representados como simples resistências, já que este é o parâmetro usualmente medido pelas concessionárias. O condutor de descida que conecta R_T ao tanque do transformador foi modelado por uma indutância de 1 μH/m. e as cargas consumidoras por resistências de 30 Ω.

IV. DESENVOLVIMENTOS

A. Sobretensões Transferidas através de Transformadores

A transferência de surtos da média para a baixa tensão através do transformador de distribuição pode ocorrer de duas maneiras distintas e complementares. A primeira corresponde ao acoplamento direto entre os dois circuitos através dos enrolamentos do transformador e depende principalmente da constituição física do equipamento e das freqüências representativas da sobretensão solicitante. As capacitâncias parasitas do transformador transferem a parcela mais rápida do surto incidente para a rede de baixa tensão.

A segunda parcela está associada à condução da corrente de surto pelos pára-raios de proteção do transformador na média tensão. Idealmente, seria desejável que essa corrente fosse totalmente drenada pelo aterramento do transformador (R_T), o que não ocorre na prática. Uma parte da corrente pode ser direcionada para o circuito de baixa tensão através dos condutores neutro (conectado ao tanque do transformador) e fase. A amplitude dessa parcela é tanto maior quanto maior a elevação de potencial no aterramento do transformador.

Assumindo-se o circuito da figura 2, foram realizadas simulações com uso do EMTP. Considerou-se a injeção de 1 e 10 kA (5/60 μs) diretamente no primário do transformador, representando, respectivamente, o limite superior das correntes associadas a sobretensões induzidas e descargas diretas ocorridas nas redes de média tensão. Os tempos de frente e de meia-onda utilizados foram derivados dos dados representativos de descargas medidas na Estação do Morro do Cachimbo.

Verificou-se nos desenvolvimentos que a parcela associada à elevação de potencial em R_T predomina amplamente sobre a transferência por acoplamento capacitivo.

As avaliações pertinentes a esse tópico se iniciaram considerando-se uma rede secundária, a descoberto, com um único consumidor de carga concentrada no final de uma rede de certo comprimento. Foram desenvolvidas análises de sensibilidade para esclarecer o papel de cada uma das variáveis do sistema e do sinal solicitante na amplitude da sobretensão resultante no transformador e no consumidor. Estas são referidas nos itens 6 a 14 da tabela 1.

À parte o interesse de conferir relevo ao efeito de cada variável, através da abordagem cartesiana, tal circuito apresenta, também, certa representatividade para a situação de consumidor rural. Assim, as conclusões desenvolvidas para essa condição encontram aplicação imediata.

Em seguida, passou a ser contemplada a presença de consumidores distribuídos, compondo típicas ramificações da rede secundária em regiões urbanas. Verificado o efeito das ramificações, foi incluído o acoplamento entre a rede primária e secundária, e verificou-se que, basicamente, a qualidade dos resultados e conclusões desenvolvidos não foram alterados. Para concluir a abordagem do fenômeno da transferência através do transformador de distribuição, foi incluída a análise relativa aos efeitos de disrupções entre média e baixa tensão (Figura 3).

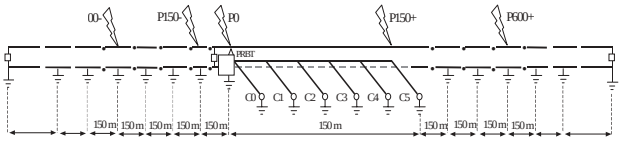

FIGURA 3 – Configuração de rede de baixa tensão analisada (transferência)

B. Tensão Induzida nas Redes de Baixa Tensão

Para se avaliar os efeitos de tensão induzida na rede de baixa tensão, foi analisada uma condição considerada crítica, correspondente à incidência de descarga a uma distância de 50 m da rede, conforme ilustra a figura 4. A onda de corrente incidente foi aproximada por uma rampa (1,2/50 μs) de valor de pico variável, sendo determinadas as amplitudes da sobretensão resultante no secundário do transformador e no consumidor, para várias hipóteses representativas das condições do circuito.

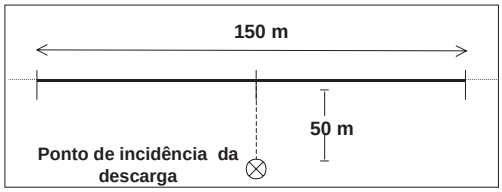

FIGURA 4 - Representação geométrica da linha e ponto de incidência da descarga para avaliações de tensão induzida.

C. Surtos gerados por incidência direta no consumidor

Verificou-se que o mecanismo de estabelecimento da sobretensão na rede secundária para esse tipo de ocorrência (figura 5) é muito semelhante àquele gerado pela elevação de potencial no aterramento do transformador de distribuição, embora o sentido da corrente seja reverso. As análises desenvolvidas puderam, então, fazer recurso aos resultados das simulações implementadas para as avaliações daquele tipo de evento. Evidentemente, foram observados cuidados com relação aos aspectos diferenciais envolvidos nas ocorrências, como é o caso da amplitude de corrente.

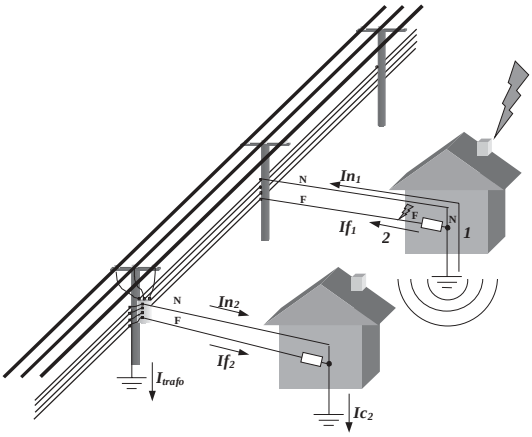

FIGURA 5 – Configuração representativa de incidência direta no consumidor

D. Configurações de Aterramentos Elétricos da Rede

Através de simulação, recorrendo-se a uma elaborada modelagem computacional, foi avaliada a eficiência das configurações de aterramento praticadas e recomendadas pelas normas da empresa. Foram propostas configurações otimizadas de melhor eficiência tanto para rede urbana quanto rural.

V. RESULTADOS E ANÁLISES

Por carência de espaço, neste texto são apresentados apenas os resultados objetivos das análises desenvolvidas no decorrer do projeto, na forma de um conjunto de conclusões e de algumas recomendações específicas. As análises e as justificativas que sustentam tais conclusões estão detalhadas na referência [1].

RESULTADOS DAS AVALIAÇÕES

Representatividade das ondas de corrente solicitantes

1. A solicitação de maior importância corresponde à transferência da média para baixa tensão, com percurso de correntes moderadas (limite superior da ordem de 1kA) pelos cabos de descida, associadas à tensão induzida. Uma condição crítica e corresponde ao fluxo de corrente de 10 kA, associada a parcela de uma corrente de incidência direta em local próximo ao transformador.
2. Na falta de uma indicação sustentada na literatura da forma de onda representativa, o uso da onda 5/60µs, seguida de análise de sensibilidade do efeito da variação do tempo de frente de onda, é um procedimento consistente.

Transferência pelo transformador

3. Importância relativa das parcelas de transferências de surto através do transformador: Predominância absoluta da transferência por elevação de potencial no aterramento, em relação à transferência direta através do acoplamento capacitivo entre as espiras do primário e secundário do transformador.
4. O modelo do transformador perde importância: embora para diferentes potências as respostas sejam diferentes, a importância relativa da transferência direta continua muito reduzida.
5. Para a maior parte das análises relativas à transferência de surtos da média para a baixa tensão, é suficiente representar os pára-raios, a indutância do cabo de descida, a impedância do aterramento do transformador e a indutância do seu secundário.

Comportamentos básicos associados à transferência: 1 consumidor no final da rede (sobretensão na carga)

6. Influência da configuração física da rede de baixa tensão (redes convencional x multiplexada): Menores sobretensões para a rede multiplexada (significativas diferenças: 1/3 a 1/2).

Influência do comprimento da rede de baixa tensão:

7. Comportamento: sobretensão cresce com o comprimento.
8. Ocorre saturação deste crescimento (rede convencional: 100 a 150 m ; rede multiplexada: a aproximadamente 300 m, sendo o crescimento da sobretensão, neste caso, mais suave e contínuo).
9. O uso de redes menores (~50 m) limitaria as sobretensões.

Influência dos aterramentos do circuito:

10. Aterramento do Transformador (R_T): Quanto menor o valor de R_T, mais reduzida é a sobretensão transferida (depende de parâmetros como ρ)
11. A sobretensão cresce com a relação "R_T / R_C", sendo importante manter valor reduzido para tal relação.
12. Influência dos tempos característicos do surto Surtos mais rápidos promovem maiores sobretensões no consumidor e no trafo: (1,2/50 : 5/60 : 8/20) à (amplitude: ~ 3:2:1)

Influência das cargas consumidoras:

13. Existe quase uma proporcionalidade inversa entre o "módulo da carga" e a sobretensão na carga. Assim, a carga do consumidor é um fator crítico: (Exemplo: R_{carga}=30Ω:10 Ω - Sobretensões: 2,5 kV:1 kV).
14. Pouca influência dos efeitos capacitivo e indutivo para os valores assumidos para L e C (a sobretensão mantém a amplitude, embora adquira certa oscilação).

Influência do uso de dispositivos pára-raios na rede de baixa tensão

Uso de pára-raios no secundário do transformador

15. Grampeia a tensão no secundário do trafo, protegendo-o.
16. Os níveis de tensão nos medidores na entrada do consumidor são menores que sua suportabilidade (> 5kV) para correntes injetadas no pára-raios primários da ordem de 1 kA.
17. Promove aumento da sobretensão na carga (até 30%). Aumenta mais para valores mais elevados da relação "R_T / R_C".
18. Esse efeito é mais acentuado para correntes maiores.

Aplicação de 1 pára-raios em posição intermediária (substitui o do secundário do transformador)

19. Proteção do transformador: Este fica desguarnecido, embora o NBI do seu secundário seja relativamente elevado (35 a 40 kV).
20. Também os consumidores ligados diretamente ao transformador ficam desprotegidos.
21. Proteção da carga: Naturalmente deve ser melhor se o pára-raios está mais próximo da carga.

Aplicação de conjunto adicional de pára-raios em posição intermediária na baixa tensão

(a) Sem aterramento no PR

22. A sobretensão cresce no consumidor à medida que o ponto de instalação do PR se afasta do consumidor. A prática é tanto mais efetiva quanto menor for "R_T / R_C".
23. Proteção assegurada apenas para instalação junto ao consumidor (medidor). Mesmo assim, não deve haver distância considerável entre o ponto de entrada e as cargas da residência, sobretudo se houver aterramento interno.
24. Para distâncias de 45 m do consumidor, há influência apenas se $R_T << R_C$, com pequena redução da sobretensão no consumidor. Nos outros casos praticamente não muda em relação à ausência de PR adicional. Para dist. de 30 e 15 m há redução discreta da sobretensão no consumidor: (~10 a 15% para 30 m e 20 a 30% para 15 m).

(b) Com aterramento no PR (R_i)

25. Existe diferença em relação à condição de ausência de aterramento apenas se $R_I << R_T$, com pequena redução da sobretensão no consumidor.
26. O comportamento é afetado apenas discretamente pelo tempo de frente e amplitude da onda de corrente. No caso da amplitude, devido ao efeito do PR, a relação entre a sobretensão e a corrente é menor que a linear ($I = 10kA \rightarrow V < V_{1kA} \times 10$).

Influência do nível de proteção dos pára-raios (d= 15m, 30m)

27. O efeito da variação do nível de proteção (para distâncias de 15 e 30 m do PR ao consumidor) é muito discreto na sobretensão. Apenas se $R_I << R_T$ o efeito se manifesta. O eventual aumento do nível de proteção afetaria pouco a proteção do consumidor. Assim, a proteção é assegurada apenas quando o PR é instalado diretamente na carga.

Influência de ramificações na rede de baixa tensão (1 ramo)

28. Na Rede Multiplexada os efeitos são menos intensos.
29. À exceção de Po (consumidor ligado ao transformador), o elemento mais penalizado (consumidor no final da rede, C5, ou nova carga, Cx) é aquele de menor resistência de aterramento.

Efeito no final da rede:

30. A presença de uma carga numa posição anterior à metade da rede (mais próxima ao transformador) tende a reduzir a sobretensão no final da rede. A redução será tanto maior quanto mais próximo do transformador estiver a nova carga. A redução será tanto maior quanto menor for a resistência de aterramento da nova carga (R_{CX}).
31. A presença de uma carga numa posição posterior à metade da rede (mais próxima do final da rede) tende a aumentar a sobretensão no final da rede. A piora será tanto maior quanto mais próximo do consumidor estiver a carga. A piora será tanto maior quanto menor for R_{CX} desta nova carga.

Efeito na nova carga:

32. A nova carga é sempre penalizada com maior sobretensão, exceto em P_0. A penalização é tanto maior quanto menor for R_{CX}.

Redes Rurais

33. A presença de aterramentos no neutro da rede de média tensão nos postes adjacentes ao transformador que alimenta o consumidor é importante para reduzir os efeitos dos surtos gerados em pontos distantes e que se propagam em direção ao transformador.
34. Usualmente há sobretensões menores na carga, pois:1. o medidor está junto ao poste (transformador) e o comprimento da ligação interna é pequeno. 2.A resistência de terra do consumidor é muito elevada (não é esperada a existência de aterramento interno: $R_T/R_C \rightarrow 0$).
35. Se o comprimento da rede interna for grande ou, eventualmente, houver R_C de valor reduzido , a sobretensão pode aumentar .

35.1. Condições de risco: No eventual fluxo de corrente de surto pelo aterramento do transformador, pela inexistência de aterramento interno na instalação do consumidor, podem ser estabelecidos valores muito elevados de tensão fase-terra e neutro-terra. Isto denota a importância de obter valor reduzido de R_T para o consumidor rural.

O uso de pára-raios (PR):

36. Reduz à ordem da metade a amplitude dos surtos que só são significativos se L é longo (L ~75m).
37. Proteção do transformador: Em princípio, apenas pela transferência não é necessária, exceto se houvesse aterramento local interno. Entretanto, na ocorrência de rupturas em algum ponto da RBT associadas aos elevados níveis de tensão fase-terra e neutro-terra desenvolvidos, seus enrolamentos podem ser submetidos a correntes intensas. Esta condição é idêntica à hipótese $R_T / R_C \rightarrow 0$.
38. Em caso de consumidores múltiplos derivando de um poste com aterramento exclusivo além do transformador (onde estão os diversos medidores) a condição é diferente: com possibilidade de sobretensões superiores na carga (apesar de uma possível relação R_T/R_C favorável).
39. Em geral, com o emprego de redes multiplexadas, as sobretensões são bem menores.

Redes Urbanas

40. Representatividade do circuito ramificado com 6 consumidores e 150 m adotado: em princípio a condição é mais severa que aquela em que a carga de cada poste fosse disseminada e não concentrada numa resistência de 30 Ω e em que houvesse rede simétrica em relação ao poste.
41. Os níveis de sobretensão são muito reduzidos para correntes da ordem de 1 kA : não ultrapassam 1 kV. Por conseguinte, nas avaliações, investigou-se o comportamento para uma condição crítica, considerando I = 10 kA (itens 13.3 a 13.8 [1]).
42. Na ausência de pára-raios, o secundário do transformador e os consumidores alimentados diretamente pelo transformador são submetidos às maiores sobretensões.

Comportamento na presença de PR no secundário do trafo:

43. Perfil da sobretensão: Cresce ao afastar-se do transformador.
44. No caso em que as resistências de aterramento dos consumidores é menor que a do transformador ($R_C < R_T$), há uma exceção a este comportamento. Neste caso tem-se: 44.1 Para rede convencional: vale comportamento descrito (exceção: C1, consumidor ligado ao primeiro poste após o transformador). 44.2 Para rede multiplexada: tem-se comportamento inverso, com decrescimento da sobretensão no consumidor ao afastar-se do transformador.
45. Efeito da redução de R_T do Transformador: Redução generalizada da sobretensão nos consumidores. Entretanto, para rede muito ramificada, os níveis de redu-

ção da sobretensão não são tão significativos: (20 a 40% para redução de R_T à metade). Maiores reduções relativas ocorrem se a resistência de aterramento dos consumidores (R_C) é elevada.

Efeito da melhoria localizada de Aterramento (1 consumidor)Apenas um consumidor tem baixo valor de resistência de aterramento (exemplo: existência de edificação com SPDA - sistema de proteção contra descargas com anel de equalização de potencial no solo):

46. Com a melhoria da resistência de aterramento do consumidor ligado ao transformador (Co), há redução generalizada da sobretensão no ramal, embora Co seja penalizado.
47. A sobretensão ao longo do ramal praticamente não é afetada pela redução de R_C de um dos demais consumidores. Entretanto, o consumidor cuja resistência de aterramento foi reduzida é severamente penalizado, com aumento da sobretensão associado ao direcionamento da corrente de surto para seu aterramento.

48 Instalação de um só PR (comparação: sem PR, PR no secundário ou PR no final da rede):Instalação apenas no transformador: protege apenas este equipamento. A sobretensão cresce a partir de P_1 (consumidor ligado no primeiro poste além daquele do transformador). O comportamento é semelhante àquele referido no item 17 desta tabela.Instalação no final da rede: protege apenas o último consumidor (C5) e melhora moderadamente a sobretensão em C4 (consumidor alimentado pelo penúltimo poste). Não influencia nos demais

49. Instalação de dois pára-raios (um no secundário do trafo)Aparentemente a melhor proteção média é provida pela instalação do PR adicional no meio do trecho. A melhoria da resistência de aterramento do PR adicional (R_I) só reduz a sobretensão (e, ainda, moderadamente) se o PR adicional está em P1, poste adjacente ao transformador.

50. Instalação de 3 pára-raios (um no secundário do transformador e outros dois no meio e no final da rede)O consumidor junto ao transformador (Po) não é afetado. Consegue-se controle razoável do perfil da tensão ao longo da rede. O efeito do aterramento dos PR's adicionais pode ser importante.

Efeito do acoplamento das redes de média e baixa tensão (rede real: neutro aterrado)

(a) Carga concentrada (única: 1 consumidor, L=30m)

51. Quando a sobretensão se dirige para o transformador e a(s) carga(s) estão antes dele, há significativo aumento do perfil da sobretensão ao longo da rede (da ordem de 1:2).
52. Quando a sobretensão se dirige para o transformador e a(s) carga(s) estão além (após) dele, há significativa redução do perfil da sobretensão ao longo da rede (da ordem de 2:1).
53. O efeito de acoplamento não altera a qualidade das conclusões desenvolvidas anteriormente e, praticamente assegura níveis de sobretensão inferiores ou, no máximo, iguais àqueles observados na hipótese de ausência de acoplamento.

(b) Cargas distribuídas (L=150m com 5 postes)

54. Os níveis das tensões são bastante reduzidos em relação à situação anterior (carga concentrada)
55. Em relação ao perfil da sobretensão no caso da transferência pelo transformador sem acoplamento, aparentemente há uma tendência a uniformizar a amplitude do nível da sobretensão ao longo dos consumidores da rede(aumento relativo em Po, consumidor ligado no transformador, ou redução relativa dos demais consumidores). Há exceção apenas no caso da condição crítica de solicitação (último consumidor, C5, do mesmo lado da corrente incidente, onde V_C =~$3V_{C0}$).

Inclusão das disrupções

56. Representatividade do circuito empregado: 56.1 Rede urbana: extremamente conservador (severo). Faltam circuitos secundários dos dois lados (simétricos) em relação ao ponto de injeção de corrente e falta circuito secundário contínuo (ou neutro). A consideração dos dois aspectos certamente reduziria sensivelmente tanto o nível das sobretensões quanto a extensão de sua abrangência. 56.2 Rede rural: os resultados para Co (consumidor junto ao transformador) poderiam ser considerados representativos para ondas vindas do lado oposto à carga.
57. O cômputo da ocorrência de disrupções entre média e baixa tensão promove a redução generalizada das sobretensões nos consumidores.
58. As sobretensões ao longo da rede (que na ausência de disrupção são tanto maiores quanto maior a resistência de aterramento dos consumidores) passam a ser tanto menores quanto menores forem tais resistências.
59. Extensão do efeito das sobretensões devido à incidência direta, considerando disrupção: Redes rurais: ~150m (inferior a 3kV) ; (600m <2kV). Redes urbanas carregadas: ~ 60m (inferior a 5kV). É ainda menor se o circuito secundário é simétrico e contínuo.

Tensão Induzida

60. Os parâmetros de corrente fundamentais que influenciam na amplitude da tensão induzida na rede de distribuição são o valor de pico da corrente (~ diretamente proporcional à amplitude) e o tempo de frente de onda de descarga (~ inversamente proporcional).
61. A avaliação de maior severidade com parâmetros locais de descarga (Descargas subsequentes x Descarga única ou Primeira) sugere os níveis gerados de sobretensão sejam de mesma ordem. A definição depende de uma série de fatores associados à descarga específica em análise (amplitude, tempo de frente, velocidade de propagação da corrente de retorno no canal de descarga, altura do ponto de conexão dos canais ascendente e descendente). Ao considerar valores medianos dos mesmos apontados na literatura internacional, tende a haver um balanço, que aponta na direção de amplitudes semelhantes para os dois eventos.
62. Os parâmetros da linha de maior influência são a altura (diretamente proporcional à amplitude), a configuração da rede (convencional ou multiplexada) e as conexões à terra.
63. Os níveis das tensão geradas em relação à terra são elevados: 80kV a 320kV (respectivamente fase casada ou aberta, corrente de descarga próxima, de valor 40kA)
63. A amplitude da sobretensão atinge valores mais elevados para a situação de fase aberta, em função das múltiplas reflexões de onda.
64. A blindagem proporcionada na fase pela presença do neutro é discreta (redução da sobretensão da ordem de 20% apenas para configuração convencional de rede)

65. A existência de pelo menos dois aterramentos é importante para redução da sobretensão (embora o simples casamento de impedâncias resulte em sobretensões menores: efeito das reflexões nos aterramentos)
66. O valor da resistência do aterramento do neutro não é importante para a tensão na carga.
67. O número de descidas também não influencia na amplitude da sobretensão na carga, desde que existam pelo menos duas.
68. A ausência de PR no transformador pode submetê-lo a tensões muito elevadas, capazes de danificá-lo.
69. A presença do PR no transformador o protege, mas pouco influencia a amplitude da sobretensão na carga do consumidor.
70. A presença da carga no consumidor é que efetivamente limita a sobretensão na mesma. Esta é tanto menor quanto maior for a carga (menor valor de impedância). Os níveis de tensão entre fase e neutro ficam muito reduzidos para cargas maiores ($Z<10\Omega$)
71. A presença de pára-raios no consumidor é que assegura a sua proteção, mesmo para iluminação direta.

Incidência direta no consumidor / ramal de entrada

72. O mecanismo de estabelecimento da sobretensão neste caso é muito semelhante àquele de transferência do surto da média para a baixa tensão a partir da elevação de potencial no transformador. Entretanto, o percurso da corrente é inverso (do aterramento do consumidor para o aterramento do transformador).
73. Considerando os níveis de isolamento das instalações do consumidor, independentemente do mesmo estar protegido por supressores, em caso de incidência, muito possivelmente haverá contato elétrico entre fases e neutro e terra locais, com fluxo de corrente em todos os condutores que podem servir de caminho para a mesma no seu percurso em direção ao aterramento do transformador (ou dos consumidores próximos). Do ponto de vista da instalação do consumidor, a ocorrência assemelha-se àquela na qual há injeção de corrente no aterramento do transformador e ocorre a operação dos pára-raios colocados no secundário deste. Neste caso, a corrente flui em direção ao transformador.
74. Quanto menor for a relação R_T / R_C maior será a solicitação do secundário do transformador, devido ao associado aumento do fluxo de corrente do aterramento do consumidor para aquele do transformador.
75. Qualitativamente os resultados são semelhantes aos desenvolvidos para o caso análogo, revertendo o sentido de fluxo do surto e considerando o transformador como uma carga usualmente de alto valor de impedância e de baixo valor de resistência de aterramento.
76. Caso não possua pára-raios no seu secundário, em decorrência do fluxo de corrente nos seu enrolamento de baixa tensão, os enrolamentos do transformador podem ser submetidos a tensões elevadas capazes danificá-lo.

Aterramento

77. Verificou-se, em todos os casos, a importância do aterramento do transformador e da relação R_T / R_C na definição dos níveis de sobretensão resultantes.
78. Verificou-se, como aspecto de relevo, que o elemento (inclusive consumidor) que possui valor de resistência de aterramento muito inferior às demais é penalizado pelo maior fluxo de corrente em direção ao seu aterramento e conseqüente maior valor de sobretensão resultante associado.

Para os quatro tipos de ocorrência tem-se:

Transferência de surto da média para baixa tensão

79. A resistência total vista pela corrente injetada deve ter o menor valor possível para redução da sobretensão.
80. A relação R_T / R_C deve ser minimizada para reduzir o fluxo de corrente para o aterramento do consumidor, o qual é responsável pela sobretensão ali resultante e pela elevação de potencial nesse aterramento, que pode comprometer a segurança do consumidor.

Tensão Induzida na baixa tensão

81. É importante a existência de conexão à terra, mas o valor da resistência de aterramento não influencia a amplitude da sobretensão

Incidência no consumidor

82. O comportamento é o inverso da transferência de surto da média para a baixa tensão a partir da elevação de potencial no transformador.
83. Quanto menor for a relação R_T / R_C , maior será a sobretensão transferida do aterramento do consumidor para o transformador, que só estará protegido caso tenha pára-raios também no secundário.

Práticas de aterramento

84. Região urbana: Foi indicada uma configuração simples e de baixo custo para redução do aterramento do transformador (busca da melhor relação R_T / R_C) em relação ao atual critério adotado.
85. Região rural: Foram indicadas modificações nas atuais práticas para aprimoramento do aterramento rural

A diversidade de situações e configurações existentes num sistema de distribuição dificulta sobremaneira a proposição de recomendações objetivas, que possuam caráter generalizado de aplicação.

Nesta perspectiva, a maior parte das recomendações (no que concerne a procedimentos e práticas de proteção) deve partir da identificação da situação real de aplicação considerando a condições de referência de uma das conclusões apresentadas no texto. De qualquer forma, dentre os resultados do projeto, foi identificado um conjunto de recomendações de caráter geral e de aplicação direta, apresentados, a seguir.

RECOMENDAÇÕES RECOMENDAÇÕES

1. Necessidade de Investigações adicionais:·para melhor definição das ondas de tensão e correntes representativas das solicitações reais, sobretudo para fins de ensaios;·para composição de modelos representativos das cargas para as condições da solicitação por surtos atmosféricos (não disponíveis na literatura).
2. Nas condições de Minas Gerais, para proteção do transformador, recomenda-se o uso do pára-raios no primário e no secundário sempre, para redes rurais e urbanas.
3. Ampliar o emprego de redes multiplexadas.
4. No que se refere a solicitações por descargas atmosféricas, o uso de menores comprimentos para a rede de baixa tensão é preferível (50 a 100 m). Recomenda-se a realização de estudos que considerem outros aspectos relevantes na definição de eventual adoção de comprimentos reduzidos desta rede, para se verificar a viabilidade desta definição.

5. A proteção do consumidor é assegurada apenas com a instalação dos pára-raios junto à carga.
6. Mesmo na existência de pára-raios junto ao medidor, pode haver níveis excessivos de sobretensão se a carga alimentada estiver a mais de 15m do medidor. Em caso de redes internas longas, a proteção requer a instalação de pára-raios junto à carga alimentada pela rede interna.
7. Para consumidores com cargas sensíveis, orientá-los que efetuem proteção específica, preferencialmente dentro da edificação.
8. Investir na redução da resistência de aterramento do transformador.
9. Recomendar aos consumidores que possuam baixo valor de resistência de aterramento (edificações amplas com SPDA ou ferragens das fundações conectadas ao terra etc.), que promovam a proteção de suas cargas.
10. Como a melhoria da resistência de aterramento do transformador ou dos primeiro consumidores (aqueles alimentados diretamente do transformador) contribuem para a redução generalizada da sobretensão na rede secundária, verificar a viabilidade econômica das práticas para:·Reduzir R_T (área urbana: adotar nova configuração sugerida, área rural: adotar aprimoramento das configurações praticadas);· Reduzir a resistência de aterramento destes primeiros consumidores;·
Conectar o máximo de consumidores ao transformador (contribui para a redução da resistência naquele ponto).
11. Em princípio, a instalação de cargas na rede é evento fora do controle da empresa. Entretanto, tanto na perspectiva de proteção da nova carga a ser instalada quanto das cargas ao final da rede, deve ser conferida prioridade à ligação da carga dos postes mais próximos do transformador (na hipótese de existir distâncias de aproximadamente mesma ordem para derivação)
12. A prática da empresa de não aterrar o conjunto de pára-raios adicional é consistente. Se for pretendida alguma melhoria de aterramento, que o investimento seja efetuado na melhoria da resistência de aterramento do transformador.
13. Em caso de necessidade de instalação de um conjunto de pára-raios (por reclamação do consumidor), instalá-lo o mais próximo possível do mesmo. Em não havendo pára-raios no secundário do transformador alimentador, providenciar sua instalação.
14. Como não há indicativo de melhoria de desempenho com a variação do nível de proteção dos pára-raios, recomenda-se a continuidade de adoção da atual especificação.
15. Consumidor rural:·sugerir o emprego de condutores multiplexados entre o medidor (no poste) e as instalações alimentadas.·sugerir o uso do menor comprimento possível da sua rede interna (conexão do medidor às suas instalações);·investir na melhoria dos aterramentos adjacentes ao poste que sustenta o transformador que alimenta o consumidor;·assegurar valores reduzidos de R_T para conferir condição de segurança ao consumidor.
16. Estimular os consumidores a práticas de aterramento que busquem equipotencialização, sobretudo na existência de SPDA's .

VI. CONCLUSÕES

Com base nos desenvolvimentos realizados, foi possível estabelecer a influência dos diversos parâmetros constituintes das redes de distribuição de energia elétrica na amplitude das sobretensões resultantes no circuito de baixa tensão e nas cargas conectadas.

Como resultado das conclusões referidas, puderam ser elaboradas diversas recomendações quanto às práticas e procedimentos de proteção. Algumas destas têm caráter genérico de aplicação e foram apresentadas separadamente. Contudo, existe enorme diversidade de situações e configurações na rede de distribuição, o que dificulta a apresentação de recomendações generalizadas. A partir da caracterização de situação de aplicação e sua identificação com condições contempladas anteriormente, é possível derivar recomendações específicas, considerando as correspondentes conclusões apresentadas.

Entretanto, a questão de maior relevo associada ao desenvolvimento deste projeto não se constitui nas inúmeras conclusões e recomendações.

A experiência desenvolvida pela equipe do projeto é o seu resultado fundamental e de maior valor. Esta proporcionou a compreensão plena dos mecanismos de estabelecimento das sobretensões associadas a descargas atmosféricas nas redes de baixa tensão e no esclarecimento do papel de cada variável envolvida na definição da amplitude da solicitação. Resultou, ainda, no desenvolvimento da capacidade de definir soluções e recomendações para proteção das redes.

Tais aspectos conferem à equipe potencialidade para desenvolver tecnologias inovadoras e não-convencionais para proteção de sistemas de distribuição.

Outro aspecto importante deste projeto é assegurar a continuidade dos desenvolvimentos e competências associados às suas realizações. Este aspecto foi contemplado através da aprovação pela ANEEL de projeto P&D, elaborado pela equipe, cuja implantação está em curso. O projeto "*Proteção das redes de distribuição de média tensão contra as descargas atmosféricas: Desenvolvimento de modelos computacionais e validação por meio de rede experimental junto à Estação do Morro do Cachimbo*" tem duração de dois anos e complementa as investigações do tema.

Por outro lado, a experiência vivenciada sugere a adoção pela empresa de uma nova abordagem para tratamento da questão da proteção de seu sistema de distribuição contra descargas atmosféricas. Esta se basearia na constituição de um sistema de informação sobre o sistema da empresa, articulado com um conjunto de aplicativos computacionais dedicados, para análise de situações específicas de solicitação e para definição de práticas e procedimentos apropriados. Tal abordagem complementaria as definições das normas internas da empresa relativas a projeto e a manutenção do sistema de distribuição, que foram desenvolvidas num contexto passado de menor disponibi-

lidade de ferramentas de avaliação.

A possibilidade de adoção desta abordagem decorre das condições únicas (no cenário nacional) de que dispõe a empresa. Estas são fundamentalmente constituídas pela disponibilidade de um sistema de detecção e localização de descargas (SLT's) com base de dados consolidada por mais de 10 anos de registro, pelo nível muito elevado de organização e registro de suas normas e procedimentos (de projeto e manutenção) e pelo pessoal de muita competência técnica na área. Tais condições permitiriam a composição de uma base de dados sobre o sistema de distribuição da empresa, que contemplasse o geo-referenciamento dos seus componentes e o registro dos parâmetros de maior significância para sua proteção (como a resistência de aterramentos dos transformadores, localização de equipamentos danificados com associação com descargas como causa, localização de consumidores reclamantes de danos por descarga, dentre outros).

Por outro lado, a partir do conhecimento acumulado no tema, poderiam ser desenvolvidos aplicativos computacionais dedicados para auxílio à decisão quanto às questões de proteção para situações específicas de projeto e manutenção.

Tais aplicativos incorporariam elementos para simulação de ocorrências, empregando modelos de rede elaborados para as condições típicas do sistema da empresa, numa base de processamento amigável e implementada para gerar respostas objetivas a condições reais de aplicação. Fazendo recurso à base de dados, tais aplicativos poderiam apresentar as definições específicas de proteção para os problemas de projeto e manutenção da rede de distribuição. Além da rapidez de resposta, um sistema desta natureza apresenta como vantagem a possibilidade de seu aprimoramento contínuo pela incorporação das experiências vivenciadas.

Evidentemente, a aplicação desta idéia não é trivial e requer realizações elaboradas, tempo considerável de desenvolvimento, investimentos financeiros e, sobretudo, vontade política de realizá-la. A sua sugestão é apresentada na perspectiva de avaliação pela empresa da viabilidade de sua implementação.

VII. REFERÊNCIAS

[1] Visacro S.F., A.R. De Conti, Pereira C., Silveira F.H., "Relatório Final do Projeto Proteção das Redes Elétricas de Baixa Tensão contra Descargas Atmosféricas - Projeto P&D - ANEEL", Setembro de 2002

[2] De Conti, A. R., "Proteção de Redes Elétricas de Baixa Tensão Contra Descargas Atmosféricas: Transferência de Surtos Através de Transformadores de Distribuição", Dissertação de Mestrado, UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

[3] Silveira, F. H., "Aplicação de Um Novo Modelo para Cálculo de Tensão Induzida por Descarga Atmosférica", Dissertação de Mestrado, UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

[4] Visacro, S. F., Soares, A. J., Schroeder, M. A. O, "An Interactive Computational Code for Simulation of Transient Behavior of Electric System Components for Lightning Currents", *Proceedings of 25th ICLP- International Conference on Lightning Protection*, Cracóvia, Polônia, Set., 2002.

[5] De Conti, A. R., Visacro, S. F., Pereira, C., Duarte, J.V.P., "A Influência das Descargas Atmosféricas na Qualidade da Energia Oferecida aos Consumidores" *XVI SNPTEE- Seminário Nacional de Produção e Distribuição de Energia Elétrica*, Campinas, Out., 2001.

[6] De Conti, A.R., Visacro, S.F., Pereira, C., Duarte, J.V.P., "Lightning and consumer power quality", *SIPDA - International Symposium on Lightning Protection*, Santos, Brazil, Nov. 2001.

[7] De Conti, A.R., Visacro, S.F., "Consumer power quality: the effect of multiplexed conductors on the reduction of lightning-related surges", *SICEL - International Symposium on Power Quality*, Bogotá, Colômbia, Nov. 2001.

[8] De Conti, A. R., Visacro, S. F., "Lightning Overvoltage in Low Voltage Distribution Lines: Multiplexed Versus Conventional Configuration", *IEEE/PES Latin America*, São Paulo, Mar., 2002

[9] .De Conti, A. R., Visacro, S. F., Pereira, C., Duarte, J.V.P., Silveira, F. H., "Effects Of Transferred Lightning Surges on Consumer Loads for Typical Brazilian Low Voltage Networks", *25th International Conference on Ligthning Protection*, Cracóvia, Polônia, Set., 2002.

[10] De Conti, A. R., Visacro, S. F., "Lightning Overvoltages on Low Voltage Networks: Analysis and Protection", *GROUND 2002 – International Conference on Grounding and Earthing*, Rio de Janeiro, Nov., 2002.

[11] De Conti, A. R., Visacro S. F., Duarte, J.V.P., "Proteção de Redes Elétricas de Baixa Tensão Contra Descargas Atmosféricas: Parte I : Sobretensões Transferidas", *Anais do 1o CITENEL*, Brasília, 2001.

[12] De Conti, A. R., Visacro, S. F., Pereira, C., Duarte, J.V.P., "Qualidade de Energia: Práticas de Proteção dos Consumidores", *Revista Eletroevolução, (Artigo Premiado no IX ERLAC)*, no. 24, p.50-54, Brasil, Setembro, 2001.

[13] De Conti, A. R., Visacro, S. F., Duarte, J.V.P., "Avaliação de Sobretensões Transferidas em Redes de Baixa Tensão Instaladas em Áreas Urbanas", *XV SENDI - Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica*, Salvador, Nov., 2002.

[14] Silveira, F. H., Visacro, S. F., Schroeder, M. A. O, Soares, A. J., "Novo Modelo para Cálculo de Tensão Induzida em LT's", *Anais do IX ERLAC - Encontro Regional Latino Americano da Cigré*, Foz do Iguaçu, Brasil, Maio, 2001.

[15] Visacro, S. F., Silveira, F. H., Schroeder, M. A. O, Soares, A. J., "Avaliação da Importância Relativa de Tensão Induzida em Linhas de Alta Tensão", *XVI SNPTEE- Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Campinas, Brasil, Out., 2001.

[16] Silveira, F. H., Visacro, S. F., Schroeder, M. A. O, Soares, A. J., "Evaluation of Lightning-Induced Overvoltages for High Voltage Transmission Lines", *VI SIPDA – International Symposium on Lightning Protection*, Santos, Brasil, Nov., 2001.

[17] Silveira, F. H., Visacro, S. F., Vale, M. H. M., "Modelos de Canal de Descarga: Inclusão do efeito corona e perdas no núcleo ionizado", SICEL'2001 – International Symposium on Power Quality, Bogotá, Colômbia, Nov., 2001.

[18] Silveira, F. H., Visacro, S. F., "Lightning Induced Overvoltage: How return current model influences it", *Proceedings of IEEE/PES T&D 2002 Latin America*, São Paulo, Brasil, Mar., 2001.

[19] Silveira, F. H., Mesquita, C. R., Visacro, S. F., "Evaluation of the Influence of Lightning Channel and Return Current Characteristics on Induced Overvoltages", *26th International Conference on Lightning Protection*, Cracóvia, Polônia, Set., 2002.

[20] Silveira, F. H., Visacro, S. F., Schroeder, M. A. O, Soares, A. J., De Conti, A. R., Vale, M. H. M., "The Influence of Transmission Line Configuration on the Amplitude of Lightning Induced Overvoltages", *Proceedings of 26th International Conference on Lightning Protection*, Cracóvia, Polônia, Set,. 2002.

[21] Silveira, F. H., Visacro, S. F., "Lightning Induced Overvoltages: The Influence of Lightning and Line Parameters", *GROUND 2002 – International Conference on Grounding and Earthing*, Rio de Janeiro, Nov., 2002.

[22] Bassi, W., Piantini, A., "Voltages and currents on secondary lines caused by direct lightning hits on medium voltage lines," *GROUND'2000 – 2nd International Conference on Grounding and Earthing*, Belo Horizonte – Brazil, Jun. 2000.