SENDI 2004
XVI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Avaliação da Distância de Proteção Proporcionada por Pára-raios Instalados em Redes de Distribuição de Média Tensão

F. S. Almeida, S. Visacro, A. R. De Conti, F. H. Silveira – UFMG
J. C. S. Ventura, J. V. P. Duarte – CEMIG

LRC – Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas

E-mail: *fuad@cpdee.ufmg.br*, *lrc@cpdee.ufmg.br*

Palavras-chave – Aterramentos, Descargas Atmosféricas, Proteção, Sobretensões Atmosféricas

Resumo – No presente trabalho, os autores descrevem alguns aspectos específicos relativos ao projeto de pesquisa intitulado "Proteção de Redes de Distribuição de Média Tensão contra Descargas Atmosféricas", atualmente em desenvolvimento, e apresentam alguns dos resultados já alcançados e de interesse aplicado. Tais resultados decorrem de avaliações acerca dos diversos tipos de ocorrências nas redes de média tensão associadas a eventos relativos à incidência de descargas sobre a rede ou em suas proximidades. A influência de diversas variáveis no desenvolvimento de surtos, os quais se propagam nas redes de distribuição de média tensão, é investigada na perspectiva de proteção dos equipamentos instalados na rede da concessionária. Os resultados subsidiam a definição da distância de proteção associada a pára-raios instalados em tal rede.

Abstract – In this paper, the authors describe specific topics investigated in the project "Lightning Protection of Medium Voltage Distribution Lines" and present some results of applied interest. These results are consequence of evaluations concerning the effects of either direct strikes or lightning induced voltages on distribution lines. The influence of several variables on the development of lightning surges on MV distribution lines is investigated on the perspective of protecting equipments placed along the utility network. The results give support for definitions about protection distance provided by surge arresters installed along the lines.

1. INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas consistem no principal elemento de solicitação das redes de distribuição de energia, seja através das descargas diretas ou pelo efeito das tensões induzidas por descargas próximas. No caso de descargas diretas sobre as redes de distribuição de média tensão, os efeitos são de elevada severidade e podem provocar diversos danos ao sistema. Esse evento é mais comum no caso de redes de média tensão rurais ou em regiões periféricas de cidades, sendo mais raro em áreas urbanas, devido à presença de edificações elevadas, que provêm certa blindagem para estas redes. Já as descargas que incidem nas proximidades das redes elétricas 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 verificado nos 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.

O problema relacionado às descargas atmosféricas é especificamente crítico no estado de Minas Gerais, dada a elevada densidade de incidência das mesmas (chegando a 12 descargas/km^2/ano nas regiões Sul e Triângulo Mineiro) e o valor extremamente elevado da resistividade dos solos locais. A carência de investigações aprofundadas no tema, que contemplem as condições particulares do sistema de distribuição instalado em Minas Gerais e as condições ambientais locais, motivou a concessionária de energia local a formular o projeto “Proteção de Redes Elétricas de Média Tensão contra Descargas Atmosféricas”. Tal investigação abrange a caracterização dos fenômenos solicitantes da rede, o desenvolvimento de modelos para simulação computacional, a avaliação do desempenho das redes de média tensão e das metodologias de proteção da rede contra as descargas.

Usualmente, as empresas concessionárias de energia elétrica protegem os equipamentos instalados em suas redes de média tensão através do uso de pára-raios, por exemplo, conectando-os ao primário dos transformadores. Uma questão importante e de interesse prático para os engenheiros que atuam no setor consiste na definição da distância de proteção proporcionada por tais dispositivos quando de sua operação. Tal questão é importante técnica e economicamente, pois dela decorre a definição prática dos critérios de aplicação de pára-raios na proteção de equipamentos (possibilidade dos pára-raios já instalados em um ponto protegerem novos equipamentos em pontos adjacentes). Os autores estão envolvidos no desenvolvimento de uma avaliação desta natureza e alguns resultados interessantes têm sido alcançados. Dentre as realizações e trabalhos desenvolvidos pelo grupo, está incluída a análise de situações concretas de solicitação da rede por descargas atmosféricas através de simulações computacionais, que envolvem a modelagem dos componentes do sistema e o uso sistemático do ATP (*Alternative Transients Program*). Diversas análises de sensibilidade foram realizadas com o intuito de se definir a distância de proteção dos pára-raios instalados na rede, sendo avaliada a influência de parâmetros como aterramentos, configuração da rede, característica do surto, etc. O objetivo do trabalho proposto é apresentar os resultados desta investigação, sobretudo na forma de perfis de amplitude máxima de tensão resultante ao longo da rede nas imediações do pára-raios. O estudo destes perfis subsidiará a definição da distância de proteção dos pára-raios, o que tornará possível o estabelecimento de práticas de instalação adequadas para tais dispositivos em redes de média tensão.

No presente texto são apresentadas, inicialmente, as configurações básicas de rede empregadas no sistema de distribuição, instaladas no estado de Minas Gerais, bem como os critérios de aterramento atualmente empregados para o condutor neutro e pára-raios. Em seguida, é feita uma breve descrição

do fenômeno investigado. Posteriormente, é apresentada a topologia básica do sistema analisado, juntamente com os parâmetros constituintes utilizados para obtenção dos resultados. Em seqüência, são elucidados os perfis de tensão associados a tal configuração analisada, bem como a análise crítica do fenômeno. Finalmente, são descritas as conclusões extraídas do trabalho.

A equipe do LRC tem desenvolvido diversos trabalhos de natureza complementar que abordam o tema proteção de redes de distribuição contra descargas atmosféricas (VISACRO, 1999; DE CONTI, 2001; DE CONTI, 2002; SILVEIRA, 2001; SILVEIRA, 2002). A referência a esses trabalhos deu suporte ao desenvolvimento da pesquisa a que se refere o presente artigo.

2. DESENVOLVIMENTOS

2.1 Características do sistema de distribuição da CEMIG

Atualmente são utilizadas no sistema CEMIG três configurações básicas de redes de média tensão aéreas (CEMIG, 1996, CEMIG, 1998, CEMIG, 1999):
1. Redes convencionais: Utilizam condutores fase nus, dispostos horizontalmente em cruzetas (redes trifásicas). O condutor neutro é posicionado em nível inferior, junto à estrutura.
2. Redes protegidas: Nesta configuração, um cabo de aço mensageiro sustenta um espaçador em formato de losango, que por sua vez suporta os cabos fase. Estes possuem cobertura com isolamento de baixa isolação. O condutor neutro segue abaixo, não sendo sustentado pelo espaçador.
3. Redes isoladas: Utilizam condutores isolados, entrelaçados em torno de um cabo de aço mensageiro. Também neste caso o condutor neutro é posicionado abaixo, junto à estrutura.

Aproximadamente 90% do total da rede primária urbana instalada é do tipo convencional e 10% do tipo protegida. A presença de redes isoladas no sistema é muito pequena, sendo sua instalação realizada em condições muito específicas (CEMIG, 2000). Em redes rurais, a quase totalidade das instalações é do tipo convencional. O padrão mínimo atual para a instalação de novas redes urbanas corresponde à configuração protegida, enquanto as redes rurais permanecem utilizando o padrão de rede convencional.

O condutor neutro presente nas redes de distribuição da CEMIG é aterrado de forma efetiva e contínua, segundo critérios específicos pré-estabelecidos. Em redes aéreas rurais, o aterramento deste condutor deve ser realizado estrutura sim e outra não, para vãos menores ou iguais a 200 m, independentemente do tipo da estrutura. Em vãos maiores que 200 m, aterram-se todas as estruturas adjacentes. Em redes urbanas, o condutor neutro deve ser aterrado aproximadamente de 200 em 200 m, devendo ser sempre contínuo e conectado à malha de terra da Subestação. No caso das redes de média tensão protegidas e isoladas, o mensageiro deve ser conectado ao neutro em todos às estruturas em que houver aterramentos. Todos os pára-raios instalados nestas redes, assim como nas redes convencionais, são aterrados, buscando sempre a mínima resistência de aterramento possível. Juntamente com os pára-raios, são aterradas as carcaças dos equipamentos protegidos e os condutores neutro e mensageiro de estruturas onde é feita a transição entre diferentes modalidades de rede ou a terminação da rede (CEMIG, 1992, 1995). Os aterramentos do pára-raios devem ter resistências de baixa freqüência com valores máximos iguais a 80 Ω. São utilizados como cabo de descida do aterramento cordoalhas de aço galvanizado MR 6,4 mm.

Na construção das redes trifásicas de media tensão, podem ser utilizadas estruturas de concreto ou madeira. O NBI das linhas instaladas em estruturas de concreto tem valor de 95 kV, sendo possível a

elevação do mesmo para 170 kV através de algumas alterações, como a mudança do ponto de fixação da mão-francesa junto à cruzeta, afastando-a o máximo possível das fases, ou a troca do isolador mais próximo à mão-francesa de 15 kV para 34,5 kV (CEMIG, 1991). Em redes com estruturas de madeira, modificações simples permitem a elevação do NBI para 300 kV. Nas redes trifásicas urbanas, não é usual a elevação do NBI, mantendo-se o valor de 95 kV.

2.2 Fenômenos em análise

Um dos efeitos mais importantes do fenômeno descarga atmosférica consiste nas tensões induzidas pela corrente que flui pelo canal ionizado constituído entre nuvem e solo durante o estabelecimento da descarga. Embora muito menos severos, se comparados aos efeitos associados à incidência direta da descarga, os efeitos mais freqüentes são aqueles decorrentes das descargas atmosféricas próximas, usualmente designadas “descargas indiretas”, e correspondem à indução de tensões em linhas ou em corpos condutores longos estendidos na superfície terrestre, em região próxima ao ponto de incidência. As tensões induzidas constituem a mais importante fonte de distúrbio em sistemas elétricos e eletrônicos de média e baixa tensão, sendo as sobretensões associadas responsáveis pela maior parte dos desligamentos das linhas de distribuição de energia elétrica.

Para entender melhor o fenômeno tensão induzida, é comum separá-lo em duas componentes. A primeira é relacionada ao efeito de iluminação direta proporcionado pelo campo eletromagnético próximo, sendo denominada “surto de iluminação direta”. A segunda parcela refere-se à propagação deste surto, sendo denominada “surto propagado”. Em pontos relativamente distantes, pode-se desprezar a primeira parcela, sendo então a segunda parcela responsável pelo estabelecimento das tensões. Por outro lado, as descargas diretas promovem sobretensões e rupturas de forma que, em pontos distantes, são originados surtos que se propagam pela rede e cuja amplitude é limitada ao NBI da mesma.
Com base nestas considerações, buscou-se caracterizar bem o surto propagado distante através da colocação do trecho de linha de 1,5 km (ver Figura 1), desprezando a influência do fenômeno de iluminação por tensão induzida nos pontos analisados.

2.3 Implementação computacional

Nas simulações computacionais realizadas, considerou-se uma linha trifásica com 2580 m de extensão, com casamento de impedâncias em suas extremidades, de forma a eliminar o efeito das reflexões. Assumiu-se que esta linha fosse sustentada por treze ou vinte e cinco estruturas, separadas em vãos de 90 ou 45 metros, respectivamente. Os aterramentos foram instalados alternadamente, em uma estrutura sim e outra não, de acordo com os critérios pré-estabelecidos para as redes de distribuição aéreas rurais (CEMIG, 1997). Os valores de tais aterramentos foram escolhidos iguais a 80 e 240 Ω, representando situações favoráveis e críticas perante os valores típicos de resistividade de solo locais. A resistividade do solo foi mantida fixa em 1000 Ω.m para efeito de cálculo dos parâmetros da linha. Um conjunto de pára-raios foi instalado entre fase e neutro em um determinado ponto da rede, distante 1,5 km do ponto de injeção do surto. O condutor de descida, que conecta o cabo neutro ao aterramento, foi modelado por uma indutância de 1 μH/m. Foi considerada nas simulações a configuração de rede convencional, pois esta representa um percentual significativo das redes trifásicas instaladas no estado de Minas Gerais. O surto foi aproximado por uma rampa, com tempos de frente/meia onda de 1/50 μs e amplitude de 2 kA pico/trifásico (1 kA em cada direção de

propagação ou 1/3 kA em cada fase), aplicado diretamente sobre os condutores fase e distante o suficiente do pára-raios.

Nas figuras 1 e 2 a seguir, são apresentados o diagrama esquemático da rede analisada e a característica V x I típica de pára-raios instalados nas redes de distribuição de média tensão em Minas Gerais.

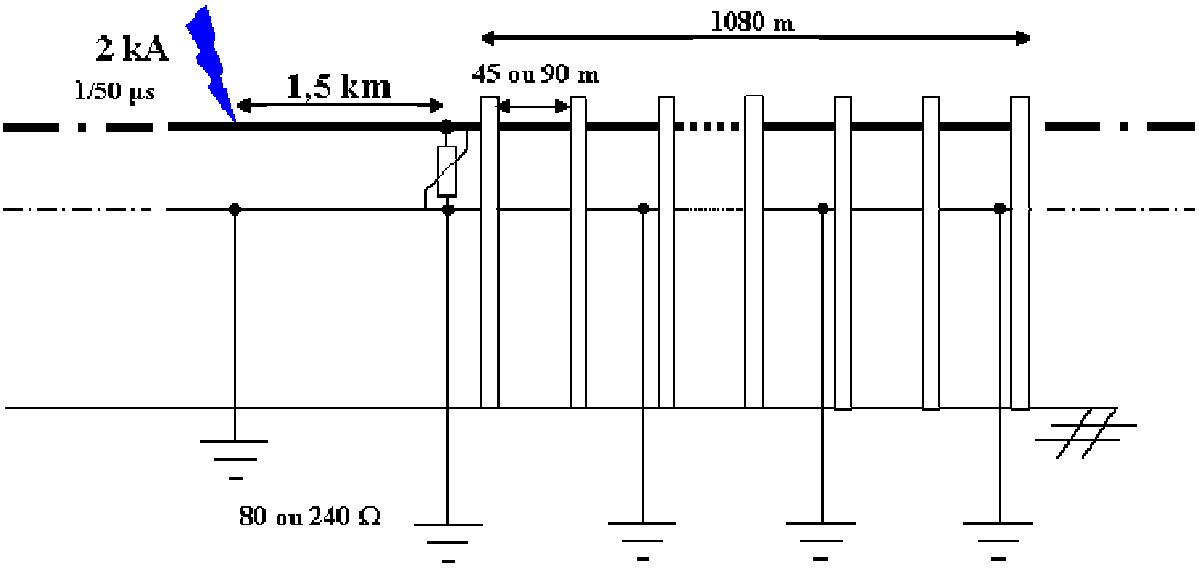


Figura 1 – Diagrama esquemático da rede analisada

Os perfis de sobretensão calculados nas condições analisadas foram determinados em pontos correspondentes aos trechos de linha com aterramento, ou seja, a cada 90 ou 180 metros. A fase B foi escolhida para medição.

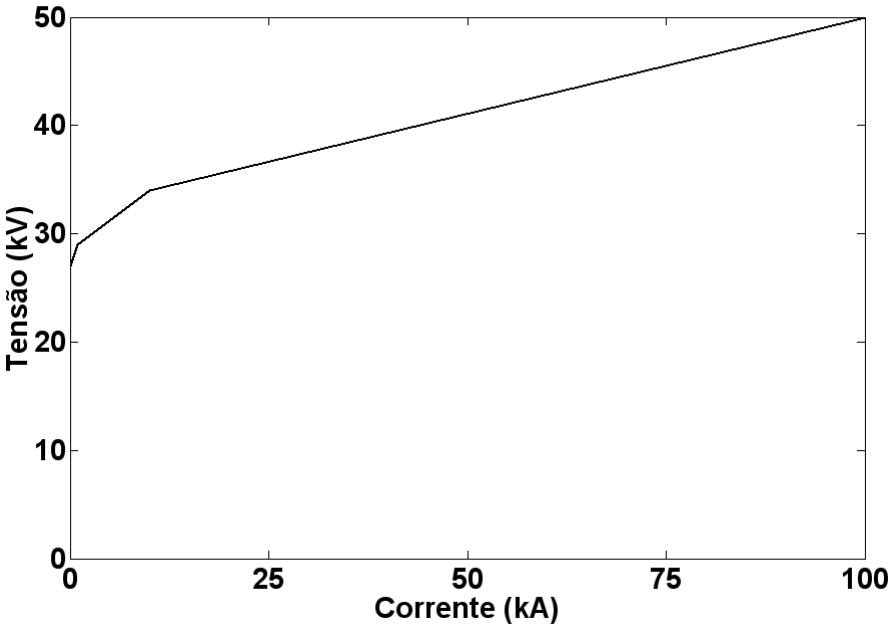


Figura 2 – Curva característica do pára-raios (DE CONTI, 2001)

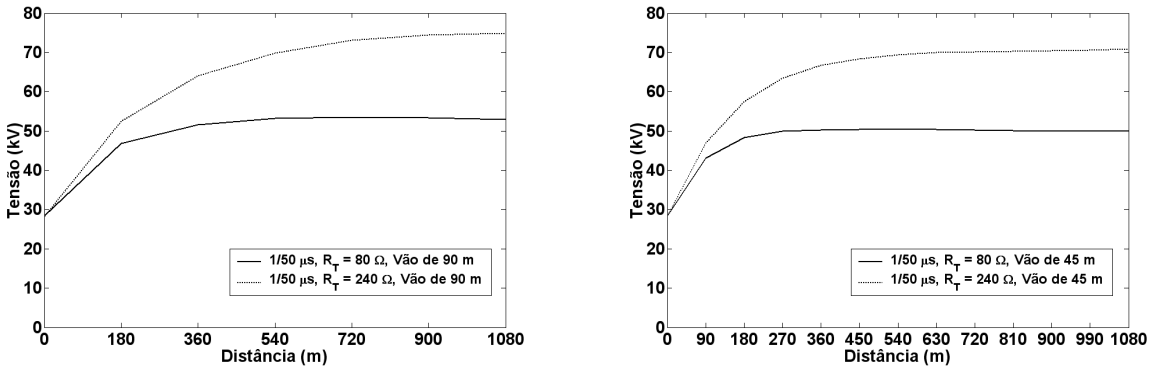
3. RESULTADOS E ANÁLISES

Foi constatado através das simulações que os valores máximos de sobretensão obtidos no ponto de injeção são superiores a 170 kV, sendo capazes assim de ocasionar disrupção entre fase e estrutura, para as redes com NBI de 95 ou 170 kV. Esta disrupção influencia a onda de tensão que se propaga adiante ao longo da rede, reduzindo significativamente sua amplitude (CIGRÉ, 1997). Tal efeito foi desconsiderado neste trabalho, tendo assumido valores de NBI iguais a 300 kV. Em outros trabalhos que estão sendo realizados pela equipe são considerados, através de uma modelagem física do fenômeno, os efeitos associados à disrupção presente nas redes.
A condição de simulação aqui apresentada foi empregada de forma que na posição de instalação dos pára-raios resultasse uma amplitude de sobretensão da ordem de 170 kV antes da instalação dos dispositivos. Tal valor seria naturalmente fixado na rede pelas rupturas do isolamento que teriam este valor para seu NBI.

Os perfis máximos obtidos para as configurações analisadas são apresentados abaixo, sendo divididos em três subitens, correspondendo às tensões Fase-neutro, Fase-terra e Neutro-terra.

3.1 Tensões Fase-neutro

Os resultados obtidos para cada vão de rede analisado, referentes às variações da resistência de aterramento, são apresentados em conjunto visando facilitar as comparações.



a) Aterramentos de 80 e 240 Ω, vão de 90 m b) Aterramentos de 80 e 240 Ω, vão de 45 m

Figura 3 – Tensões Fase-neutro detectadas a partir do ponto de instalação do pára-raios

Em se tratando da proteção dos equipamentos alocados ao longo das redes de distribuição, a amplitude das tensões fase-neutro constitui o principal parâmetro de interesse. Para a solicitação indicada na Figura 1, na ausência do conjunto de pára-raios, estas assumem magnitudes da ordem de 170 kV, para os pontos posicionados a partir do local de instalação dos dispositivos. Na presença dos mesmos, tais valores são reduzidos para algo em torno de 30 kV (tensão residual do dispositivo), junto à estrutura de instalação. Tal amplitude cresce a partir deste ponto. A despeito do crescimento da tensão observado, os valores máximos alcançados são limitados a um limiar, cujas amplitudes se aproximam respectivamente de 50 e 70 kV para valores de resistência de aterramento de 80 e 240 Ω. Tais amplitudes são inferiores a 95 kV, que corresponde ao valor de NBI convencional das redes de distribuição.

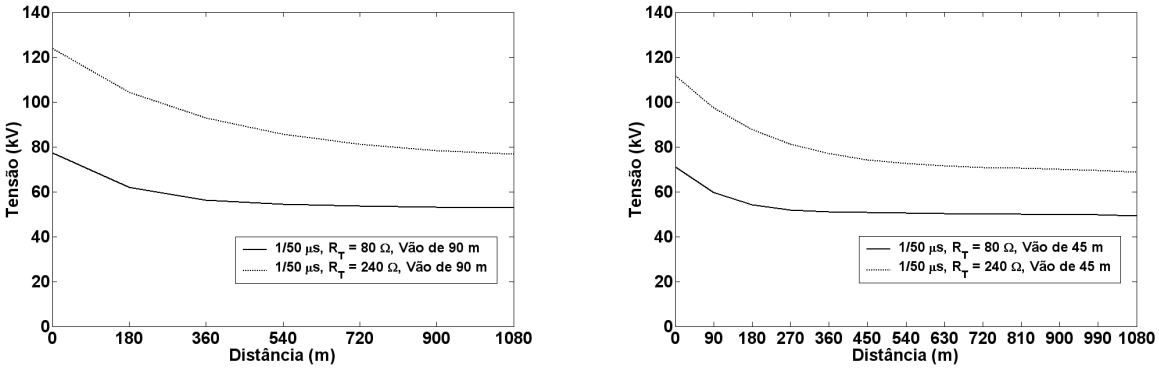
Como era esperado, sobretensões maiores entre os condutores fase e neutro são observadas para maiores valores de aterramento. Ao reduzir a resistência de aterramento, maiores correntes são

drenadas pelo mesmo, minimizando a corrente que se propaga pelo condutor neutro. Portanto, menores sobretensões entre o neutro e o terra remoto são verificadas. Assumindo-se que os trechos de rede são curtos o suficiente para desprezar o tempo de trânsito (0,3 ou 0,15 µs), pode-se demonstrar que o potencial entre os condutores fase e neutro em um dado ponto da rede é dado pela queda de potencial no condutor neutro, somada à tensão Fase-neutro sobre o pára-raios e subtraída da queda de potencial no condutor fase. Portanto são verificadas maiores sobretensões entre os condutores fase e neutro para um aumento no valor da resistência de aterramento. Este aumento, para os valores de aterramento analisados e distâncias em torno de 1 km, foi de aproximadamente 40 %.

A absorção da corrente no condutor neutro pelo aterramento se processa de maneira mais rápida para vãos menores, implicando em menores distâncias necessárias para se atingir o patamar de tensão, como observado através da comparação entre as figuras 3a e 3b.

3.2 Tensões Fase-terra

Através da análise da Figura 4, observa-se uma redução na tensão Fase-terra em pontos mais afastados do pára-raios. Tal redução está relacionada às perdas e diminuição da corrente que se propaga através do condutor neutro, diminuindo consequentemente as tensões entre este e o terra remoto que, por sua vez, através do acoplamento eletromagnético existente entre estes condutores, reduz em menor intensidade as tensões entre fase e terra. Um aumento na resistência de aterramento implica em maiores sobretensões Fase-terra. Vãos menores implicam em menores sobretensões, pois menores são os tempos de trânsito associados às ondas de reflexão oriundas dos pontos de descontinuidade na rede, como por exemplo, aterramentos.

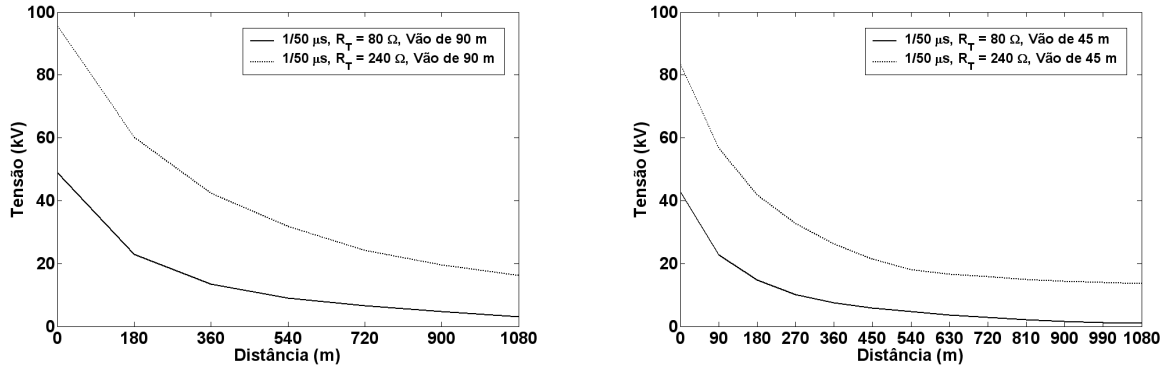


a) Aterramentos de 80 e 240 Ω, vão de 90 m b) Aterramentos de 80 e 240 Ω, vão de 45 m

Figura 4 – Tensões Fase-terra detectadas a partir do ponto de instalação do pára-raios

3.3 Tensões Neutro-terra

Os perfis de sobretensão Neutro-terra ilustrados na Figura 5 também retratam claramente a redução das elevações de potencial proporcionada pelo fluxo para o terra remoto das correntes. Esta corrente tende a zero mais rapidamente em redes com vãos menores. Um aumento na resistência de aterramento de 80 para 240 Ω pôde ocasionar, na maior parte dos trechos de rede, uma elevação de mais de 100 % no valor máximo das sobretensões. Por este motivo as concessionárias de energia estão sempre preocupadas em reduzir, através de técnicas de tratamento químico e físico do solo e/ou configurações mais elaboradas de aterramento, os valores de tais resistências, sobretudo no aterramento do pára-raios, visando um maior fluxo para terra destas correntes.



a) Aterramentos de 80 e 240 Ω, vão de 90 m b) Aterramentos de 80 e 240 Ω, vão de 45 m

Figura 5 – Tensões Neutro-terra detectadas a partir do ponto de instalação do pára-raios

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, os autores avaliaram a Distância de Proteção proporcionada pela atuação de pára-raios em redes de distribuição de média tensão de configuração convencional, para surtos de origem atmosférica que chegam à estrutura por propagação ao longo da rede.

Com base nos resultados apresentados, verificou-se que a presença dos pára-raios é capaz de garantir níveis seguros de tensão para os pontos posteriores à estrutura de instalação dos mesmos, no sentido de propagação do surto. Constatou-se o estabelecimento de patamares de tensão de valor inferior ao NBI usual das redes. No pior caso, este patamar correspondeu a amplitudes da ordem de 70 kV. Desta forma, a distância de proteção assegurada por tais dispositivos assumiu valores muito elevados.

As análises de sensibilidade desenvolvidas permitiram, ainda, avaliar a influência de parâmetros tais como a resistência de aterramento e o espaçamento entre estruturas, no mecanismo de estabelecimento das sobretensões máximas. Verificou-se que a redução dos vãos ou dos valores de resistência de aterramento promoveu a diminuição da distância necessária para que se alcance o patamar.

Esta conclusão quanto à distância de proteção tem importância técnica e econômica, pois dela decorre a definição prática de que a instalação de apenas um conjunto de pára-raios seria suficiente para assegurar níveis de tensão fase-neutro inferiores ao NBI da rede, para surtos que chegam ao pára-raios propagando-se pela rede. Avaliações complementares sobre o tema estão em curso.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CEMIG, Estudo de Distribuição ED 2.21, *Padrões de Montagem de Estruturas com NBI Elevado*, Setembro de 1991.

CEMIG, Estudo de Distribuição ED 3.14, *Critérios para Aterramento de Redes de Distribuição*, Setembro de 1992.

CEMIG, Estudo de Distribuição ED 3.4, *Proteção contra Sobretensões em Redes de Distribuição Aéreas*, Setembro de 1995.

CEMIG, Manual de Distribuição ND-2.1, *Instalações Básicas de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas*, Janeiro de 1996.

CEMIG, Manual de Distribuição ND-2.2, *Instalações Básicas de Redes de Distribuição Aéreas Rurais*, Outubro de 1997.

CEMIG, Manual de Distribuição ND 2.7, *Instalações Básicas de Redes de Distribuição Aéreas Isoladas*, Janeiro de 1998.

CEMIG, Manual de Distribuição ND 2.9, *Instalações Básicas de Redes de Distribuição Protegidas*, Julho de 1999.

CEMIG, Relatório Geral de Distribuição, *Dados Físicos do Sistema Elétrico; Sistema de Gerenciamento de Rede*, Outubro de 2000.

CIGRÉ WORKING GROUP 05, *Protection of MV and LV Networks Against Lightning. Part I: Basic Information*, CIRED – Conferência Internacional de Redes Elétricas de Distribuição, Junho de 1997.

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*, Proceedings of 25th ICLP – International Conference on Lightning Protection, Cracow, Poland, September of 2002.

SILVEIRA, F. H., *Aplicação de um Novo Modelo para Cálculo de Tensão Induzida por Descarga Atmosférica*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Julho de 2001.

SILVEIRA, F. H., MESQUITA, C. R., VISACRO, S. F., *Evaluation of the Influence of Lightning Channel and Return Current Characteristics on Induced Overvoltages*, Proceedings of 25th ICLP – International Conference on Lightning Protection, Cracow, Poland, September of 2002.

VISACRO, S. F., DE CONTI, A. R., MARROIG, L. B., *Evaluations of Models for Representing Usual Grounding Electrode Configurations of Distribution Lines in Brazil*, Proceedings of V SIPDA - International Symposium on Lightning Protection, Sao Paulo, November of 1999.