



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GCQ 09
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO XIII

GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA - GCQ

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS CAUSADOS EM REDES DE ENERGIA ELÉTRICA E UNIDADES CONSUMIDORAS PELA INCIDÊNCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM TORRES DE TELEFONIA CELULAR

Fernando Henrique Silveira*

Silvério Visacro

**LRC – Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas
UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais**

RESUMO

Este trabalho apresenta uma avaliação prospectiva dos níveis de sobretensão em redes de energia elétrica e unidades consumidoras decorrentes da incidência de descargas atmosféricas em estruturas elevadas de estações de telefonia celular próximas. Os resultados foram obtidos pela realização de simulações computacionais sistemáticas utilizando um elaborado modelo eletromagnético. Configurações representativas da rede elétrica, da estrutura elevada e do sistema de aterramento da estação, tipicamente existentes em áreas urbanas no Brasil, foram adotadas no trabalho. Os resultados apresentados denotam valores de sobretensão extremamente severos para o sistema elétrico, notoriamente capazes de danificar os componentes da rede.

PALAVRAS-CHAVE

Elevação de Potencial, Estação Rádio-Base, Rede Elétrica, Sistema de Aterramento, Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas.

1.0 - INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, um crescimento acentuado do número de estruturas elevadas em áreas urbanas e periferia tem sido observado, sobretudo pela instalação de estações de telefonia celular (também denominadas Estações Rádio-Base - ERB), que empregam torres ou postes com altura superior a 50 m.

Por causa da sua altura elevada, essas estruturas constituem ponto preferencial para a incidência de descargas atmosféricas. Tal incidência é capaz de causar uma série de efeitos nas regiões vizinhas à estação, tais como elevação de potencial do solo, transferência de correntes e tensões pelo sistema de aterramento da rede elétrica e tensões induzidas nas linhas aéreas e na entrada de serviço do consumidor. Estes efeitos, responsáveis por afetar a qualidade da energia fornecida às unidades consumidoras, se tornam extremamente severos para o sistema elétrico em decorrência da proximidade existente entre a estação rádio-base e a rede elétrica. Ademais, acabam gerando demandas por parte dos consumidores às empresas concessionárias de energia, em relação à ocorrência de danos em suas residências durante tempestades, principalmente em equipamentos de menor suportabilidade elétrica (computador, televisão, vídeo-cassete, etc). Embora as empresas concessionárias de energia não sejam responsáveis pelo aumento destes efeitos para o consumidor, as reclamações são a elas direcionadas simplesmente pelo fato dos equipamentos danificados estarem conectados à rede de energia. As empresas de telefonia celular, responsáveis pelas estruturas elevadas instaladas nas proximidades do sistema elétrico, são usualmente poupadas.

Este cenário justifica o desenvolvimento de avaliações relacionadas a esse tipo de ocorrência. Além disso, estudos relacionados a esse tema são extremamente raros na literatura.

É neste contexto que se insere este trabalho que tem como objetivo apresentar uma investigação a respeito dos níveis de sobretensão desenvolvidos em redes elétricas devido à incidência de descargas em estruturas elevadas (como torres e postes) de estações rádio-base.

2.0 - CONSIDERAÇÕES BÁSICAS E METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

A incidência de descargas em estruturas elevadas de estações rádio-base gera sobretensões ao longo do sistema elétrico relativas a dois tipos de efeitos.

O primeiro efeito corresponde às tensões induzidas associadas à distribuição de corrente ao longo do canal de descarga e da estrutura elevada (1). Diversos fatores são capazes de afetar a intensidade e a forma de onda destas tensões (2), sendo classificados em parâmetros de descarga (valor de pico da corrente, taxa de crescimento da frente da onda, velocidade de propagação da onda de corrente), parâmetros ambientais (resistividade do solo e orografia), parâmetros geométricos relativos à posição relativa entre o canal de descarga e a linha (ponto de incidência da descarga, altura do ponto de conexão entre os canais ascendente e descendente de descarga) e parâmetros físicos da rede (presença de cabo de blindagem, número de condutores de descida, valor da impedância de aterramento, etc). Análises de sensibilidade considerando a influência desses fatores nas tensões induzidas são encontradas em (2).

O segundo efeito está relacionado à sobretensão gerada pela injeção de corrente no condutor neutro, resultado da elevação de potencial no solo. O comportamento de tal sobretensão está intimamente associado ao valor da resistividade do solo e ao tipo de configuração adotado para os sistemas de aterramento da rede elétrica e da estação rádio-base (3). Além disso, a existência de uma conexão direta entre esses dois sistemas de aterramento pode contribuir para o aumento do valor da sobretensão resultante.

Sendo assim, a avaliação das sobretensões em redes elétricas causadas pela incidência de descarga em estruturas elevadas próximas compreende aspectos complexos, como o comportamento transitório dos sistemas de aterramento e da estrutura elevada atingida pela descarga, a distribuição de corrente ao longo do canal de descarga e o acoplamento eletromagnético entre linha e canal. Para uma correta avaliação desta sobretensão, é condição fundamental a adoção de um modelo computacional que seja capaz de contemplar todos esses aspectos em seus cálculos.

A investigação proposta neste trabalho foi realizada através da aplicação de um modelo elaborado desenvolvido pela equipe dos autores para a avaliação de distúrbios associados às descargas atmosféricas (4). Este modelo é denominado HEM (Hybrid Electromagnetic Model). Baseado em equações de campo eletromagnético, contempla o acoplamento eletromagnético entre linha e canal de descarga, sendo capaz de estimar a tensão induzida nas regiões próximas ao ponto de incidência da descarga, assim como a corrente e a tensão transferidas por meio dos eletrodos de aterramento e condutores de descida do sistema elétrico decorrentes da elevação de potencial no solo. Sua aplicação pode indicar soluções simples de proteção, tanto para a rede elétrica quanto para o consumidor, de fácil implementação pelo departamento de engenharia das empresas concessionárias.

3.0 - DESENVOLVIMENTOS

Simulações sistemáticas utilizando configurações típicas usualmente adotadas no Brasil para a rede de energia elétrica e para o sistema de aterramento da estação rádio-base foram realizadas. A Figura 1 ilustra a estrutura elevada da estação rádio-base representada nas simulações como um poste circular de raio 0,5 m, posicionado a 20 m do sistema de distribuição da concessionária de energia elétrica.

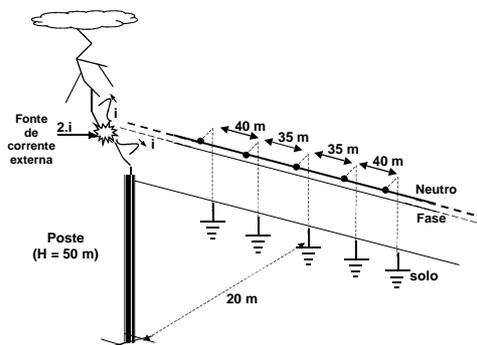


FIGURA 1 – Representação do problema a ser investigado.

A configuração do sistema de aterramento da estação rádio-base é destacada na Figura 2. Eletrodos enterrados a 0,5 m de profundidade compõem dois anéis de equalização em torno do poste e do *container*, local responsável por abrigar os equipamentos eletrônicos da estação. Hastes verticais de 3 m de comprimento são conectadas a esses anéis. Além disso, uma haste adicional é conectada na base da estrutura do poste, sendo enterrada 7 m

abaixo do nível do solo. O raio de todos os eletrodos de aterramento foi assumido igual a 0,5 cm. As simulações consideraram diferentes valores para a resistividade do solo (100, 500, 1000 e 2500 $\Omega \cdot m$). O efeito da ionização do solo foi desconsiderado devido ao comprimento adotado para os eletrodos. Ademais, o acoplamento eletromagnético entre os condutores aéreos e enterrados não foi considerado. Por outro lado, o comportamento dos eletrodos de aterramento sujeitos à corrente de descarga foi precisamente computado, considerando a interação entre a malha que envolve o poste e os eletrodos de aterramento da rede elétrica.

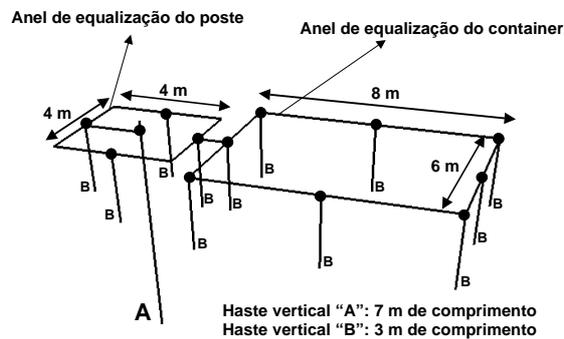


FIGURA 2 – Configuração do sistema de aterramento da estação rádio-base.

A Figura 3 apresenta a configuração simulada para a rede elétrica de baixa tensão. O condutor neutro é posicionado 7,2 m acima do nível do solo. O condutor fase localiza-se 20 cm abaixo do condutor neutro. As extremidades de ambos os condutores apresentam casamento de impedâncias para evitar efeitos de reflexão e representar uma condição de continuidade elétrica do sistema. Cinco condutores de descida conectam o condutor neutro ao solo. O aterramento dessas conexões foi representado através de hastes verticais com 3 m de comprimento.

Em relação à modelagem das cargas consumidoras, optou-se por representá-las através de simples resistências de 30 Ω conectadas entre os condutores fase e neutro. Inúmeras incertezas cercam a modelagem de tais cargas, principalmente em relação à diversidade encontrada em instalações consumidoras. É extremamente difícil computar-se as condições reais das cargas dos consumidores em decorrência dos diferentes tipos de equipamento instalados em cada caso, da condição de operação (equipamentos em funcionamento ou desligados), do comportamento de cada tipo de carga frente à ocorrência de surtos, da existência ou não de pontos de aterramento e da presença de dispositivos protetores. De acordo com dados experimentais apresentados em (5), o valor de resistência 30 Ω é capaz de reproduzir de maneira razoável o módulo da impedância da carga de uma instalação consumidora de uma rede elétrica de baixa tensão. Sendo assim, as conclusões destacadas neste trabalho estão associadas à consideração de cargas com comportamento puramente resistivo.

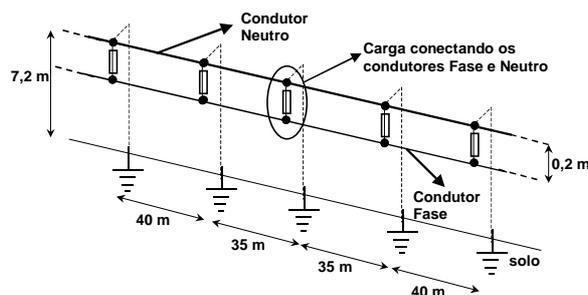


FIGURA 3 – Configuração da rede de distribuição de baixa tensão simulada.

Simulou-se a injeção de uma onda de corrente do tipo triangular $1/50 \mu s$ com valor de pico de 2 kA em um canal de descarga representado por um condutor vertical. Assumiu-se a velocidade de propagação da corrente no canal como sendo a velocidade da luz (3×10^8 m/s). A onda de corrente foi injetada 100 m acima do topo do poste, reproduzindo, assim, a conexão entre os canais ascendente e descendente de descarga a esta altura. No início do fenômeno, a impedância de surto equivalente vista pela fonte acima e abaixo do ponto de conexão entre esses canais é bastante similar. Tal fato dá origem à propagação de duas ondas de corrente com valor de pico de 1 kA: uma onda se propaga para cima, enquanto a outra se propaga para baixo no canal de descarga.

4.0 - RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados apresentados neste trabalho são organizados em duas partes.

Inicialmente, procedeu-se à avaliação do efeito da resistividade do solo na elevação de potencial no sistema de aterramento da estação rádio-base. Em seguida, foram analisadas as sobretensões desenvolvidas na rede elétrica de baixa tensão em decorrência da incidência da descarga na estrutura elevada da estação rádio-base.

Os resultados obtidos são apresentados por meio de gráficos de sobretensão expressos em kV/kA. A extrapolação dos resultados para uma condição referente a valores típicos de corrente de descarga pode ser realizada pela multiplicação dos valores instantâneos de sobretensão indicados nos gráficos e o valor de corrente desejado.

4.1 Comportamento do sistema de aterramento da estação rádio-base

A Figura 4 - (a) destaca a resposta do sistema de aterramento da estação rádio-base frente à injeção de uma onda de corrente do tipo triangular com 1 kA de pico, 1/50 μ s, em termos da elevação de potencial no solo (GPR) (3,6). O ponto de injeção da corrente é ilustrado na Figura 4 - (b).

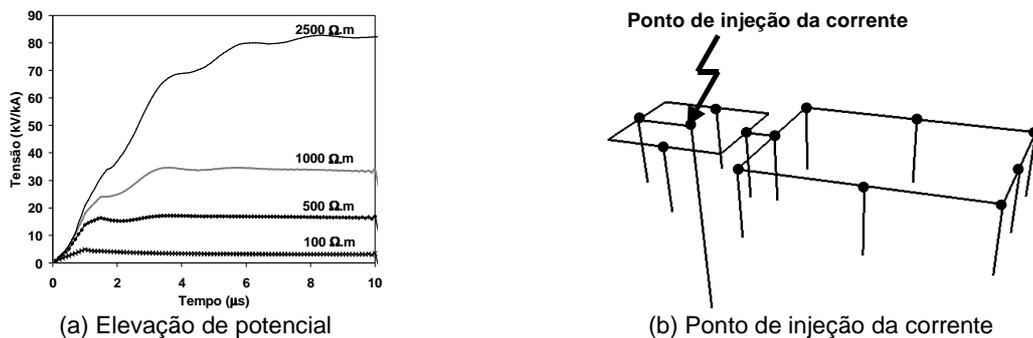


FIGURA 4 - Avaliação da elevação de potencial no sistema de aterramento da estação rádio-base.

Para solos com baixa resistividade, a natureza condutiva do solo prevalece e o aterramento possui comportamento similar ao apresentado por um resistor (3,7). Tal comportamento é evidenciado na curva referente ao solo com resistividade de 100 Ω .m. Neste caso, a onda de potencial apresenta o mesmo crescimento em formato de rampa e o mesmo tempo de frente da onda de corrente injetada. Os valores de pico de ambas as ondas ocorrem por volta de 1 μ s. O aumento do valor da resistividade do solo promove a distorção na onda de potencial. Para solos com resistividade elevada, o comportamento capacitivo do aterramento se torna mais relevante, resultando, assim, no atraso da onda de potencial em relação à onda de corrente injetada.

Os valores da impedância impulsiva de aterramento Z_p para a configuração analisada são apresentados na Tabela 1. Essa impedância é aqui definida como a razão entre os valores de pico das ondas de tensão e corrente (3,7). É importante destacar a relação praticamente linear entre os valores de impedância impulsiva de aterramento e de resistividade do solo.

Tabela 1 - Impedância impulsiva do sistema de aterramento da estação rádio-base

Resistividade do solo (Ω .m)	Impedância Impulsiva Z_p (Ω)	Razão das Impedâncias (Z_p / Z_{p100})	Razão das Resistividades do Solo ($\rho / 100$)
100	3,2	1	1
500	16,9	5,3	5
1000	34,5	10,8	10
2500	82,2	25,7	25

4.2 Sobretensão desenvolvida na rede de distribuição de baixa tensão

As análises a serem apresentadas nesta seção correspondem a três pontos de observação ao longo da linha, conforme destacado na Figura 5: ponto A, referente ao centro da linha e ponto mais próximo em relação à estrutura elevada da estação rádio-base, ponto B, a 35 m de distância do centro da linha e ponto C, a 75 m do centro da linha.

A seguir, serão investigados as sobretensões fase-terra e fase-neutro que surgem ao longo da rede elétrica quando da incidência direta da descarga sobre a estrutura elevada da estação rádio-base. Em um primeiro momento, será desconsiderada a existência de conexão entre os sistemas de aterramento da estação rádio-base

e da rede de distribuição de baixa tensão. Depois, será avaliada a influência que a conexão entre esses sistemas de aterramento causa nas sobretensões resultantes na rede elétrica.

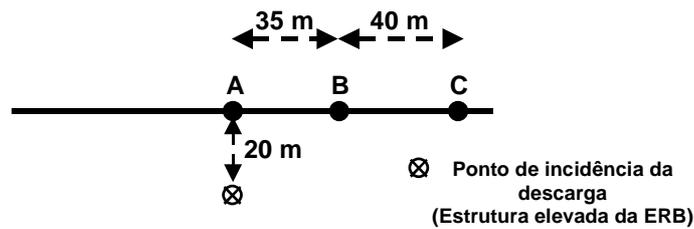


FIGURA 5 – Pontos de observação das sobretensões fase-terra e fase-neutro ao longo da rede elétrica.

4.2.1 Sistema de aterramento da estação rádio-base isolado do sistema de aterramento da rede de distribuição de baixa tensão

A configuração de linha adotada para essa avaliação foi anteriormente apresentada na Figura 3. Neste caso, desconsiderou-se a existência de conexão física entre os sistemas de aterramento da estação rádio-base e da rede de distribuição de baixa tensão. O sistema de aterramento da estação rádio-base é considerado isolado da rede elétrica. A Figura 6 ilustra a sobretensão fase-terra desenvolvida ao longo do condutor fase para diversos valores de resistividade do solo.

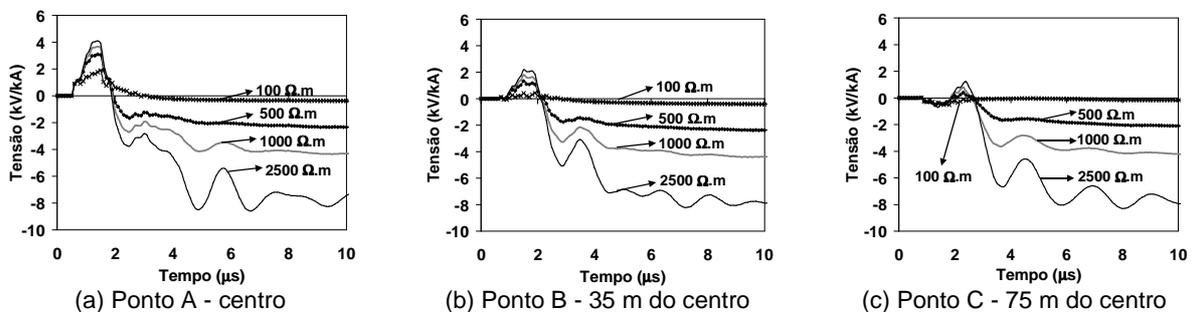


FIGURA 6 - Sobretensão fase-terra desenvolvida ao longo da rede elétrica.

Os resultados da Figura 6 mostram níveis de sobretensão extremamente elevados para todos os valores de resistividade do solo considerados, independente do ponto de observação ao longo da linha. Para solos com resistividade igual a 2500 Ω.m, o valor máximo de sobretensão é, em módulo, de aproximadamente 8,5 kV/kA. Neste caso, assumindo-se a ocorrência de descarga com valor de pico de corrente igual a 45 kA, correspondente ao valor mediano da amplitude máxima de corrente das primeiras descargas medidas na estação do Morro do Cachimbo (8), a amplitude da sobretensão fase-terra no centro da linha pode atingir valores superiores a 380 kV.

A sobretensão desenvolvida no condutor fase para esse tipo de ocorrência é composta pelos efeitos opostos da tensão induzida e da elevação de potencial no solo. Tal fato explica o perfil bipolar da sobretensão mostrada na Figura 6.

O fenômeno de tensão induzida está intimamente ligado à taxa de crescimento da frente da onda de corrente (di/dt). À medida que o valor instantâneo da corrente aumenta, um crescimento similar é observado na onda de tensão induzida. Quando este aumento na amplitude da onda de corrente cessa, a amplitude de tensão induzida apresenta um significativo decréscimo. Sendo assim, o fenômeno de tensão induzida é responsável pelos primeiros microssegundos da onda de sobretensão representada na Figura 6. Após esse intervalo de tempo, o efeito da sobretensão causada pela elevação de potencial no solo passa a prevalecer, dando origem à inversão da polaridade da sobretensão resultante entre fase e terra.

Quanto maior for o valor da resistividade do solo, mais destacada se torna a característica bipolar da onda de sobretensão. A elevação de potencial desenvolvida na superfície do solo explica tal comportamento. De acordo com os resultados da Figura 4 - (a), um aumento no valor da resistividade do solo contribui para aumentar a amplitude das ondas de potencial no solo. Para valores de resistividade do solo superiores a 500 Ω.m, as ondas de potencial ainda apresentam crescimento após 1 μs, tempo para o pico da onda de corrente injetada. Tal característica, conforme anteriormente explicado na seção 4.1, se deve ao comportamento capacitivo do aterramento que se torna mais relevante para solos com valores elevados de resistividade. Este aumento contínuo contribui para elevar o valor absoluto da sobretensão no condutor fase até um nível referido à elevação de potencial na superfície do solo.

Todavia, o aumento da distância entre o ponto de observação na linha e a estação rádio-base contribui para reduzir o valor de pico positivo da onda de sobretensão resultante. Este fato é explicado pela redução do efeito da tensão induzida, uma vez que a intensidade do campo eletromagnético diminui com a distância até o ponto de observação. Para longas distâncias em relação à estação rádio-base, há o predomínio do efeito da elevação de potencial na superfície do solo na sobretensão resultante na rede elétrica. Tal fato pode ser facilmente notado pelas sobretensões apresentadas na Figura 6 - (c), referentes ao ponto C, posicionado a 75 m do centro do condutor fase.

A Figura 7 destaca as sobretensões fase-neutro para os três pontos de observação ao longo da rede de distribuição de baixa tensão. Quanto maior o valor da resistividade do solo, mais severas são essas sobretensões. A amplitude máxima considerando um solo com resistividade de 2500 $\Omega.m$ é de aproximadamente 0,52 kV/kA para o ponto A (centro da linha), 0,49 kV/kA para o ponto B (35 m do centro da linha) e 0,36 kV/kA para o ponto C (75 m do centro da linha). Tais valores são extremamente intensos para o nível de suportabilidade das cargas. Assumindo a ocorrência de uma descarga com 45 kA de valor de pico de corrente, estas sobretensões podem exceder 23, 22 e 16 kV, respectivamente, certamente causando danos para a carga.

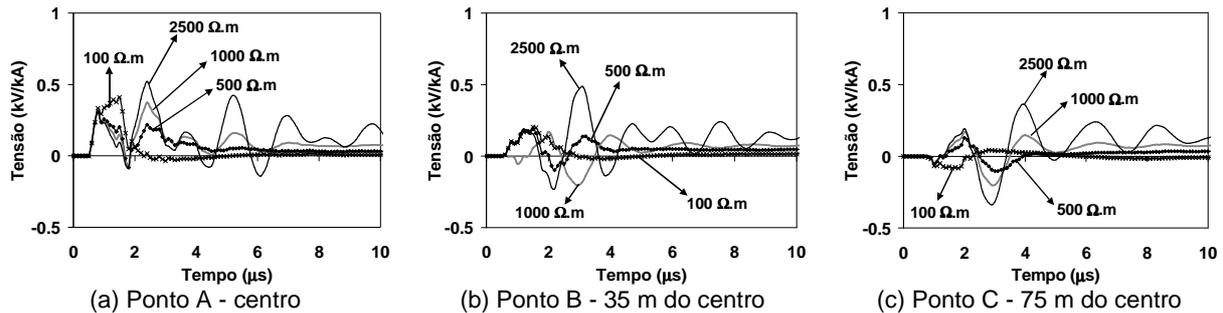


FIGURA 7 - Sobretensão fase-neutro desenvolvida ao longo da rede elétrica.

4.2.2 Conexão direta entre os sistemas de aterramento da estação rádio-base e da rede de baixa tensão

Usualmente, os sistemas de aterramento da estação rádio-base e da rede de baixa tensão que alimenta a estação são conectados entre si. Por causa da elevação de potencial no solo, tal conexão pode contribuir para aumentar os níveis de sobretensão desenvolvidos na rede elétrica pela injeção de corrente no condutor neutro. A fim de investigar tal condição, simulou-se a presença de um condutor horizontal enterrado conectando uma haste do anel de equalização do container à haste do condutor de descida central da rede de baixa tensão, conforme indicado na Figura 8. Esse eletrodo horizontal possui aproximadamente 20 m de comprimento e foi enterrado 0,5 m abaixo do nível do solo. Os resultados obtidos para as sobretensões fase-terra desenvolvidas ao longo da rede elétrica são destacados na Figura 9.

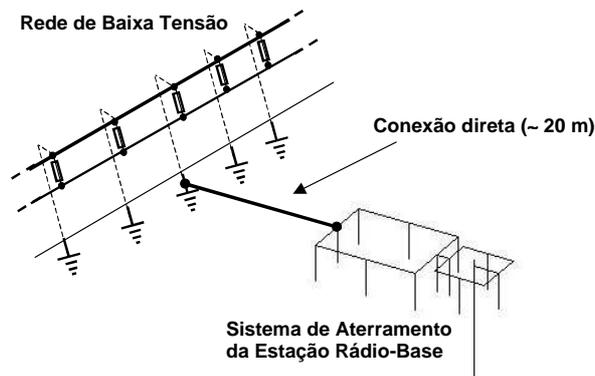


FIGURA 8 - Representação da conexão direta entre os sistemas de aterramento da estação rádio-base e da rede de distribuição de baixa tensão.

Os resultados da Figura 9 mostram que a conexão direta entre os dois sistemas de aterramento é responsável por promover um significativo aumento na amplitude das sobretensões entre fase e terra. Os valores máximos no centro do condutor fase são de aproximadamente 5 kV/kA para 100 $\Omega.m$, 20 kV/kA para 500 $\Omega.m$, 38 kV/kA para 1000 $\Omega.m$ e 80 kV/kA para 2500 $\Omega.m$. Tais níveis de sobretensão certamente causarão sérios danos aos consumidores e ao sistema elétrico. Além disso, os resultados apresentados na Figura 9 denotam que esses valores de sobretensão se mantêm os mesmos para cada resistividade do solo, independentemente da localização do ponto de observação ao longo da linha, conforme pode ser visto pelos resultados da Figura 9 - (b) e Figura 9 - (c).

Ademais, com a conexão direta entre os dois sistemas de aterramento, o efeito da elevação de potencial na sobretensão fase-terra se torna muito mais relevante em relação ao efeito de tensão induzida, comportamento que é evidenciado pelos valores negativos de sobretensão apresentados na Figura 9.

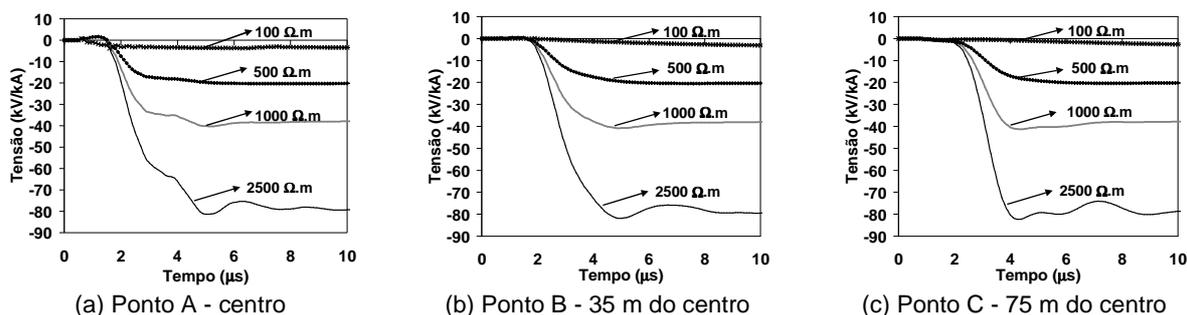


FIGURA 9 - Sobretensão fase-terra ao longo da rede elétrica – Influência da conexão direta entre os sistemas de aterramento da estação rádio-base e da rede de baixa tensão.

A Figura 10 apresenta as sobretensões fase-neutro referentes a esse caso para os três pontos de observação destacados ao longo da rede. Nota-se a grande elevação dos níveis de sobretensão com o aumento do valor de resistividade do solo em comparação com os resultados da Figura 7, que consideravam o sistema de aterramento da estação rádio-base isolado. Os efeitos mais intensos ocorrem para o centro da linha, podendo resultar em valores próximos a 6 kV/kA para solos com resistividade de 2500 Ω.m.

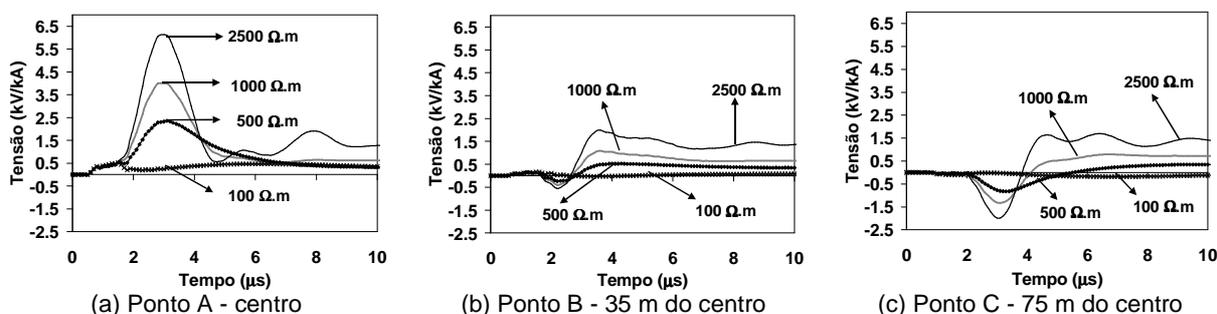


FIGURA 10 – Sobretensão fase-neutro ao longo da rede elétrica – Influência da conexão direta entre os sistemas de aterramento da estação rádio-base e da rede de distribuição de baixa tensão.

5.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um conjunto de avaliações a respeito dos níveis de sobretensão em redes convencionais de baixa tensão associados à incidência de descargas em estruturas elevadas de estações rádio-base de telefonia celular.

Admitindo-se a hipótese do aterramento da torre (estrutura elevada) não possuir conexão elétrica com o condutor neutro (aterramento considerado isolado do sistema elétrico), os resultados revelaram valores de sobretensão extremamente elevados estabelecidos no condutor fase em relação ao terra remoto, sendo a região da linha mais próxima da estação a que ficou submetida aos níveis mais críticos.

Ademais, observou-se que a onda da sobretensão desenvolvida no condutor fase possui um perfil bipolar, sendo o fenômeno de tensão induzida responsável pela parcela positiva da onda em seus primeiros microssegundos. Após este intervalo de tempo, a sobretensão causada pela elevação de potencial no solo prevalece, alterando a polaridade da onda de sobretensão resultante. Quanto maior o valor da resistividade do solo, mais relevante se torna a contribuição da elevação de potencial na sobretensão total desenvolvida no condutor fase.

A sobretensão fase-terra na entrada de serviço do consumidor é extremamente intensa quando se considera a presença de cargas resistivas conectando os condutores fase e neutro. Tal fato se constitui em sério risco para a segurança do consumidor e requer atenção especial com relação à proteção das instalações dos consumidores. Apesar dos valores de sobretensão fase-neutro serem comparativamente baixos em relação aos valores obtidos entre fase e terra, tais valores são muito superiores aos níveis de suportabilidade de cargas típicas.

Usualmente o condutor neutro está conectado a um dos terminais da carga correspondente à estação rádio-base, que por sua vez está conectado diretamente ao aterramento da torre. Esta conexão entre os sistemas de aterramento da estação rádio-base e da rede de baixa tensão é responsável por promover uma significativa elevação da amplitude da sobretensão no condutor fase, em relação à hipótese de aterramento isolado. Tal

elevação se torna mais intensa com o aumento do valor de resistividade do solo. As amplitudes das sobretensões entre fase e neutro também se tornam extremamente elevadas, sendo certamente capazes de causar danos severos às cargas conectadas à rede e aos componentes do sistema elétrico. Esta conclusão aponta para a necessidade de adoção de cuidados especiais com relação à proteção da rede da empresa e consumidores próximos das estações rádio-base.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) NUCCI, C.A., RACHIDI, F., IANOZ, M., MAZZETTI, C., Lightning-induced Voltages on Overhead Lines, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol.35, No.1, pp.75-86, Fevereiro, 1993.
- (2) SILVEIRA, F.H., Modelagem para Cálculo de Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Dezembro, 2006.
- (3) VISACRO, S., Aterramentos Elétricos: Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramento, 2a. edição, São Paulo, Brasil, Ed. Artliber, p. 1-159, 2002.
- (4) VISACRO, S., SOARES J., A., HEM: A Model for Simulation of Lightning Related Engineering Problems, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, p. 1206-1208, Abril, 2005.
- (5) HOIDALEN, H.K., Lightning-Induced Voltages in Low-Voltage Systems and Its Dependency on Voltage Line Terminations, In: Proceedings of 24th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Birmingham, Inglaterra, p. 287-292, 1998.
- (6) VISACRO, S., SARAIVA, A.C., SOARES J., A., SCHROEDER, M.A.O., Análise do Comportamento de Configurações Típicas do Aterramento de Torres de Telecomunicações na Incidência de Descargas Atmosféricas – Aspectos de Aplicação, IV International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), São Paulo, Brasil, pp.155 – 159, 1997.
- (7) VISACRO, S., "A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 1, p. 381-386, Janeiro, 2007.
- (8) VISACRO, S., SCHROEDER, M.A.O., SOARES J., A., CHERCHIGLIA, L.C.L., SOUZA, V.J., Statistical Analysis of Lightning Current Parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station, Journal of Geophysical Research, vol. 109, no. D01105, 1-11, 2004.