



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

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

GRUPO X

SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO – GSC

**RESPOSTA DOS ATERRAMENTOS ELÉTRICOS FRENTE A CORRENTES
DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Silvério Visacro

Universidade Federal de Minas Gerais

LRC – LIGHTNING RESEARCH CENTER (UFMG/CEMIG)

RESUMO

Este artigo apresenta uma abordagem objetiva e sintética sobre o comportamento dos aterramentos elétricos quando submetidos a correntes associadas a descargas atmosféricas, que contempla todos os principais fatores que influenciam tal comportamento.

PALAVRAS-CHAVE

Comportamento de aterramentos elétricos frente a correntes de descargas atmosféricas, Comportamento transitório de aterramentos elétricos, Desempenho de aterramentos elétricos frente a descargas atmosféricas.

1.0 - INTRODUÇÃO

Quando submetido a correntes associadas a descargas atmosféricas, o aterramento elétrico apresenta uma resposta bem peculiar, muito distinta daquela típica de solicitações lentas como, por exemplo, curtos-circuitos.

Há muito, o autor vem pesquisando o tema nos seus aspectos teóricos e experimentais (1,2,3), tendo inclusive desenvolvido um modelo original para cálculo do comportamento transitório dos aterramentos elétricos, reconhecido internacionalmente (4). A experiência do autor, ensinando o tema em cursos de pós-graduação envolvendo pessoal de empresas e acadêmico, revela que freqüentemente faltam aos engenheiros conceitos fundamentais sobre o comportamento transitório dos aterramentos, cujo conhecimento é essencial para o entendimento e solução dos problemas envolvidos na proteção contra descargas.

Neste artigo, apresenta-se uma abordagem didática e objetiva do tema, cuja meta é possibilitar ao engenheiro de concessionárias de energia alcançar um conhecimento consistente sobre os fundamentos da matéria, que o capacite a entender o comportamento do aterramento nesse domínio e, sobretudo, as implicações desse comportamento nas aplicações de sistemas de potência. A abordagem tem seu foco concentrado nos aspectos físicos, evitando-se desenvolvimentos matemáticos. Nesta perspectiva, são explicitados conceitos relevantes e são esclarecidas falsas premissas apresentadas na literatura. Esse conhecimento é relevante para o engenheiro, sobretudo no cenário atual em que se disponibilizam diversas ferramentas computacionais para este tipo de cálculo, baseadas em diferentes metodologias (FDTD, método dos momentos, elementos finitos etc.). O uso dessas ferramentas requer do usuário a escolha de representações (modelos) adequadas para os componentes do aterramento, o que implica a necessidade de conhecimento apurado do problema físico correspondente. Sem tal conhecimento, a aplicação das ferramentas pode levar a resultados que correspondem a desvios grosseiros da realidade física. O conteúdo deste artigo é derivado de dois livros do autor (1,3), de uma publicação recente em periódico (2) e de um livro em fase de edição (5).

2.0 - CONSIDERAÇÕES BÁSICAS SOBRE O COMPORTAMENTO DO ATERRAMENTO

Basicamente, o aterramento é constituído por três componentes: (i) os condutores metálicos que conectam o sistema aos eletrodos, (ii) os corpos condutores enterrados que constituem os eletrodos (iii) a terra envolvente aos eletrodos, que constitui o componente mais relevante.

Para fins de possibilitar um melhor entendimento dos conceitos apresentados nas sessões seguintes, uma

descrição simplificada do comportamento do aterramento elétrico segundo uma abordagem de teoria de circuitos é desenvolvida a seguir (1). Inicialmente, para realçar a natureza do comportamento do aterramento, vale comentar que qualquer terminação para terra apresenta efeitos resistivo, indutivo e capacitivo. A Figura 1 apresenta um circuito equivalente que representa tais efeitos para um elemento do aterramento, constituído por uma parcela do comprimento do eletrodo enterrado no solo.

A corrente injetada no eletrodo tem duas diferentes componentes. Ela é parcialmente dispersada para o solo através de uma corrente transversal (I_t) e parcialmente transferida para o comprimento restante do eletrodo, através de uma corrente longitudinal (I_l).

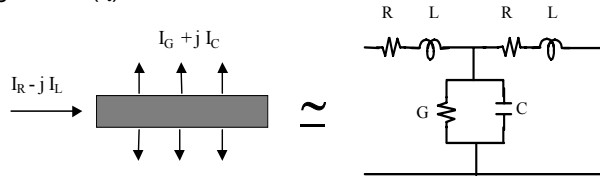


FIGURA 1 - Componentes de corrente no eletrodo e no solo [adaptado de (2)]

A componente longitudinal é responsável por perdas internas ao condutor e pelo campo magnético estabelecido na região em volta dos caminhos de corrente (no interior e exterior do condutor). Em termos do circuito equivalente, o cômputo das energias correspondentes pode ser feito por meio de uma resistência R e uma indutância L em série. Por outro lado, o campo elétrico no solo (um meio de resistividade ρ e permissividade ϵ) determina o fluxo de correntes condutiva e capacitiva no meio. A relação entre tais correntes não depende da geometria dos eletrodos, mas tão somente da relação " $\sigma/\omega\epsilon$ ", onde σ refere-se à condutividade do solo e ω à frequência angular. A energia associada ao fluxo dessas correntes transversais pode ser computada por meio de uma condutância G e de uma capacitância C , colocadas em paralelo no circuito equivalente.

Tal descrição se aplica somente ao elemento específico de aterramento representado no circuito equivalente. Para considerar a configuração completa do aterramento, também os acoplamentos eletromagnéticos correspondentes aos efeitos mútuos entre os elementos que compõem o aterramento devem ser computados (efeitos resistivo, indutivo e capacitivo). Portanto, o conhecimento da resposta do aterramento requer a solução de uma rede constituída por um conjunto de circuitos equivalentes conectados, correspondentes ao conjunto de elementos que compõem o aterramento. A conexão destes elementos é feita segundo a topologia de configuração dos eletrodos e deve ter em conta os efeitos mútuos entre os mesmos.

Numa abordagem generalizada, a solução desta rede, vista do ponto de injeção de corrente, expressa a impedância do aterramento. No domínio da frequência, é possível se determinar precisamente uma Impedância Complexa de Aterramento para cada frequência específica, como a solução da rede correspondente ao circuito elétrico equivalente do aterramento ($Z(\omega) = V(\omega) / I(\omega)$). A Figura 2 ilustra tal aspecto para um eletrodo longo enterrado num solo de $2500 \Omega \cdot m$. Detalhes sobre o diagrama de impedâncias apresentado na figura são comentados posteriormente.

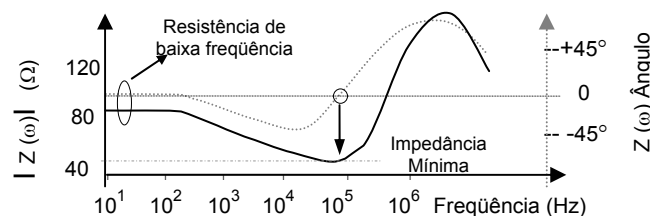


FIGURA 2 – Diagrama de Frequências da Impedância de Aterramento $Z(\omega)$ [adaptado de (2)]

Numa perspectiva eletromagnética, essa impedância, definida pela razão entre a elevação de potencial desenvolvida no eletrodo (em relação ao terra remoto) e a corrente aplicada ao aterramento, expressa o comportamento do aterramento. No domínio do tempo, para ondas impulsivas, como aquelas associadas a descargas atmosféricas, é muito usual representar o comportamento do aterramento através da *Impedância Impulsiva de Aterramento*, Z_p . Este parâmetro se refere ao quociente entre os valores de pico das ondas de tensão e corrente no aterramento:

$$Z_p = V_p / I_p \quad (1)$$

A despeito da usual não simultaneidade da ocorrência destes picos, esta representação apresenta um aspecto muito atrativo. Este consiste na possibilidade de se determinar prontamente o valor máximo da tensão resultante no ponto de injeção de corrente, simplesmente multiplicando-se o valor de pico da corrente por Z_p . Este recurso é muito apropriado para a realização de análises de sensibilidade.

Deve-se realçar que a Impedância Impulsiva depende da forma de onda de corrente e dos parâmetros de tempo da frente desta. A Figura 3 ilustra este aspecto, mostrando a resposta de um mesmo aterramento (mesma configuração e solo) para duas diferentes ondas de corrente.

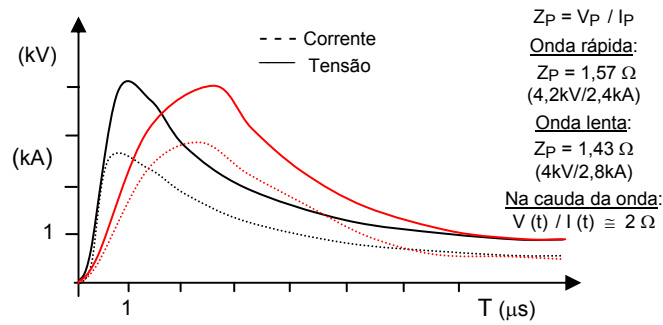


FIGURA 3 – Impedância Impulsiva de um mesmo aterramento para diferentes ondas de corrente [adaptado de (2)]

O quociente entre os picos de tensão e corrente é maior para a onda rápida ($1,57 \Omega$) em relação à onda lenta ($1,43 \Omega$). Apesar da variação da impedância impulsiva em função do tempo de frente de onda, a relação entre os valores instantâneos de tensão e corrente na cauda da onda é praticamente constante nos dois casos ($\sim 2 \Omega$). Nesta faixa, tal relação se aproxima da resistência de baixa frequência do aterramento. A variação de impedância indicada tem caráter apenas ilustrativo, sendo válida somente para uma configuração específica de aterramento.

Apesar dos dois tipos de representação de impedância anteriores, na maior parte das aplicações é usual referir-se à resistência do aterramento em lugar da impedância de aterramento. Em princípio, isto se explica pelo fato de que, nestas aplicações, os efeitos reativos podem ser desprezados. Estas condições são muito comuns para fenômenos lentos, cujas frequências representativas têm baixo valor, tais quais os curtos-circuitos em sistemas de potência. Nestes casos, é válida a aproximação potencial constante para os eletrodos e o circuito equivalente representativo do aterramento pode ser reduzido a um conjunto de condutâncias (ou resistências transversais equivalentes), incluídos os efeitos mútuos resistivos entre estas.

O valor da Resistência de Aterramento, R_T , é quantificado como o quociente entre a elevação de potencial do eletrodo (referida a um ponto distante) e a corrente nele injetada:

$$R_T = V_T / I_T \quad (2)$$

3.0 - CONCEITOS FUNDAMENTAIS: EXPLICANDO O COMPORTAMENTO DO ATERRAMENTO PARA CORRENTE DE DESCARGAS

3.1 Introdução

Em geral, para se descrever o comportamento do aterramento, dois aspectos principais devem ser contemplados: (i) o comportamento do solo nas condições ditadas pelo fenômeno eletromagnético solicitante (ii) a expressão correta do acoplamento eletromagnético entre os elementos do aterramento, incluindo os efeitos de propagação.

O primeiro aspecto depende apenas das propriedades do solo, mas o segundo aspecto é bastante influenciado pela configuração geométrica dos eletrodos. O cálculo dos dois aspectos consiste numa tarefa técnica complexa. Nos próximos parágrafos tais aspectos são comentados, mas apenas os conceitos fundamentais de interesse objetivo para a presente abordagem são considerados.

3.2 Composição da corrente e dependência da frequência dos parâmetros do solo

A maioria dos trabalhos dedicados a aterramentos assume que o solo é um meio predominantemente condutivo. Em decorrência, as correntes de deslocamento (capacitivas) são desprezadas. Esta hipótese é razoável apenas para fenômenos lentos. Para fenômenos rápidos, a corrente capacitiva pode alcançar a mesma amplitude da resistiva, principalmente em solos de alta resistividade. Dados experimentais mostram que o quociente entre as correntes de condução e capacitiva no solo varia amplamente no domínio de frequências que é representativo das correntes de descargas ($0,5 < \sigma/\omega\epsilon < 10^3$) (6,7). A Figura 4 mostra a curva característica tensão-corrente medida para uma amostra de solo submetida a uma corrente impulsiva (dupla exponencial: $2/50 \mu s$). A onda de tensão é aplicada entre dois cilindros coaxiais separados por uma amostra compacta de solo, quando uma corrente de baixa amplitude flui entre eles.

A curva foi construída a partir das ondas registradas de tensão e corrente. Para cada instante de tempo (t_i), os valores simultâneos de corrente e tensão foram tirados de curvas que representam tais ondas no domínio do tempo (como aquelas da Figura 3) e foram colocados na curva $V_x I$. Como se percebe, a curva resultante corresponde à resposta de um circuito paralelo RC frente a uma onda impulsiva da corrente. A derivada (na curva $V_x I$) dá uma idéia da impedância do solo uma vez que esta é obtida do quociente entre as variações de tensão e corrente ($\Delta V/\Delta I$). A curva dupla exponencial de corrente apresenta sua derivada máxima nos instantes iniciais e tal derivada decresce para o valor nulo quando a curva alcança sua crista. Assim, nos primeiros instantes, o ramo capacitivo é responsável por decrescer a impedância do circuito equivalente. Isto explica a ocorrência nesse período da derivada mínima na curva $V_x I$. Quando a corrente total aumenta, a impedância do ramo capacitivo é ampliada e, também, a derivada na curva $V_x I$. A linha reta expressa o comportamento do solo na faixa de baixas frequências. Sua inclinação corresponde à resistência de baixa frequência (R_{LF}) entre os condutores coaxiais.

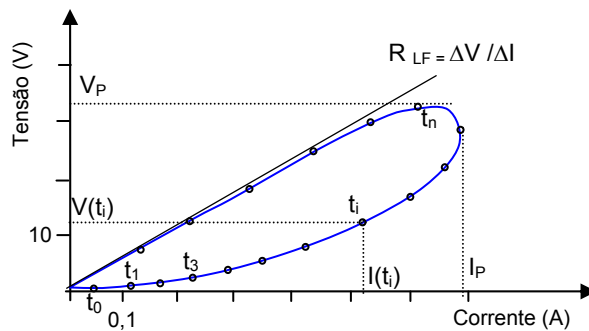


FIGURA 4 – Característica tensão-corrente de uma amostra de solo [adaptado de (2)]

A curva denota claramente a relevância da corrente capacitiva no solo. O avanço da crista da corrente em relação à da tensão revela este efeito capacitivo e justifica a forma da curva $V \times I$ no entorno dos picos de corrente e tensão. Também o diagrama de impedância de aterramento $Z(\omega)$, na Figura 2, mostra tal aspecto. Quando a frequência é aumentada, a impedância de aterramento se reduz em relação à resistência de baixa frequência devido ao efeito capacitivo. Em seguida, a impedância continua decrescendo enquanto o efeito indutivo começa a exercer influência. Esta atinge um valor mínimo em torno de uma frequência na qual os efeitos capacitivo e indutivo se compensam ($\theta_z(\omega) \cong 0$). Após esta fase, o efeito indutivo prevalece e a impedância cresce.

Na maior parte das condições práticas, a propriedade magnética do solo é similar àquela do ar (permeabilidade magnética: μ_0). Entretanto, os parâmetros responsáveis pelas correntes condutiva e capacitiva são fortemente dependentes da frequência (6,7). Dados experimentais, obtidos para certas categorias de solo, mostram que a resistividade do solo decresce para aproximadamente metade do seu valor para aumento da frequência entre 10^2 e $2 \cdot 10^6$ Hz. O cômputo desse efeito implica a redução da impedância de aterramento. A ordem de grandeza da permissividade relativa do solo decresce de 10^4 para 10^1 na mesma faixa de frequências (6). Como a literatura não provê nenhuma formulação geral para expressar a dependência da frequência dos parâmetros do solo, esse efeito é usualmente desprezado. Numa abordagem conservadora, o valor da resistividade do solo é assumido como aquele medido por instrumentos convencionais, que usam sinais de baixa frequência. Segundo a mesma abordagem, assume-se que a permissividade relativa do solo varie entre 4 e 81, consoante a umidade do solo.

3.3 Distribuição do campo e efeitos de propagação no solo

Quando ondas de tensão e corrente impulsivas são aplicadas a um condutor longo enterrado no solo, as ondas eletromagnéticas correspondentes se propagam ao longo deste. Este sistema se comporta como uma linha de transmissão colocada num meio com perdas. Enquanto a onda se propaga, a perda de energia promove atenuação da sua amplitude. Por outro lado, as componentes de frequência da onda apresentam diferentes velocidades de propagação e são submetidas a diferentes níveis de atenuação. Assim como a perda de energia, tal atenuação aumenta com a frequência e com a condutividade do solo. Como resultado, as ondas de corrente e tensão que se propagam ao longo do eletrodo têm sua amplitude atenuada e são também submetidas a distorção ao longo da direção de propagação, com a redução da inclinação da frente de onda. Tais aspectos são ilustrados na Figura 5.

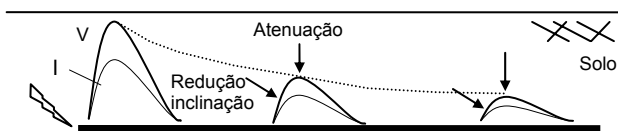


FIGURA 5 – Atenuação e distorção das ondas de corrente e tensão ao longo do eletrodo [adaptado de (2)]

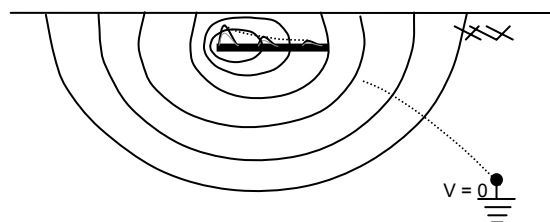


FIGURA 6 – Comportamento divergente do campo no solo [adaptado de (2)]

Como o comprimento do eletrodo é limitado, tal comportamento é superposto àquele associado ao campo divergente gerado pela corrente que flui do eletrodo para o terra remoto. A Figura 6 ilustra este aspecto, através de curvas que mostram a distribuição do potencial escalar no solo. Para eletrodos concentrados (curtos em comparação com o comprimento de onda típico do sinal solicitante), este comportamento divergente prevalece.

Como consequência da atenuação, a corrente dispersa para o solo ao longo do eletrodo apresenta uma distribuição não uniforme. A densidade linear de corrente (A/m) diminui ao longo do eletrodo. O conceito de comprimento efetivo do eletrodo (ou raio efetivo para malhas), introduzido por Gupta (8), é derivado de tais considerações. Este corresponde a um comprimento limite do eletrodo. O alongamento do eletrodo além deste limiar não é capaz de promover redução adicional da impedância de aterramento. Este comportamento é explicado pelo fato de que, além deste limiar, as componentes de alta frequência das correntes (associadas à frente de onda) estão tão atenuadas que, a despeito da disponibilidade de comprimento adicional de eletrodo, praticamente não mais contribuem para a dispersão de corrente para o solo. O comprimento efetivo (L_{ef})

decrece com o aumento da condutividade e da frequência. Isto se explica pelo fato desses dois parâmetros serem responsáveis pelo crescimento das perdas no solo e, por conseguinte, pelo aumento da atenuação das ondas de corrente e tensão que se propagam ao longo do eletrodo. Isto se torna muito evidente ao se aproximar o eletrodo enterrado no solo por uma linha de transmissão. A constante de atenuação corresponde à parcela real da constante de propagação (γ). Esta aumenta naturalmente com o crescimento da frequência e da condutância: $\gamma = \alpha + j\beta = [(R+j\omega L)(G+j\omega C)]^{1/2}$, sendo a condutância proporcional à condutividade do solo.

No domínio da frequência, o valor de L_{ef} é definido claramente para cada frequência, o que não ocorre para correntes impulsivas, as quais envolvem um amplo espectro de componentes de frequência. Nesse caso, L_{ef} é usualmente assumido como o comprimento de eletrodo que corresponde à mínima impedância impulsiva de aterramento. O aumento do comprimento do eletrodo (além de L_{ef}) não é mais capaz de promover a redução desta impedância. O comprimento efetivo pode ser obtido a partir de curvas que expressam a impedância impulsiva em função do comprimento de eletrodo, através da identificação do comprimento no qual se inicia o patamar correspondente à constância no valor da impedância. A Figura 7 mostra este tipo de curva para um condutor longo horizontal enterrado em solo homogêneo de diferentes resistividades (9). As curvas foram construídas, determinando-se Z_p a partir das ondas de tensão resultantes da aplicação de uma onda impulsiva de corrente de 1,2/50 μ s, considerando diferentes comprimentos de eletrodo.

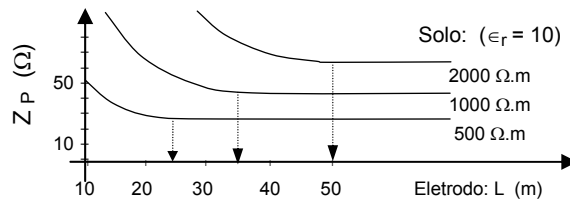


FIGURA 7 – Definição do Comprimento Efetivo de Aterramento a partir de curvas de Impedância Impulsiva de Aterramento [adaptado de (2)]

3.4 Efeito da intensidade de corrente

Nas condições práticas usuais, para um amplo domínio de intensidades de correntes, o solo apresenta um comportamento linear. Isto significa que é constante o quociente entre as amplitudes da tensão resultante e a onda de corrente aplicada ao aterramento. Entretanto, para eletrodos concentrados e correntes muito intensas, a densidade de corrente no solo próximo à superfície do eletrodo pode alcançar valores muito elevados. O campo elétrico correspondente nesta região pode exceder a um limiar crítico. Acima deste limite, tem lugar um processo de ionização do solo, com o estabelecimento de descargas elétricas disruptivas nesse meio (Figura 8.a). O designado *Campo Elétrico Crítico* (E_{CR}) varia entre 0,2 e 1,7 MV/m, dependendo da resistividade do solo e da sua umidade (10,11). Esse fenômeno guarda certa similaridade com o Efeito Corona, embora sua distribuição seja muito mais não regular devido às características do solo. Para correntes impulsivas e correntes de elevada intensidade, tal efeito se manifesta através da diminuição da impedância impulsiva, como mostra Figura 8.b (6).

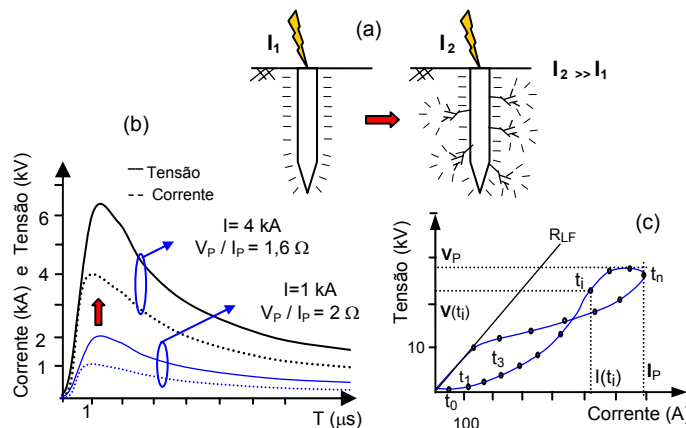


FIGURA 8 – Aspectos do processo de ionização do solo [adaptado de (2)]

Este comportamento é explicado pelo aumento da área de dissipação do eletrodo. Como os canais ionizados de descarga apresentam alta condutividade em relação ao solo, eles promovem a extensão da área de dissipação do eletrodo. A Figura 8.c mostra como este efeito afeta a curva da Figura 4.

O cômputo deste efeito não linear apresenta duas complexidades principais. A primeira se refere à definição do valor crítico de campo elétrico, onde o processo de ionização tem início. A segunda corresponde ao fato de que a distribuição do efeito ao longo do eletrodo é não uniforme, uma vez que a onda de tensão (e o correspondente campo elétrico) é atenuada ao longo da superfície do eletrodo devido ao efeito de propagação.

A dinâmica deste fenômeno já foi explicada por diferentes abordagens (10,12). Nos casos em que a configuração

do campo elétrico não é significativamente distorcida pelo processo de ionização, avaliações experimentais mostram a possibilidade de se computar o efeito através de um aumento equivalente da seção transversal do eletrodo, admitindo-se que esse aumento da seção varie ao longo do comprimento do condutor (12). Contudo, para eletrodos muito concentrados, o cômputo do efeito é mais complicado, uma vez que os canais ionizados podem alterar totalmente a configuração de campo nas proximidades do eletrodo.

3.5 Cômputo simultâneo de todos os fatores de influência

Para as correntes de descargas atmosféricas, um aspecto torna a compreensão do comportamento de aterramento mais complexo: usualmente todos os efeitos referidos anteriormente ocorrem simultaneamente. Cada qual exerce influência no comportamento do aterramento, embora, dependendo das características da corrente solicitante, um efeito possa prevalecer sobre os demais. Em muitos casos, é difícil identificar corretamente a principal causa de um comportamento determinado. Isto explica parcialmente os equívocos de interpretação da resposta do aterramento. Neste aspecto, se destaca o usual equívoco de se atribuir integralmente a redução da impedância de aterramentos para correntes impulsivas à ocorrência de ionização no solo. Como explicado, mesmo na ausência desse efeito, a impedância impulsiva pode ser inferior à resistência de baixa frequência.

A abordagem analítica, empregada no passado para descrever o comportamento transitório do aterramento, era muito limitada para computar todos os citados efeitos. Felizmente, o avanço computacional, no que diz respeito à capacidade de memória e à velocidade de processamento, permitiu o desenvolvimento de abordagens numéricas muito eficientes, baseadas em equações de campo, para substituir as aproximações analíticas. Por volta de 1990, vários modelos computacionais consistentes foram apresentados na literatura para cálculo do comportamento transitório de aterramentos (13,14,15). Os modelos formulados por tais abordagens evoluíram desde então e, atualmente, permitem computar todos os efeitos referidos (4,12), para calcular as grandezas de interesses no projeto de aterramentos.

4.0 - ASPECTOS DE ORDEM PRÁTICA DE MAIOR RELEVÂNCIA

As simples considerações anteriores são suficientes para permitir realçar alguns importantes aspectos práticos e para enfatizar a significância de certos conceitos de interesse para este texto.

Primeiramente, em princípio, *o aterramento tem o comportamento de uma impedância*. Apenas para condições muito particulares do fenômeno solicitante (baixa frequência), este pode ser representado adequadamente por uma resistência. A usual referência a uma "resistência dinâmica" para descrever o comportamento transitório do aterramento deve ser evitada, pois na realidade ela esconde a natureza real desse comportamento.

Para correntes de descargas, o comportamento do aterramento é muito diferente daquele de uma resistência, mesmo quando o comportamento não linear é desprezado. Neste contexto, uma questão se coloca de imediato: *"Por que o termo resistência de aterramento é a referência usual nos problemas envolvidos na proteção contra descargas atmosféricas no lugar de impedância de aterramento?"*. Esta parece uma prática razoável, derivada das restrições experimentais para se medir a impedância de aterramento nas condições de campo. Para o pessoal de engenharia, esta medição é uma tarefa técnica demasiado complexa. Por outro lado, a medição da resistência de aterramento é uma tarefa de realização viável por este mesmo pessoal. Do conhecimento desse parâmetro e da configuração do eletrodo, estimativas do valor da impedância de aterramento podem ser desenvolvidas.

Como um segundo aspecto de destaque, *a hipótese usual de equipotencialidade dos eletrodos é razoável apenas para ocorrências lentas (baixa frequência) ou para comprimentos muito curtos dos eletrodos*. Para transientes e ocorrências de alta frequência, o efeito de propagação e a queda de tensão (devido aos efeitos indutivo e da resistência interna) estabelecem significativas diferenças de potencial ao longo do eletrodo suprimindo a equalização do potencial ao longo do eletrodo de aterramento para correntes de descargas. A conexão das terminações para terra de equipamentos em diferentes pontos do eletrodo não assegura a equalização do potencial. Neste aspecto, parece prudente evitar conectar eletricamente equipamentos que fecham elos de corrente (conectados por "loops" aéreos, tais quais cabos de blindagem) ao eletrodo de aterramento em diferentes pontos da malha enterrada. Isto pode dar origem a "loops" de corrente destrutivas.

No projeto de aterramentos, *a resposta do eletrodos frente a correntes de descargas é avaliada em termos de três parâmetros: a elevação de potencial do aterramento (GPR - Ground Potential Rise), a distribuição de potenciais ao longo dos eletrodos e a distribuição de potencial sobre a superfície do solo na vizinhança do aterramento*. Na maior parte das situações, o interesse prático reside no conhecimento das condições críticas, usualmente traduzidas pelo valor de pico das tensões desenvolvidas. *Nesses casos, muito comumente utiliza-se a impedância impulsiva (Z_P) para representar o comportamento do aterramento*, pois esta representação permite determinar o máximo GPR (sempre verificado no ponto de injeção de corrente) a partir do simples produto de Z_P pelo valor de pico da corrente. Em geral, a impedância impulsiva tem valor diferente da resistência de baixa frequência devido aos efeitos reativos e de atenuação e, também, devido à dependência dos parâmetros do solo em relação à frequência. Entretanto, em alguns casos, é possível estimar-se tal impedância a partir da resistência de aterramento, que é o parâmetro usualmente medido. A título de exemplo, vale citar uma referência (9), que sugere um valor para a impedância impulsiva um pouco inferior àquele da resistência de baixa frequência ($Z_P \cong 0.7.R_{LF}$) para longos eletrodos horizontais (aplicável se o comprimento efetivo não é excedido e o processo de ionização não é relevante).

Outro aspecto que merece atenção especial é o conceito de *Comprimento Efetivo do Eletrodo*. Como já explicado, é para este comprimento que se alcança o valor mínimo de impedância. Este conceito é muito importante quando a atenuação da onda de corrente é significativa. Este é o caso usual para longos eletrodos ou para eletrodos curtos quando estes estão enterrados em solo de baixa resistividade. O comprimento efetivo não é um parâmetro constante para uma dada configuração do eletrodo enterrado num determinado solo. Naturalmente, ondas de correntes com diferentes tempos de frente correspondem a diferentes comprimentos efetivos. Ondas rápidas, cujas freqüências representativas são tipicamente elevadas, têm comprimento efetivo menor, por estarem associadas a efeitos de atenuação mais pronunciados no solo. Apenas como uma primeira referência, para solos cujas resistividades têm os valores 100, 500, 1000, 2000 e 5000 $\Omega \cdot m$, o comprimento efetivo tem respectivamente a ordem de 10, 23, 34, 50 e 85 m, considerando-se uma onda rápida de corrente (1,2/50 μs) (9). Para ondas mais lentas (por exemplo, 3/70 μs), os valores são pouco maiores. Entretanto, em aplicações de proteção contra descargas, parece razoável adotar tais valores, mesmo para correntes lentas. Para as componentes elevadas de freqüência associadas à frente de onda, a densidade linear de corrente dissipada para o solo é muito reduzida próximo ao comprimento efetivo e, assim, não é uma prática eficiente alcançar tal comprimento.

Com respeito a este efeito, *três aspectos práticos principais merecem destaque*. Primeiramente, *no que concerne a aplicações de aterramentos relativos à proteção contra descargas, o uso de comprimento de eletrodo mais longo que o comprimento efetivo pode ser um desperdício*. O segundo aspecto refere-se aos cuidados recomendados para aquelas aplicações nas quais a impedância de aterramento tem seu valor estimado a partir do valor medido de resistência de aterramento, como é usual no caso de linhas de transmissão. Nesse caso, é comum observar-se um valor limite da resistência de aterramento da torre (muito usualmente 20 Ω ou 30 Ω no Brasil) na expectativa de que isto implique limitação de ordem similar no valor da impedância. *Algumas vezes, um valor reduzido de resistência de aterramento não assegura valor reduzido para a impedância de aterramento*. Ao se aumentar o comprimento do eletrodo, sua resistência é diminuída continuamente e este comportamento persiste mesmo ao se ultrapassar o comprimento efetivo. Logo, essa resistência pode alcançar valores muito reduzidos, enquanto o valor da impedância de aterramento fica limitado àquele do comprimento efetivo do eletrodo. Neste caso, o valor reduzido de resistência pode gerar uma falsa expectativa de valor reduzido de impedância.

Como um terceiro aspecto, é muito relevante a definição da posição da conexão entre a terminação para a terra e no eletrodo. *Mesmo para um mesmo aterramento, o valor da impedância impulsiva varia significativamente, de acordo com a posição no eletrodo enterrado da conexão da terminação para terra*. Isto é ilustrado para duas configurações de eletrodos na Figura 9, assumindo-se que os eletrodos sejam mais longos que o comprimento efetivo no solo particular onde estão enterrados.

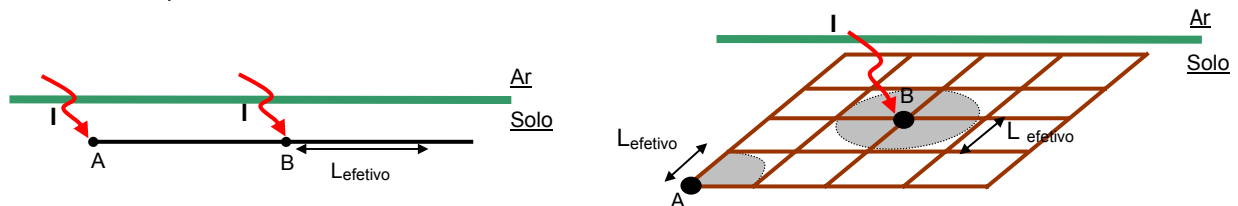


FIGURA 9 – A influência na impedância impulsiva da posição da conexão à malha da terminação para terra [adaptado de (2)]

Para um eletrodo horizontal, a conexão no ponto A (extremidade do eletrodo) resulta em valor de impedância de aterramento aproximadamente igual ao dobro daquele obtido para uma conexão no ponto B (posição central ao longo do comprimento do eletrodo). Isto se explica pelo fato de que, no segundo caso, a corrente "enxerga" duas impedâncias em paralelo, cujo valor individual é similar àquele da impedância do primeiro caso. Para malhas, a conexão da terminação à posição central resulta num valor de impedância em torno de um quarto a um terço do valor encontrado para a conexão a uma das extremidades. Pelo mesmo motivo, haveria também redução de mesma ordem na impedância impulsiva (em relação àquela da conexão a uma extremidade) se condutores aéreos fossem empregados para distribuir a corrente de descarga através de conexões às quatro extremidades.

Naturalmente, este efeito é muito pronunciado apenas nos casos em que o comprimento do eletrodo ultrapassa o comprimento efetivo. Para solos de alta resistividade este efeito tende a diminuir, uma vez que a atenuação da onda de corrente é menor, correspondendo a comprimentos efetivos maiores.

Com respeito à *recomendação de baixo valor da impedância de aterramento*, em princípio, esta é uma condição comumente desejada. Entretanto, em alguns casos especiais, pode haver interesse prático em se aumentar a impedância de aterramento de uma terminação para terra. Isto pode permitir influenciar a distribuição de correntes intensas (e sobretensões associadas) através de sistemas com várias terminações para terra. Efeitos indesejáveis de interferência eletromagnética, associados a correntes de surto na região próxima a uma terminação, podem ser evitados por essa prática. Nestas aplicações devem ser sempre observadas precauções com relação à segurança. Um exemplo prático desta situação refere-se à transferência de surtos de tensão da rede de distribuição de média tensão para as instalações consumidoras alimentadas pela rede de baixa tensão. Quando uma onda de sobretensão (associada a uma tensão induzida por descarga ou pela incidência direta na rede num ponto distante) alcança o transformador de distribuição protegido, os pára-raios operam e a corrente associada é drenada para o solo. Esta é também parcialmente transferida para a rede de baixa tensão através dos condutores do neutro e das fases. Se a impedância de aterramento na entrada de serviço de um consumidor próximo é bem inferior àquela do transformador, a corrente de surto tende a ser drenada para o aterramento do consumidor. A menos que as

instalações do consumidor sejam protegidas estas podem ser submetidas a níveis perigosos de tensão.

O principal fator de influência na redução da impedância de aterramento é a extensão da área coberta pelos eletrodos do sistema. Contudo, para fenômenos rápidos, a atenuação do campo torna o aumento da dimensão além de determinada extensão não efetivo para diminuição da impedância de aterramento (em decorrência do comprimento efetivo). Nesse caso, a ação para redução da impedância de aterramento deve ser concentrada numa região próxima ao ponto de injeção de corrente, a uma distância deste inferior ao comprimento efetivo do aterramento, e devem ser observados cuidados para não gerar efeitos mútuos muito intensos. Como já citado, a posição de conexão da terminação para a terra à malha pode ser importante. Quando longos eletrodos estão envolvidos, o número e a posição das conexões para terra podem desempenhar um papel importante na redução da impedância. Para a condição específica de um solo estratificado, cuja segunda camada apresente valor inferior de resistividade, o uso de hastes verticais para alcançar tal camada pode também ter influência significativa.

O processo de ionização é capaz de contribuir para reduzir o valor da impedância de aterramento, mas apenas para eletrodos muito concentrados (curtos) e valores muito elevados da corrente de descarga. Para comprimentos longos de eletrodos, este efeito praticamente não é capaz de afetar o valor da impedância. Este é o caso usual do aterramento de linhas de transmissão de alta tensão nas condições típicas de solo brasileiro. Apenas para se estabelecer uma primeira idéia quanto à intensidade desse efeito, se faz referência aos resultados de um trabalho experimental (12) que considera um longo eletrodo horizontal de raio 0,5 cm, enterrado num solo de 800 Ω .m. O início do efeito de ionização só foi detectado quando a densidade linear de corrente ultrapassou 200 A/m. A redução da impedância de aterramento em 10% iria requerer que a densidade excedesse 600 A/m. Considerando-se um cabo contrapeso longo de 20 m (80 m para as quatro pernas), seria requerido um valor de pico de 16 kA da corrente de descarga para que o processo de ionização tivesse início (nesta estimativa o efeito de atenuação foi desconsiderado uma vez que comprimento efetivo tem a ordem de 30 m). A redução da impedância de aterramento em torno de 10% iria requerer a injeção no solo de uma corrente de valor de pico superior a 48 kA.

5.0 - COMENTÁRIOS FINAIS

Este artigo apresenta uma contribuição para o melhor entendimento da resposta dos aterramentos elétricos frente a correntes de descargas atmosféricas, através de uma abordagem objetiva e simplificada. O autor tem a expectativa de que o texto possa ser útil para os engenheiros envolvidos com a proteção contra descargas e para o pessoal acadêmico que lida com a aplicação de modelos numéricos destinados à predição da resposta transitória de aterramentos. O texto pode constituir uma referência de valor para se preservar a observação da realidade física nos resultados relativos ao comportamento do aterramento elétrico.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) VISACRO S., "Aterramentos Elétricos: Conceitos Básicos, Métodos de Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramento", pp.1-159", *livro*, Artliber Editora Ltda, São Paulo, SP, 2002/2005
- (2) VISACRO S., "A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents", *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.22, n.1, pp.381-386, Jan. 2007
- (3) VISACRO S., "Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem em Engenharia", *livro*, pp.1-272, Artliber Editora Ltda, São Paulo, SP, 2005
- (4) VISACRO S., SOARES A. JR, "HEM: A Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.20, No.2, pp. 1026-1208, April 2005
- (5) VISACRO S., "Práticas e Técnicas de Projeto de Aterramentos Elétricos", texto em edição, *livro*, pp.1-329.
- (6) VISACRO S., PORTELA C., "Soil Permittivity and Conductivity Behavior on Frequency Range of Transient Phenomena in Electric Power Systems", in *Proc. 1987 Symp. High Voltage Engineering, Germany*.
- (7) PORTELA, C. "Measurement and Modeling of Soil Electromagnetic Behavior", in *Proc. 1999 IEEE Int. Symp. Electromagnetic Compatibility, USA*
- (8) GUPTA B.R. , THAPAR B. , "Impulsive Impedance of Grounding Grids", *IEEE PAS-99*, n.6, Nov./Dec. 1980.
- (9) SOARES A. JR., VISACRO S., "Lightning Response of Typical Brazilian Transmission Line Tower-footing Arrangements ", in *Proc. 1998 Int. Conf. Grounding and Earthing - GROUND'98*, pp.98-102, Brazil
- (10) LIEW A.C. , DARVENIZA M., "Dynamic Model of Impulse Characteristic of Concentrated Earths", *IEE Proc.*, vol.121,n.2, pp.123-135, Feb. 1974
- (11) MOUSA A.M., "The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.9, No.3, pp. 1669-1677, July 1994
- (12) VISACRO S., SOARES A. JR., "Sensitivity Analysis for the Effect of Lightning Current Intensity on the Behavior of Earthing Systems", in *Proc. 1994 Int. Conf. Lightning Protection*, pp.R3a-01(1-5) Hungary
- (13) VISACRO S., PORTELA C., "Investigation of Earthing Systems Behavior on the Incidence of Atmospheric Discharges at Electrical Systems", in *Proc. 1990 Int. Conf. Lightning Protection*, pp.3.8.1-3.8.5, Switzerland
- (14) GRCEV L. , DAWALIBI F. , "An Electromagnetic Model for Transients in Grounding Systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.5, n.4, pp.1773-1781, Nov. 1990
- (15) VISACRO S., PORTELA C., "Modeling of Earthing Systems for Lightning Protection Applications, Including Propagation Effects", in *Proc. 1992 Int. Conf. Lightning Protection*, pp.129-132, Germany.