SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

GSC 10
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO X
GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO – GSC

MODELAGEM DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO CONSIDERANDO A IONIZAÇÃO DO SOLO

João Clavio Salari *
CEPEL

Carlos Portela
COPPE/UFRJ

RESUMO

Descreve-se neste artigo uma nova metodologia híbrida freqüência-tempo para a modelagem de sistemas de aterramento considerando-se o efeito não-linear da ionização do solo circunvizinho. Esta metodologia foi implementada no programa computacional GROUNDSI e a mesma é aqui validada aplicando-a ao cálculo de dois sistemas de aterramento reais, donde se percebe claramente o efeito de redução da "impedância equivalente" destes sistemas quando ocorre a ionização do solo.

PALAVRAS-CHAVE

Aterramento, Domínio da Freqüência, Ionização do Solo, Transitórios Eletromagnéticos

1.0 - INTRODUÇÃO

Sob algumas aproximações e considerações, evidencia-se a ionização do solo ao redor dos eletrodos que compõem um sistema de aterramento quando a corrente que é injetada para o solo através destes eletrodos é elevada o suficiente para induzir um campo elétrico no solo superior a um determinado valor crítico, sendo este campo elétrico tipicamente da ordem de desde dezenas a algumas centenas de kV/m .

Portanto, quando ocorre a ionização do solo ao redor de um eletrodo de aterramento, tal região ionizada apresenta características elétricas similares àquela de um condutor com elevada condutividade elétrica, favorecendo a dispersão de corrente para o solo através do eletrodo. Esse efeito é similar ao aumento das dimensões transversais do eletrodo (Figura 1). Do ponto de vista de uma "impedância transversal equivalente" do eletrodo, observa-se uma "redução" desta impedância com o aumento da ionização do solo. No que diz respeito a uma "impedância longitudinal equivalente", o efeito relativo da ionização do solo é usualmente bem moderado, mas também implicando em uma "redução" desta impedância. Naturalmente, como se está lidando com um fenômeno não linear, o conceito de impedância, no sentido usual, não se aplica em um sentido restrito. Entretanto, o mesmo pode ser generalizado, e.g., em um sentido incremental, tal como será discutido neste trabalho.

Como um exemplo aplicativo simples e concreto de tal efeito, seja o caso típico de uma descarga atmosférica que incide em um cabo aéreo paralelo ao solo, aterrado em um ponto ao longo de sua extensão, e seja outro cabo, isolado e paralelo ao cabo aterrado. Ao se verificar a sobretensão induzida entre ambos os cabos em um ponto próximo à descida do aterramento, e.g. em um isolador, observa-se tipicamente uma redução desta sobretensão quando ocorre a ionização do solo, e, portanto, a desconsideração deste efeito conduz a valores errôneos.

Note-se que, para pequenos sistemas de aterramento, e.g. do tipo composto por hastes verticais interligadas (similares àqueles empregados em linhas de distribuição), nos quais a densidade de corrente nas hastes e nos seus cabos de interligação é usualmente elevada, o fenômeno da ionização do solo merece realmente ser investigado. Por outro lado, para os sistemas de aterramento com grandes dimensões, compostos por vários eletrodos ou por eletrodos com grande comprimento (e.g. alguns sistemas empregados em torres de linhas de transmissão), o efeito da ionização do solo é tipicamente menos severo, e, em algumas situações, bem reduzido.

Considerando-se os métodos existentes para o cálculo de sistemas de aterramento, como a ionização do solo se caracteriza como um comportamento não linear do sistema de aterramento, se este for o caso, metodologias restritas a análises lineares são obviamente inadequadas. Cumpre comentar que, mesmo no plano da análise

(*) Av. Horácio de Macedo, 354 – Cidade Universitária – Ilha do Fundão – Rio de Janeiro, RJ - Brasil
CEP 21941-911 – Tel: 55 21 2528-6223 – Fax: 55 21 2270-4189 – e-mail: jclavio@cepel.br

linear, muitos dos procedimentos usuais apresentam restrições severas de uso para a análise da propagação de surtos, principalmente aqueles desenvolvidos para fenômenos estacionários ou quase estacionários ou sem a consideração da dependência dos parâmetros do solo com a freqüência [1-4].

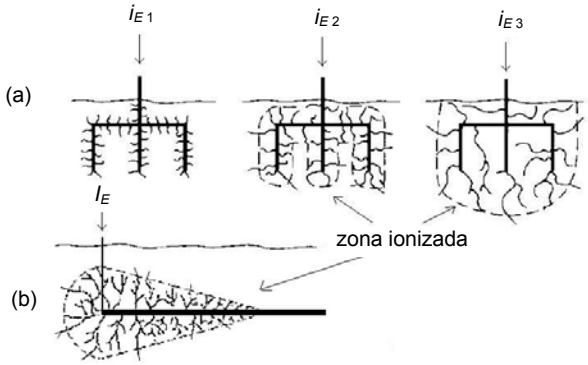

FIGURA 1 – Representação estilizada do efeito de ionização do solo ao redor de um grupo de eletrodos de aterramento submetidos à injeção de correntes de amplitudes $i_{E1} < i_{E2} < i_{E3}$; o comprimento do sistema de aterramento (b) é muito maior do que as dimensões do sistema de aterramento (a)

Nesta direção, em trabalhos recentes, os autores desenvolveram um modelo robusto para a análise de campos e transitórios eletromagnéticos. Esse modelo apresenta base de cálculo no domínio da freqüência e foi implementado no programa computacional FDETP – *Frequency Domain Electromagnetic Transients Program* [4-6]. O programa FDETP incorpora o uso simultâneo de vários elementos lineares e não-lineares, do tipo:

(i) Elementos do tipo "*Circuito*": elementos tipicamente empregados em análises de circuitos e de redes elétricas, tais como elementos RLC lineares e não lineares, quadripolos representativos de cabos de linhas de transmissão, quadripolos genéricos, transformadores, chaves, diodos, pára-raios etc.

(ii) Elementos do tipo "*Campo*": elementos tridimensionais do tipo "fonte de campo eletromagnético", com o formato de eletrodos cilíndricos, tipicamente empregados em análises de campos eletromagnéticos. Esses elementos podem ser usados isoladamente ou em grupos previamente estabelecidos no programa FDETP, estes para a fácil modelagem de torres de linhas de transmissão típicas, sistemas de aterramento típicos, cabos com posicionamento arbitrário (no ar ou no solo; com ou sem o efeito das catenárias), canal da descarga atmosférica, toróides, grandes esferas etc.

A solução matemática implementada no programa FDETP envolve um sistema de equações do tipo nodal modificado, relacionando tensões e correntes nos terminais (nós) de todos os elementos do "circuito elétrico" em estudo (Figura 2) por intermédio de uma matriz de imitâncias globais, que é obtida para cada freqüência de cálculo. O processo de conversão freqüência-tempo é executado através da Série de Fourier, Integral de Fourier ou transformada de Laplace; o primeiro método é útil para a análise de soluções periódicas no tempo, e os dois últimos são aplicáveis a soluções periódicas e não periódicas. Com algumas precauções, o primeiro método também pode ser usado para a análise de soluções não periódicas, e.g., aplicando-se algoritmos rápidos baseados na FFT (*Fast Fourier Transform*).

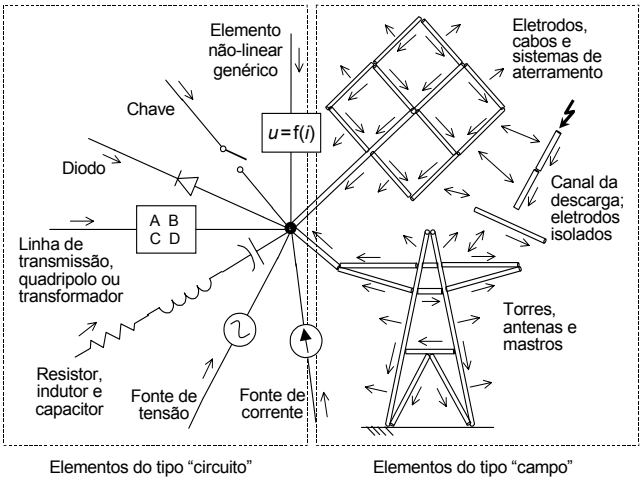

FIGURA 2 – Exemplo estilizado de diferentes componentes conectados em um nó do circuito elétrico

Considerando-se as diferentes formas de se modelar sistemas de aterramento para estudos de transitórios eletromagnéticos no programa FDETP, é particularmente robusto empregar os elementos do tipo eletrodo cilíndrico. Nesse caso, a mencionada matriz de imitâncias resulta da manipulação matemática de matrizes de impedâncias longitudinais e transversais entre eletrodos, associadas, respectivamente, às correntes longitudinais (I_L) e transversais (I_T) nos eletrodos. No âmbito da análise linear, a solução é direta, posto que não há o

acoplamento inter-harmônico, i.e., não há o acoplamento entre os elementos das matrizes de imitâncias calculadas para diferentes freqüências. Portanto, essas matrizes precisam ser calculadas apenas uma única vez e separadamente para cada freqüência durante todo o tempo de cálculo. Alguns exemplos de aplicação envolvendo tanto a análise da propagação de sinais à freqüência industrial quanto sinais de alta freqüência para sistemas de aterramento típicos podem ser encontrados em [1-4].

Entretanto, evidenciando-se o efeito de ionização do solo, essa simplicidade deixa de existir, dado que a não-linearidade que surge provoca o referido acoplamento inter-harmônico. Esse fato demanda inevitavelmente uma solução híbrida freqüência-tempo, tal como um modelo matemático desenvolvido pelos autores e implementado no programa computacional GROUNDSI – *Grounding Systems Modeling Considering Soil Ionization*. O programa GROUNDSI foi desenvolvido na linguagem de programação Fortran 90, e foi também incluído como um módulo de cálculo adicional ao programa FDETP.

Portanto, o objetivo deste artigo técnico é introduzir este novo modelo desenvolvido para o cálculo de sistemas de aterramento para ambas as análises em regime linear e não linear, e apresentar a sua validação em função de duas comparações entre resultados obtidos experimentalmente e por outros programas computacionais, nomeadamente em situações em que o sistema de aterramento encontra-se nitidamente sujeito ao efeito de ionização do solo. Aspectos adicionais de implementação computacional, outros exemplos de aplicação e uma descrição pormenorizada do método podem ser encontrados em [4].

2.0 - FORMULAÇÃO BÁSICA

2.1 Sistema de Equações

Basicamente, considerando-se funções genéricas no domínio do tempo decompostas em somas de parcelas do tipo $F_s e^{st}$, e, para cada parcela relativa a um valor de s (sendo $s = a + i\,\omega$, em geral complexo, onde a parcela a e a pulsação ω são números reais e $i = +\sqrt{-1}$ é a unidade imaginária), relacionando-se coerentemente tensões (com determinados condicionamentos de percurso entre o nó considerado e um ponto muito afastado ao longo do qual é medida a tensão) e correntes nos terminais (nós) de cada elemento do circuito, obtém-se um sistema de n equações, o qual, em notação matricial, é dado por:

$$\mathbf{W} \cdot \boldsymbol{\alpha} = \boldsymbol{\beta}\,; \tag{1}$$

sendo $\mathbf{W} \in C^{n \times n}$ a matriz de imitâncias globais, $\boldsymbol{\alpha} \in C^{n}$ o vetor de tensões nos nós ou de correntes entre dois nós, e $\boldsymbol{\beta} \in C^{n}$ o vetor de correntes injetadas externamente nos nós ou de tensões aplicadas entre dois nós.

Conforme descrito no item 1.0, a matriz $\mathbf{W}$ pode ser calculada considerando-se no circuito elétrico global elementos do tipo (i) ou (ii). Entretanto, buscando-se robustez de cálculo, neste trabalho somente serão enfocados os elementos do tipo (ii), i.e., elementos tridimensionais com o formato de eletrodos cilíndricos, e fontes de corrente aplicadas. Portanto, os vetores $\boldsymbol{\alpha}$ e $\boldsymbol{\beta}$ representarão somente os vetores das tensões transversais nos nós dos eletrodos (medidas ao longo de percursos, escolhidos por forma a satisfazer a um conjunto de condicionamentos, entre estes nós e um ponto "muito afastado"), $\mathbf{U}$, e das correntes injetadas nos nós dos eletrodos, $\mathbf{I_E}$, respectivamente, resultando:

$$\mathbf{W} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{I_E}\ . \tag{2}$$

Nesse caso, a matriz $\mathbf{W}$ é calculada em função das matrizes $\mathbf{Z_T}$ e $\mathbf{Z_L}$, associadas, respectivamente, ao vetor das correntes transversais em todos os eletrodos, $\mathbf{I_T}$, e ao vetor das correntes longitudinais em todos os eletrodos, $\mathbf{I_L}$. A matriz $\mathbf{W}$ pode ser calculada a partir da formulação geral apresentada em [1, 4]:

$$\mathbf{W} = \left(\mathbf{D} - \mathbf{C}\right) \cdot \left(\frac{1}{2}\mathbf{Z_T^{-1}} \cdot \mathbf{B}\right) - \left(\mathbf{D} + \mathbf{C}\right) \cdot \left(\mathbf{Z_L^{-1}} \cdot \mathbf{A}\right); \tag{3}$$

sendo:

$$\begin{cases} \mathbf{I_{L1}} = -\left(\mathbf{Z_L^{-1}} \cdot \mathbf{A} + \frac{1}{2}\mathbf{Z_T^{-1}} \cdot \mathbf{B}\right) \cdot \mathbf{U} \\ \mathbf{I_{L2}} = +\left(\frac{1}{2}\mathbf{Z_T^{-1}} \cdot \mathbf{B} - \mathbf{Z_L^{-1}} \cdot \mathbf{A}\right) \cdot \mathbf{U} \end{cases}; \tag{4}$$

$$\begin{cases} \mathbf{I_L} = \frac{1}{2}\left(\mathbf{I_{L1}} - \mathbf{I_{L2}}\right) \\ \mathbf{I_T} = \mathbf{I_{L1}} + \mathbf{I_{L2}} \end{cases}. \tag{5}$$

Nas equações (3) e (4), considerando-se n nós e m eletrodos, $\mathbf{A}$ e $\mathbf{B} \in R^{m \times n}$, e $\mathbf{C}$ e $\mathbf{D} \in R^{n \times m}$ são matrizes cujos elementos são coeficientes iguais a 0 , 0,5 , -0,5 , 1 ou -1, dependendo das conexões entre eletrodos.

2.2 Campo Elétrico na Superfície dos Eletrodos

Considere-se inicialmente um único eletrodo cilíndrico, de comprimento L_s e raio b, imerso em um meio linear, isotrópico e homogêneo, caracterizado por um coeficiente de propagação γ e grandezas eletromagnéticas expressas no domínio de s. Considere-se também as convenções de tipo usual, e com as precauções pertinentes, para conversão de grandezas expressas nos domínios de s e do tempo, t.

Aplicando-se a formulação apresentada em [3], [4], o módulo do campo elétrico induzido na superfície do eletrodo, em função da corrente transversal I_T no eletrodo, no ponto intermediário entre as duas extremidades do eletrodo, no domínio de s, é dado por:

$$E_c(s) = \frac{I_T(s)(1+\gamma\, b)\, e^{-\gamma\, b}}{\pi(\sigma + s\,\varepsilon)} \cdot \frac{1}{(2R+L_s)(2R-L_s)}\left(\frac{b}{R}\right); \tag{6}$$

sendo:

$$R^2 = \left(\frac{L_s}{2}\right)^2 + b^2 \;; \tag{7}$$

$$\gamma = \sqrt{s\,\mu(\sigma + s\,\varepsilon)}\;; \tag{8}$$

onde μ, ε e σ são respectivamente a permeabilidade magnética, a permissividade dielétrica e a condutividade elétrica do meio. Cumpre notar que, para solos, σ e ε são dependentes da freqüência, e o efeito desta variação é tipicamente importante [2-5].

Se o fator $|\gamma\, b|$ é pequeno, pode-se estabelecer da equação (6):

$$E_c(s) \cong \frac{I_T(s)}{2\,\pi\, b\, L_s(\sigma + s\,\varepsilon)\sqrt{1+\left(\frac{b}{2\,L_s}\right)^2}}\;; \tag{9}$$

e, também, para valores muito reduzidos da relação $b\,/\,L_s$:

$$E_c(s) \cong \frac{I_T(s)}{2\,\pi\, b\, L_s(\sigma + s\,\varepsilon)}\;. \tag{10}$$

Para um sistema de aterramento real, imerso em um solo, obviamente, necessita-se considerar os efeitos das correntes fluindo nos outros eletrodos que compõem todo o sistema de aterramento e os efeitos da interface solo-ar. Nesse caso, entre algumas possibilidades de modelagem, pode-se considerar uma parcela adicional a E_c, E'. Essa parcela pode ser assumida aproximadamente independente de b. Logo, o campo elétrico total na superfície do eletrodo, E_{cT}, é dado por:

$$E_{cT}(s) = \frac{I_T(s)}{2\,\pi\, b\, L_s(\sigma + s\,\varepsilon)\sqrt{1+\left(\frac{b}{2\,L_s}\right)^2}} + E'(s)\;; \tag{11}$$

e, novamente, para valores muito reduzidos da relação $b\,/\,L_s$, tem-se:

$$E_{cT}(s) \cong \frac{I_T(s)}{2\,\pi\, b\, L_s(\sigma + s\,\varepsilon)} + E'(s)\;. \tag{12}$$

É interessante também notar que, se possível, o uso da equação (12) é realmente prático, uma vez que desta forma pode-se formular facilmente os correspondentes valores no tempo de E_{cT} em função do raio b, i.e.:

$$e_{cT}(t) \cong \frac{1}{b} f_1(t) + f_2(t)\;; \tag{13}$$

sendo:

$$\begin{cases} f_1 = \mathrm{L}^{-1}\left[\dfrac{I_T(s)}{2\,\pi\, L_s(\sigma + s\,\varepsilon)}\right]; \\ f_2 = \mathrm{L}^{-1}\left[E'(s)\right] \end{cases} \tag{14}$$

onde o símbolo L^{-1} significa a transformada inversa de Laplace.

Portanto, considerando-se a equação (10), $e_{cT}(t)$ pode ser mantido inferior a um valor crítico, $e_{crit\ solo}$, através da mudança adequada do raio b, i.e.:

$$\frac{1}{b} f_1(t) + f_2(t) < e_{crit\ solo} \quad \therefore \quad b > \frac{f_1(t)}{e_{crit\ solo} - f_2(t)}\;. \tag{15}$$

2.3 <u>Um Método Simples para a Modelagem Incremental do Efeito de Ionização do Solo</u>

Apresenta-se neste subitem um método simples para a consideração do efeito de ionização do solo ao redor dos eletrodos de aterramento. A despeito de sua simplicidade e inerente aproximação, e conseqüentes faixa de aplicação e precisão, o processo leva em conta aspectos relevantes associados ao respectivo efeito de ionização, designadamente:

- Para cada eletrodo cilíndrico que compõe o sistema de aterramento, considera-se que a zona ionizada ao redor do eletrodo é aproximada por um volume cilíndrico, mas este volume pode variar entre os eletrodos.
- Considera-se que esta zona ionizada tem as características de um "razoável condutor" de eletricidade, no sentido de que este pode ser caracterizado por um parâmetro $\sigma_I + i\,\omega\,\varepsilon_I$ (eventualmente em formulação tensorial) de módulo muito superior ao módulo do parâmetro do solo $\sigma + i\,\omega\,\varepsilon$, embora muito inferior ao módulo do parâmetro $\sigma_e + i\,\omega\,\varepsilon_e$ do material metálico dos eletrodos do sistema de aterramento. Isso permite adotar, para o cálculo de parâmetros transversais do sistema de aterramento e para a representação aproximada de tal ionização, o eletrodo cilíndrico possuindo um raio maior.
- Considera-se que a ionização do solo ocorre somente quando o campo elétrico na superfície do eletrodo, e_{cT}, excede um valor crítico, $e_{crit\ solo}$, embora para estudos específicos não exista restrição para variar este valor crítico ao longo do intervalo de tempo em que se efetua o cálculo.

Em princípio, tal variação de parâmetros transversais poderia ser feita de duas formas na equação (2), ou seja:

1. Diretamente na matriz de impedâncias transversais, $\mathbf{Z_T}$, em um sentido incremental, i.e., considerando-se a matriz de impedâncias transversais incrementais, $\mathbf{Z_{Ti}}$.
2. Indiretamente, aplicando-se este sentido incremental às correntes transversais, I_T, i.e., considerando-se o vetor $\mathbf{\Delta I_T}$.

Em síntese, ambas as opções demandam um processo híbrido freqüência-tempo, o qual demanda uma solução incremental. Para ambos os casos, um procedimento robusto pode ser formulado e.g. usando-se a técnica da Análise Tensorial [7], o que permite considerar adequadamente o mencionado acoplamento inter-harmônico. Contudo, a aplicação deste tipo de solução torna-se mais simples quando todas as formas de onda das correntes injetadas no sistema de aterramento são conhecidas previamente.

Por outro lado, como uma alternativa de menor tempo de cálculo, e com as conseqüentes limitação e precisão, é possível "desacoplar as freqüências" representando-se as tensões nos nós e as correntes injetadas nos nós dos eletrodos do sistema de aterramento por uma sucessão de funções do tipo degrau, conforme se ilustra na Figura 3 para a corrente injetada i_E.

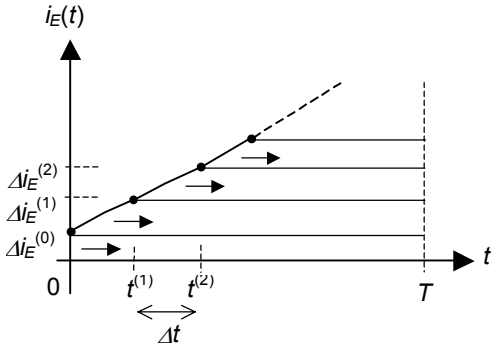

FIGURA 3 – Representação esquemática da variação no tempo da corrente i_E por uma sucessão de "degraus" de corrente

Para análises gerais, e, principalmente, para eventualmente interligar o processo com um programa externo de cálculo de transitórios eletromagnéticos, é prático empregar a opção 1 e a alternativa anterior que faz uso da sucessão de degraus de corrente injetados nos nós do sistema de aterramento. Entretanto, como esse processo é aproximado, pode ser necessário implementar um refinamento iterativo em cada tempo de cálculo para melhoria de precisão numérica. Além disso, essa solução tem algumas restrições inerentes para o cálculo de sistemas de aterramento de grandes dimensões, nomeadamente algumas limitações associadas ao efeito do tempo de propagação ao longo de cada eletrodo que compõe o sistema de aterramento. Por outro lado, uma vez que o efeito da ionização do solo é tipicamente um maior problema somente para os sistemas de aterramento de pequenas dimensões, essa última restrição não aparenta ser problemática para as aplicações em que, tipicamente, a ionização do solo é relevante, tal como será concluído dos resultados apresentados no item 3.0.

Portanto, os principais passos para a implementação computacional desse processo simples são os seguintes:

1 – Representação do sistema de aterramento em estudo por eletrodos cilíndricos, com o raio b cada. Cálculo das matrizes $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$ e $\mathbf{D}$.

2 – Inicialização do processo em $t = 0$, quando então se assume que não há o efeito de ionização do solo, e, portanto, para cada eletrodo, considera-se o raio "dinâmico" b_d igual a b.

3 – Cálculo da matriz de impedâncias longitudinais incrementais $\mathbf{Z_{Li}}$ no domínio de s usando-se o raio b:

$$\mathbf{Z_{Li}} \cong \mathbf{Z_L}\,. \tag{16}$$

4 – Cálculo da matriz de impedâncias transversais incrementais $\mathbf{Z_{Ti}}$ no domínio de s usando-se o raio b_d.

5 – Cálculo dos incrementos das correntes injetadas nos nós dos eletrodos, Δi_E, para o tempo t, e de seus valores correspondentes no domínio de s, ΔI_E (vide Figura 3), resultando o vetor $\mathbf{\Delta I_E}$.

6 – Solução incremental da equação (2) para a obtenção dos incrementos das correntes transversais, ΔI_T, no domínio de s:

$$\mathbf{W_i} \cdot \mathbf{\Delta U} = \mathbf{\Delta I_E}\,; \tag{17}$$

$$\mathbf{W_i} = \left(\mathbf{D} - \mathbf{C}\right) \cdot \left(\frac{1}{2}\mathbf{Z_{Ti}^{-1}} \cdot \mathbf{B}\right) - \left(\mathbf{D} + \mathbf{C}\right) \cdot \left(\mathbf{Z_{Li}^{-1}} \cdot \mathbf{A}\right); \tag{18}$$

$$\begin{cases} \mathbf{\Delta I_{L1}} = -\left(\mathbf{Z_{Li}^{-1}} \cdot \mathbf{A} + \frac{1}{2}\mathbf{Z_{Ti}^{-1}} \cdot \mathbf{B}\right) \cdot \mathbf{\Delta U} \\ \mathbf{\Delta I_{L2}} = +\left(\frac{1}{2}\mathbf{Z_{Ti}^{-1}} \cdot \mathbf{B} - \mathbf{Z_{Li}^{-1}} \cdot \mathbf{A}\right) \cdot \mathbf{\Delta U} \end{cases}; \tag{19}$$

$$\mathbf{\Delta I_T} = \mathbf{\Delta I_{L1}} + \mathbf{\Delta I_{L2}}\,. \tag{20}$$

7 – Cálculo do vetor de correntes transversais, I_T, e, conseqüentemente, E_{cT}, pela equação (10):

$$\mathbf{I_T} \leftarrow \mathbf{I_T} + \mathbf{\Delta I_T} \tag{21}$$

8 – Cálculo do campo elétrico na superfície de todos os eletrodos para o tempo t, $e_{cT}(t)$, usando-se a equação (13).

9 – Verificação da ocorrência da ionização do solo ao redor de todos os eletrodos:

Se $e_{cT}(t) > e_{crit\ solo}$:

$$b_{eq} = \frac{f_1(t)}{e_{crit\ solo} - f_2(t)}\,. \tag{22}$$

Novo valor do raio dos eletrodos:

$$b_d = b_{eq}\,. \tag{23}$$

Caso contrário:

O raio b_d retorna ao seu valor inicial sem a ocorrência da ionização do solo, b. Para se evitar problemas numéricos, é aconselhável reduzir gradualmente b_d até b.

10 – Variação do tempo de cálculo:

$$t = t + \Delta t\,. \tag{24}$$

11 – Retorno ao passo 4 se t é inferior ao tempo final de cálculo, T; caso contrário, finaliza-se o cálculo.

3.0 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

3.1 Sistema de Aterramento Formado por um Cabo horizontal

Considera-se neste primeiro exemplo um sistema de aterramento formado por um cabo horizontal, com o comprimento de 5 m e raio de 4 mm. O cabo é instalado a 0,6 m da superfície do solo (Figura 4), conforme descrito por Geri em [8]. Na Figura 5 representa-se a forma de onda da corrente injetada no sistema de aterramento, cuja amplitude atinge o nível de 25 kA, provocando intensa ionização do solo. Devido à ausência de dados específicos sobre a dependência dos parâmetros do solo com a freqüência, usou-se os valores fixos informados em [8], nomeadamente a resistividade elétrica do solo igual a 40,5 Ω m e a permissividade dielétrica relativa do solo igual a 10.

Os resultados da simulação estão apresentados na Figura 6, juntamente com aqueles computados e medidos por Geri. Da comparação com os valores medidos, fica claro o ajuste excelente obtido da aplicação da expedita metodologia de cálculo aqui apresentada.

Deve-se ainda comentar que se empregou para esta análise um valor fixo de $e_{crit\ solo}$; i.e., igual a 300 kV/m, o qual é recomendado em muitos trabalhos técnicos para propostas de cálculo gerais [9]. A título adicional, analisou-se este exemplo empregando-se $e_{crit\ solo}$ igual a 400 kV/m, como também é sugerido em trabalhos técnicos sobre o tema [10], mas neste caso a margem de erro foi maior.

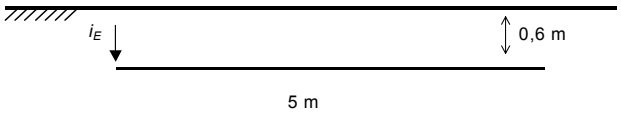

FIGURA 4 – Cabo horizontal

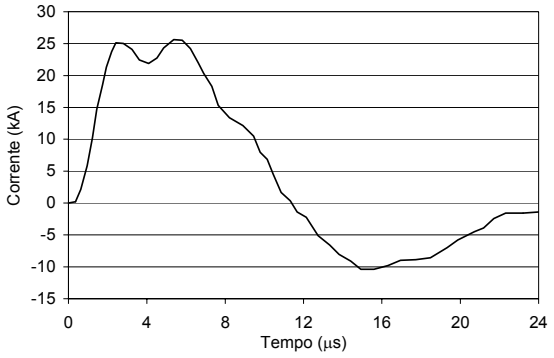

FIGURA 5 – Corrente injetada no cabo horizontal

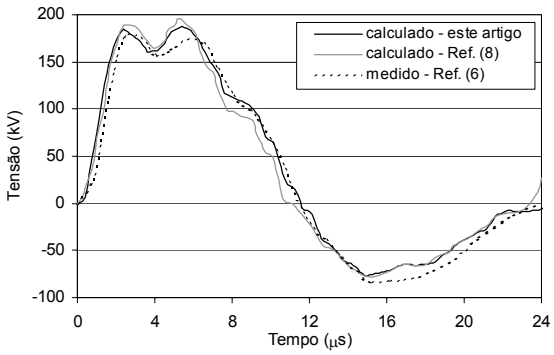

FIGURA 6 – Tensões medidas e calculadas no ponto de injeção da corrente

3.2 Sistemas de Aterramento Formados por Hastes Verticais Interligadas

Considera-se neste segundo exemplo sistemas de aterramento formados por uma, duas e quatro hastes interligadas. Cada haste possui 3,05 m de comprimento e as distâncias entre hastes consecutivas são idênticas e iguais a 3,05 m . Esses casos foram inicialmente apresentados por Liew e Darveniza em [11], e, desde então, foram muitas vezes empregados como um guia para validação de métodos matemáticos para a simulação de sistemas de aterramento sujeitos à ionização do solo.

Em todos os três casos a corrente injetada no sistema de aterramento tem a forma de onda do tipo rampa, com um tempo de frente de 4 μs . A amplitude da corrente injetada varia desde um valor bem reduzido, sem provocar a ionização do solo, até o valor elevado de 100 kA , provocando forte ionização do solo. A intenção deste cálculo é avaliar uma "impedância equivalente" do sistema de aterramento. Essa "impedância equivalente" é definida pela relação entre o valor máximo da tensão no "ponto" de injeção da corrente (medida segundo uma linha entre este ponto e um ponto muito afastado, com determinados condicionamentos de percurso) e a amplitude da corrente injetada, sendo ambas as amplitudes obtidas no domínio do tempo. Nota-se que essa "definição" de "impedância" traduz um conceito radicalmente diferente do conceito usual de impedância, conceito usual este que traduz a relação entre os complexos associados à tensão e à corrente em causa, no domínio de $f = \omega / 2\pi$, ou ω , ou $s = a + i\,\omega$, ou $p = a + i\,\omega$, para um valor específico de f , ou ω , ou $s = a + i\,\omega$, ou $p = a + i\,\omega$, e tais que os valores correspondentes de tensão e corrente, no domínio do tempo, são traduzidos pelas partes reais dos produtos destes complexos por $e^{\pm i\,\omega t}$ ou por $e^{\pm a \pm i\,\omega t}$. Novamente, em função da ausência de dados específicos sobre a dependência dos parâmetros do solo com a freqüência, usou-se os valores informados da resistividade elétrica do solo igual a 100 Ω m e da permissividade dielétrica relativa do solo igual a 10 [11]. Também se adotou para este exemplo o valor de $e_{crit\ solo}$ igual a 300 kV/m .

Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 7, incluindo os valores medidos por Liew e Darveniza, e, para comparação adicional, aqueles calculados pela metodologia apresentada em [12].

Mesmo sob a ausência de detalhes importantes para uma simulação precisa, como, e.g., com relação aos parâmetros do solo e à geometria do sistema de aterramento, pode-se observar da Figura 7 a ótima concordância entre os valores medidos e aqueles calculados pela metodologia aqui apresentada. Além disso, é importante comentar dois aspectos básicos associados ao efeito de ionização do solo e às dimensões dos sistemas de aterramento:

– Para os três sistemas de aterramento ocorre a redução da designada "impedância equivalente" com o aumento da amplitude da corrente, i.e., com o aumento do efeito de ionização do solo.

– Ocorre uma atenuação desse efeito de redução quando as dimensões do sistema de aterramento aumentam, i.e., quando se passa de uma para duas hastes, e então para quatro hastes. Considerando como base o nível da corrente de 100 kA injetada em cada sistema de aterramento, em relação à "impedância equivalente" calculada para a corrente de menor amplitude, obtém-se as seguintes reduções desta "impedância equivalente":

  - 1 haste: 69% ;
  - 2 hastes: 53% ;
  - 4 hastes: 39% .

  Tal diferença entre o "efeito relativo" da ionização do solo na redução da "impedância equivalente" nos exemplos com 1 , 2 e 4 hastes resulta, dominantemente, do resultado conjugado dos seguintes efeitos:

  - Ao aumentar o número de hastes, para igual corrente total injetada no sistema, a densidade de corrente injetada no solo, junto à superfície das hastes, diminui, e, portanto, o mesmo sucede quanto ao "volume" de solo ionizado na vizinhança de cada haste e quanto à redução relativa da "impedância transversal equivalente" respeitante apenas e separadamente a cada uma das hastes. O mesmo sucede, para outras configurações de aterramento, ao aumentar a extensão do sistema de aterramento.
  - Para um sistema de aterramento apenas com uma haste, a "impedância equivalente" do sistema é traduzida diretamente pela "impedância transversal equivalente" da única haste. Ao aumentar o número de

hastes, a “impedância equivalente” resulta das “impedâncias transversais equivalentes” relativas às diversas hastes e das “impedâncias transversais equivalentes” mútuas entre as diversas hastes, com uma influência relativa dos elementos mútuos crescente com o número de hastes do sistema. Como os parâmetros mútuos são muito pouco afetados pela ionização do solo, também por este motivo, a importância relativa da ionização do solo diminui ao aumentar o número de hastes do sistema, ou, em geral, ao aumentar a extensão do sistema de aterramento.

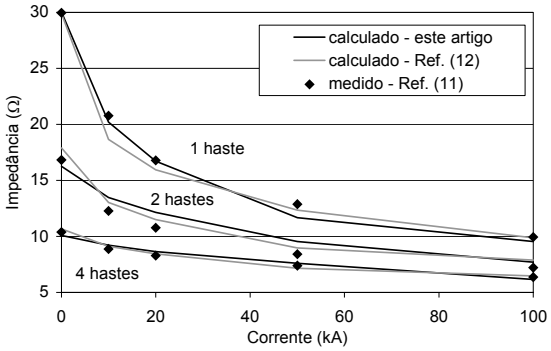

Figura 7 – “Impedância equivalente” dos sistemas de aterramento em função do número de hastes e da amplitude da corrente injetada no sistema

4.0 - CONCLUSÕES

Apresentou-se neste artigo uma metodologia híbrida freqüência-tempo, simples e eficiente, para a modelagem de sistemas de aterramento considerando-se o efeito não-linear da ionização do solo. Esta metodologia foi validada por intermédio da simulação de dois sistemas de aterramento de pequeno porte submetidos à injeção de corrente de elevada amplitude, o que caracteriza uma situação em que o efeito da ionização do solo é particularmente elevado. Outros exemplos de aplicação e uma descrição pormenorizada do método podem ser encontrados em [4].

Duas importantes conclusões podem ser estabelecidas a partir dos resultados aqui apresentados, designadamente: ocorre o efeito de redução da “impedância equivalente” do sistema de aterramento com a elevação da amplitude da corrente injetada no sistema, i.e., com a intensificação do efeito de ionização do solo; ocorre uma atenuação deste efeito de redução com o aumento das dimensões do sistema de aterramento.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] PORTELA, C., “Frequency and Transient Behavior of Grounding Systems; I Physical and Methodological Aspects; II Practical Application Examples”, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility Proceedings, pp. 379-390, Austin, E.U.A., 1997

[2] PORTELA, C., “Soil Electromagnetic Behavior in Frequency Domain and its Influence in Lightning Effects”, Ground’2002 International Conference on Grounding and Earthing Proceedings, pp. 211-216, Rio de Janeiro, Brasil, Novembro, 2002

[3] SALARI, J. C., PORTELA, C., “Frequency Dependent Behavior of Grounding Systems”, VII International Symposium on Lightning Protection (SIPDA) Proceedings, pp. 75-81, Curitiba, Brasil, Novembro, 2003

[4] SALARI, J. C., “Efeito das Descargas Atmosféricas no Desempenho de Linhas de Transmissão – Modelagens nos Domínios do Tempo e da Freqüência”, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2006 (Disponível para cópia em: http://www.pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2006120601.pdf)

[5] SALARI, J. C., PORTELA, C., “Development of a Frequency Domain Electromagnetic Transients Program”, VIII International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), pp. 243-248, São Paulo, Brasil, Novembro, 2005

[6] SALARI, J. C., PORTELA, C., “Uma Metodologia para o Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos – Aplicação ao Cálculo da Propagação de Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão”, XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), Curitiba, Brasil, 2005

[7] PORTELA, C., Análise Tensorial – Algumas Aplicações, 1046 p., Instituto de Alta Cultura, Lisboa, Portugal, 1970

[8] GERI, A., “Behavior of Grounding Systems Excited by High Impulse Currents: The Model and Its Validation”, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 14, n. 3, pp. 1008-1017, Julho, 1999

[9] MOUSA, A. M., “The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents into Concentrated Electrodes”, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 9, n. 3, pp. 1669-1677, Julho, 1994

[10] CIGRE, “Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines”, Brochure n. 63, Outubro, 1991

[11] LIEW, A. C., DARVENIZA, M., “Dynamic Model of Impulse Characteristics of Concentrated Earths”, Proceedings IEE, v. 121, n. 2, pp. 123-135, Fevereiro, 1974

[12] CIDRÁS, J., OTERO, A. F., GARRIDO, C., “Nodal Frequency Analysis of Grounding Systems Considering the Soil Ionization Effect”, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 15, n. 1, pp. 103-107, Janeiro, 2000