

Avaliação da Resposta em Frequência de Aterramentos Considerando Solo com Parâmetros Dependentes da Frequência Utilizando o MEF

Gabriel V. N. Bezerra* Fernando A. Moreira** Tarso V. Ferreira***
Felipe M. Vasconcellos****

* *Departamento de Engenharia Elétrica, Instituto Federal da Bahia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade
Federal da Bahia (UFBA), Brasil (e-mail: gabriel.vidal@ifba.edu.br).*

** *Departamento de Engenharia Elétrica - UFBA
(e-mail: moreiraf@ufba.br)*

*** *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de
Sergipe (UFS) (e-mail: tarso@academico.ufs.br)*

**** *Departamento de Engenharia Elétrica - UFBA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFBA
(e-mail: felipe.vasconcellos@ufba.br)*

Abstract: This work presents a frequency response evaluation of a horizontal grounding electrode using the finite element method (FEM). A rigorous electromagnetic modeling was used, considering a soil with frequency-dependent resistivity and permittivity. The frequency spectrum evaluated was from 100 Hz to 4 MHz; range that includes both low frequency phenomena, such as faults in the electrical system, as well as transient high frequency phenomena, such as lightning strikes in transmission lines. A comparative analysis of the electromagnetic model was performed with experimental data from the literature, as well as with a transmission line model, with a satisfactory agreement being identified. In addition, the behavior of the electrical potential in the soil for different frequencies was analyzed, with visual indication of the increase in the impedance module with increasing frequency, as well as the reduction in the useful length of the electrode. A conservative approach was used, disregarding the phenomenon of soil ionization.

Resumo: Este trabalho apresenta a avaliação da resposta em frequência de um aterramento com eletrodo horizontal através do método elementos finitos (MEF). Utilizou-se uma modelagem eletromagnética rigorosa, considerando um solo com resistividade e permissividade dependentes da frequência. Foi realizada uma varredura em frequência da impedância do aterramento, entre 100 Hz a 4 MHz; faixa que contempla tanto fenômenos de baixa frequência, tais como as faltas no sistema elétrico, quanto fenômenos transitórios de alta frequência, como surtos e descargas atmosféricas em linhas de transmissão. Foi realizada uma análise comparativa do modelo eletromagnético com dados experimentais da literatura, bem como com um modelo de linha de transmissão, sendo identificada uma concordância satisfatória. Além disso, foi analisado o comportamento dos potenciais no solo para diferentes frequências, sendo apontado de forma visual as elevações do módulo da impedância com o aumento da frequência, bem como a redução do comprimento útil do eletrodo. Utilizou-se uma abordagem conservativa, desconsiderando o fenômeno da ionização do solo.

Keywords: Electrical Grounding; Frequency dependence of soil; Impulsive response of grounding electrodes; Lightning; Soil permittivity; Soil Resistivity; Harmonic impedance.

Palavras-chaves: Aterramentos Elétricos; Dependência da Frequência do solo; Resposta impulsiva de aterramentos; Permissividade do solo; Resistividade do Solo; Impedância harmônica.

1. INTRODUÇÃO

O sistema de aterramento desempenha um importante papel nos sistemas elétricos. Seu comportamento em baixa frequência é bem conhecido e relativamente fácil de se medir e estudar. Contudo, na prática, os aterramentos podem ser submetidos a importantes fenômenos de alta frequência. Exemplo disso é a incidência de descargas atmosféricas nos cabos-guarda de linhas de transmissão ou em captadores do sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) de uma subestação ou instalação elétrica. Em todos esses casos, a resposta em frequência do aterramento desempenhará um papel crucial. Uma impedância de aterramento elevada pode ocasionar *backflashover* em uma linha de transmissão bem como produzir elevados potenciais no solo, conforme discutido no Capítulo 14 de Ametani (2015) e no Capítulo 7 de He et al. (2012). A primeira situação pode promover desligamento da linha com consequentes prejuízos econômicos; a segunda pode ocasionar danos a integridade física de pessoas ou animais que porventura circulem na área.

A resposta de eletrodos de aterramentos quando submetidos a descargas atmosféricas é um estudo complexo. Isso se deve principalmente porque existem mais de um fenômeno ocorrendo ao mesmo tempo, conforme explanado em Visacro (2007). O primeiro é o efeito da ionização do solo (que é não linear), ocasionado pela elevada amplitude da corrente da descarga injetada no solo, produzindo valores de campo elétrico acima do gradiente de ionização do solo (E_c) e consequente decaimento exponencial da resistividade do solo (Liew and Darveniza, 1974; He and Zhang, 2013, 2015). O segundo fenômeno é a dependência que os parâmetros do solo têm da frequência. Ou seja, à medida que a frequência da corrente injetada aumenta, a resistividade e permissividade do solo decaem. Além desses dois fenômenos, ainda soma-se os efeitos indutivos e capacitivos inerentes ao aterramento que, apesar de serem lineares, são também dependentes da frequência. Diante de todos esses fenômenos, quando deseja-se estudar a resposta em frequência dos aterramentos, comumente escolhe-se apenas uma parte dos fenômenos envolvidos.

A dependência que os parâmetros do solo possuem da frequência já é conhecida e reportada há pelo menos 45 anos. Possivelmente, um dos primeiros trabalhos a estudar essa característica do foi o de Smith-Rose (1934). Após isso, surgiram outros trabalhos, como os de Scott et al. (1964); Scott (1966); Smith and Longmire (1975); Messier (1980, 1985); Visacro and Portela (1987). Mais recentemente, estudos envolvendo uma grande quantidade de medições experimentais foram apresentados em Visacro and Alipio (2012) e Alipio and Visacro (2014b). Sendo, este último, um modelo causal que satisfaz o critério de Kramers-Kronig.

Um dos pontos mais importantes sobre a dependência da frequência do solo é que a utilização de parâmetros constantes para o solo produz erros consideráveis quando os fenômenos estudados apresentam frequências que ultrapassam a ordem dos kHz: caso das descargas atmosféricas. Simulações que utilizam parâmetros constantes para o solo

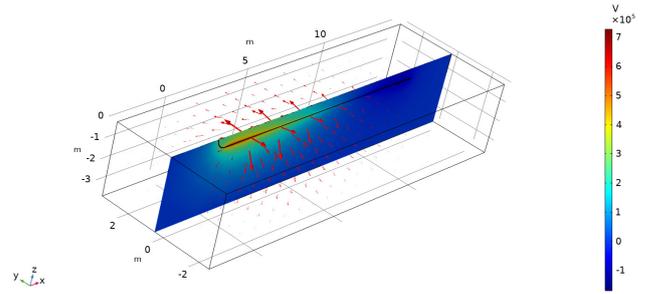


Figura 1. Aterramento com eletrodo horizontal de 12 m, sob uma corrente de 10 kA e 1,5 MHz de frequência; para um solo de $\rho_0 = 300 \Omega.m$, dependente da frequência. Potenciais (V) no solo (plano vertical) e densidade de corrente (vetores em vermelho). Simulação através do MEF.

indicam amplitudes de tensão com erro de aproximadamente 30% a mais de 100% (Visacro et al., 2011). Por esse motivo, o presente trabalho considera o solo com permissividade e resistividade dependentes da frequência utilizando as equações apresentadas em Alipio and Visacro (2014b).

Os tipos de modelos que podem ser utilizados para representar um aterramento são basicamente: modelos circuitais (Ramamoorthy et al., 1989; Geri, 1999), modelos de linhas de transmissão (Devgan and Whitehead, 1973; Velazquez and Mukhedkar, 1984; Mentre and Grcev, 1994; Liu et al., 2005), modelos de campos eletromagnéticos (Roubertou et al., 1984; Grcev and Dawalibi, 1990; Dawalibi and Selby, 1993; Olsen and Willis, 1996; Grcev and Heimbach, 1997) e os modelos híbridos (Dawalibi, 1986; Huang and Kasten, 2001; Li et al., 2006; Li and Fan, 2008; Visacro and Soares, 2005).

Os modelos circuitais e de linha de transmissão utilizam uma abordagem simplificada dos fenômenos eletromagnéticos presentes nos aterramentos, que é traduzida em circuitos de parâmetros concentrados ou distribuídos, com elementos R, L e C, os quais podem ter característica linear ou não-linear a depender da situação para qual será utilizado (ex: estudos simples, faltas, transitórios, etc.) e do tipo de aterramento (ex: malha ou cabos contrapeso) (Lorentzou et al., 2003). A vantagem desses modelos é sua praticidade e facilidade de implementação em softwares de simulação do tipo EMTP, amplamente utilizados na indústria; vide modelo de linha de transmissão na Figura 2. No entanto, quando deseja-se estudar aterramentos com geometrias ou topologias não convencionais os modelos circuitais apresentam limitações, pois, de forma geral, basicamente modelam aterramentos do tipo malha, eletrodos

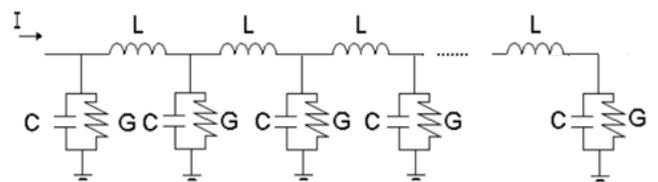


Figura 2. Representação do modelo de linha de transmissão (MLT) para aterramentos.

* Os autores agradecem o suporte financeiro do IFBA e UFS, bem como do Programa de Pós-graduação da UFBA.

verticais ou horizontais com hastes ou cabos cilíndricos dispostos de forma simétrica; e muitas vezes não consideram o acoplamento magnético entre os condutores do aterramento de forma adequada.

Os modelos eletromagnéticos, por outro lado, têm como base as equações elementares do eletromagnetismo, não sendo feitas maiores simplificações Silva (2006). Por esse motivo, os modelos eletromagnéticos são mais próximos às equações físicas que regem os fenômenos elétricos e magnéticos que os modelos circuitais. Assim, permite-se maior flexibilidade em estudos elaborados, tais como aterramentos de geometria não convencional, solos com estratificações (ex: estratificação horizontal, vertical ou combinada), bem como quando deseja-se estudar os efeitos da presença de equipamentos enterrados próximo ao sistema de aterramento. Outro ponto favorável aos modelos eletromagnéticos é sua capacidade de apresentar de forma visual os campos eletromagnéticos bem como fenômenos envolvidos; como pode-se observar na Figura 1. Por outro lado, à medida que os modelos eletromagnéticos ficam mais complexos, as simulações acabam requerendo um esforço computacional maior. Já os modelos híbridos são uma composição de modelos eletromagnéticos com modelos circuitais, na tentativa de obter o melhor dos dois.

Diante do exposto, o presente trabalho destina-se a abrir caminhos para futuros estudos de aterramentos com geometrias ou topologias otimizadas do ponto de vista da resposta em frequência. Dessa forma, a utilização de modelos eletromagnéticos puros apresenta vantagens em relação à utilização de modelos circuitais, de linhas de transmissão ou híbridos. Por esse motivo, adotou-se a modelagem do tipo eletromagnética pura, lançando mão das equações de Maxwell, com solução via método dos elementos finitos, utilizando o software *COMSOL Multiphysics*®. Na modelagem foi considerado o efeito da dependência da frequência do solo, de forma a se obter resultados condizentes com medições em campo. Foi apresentada uma varredura em frequência (100 Hz a 4 MHz) para análise da impedância harmônica de aterramento com eletrodo horizontal. Além disso, buscando-se uma melhor compreensão visual dos fenômenos envolvidos, também é apresentada uma análise do potencial elétrico no solo para diferentes frequências de corrente injetada, sendo observado a fenomenologia do comprimento efetivo dos aterramentos. Os resultados obtidos foram comparados com dados de medições em campo e com um modelo de linha de transmissão que considera o solo dependente da frequência. O fenômeno da ionização do solo foi desconsiderado, levando a uma abordagem conservadora.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção é apresentada a metodologia para realização do presente estudo, sendo indicado: o arranjo do aterramento avaliado; o modelo do solo dependente da frequência; o equacionamento utilizado na simulação via MEF; as fontes dos dados experimentais bem como informações do modelo de linha de transmissão utilizado nas comparações. Os resultados das simulações foram comparados com dados experimentais sendo apontadas as respectivas considerações na Seção 3.

2.1 Aterramento Simulado

O aterramento estudado é apresentado na Figura 3 e consiste em um eletrodo cilíndrico de cobre com 0,7 cm de raio e 12 m de comprimento, enterrado a 0,5 m no solo. Os valores de resistividade e permissividade de baixa frequência do solo avaliados são $\rho_0 = 300 \Omega \cdot m$ ($\sigma_0 = 3,33 \text{ mS/m}$) e $\epsilon_r = 192,2$, respectivamente. Para a representação do solo, utilizou-se um prisma retangular com dimensões 18 m x 6 m x 3,5 m. A energização desse eletrodo horizontal, foi feita através de um condutor isolado que vai desde a superfície do solo até a extremidade do eletrodo horizontal, com um raio de curvatura de 0,5 m. Esse arranjo é similar ao utilizado em Visacro and Rosado (2009).

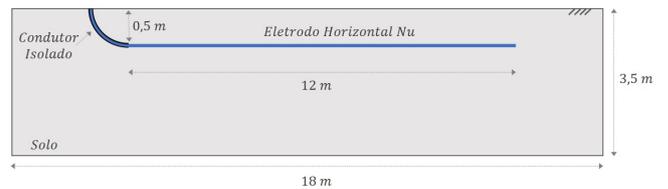


Figura 3. Arranjo da simulação.

Embora, fosse possível representar no ambiente de simulação um eletrodo horizontal puro, a utilização do condutor isolado se deu pelo fato de ser o mesmo arranjo utilizado em Visacro and Rosado (2009), no qual a tensão e corrente foram medidas no topo do condutor isolado (superfície do solo). Dessa forma, buscou-se uma representação fidedigna, para que eventuais efeitos indutivos advindos do "joelho" formado pelo condutor isolado também sejam representados nas simulações.

Diferentemente de simulações que não consideram um solo dependente da frequência, o aumento indiscriminado do domínio do solo, aqui, não leva a resultados mais precisos, uma vez que todo volume do solo simulado está sujeito a (2) e (3). Ou seja, na prática, é fisicamente impossível que (2) e (3) se apliquem a um volume muito grande de solo. Até o momento, os autores não identificaram na literatura trabalhos que indiquem com precisão o tamanho da região do solo que estará sujeita à dependência da frequência. Verificou-se, após testes de simulação, as dimensões do solo que melhor representam o arranjo experimental e estas foram utilizadas nas simulações correspondentes.

2.2 Impedância Harmônica

A impedância harmônica é uma grandeza de importância na análise de aterramentos. Uma vez que os aterramentos estão sujeitos a fenômenos de frequências variadas, a compreensão da impedância do aterramento para cada faixa de frequência é uma informação valiosa. De forma geral, o termo impedância harmônica é utilizado para representar uma curva de impedância versus frequência. Assim, a impedância harmônica é definida como:

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)}, \quad (1)$$

sendo $V(\omega)$ e $I(\omega)$ os fasores de potencial no ponto de injeção e da corrente injetada, respectivamente. Nas si-

mulações utilizando o modelo eletromagnético, foi realizada uma varredura da impedância harmônica em várias frequências entre 100 Hz e 4 MHz sendo plotada a curva de impedância formada por esses pontos.

2.3 Dados Experimentais

Com o propósito de validar a presente modelagem, os resultados das simulações foram comparados com dados experimentais apresentados em Visacro and Rosado (2009), no qual são apresentadas medições de impedância harmônica $Z(\omega)$ de um aterramento do tipo eletrodo horizontal com 12 m de comprimento. O intervalo de frequências desses dados experimentais apresentados é de 1 kHz a 1 MHz.

2.4 Solo Dependente da Frequência

Em todas as simulações utilizou-se um solo cuja permissividade e resistividade são dependentes da frequência, definidos pelo modelo causal proposto por Alipio and Visacro (2014b), conforme as equações:

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_0 \cdot h(\sigma_0) \left(\frac{f}{1MHz} \right)^\gamma \quad (2)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon'_\infty}{\varepsilon_0} + \frac{\tan(\pi\gamma/2) \cdot 10^{-3}}{2\pi\varepsilon_0(1MHz)^\gamma} \sigma_0 \cdot h(\sigma_0) f^{\gamma-1} \quad (3)$$

Em (2) e (3), σ é a condutividade do solo (mS/m), σ_0 é a condutividade (mS/m) em baixa frequência (100 Hz), ε_r é a permissividade relativa, ε'_∞ é a permissividade relativa em frequências mais altas, ε_0 é a permissividade do vácuo ($\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m) e f é a frequência em Hz. A função da permissividade apresentada em (3) é definida para frequências maiores que 1 kHz. Para frequências menores que 1 kHz assume-se o mesmo valor de permissividade de 1 kHz ($\varepsilon_r = \varepsilon_r(1kHz) : f \leq 1 kHz$). Os parâmetros $\varepsilon'_\infty/\varepsilon_0 = 12$, $\gamma = 0,54$ e $h(\sigma_0) = 1,26 \cdot \sigma_0^{-0,73}$, são recomendados para se obter um solo dependente da frequência com resultados médios (Alipio and Visacro, 2014b).

2.5 Modelo de Campo Eletromagnético

No presente trabalho foi utilizado o *Comsol Multiphysics*, ferramenta de simulação de campos eletromagnéticos através do método dos elementos finitos. O equacionamento matemático utilizado permite a avaliação tanto do comportamento capacitivo quanto indutivo do aterramento, ao mesmo tempo que considera a dissipação de corrente do eletrodo para o solo. As equações governantes para modelar o problema eletromagnético foram:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (6)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V - j\omega \mathbf{A} \quad (7)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \mathbf{D} + \sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{J}_e \quad (8)$$

Onde \mathbf{J} é a densidade de corrente; \mathbf{H} é a intensidade de campo magnético; \mathbf{E} é o campo elétrico; \mathbf{A} é o vetor potencial magnético; ω a frequência angular; σ a condutividade elétrica; \mathbf{D} a densidade de campo elétrico; \mathbf{J}_e a densidade de corrente gerada externamente e \mathbf{v} a velocidade do condutor, que no presente estudo é nula ($\mathbf{v} = 0$), uma vez que o sistema de aterramento é estático.

2.6 Modelo de Linha de Transmissão

O modelo de linha de transmissão, utilizado na comparação com o modelo eletromagnético, é composto por uma indutância L em série, uma condutância G e uma capacitância C em paralelo. Eles podem ser descritos como circuitos "pi-equivalentes" conectados em série com elementos distribuídos $R-L-C$, onde cada circuito "pi-equivalente" corresponde a um pequeno segmento do condutor de aterramento (Lorentzou et al., 2003), conforme ilustra a Figura 2.

Os parâmetros $R-L-C$ dos circuitos "pi-equivalentes" são calculados usando (9), (10) e (11), baseado nas conhecidas expressões de Sunde (1968):

$$R = G^{-1} = \frac{\rho}{\pi} \cdot \left[\log \frac{2l}{\sqrt{2da}} - 1 \right] : (l \gg a, d \ll l) \quad (9)$$

$$C = \frac{\rho\varepsilon}{R} \quad (10)$$

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \left[\log \frac{2l}{\sqrt{2da}} - 1 \right], \quad (11)$$

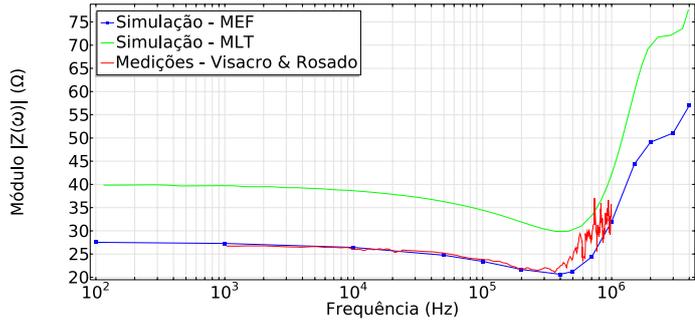
onde ρ ($\Omega \cdot m$) é a resistividade do solo, l (m) o comprimento do eletrodo, a (m) o raio do eletrodo, d (m) a profundidade em que o eletrodo contrapeso está enterrado, ε (F/m) é a permissividade do solo e μ (H/m) é a permeabilidade do solo.

3. RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES

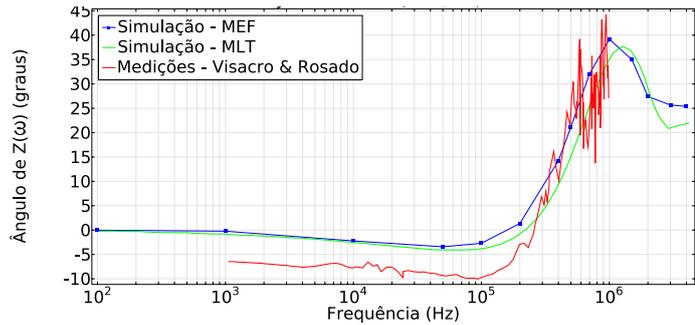
Nesta seção são apresentados os resultados do aterramento indicado na Figura 3. Foram avaliadas frequências de 100 Hz a 4 MHz. Os resultados do modelo eletromagnético (MEF) foram obtidos e comparados com os dados experimentais de impedância harmônica e com resultados do modelo de linha de transmissão (MLT), tanto seu módulo (em $\Omega \cdot m$) quanto sua fase (em graus). As Figuras 4a e 4b apresentam esses resultados.

3.1 Impedância Harmônica

A Figura 4a indica uma grande similaridade do módulo da impedância harmônica simulada no MEF com os dados experimentais, tanto para frequências mais baixas quanto para as mais altas. Observou-se que o MEF seguiu o comportamento geral das medições de forma satisfatória. As medições experimentais utilizadas contemplam frequências de 1 kHz a 1 MHz, enquanto as simulações contemplam 100 Hz a 4 MHz. Note-se que os dados experimentais extraídos de Visacro and Rosado (2009) apresentam oscilações bruscas para frequências de 500 kHz até 2 MHz; os autores não informaram sua origem: se são ruídos de medição ou outro fenômeno. Contudo, a simulação acompanhou



(a) Módulo da impedância harmônica $|Z(\omega)|$ (em $\Omega.m$).



(b) Ângulo da impedância harmônica $\angle Z(\omega)$ (graus).

Figura 4. Impedância harmônica $Z(\omega)$. Simulação versus dados experimentais, para os modelos eletromagnético (MEF) e linha de transmissão (MLT).

o comportamento médio das medições em altas frequência, representando satisfatoriamente a impedância harmônica. Já o MLT apresentou uma impedância mais elevada que os dados de medição entre 100 Hz e 100 KHz, levando a um erro médio de mais de 40% nessa região. Apesar disso, o MLT seguiu o comportamento da curva experimental e, dependendo da situação, pode ser entendido como um modelo conservador. Observou-se que em altas frequências, entre 2 e 4 MHz, ambos os modelos apresentaram uma oscilação similar e que não é representada nas medições.

O ângulo da impedância simulada do MEF (Figura 4b) também seguiu o comportamento dos dados experimentais. Para frequências até 200 kHz a simulação apresentou uma diferença de 6 a 10 graus em relação aos dados experimentais, o que é uma divergência tolerável dada a natureza complexa dos solos que, na prática, não são perfeitamente homogêneos. Apesar disso, para 200 kHz em diante, a simulação seguiu satisfatoriamente o aumento no valor do ângulo da impedância, indicando um comportamento mais pronunciadamente indutivo. Observa-se que, após 1 MHz os valores de ângulo da impedância passam a decair, o que também é reportado em Cavka et al. (2014). Nota-se que, para o ângulo da impedância, tanto o modelo MEF quanto o MLT apresentaram resultados muito similares e também muito próximos aos dados de medição. Além disso, observa-se que, quando o ângulo é aproximadamente zero, ocorrem os valores mínimos do módulo da impedância. Essa situação é o momento em que a capacitância e a indutância do aterramento estão em ressonância, tendo uma característica aproximadamente resistiva, o que também é reportado em Visacro and Rosado (2009). Após esse ponto de ressonância, o aterramento passa a assumir um

comportamento fortemente indutivo, o que é confirmado com o aumento do ângulo, ao mesmo tempo que o módulo também cresce. Por outro lado, observa-se que, em baixas frequências, as medições indicam um aterramento com característica capacitiva mais pronunciada que os modelos MEF e MLT.

Outro fator importante de se notar é que a elevação da impedância com o aumento da frequência é um resultado da associação do aumento da indutância com a redução do comprimento útil do eletrodo. Isso pode ser melhor visualizado na Seção 3.2.

3.2 Potenciais no Solo

Uma das vantagens da utilização do MEF é a possibilidade de se analisar e compreender fenômenos eletromagnéticos de forma visual, auxiliando no entendimento dos problemas físicos estudados. Neste sentido, é apresentado na Figura 5 o comportamento do potencial elétrico no solo ao redor do eletrodo para algumas das frequências analisadas anteriormente nas Figuras 4a e 4b.

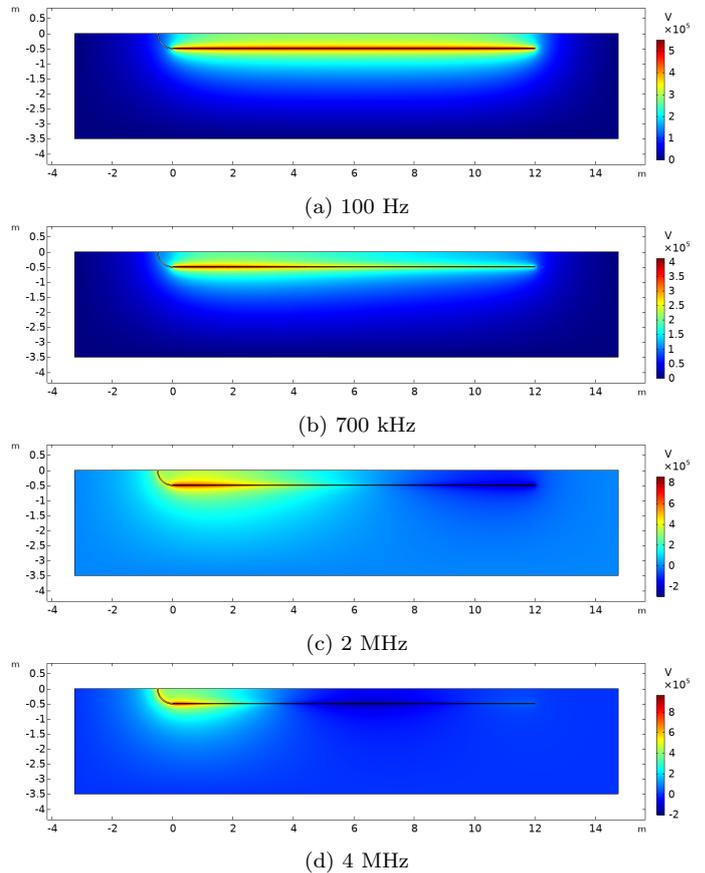


Figura 5. Potencial elétrico no solo considerando uma corrente injetada de 10 kA, nas frequências: (a) 100 Hz, (b) 700 kHz, (c) 2 MHz e (d) 4 MHz. Escala lateral em Volts (V). Solo dependente da frequência. Arranjo de simulação apresentado na Fig. 3

A Figura 5 apresenta o comportamento do potencial elétrico no solo quando uma corrente de 10 kA, em diferentes frequências, é injetada no aterramento. Observa-se de forma a clara que, à medida que a frequência aumenta, os maiores potenciais são retraídos em direção à

extremidade do eletrodo na qual a corrente foi injetada. Dessa forma, fica evidente a redução do comprimento útil do eletrodo à medida que a frequência aumenta. Uma vez que os potenciais se retraem à extremidade esquerda do eletrodo, o centro e a extremidade esquerda assumem potenciais próximos a zero, fazendo com que a corrente dissipada nessa região seja muito reduzida. Esse fenômeno já era esperado e está diretamente ligado ao conceito de comprimento efetivo dos aterramentos, amplamente citado na literatura (He et al., 2005; Liu et al., 2007; Grcev, 2009; Alipio and Visacro, 2014a). Dessa forma, uma vez que as descargas principais possuem componentes de frequências menores que as descargas subsequentes, o comprimento efetivo de um aterramento para as descargas principais é maior que para as descargas subsequentes, mesmo em solos de baixas resistividades. No entanto, para solos com elevada resistividade essa diferença aumenta; por exemplo, considerando um solo de $4.000 \Omega \cdot m$, o comprimento efetivo para descargas subsequentes é de 60 m, enquanto que para descargas principais é de 130 m Alipio and Visacro (2014a).

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi avaliada a resposta em frequência de um aterramento com eletrodo horizontal, utilizando uma modelagem eletromagnética rigorosa por meio do método dos elementos finitos. Na simulação, foi calculada a curva de impedância harmônica (módulo e fase). A dependência da frequência do solo foi considerada, tanto para a resistividade quanto para a permissividade. Um largo espectro foi avaliado, frequências de 100 Hz a 4 MHz, contemplando fenômenos de descargas atmosférica principais e subsequentes. Os resultados obtidos foram satisfatórios, indicando que o modelo eletromagnético apresentado pode ser utilizado para estudos de aterramentos com diversas topologias, incluindo aterramentos não convencionais, os quais dificilmente conseguiriam ser modelados diretamente por modelos circuitais ou de linhas de transmissão. A modelagem eletromagnética permitiu uma compreensão visual dos campos e fenômenos envolvidos, facilitando o entendimento e avaliação do sistema de aterramento utilizado. Neste sentido, foi apresentado o campo do potencial elétrico no solo para diferentes frequências, sendo constatada a variação do comprimento efetivo do aterramento com a elevação da frequência da corrente injetada. Por fim, abrem-se caminhos para futuros estudos que avaliem a resposta em frequência dos aterramentos, buscando por topologias que otimizem a resposta harmônica do sistema.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao prof. Davi Franco (IFBA) pela parceria e ajuda na utilização do COMSOL.

REFERÊNCIAS

Alipio, R. and Visacro, S. (2014a). Impulse efficiency of grounding electrodes: Effect of frequency-dependent soil parameters. *IEEE transactions on power delivery*, 29(2), 716–723.

Alipio, R. and Visacro, S. (2014b). Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil. 56, 1163–1171. doi:10.1109/TEM.2014.2313977.

Ametani, A. (ed.) (2015). *Numerical Analysis of Power System Transients and Dynamics*. Institution of Engineering and Technology. doi:10.1049/pbpo078e. URL <https://doi.org/10.1049/pbpo078e>.

Cavka, D., Mora, N., and Rachidi, F. (2014). A comparison of frequency-dependent soil models: Application to the analysis of grounding systems. 56, 177–187. doi:10.1109/TEM.2013.2271913.

Dawalibi, F. (1986). Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors part 2-ground networks. *IEEE transactions on power delivery*, 1(4), 112–119.

Dawalibi, F. and Selby, A. (1993). Electromagnetic fields of energized conductors. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 8(3), 1275–1284. doi:10.1109/61.252653. URL <https://doi.org/10.1109/61.252653>.

Devgan, S. and Whitehead, E. (1973). Analytical models for distributed grounding systems. *IEEE transactions on Power Apparatus and Systems*, (5), 1763–1770.

Geri, A. (1999). Behaviour of grounding systems excited by high impulse currents: the model and its validation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14(3), 1008–1017.

Grcev, L. and Dawalibi, F. (1990). An electromagnetic model for transients in grounding systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5(4), 1773–1781. doi:10.1109/61.103673. URL <https://doi.org/10.1109/61.103673>.

Grcev, L. (2009). Modeling of grounding electrodes under lightning currents. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 51(3), 559–571. doi:10.1109/temc.2009.2025771.

Grcev, L.D. and Heimbach, M. (1997). Frequency dependent and transient characteristics of substation grounding systems. *IEEE Transactions on power delivery*, 12(1), 172–178.

He, J., Gao, Y., Zeng, R., Zou, J., Liang, X., Zhang, B., Lee, J., and Chang, S. (2005). Effective length of counterpoise wire under lightning current. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(2), 1585–1591. doi:10.1109/tpwr.2004.838457.

He, J., Zeng, R., and Zhang, B. (2012). *Methodology and technology for power system grounding*. John Wiley & Sons.

He, J. and Zhang, B. (2013). Soil ionization phenomenon around grounding electrode under lightning impulse. 1–5. IEEE. doi:10.1109/APEM.2013.7360610.

He, J. and Zhang, B. (2015). Progress in lightning impulse characteristics of grounding electrodes with soil ionization. 51, 4924–4933. doi:10.1109/TIA.2015.2427124.

Huang, L. and Kasten, D.G. (2001). Modeling of ground grid and metallic structure currents in high voltage ac substations for the computation of electromagnetic fields. *Electric Power Systems Research*, 59(1), 31–37.

Li, Z.X., Chen, W., Fan, J.B., and Lu, J. (2006). A novel mathematical modeling of grounding system buried in multilayer earth. *IEEE transactions on Power Delivery*, 21(3), 1267–1272.

Li, Z.X. and Fan, J.B. (2008). Numerical calculation of grounding system in low-frequency domain based on the boundary element method. *International journal for numerical methods in engineering*, 73(5), 685–705.

- Liew, A. and Darveniza, M. (1974). Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths. In *Proceedings of the Institution of electrical Engineers*, volume 121, 123–135. IET.
- Liu, Y., Theethayi, N., and Thottappillil, R. (2005). An engineering model for transient analysis of grounding system under lightning strikes: Nonuniform transmission-line approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(2), 722–730.
- Liu, Y., Theethayi, N., and Thottappillil, R. (2007). Investigating the validity of existing definitions and empirical equations of effective length/area of grounding wire/grid for transient studies. *Journal of Electrostatics*, 65(5-6), 329–335. doi:10.1016/j.elstat.2006.09.005.
- Lorentzou, M., Hatzargyriou, N., and Papadias, B. (2003). Time domain analysis of grounding electrodes impulse response. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(2), 517–524. doi:10.1109/tpwr.2003.809686. URL <https://doi.org/10.1109/tpwr.2003.809686>.
- Mentre, F. and Grcev, L. (1994). EMTP-based model for grounding system analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9(4), 1838–1849. doi:10.1109/61.329517. URL <https://doi.org/10.1109/61.329517>.
- Messier, M. (1985). Another soil conductivity model. Technical report, Internal Rep., JAYCOR, Santa Barbara, CA.
- Messier, M. (1980). The propagation of an electromagnetic impulse through soil: Influence of frequency dependent parameters. *Mission Res. Corp., Santa Barbara, CA, USA, Tech. Rep. MRC-N-415*.
- Olsen, R. and Willis, M. (1996). A comparison of exact and quasi-static methods for evaluating grounding systems at high frequencies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(2), 1071–1081. doi:10.1109/61.489370. URL <https://doi.org/10.1109/61.489370>.
- Ramamoorthy, M., Narayanan, M.B., Parameswaran, S., and Mukhedkar, D. (1989). Transient performance of grounding grids. *IEEE Power Engineering Review*, 9(10), 48–48.
- Roubertou, D., Fontaine, J., Plumey, J., and Zeddou, A. (1984). Harmonic input impedance of earth connections. In *1984 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. IEEE. doi:10.1109/isemc2.1984.7568121. URL <https://doi.org/10.1109/isemc2.1984.7568121>.
- Scott, J.H. (1966). Electrical and magnetic properties of rock and soil. Technical report, Theoretical Notes, Note 18, U.S. Geological Survey.
- Scott, J., Carroll, R., and Cunningham, D. (1964). Dielectric constant and electrical conductivity of moist rock from laboratory measurements. *US Dept. of interior geological survey technical letter, Special projects-12, August*, 17.
- Silva, V.C. (2006). *Método de elementos finitos aplicado à solução de problemas de aterramento elétrico*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo.
- Smith, K. and Longmire, C. (1975). A universal impedance for soils. *Defense Nuclear Agency, Alexandria, VA, USA, Topical Report for Period*, 30, 1975.
- Smith-Rose, R. (1934). Electrical measurements on soil with alternating currents. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, 75(452), 221–237. doi:10.1049/jiee-1.1934.0127. URL <https://doi.org/10.1049/jiee-1.1934.0127>.
- Sunde, E. (1968). Ground resistance measurements. In *Earth Conduction Effects in Transmission Systems*, 94–97. Dover.
- Velazquez, R. and Mukhedkar, D. (1984). Analytical modeling of grounding electrodes transient behavior. *IEEE Power Engineering Review*, PER-4(6), 43–44. doi:10.1109/mper.1984.5526103. URL <https://doi.org/10.1109/mper.1984.5526103>.
- Visacro, S. and Portela, C. (1987). Soil permittivity and conductivity behavior on frequency range of transient phenomena in electric power systems. In *Symp. High Voltage Eng.* Braunschweig, Germany,.
- Visacro, S. and Rosado, G. (2009). Response of grounding electrodes to impulsive currents: An experimental evaluation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 51(1), 161–164.
- Visacro, S. and Soares, A. (2005). HEM: A model for simulation of lightning-related engineering problems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(2), 1206–1208. doi:10.1109/tpwr.2004.839743.
- Visacro, S. and Alipio, R. (2012). Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(2), 927–935.
- Visacro, S., Alipio, R., Vale, M.H.M., and Pereira, C. (2011). The response of grounding electrodes to lightning currents: The effect of frequency-dependent soil resistivity and permittivity. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 53(2), 401–406.
- Visacro, S. (2007). A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents. 22, 381–386. doi:10.1109/TPWRD.2006.876707.