



AValiação DE PROGRAMA PARA ATERRAMENTOS ELÉTRICOS FUNDAMENTADO NO MÉTODO DOS ELEMENTOS DE CONTORNO

Raphael Batista*¹ e Pedro Enrique Batista Borges Louro¹

¹UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

Resumo – Este trabalho apresenta a avaliação da precisão dos resultados em baixas frequências de um programa para cálculo de parâmetros associados a aterramentos elétricos. O programa TOTBEM, desenvolvido por pesquisadores da Universidade da Coruña, emprega o Método dos Elementos de Contorno para solucionar o problema de aterramento elétrico em solos uniformes e estratificados horizontalmente em duas camadas. Por meio da comparação de suas estimativas para a resistência de aterramento com fórmulas analíticas e um programa comercial de solução de problemas eletromagnéticos, é possível avaliar seu emprego em projetos e no ensino de conceitos sobre o assunto. Os resultados indicam muita boa precisão para condições de solo homogêneo, porém a presença de estratificação pode tornar as estimativas do TOTBEM completamente inadequadas. Se a espessura da primeira camada do solo for maior ou igual a 1 m, erros superiores a 1000% para a resistência de aterramento podem ocorrer, o que limita a indicação do programa para análise de problemas de aterramento em meios homogêneos.

Palavras-Chave – Aterramentos, Baixas frequências, Métodos numéricos, Código aberto, Solos estratificados.

EVALUATION OF A GROUNDING SOFTWARE BASED ON BOUNDARY ELEMENT METHOD

Abstract – This work shows the evaluation of electrical parameters related to grounding problems provided by a software based on Boundary Element Method. The TOTBEM software is developed by researchers from Coruna University to solve grounding problems in conditions of uniform and horizontally stratified soils. Its results are compared to a rigorous commercial software that solves electromagnetic problems assuming the full wave equations and to analytical expressions, aiming to reply if it can be used to analyze practical grounding problems. The results indicate a remarkable precision for uniform soil cases, but the presence of stratifications can make TOTBEM extremely unstable. If the thickness of the

first-layer is greater or equal to 1 m, inadequate solutions can be obtained with errors greater than 1000% for the grounding resistance. Consequently, is concluded that TOTBEM is only indicated for the analysis of homogeneous soil for the analysis of grounding problems.

Keyword – Grounding, Low frequency, Numerical methods, Open-source, Stratified soils.

I. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico de potência (SEP) deve apresentar desempenho compatível com os valores especificados por normas [1]. Entre os elementos que o constituem, o aterramento elétrico é comumente um ponto estudado para a melhoria do desempenho de linhas de transmissão (LT) no SEP, principalmente em relação a incidência direta e indireta de descargas atmosféricas [2].

Sabe-se que o comportamento do aterramento elétrico apresenta diferentes características para transitórios de baixas e altas frequências, o que implica na avaliação dos valores da resistência de aterramento (R_{LF} ou, do inglês, *low-frequency resistance*) e impedância impulsiva, respectivamente, para as condições indicadas [3,4]. Curtos-circuitos, ferroressonância, chaveamentos e rejeição de cargas são exemplos de transitórios lentos, i.e., relacionados a baixas frequências, enquanto descargas atmosféricas exemplificam fenômenos rápidos e de altas frequências envolvidas [5].

Malhas de subestações são habitualmente avaliadas por meio do valor de R_{LF} , já que a ocorrência de faltas é crítica para a segurança dos funcionários da instalação. Caso a configuração empregada não seja adequada, a diferença de potencial elétrico entre pontos da malha, no instante da falta, pode superar os limites seguros de tensão de passo, toque e transferível [3], constituindo um perigo para as pessoas no interior e arredores da subestação.

Para configurações utilizadas em torres de LT, mesmo com o interesse principal no desempenho do aterramento em condições associadas a altas frequências, por conta da maior taxa de falhas/interrupções devido a incidência direta e indireta de descargas atmosféricas, o R_{LF} ainda tem importância, já que é possível a ocorrência de faltas e fugas de corrente da torre para o solo. Quando instaladas em meios urbanos, é necessário avaliar as tensões de passo e toque em

*raphaelbatista@ufmg.br

condições de falta, já que pessoas podem estar posicionadas próximas às torres de LT.

Por meio dos comentários anteriores, percebe-se a importância de ferramentas computacionais para a análise de aterramentos elétricos em baixas frequências. A estimativa de R_{LF} e distribuição de potencial elétrico ao longo da superfície do solo são os principais parâmetros elétricos de interesse para malhas em condições de transitórios lentos. A procura por rotinas numéricas que facilitem tais análises é contínua [6-10] e, dentre elas, uma alternativa gratuita em meio a tantas opções pagas se destaca: o programa TOTBEM [11], desenvolvido por pesquisadores da Universidade de Coruña e disponibilizado na versão 1.0 [12].

Para seu emprego no ensino de aterramentos elétricos e em projetos, é requisito avaliar a precisão de suas estimativas de R_{LF} e distribuição de potencial elétrico na superfície do solo, o que constitui o objetivo principal deste trabalho. Solos uniformes e estratificados em duas camadas são considerados nas simulações e o programa TOTBEM é comparado com o programa HFSS, que soluciona a equação de onda eletromagnética em sua forma completa por meio do uso do Método dos Elementos Finitos (MEF).

II. O PROGRAMA TOTBEM

O programa TOTBEM é desenvolvido na linguagem Python e utiliza a plataforma SALOME como interface gráfica no sistema operacional Linux [13]. Como detalhado em [11], o Método dos Elementos de Contorno (MEC) é implementado para solucionar as equações eletromagnéticas que regem o problema, para um solo homogêneo, i.e.:

$$\text{No solo: } \vec{\nabla} \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (1)$$

$$\text{No solo: } \mathbf{J} = -\sigma \vec{\nabla} V = -\vec{\nabla} V / \rho \quad (2)$$

$$\text{Na interface solo - ar: } \mathbf{J}' \cdot \mathbf{n}_E = 0 \quad (3)$$

$$\text{No superfície dos condutores: } V = V_T \quad (4)$$

$$\text{No superfície dos condutores: } V \rightarrow 0 \text{ para } |x| \rightarrow \infty \quad (5)$$

Onde:

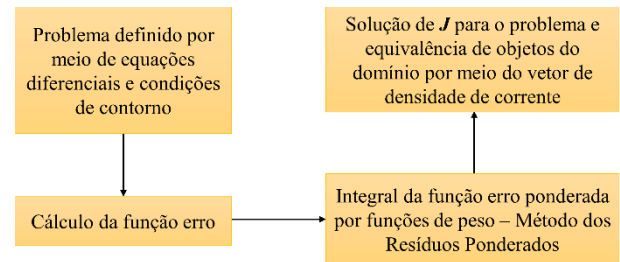
- \mathbf{J} - Vetor de densidade de corrente de condução.
- σ - Condutividade elétrica do solo.
- ρ - Resistividade elétrica do solo.
- V - Potencial elétrico em um dado ponto x .
- \mathbf{J}' - Componente tangencial de \mathbf{J} .
- \mathbf{n}_E - Versor normal à superfície externa do condutor.
- V_T - Valor constante qualquer para o potencial elétrico em um certo ponto x .

Assume-se aproximação potencial constante ao longo dos eletrodos inseridos no solo e, por meio das relações de (1) a (5), a corrente de condução I , função de \mathbf{J} , é estimada com o auxílio do Método das Imagens e identidade de Green [11,14]. Com V e I estimados nos condutores, é possível estimar a R_{LF} e o potencial elétrico em qualquer ponto do domínio computacional.

Para emprego do MEC, pode-se proceder como indicado no fluxograma da Figura 1 [15]. Inicia-se com a representação do problema por meio de uma equação diferencial e suas condições de fronteira são estabelecidas. Uma solução aproximada para o problema é definida e, por meio das

condições de contorno, a resposta hipotética é reescrita – caso a solução hipotética seja uma função polinomial, o procedimento é comumente chamado de Método dos Momentos (MOM) [16]. Por meio da derivada da solução aproximada, a função erro é obtida e ponderada por funções de peso em uma integral correspondente ao Método dos Resíduos Ponderados – chega-se a uma equação integral para o problema. Como observado em (1) a (3), quaisquer objetos serão representados por meio de \mathbf{J} e este é o parâmetro desejado para solucionar o sistema de equações lineares.

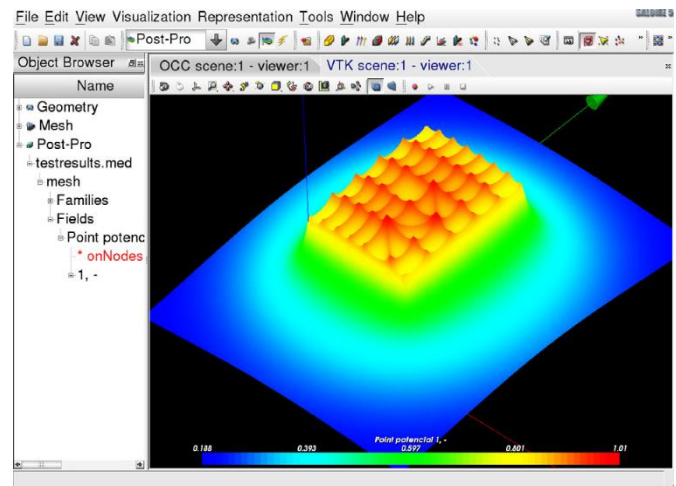
Figura 1: Passos para solução de problemas por meio do uso do MEC – adaptado de [15].



Com a estimativa da distribuição de \mathbf{J} ao longo dos condutores, é possível calcular a corrente total que flui pelos eletrodos, o potencial elétrico desenvolvido na malha (*ground potential rise* ou GPR) e em qualquer ponto do solo, além de R_{LF} . O mesmo procedimento é estendido para meios estratificados em duas camadas.

A Figura 2 ilustra a interface do programa TOTBEM, disponível exclusivamente no sistema operacional Linux.

Figura 2: Programa TOTBEM e seu pacote de pós-processamento de dados – adaptado de [14].

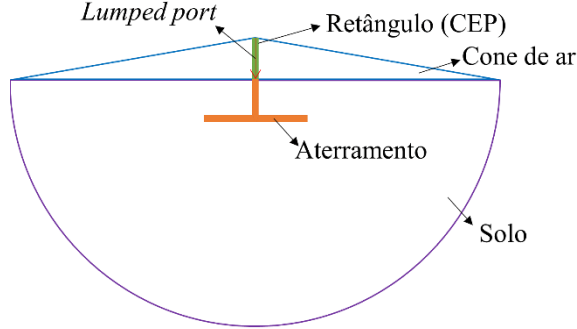


III. COMPARAÇÃO COM OUTRAS TÉCNICAS

Neste trabalho, o TOTBEM é comparado com o programa comercial HFSS e com fórmulas analíticas para configurações mais simples. O HFSS, um programa baseado no MEF para estimar a solução da equação de onda eletromagnética em sua forma completa, é capaz de avaliar R_{LF} de configurações e solos diversos por meio da implementação apresentada em [17], que consiste na construção da geometria do aterramento

imersa em um solo com formato hemisférico, como ilustrado na Figura 3. Um cone de ar é acoplado ao topo do hemisfério e uma porta do tipo *lumped* é implementada para a excitação da malha de eletrodos. Como condições de contorno, todas as superfícies externas do cone e hemisfério são admitidas como condutores elétricos perfeitos (CEP) e R_{LF} é calculado por meio da razão entre o GPR desenvolvido no aterramento e a corrente injetada. Resultados desse procedimento são indicados em [17-19].

Figura 3: Representação do problema de aterramento implementado no programa HFSS – adaptado de [17].



As fórmulas analíticas consideradas se relacionam com hastes ou eletrodos horizontais imersos em solo uniforme ou heterogêneo, exibidos na Figura 4. A expressão para um eletrodo horizontal em solo heterogêneo, para $d < h$, é [20]:

$$R_{LF} = \frac{\rho_1}{\pi l} \left\{ -1 + \ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2ad}} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left[\frac{4nh}{l} - 2\sqrt{\frac{4n^2 h^2 + l^2}{l^2}} - 2 \ln \left(\frac{2nh}{l + \sqrt{4n^2 h^2 + l^2}} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

Onde:

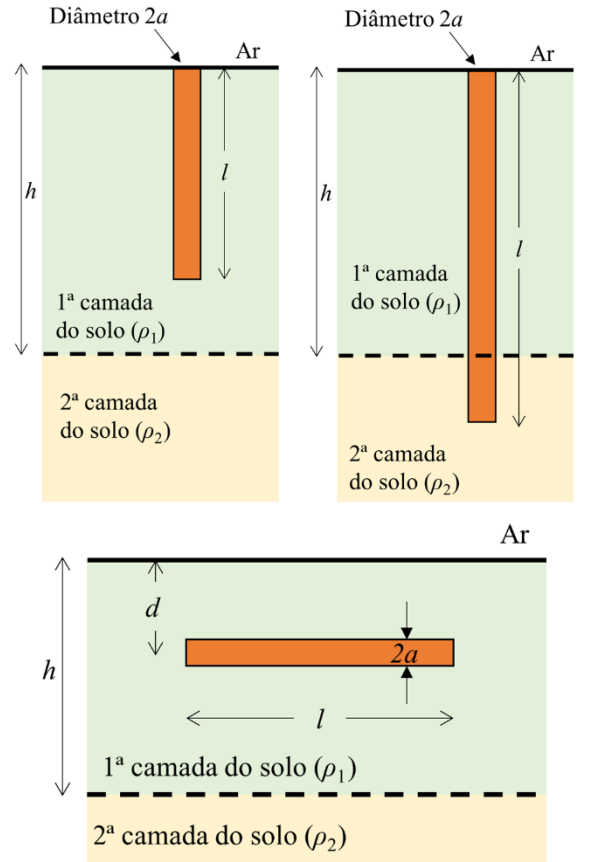
- l - Comprimento do eletrodo.
- a - Raio do eletrodo.
- d - Profundidade do eletrodo.
- ρ_1 - Resistividade elétrica da primeira camada do solo.
- ρ_2 - Resistividade elétrica da segunda camada do solo.
- h - Espessura da primeira camada do solo.
- k - Coeficiente de reflexão, $k = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$.
- n - Imagem n da fonte de corrente no solo, originada por meio do uso do Método das Imagens.

Para uma haste imersa em solo estratificado, se $l < h$, a expressão de R_{LF} vale [20,21]:

$$R_{LF} = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left\{ -1 + \ln \left(\frac{4l}{a} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \ln \left(\frac{2nh+l}{2nh-l} \right) \right\} \quad (7)$$

enquanto para $l \geq h$ é:

Figura 4: Eletrodo vertical e horizontal em solos estratificados em duas camadas.



$$R_{LF} = \frac{\rho_1 (1+k)}{2\pi (2kh - kl + l)} \left\{ -1 + \ln \left(\frac{4l}{a} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \ln \left(\frac{2nh+l}{(2n-2)h-l} \right) \right\} \quad (8)$$

Deve-se atentar que as soluções analíticas são obtidas por meio de aproximações e simplificações do problema.

IV. RESULTADOS

A. Eletrodo horizontal em solo uniforme

A avaliação de um eletrodo horizontal em solo uniforme assume um condutor de comprimento l variável, à profundidade $d = 50$ cm e raio $a = 5$ mm, além de $\rho = 1000$ Ωm . A Tabela I apresenta os valores de R_{LF} obtidos por meio do TOTBEM, HFSS e da formulação analítica, assumindo $\rho_1 = \rho_2 = 1000$ Ωm em (6). Para a comparação, assume-se o HFSS como valor referência.

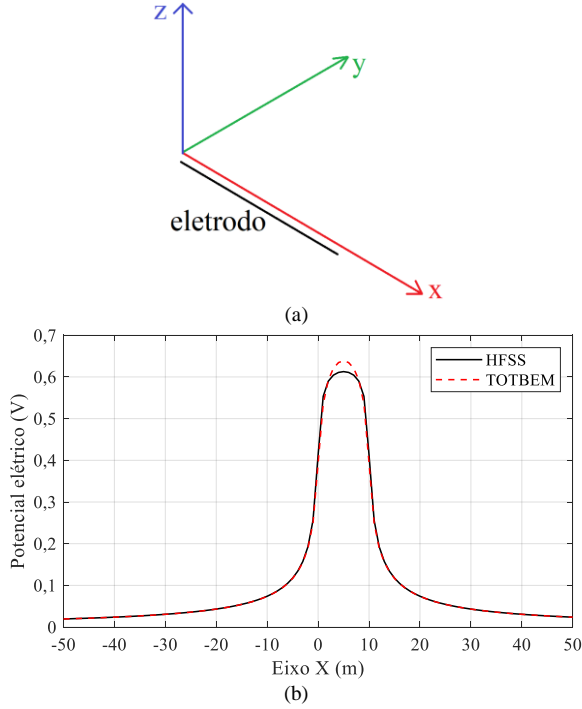
Tabela I: Valores de R_{LF} de um eletrodo horizontal em solo uniforme com $\rho = 1000$ Ωm em função da variação de l

Comprimento l	R_{LF} HFSS	R_{LF} (6)	R_{LF} TOTBEM
5 m	257,4 Ω	-2,25%	0,11%
10 m	149,2 Ω	-0,87%	-0,07%
20 m	85,28 Ω	-0,38%	0,08%
50 m	39,90 Ω	-0,20%	-0,05%
100 m	22,16 Ω	-0,23%	-0,14%

Nota-se que as estimativas de todos os procedimentos são muito similares, sendo o resultado do TOTBEM extremamente parecido com o programa HFSS. Uma média aritmética absoluta de diferença em relação ao HFSS de 0,09% para o TOTBEM é observada, enquanto (6) implica em 0,79%.

A proximidade dos resultados entre o TOTBEM e o HFSS é novamente percebida pela distribuição de potencial elétrico na superfície do solo, como indicado na Figura 5 para um eletrodo horizontal $l = 10$ m e corrente I injetada na malha igual a $1/R_{LF}$, obtida pela simulação do programa TOTBEM.

Figura 5: a. Representação do eletrodo horizontal e b. a distribuição de potencial elétrico na superfície do solo ao longo do eixo X.



B. Eletrodo vertical em solo uniforme

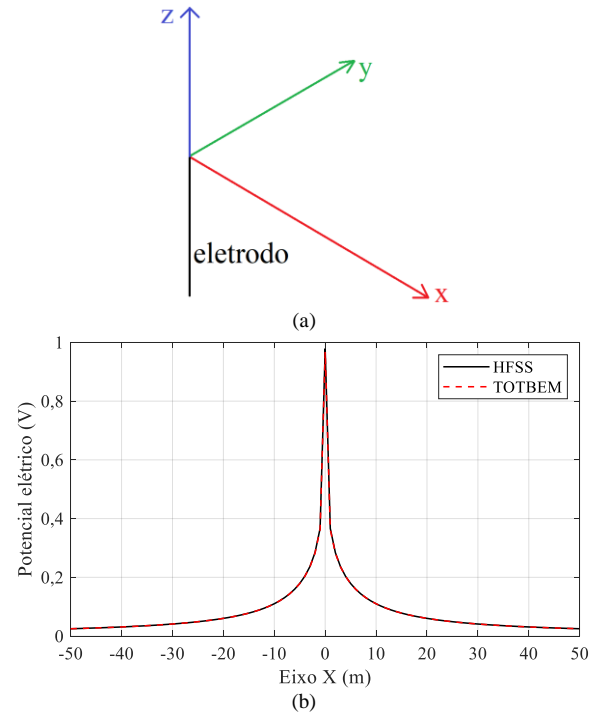
Um solo uniforme com $1000 \Omega\text{m}$ é considerado em conjunto com um eletrodo vertical de raio igual a 5 cm e comprimento l variável. Os resultados de R_{LF} são exibidos na Tabela II, enquanto a distribuição de potencial elétrico na superfície do solo para $l = 10$ m é ilustrado na Figura 6, novamente para $I = 1/R_{LF}$ oriunda do programa TOTBEM.

Tabela II: Valores de R_{LF} de um eletrodo vertical em solo uniforme com $\rho = 1000 \Omega\text{m}$ em função da variação de l

Comprimento l	R_{LF} HFSS	R_{LF} (6)	R_{LF} TOTBEM
3 m	359,4 Ω	0,14%	-0,19%
10 m	127,1 Ω	~ 0%	-0,24%
15 m	89,02 Ω	0,03%	-0,17%
20 m	69,06 Ω	0,01%	-0,16%
30 m	48,20 Ω	~ 0%	-0,17%

Como no caso do eletrodo horizontal, há grande semelhança entre os resultados do TOTBEM e HFSS. Para as estimativas de R_{LF} , uma diferença média em relação ao HFSS de 0,04% é observada para (6) e de 0,19% para o programa TOTBEM.

Figura 6: a. Representação do eletrodo vertical e b. a distribuição de potencial elétrico na superfície do solo ao longo do eixo X.



C. Eletrodo horizontal em solo heterogêneo

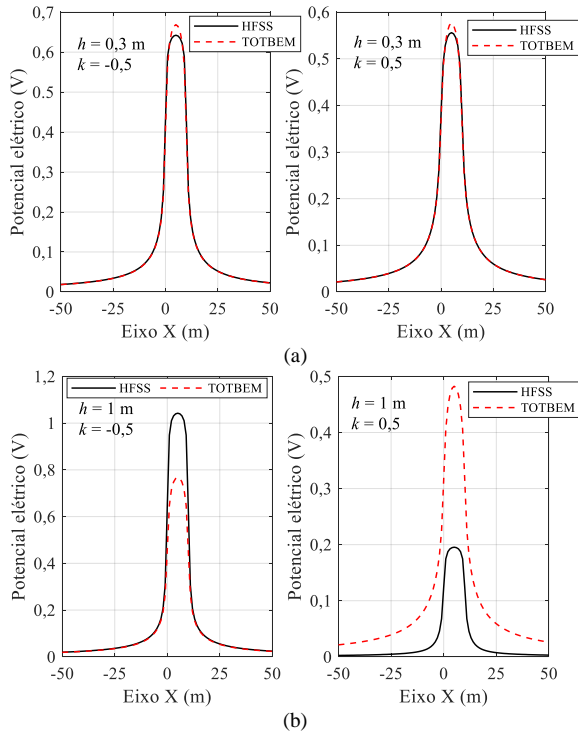
Para $l = 10$ m, $a = 5$ mm, $d = 50$ cm e ρ_1 fixado em $100 \Omega\text{m}$, assumem-se valores de 0,3 e 1,0 m para h para diferentes valores de k para o solo estratificado em duas camadas. A Tabela III exibe os valores de R_{LF} , enquanto a Figura 7 mostra a distribuição de potencial elétrico ao longo da superfície do solo para $I = 1/R_{LF}$ estimada pelo programa TOTBEM para algumas situações avaliadas.

Tabela III: Valores de R_{LF} de um eletrodo horizontal de 10 m em solo estratificado com $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$ em função da variação de h e ρ_2

h	k	ρ_2 (Ωm)	R_{LF} HFSS	R_{LF} (6)	R_{LF} TOTBEM
0,3 m	-0,9	5,26	0,85 Ω	---	~ 0%
	-0,7	17,65	2,81 Ω	---	0,36%
	-0,5	33,33	5,20 Ω	---	0,96%
	-0,3	53,85	8,31 Ω	---	0,24%
	0,3	185,71	26,43 Ω	---	-0,15%
	0,5	300	41,35 Ω	---	-1,96%
	0,7	566,67	72,54 Ω	---	-2,67%
1,0 m	0,9	1900	215,8 Ω	---	-8,72%
	-0,9	5,26	9,11 Ω	1,76%	-91,3%
	-0,7	17,65	10,05 Ω	0,90%	-73,3%
	-0,5	33,33	11,16 Ω	0,09%	-76,7%
	-0,3	53,85	12,53 Ω	-1,12%	-96,0%
	0,3	185,71	18,42 Ω	-0,38%	44,1%
	0,5	300	22,28 Ω	-1,08%	82,5%
0,7	566,67	28,47 Ω	-1,02%	147%	
0,9	1900	43,33 Ω	-0,46%	-64,5%	

Nota-se da Tabela III a proximidade dos valores do TOTBEM em relação ao HFSS para a situação em que $h = 0,3$ m – há tendência de aumento na discrepância entre os valores com a aproximação de k para o valor unitário positivo. Para a situação em que $h = 1$ m, o programa TOTBEM se mostrou instável e com grande divergência de valores, possivelmente

Figura 7: Distribuição de potencial elétrico na superfície do solo ao longo do eixo X para um eletrodo horizontal de 10 m em solo estratificado em duas camadas: a. $h = 0,3$ m e b. 1,0 m.



por algum mal condicionamento do método implementado para a situação avaliada. As estimativas de R_{LF} apresentaram oscilação, sem manter a tendência esperada de aumento da resistência com o aumento de k positivo para $h = 1$ m. Destaca-se a boa precisão da formulação analítica para $h = 1$ m em relação ao HFSS, com diferença média estimada em 0,85%. Para $h = 0,3$ m, o programa TOTBEM resultou em diferença média em relação ao HFSS de 1,88% e, para $h = 1$ m, de 84,4%.

A Figura 7 repete a tendência dos valores de R_{LF} observados, com proximidade do potencial elétrico para $h = 0,3$ m e divergência substancial nos valores para $h = 1$ m.

D. Eletrodo vertical em solo heterogêneo

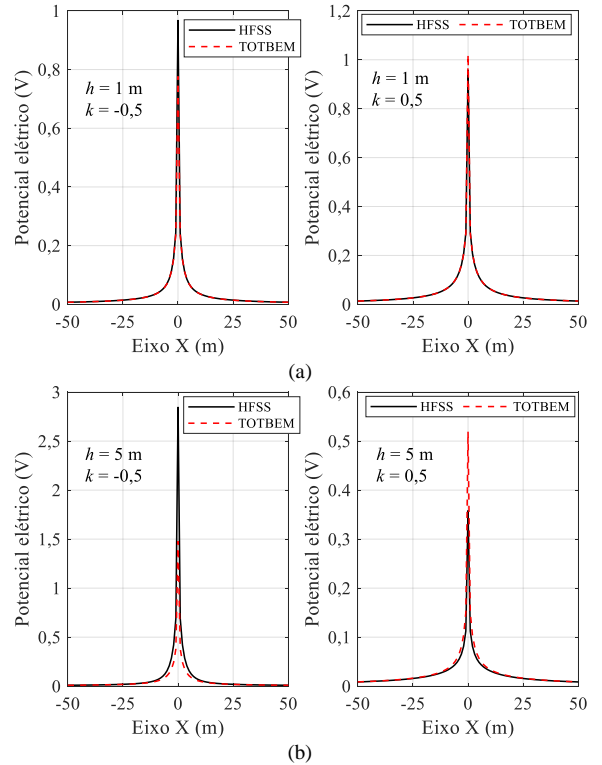
A última avaliação do trabalho corresponde à uma haste de 3 m de comprimento e raio de 5 mm em um solo estratificado em duas camadas, com $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$. Os valores de h e k são variados, como na avaliação anterior, com avaliação de R_{LF} e da distribuição de potencial elétrico ao longo do solo – emprega $I = 1/R_{LF}$ derivado da estimativa do programa TOTBEM. Os resultados são apresentados na Tabela IV e Figura 8.

A situação em que a haste atinge a segunda camada do solo constitui a situação crítica da avaliação, particularmente para k positivo muito próximo ao valor unitário. Nesta situação, nota-se uma divergência entre os valores do HFSS, TOTBEM e fórmula analítica, sendo a primeira opção a que apresenta menor valor de R_{LF} . De maneira geral, para $h = 1$ m, todas as técnicas analisadas resultam em valores de R_{LF} similares, com diferença média de 14,62% para a fórmula analítica (8) e 7,00% para o TOTBEM em comparação ao HFSS.

Tabela IV: Valores de R_{LF} de um eletrodo vertical de 3 m em solo estratificado com $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$ em função da variação de h e ρ_2

h	k	$\rho_2 (\Omega\text{m})$	R_{LF} HFSS	R_{LF} (7,8)	R_{LF} TOTBEM
1 m	-0,9	5,26	2,60 Ω	6,92%	0,38%
	-0,7	17,65	8,31 Ω	6,14%	0,48%
	-0,5	33,33	14,79 Ω	4,53%	0,54%
	-0,3	53,85	22,30 Ω	2,24%	0,18%
	0,3	185,71	53,73 Ω	2,48%	0,30%
	0,5	300	69,52 Ω	8,95%	1,77%
	0,7	566,67	90,30 Ω	24,4%	8,07%
	0,9	1900	123,93 Ω	61,3%	44,3%
	5 m	-0,9	5,26	33,70 Ω	0,47%
-0,7		17,65	34,08 Ω	0,44%	-82,0%
-0,5		33,33	34,54 Ω	0,32%	-65,8%
-0,3		53,85	35,06 Ω	0,17%	-45,0%
0,3		185,71	37,11 Ω	0,11%	77,2%
0,5		300	38,27 Ω	-0,05%	172%
0,7		566,67	39,96 Ω	-0,15%	378%
0,9		1900	43,51 Ω	-0,21%	1308%

Figura 8: Distribuição de potencial elétrico na superfície do solo ao longo do eixo X para um eletrodo vertical de 3 m em solo estratificado em duas camadas: a. $h = 1,0$ m e b. 5,0 m.



Como observado na análise do eletrodo horizontal em solo heterogêneo, uma instabilidade de R_{LF} para $h = 5$ m é identificada no TOTBEM. Enquanto a diferença média de (7) é igual a 0,24%, o erro em relação ao HFSS devido ao uso do TOTBEM alcança 278%, um valor significativamente alto. As mesmas características de divergência são percebidas nos gráficos da Figura 8, o que reforça a má adequação do TOTBEM para avaliar tais casos.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma avaliação do programa TOTBEM relacionada a precisão de seus valores estimados de RLF. Por meio de uma comparação com um programa referência e expressões analíticas para hastes e eletrodos horizontais, foi possível perceber em quais condições o TOTBEM se mostra adequado para uso na análise e projeto de aterramentos.

Para os casos de solo homogêneo avaliados, o programa TOTBEM se mostrou preciso, com valores de R_{LF} e gráficos de potencial elétrico na superfície do solo muito similares ao HFSS. O pior caso apresentou diferença inferior a 1% em relação ao HFSS, um resultado notável. Para condições mais práticas, em que o solo é estratificado em duas camadas, quando h é menor do que o valor unitário, o programa TOTBEM apresenta valores consistentes com os apresentados pelo HFSS, com diferença média inferior a 10% para hastes e eletrodos horizontais. Entretanto, uma instabilidade do programa foi percebida para solos estratificados com $h \geq 1$ m, com enorme divergência quando comparado ao HFSS e as expressões analíticas.

Embora o MEC apresente grande similaridade com o MOM, método famoso na avaliação de problemas eletromagnéticos, aparentemente sua implementação no programa TOTBEM apresenta alguma inadequação ou limitação, já que a divergência percebida nas avaliações ocorre frequentemente para $h \geq 1$ m. É possível que os problemas observados sejam exclusivos da versão disponibilizada em [12], mas detalhes sobre a razão dos resultados indesejáveis são desconhecidos. Apesar da interface amigável e facilidade de uso, é sugerido seu uso exclusivamente a condições de solo homogêneo, já que não é garantido que os resultados com solo estratificado, mesmo com $h < 1$ m, sejam coerentes.

REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL, "Resolução Normativa n° 270 de 26 de junho de 2007", *Agência Nacional de Energia Elétrica*, pp. 1-16, 2016.
- [2] S. Visacro, *Aterramentos elétricos: uma abordagem de engenharia*, ArtLiber Editora, 1ª Edição, São Paulo, 2002.
- [3] J. He, R. Zeng, B. Zhang, *Methodology and Technology for Power System Grounding*, John Wiley & Sons, 1st Edition, Singapore, 2013.
- [4] A. Vainer, "Impulse characteristics of complex earth grid", *Elektrichestvo*, vol. 3, pp. 107–117, 1965.
- [5] J. A. Martinez-Velasco, *Power System Transients: Parameter Determination*, CRC Press, 1st Edition, Boca Raton, 2010.
- [6] F. Dawalibi and D. Mukhedkar, "Optimum design of substation grounding in a two layer earth structure: Part I Analytical study," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 94, no. 2, pp. 252-261, 1975.
- [7] T. Takahashi, T. Kawase, "Calculation of earth resistance for a deep-driven rod in a multi-layer earth structure", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 2, pp. 608-614, 1991.
- [8] L. M. R. Raggi, "Projeto de malhas de aterramento: Contribuição ao cômputo da estratificação do solo", *Dissertação*, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- [9] R. Batista, "GroundCalc", *INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial*, 2019.
- [10] R. Batista, and J. R. Souza, "Estimation of Grounding Resistance of Transmission Line Towers based on Artificial Neural Networks: A Practical Analysis based on a developed Android App", in *2019 International Symposium on Lightning Protection (XV SIPDA)*, pp. 1-6, 2019.
- [11] J. París, I. Colominas, X. Nogueira, F. Navarrina, and M. Casteleiro, "Numerical simulation of multilayer grounding grids in a user-friendly open-source CAD interface", in *Proc. of ICETCE*, vol. 01, pp. 1-4, 2012.
- [12] Grupo de Métodos Numéricos en Ingeniería (2018). *TOTBEM: Numerical Simulation of Grounding Grids for Electrical Installations*. Acedido em 17 de Setembro de 2020, em: <http://caminos.udc.es/gmni/software.html>.
- [13] CEA & EDF & OpenCascade (2012). *Salome: The Open Source Integration Platform for Numerical Simulation*. Acedido em 18 de Setembro de 2020, em: <http://www.salome-platform.org/>.
- [14] I. Colominas, J. París, D. Fernández, F. Navarrina, M. Casteleiro, "A numerical simulation tool for multilayer grounding analysis integrated in an open-source CAD interface," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 45, pp. 353-361, 2013.
- [15] L. M. Alves, "Apostila de Método dos Elementos de Contorno", *Método dos Elementos de Contorno*, Universidade Federal do Paraná, 2006.
- [16] M. N. O. Sadiku, *Numerical techniques in electromagnetics*, CRC Press, 2nd Edition, Boca Raton, 2001.
- [17] B. Salarieh, H. M. J. De Silva, and B. Kordi, "Wideband EMT-Compatible Model for Grounding Electrodes Buried in Frequency Dependent Soil", in *Proc. of IPST*, vol. 01, pp. 1-6, 2019.
- [18] R. Batista, C. E. F. Caetano, J. O. S. Paulino, W. C. Boaventura, I. J. S. Lopes, E. N. Cardoso, "A practical approach to estimate grounding impedance of a vertical rod in a two-layer soil", *Electric Power System Research*, vol. 180, pp. 1-9, 2019.
- [19] R. Batista, J. O. S. Paulino, "A study of grounding arrangements composed by vertical electrodes for two-layered soil models", *Electric Power System Research*, vol. 180, pp. 1-8, 2019.
- [20] E. D. Sunde, *Earth conduction effects in transmission systems*, Dover Publications, 2nd Edition, New York, 1968.
- [21] G. F. Tagg, *Earth resistances*, Pitman, 1st Edition, London, 1964.