

Aplicação de Algoritmos Genético Aperfeiçoado por um Algoritmo Elipsoidal no Cálculo da Resistividade Considerando Solo Estratificado em Duas Camadas

OCHOA, J. P. OLIVEIRA, R. V. MOURA, R. A.R. SCHROEDER, M. A.O. NEPOMUCENO, E. G.

UFSJ – Universidade Federal de São João del Rei - Departamento de Engenharia Elétrica – DEPEL

PPGEL – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - São João del Rei/MG, Brasil

juanochaaviles@gmail.com, renatovale.bhz@hotmail.com, moura@ufsj.edu.br, schroeder@ufsj.edu.br, nepomuceno@ufsj.edu.br

Resumo – Este artigo ilustra os resultados relativos à implementação de um algoritmo genético capaz de otimizar a obtenção dos parâmetros elétricos (resistividade e coeficiente de reflexão) e geométricos (profundidade da primeira camada) de um determinado tipo de solo. Especificamente, são aplicadas técnicas de otimização do tipo Algoritmo Genético aperfeiçoado por um Algoritmo Elipsoidal, sendo esta técnica utilizada para refinar os resultados obtidos dos referidos parâmetros em solos estratificados em duas camadas. Para a obtenção dos resultados são utilizados valores medidos *in loco* pelo método de Frank Wenner, em diferentes períodos, em um intervalo de dois anos. Considera-se que os estudos apresentados têm importância prática no projeto de aterramentos elétricos para proteção de sistemas elétricos (e seres humanos) quando sujeitos a falhas (curtos-circuitos) envolvendo correntes de alta intensidade.

Palavras-Chave – *Algoritmo Elipsoidal, Algoritmo Genético, Aterramento elétrico, Estratificação do Solo, Otimização não linear, Resistividade do solo.*

I. INTRODUÇÃO

A interrupção do fornecimento de energia proveniente de eventos indesejados em sistemas elétricos, mas inerentes ao funcionamento do mesmo, gera, para as concessionárias de energia elétrica, prejuízos de ordem financeira e pagamento de multas. Em casos mais extremos podem ocorrer até mesmo perdas de vidas humanas. Assim, existe um esforço para garantir a continuidade de operação e a confiabilidade dos sistemas elétricos de potência.

Essas interrupções, que podem ocorrer na geração, transmissão e utilização da energia elétrica, são ocasionadas por falhas no sistema elétrico, como por exemplo, curtos-circuitos, cujas causas são de natureza bastante diversificada (operações incorretas de manobras/chaveamento, descargas atmosféricas, vandalismo, ventos, quedas de árvores etc.). Tais fenômenos apresentam como consequência a injeção de elevados níveis de correntes elétricas no sistema avariado.

Estas correntes podem provocar a interrupção do sistema e até mesmo a destruição de equipamentos a ele conectados. Porém, o mais agravante nestes casos é o risco que estas correntes de falta trazem à integridade física de seres vivos situados no sistema em questão (ou mesmo nas proximidades do mesmo). Um dos diversos mecanismos capazes de diminuir tais prejuízos e danos corresponde ao aterramento elétrico do sistema sob estudo.

De um modo geral, compreende-se como aterramento elétrico uma ligação elétrica proposital de um sistema físico (elétrico, eletrônico ou corpos metálicos) ao solo [1]. As aplicações típicas dos aterramentos elétricos são correlacionadas a dois fatores fundamentais: desempenho do sistema ao qual o aterramento está conectado, e garantia de segurança (de seres vivos) e proteção (de equipamentos).

Conforme [2] os principais quesitos de um aterramento elétrico são: obter resistência de aterramento mais baixa possível para as correntes de falta à terra; manter os potenciais produzidos por estas correntes de falta dentro de limites aceitáveis de segurança; fazer com que os equipamentos de proteção sejam sensibilizados e isolem rapidamente as falhas à terra; proporcionar um caminho seguro de escoamento de descargas atmosféricas; usar a terra como retorno de corrente do sistema (malha de terra) e escoar cargas eletrostáticas geradas nas carcaças dos equipamentos.

Ademais, é sabido que o aterramento elétrico é influenciado pela geometria do mesmo e pela resistividade do solo circunvizinho a ele [3]. As ondas eletromagnéticas que percorrem esses aterramentos usualmente são divididas em duas naturezas: i) fenômenos rápidos, onde o espectro de frequência dominante é o superior (descargas atmosféricas) e ii) fenômeno lento, onde o espectro de frequência dominante é o inferior (operações de manobra). Em especial no segundo caso, as ondas eletromagnéticas são capazes de penetrar profundamente no solo podendo encontrar regiões com características elétricas diferentes em seu percurso.

Em função do exposto, percebe-se que para o adequado projeto do aterramento é de fundamental importância uma modelagem confiável do solo onde o mesmo é imerso. Em ocorrências de baixas frequências (típicas dos eventos citados), os solos são normalmente estratificados em 2 (duas) camadas. Tais camadas são representadas por 3 (três) parâmetros, a saber: resistividades da primeira e segunda camadas e profundidade da primeira camada. Tal modelagem corresponde à forma encontrada pelos engenheiros e pesquisadores para traduzir as características heterogêneas dos solos mais comuns, naturais dos processos de formação geológica dos mesmos.

Diversos estudos são apresentados na literatura que ilustram a importância prática da estratificação do solo em camadas. A título de ilustração, citam-se as referências [4]-[5] que tratam, respectivamente, da aplicação em aterramentos elétricos e em linhas de transmissão. Concomitantemente, verifica-se a necessidade de medições de características do solo que permitam estabelecer a estratificação em causa, juntamente com técnicas matemáticas para tratamento das grandezas medidas.

Dada a relevância da temática em causa os autores estão envolvidos em uma pesquisa que objetiva realizar medições de resistividade do solo, com posterior estratificação em 2 (duas) camadas, ao longo das estações do ano. Os primeiros resultados da referida pesquisa foram publicados em [6]. Neste trabalho, foi apresentada uma avaliação experimental da variação sazonal da resistividade do solo. No atual trabalho, utiliza-se o Algoritmo Genético SSGA “*Steady State Genetic Algorithm*”, ao qual atua em problemas multivariados não lineares, com o objetivo de otimizar a estratificação do solo. Conforme [7], o algoritmo genético é caracterizado pela “evolução” de um conjunto de soluções-tentativas, segundo regras estocásticas de busca e combinação que resultam numa sequência de gerações. De acordo com [8], o SSGA codifica as variáveis de otimização diretamente como números reais, com população de tamanho fixo, sempre preservando os melhores indivíduos de uma geração para a outra. Sabendo que o algoritmo genético é lento para os estágios finais de convergência, utilizou-se para o refinamento do resultado, o Algoritmo Elipsoidal, que tem o papel de criar elipses que delimitam áreas a serem avaliadas pelo algoritmo, excluindo-se regiões que não contém o ótimo local, até se obter o resultado otimizado.

II. DESENVOLVIMENTO

O processo de otimização trabalha com a solução de expressões implementadas no mesmo. Com intuito de apresentar essas equações existe a necessidade de uma explanação sobre o tema e métodos de medição de resistência de aterramento e de resistividade do solo.

A resistência de aterramento conforme [1] é a designação da resistência oferecida pela passagem de corrente elétrica em um caminho previamente determinado pelo aterramento elétrico. A resistência de aterramento, portanto, é a relação entre o valor de elevação de potencial resultante no eletrodo (em relação ao infinito – terra remoto) e o valor da corrente injetada no solo, seguindo a Lei de Ohm, em (1).

$$R_t = \frac{V_t}{I} \quad [\Omega]. \quad (1),$$

onde:

$R_t \rightarrow$ Resistência de aterramento;

$V_t \rightarrow$ Tensão resultante no eletrodo;

$I \rightarrow$ Corrente injetada no solo.

Para obtenção dos parâmetros estudados é necessário que haja uma injeção externa de corrente no solo. Desta forma, esta corrente se dispersa em todas as direções, determinadas pelas características do meio. Utiliza-se para isto, eletrodos que fecham um circuito elétrico pelo solo, e a partir disto, podem-se determinar as distribuições de potenciais no mesmo, conforme apresentado de forma esquemática na Fig. 1.

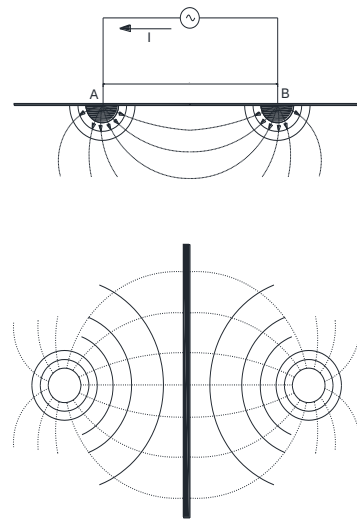


Figura 1. Linhas de corrente e equipotenciais distribuídas no solo. Adaptado de [1].

Como o interesse imediato neste trabalho corresponde à obtenção da resistividade do solo, entre diversas técnicas, é adotado o Método de Frank Wenner para medições desta grandeza, ao qual utiliza hastes em quatro pontos alinhados, igualmente espaçados, e fixados à mesma profundidade, de forma a se ter a configuração exposta na Fig. 2.

Pelos terminais externos 1 e 4 (denominados eletrodos de corrente), é injetada uma corrente no solo. Com isso, causa-se uma queda de tensão entre os terminais centrais 2 e 3 (denominados eletrodos de potencial). Com a relação entre a tensão e a corrente injetada, obtém-se o valor de R .

Este valor é utilizado em uma equação, como demonstrado em [1]-[2], onde se afirma que há uma relação entre o valor de resistividade do solo (ρ) e a resistência medida (R) pelo equipamento que registra este último. Tal equipamento é denominado terrômetro. Equação (2) estabelece a relação entre tais grandezas.

$$\rho = KR \quad [\Omega m]. \quad (2),$$

onde:

$K \rightarrow$ coeficiente de reflexão.

Utilizando o Método das Imagens, tem-se que a equação do coeficiente K é aquela representada em (3), [1]-[2].

$$K = \frac{4\pi a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} \quad (3),$$

onde (conforme Fig. 2):

$a \rightarrow$ espaçamento entre as hastes;

$b \rightarrow$ profundidade à qual as hastes são cravadas.

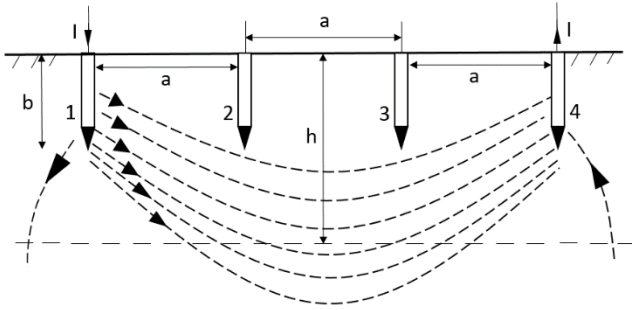


Figura 2. Configuração do Método de Frank Wenner e o deslocamento das correntes no solo. Adaptado de [1]-[2].

Porém, é necessário que a modelagem matemática seja para duas camadas, e assim, o método de Frank Wenner para solos homogêneos, colabora para se obter os parâmetros em solos de duas camadas, aplicadas com a devida teoria eletromagnética. Neste caso, considera-se a segunda camada com profundidade infinita.

Os potenciais gerados na primeira camada do solo devem satisfazer a Equação de Laplace, conforme (4).

$$\nabla^2 V = 0. \quad (4),$$

onde:

$V \rightarrow$ potencial na primeira camada.

Com o desenvolvimento de (4) em qualquer ponto r distante da fonte de corrente, tem-se (5), [1]-[2].

$$V_p = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right] \quad (5),$$

onde:

$V_p \rightarrow$ Potencial de um ponto qualquer (p) da primeira camada em relação ao infinito;

$\rho_1 \rightarrow$ Resistividade da primeira camada;

$h \rightarrow$ Profundidade da primeira camada;

$r \rightarrow$ Distância do ponto p à fonte de corrente;

$K \rightarrow$ Coeficiente de reflexão;

$n \rightarrow$ Número de medições para cada espaçamento “a”.

Para se encontrar o valor da resistividade da segunda camada utiliza-se (6).

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (6),$$

onde:

$\rho_2 \rightarrow$ Resistividade da segunda camada.

Verifica-se, portanto, a variação de K em (7) (uma inequação).

$$-1 < K < 1. \quad (7)$$

Após algumas manipulações matemáticas, mostradas em [4], obtêm-se (8).

$$\rho(a) = K \frac{\rho_1}{2\pi a} \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} \right] \right\} \quad (8).$$

III. METODOLOGIA

A partir de (8), utiliza-se o método de duas camadas usando técnicas de otimização para obter os valores de ρ_1, ρ_2, K e h , tal que (8) seja ajustada às séries de valores medidos em campo. Ademais, minimizam-se os desvios entre os valores medidos e os calculados pelo Método dos Mínimos Quadrados.

Considerando [2] o termo do lado direito de (8), nomeando-o como $h(x)$, tem-se (9).

$$\text{minimizar} \sum_{i=1}^q \{\rho(a_i)_{\text{medido}} - h(x)\}^2 \quad (9),$$

onde:

$i, q \rightarrow$ Número de medições realizadas para cada espaçamento “a”;

$\rho(a_i)_{\text{medido}} \rightarrow$ Média das resistividades encontradas em cada espaçamento.

Tem-se, assim, um problema de otimização restrita, e isto é considerado no processo, conforme (10).

$$x^* = \arg \min_x f(x) \quad (10),$$

sujeito a:

$$g_i(x) < 0 \quad \forall i = 1, 2, 3, 4. \quad (11),$$

sendo $x \in \mathbb{R}^n, f(\cdot): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ e $g(\cdot): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p$, onde $f(x)$ é a função a ser minimizada.

Transformando as funções restritivas em formato padrão, têm-se (12) a (14).

$$\rho_1 > 0 \rightarrow -\rho_1 < 0. \quad (12)$$

$$-1 < K < 1 \rightarrow -K - 1 < 0 \text{ e } K < 1 \quad (13)$$

$$h > 0 \rightarrow -h < 0. \quad (14)$$

Portanto, como visto, têm-se quatro restrições para o problema, aumentando a complexidade dos estudos.

Nas medições foram utilizados oito espaçamentos ($i=1,2,\dots,8$) e três medições ($n=1,2,3$) para cada um destes. Adicionalmente, foram realizadas 21 medições em dias distintos, em um intervalo de aproximadamente dois anos, para que, assim, várias características de tempo e umidade estivessem presentes nas medições. As medições foram realizadas por alunos de mestrado do PPGEL/UFSJ-CEFET-MG, entre o período de 26 de Junho de 2012 e 26 de Abril de 2014.

A partir da função de otimização expressa em (9), e com o auxílio do MATLAB®, foi testada sua convergência respeitando as restrições pelo SSGA, além do refinamento pelo Método de Exclusão de Regiões do Algoritmo Elipsoidal, ao qual utiliza da aplicação de subgradientes procurando novas estimativas de ponto mínimo dentro de regiões particionadas. Ao final de todo o processo encontram-se os valores ótimos do problema não linear.

IV. RESULTADOS

Todas as medições foram incluídas no algoritmo genético, e ao final deste processo tomaram-se seus resultados como o novo ponto de partida, e inicializou-se o algoritmo elipsoidal para possível melhoria dos resultados. Com isto, obteve-se a Tabela I, que ilustra a resistividade e profundidade da primeira camada e coeficiente de reflexão. É importante ressaltar que todos os dados presentes nas colunas nomeadas por “Elipsoidal” da Tabela I foram obtidos com a aplicação anterior do Algoritmo Genético, uma vez que o primeiro refina os dados do segundo.

Com intuito de comparar os resultados encontrados no desenvolvimento desse trabalho com o que são apresentados na literatura, os resultados são comparados com o método indicado por [10] conhecido como Método das Duas Camadas Usando Curvas¹ [2]. Os resultados são também apresentados na Tabela I.

Como pode ser observado na Tabela I, os valores de resistividade e profundidade alteraram-se entre as medições. Esse fato é proveniente de que as medições foram realizadas durante condições climáticas diferentes (estação do ano, tempo seco, entre outras). Naturalmente, tal comportamento é esperado, pois, como amplamente conhecido na literatura técnica, as características do solo alteram com a umidade e temperatura (dentre outros) influenciando diretamente nos parâmetros do solo [9]. Ademais, observam-se, em algumas

ocasiões, diferenças significativas entre os valores calculados pela metodologia de otimização adotada neste trabalho e aqueles oriundos da aplicação do método das curvas.

Foram calculados, ainda, os níveis da função objetivo para todos os valores encontrados, com o intuito de verificar a ocorrência de uma melhoria dos resultados obtidos pelo refinamento do método elipsoidal para a convergência ao mínimo global. A Tabela II representa os mínimos da função objetivo e o método que obteve melhor resultado de cada medição. Por “melhor resultado” entende-se o mínimo valor obtido para a função objetivo expressa em (9), da comparação entre os resultados dos algoritmos genético e elipsoidal. Verificou-se que o melhor desempenho foi obtido pelo algoritmo elipsoidal, com exceção da medição 18 representado pelo algoritmo genético.

Com todos os dados levantados nas Tabelas I e II, foi possível calcular o valor da resistividade da segunda camada do solo estratificado, conforme Tabela III, considerando-o com profundidade infinita.

Outra importante verificação, merecedora de destaque, se deve ao fato do algoritmo respeitar todas as restrições que lhe foram impostas.

V. CONCLUSÃO

Os valores de ρ_1, ρ_2, K e h encontrados por meio das técnicas de otimização apresentaram diferenças percentuais consideráveis em relação ao método proposto pelo IEEE [10]; por exemplo, em determinadas medições foram verificadas diferenças percentuais máximas e médias, respectivamente, em torno de 200% (vide tabela I – medição 5) e 17% da profundidade do solo, 127% (vide tabela I – medição 5) e 30% do coeficiente de reflexão, 60% (vide tabela I – medição 6) e 27% da resistividade da primeira camada e 48% (vide tabela III – medição 5) e 9% da resistividade da segunda camada.

É esperado que, devido às imprecisões intrínsecas do método das curvas, a aplicação das técnicas de otimização supracitadas apresente valores mais realísticos em relação à modelagem do solo em duas camadas. Sendo assim, o método com algoritmo de otimização fornece uma confiabilidade relevante visto que apresenta somente erros de cálculos computacionais, como por exemplo, truncamento e arredondamento.

Ainda é possível constatar que os valores das resistividades da camada mais superficial do solo apresenta influência sensível em função da estação do ano. Isso é natural devido ao nível de umidade encontrada no solo estudado. Para cada estação foi encontrado um valor médio de resistividade de: 72 $\Omega.m$ no verão, 78 $\Omega.m$ na primavera, 92 $\Omega.m$ no outono e 105 $\Omega.m$ no inverno, somando um valor médio de 84 $\Omega.m$ em todas as medições.

Além disso, os resultados obtidos com o algoritmo genético e elipsoidal foram comparados e obtiveram-se resultados

¹ Neste trabalho o termo “Método das Duas Camadas Usando Curvas” é substituído por simplesmente “Método das Curvas”.

muito próximos entre si. Verificou-se também que, todos os limites físicos impostos pelas equações de restrição foram respeitados, confirmando assim o uso correto das ferramentas computacionais. Com relação à otimização da complexa função-objetivo, foi de grande valia a utilização do SSGA para otimização.

Além deste, e com o intuito de melhorar e refinar os resultados otimizados foi utilizado o Algoritmo Elipsoidal. Com este último, verificou-se uma minimização melhor do que aquela apresentada apenas pelo Algoritmo Genético.

TABELA I. RESULTADOS OBTIDOS PARA OS PARÂMETROS DO SOLO: RESISTIVIDADE E PROFUNDIDADE DA PRIMEIRA CAMADA E COEFICIENTE DE REFLEXÃO.

Resultados			Parâmetros do Solo								
			Resistividade da 1ª camada ρ_1 ($\Omega.m$)			K			Profundidade da 1ª camada h (m)		
Medição	Data	Estação do Ano	Genético	Elipsoidal	Método das Curvas	Genético	Elipsoidal	Método das Curvas	Genético	Elipsoidal	Método das Curvas
1	26/06/12	Inverno	86,600	86,320	104,025	0,551	0,553	0,422	0,951	0,950	0,857
2	22/11/12	Primavera	102,860	102,309	129,207	0,488	0,490	0,306	1,178	1,172	1,302
3	30/11/12	Primavera	78,143	78,276	98,809	0,527	0,525	0,383	0,680	0,681	0,689
4	01/02/13	Verão	64,850	64,617	77,387	0,537	0,538	0,426	0,671	0,664	0,647
5	11/02/13	Verão	74,727	74,036	111,880	0,410	0,415	0,934	0,566	0,569	1,827
6	11/03/13	Verão	45,881	45,164	73,481	0,657	0,666	0,445	0,370	0,366	0,532
7	21/03/13	Outono	81,569	80,385	110,590	0,413	0,418	0,256	0,673	0,650	1,032
8	19/04/13	Outono	99,327	99,113	78,388	0,289	0,289	0,381	0,988	0,988	0,524
9	26/04/13	Outono	88,106	88,366	127,330	0,390	0,386	0,202	0,677	0,676	0,563
10	05/07/13	Inverno	110,859	110,781	139,644	0,369	0,371	0,216	0,812	0,826	0,558
11	08/08/13	Inverno	113,756	112,659	148,150	0,400	0,404	0,268	0,712	0,695	0,836
12	22/08/13	Inverno	116,045	115,838	148,555	0,420	0,420	0,295	0,789	0,789	0,913
13	09/09/13	Inverno	98,051	98,269	131,558	0,498	0,498	0,344	0,720	0,720	0,818
14	18/10/12	Primavera	79,263	79,128	99,994	0,538	0,539	0,399	0,641	0,643	0,639
15	31/10/13	Primavera	109,006	109,590	136,851	0,398	0,397	0,257	0,712	0,723	0,911
16	11/11/13	Primavera	59,574	59,950	83,825	0,526	0,523	0,381	0,404	0,407	0,363
17	28/11/13	Primavera	69,635	68,422	92,111	0,452	0,459	0,373	0,486	0,475	0,402
18	05/12/13	Primavera	76,396	83,675	101,149	0,513	0,428	0,421	0,747	0,498	0,462
19	22/01/14	Verão	99,236	91,251	97,309	0,400	0,417	0,421	0,917	0,795	1,225
20	05/02/14	Verão	76,836	76,868	119,255	0,509	0,508	0,360	0,751	0,747	0,851
21	23/04/14	Outono	99,300	99,363	123,404	0,398	0,397	0,291	0,920	0,910	1,204

TABELA II. DESEMPENHO DOS ALGORITMOS.

Resultados	Desempenho dos Algoritmos		
	Algoritmo Genético	Algoritmo Elipsoidal	Melhor Desempenho
1	318,989	317,531	Elipsoidal
2	590,888	590,492	Elipsoidal
3	195,107	195,026	Elipsoidal
4	223,437	219,566	Elipsoidal
5	142,830	141,857	Elipsoidal
6	1669,328	1659,841	Elipsoidal
7	394,832	394,517	Elipsoidal
8	198,355	197,278	Elipsoidal
9	92,723	91,433	Elipsoidal
10	922,634	921,604	Elipsoidal
11	536,632	535,695	Elipsoidal
12	645,669	642,570	Elipsoidal
13	288,952	287,591	Elipsoidal
14	280,277	279,036	Elipsoidal
15	622,701	621,456	Elipsoidal
16	216,526	214,569	Elipsoidal
17	173,947	173,541	Elipsoidal
18	325,496	2365,280	Genético
19	361,972	209,863	Elipsoidal
20	322,222	321,936	Elipsoidal
21	361,460	361,059	Elipsoidal

TABELA III. RESISTIVIDADE DA 2ª CAMADA

Resistividade da 2ª camada		
	Algoritmo Ótimo	Método das Curvas
Medição	ρ_2 ($\Omega.m$)	ρ_2 ($\Omega.m$)
1	300,310	256,250
2	298,931	243,289
3	251,323	221,513
4	215,411	192,273
5	179,376	348,805
6	225,791	191,562
7	196,022	186,699
8	179,727	175,021
9	199,769	192,037
10	242,009	216,694
11	265,466	256,523
12	283,797	272,994
13	293,739	269,865
14	264,416	232,912
15	254,093	231,446
16	191,519	187,179
17	184,561	202,070
18	237,459	245,966
19	221,879	238,853
20	236,061	253,524
21	230,524	224,794

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e à UFSJ pelo auxílio financeiro concedido na forma de bolsas de mestrado ao PPGEI.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Visacro Filho, "Aterramentos Elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento," Ed. São Paulo: Artliber, 2002.
- [2] G. Kindermann e J. M. Campagnolo, "Aterramento Elétrico," 3ª ed, Ed. Porto Alegre: Sagra-DC Luzzatto, 1995, pp. 13-60.
- [3] R. Alípio, "Modelagem Eletromagnética de Aterramentos elétricos nos domínios do tempo e da frequência," Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional – CEFET-MG, 2008.
- [4] M. L. Pereira, "Aplicação do Método de Imagens Complexas ao Cálculo de Malhas de Aterramento em solo com Estratificação Horizontal," Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Escola Politécnica da USP, 1999.
- [5] T. A. Papadopoulos, G.s K. Papagiannis and D. A. Labridis, "Wave Propagation Characteristics of Overhead Conductors Above Imperfect Stratified Earth for a Wide Frequency Range," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 3, pp. 1064-1067, March 2009.
- [6] B. P. Jacome, L.S.C. Batista, M.A.O. Schroeder, L.M.R. Baccarini e G.F.V. Amaral, "Avaliação Experimental da Variação Sazonal da Resistividade do Solo," Seminário Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2014.
- [7] R. Linden, "Algoritmos Genéticos: uma importante ferramenta da inteligência computacional," 2ª ed, Ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2008.
- [8] M. Mitchell, "An Introduction to Genetic Algorithms," 1st ed, Ed. London: A Bradford Book, 1998.
- [9] H. S. Scott, R. D. Carroll and D. R. Cunningham, "Dielectric Constant and Electrical Conductivity Measurements of Moist Rocks: A New Laboratory Method," J. Geophysical Research Atmospheres, vol. 20, no. 1, pp. 5101-5115, 1967.
- [10] *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, IEEE Std. 80-2000, Jan. 2000.