



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

1

FI/GSE/26
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTO DE ALTA TENSÃO - GSE

FERRAMENTA BASEADA EM ALGORITMO GENÉTICO PARA ESTRATIFICAÇÃO OTIMIZADA DO SOLO

Amauri G. Martins Jr. (*)
Universidade de Brasília

Antonio José Martins Soares
Universidade de Brasília

RESUMO

Neste trabalho, é descrita uma metodologia para a determinação otimizada dos parâmetros elétricos do solo, que é modelado como uma estrutura estratificada em camadas horizontais. Por meio de uma ferramenta computacional, que recebe como entrada os valores das medições de resistividade elétrica aparente, são obtidos o número de camadas, a resistividade elétrica e a espessura de cada camada. O método proposto é formulado em termos de um problema de mínimos quadrados aplicado à solução analítica direta do algoritmo de Sunde. Estudo de casos extraídos da norma ABNT NBR 7117 comprovam a elevada correlação entre os resultados obtidos pela metodologia proposta com os valores de resistividade aparente medidos. A ferramenta se mostra eficaz para obtenção de parâmetros otimizados do solo, resultando em modelos de elevada precisão, e apresenta tempos computacionais relativamente baixos.

PALAVRAS-CHAVE

Resistividade aparente, Estratificação do solo, Algoritmos genéticos

1.0 - INTRODUÇÃO

O solo é uma estrutura complexa, composta por elementos sólidos, líquidos e gasosos. É considerado um eletrólito polivalente no qual ocorrem, simultaneamente, condução metálica, semicondução eletrônica e condução eletrolítica. A resistividade elétrica do solo é fortemente dependente da presença de água, porosidade das partículas, tipo de eletrólito e temperatura. Em situações práticas, apresenta propriedade anisotrópica, isto é, os parâmetros variam com a direção (camadas verticais) e com a profundidade (camadas horizontais) [1].

Dentre as técnicas disponíveis para medição da resistividade elétrica do solo, destacam-se os métodos de Wenner e Schlumberger [2]. Ambos consistem na tomada de sucessivas leituras, a partir da superfície do solo, de um valor de resistividade elétrica dita aparente, em localidades distintas e para diversas profundidades. Ao processo de modelagem matemática do solo em camadas finitas e resistividades reais, a partir dos valores de resistividade aparente, é dado o nome de estratificação do solo.

A estratificação do solo em duas camadas horizontais é um processo amplamente conhecido e documentado na norma IEEE Std. 80 [3] e na ABNT NBR-7117 [4], embora represente fidedignamente poucos casos reais [5]. Para os casos de solos com múltiplas camadas, parcela predominante das aplicações práticas, estão disponíveis métodos gráficos e computacionais de estratificação, baseados em curvas e tabelas padrão. A estratificação do solo em N camadas horizontais é um problema de otimização numérica com $(2N - 1)$ variáveis, em que os algoritmos comumente adotados introduzem erros aleatórios nos resultados, inerentes ao uso de extrapolações matemáticas e à forte dependência de estimativas de valores iniciais [6].

(*) Endereço: SIA Trecho 03, n.º. 990 – sala 111 – Setor de Indústria e Abastecimento – CEP 71.200-030 – Brasília / DF – Brasil – Telefone: (+55 61) 3046-6700 – Email: amauri@engecorr.com.br

Em projetos de aterramento elétrico, a depender da criticidade do sistema ou instalação, esses erros podem ultrapassar os limites toleráveis, conduzindo a uma das seguintes situações extremas: ou o projeto é subdimensionado, deixando de prever riscos reais e resultando em uma instalação insegura, ou é demasiadamente conservador, acarretando gastos excessivos com materiais e dispositivos de mitigação. Uma metodologia para determinação precisa e realista dos parâmetros do solo é, portanto, uma necessidade real da indústria.

Para abordar essa dificuldade, é proposta uma ferramenta computacional baseada na solução das equações fundamentais que determinam o potencial escalar em um solo com múltiplas camadas, e na aplicação de um algoritmo genético (AG) para solução de um problema de ajuste de mínimos quadrados entre os valores de resistividade aparente medidos e calculados. A escolha do AG como mecanismo de otimização se justifica em razão de sua natureza probabilística, que impõe poucas restrições sobre o espaço de soluções, independe de estimativas iniciais, não requer o cálculo de gradientes e sempre converge para uma solução ótima.

Algoritmos genéticos já vêm sendo utilizados com êxito na solução do problema da resistividade do solo [7][8][9]. A abordagem descrita neste trabalho se distingue pela introdução de uma etapa de pré-processamento dos dados de resistividade aparente usando o método de estratificação de Pirson, para determinação do número provável de camadas e delimitação do espaço de busca de soluções. Com isso, o esforço computacional é reduzido, o que viabiliza a formulação analítica exata das funções potencial elétrico, sem simplificações ou aproximações polinomiais.

Para validação da ferramenta, são apresentados três estudos de caso, correspondentes aos dados contidos nos anexos B.1, B.2 e B.3 da norma ABNT NBR-7117. São comparados os parâmetros do solo e erro quadrático absoluto para os resultados obtidos pelo AG, pelo método de estratificação gráfico descrito na norma e pelo aplicativo comercial baseado em gradientes RESAP, desenvolvido pela empresa canadense SES – *Safe Engineering Services*, reconhecido pela comunidade científica mundial como experimentalmente válido.

2.0 - MODELAGEM MATEMÁTICA

2.1 Função potencial elétrico em um solo estratificado em N camadas horizontais

A Figura 1 ilustra um meio heterogêneo estratificado em N camadas horizontais. A camada superficial possui resistividade ρ_1 e espessura h_1 . A camada mais profunda possui resistividade ρ_N e espessura infinita.

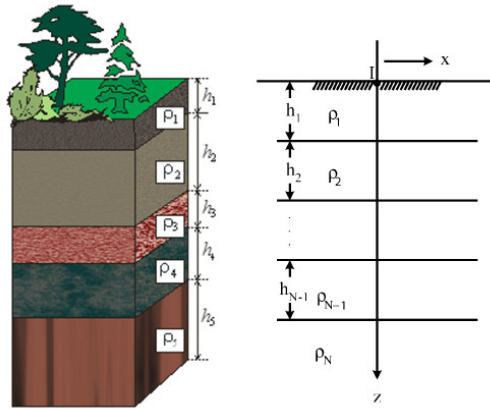


Figura 1 - Modelo de solo estratificado em camadas horizontais

Demonstra-se que o potencial elétrico em qualquer ponto x na superfície do solo, produzido por uma corrente I entrando na terra através de um eletrodo puntiforme, é descrito por [10].

$$V_N(x) = \frac{\rho_1 I}{2\pi x} [1 + F_N(x)] \quad (1)$$

em que:

$$F_N(x) = 2x \int_0^{\infty} \frac{K_{N1} e^{-2\lambda h_1}}{1 - K_{N1} e^{-2\lambda h_1}} J_0(\lambda x) d\lambda \quad (2)$$

Na expressão (2), J_0 é a função de Bessel de primeira espécie e ordem zero, λ é a variável auxiliar de integração e K_{N1} é dado por:

$$K_{NS} = \frac{k_S + K_{NS+1}e^{-2\lambda h_{S+1}}}{1 + k_S K_{NS+1}e^{-2\lambda h_{S+1}}} \quad (3)$$

$$K_{NN-1} = k_{N-1} \quad (4)$$

Para $1 < i < N - 1$, o coeficiente de reflexão k_i entre duas camadas de solo adjacentes é dado pela fórmula:

$$k_i = \frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{\rho_{i+1} + \rho_i} \quad (5)$$

2.2 Resistividade elétrica aparente

A Figura 2 ilustra o método de Wenner para medição em campo da resistividade aparente do solo estratificado em N camadas. São utilizados 4 eletrodos, distanciados de a entre si. É imposta uma corrente conhecida de magnitude I entre os eletrodos c_1 e c_2 , resultando em um valor de tensão V entre os eletrodos p_1 e p_2 e, consequentemente, uma resistência aparente R equivalente ao caminho elétrico percorrido pela corrente na profundidade equivalente ao espaçamento a .

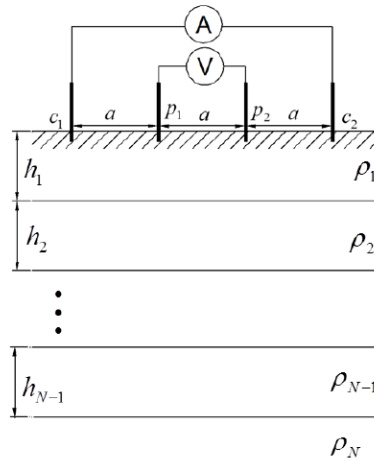


Figura 2 - Arranjo típico de Wenner para medição da resistividade aparente do solo

Assumindo que os eletrodos são enterrados a uma profundidade P , pode-se escrever a seguinte expressão para resistividade aparente do solo, conhecida como Fórmula de Palmer:

$$\rho_{a,M} = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2P)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2P)^2}}} \quad (6)$$

Aplicando a equação (1) aos pontos onde estão localizados os eletrodos, após algumas manipulações algébricas, obtém-se a seguinte equação para a resistividade aparente teórica:

$$\rho_{a,T} = \rho_1 [1 + 2F_N(a) - F_N(2a)] \quad (7)$$

O algoritmo de Sunde consiste na determinação recursiva do perfil teórico de resistividade aparente visto a partir da superfície do solo, com base nas resistividades e espessuras das camadas horizontais. Portanto, se os parâmetros do solo $[\rho_1 \rho_2 \dots \rho_N]$ e $[h_1 h_2 \dots h_{N-1}]$ são conhecidos, é possível determinar a resistividade aparente teórica em qualquer ponto do espaço. Reciprocamente, pode-se estimar os valores dos parâmetros do solo a partir das medições de resistividade aparente. Nesse caso, define-se uma função erro como:

$$\psi(x) = \sum \left[\frac{\rho_{a,M}(x) - \rho_{a,T}(x)}{\rho_{a,T}(x)} \right]^2 \quad (8)$$

Estratificar o solo é o mesmo que obter o conjunto de valores $[\rho_1 \rho_2 \dots \rho_N]$ e $[h_1 h_2 \dots h_{N-1}]$ que minimizam a função erro exposta em (8).

2.3 Aplicação do Algoritmo Genético

A otimização ou operação-pesquisa é o processo complexo de análise e busca por condições que forneçam os valores máximos ou mínimos de uma função. É fundamental para qualquer processo de otimização especificar os critérios restritivos e decidir qual deverá ser a função objetivo, isto é, a função a ser otimizada. Para a simulação de um sistema, pode ser necessário avaliar seu desempenho com inúmeras condições operacionais, o que se caracteriza como uma etapa preliminar para um estudo completo de otimização, que envolve a concepção de todas as alternativas razoáveis, a otimização do projeto de cada alternativa e, então, a escolha dos melhores projetos otimizados.

A equação (8) descreve um problema de otimização multi-objetivo tendo como incógnitas o número de camadas N , os valores de resistividade $[\rho_1 \rho_2 \dots \rho_N]$ e as espessuras das camadas $[h_1 h_2 \dots h_{N-1}]$. A abordagem usual para problemas desse tipo envolve o cálculo de vetores gradiente e estimativas dos valores iniciais, o que pode ser demasiadamente complexo e custoso computacionalmente, a depender da quantidade de camadas presentes no solo (o que se desconhece, a priori). Além disso, a qualidade das estimativas iniciais, sobretudo para os valores da primeira camada determina, diretamente, a convergência do método de otimização e a precisão do resultado final.

Algoritmos genéticos são uma categoria particular de métodos de otimização estocásticos, inspirados pelos conceitos de evolução e genética natural, que se notabilizam por requererem somente as informações explícitas na função objetivo, dispensando dados sobre diferenciabilidade e continuidade. Algoritmos genéticos emulam o processo biológico de evolução por seleção natural, representando as possíveis soluções de um dado problema de otimização por meio de um “código genético”, quantificando o quão “mais apto” uma resposta é em relação à outra e fazendo-as “evoluir” quando em interação entre si e com um “meio”.

O processamento de um algoritmo genético simples ocorre através das etapas de codificação, inicialização e evolução, e tem como resultado um conjunto de indivíduos que consistem em soluções ótimas para as funções que se deseja maximizar ou minimizar. O ciclo de execução típico de um algoritmo genético é mostrado na Figura 3.

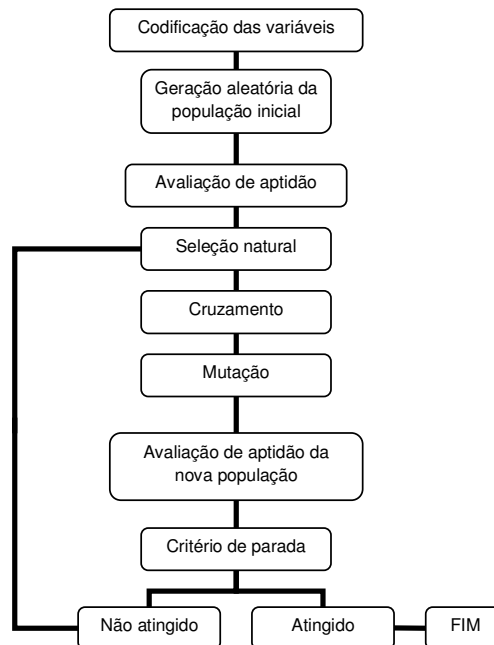


Figura 3 - Fluxograma de um AG simples

O operador seleção natural atribui oportunidades reprodutivas aos indivíduos mais aptos, o que faz com que prevaleçam e se disseminem. Os indivíduos mais fracos ou menos adaptados ao meio não gerarão descendentes e serão eliminados. O conceito de elitismo preserva os melhores resultados de uma geração para outra, promovendo o refinamento dos resultados à medida que o algoritmo progride. O cruzamento é o processo que possibilita o

surgimento de uma nova população, por meio da mistura de material genético entre indivíduos previamente selecionados e agrupados em pares. Este operador ressalta a competição entre os espécimes para se reproduzirem e, logo, os indivíduos mais bem adaptados ao meio prevalecem e propagam suas características para seus descendentes. O operador mutação administra uma modificação aleatória nos cromossomos de indivíduos resultantes do processo de cruzamento por meio de flutuações em um ou mais genes, o que possibilita a introdução de novas características ou restauração de características perdidas. Este operador exerce papel fundamental na introdução e na manutenção da variabilidade genética da população, desta forma evitando a homogeneização prematura de soluções.

O algoritmo genético proposto foi implementado em ambiente Matlab, utilizando codificação binária e os operadores evolutivos descritos. Previamente à inicialização do vetor de soluções (população inicial), os dados de entrada são processados utilizando o método de estratificação de Pirson, para determinação do número provável de camadas e delimitação do espaço de busca de soluções. O método de Pirson consiste esboçar a curva de resistividade aparente de Wenner em função do espaçamento a e a subdividir em porções descendentes e ascendentes, por meio da determinação dos seus pontos de inflexão e mudança de concavidade. A quantidade de pontos de inflexão oferece uma estimativa inicial razoável para o número de camadas presentes no solo, permitindo a construção dos vetores $[\rho_1 \rho_2 \dots \rho_N]$ e $[h_1 h_2 \dots h_{N-1}]$ a serem otimizados.

O critério de parada adotado é o primeiro dos seguintes eventos: erro quadrático absoluto inferior a 0,1% ou 200 iterações.

3.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estudo de caso 01 – Anexo B.1 – NBR-7117

As medições de resistividade aparente em função do espaçamento estão contidas na Tabela 1. Os resultados da estratificação do solo são apresentados na Tabela 2 e Figura 4. A norma utiliza, neste caso, uma formulação simplificada para estratificação em duas camadas, o que resulta em um elevado valor de erro quadrático absoluto. O software comercial RESAP, que utiliza um método de otimização baseado em derivadas direcionais, também resulta em um modelo estratificado de duas camadas. A resposta otimizada pelo AG, contudo, é um modelo de solo estratificado em três camadas, com erro inferior a 1% e incremento considerável do valor de resistividade na camada mais profunda, informação de grande relevância em projetos de sistemas de aterramento, pois tende a agravar os resultados de elevação de potencial do solo.

Tabela 1 - Resistividade aparente conforme Anexo B.1 – NBR-7117

Espaçamento (m)	Resistividade aparente ($\Omega.m$)
2,0	3389,0
4,0	1900,0
8,0	585,0
16,0	568,0
32,0	823,0

Tabela 2 - Resultados da estratificação para os dados do Anexo B.1 – NBR-7117

Parâmetro	NBR-7117	RESAP	AG
$\rho(1)$	3350,0 $\Omega.m$	5061,81 $\Omega.m$	4371,42 $\Omega.m$
$\rho(2)$	630,0 $\Omega.m$	575,70 $\Omega.m$	314,61 $\Omega.m$
$\rho(3)$	-	-	1521,97 $\Omega.m$
$h(1)$	3,1 m	1,87 m	2,38 m
$h(2)$	-	-	9,06 m
Erro	158,15%	17,34%	0,39%

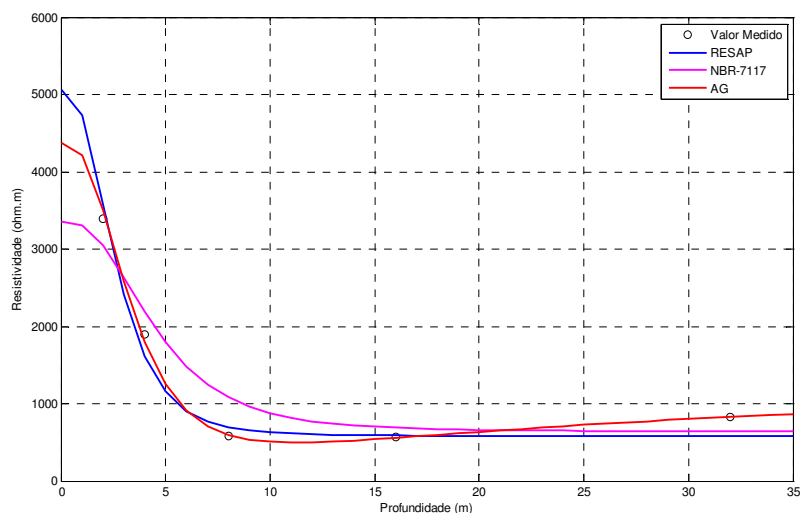


Figura 4 - Gráfico de resistividade aparente e estratificação do solo para os dados do Anexo B.1 – NBR-7117

3.2 Estudo de caso 02 – Anexo B.2 – NBR-7117

As medições de resistividade aparente em função do espaçamento estão contidas na Tabela 3. Os resultados da estratificação do solo são apresentados na Tabela 4 e Figura 5. Neste caso a norma obtém a estratificação do solo por meio de um método gráfico de curvas-padrão e auxiliar, resultando em um modelo de três camadas, o que concorda com a resposta do software RESAP e do AG. Embora o perfil de três camadas seja nítido nas três curvas de resistividade aparente, observa-se ainda redução expressiva do erro quadrático absoluto na resposta otimizada produzida pelo AG.

Tabela 3 - Resistividade aparente conforme Anexo B.2 – NBR-7117

Espaçamento (m)	Resistividade aparente ($\Omega.m$)
2,0	680,0
4,0	840,0
8,0	930,0
16,0	690,0
32,0	330,0

Tabela 4 - Resultados da estratificação para os dados do Anexo B.2 – NBR-7117

Parâmetro	NBR-7117	RESAP	AG
$\rho(1)$	340,0 $\Omega.m$	251,58 $\Omega.m$	611,59 $\Omega.m$
$\rho(2)$	1020,0 $\Omega.m$	1024,56 $\Omega.m$	1285,05 $\Omega.m$
$\rho(3)$	150,0 $\Omega.m$	162,11 $\Omega.m$	173,2 $\Omega.m$
$h(1)$	0,69 m	0,42 m	2,16 m
$h(2)$	14,31 m	12,10 m	8,4 m
Erro	38,79%	2,49%	0,10%

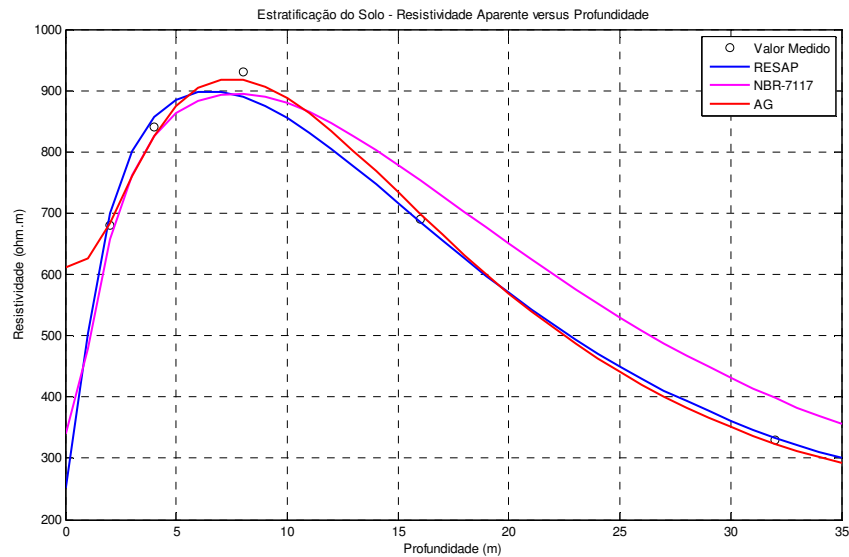


Figura 5 - Gráfico de resistividade aparente e estratificação do solo para os dados do Anexo B.2 – NBR-7117

3.2 Estudo de caso 03 – Anexo B.3 – NBR-7117

As medições de resistividade aparente em função do espaçamento estão contidas na Tabela 5. Os resultados da estratificação do solo são apresentados na Tabela 6 e Figura 6. O caso em questão é resolvido no âmbito da norma utilizando o método gráfico de Pirson, resultando em um modelo estratificado de 5 camadas e elevado valor de erro quadrático absoluto. O método de resolução baseado em derivadas implementado pelo RESAP, por sua vez, aparenta produzir uma demasiada simplificação do problema, resultando em uma estratificação em duas camadas, ainda que com erro substancialmente inferior ao apresentado na norma. O AG retorna um modelo de 4 camadas e, assim como nos estudos de caso anteriores, o menor valor de erro.

Tabela 5 - Resistividade aparente conforme Anexo B.3 – NBR-7117

Espaçamento (m)	Resistividade aparente (Ω.m)
2,0	680,0
4,0	840,0
8,0	930,0
16,0	690,0
32,0	330,0

Tabela 6 - Resultados da estratificação para para os dados do Anexo B.3 – NBR-7117

Parâmetro	NBR-7117	RESAP	AG
$\rho(1)$	8600,0 Ω.m	14558,86 Ω.m	8689,38 Ω.m
$\rho(2)$	21575,0 Ω.m	3302,48 Ω.m	25501,4 Ω.m
$\rho(3)$	19146,0 Ω.m	-	26011,5 Ω.m
$\rho(4)$	4460,0 Ω.m	-	3604,66 Ω.m
$\rho(5)$	3151,0 Ω.m	-	-
$h(1)$	0,64 m	6,47 m	0,68 m
$h(2)$	0,29 m	-	0,58 m
$h(3)$	3,47 m	-	2,58 m
$h(4)$	7,4 m	-	-
Erro	592,25%	14,31%	0,21%

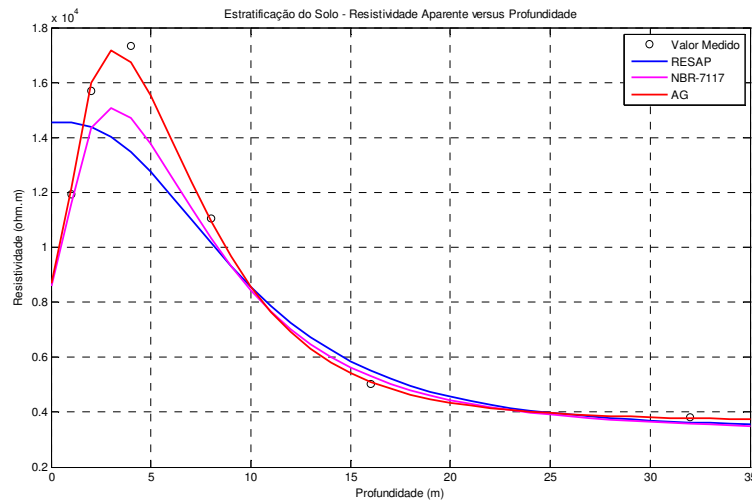


Figura 6 - Gráfico de resistividade aparente e estratificação do solo para os dados do Anexo B.3 – NBR-7117

4.0 - CONCLUSÃO

Os resultados obtidos apresentam elevada correlação com os valores de resistividade aparente medidos, com erros substancialmente menores que os das técnicas de estratificação baseadas em curvas padrão e cálculo numérico de gradientes. O método é de implementação simples, com tempos computacionais relativamente baixos. A ferramenta se mostra eficaz para obtenção de parâmetros otimizados do solo, resultando em modelos de elevada precisão.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. HE, R. ZENG, B. ZHANG, 2013, **Methodology and Technology for Power System Grounding**, Department of Electrical Engineering, Tsingua University, China, Wiley & Sons Singapore.
- [2] G. KINDERMANN, J. M. CAMPAGNOLO, 1995, **Aterramento elétrico**, 3ª. Ed., Porto Alegre, RS, Sagra-DC Luzzato.
- [3] ANSI / IEEE, **IEEE Std. 80: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding**, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, NY.
- [4] ABNT, **NBR-7117: Medição de resistividade do solo pelo método dos quatro pontos (Wenner)**, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [5] J. M. WHELAN, B. HANRATTY, E. MORGAN, 2010, **Earth Resistivity in Ireland**, CDEGS Users' Group Conference Proceedings, June 2010.
- [6] J. L. DEL ALAMO, 1993, **A Comparison Among Eight Different Techniques to Achieve and Optimum Estimation of Electrical Grounding Parameters in Two-Layered Earth**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 4, Oct. 1993.
- [7] W. P. CALIXTO, L. M. NETO, M. WU, H. B. M. FILHO, **Algoritmo Genético Aplicado a um Método de Prospecção Geoeletrico**, Núcleo de Desenvolvimento e Pesquisa em Eletromagnetismo e Sistemas de Aterramentos Elétricos, Faculdade de Engenharia Elétrica - FEELT, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Uberlândia – Minas Gerais, Brasil.
- [8] R. R. A. COELHO, R. S. T. PONTES, **Análise da Norma NBR-7117 Baseado na Estratificação Otimizada do Solo a Partir do Algoritmo de Sunde e Algoritmos Genéticos**, Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica.
- [9] I. F. GONOS, I. A. STATHOPOULOS, 2005, **Estimation of Multilayer Soil Parameters Using Genetic Algorithms**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, Jan. 2005.
- [10] T. TAKAHASHI, T. KAWASE, **Analysis of Apparent Resistivity in a Multi-Layers Earth Structure**, 1990, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, Apr. 1990.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Amauri G. Martins Jr.

Engenheiro Eletricista
Universidade de Brasília – 2004
Mestrado em andamento pela Universidade de Brasília
Posição Atual: Diretor de Engenharia
ENGECORR ENGENHARIA – Brasil.

Antônio José Martins Soares

Engenheiro Eletricista
Universidade Federal do Pará – 1980
Mestrado em Engenharia Elétrica
Universidade Estadual de Campinas – 1983
Doutorado em Engenharia Elétrica
Universidade Estadual de Campinas – 1986
Posição Atual: Professor Associado do Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade de Brasília – UnB – Brasil.