

DESENVOLVIMENTO DE *SOFTWARE* PARA ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE ATERRAMENTO ELÉTRICO

Autores: Bárbara Duarte e Silva¹, Cristiano Geraldo Teixeira Silva², Elmo Augusto Alves², Fábio José de Castro¹, João Paulo Ferreira Soares¹.

¹ Graduandos do Curso de Elétrica da Universidade FUMEC

² Professores da Universidade FUMEC

RESUMO

Neste projeto foi desenvolvido um aplicativo computacional destinado à elaboração de projetos de malha de aterramento, baseado em uma metodologia de cálculo de um modelo de estratificação em duas camadas tomando como princípio de aquisição de dados o Método de Wenner. Os resultados oriundos deste aplicativo poderão servir de subsídios em projetos de sistemas de aterramento, visando maior proteção às instalações elétricas, equipamentos e pessoas, bem como uma economia quando da execução das malhas de aterramento, por conta de um dimensionamento mais próximo do real.

Palavras-chave: Método de Wenner, Resistividade, Estratificação do Solo.

ABSTRACT

This project was developed a computer application for the preparation of ground grid projects, based on a calculation methodology of a stratification model in two layers using as a principle data acquisition the Wenner method. The results derived from this application can serve as support in grounding systems design, seeking greater protection of electrical installations, equipment and persons as well as an economy when the implementation of ground grid, due to a closer sizing of the real.

Keywords: Wenner Method, Resistivity, Ground Stratification

1 – INTRODUÇÃO

Um sistema de aterramento elétrico por finalidade proteger a vida das pessoas, evitar danos aos equipamentos pelas sobretensões, melhorar a eficácia dos dispositivos de proteção elétrica e proporcionar uma adequada condução da corrente de falta para o solo.

A corrente de falta é o fluxo de elétrons ocasionado pelo contato de partes energizadas com potenciais distintos em um sistema (falta direta), assim como de uma ou mais dessas partes para a terra (falta para terra). As faltas para terra produzem correntes que devem alcançar um valor suficiente para ser detectado pelos dispositivos de proteção. E estes, por sua vez, precisam contar com um eficiente sistema de aterramento (VISACRO FILHO, 2002).

A contínua inspeção de um sistema de aterramento, assim como sua manutenção periódica, garante a qualidade e a confiabilidade do mesmo.

O aterramento tem vários motivos para existir, dentre eles equalizar potenciais, drenar descargas atmosféricas, oferecer proteção para as pessoas, porque um simples passo ou um encostar em equipamento ou em uma estrutura metálica, pode gerar uma diferença

de potencial acarretando em um choque que pode ser um susto ou até mesmo levar ao óbito.

O aterramento eficiente não significa que o local está isento de surtos, mas está bem protegido dentro das normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) que define que a resistência máxima da malha seja de 10 Ω . Para estações de telecomunicações, principalmente de telefonia móvel celular, as operadoras estabeleceram um valor máximo de 7 Ω para a malha de aterramento. Quanto menor for o valor da malha e menor for a quantidade de curvas, melhor será o resultado na drenagem das descargas atmosféricas, fazendo com que a eficiência do sistema de aterramento garanta o perfeito funcionamento das estações durante períodos de surto e diferenças de potenciais (VISACRO FILHO, 2002).

1.1 – ATERRAMENTO

1.1.1 - Potencial de Passo e de Toque

Quando uma pessoa recebe uma descarga elétrica, a mesma submeteu-se a uma diferença de potencial que pode ser de dois tipos: Diferença de Potencial de Passo e Diferença de Potencial de Toque. Diferença de Potencial de Passo é a diferença de potencial entre dois pontos na superfície do solo tocados pelos pés de uma pessoa que caminha no interior da área sobre o sistema de aterramento, sem que a pessoa faça contato com qualquer outro objeto aterrado. Diferença de Potencial de Toque é a diferença de potencial entre um ponto de uma estrutura no qual uma pessoa toca com ambas as mãos e o ponto na superfície do solo tocado pelos seus pés. (KINDERMANN, 1992)

A eficiência de uma malha de aterramento é fundamental para o bom funcionamento do sistema de proteção. O sistema de proteção das estações de telecomunicações é diferente daquele utilizado em residências, pois a tensão nas estações de telecomunicação são bem mais altas e os valores dos equipamentos são elevados. Os limites de resistência são dimensionados para que a malha possa ter um desempenho eficaz para o valor de corrente a ser escoada para o solo. Quando há uma descarga que é escoada pela malha, esta tensão modifica os potenciais da malha e do solo. Quanto mais baixo for o valor da resistência da malha de aterramento, menor serão os valores da Diferença de Passo e de Toque (LEITE e LEITE, 1993).

1.1.2 - Escoamento da Malha

O escoamento da descarga atmosférica é realizado por um conjunto de materiais, que interligados entre si formam o sistema de aterramento e o Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA). O SPDA é formado por vários itens, sendo alguns deles: Captor Franklin, Cabo de descida, Isoladores, eletrodos de aterramento (SALARI FILHO, 2000).

1.1.3 - Requisitos

Projetando-se um aterramento é preciso verificar vários itens, entre esses o tipo de solo, se úmido ou seco. Esses fatores vão determinar o método de aterramento a ser utilizado. Ao executar a estratificação do solo utiliza-se, o método Wenner que fornece os valores de resistência do solo mediante variação de campos elétricos. Para saber qual o tipo

do solo (rochas, areia, argila, etc.) e o tipo de resistência retira-se uma amostra e após uma análise obtém-se o resultado (WENNER, 1915).

Com o resultado pode-se definir qual a configuração da malha de aterramento a ser utilizada e a geometria, quantos eletrodos de aterramento, a profundidade dos eletrodos, o espaçamento entre eles, se há necessidade de tratamento químico do solo para melhorar a condutividade e diminuir a resistência da malha de aterramento. Em todo tipo de edificação deve-se fazer este processo de reconhecimento do solo, cálculo da malha e depois determinar quais os métodos a serem utilizados (WENNER, 1915).

1.1.4 - Resistividade elétrica do solo

A resistividade elétrica ρ de um material descreve a dificuldade imposta aos portadores de carga, sujeitos à ação de um campo elétrico, ao atravessarem de um ponto a outro, em um determinado corpo (VISACRO FILHO, 2002). O que difere a resistividade da resistência elétrica é o fato daquela, sendo uma propriedade intrínseca da matéria, não depende das dimensões do corpo em questão. Da mesma forma se pode definir a condutividade σ como a facilidade encontrada pela corrente elétrica ao atravessar esse material. A resistência elétrica apresentada por um condutor homogêneo é determinada pela resistividade do material que o constitui e a geometria do condutor. Para um condutor retilíneo e homogêneo de seção reta S e comprimento L , sua resistência elétrica pode ser expressa por:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

A partir desta equação é possível chegar à expressão da resistividade:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{L}$$

Portanto, a resistividade pode ser entendida como uma propriedade da matéria, assim como o índice de refração, densidade, temperatura de fusão etc. A unidade de resistividade é ohm metro ($\Omega \cdot m$).

A resistividade dos metais aumenta com a temperatura. A uma temperatura normal, a resistividade nos metais varia entre 10^{-8} e $10^{-9} \Omega m$.

O solo é uma mistura não homogênea de rocha, água, gases e outros materiais orgânicos e inorgânicos. A resistividade de uma amostra de solo em particular depende não só de sua composição, mas também de fatores externos como umidade, temperatura, pressão etc., que podem provocar variações dos valores de resistividade no tempo. Desses fatores externos, a umidade é a mais significativa.

A água pura não é uma boa condutora de eletricidade. A água destilada apresenta uma resistividade da ordem de $10^5 \Omega m$, o que faz com que se possa considerá-la como um isolante. Entretanto, a água encontrada na natureza apresenta condutividade apreciável, pois algum sal encontra-se diluído, geralmente o Cloreto de Sódio (NaCl). Águas subterrâneas possuem resistividade entre 1 a $20 \Omega m$. No mar, pela alto conteúdo de sal, encontra-se valores em torno de $0,2 \Omega m$.

Se o valor da resistividade das rochas dependesse unicamente dos minerais que a constituem (quartzo, arenito etc.), é preciso considerá-las isolantes na maioria dos casos. Contudo, uma rocha é um material heterogêneo constituído por uma fase sólida (matriz) e

por poros, os quais podem estar ocupados total ou parcialmente por eletrólitos. Desta forma torna-se um condutor de eletricidade. O valor da resistividade das rochas pode variar em uma margem muito ampla, em função do seu conteúdo, ou seja, o grau de saturação de água, a salinidade desta e o modo de distribuição de seus poros. Cabe mencionar, que a resistividade de alguns minerais, assim como das rochas por eles compostas, varia de acordo com a direção da medida que se toma. É o que é chamado de anisotropia. A resistividade da matriz depende da sua textura e pode – em função dela – demonstrar anisotropia. Numa matriz isotrópica a resistividade não depende da direção em que é medida. Mas numa matriz onde o posicionamento dos grãos possui direções particulares, verifica-se que a resistividade varia com a direção. Na tabela 1 estão demonstradas algumas variações de resistividade em alguns tipos de solos.

Tipo de solo	$\rho [\Omega \cdot m]$
Lama	5 a 100
Húmus	10 a 150
Limo	20 a 100
Argila com 40% de umidade	80
Argila com 20% de umidade	330
Terra de jardim com 50% de umidade	140
Terra de jardim com 20% de umidade	480
Argila seca	1.500 a 5.000
Calcário fissurado	500 a 1.000
Calcário compacto	1.000 a 5.000
Granito	1.500 a 10.000
Areia com 90% de umidade	1.300
Areia seca	3.000 a 8.000
Basalto	10.000 a 20.000

Tabela 1: Variação da resistividade de acordo com o tipo de solo
Fonte: ABNT, 2004

No solo, à medida que a profundidade aumenta, diminui-se o valor da resistividade. Outra consideração é que resistividades maiores são encontradas em solos com idades geológicas mais elevadas.

1.2 - MÉTODO DE WENNER

Métodos Geofísicos compreendem um grupo de processos que buscam determinar as características do solo por meio de seu comportamento a determinados fatores a ele exposto. Basicamente, o processo de Sondagem Vertical consiste em induzir uma corrente elétrica no interior de um terreno e medir a resistência oferecida pelo mesmo.

F. Wenner, em 1915, propôs o método de quatro pontas para medir a resistividade elétrica do solo. A mesma técnica foi utilizada por L.B. Valdes em 1954 para efetuar medidas de resistividade em *wafers* de materiais semicondutores. O Método de Wenner, como é conhecido pelos geofísicos, consiste na utilização de 4 terminais (eletrodos) alinhados, com distâncias iguais entre os mesmos, conforme demonstrado na figura 1. O cálculo da resistividade do solo, por meio desse método, pode ser explicado utilizando o método das imagens, como se segue (WENNER, 1915).

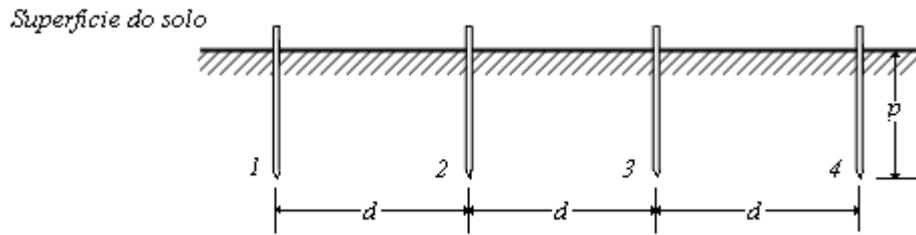


Figura 1: Hastes cravadas no solo
 Fonte: COPEL, 2013

Injetando-se uma corrente elétrica I no solo na haste de número 1 e coletando esta corrente na haste de número 4, serão produzidas superfícies equipotenciais que podem ser analisadas pelas hastes 2 e 3. Na maioria dos casos, entretanto, necessita-se da determinação de valores de resistividade inerentes a grande volume de solo, envolvendo, portanto, distância elevada entre os eletrodos. Logo, o espaço entre os eletrodos pode ser considerado muito grande em relação à dimensão dos mesmos, fazendo com que a distribuição da corrente é praticamente a mesma se tratarmos o eletrodo de forma pontual. A resistividade pode ser obtida pela fórmula:

$$\rho = \frac{4\pi d r}{1 + \frac{2d}{\sqrt{d^2 + 4p^2}} - \frac{d}{\sqrt{d^2 + p^2}}}$$

Essa expressão é conhecida como Fórmula de Palmer. Na prática, considera-se que d seja muito menor que p . Usualmente usa-se $p=(d/20)$ para a profundidade das hastes de teste. Dessa forma, considerando essa aproximação, a fórmula é reduzida para:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot d \cdot R$$

Esse método é, sem dúvida, o mais utilizado para se determinar a resistividade elétrica em condutores e semicondutores, nas suas mais diversas formas. Isso devido, também à sua rápida execução e fácil interpretação. Evidentemente, essas facilidades vêm seguidas de erros, que podem ser minimizados utilizando os “coeficientes de ajuste”, explicados logo abaixo.

Para que as medições seguissem um padrão e, desta forma não apresentassem discrepâncias substanciais, optou-se por adotar distanciamentos de 2, 4, 8, 16, 32, 64 e até 128 m entre hastes cravadas com mesma profundidade e em direções diferentes para uma análise com considerável fidelidade. Para melhores análises, valores obtidos são demonstrados em processos gráficos.

1.2.1 – Medições utilizando o método de Wenner

O solo apresenta, como visto, variações de resistividade em relação à profundidade. A análise dessa variação se faz por meio da obtenção do perfil geológico, em camadas, processo este que é conhecido como estratificação do solo, conforme exibido a figura 2.

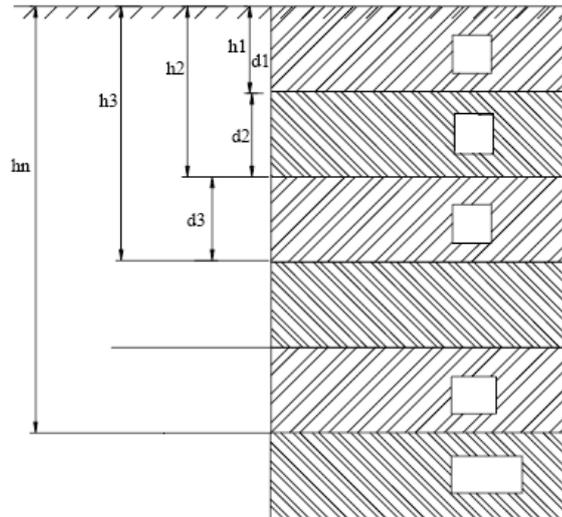


Figura 2: Estratificação do solo em n camadas.
Fonte: COPEL, 2013

Uma das formas de se conseguir a estratificação de um determinado terreno se dá por meio do Método de Wenner. Basicamente, a técnica consiste em uma sondagem elétrica, por meio de medidas tomadas na superfície do terreno.

O modelo típico do solo é uma estratificação horizontal em duas camadas. Contudo, tal procedimento considera o solo como sendo dividido em camadas horizontais perfeitas, o que foge à realidade.

As medições realizadas para o procedimento em duas camadas são realizadas com o auxílio de um equipamento conhecido como Megger ou Terrômetro (Figura 3). O Megger possui quatro terminais, sendo dois de potencial (internos, P_1 e P_2) e dois de corrente (externos, C_1 e C_2), e tem como finalidade medir valores de resistência. Dois eletrodos são conectados aos terminais C_1 e C_2 por meio de fios de cobre isolados e, da mesma forma, dois eletrodos são conectados a P_1 e P_2 (Figura 3). Utilizando sua fonte de corrente interna (um gerador de corrente alternada, sendo esta na faixa de 40 a 100 Hz), o equipamento faz circular uma corrente entre os eletrodos externos (C_1 e C_2).

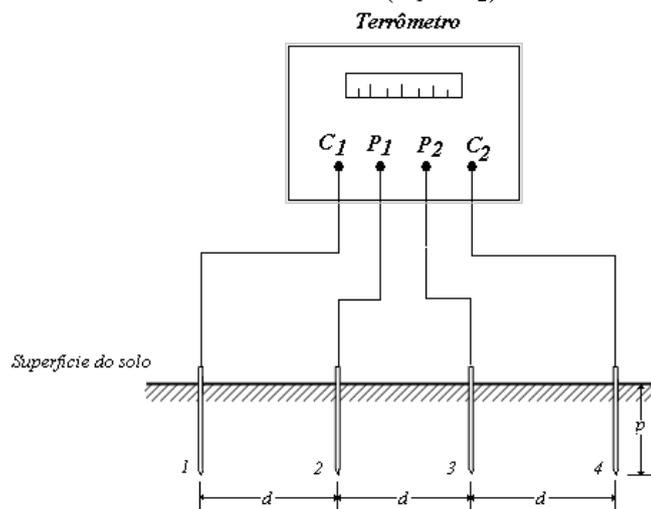


Figura 3: Terrômetro com as hastes cravadas no solo e cabos conectados.
Fonte: COPEL, 2013

O gerador interno não deve trabalhar com frequências de 50 ou 60 Hz, pois estas podem gerar erros devido às correntes no solo geradas por concessionárias de energia. Após coletar os valores e realizar um processamento interno o valor da resistência é indicado.

O método consiste de que a maior parte da corrente distribuída flui entre os eletrodos das extremidades. Portanto, para efeito do método de Wenner, considera-se que o valor da resistência elétrica apresentada no aparelho é relativa a uma profundidade p do solo. Os eletrodos usados no método devem ter aproximadamente 50 cm de comprimento com diâmetro entre 10 a 15 mm. Devem ser feitas diversas leituras, para vários espaçamentos.

Determina-se a resistividade aparente do solo (ρ_a), através de valores obtidos pelas medições nos eletrodos alinhados, que são realizadas em quatro direções sendo elas defasadas entre si de 90°.

Distância dos eletrodos (m)	Resistência Média – Valores Medidos (Exemplo)				
	A	B	C	D	Média de ρ_a
2	1,6	1,7	1,6	1,7	1,65
4	1,8	1,9	2,0	2,1	1,95
8	3,0	3,2	3,2	3,5	3,225
16	4,0	4,1	4,2	4,3	4,15

Tabela 2: Determinação dos valores médios ρ_a

Fonte: ABNT, 2004

a- Após ter os valores medidos constrói-se uma tabela e calcula-se a média de ρ (Tabela 2).
b- Com os valores da tabela traçar o gráfico da curva de resistividade média x distância. Após a curva traçada prolonga-se o início da mesma que estará na parte mais alta do gráfico até o eixo das ordenadas e então neste ponto determina o valor de ρ_{m1} .

Para determinar o valor de ρ_{m2} (camada inferior do solo), prolonga-se a assíntota à curva de resistividade também até o eixo das ordenadas e a partir desse ponto obtém-se o valor de ρ_{m2} .

Calcula-se então o valor de ρ_{m2} / ρ_{m1} e procura-se na tabela padrão (Método de Wenner) o valor de M_o , onde $\rho_m = \rho_{m1} \cdot \rho_{Mo}$ [$\Omega \cdot m$]

c- Determinando a profundidade da camada do solo correspondente a resistência média, a partir da curva de resistividade média ρ_m indicará a profundidade D_p .

d- Determinação do raio do círculo equivalente a superfície da subestação, conforme a equação (2.1):

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad [m] \quad (2.1)$$

Onde: S = área da malha terra em m^2 .

e- Cálculo da Resistividade Aparente ρ_a para análise de duas camadas de solo:

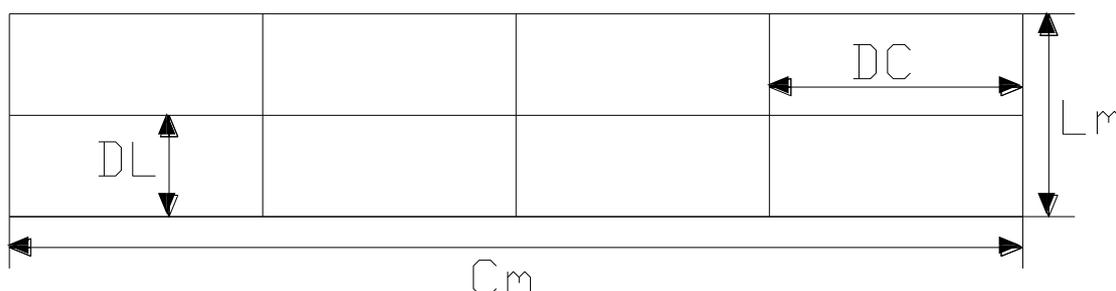
$$\rho_a = \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{k^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{d_p}{a}\right)^2}} - \frac{k^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{d_p}{a}\right)^2}} \right] \right\} \quad (2.2)$$

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (2.3)$$

Onde a equação 2.3 nos dá o valor do Coeficiente de Reflexão e o parâmetro a da equação 2.1 se refere ao maior distanciamento entre as hastes utilizado.

Representar o solo por meio de um modelo de duas camadas simplifica o projeto de malhas e reduz o tempo de processamento, permitindo maior dedicação à análise de potenciais soluções, em termos de arranjos de eletrodos. Esta escolha também se baseia que a estratificação em mais de três camadas possui pouco interesse prático, motivo pelo qual não foi objeto de análise neste trabalho.

f- Números de condutores principais e de junção:



Condutores principais - Largura:

$$N_{cp} = \left(\frac{C_m}{DL} \right) + 1 \quad (2.4)$$

C_m : comprimento em metros

DL : distância entre os eletrodos correspondentes a largura (m) – 5% de L_m

Condutores de junção - Comprimento:

$$N_{cj} = \left(\frac{L_m}{DC} \right) + 1 \quad (2.5)$$

L_m : largura da malha (m)

DC : distância entre os eletrodos correspondentes ao comprimento(m) - 5% de C_m .

g- Calculo do comprimento do condutor para áreas retangulares:

$$L_{cm} = 1.05 \cdot [(C_m \cdot N_{cj}) + (L_m \cdot N_{cp})] \quad (2.6)$$

h- Seção mínima do condutor: Em função da corrente de surto e do tempo de duração da mesma, assim como o tipo de junção. (a seção não deve ser menor que 25mm^2).

$$S_c = k \cdot I_{cft} \quad [\text{A}] \quad (2.7)$$

I_{cft} = Corrente de curto fase-terra.

K = Tipo de junção x tempo (s). (ver tabela 3)

Tempo (S)	Cabo simples, solda exotermica(k)	Componentes soldados (k)	Componentes rebitados(k)
30	0,020268	0,025335	0,032935
4	0,007093	0,010134	0,012160
1	0,003546	0,005067	0,006080
0,5	0,002533	0,003293	0,004306

Tabela 3: Valor de K.

Fonte: ABNT, 2004

i- Resistência da malha de terra.

$$R_{mt} = \left(\frac{\rho_a}{4R} \right) + \left(\frac{\rho_a}{L_{cm}} \right) \quad [\Omega] \quad (2.8)$$

R: raio do círculo equivalente a área destinada a malha de terra (m).

2 - CONSTRUÇÃO DO SOFTWARE

O aplicativo, intitulado de *Ground Control*, foi desenvolvido em Java aplicando as técnicas de orientação a objetos e classes para sustentar os cálculos e a geração de gráficos. A linguagem Java é uma linguagem moderna que utiliza os recursos de orientação a objetos e fornece portabilidade para qualquer plataforma com segurança e rapidez (HORSTMANN, 2004). Diante disso, o aplicativo favorece a adoção de novas funcionalidade no futuro e pode ser integrado a outros sistemas, fornecendo grande benefício para outros projetos.

A elaboração deste software foi baseada no método de Wenner, conforme explanação anterior. Para lançamento da medição, foi escolhida a classe JFrame para a camada de apresentação, pois oferece recursos de criação de janelas para interface de lançamento dos dados.

Além das medições, o *software* recebe a informação sobre o terreno: seco, normal ou úmido. Esta informação é importante na aplicação de um fator no cálculo para encontrar o ponto de interseção da curva de resistividade no ponto zero do eixo y do gráfico. Onde foi considerado o fator de 0,5 para seco, 0,3 para normal e 0,1 para úmido.

Foi aplicado o método de interpolação para identificação da interseção da curva de resistividade no ponto zero do eixo através da fórmula:

$$y = y1 + [(x - x1 / x2 - x1) * (y2 - y1)]$$

Onde foram consideradas as médias de resistividade entre os pontos e as medições lançadas no *software*.

O gráfico é apresentado como um dos resultados obtidos pelo *software*. Para a sua geração, foi utilizada a classe JFreeChart que oferece recursos para criação de uma grande variedade de gráficos.

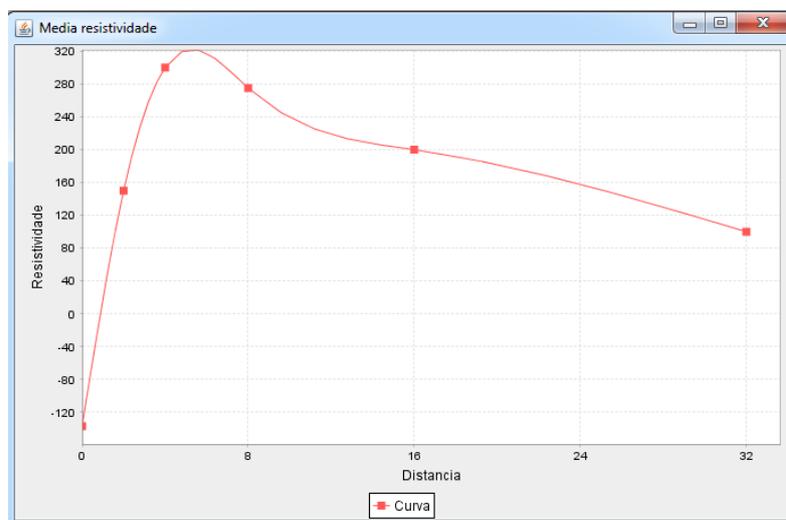


Figura 4: Exemplo do gráfico de resistividade fornecido pelo *Ground Control*

O *Ground Control* passou por simulações internas para refinamento dos cálculos e apresentação de resultados. Assim, foi possível garantir a sua eficiência para dar apoio ao cálculo de resistividade de solo.

3 - CONCLUSÃO

Inicialmente, realizou-se um estudo sobre malhas de aterramento, explorando suas aplicações e etapas em solos estratificados. Em seguida foi realizada uma análise sobre modelos de duas camadas e a partir daí iniciou-se a construção de um programa para executar as etapas do projeto, gerando os resultados esperados.

As simulações com o aplicativo geraram resultados das resistividades de cada espaçamento bem próximos aos apresentados na literatura. Os resultados apresentados indicam que o *software* proposto pode ser aplicado de forma eficaz para o fim que se destina, isto é, analisar um solo estratificado pelo método de Wenner. O desenvolvimento desse tipo de programa constitui uma importante contribuição acadêmica que inevitavelmente será incorporada ao arsenal de recursos de ensino nas disciplinas de Infraestrutura e demais estudos relacionados à área.

4 – BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2004.

COPEL, Companhia Paranaense de Energia. Manual de Instruções Técnicas: Aterramento de Redes de Distribuição. Curitiba: SEE/DNGO, 2013. 38p.

HORSTMANN, Cay. Big Java. Porto Alegre: Bookman, 2004. 1125p;

KINDERMANN, Geraldo. Descargas Atmosféricas. Porto Alegre: Sagra-DC Luzzatto, 1992. 132p.

LEITE, Duilio Moreira; LEITE, Carlos Moreira. Proteção Contra Descargas Atmosféricas. São Paulo: MM Editora, 1993.

ROBERTO, Júnia Taíze Santos et al. Avaliação do transitório eletromagnético estabelecido em torres de telecomunicação atingidas por descargas atmosféricas. Aula magna: revista de cultura universitária. v.10, n.9, p.23-30, maio 2004.

SALARI FILHO, João Clavio, Relatório Técnico ADG-A/PER. São Paulo: Cepel, 2000. 50p.

VALDES, L.. Proceedings of the I.R.E. Nova York: IEEE, 1954. v.42. p. 420 - 427.

VISACRO FILHO, Silvério. Aterramentos Elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento. São Paulo: Artliber, 2002. 159 p.

WENNER, F.. Bulletin of the Bureau of Standards. Nova York: Sci.paper, 1915. v.12. p.469-478.