


Services How to cite this paper**An. 3. Enc. Energ. Meio Rural 2003**

O método dos elementos finitos na análise do aterramento do sistema monofilar com retorno por terra

Fernando Selles Ribeiro; Luiz Henrique Alves Pazzini; Luiz Fernando Kurahassi; Luiz Cláudio Ribeiro Galvão; Marcelo Aparecido Pelegrini; Octávio Ferreira Afonso; Luciano de Oliveira Lima

GEPEA-USP, Grupo de Energia do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Avenida Prof. Luciano Gualberto, travessa 3, 158, Sala A2, 35, CEP: 05508-900, São Paulo, SP, Brasil; Tel: (55)(11)818-5279, Fax: (55)(11)210-3595

[Endereço para correspondência](#)

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo do comportamento do sistema de aterramento de circuitos monofilares com retorno por terra (MRT) através do método dos elementos finitos. São empregadas técnicas numéricas de mapeamento de campo para a determinação do campo elétrico, o que permite o conhecimento da difusão de corrente tanto em situação de regime permanente quanto em condições de falta. A região de influência do aterramento (domínio do estudo) é dividida em pequenos elementos de volume na forma de tetraedros, possibilitando o cálculo dos potenciais elétricos em seus vértices. Um trabalho de pós-processamento permite mapear o campo elétrico e a distribuição de correntes por todo o domínio. Como resultado são obtidos o mapeamento das curvas equipotenciais de tensão na superfície do solo e em todo o volume estudado, a resistência de terra, curvas de distribuição de potencial em direções determinadas, carta de cores degradê em função da intensidade do potencial de passo, e outros. O estudo permite ao projetista avaliar com precisão o desempenho do aterramento e propor soluções que melhor atendam os requisitos de economia e segurança.

Palavras-chave: Eletrificação rural, aterramento, elementos finitos.

ABSTRACT

This paper presents a study of the behavior of the grounding of single wire earth return circuits (SWER) by means of the finite-element method. Numeric techniques of field mapping are used to determine the electric field around the grounding electrode, which results in the knowledge of current distribution both for steady state and fault conditions. The area of influence of the grounding electrode (domain of study) is divided in small volume elements with a tetrahedron shape, which allows the calculation of the electric potentials in their vertexes. A post-processing stage supplies the electric field map and the current distribution for the whole domain. The final results obtained are the equipotential curves mapped at the soil surface and at specified vertical planes through the domain of study, the ground resistance of the electrode configuration, surface potential curves for predetermined directions, color chat for step voltage and others. The study enables the designer to evaluate precisely the performance of the grounding system and to develop the best solutions as regards safe by and economy.

INTRODUÇÃO

A luz elétrica, a geladeira, a televisão, são partes da contemporaneidade. A energia para mover a água encanada, para aliviar trabalhos domésticos, para gelar a cerveja e fazer o sorvete está inserida no cotidiano.

A energia elétrica implica melhora na qualidade de vida. Melhor iluminação, maior facilidade de educação e melhores condições de higiene são alguns benefícios que ela possibilita.

No entanto, as luzes provenientes dos lampiões e lamparinas ainda prevalecem em boa parte da zona rural dos países em desenvolvimento.

A zona rural brasileira se enquadra nessa penumbra. A maioria das propriedades rurais do Brasil ainda está sem luz elétrica. A [Tabela 1](#) apresenta o panorama atual da zona rural brasileira no que tange a utilização de energia elétrica.

Tabela 1 - Propriedades Rurais Eletrificadas, segundo as regiões brasileiras.

Região	Número de propriedades rurais.	Número de propriedades rurais eletrificadas.	% de eletrificação.
Norte	661.176	13.731	2,08
Nordeste	3.157.980	419.885	13,30
Centro-Oeste	276.901	127.651	46,10
Sudeste	1.120.578	651.840	58,20
Sul	1.346.945	939.161	71,20
Brasil	6.563.580	2.152.268	32,79

Fonte: ELETROBRÁS (1999).

Um dos fatores que contribuíram para esse cenário de escuridão no campo foi a utilização de sistemas e padrões urbanos na eletrificação de zonas rurais. A utilização de sistemas simplificados e materiais alternativos, tais como poste de madeira e o condutor de aço zincado, esbarram na oposição das concessionárias, preocupadas em atender supostos requisitos de segurança e qualidade.

Este trabalho apresenta uma ferramenta que pode auxiliar a reduzir a rejeição da utilização de sistemas mais baratos na zona rural, particularmente o Monofásico com retorno por Terra. Trata-se de um modelo computacional baseado no Método dos Elementos Finitos para estudos de configurações de aterramento. Tal ferramenta possibilita aos projetistas uma análise mais confiável da malha de terra, auxiliando a busca por configurações mais seguras e com menor custo para o consumidor.

O SISTEMA MRT

O Sistema Monofilar com Retorno por Terra (MRT) constitui-se em um circuito elétrico para distribuição de energia através de um único fio. O retorno da corrente, como o próprio nome já esclarece, é efetuado através da terra.

Este tipo de sistema é bem mais simples que um sistema trifásico convencional e, portanto, apresenta um custo inferior. Isso abre a possibilidade de utilizá-lo em regiões de baixa densidade populacional, característica marcante das zonas rurais.

Dependendo da natureza do sistema elétrico existente, tipos de sistemas de proteção, carga a ser ligada e características do solo onde será implantado, o MRT pode apresentar diferentes versões.

SISTEMA MONOFILAR SEM TRANSFORMADOR DE ISOLAMENTO.

Constitui-se de um único condutor metálico ligado diretamente a uma das fases de uma linha trifásica, sendo o solo um caminho de retorno da corrente. Os transformadores de distribuição por ele alimentados têm seus enrolamentos primários ligados entre o condutor e solo, conforme se observa na [Figura 1](#).

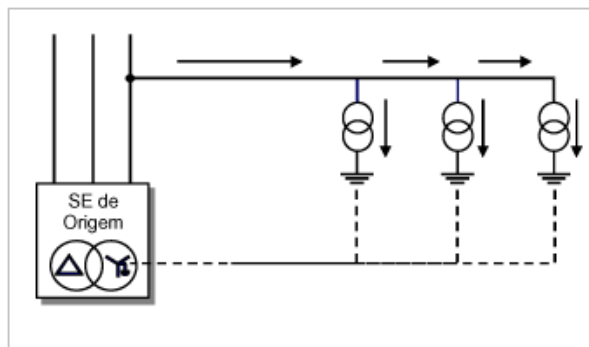


Figura 1: Sistema MRT sem transformador de Isolamento.

Este sistema só pode ser originado em alimentadores cuja saída da subestação de origem derive de um transformador com enrolamentos ligados em estrela-aterrado. No seu emprego deve-se procurar manter um adequado balanceamento de fases, com o objetivo de concentrar as correntes de retorno nas áreas servidas pelo sistema, reduzindo-se os riscos de atuação indevida dos dispositivos de proteção contra falta fase-terra da subestação.

É comprovadamente a versão mais prática e econômica do MRT, sendo, portanto, a mais recomendada. JUCÁ (1998) estima que há mais de 300.000 ligações em linhas de distribuição com esta configuração no Brasil.

SISTEMA MONOFILAR COM TRANSFORMADOR DE ATERRAMENTO.

Consiste de um único condutor metálico partindo de um sistema trifásico através de um transformador de isolamento, tendo o solo como caminho de retorno da corrente. O transformador de isolamento tem seu enrolamento primário ligado a duas fases do sistema trifásico e o secundário entre o condutor metálico e a terra, conforme se vê na [Figura 2](#).

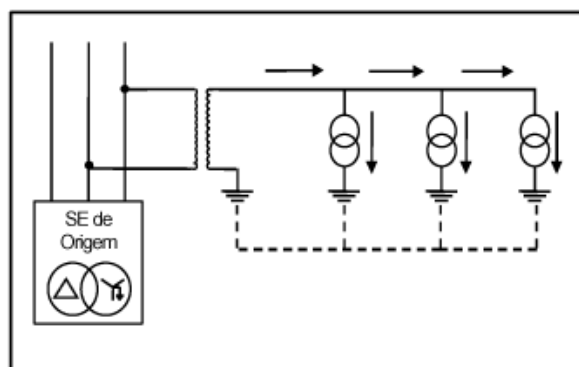


Figura 2: Sistema MRT com transformador de Isolamento.

Apresenta-se como solução para o emprego do MRT a partir de sistemas isolados. Para os casos onde o sistema deriva de uma ligação estrela-aterrado, sua utilização poderá vir a ser justificada aliando-se as seguintes vantagens:

- limitar a zona de circulação das correntes de retorno pela terra, evitando atuação indevida de dispositivo de proteção sensível a falta fase-terra de alta impedância;
- elevar a tensão para permitir o atendimento a uma área mais ampla em condições econômicas;
- limitar as correntes de curto-circuito nas linhas MRT;

Como desvantagens, além dos custo adicional do transformador de isolamento, pode-se destacar:

- limitação da potência do ramal à potência nominal do transformador de isolamento;
- limitação da potência do transformador de isolamento pela viabilidade de conseguir um aterramento seguro.

Por esses aspectos, sua aplicação deve ser acompanhada de um estudo técnico-econômico, no qual deve-se levar em conta, além dos fatores acima apresentados, outros tais como a extensão da área a ser atendida.

SISTEMA MONOFILAR COM NEUTRO PARCIAL.

Consiste das interligações dos aterramentos dos transformadores do ramal MRT através de um condutor adicional. Desta forma, apresenta-se fisicamente como o monofásico fase-neutro multi-aterrado, com a diferença de que o

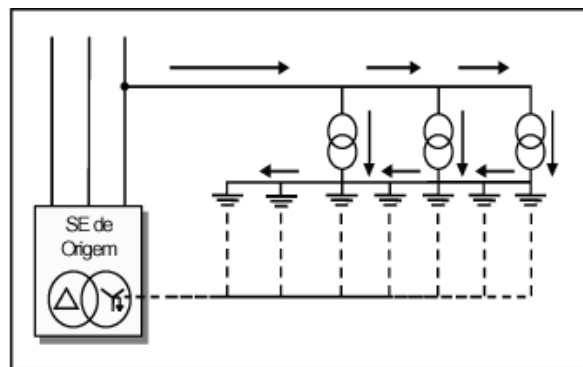


Figura 3: Sistema MRT com neutro parcial.

É empregado como solução para a utilização do MRT em regiões de solos de alta resistividade, quando se torna difícil obter valores de resistência de terra dos transformadores dentro dos limites máximos estabelecidos no projeto. Neste sistema, a interligação dos aterramentos dos transformadores forma uma única malha de terra, reforçada pelos aterramentos que podem ser acrescidos ao longo do ramal, contribuindo para baixar o valor da resistência equivalente em cada ponto.

ATERRAMENTO PARA O SISTEMA MRT

De modo geral, o aterramento de sistemas de alta tensão é meramente uma medida protetora, pois a corrente flui no circuito de terra somente durante uma situação anormal. No entanto, no sistema MRT a corrente flui constantemente pela terra, surgindo a necessidade de uma maior atenção para o aterramento destes sistemas.

A operação segura de qualquer sistema de distribuição exige a manutenção de baixas impedâncias de terra para garantir que os equipamentos de proteção operem em condições de curto-circuito. Por isso, dentro de certos limites, o sistema MRT não apresenta maiores problemas que os encontrados nos sistemas convencionais, pressupondo-se que não ocorra nenhum acréscimo de resistência decorrente do aquecimento do solo circundante pela passagem da corrente de carga.

O aterramento do sistema MRT deverá ser adequadamente projetado e instalado, de maneira que apresente potenciais dentro dos limites de segurança, nas condições de qualquer tempo e estação.

O problema de obter aterramentos adequados para o sistema MRT é igual ao caso de exigência de baixa resistência de terra. As características indispensáveis são determinadas pela necessidade de se obter segurança e capacidade de corrente de carga.

ASPECTOS DE SEGURANÇA

Os gradientes de tensão ao longo da superfície de terra, dentro e fora da malha de aterramento de uma subestação, podem ser elevados, pondo em risco homens e animais. Potenciais perigosos podem ocorrer quando elevadas correntes fluírem para o solo, seja por elevadas potências, seja por descargas atmosféricas.

A geometria do sistema de aterramento é, freqüentemente, mais complexa do que parece, e o conhecimento das características do subsolo é muitas vezes incompleto.

Uma estação com resistência de terra baixa pode ser perigosa em algumas circunstâncias. Por outro lado, algumas estações com resistência de terra alta são seguras ou podem torna-se seguras através de certos ajustes em um projeto.

Não só a magnitude dos gradientes locais é o fator de risco, outras circunstâncias também favorecem para aumentá-lo: duração do choque, resistência do corpo, condições físicas do indivíduo e probabilidade de contato.

A primeira consideração a respeito do aterramento das linhas MRT é a proteção da vida de pessoas e animais. Estudos do ELETROBRÁS (1986) apontam o risco quando quedas de tensão no sistema de aterramento são superiores a 40 V. Na Austrália esse risco é reduzido através da aplicação de um coeficiente de segurança de 2 sobre 40 V, limitando a tensão máxima em 20 V em condições normais de operação. Com tal limitação o risco de morte é desprezível.

KINDERMANN e CAMPAGNOLO (1995) mostram que o limiar da sensação de corrente alternada para o corpo humano é de 1 mA. Correntes de 9 a 25 mA já são quase dolorosas e podem resultar em descontrole muscular, suficiente para dificultar a retirada de objetos energizados agarrados pelas mãos. Ainda no intervalo de 9 a 25 mA podem ocorrer problemas respiratórios, que podem desaparecer quando a corrente for interrompida, ou, quando a contração for mais severa, verifica-se a interrupção respiratória. O limiar para fibrilação ventricular varia de 50 a 100 mA.

SCHIESSER apud MACIEL (1982) indica o valor de 150 V em corrente alternada como sendo perigoso para um ser humano tocar dois pontos. Esse também é o limite fixado pelas normas americanas.

GRANDE e CORVACAN (1979) afirmam que a COPEL (Companhia Paranaense de Energia) usa, há vários anos, o sistema MRT e menciona a resistência de terra de 10Ω como valor para todas as potências dos transformadores como sendo adequado à garantia do potencial de toque.

COMETÁRIOS

Verifica-se a importância de um adequado sistema de aterramento na utilização do sistema MRT. Também nota-se a existência de dificuldades no estudo das configurações de malha de terra existentes, bem como a existência de diversas incertezas para obtenção de resultados conclusivos. A seguir será apresentada uma ferramenta computacional capaz de auxiliar os projetistas na análise de sistemas de aterramento para circuitos MRT.

O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

As equações de Maxwell descrevem completamente os fenômenos eletromagnéticos. Porém, sua resolução analítica é impraticável em dispositivos com geometria complexa. Uma alternativa para contornar esse problema é a utilização de métodos do cálculo numérico para obter-se uma solução aproximada.

O Método dos Elementos Finitos é um entre os vários métodos conhecidos do cálculo numérico para fenômenos eletromagnéticos. Ele pode ser aplicado sem as limitações ou dificuldades que existem em alguns outros métodos.

Para utilizar o Método dos Elementos Finitos o objeto de estudo deve ter sua geometria subdividida em várias partes, os chamados elementos finitos. Essas subdivisões recebem o nome de malhas, sendo constituídas, normalmente, por triângulos ou quadriláteros (bidimensional) ou pirâmides e tetraedros (tridimensional). Os vértices dessas malhas são denominados nós e são utilizados para montar um sistema de equações cuja solução permite determinar as grandezas de interesse no fenômeno analisado. No caso eletromagnético, essa solução é o vetor potencial magnético ou potencial elétrico em cada nó da malha, a partir dos quais é possível determinar os campos magnéticos e elétricos no interior dos elementos finitos e proceder os cálculos de energia, força, torque parâmetros (resistência, capacitância, indutância), etc.

CARDOSO (1994) aponta três etapas na utilização do Método dos Elementos Finitos em uma ferramenta computacional:

- pré-processamento: engloba o desenho da geometria do objeto estudado, a geração da malha, a imposição das propriedades físicas dos meios envolvidos, a imposição dos valores das fontes de campo no objeto (densidade de corrente elétrica nas bobinas ou densidade de carga elétrica nos materiais) e a imposição das condições de contorno pertinentes ao fenômeno e ao objeto estudado;
- processamento: inclui a montagem do sistema de equações, através dos dados de pré-processamento, e a sua resolução através de métodos diretos ou iterativos;
- pós-processamento: os dados das etapas anteriores permitem criar procedimentos para cálculo e apresentação da grandeza do fenômeno estudado. Os algoritmos que traçam linha de campo ou equipotenciais sobre a geometria fornecida, os que calculam energia, força, torque e parâmetros, os que traçam gráficos de campos e potenciais sobre segmentos definidos no objeto ou outros mais específicos para alguns fenômenos ou outras grandezas, são os constituintes do pós-processamento.

O SISTEMA GROUND-3D

O Ground-3D é um sistema computacional desenvolvido por pesquisadores da Escola Politécnica da USP que utiliza o Método dos Elementos Finitos em análise de aterramentos. O sistema baseia-se na estrutura descrita por CARDOSO (1994), possuindo diversas interfaces com o usuário. A [Figura 4](#) resume a estrutura do Groud-3D.

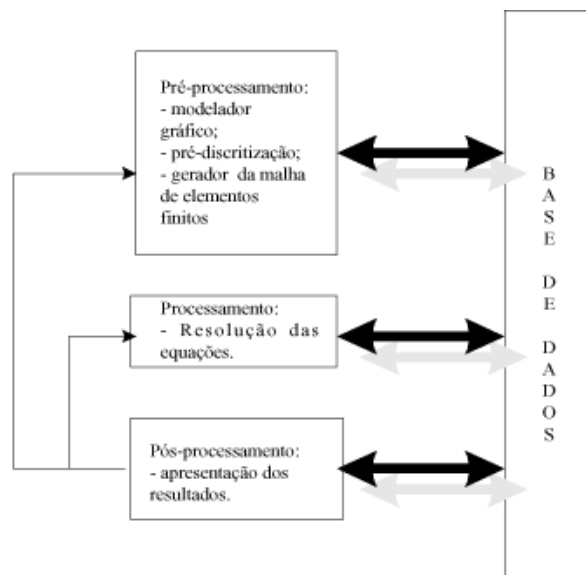


Figura 4: Esquema de Funcionamento do Ground-3D.

O modelador gráfico permite ao usuário definir as malhas a serem analisadas, informando os parâmetros geométricos, tais como comprimento de condutores e hastes e profundidade da malha de terra, bem como parâmetros topológicos, ou seja, as ligações entre condutores e hastes.

O subsistema de associação de dados físicos é o módulo pelo qual o usuário atribui às malhas as propriedades físicas de condutores e hastes, definindo a resistividade e profundidade das camadas de estratificação do solo e, também, permite indicar os pontos de injeção da corrente na malha e o valor total da corrente injetada em situação de curto-circuito ou de regime.

A geração automática da malha de elementos finitos implementada para o Ground-3d necessita da definição prévia de um conjunto de pontos que orientarão o adensamento dessa malha de elementos finitos. Esta geração prévia de pontos é função do subsistema de pré-discretização.

O gerador de malha de elementos finitos é responsável pela geração de elementos finitos tridimensionais. Para os dados de entrada, este módulo utiliza os arquivos anteriormente gerados pelo subsistemas apresentados anteriormente.

Concluído o processo de discretização do domínio em estudo passa-se aos procedimentos matemáticos. O módulo de resolução de equações monta e resolve um sistema de equações em função da malha de elementos finitos elaborada. A ordem deste sistema, e portanto a complexidade em resolvê-lo, depende do número de nós da malha de elementos finitos do número de nós com potenciais conhecidos.

Os resultados finais são de responsabilidade do sistema explorador de resultados. Ele possibilita a análise dos resultados por meio de apresentação de curvas equipotenciais, gráficos de variação de potencial de passo e de toque e do potencial elétrico, e carta graduada em cores com a variação do potencial de passo. Este módulo do sistema fornece, também, informações sobre a resistência de aterramento calculada, o máximo potencial de toque e de passo, a máxima elevação de potencial, os pontos de defeito e sobre as características das camadas estratificadas do solo pertinentes ao projeto em análise. Estas informações, sobre um sistema de aterramento simples, de caráter ilustrativo, serão mostradas no item a seguir.

ESTUDO DE CASO

Apresenta-se a simulação de um sistema de aterramento de um MRT da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) situado no assentamento Agrovila I, no município de Motuca, interior de São Paulo. A [Tabela 2](#) resume a estratificação do solo deste local.

Tabela 2: Estratificação do solo do caso em estudo.

Camada	Espessura (m)	Resistividade [$\Omega.m$]
1ª camada	0,5	341,80
2ª camada	∞	702,51

O aterramento em questão constitui-se de uma única haste de 3 m, conforme se observa na [Figura 5](#).

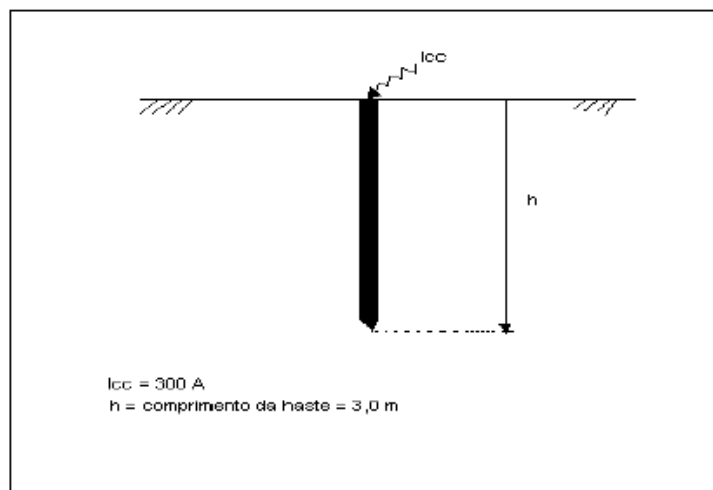


Figura 5: Configuração do aterramento em análise.

Utilizando-se esta configuração no Ground-3D, obtém-se a malha de elementos finitos mostrada na [Figura 6](#).

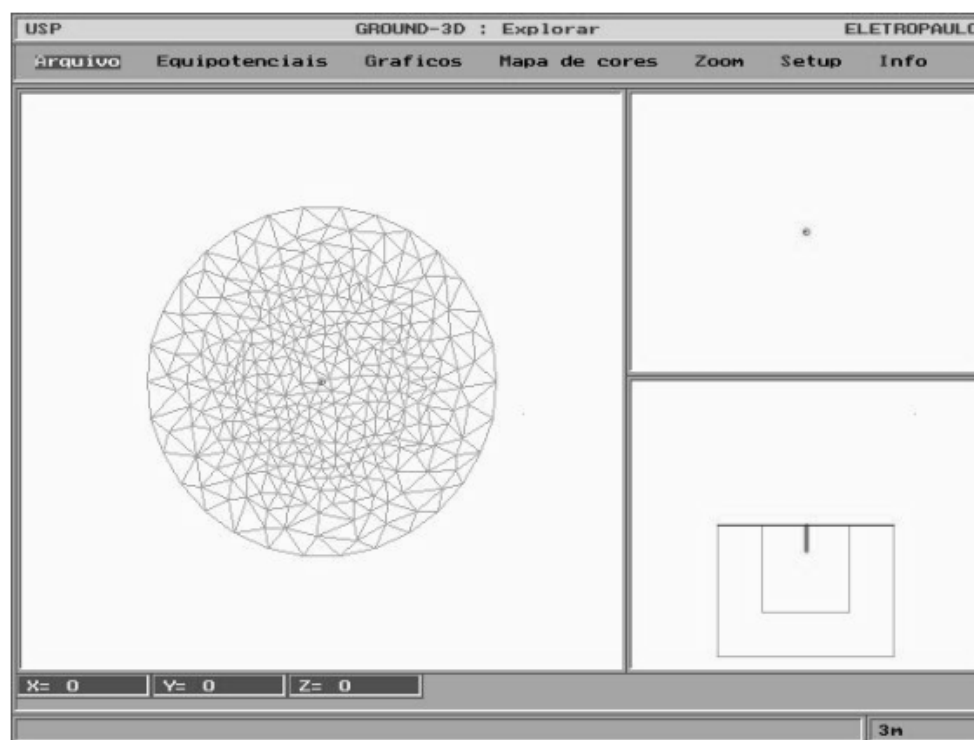


Figura 6: Malha de elementos finitos para análise.

A partir desta malha é montado um sistema de equações que, após adequadamente resolvido, proporcionará diversas informações ao projetista. Estas informações podem ser apresentadas de diversas formas: gráficos, carta de cores, etc. A título de ilustração apresenta-se, na [Figura 7](#), um gráfico do potencial de passo em função da distância da haste de aterramento.

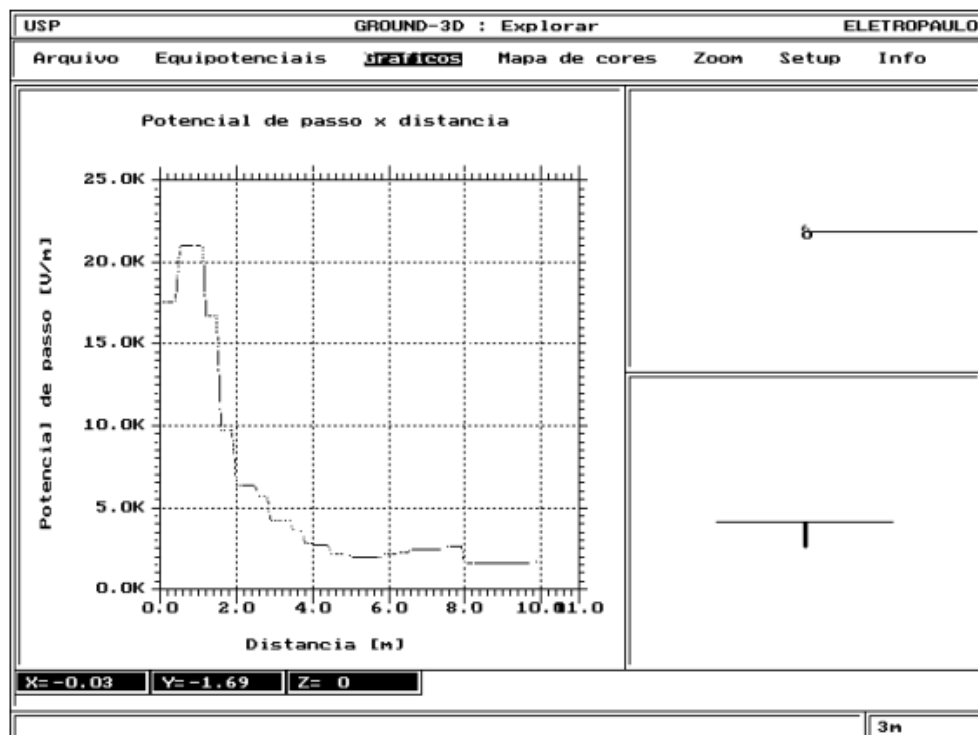


Figura 7: Potencial de passo em função da distância.

Através de uma análise da [Figura 7](#) percebe-se claramente que, caso uma corrente de curto-circuito de 300 A venha a ocorrer, o potencial de passo resultante estará muito acima de valores aceitáveis.

Assim, percebe-se que o programa permite ao projetista a possibilidade de alterar a configuração da malha de terra para sanar o problema antes da execução do projeto, trazendo maior segurança e confiabilidade ao projeto.

CONCLUSÕES

O sistema MRT é uma excelente alternativa para ser utilizada em atendimentos de zonas rurais. Seus problemas não são maiores do que os sistemas tradicionais.

A questão do aterramento, ponto polêmico na sua utilização, pode ser bem estudada através do uso de softwares específicos, como é o caso do Ground3d. Como visto, essa ferramenta é bastante versátil, podendo ser facilmente manuseada por projetistas no seu cotidiano.

No entanto, ela também apresenta alguns problemas. O primeiro a ser comentado é sua interface com o usuário, ainda pouco amigável. Isso está sendo objeto de aperfeiçoamento pelos pesquisadores da USP. Outro ponto é que o software só permite estudos de terrenos com, no máximo, cinco camadas de resistividade, mais do que o suficiente para a grande maioria dos casos. Um último ponto a ser ressaltado é a dificuldade que existe no tratamento de configurações mais complexas, pois sua ferramenta gráfica apresenta limitações. Em tais casos, aproximações têm de ser realizadas.

REFERÊNCIAS

- [1]ELETROBRÁS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **"Luz no Campo" - programa nacional de eletrificação rural - normas operacionais (versão preliminar)**. Brasil, março de 1999.
- [2]JUCÁ, A. da S. **Eletrificação rural de baixo custo – norma técnica e vontade política**. Dissertação (Mestrado) apresentada à Escola Politécnica da USP para obtenção do título de Mestre em Engenharia. São Paulo, 1998. 190p.
- [3]ELETROBRÁS – CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. **Diretriz para atividades de engenharia RER 01 – 10**. Rio de Janeiro, 1996. (Distribuição em alta tensão com retorno por terra para áreas rurais).
- [4]KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J.M. **Aterramento elétrico**. Editora Sagra DC Luzzatto, 3ª Edição. Porto Alegre, 1995.
- [5]MACIEL, N.F. **Análise do aterramento da subestação de distribuição num protótipo de sistema monofilar com retorno por terra**. Viçosa, 1982.
- [6]GRANDE, L.; CORVACAN, J.V. **Sistema monofásico com retorno por terra utilizado pela Copel**. Conferência Latino Americana de Eletrificação Rural. Lima, Peru, novembro de 1979.

[7]CARDOSO, J.R. **Introdução ao método dos elementos finitos para engenheiros eletricitistas**. 1ª Edição. Publicação independente, 1994.

Endereço para correspondência

Luiz Henrique Alves Pazzini

e-mail: pazzini@pea.usp.br

© 2019 UNICAMP/SBEA

Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético - NIPE/UNICAMP
Caixa Postal 1170
13083-970 Campinas SP Brasil



cortez@reitoria.unicamp.br