

SENDI 2004
XVI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

**Análise Simultânea de Sistemas de Aterramento
e Distribuição de Corrente de Curto-Circuito**

A. N. Aleixo

CPFL Companhia Piratininga de Força e Luz

aaleixo@cpfl.com.br

Palavras-chave: Aterramento, Distribuição de Corrente de Curto-Circuito, Medição de Malhas Energizadas, Simulação de Sistemas de Aterramento

RESUMO

Este texto apresenta uma integração entre o cálculo de distribuição de corrente de curto-circuito e a análise de sistemas de aterramento interligados, fornecendo resultados mais precisos, ao simular sistemas mais complexos e interconectados entre si, fornecendo interferências entre elementos e apresentando uma visão global do problema. Além de introduzir uma forma de atacar estes problemas de forma conjunta, apresenta ainda uma metodologia para verificação das características que foram calculadas nas instalações já energizadas, permitindo a execução de levantamentos periódicos em instalações onde o fornecimento de energia é crítico e, portanto, não pode ser desligada do sistema.

1. INTRODUÇÃO

Os estudos de sistemas de aterramento normalmente são efetuados em etapas separadas. Primeiro, calcula-se aproximadamente a distribuição de corrente de curto-circuito, admitindo-se valores pré-concebidos de resistências de aterramento dos elementos que compõem o sistema interligado. Depois, simula-se o sistema em projeto com a corrente previamente calculada, ou com um valor previamente estabelecido. De posse dos valores de resistência calculado na simulação, pode-se reiniciar o processo com um novo valor de resistência, agora mais próximo do real, e recalcula-se a distribuição das correntes de curto. A idéia principal deste trabalho é implementar uma análise conjunta destes dois estudos, onde um resultado alimenta o outro processo e assim sucessivamente, até uma convergência de valores. Deste modo, poderemos obter resultados mais condizentes com a realidade de uma maneira mais prática e eficiente.

Ao passo que este processo é apresentado, outros dois são utilizados: um sistema especializado para facilitar o projeto de sistemas de aterramento; e outro de verificação das características com medições em campo, inclusive em instalações energizadas, permitindo uma confirmação dos procedimentos teóricos com resultados medidos na prática em instalações reais existentes.

2. METODOLOGIAS

Para a realização deste trabalho, algumas metodologias foram utilizadas e serão descritas a seguir.

2.1. Projeto de um Sistema de Aterramento Auxiliado por Computador

Para auxiliar a confecção de um projeto de sistema de aterramento utiliza-se um programa especializado, baseado em plataforma AutoCAD, com base nas informações geométricas da área a ser coberta pela malha. A partir de dados iniciais previamente adquiridos, como a estratificação do solo em camadas; a definição das correntes de curto-circuito na barra em estudo, proveniente dos estudos tradicionais de curto; e a estimativa da corrente dissipada pela malha, pode-se iniciar o processo de distribuição dos cabos da malha de aterramento de modo não-uniforme, conforme definido por ⁶. Este processo agiliza o desenho de uma malha, pois distribui os cabos de tal maneira que haverá uma otimização na distribuição dos potenciais no solo, facilitando o resultado final.

Na prática este sistema pré-dimensiona geometricamente a distribuição de cabos de modo a otimizar a distribuição dos potenciais no solo. Um exemplo de saída está mostrado na figura abaixo:

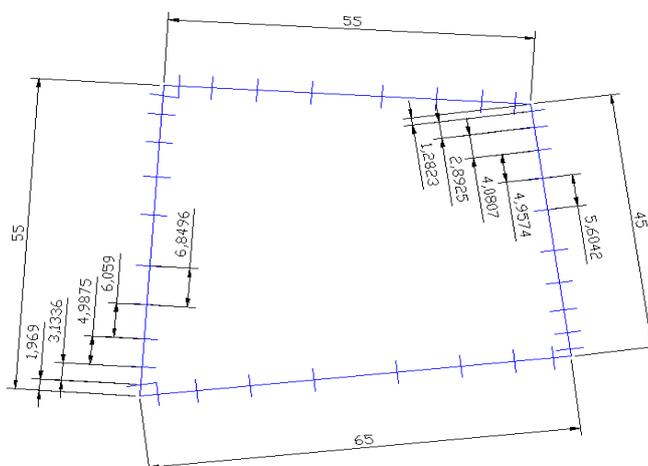


Figura 1 – Exemplo de Distribuição dos Cabos

2.2. Distribuição da Corrente de Curto-Circuito

A consideração de que um sistema de aterramento é, na verdade, um conjunto de elementos interconectados entre si leva a uma dificuldade adicional, porém extremamente relevante. Torna-se necessário o cálculo o mais preciso possível da distribuição das correntes de curto-circuito em um evento por todos os componentes do sistema. Podemos citar como exemplo de interconexão o sistema abaixo:

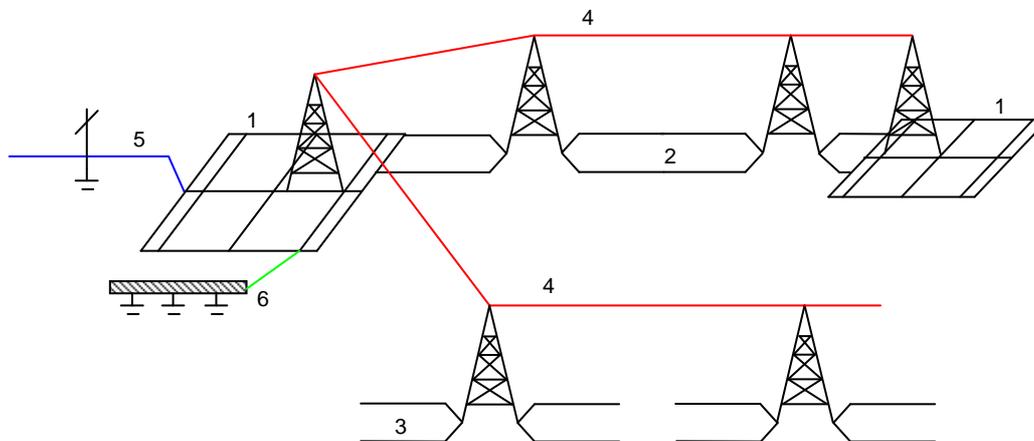


Figura 2 – Sistema de Aterramento Interconectado

Nota-se que, em um evento que ocorra na barra da SE, haverá circulação de corrente de curto pelos cabos-guarda das linhas de transmissão, cabos contrapeso, neutro dos alimentadores e blindagem dos cabos de potência, além das malhas das subestações. A distância das SE's terminais também interfere na distribuição de correntes.

A metodologia descrita em ¹¹ foi utilizada para este cálculo, apenas com a ressalva de que não serão utilizados cabos contrapeso contínuos. Esta metodologia é bastante abrangente e tem como seqüência lógica os pontos:

- a) Transformação das correntes induzidas nas linhas de transmissão por fontes de corrente nos terminais da linha;
- b) Redução das linhas por circuitos *ladder* equivalentes;
- c) Computa-se (ou não) as impedâncias mútuas entre sistemas (por exemplo, pés de torres adjacentes);
- d) Cada elemento do sistema estará conectado e, a partir das correntes de curto calculadas por processos tradicionais, poderemos obter as correntes e tensões em quaisquer pontos em estudo.

Alternativamente, cada trecho de linha pode ser traduzido pelo seu *ladder* equivalente, introduzindo mais facilidades no estudo.

2.3. Simulação de Sistemas de Aterramento Interconectados ou Independentes

A metodologia utilizada para cálculo da distribuição de potenciais em um sistema de aterramento é baseada em ² e ⁴, considerando que cada sistema de aterramento é uma superfície equipotencial. É um processo já tradicional e que apresenta excelentes resultados mesmo em sistemas grandes, desde que utilizada para uma situação de regime, isto é, para correntes de curto permanentes, e não nos momentos transitórios.

Esta simulação produz a distribuição de potenciais em qualquer ponto do solo, fornecendo ainda a distribuição de potenciais relativos, como potenciais de toque e passo em um determinado ambiente em estudo.

Introduziu-se, neste estudo, a conexão de mais de um elemento, compondo sistemas interconectados de aterramento, na simulação. Esta diferenciação tornou possível a simulação de diversas situações, como será mostrado a seguir. Como a metodologia calcula o acoplamento resistivo de todos os elementos de um sistema, é possível inferir as interferências entre eletrodos de aterramento em vários casos, onde encontramos fatores díspares, como resistividades extremas ou características geométricas e construtivas. Adicionalmente, cada elemento pode dissipar uma parcela de corrente, proveniente da etapa anterior, que resultará numa simulação muito mais próxima da realidade.

2.4. Verificação das Características de um Sistema de Aterramento

Finalmente, de posse de uma simulação detalhada e de um projeto otimizado, torna-se necessário aferir em campo os dados calculados. Como existe a dificuldade cada vez mais premente da continuidade dos serviços de energia, é inexequível a desconexão de um elemento do sistema para a verificação de suas características. Portanto, uma nova abordagem para se medir um sistema de aterramento em subestações energizadas foi elaborada, tendo em mente a facilidade de execução e, principalmente, na segurança dos técnicos envolvidos na tarefa.

Na prática, pode-se isolar cada sistema de aterramento através de pontos de desconexão previamente planejados e executados. Um ponto em especial é a desconexão dos cabos guarda da linha de transmissão, que é feita através de isoladores disco especialmente montados para este fim, evitando desconectar os cabos tensionados, conforme figura a seguir:



Figura 3 – Desconexão de LT

Adicionalmente, desconectam-se outros elementos através de caixas de inspeção, como os cabos contrapeso e neutros de alimentadores.

O método de medição mais adequado para estes sistemas é o de injeção de corrente ou da queda de potencial, como tratados na referência ¹³.

3. APLICAÇÕES E SIMULAÇÕES

Além de diversas comparações com sistemas computacionais já existentes, vários sistemas reais foram simulados, e depois medidos, para confirmar a eficácia das metodologias empregadas. Assim, escolheram-se algumas instalações projetadas e simuladas pelo método aqui detalhado e que estão atualmente operando no sistema da CPFL.

Em especial, as instalações onde as características eram particularmente diferenciadas foram escolhidas. É o caso das subestações Aeroporto, em Mirassol/SP, e Antonina, em Jaú/SP, que possuíam, respectivamente, resistividade do solo alta e baixa, evidenciando as interferências entre elementos.

3.1. Análise do Sistema de Aterramento da SE Aeroporto

O sistema em análise constitui-se da malha da SE e do aterramento da 1ª estrutura da LT que alimenta a SE, conforme ilustrado abaixo na tela do programa:

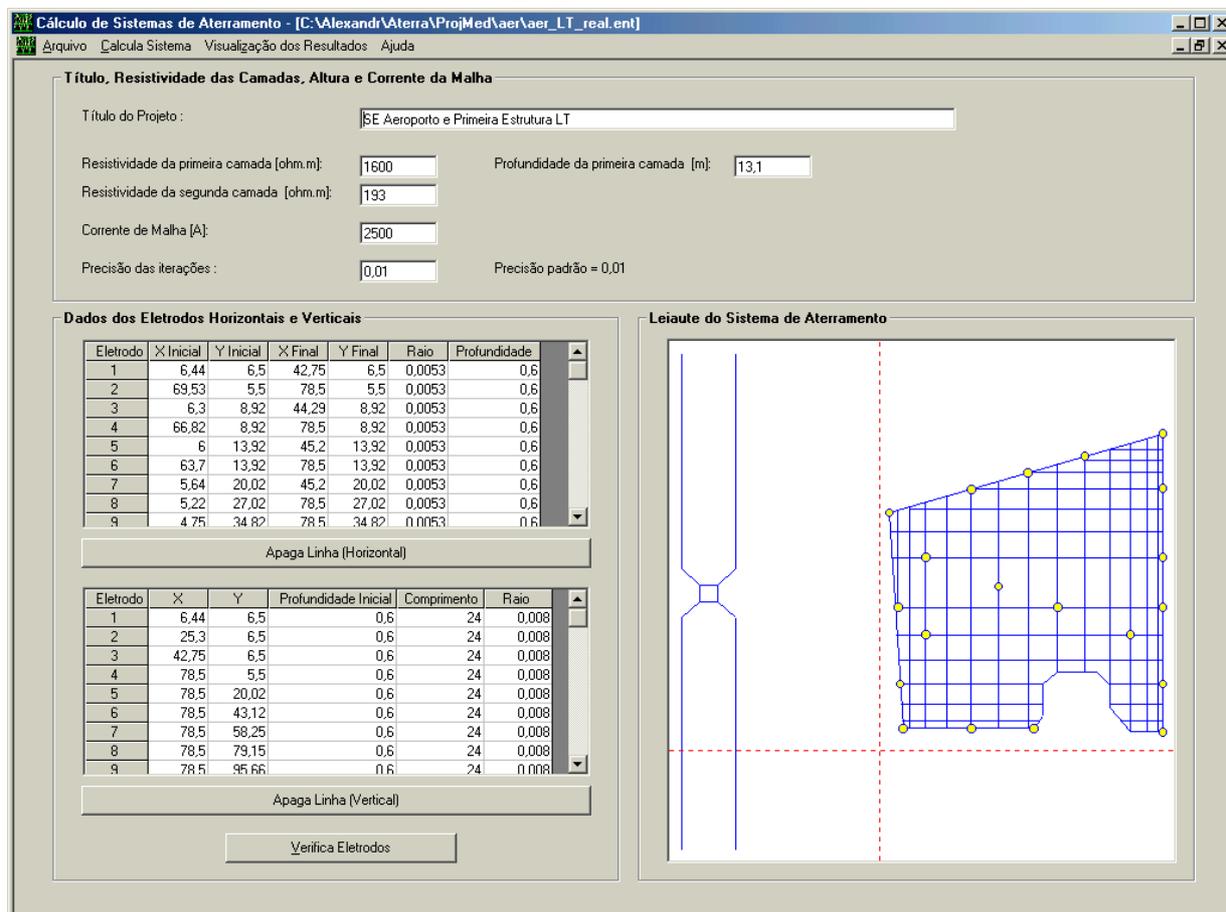


Figura 4 – Sistema Simulado – SE Aeroporto

A SE Aeroporto, de Mirassol/SP, apresenta a seguinte estratificação do solo:

Tabela 1 – Estratificação do Solo – SE Aeroporto

Resistividade da 1ª. Camada (ρ_1):	1.600 $\Omega \cdot m$
Resistividade da 2ª. Camada (ρ_2):	193 $\Omega \cdot m$
Profundidade da 1ª. Camada (h)	13,1 m

As características adicionais, que determinaram a escolha da SE para análise, foram o fato de a SE possuir um muro que a delimita, não necessitando de cerca (e conseqüentemente da malha da cerca); de possuir baixa resistividade na segunda camada, o que possibilitou o uso de hastes profundas (18 m); e de estar em uma área da cidade que facilitava as medições posteriores.

Neste caso, as resistências e elevações de tensão desenvolvidas nos sistemas são:

Tabela 2 – Valores Calculados – SE Aeroporto e Estrutura LT

Elemento	Elevação de Tensão [V]	Resistência [Ω]
Malha da SE	3276,25	1,310
Estrutura LT	2044,27	17,036

Como resultado da simulação, podemos ver os gráficos seguintes que ilustram as tensões desenvolvidas quando do curto na SE:

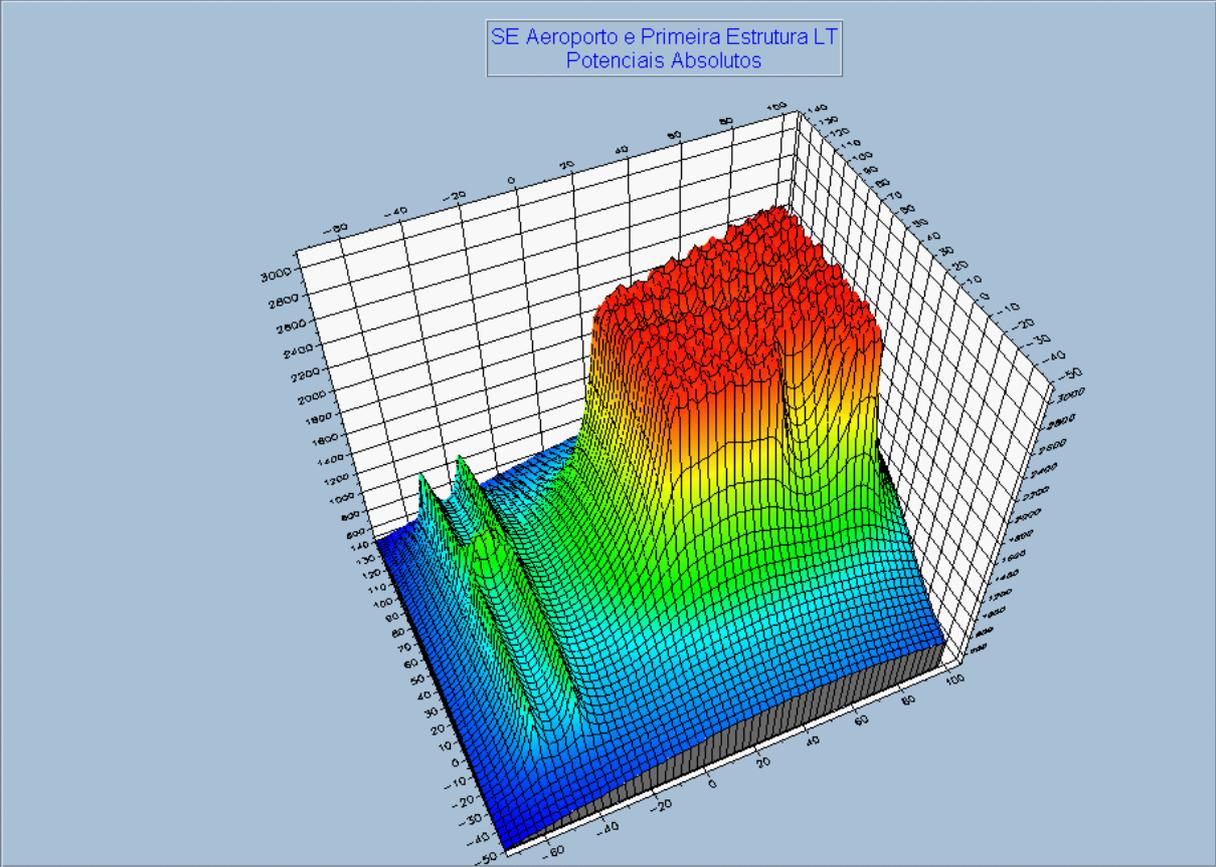


Figura 5 – Simulação – 3D

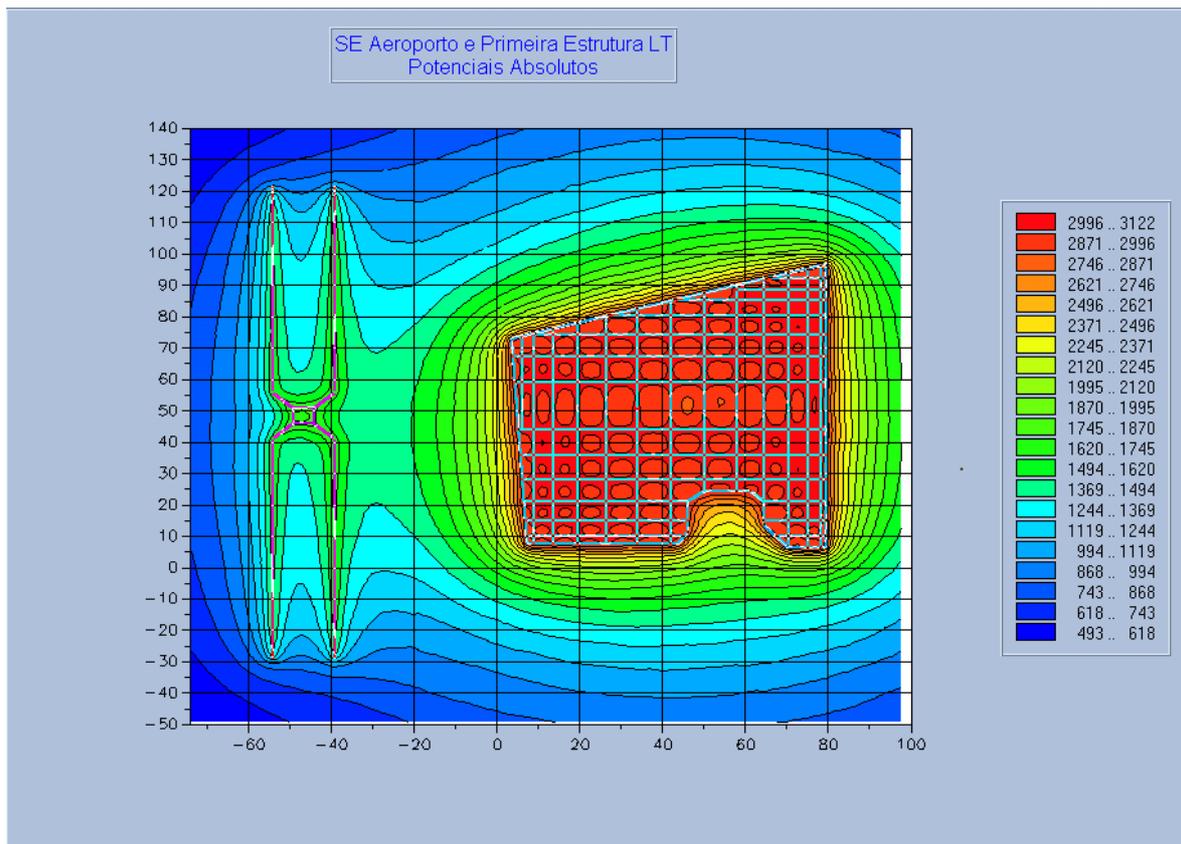


Figura 6 – Simulação – Curvas de Nível

Pode-se notar que a interferência entre as malhas é pequena, pois a resistividade é alta, principalmente na primeira camada, onde está a malha da LT.

E quanto aos valores medidos? O gráfico a seguir mostra algumas das várias medições, em vários ângulos, da resistência da malha:

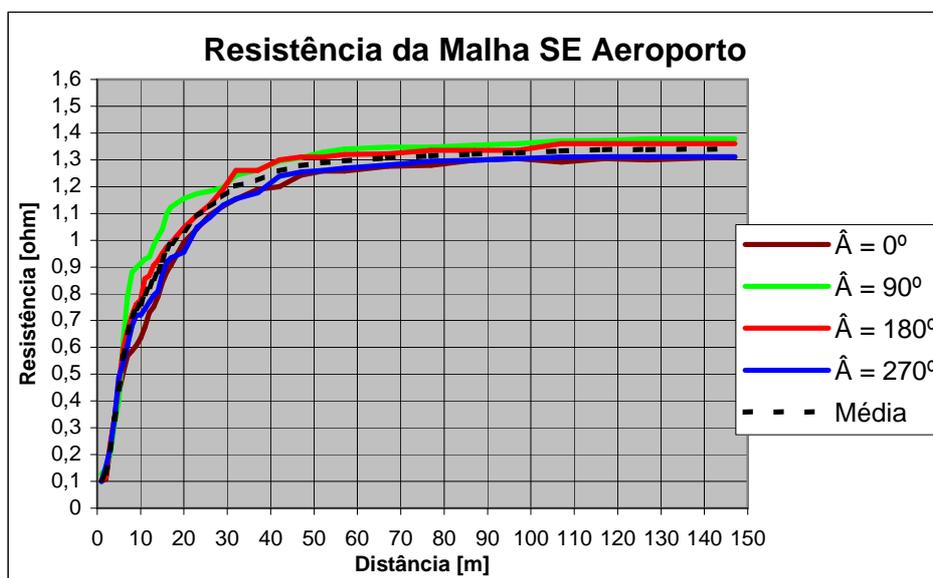


Figura 7 – Gráfico das Medidas

Conforme se pode notar, o valor calculado para a resistência da malha é muito próximo do valor medido. Outras medições foram realizadas, como levantamento de potenciais no solo e tensões de passo e toque, e todas demonstraram que os valores calculados estão condizentes com os medidos.

Para efeito de comparação, temos:

Tabela 3 – Comparação dos Valores Medidos e Calculados – SE Aeroporto

	Medido	Calculado	Desvio [%]
Resistência da Malha	1,341	1,310	2,312
Elevação de Potencial	3.352,5	3.276,25	2,274

3.2. Análise do Sistema de Aterramento da SE Antonina

O segundo sistema em análise constitui-se da malha da SE, da malha da cerca e do aterramento da 1ª estrutura da LT que alimenta a SE, conforme ilustrado abaixo na tela do programa:

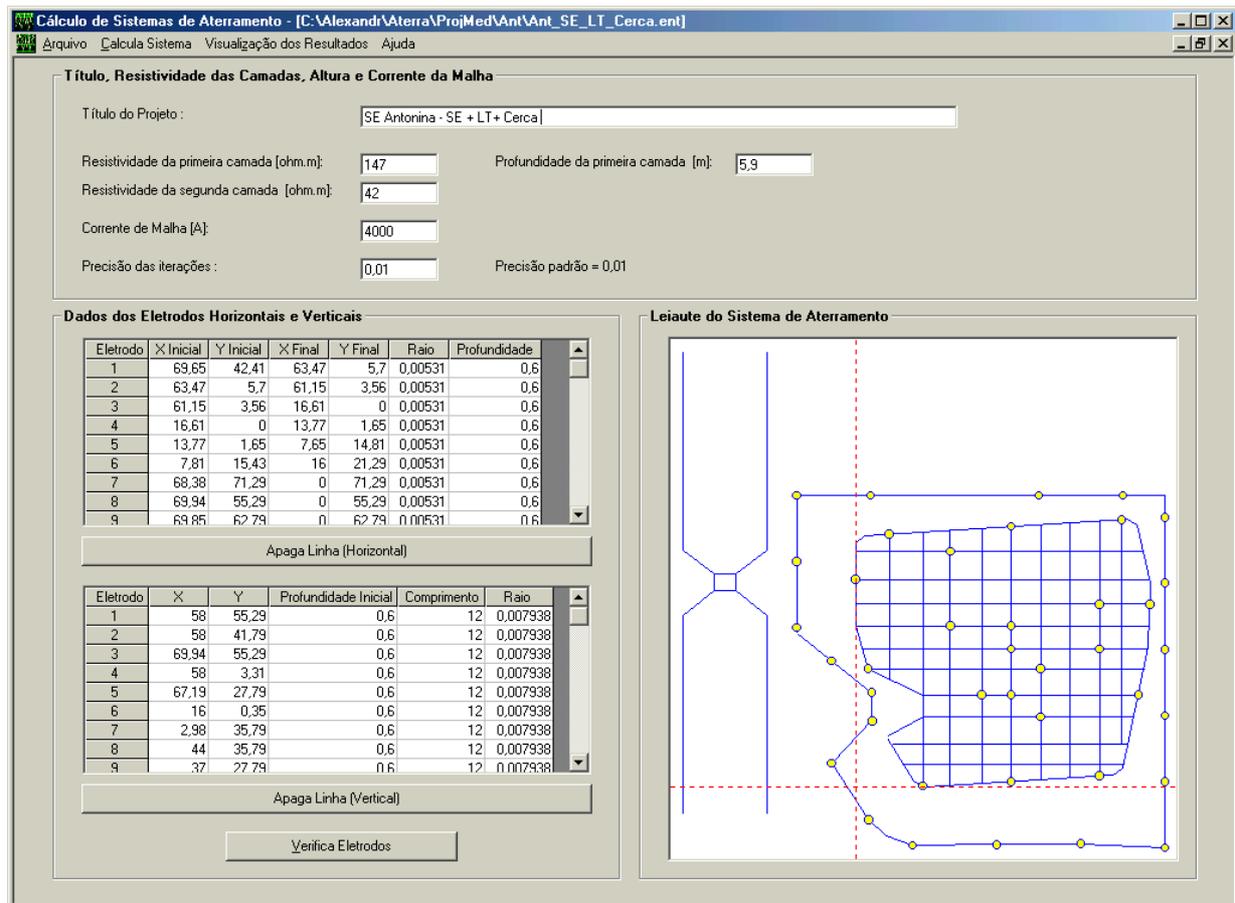


Figura 8 – Sistema Simulado – SE Antonina

A SE Antonina, de Jaú/SP, apresenta a seguinte estratificação do solo:

Tabela 4 – Estratificação do Solo – SE Antonina

Resistividade da 1ª. Camada (ρ_1):	147 $\Omega \cdot m$
Resistividade da 2ª. Camada (ρ_2):	42 $\Omega \cdot m$
Profundidade da 1ª. Camada (h)	5,9m

Aqui, diferentemente do caso anterior, notam-se resistividades muito baixas, além do fato de esta SE possuir cerca com malha própria, e a estrutura da LT participar da simulação mais ativamente, como se verá.

O cálculo apresentou os seguintes módulos de correntes para os eletrodos em análise:

Tabela 5 – Correntes nos Eletrodos

Eletrodo	Malha SE	Cerca	Estrutura LT
Corrente de Curto	4.000 A	0 A (eletrodo passivo)	180 A

Ao simular, chegamos aos seguintes gráficos:

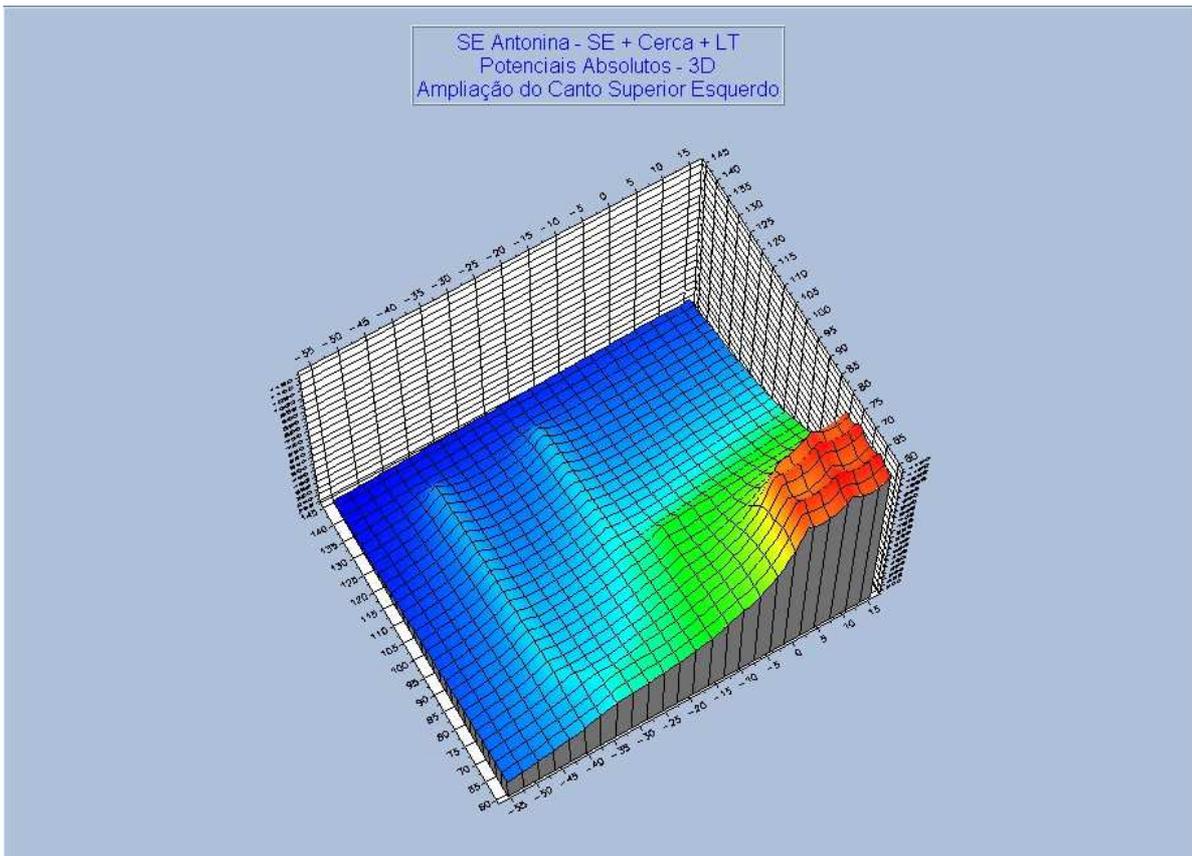


Figura 9 – Simulação – 3D

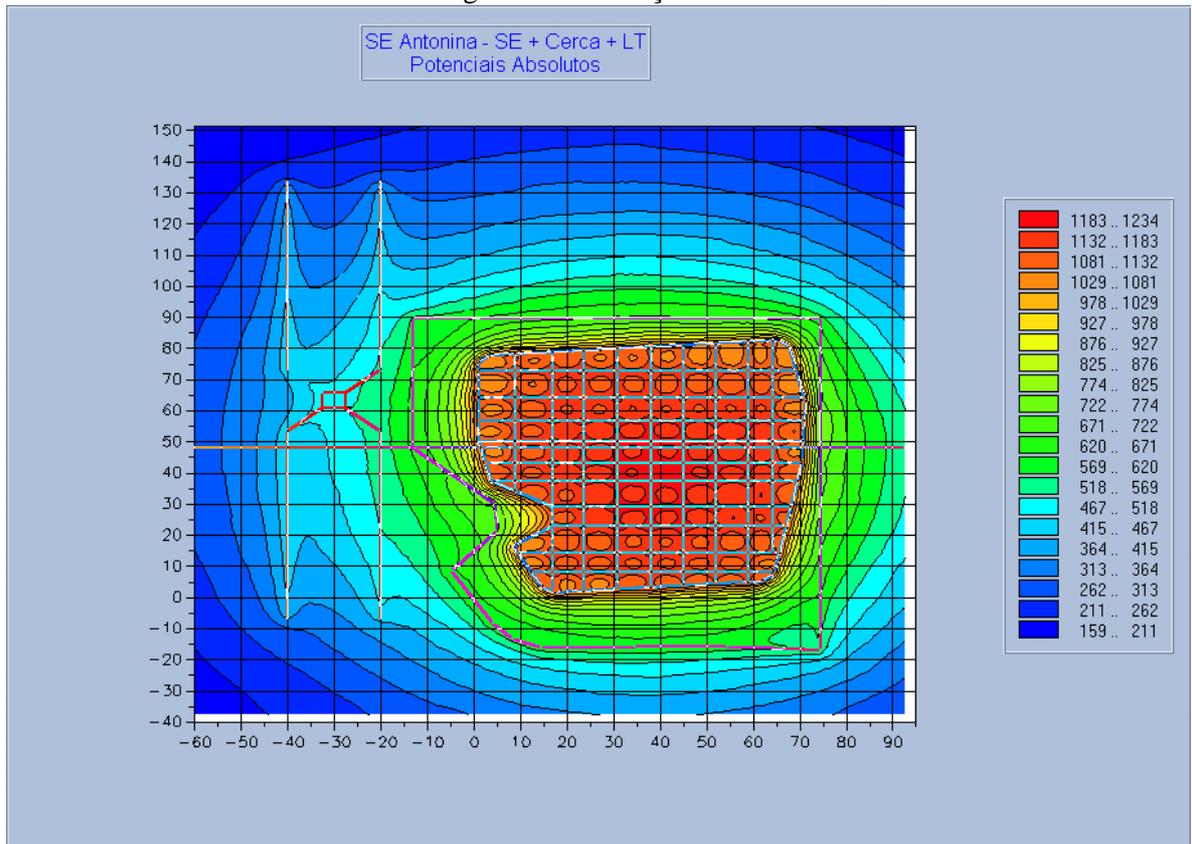


Figura 10 – Simulação – Curvas de Nível

Sem dúvida chegamos a uma interferência muito mais visível, neste caso, graças à resistividade menor, e ao fato de possuímos mais eletrodos na simulação.

Os valores de elevação de potencial e das resistências calculadas são:

Tabela 6 – Valores Calculados

Eletrodo	Corrente Aplicada	Resistência Calculada	Elevação de Potencial
Malha SE	4.000 A	0,323 Ω	1.291,3 V
Malha Cerca	0 A	0,163 Ω	650,2 V
Estrutura LT	180 A	2,995 Ω	539,16 V

Da mesma forma, as medições foram feitas em várias direções e tipos. Seguem algumas delas:

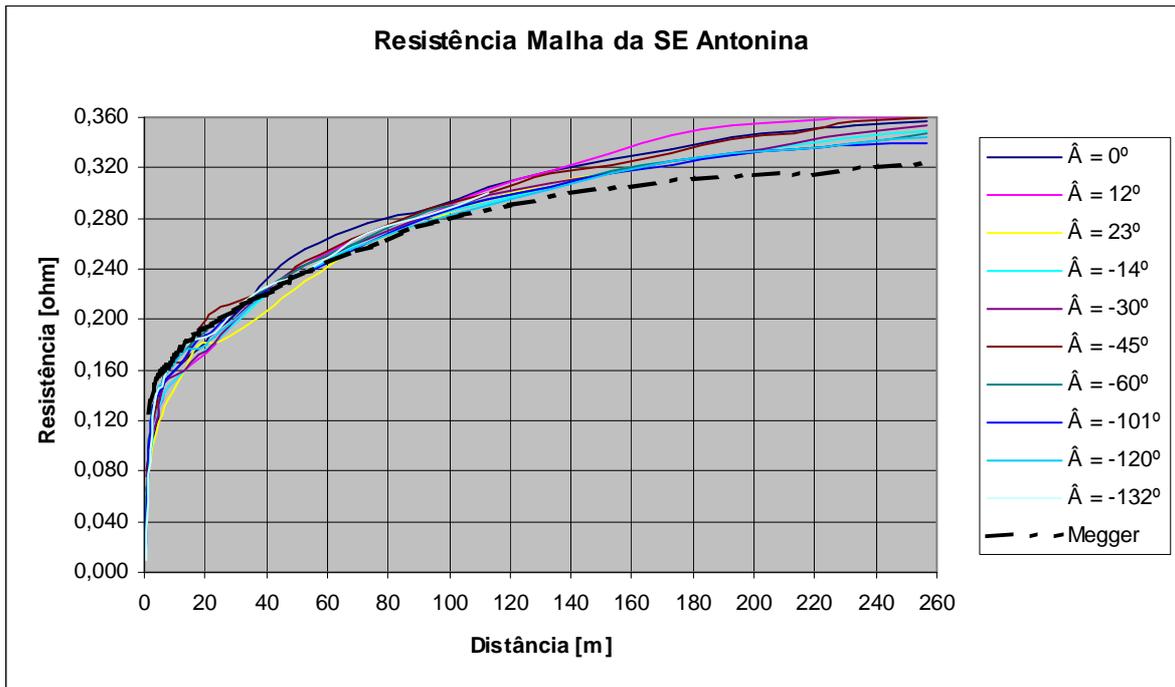


Figura 11 – Medições de Resistência SE Antonina

E, assim como no caso da SE Aeroporto, foram efetuadas medidas de tensão de toque, antes e depois da energização, e comparadas com as calculadas:

Tabela 7 – Tensões de Toque Medidas

Pont o	Inversão de Corrente		Megger	
	Antes Energ.	Depois Energ.	Antes Energ.	Depois Energ.
T1	173	164	170	160
T2	234	214	231	200
T3	315	298	309	280
T4	183	157	181	148
T5	142	131	139	116
T6	122	117	117	112
T7	179	160	175	152
T8	112	97	110	96
T9	71	65	68	60
T10	223	221	220	217

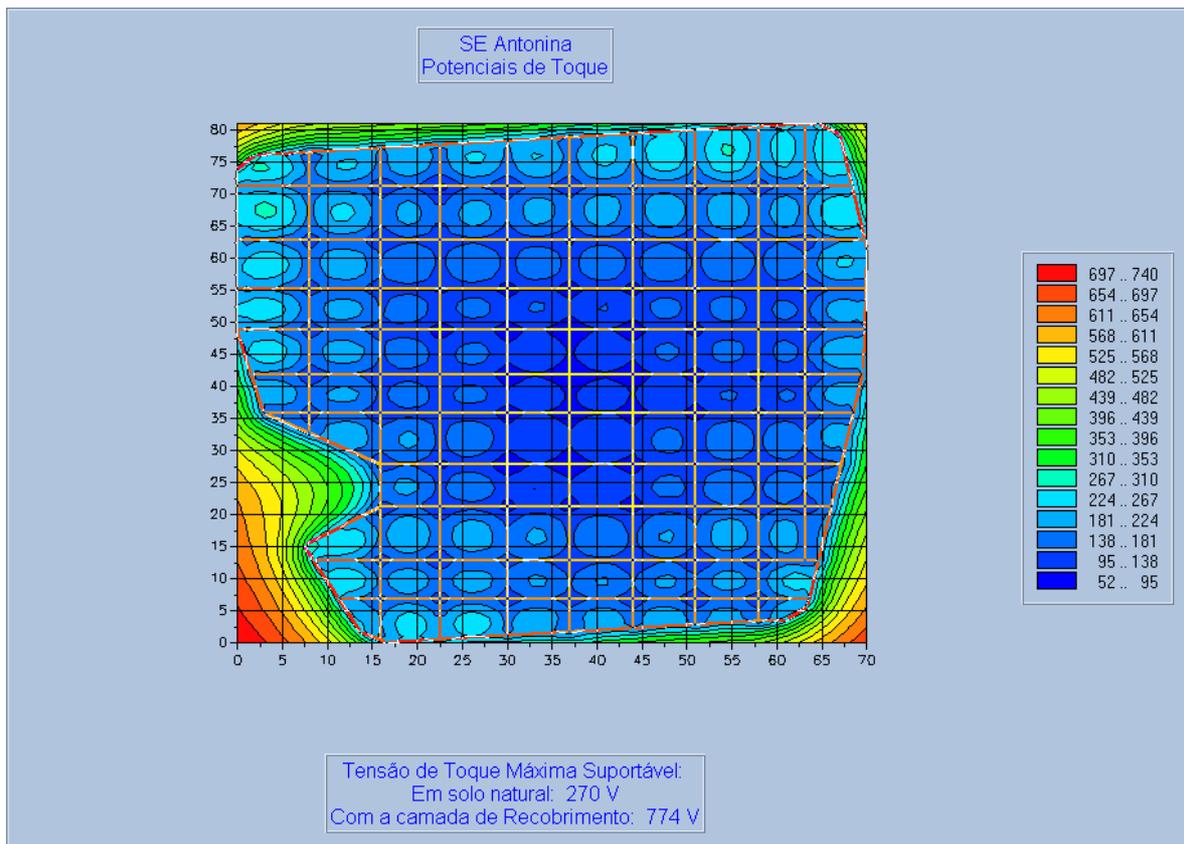


Figura 12 –Tensões de Toque Calculadas

É importante ressaltar que as medições foram efetuadas antes e depois da energização, em vários métodos, com resultados muito próximos dos calculados:

Tabela 8 – Comparação entre Métodos e Épocas de Medição

Método	Freq. [Hz]	Corr. [A]	Tipo de Onda	Antes energização (17.12.1997)	Depois energização (20.01.1998)
Inversão de Corrente	60	40,5	Senoidal	0,372 Ω	0,316 Ω
Megger DET 2/2	105 a 150	0,050	Quadrada	0,340 Ω	0,314 Ω

4. CONCLUSÕES

A maior contribuição deste trabalho é o uso integrado de metodologias para projeto, definição de correntes de curto, simulação de vários sistemas concomitantemente e levantamento de características em campo, que permitem tratar do processo aterramento como um todo, havendo, portanto, uma integração muito mais intensa, permitindo um controle melhor de cada etapa.

Não basta, é claro, ater-se a um destes pontos somente. Busca-se nesta área, um profissional que possa interagir mais ativamente em mais pontos ao mesmo tempo. O estudo mostra que é possível atender várias solicitações e exibir resultados convincentes ao mesmo tempo.

Um dos grandes objetivos era apresentar resultados de sistemas em situações reais, onde correntes de curto são dissipadas ao mesmo tempo por elementos distintos, mas que também interferem entre si. Neste ponto, os dados apresentados mostram qualitativamente e quantitativamente o que acontece aos sistemas quando uma situação de curto acontece num sistema interligado.

Outro ponto bastante esclarecedor, e que pode ser muito explorado, é a interação entre sistemas de acordo com as condições locais do solo. Pudemos verificar como são alterados os acoplamentos resistivos e, conseqüentemente, as tensões desenvolvidas para solos com parâmetros bastante diferenciados, com baixos e altos acoplamentos (respectivamente, resistividades altas e baixas). Ao mesmo tempo, verificamos que há uma relação imediata e direta entre a estratificação do solo e a interferência do eletrodo auxiliar de corrente nas medições das características de um sistema de aterramento. Quanto menor a resistividade do solo, mais afastados deverão estar os eletrodos numa medição; em contrapartida, para um terreno com resistividade muito alta, o eletrodo auxiliar pode estar bem próximo.

Assim, concluiu-se que a idéia disseminada de que o eletrodo auxiliar de corrente deve sempre estar afastado do eletrodo sob teste em no mínimo cinco vezes a maior dimensão deste último não é correta, como afirmam várias referências.

Além de serem verificadas, nas simulações, as interações entre malhas de aterramento e eletrodos passivos, o método mostra como se portam n elementos escoando cada qual uma parcela da corrente de curto total para o solo. Pode ser, inclusive, estendido para a situação de retorno de corrente em uma subestação terminal, bastando utilizar a corrente como sendo negativa em relação àquela injetada pela malha 'principal'. Neste caso, porém, a tensão de referência, para os eletrodos com injeção negativa de corrente, continua sendo a terra remota, mas seus valores de tensão absoluta serão negativos e, portanto, caracterizam-se como potenciais transferidos se medirmos a partir dos eletrodos com injeção positiva. Um uso simples deste sistema é a situação onde seriam simulados apenas o eletrodo principal (malha) e o eletrodo auxiliar de corrente de uma medição, onde facilmente poderia ser observada a presença ou não de interferência entre eles – para que não houvesse interferências, bastaria que houvesse um patamar de tensões nulas durante um certo intervalo de área.

No que se refere ao cálculo de distribuição de curto circuito, uma das vantagens do sistema é a possibilidade de se ter um procedimento iterativo combinado, isto é, a partir de valores inicialmente calculados para as resistências dos elementos, calculam-se as correntes que fluem pelos diversos elementos. Depois, procede-se à simulação, que trará resultados mais reais de resistências. De posse destas últimas, reiniciamos o processo, que agora trará resultados muito mais próximos dos finais (de um modo geral, em duas iterações o desvio cai para menos de 3%) e, por sua vez, irão gerar valores de resistência quase idênticos aos anteriores (caso não se alterem os parâmetros do solo nem as geometrias dos eletrodos). O processo que se obtém atualmente é calcular cada resistência de aterramento e partir para a distribuição de corrente de curto, que será tida como final. Ocorre, porém, que as resistências sofrerão alterações quando forem analisadas em conjunto, devido aos acoplamentos entre elementos.

Especial atenção foi dada no que se refere às medições em campo. A facilidade encontrada com o método de medida estabelecido auxiliou – e também incentivou – o desenvolvimento de toda a parte teórica. Apresentamos apenas uma pequena parcela de ensaios realizados. No todo, até 2002, já foram ensaiadas mais de 20 subestações da CPFL e em torno de uma dúzia de subestações particulares de terceiros. Esta bagagem prática levou à confirmação das teorias e demonstrou que o caminho trilhado foi vitorioso.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ¹. Institute Of Electrical And Electronics Engineers – *IEEE Guide For Safety In AC Substation Grounding*. In: IEEE Standard 80, New York: IEEE Press, 2000.

2. DAWALIBI, F. & MUKHEDKAR, D. *Optimum Design of Substation Grounding in a Two-Layer Earth Structure – Parts I and II*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-94, no 2, March/April 1975.
3. SVERAK, J. G. *Optimized Grounding Grid Design Using Variable Spacing Technique*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-95, no 1, January/February 1976.
4. HEPPE, R. J. *Computation of Potential at Surface Above an Energized Grid or Other Electrode, Allowing for Non-Uniform Current Distribution*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, no 6, Nov/Dec 1979.
5. HAFFNER, S. L.; TELLÓ, M.; DIAS, G. A. D. *Aterramento de Cercas Metálicas de Subestações Situadas em Regiões Urbanas*. XI SNPTEE – Anais, Grupo VIII – Subestações/1991.
6. HUANG, L.; CHEN, X.; YAN, H. *Study of Unequally Spaced Grounding Grids*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no 2, April 1995.
7. ENDRENYI, J. *Analysis of Transmission Tower Potential During Ground Faults*. In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-86, no. 10, October 1967.
8. SOBRAL, S. T. & MUKHEDKAR, D. *'Decoupled' Method For Studying Large Interconnected Grounding Systems Using Microcomputers – Part I – Fundamentals*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, no 4, October 1988.
9. VERMA, R. & MUKHEDKAR, D. *Ground Fault Current Distribution In Substation, Towers and Ground Wire*. In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, no 3, May/June 1980.
10. DAWALIBI, F. *Ground Fault Current Distribution Between Soil And Neutral Conductors*. In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, no 2, March/April 1980.
11. ANNICCHINO, M. W. *Metodologia de Cálculo da Distribuição da Corrente de Falta em Sistemas de Aterramento Multiconectados*. 1995. 120p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.
12. BRODSKYN, H. O. *Ground-3D Acoplado: Uma Nova Contribuição ao Cálculo da Distribuição da Corrente de Defeito*. 1996. 64p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.
13. NAKAGAWA, F.; ALTAFIM, R. A. C.; ALEIXO, A. N. *Measurements of Grounding Resistance in AC Energized Substations – Procedures of Maintenance*. III CONLADIS – Congresso Latino Americano de Distribuição de Energia Elétrica – Anais. 1998.
14. Institute Of Electrical And Electronics Engineers – *IEEE Guide For Measurements of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems*. In: IEEE Standard 81.2, New York: IEEE Press, 1991.
15. ALEIXO, A. N. *Análise Simultânea de Sistemas de Aterramento e Distribuição de Corrente de Curto-Circuito*. 2002. 123p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.