

Metodologia de Avaliação de Integridade das Conexões de Aterramento de Equipamentos a Malhas de Subestações Energizadas

LUÍS FERNANDO DIAS

**Monografia submetida à Comissão Coordenadora do Curso de
Especialização em Engenharia de Sistemas Elétricos de Potência – CESEP, Ênfase:
Proteção Elétrica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à
obtenção do certificado da Especialização.**

Aprovada em 16 de julho de 2012



Fernando Henrique Silveira - Dr.

Supervisor



Silvério Visacro Filho - Dr.

Coordenador do CESEP

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 RELEVÂNCIA E CONTEXTO DA INVESTIGAÇÃO	1
1.2 OBJETIVO E METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	2
2. PROJETO DE MALHA DE ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÃO	4
2.1 INTRODUÇÃO.....	4
2.2 ASPECTOS BÁSICOS RELATIVOS AO ATERRAMENTO ELÉTRICO.....	4
2.2.1 Tensão de Passo	7
2.2.2 Tensão de Toque.....	9
2.3 PROJETO DE MALHA DE ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÃO	10
2.3.1 Estratificação do Solo	11
2.3.2 Características Técnicas das Linhas de Transmissão (LT's) e Linhas de Distribuição (LD's).....	15
2.3.3 Configuração do Sistema.....	15
2.3.4 Potência de Curto-circuito Atual e Futura.....	15
2.3.5 Estudo de Distribuição da Corrente de Curto-circuito (ATP).....	16
2.3.6 Determinação da Corrente Malha-solo.....	16
2.3.7 Calculo das Tensões de Toque e Passo de Segurança	16
2.3.8 Definição da Configuração Básica da Malha (Reticulado)	16
2.3.9 Simulações e Verificação da Segurança (Prog. Malto ou SE Ground) .	16
3. MÉTODOS PRÁTICOS PARA DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE MALHAS DE ATERRAMENTO	19
3.1 INTRODUÇÃO	19
3.2 MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO COM A MALHA DESENERGIZADA: MÉTODO DA QUEDA DE POTENCIAL OU MÉTODO DE FRANK WENNER	20
3.3 TESTES DE INJEÇÃO DE CORRENTE EM MALHAS DE ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÃO ENERGIZADAS	22
3.3.1 Descrição do Método	22
3.3.2 Segurança das Pessoas e Proteção dos Equipamentos	24
4. TESTES DE CONTINUIDADE DAS INTERLIGAÇÕES ENTRE OS EQUIPAMENTOS E À MALHA DE ATERRAMENTO UTILIZANDO TERRÔMETRO ALICATE.....	26
4.1 INTRODUÇÃO.....	26
4.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO TERRÔMETRO ALICATE	27
4.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS NA UTILIZAÇÃO DO TERRÔMETRO ALICATE.....	28

4.4	METODOLOGIA DE MEDIÇÃO.....	29
4.5	SEGURANÇA.....	32
4.6	ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS.....	32
4.6.1	<i>Subestação Joaquim Murtinho</i>	33
4.6.2	<i>Subestação Bonsucesso</i>	33
4.6.3	<i>Subestação Manga 5</i>	33
4.6.4	<i>Subestação Sabará</i>	37
5.	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	38
5.1	INTRODUÇÃO	38
5.2	CONCLUSÕES.....	38
5.3	PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	39
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40

RESUMO

As malhas de aterramento das subestações de energia elétrica desempenham um papel extremamente importante tanto no funcionamento do sistema elétrico quanto na proteção dos equipamentos e pessoas que transitam sobre elas. Sendo assim torna-se indispensável saber como está a condição operativa desse importante item após anos sendo solicitadas pelo sistema elétrico e atualmente, devido a grande incidência da ação de vandalismo.

Essa verificação até pouco tempo estava tecnicamente dominada por serem executadas em malhas de subestações desenergizadas, porém, hoje, com o constante crescimento da demanda, tornou-se difícil a liberação das instalações por horas de ensaios em condições desenergizadas.

Diante disso, estudos têm sido realizados na tentativa de propor métodos que viabilizem a realização de verificação das condições operativas de forma segura, confiável e rápida, com a instalação energizada.

Diversos métodos estão em aplicação pelo mundo, porém, inúmeros deles dispensam uma gama enorme de equipamentos, equipes e logística para uma execução confiável.

Este trabalho tem como objetivo comparar métodos em aplicação sugerindo uma nova metodologia de fácil utilização para verificação da continuidade das interligações entre os equipamentos e a malha de aterramento de subestações em condições energizadas, subsidiando a tomada de decisões quanto a necessidade de intervenção nas manutenções programadas ou até emergenciais.

O trabalho se inicia com uma apresentação básica sobre a teoria em aterramento elétrico nas concessionárias de energia elétrica. Depois são apresentadas as etapas necessárias para um projeto de malha de aterramento seguidos dos métodos utilizados em condições desenergizadas e um em condições energizadas para provocar comparação junto ao método apresentado neste trabalho. Por ultimo, são apresentados exemplos de aplicações reais, com motivações, ações e resultado.

ABSTRACT

Meshes of grounding electrical substations play an very important role both in the functioning of the electrical system and the protection of equipment and people passing over them. Therefore it is essential to know how is the operating condition of this important item after years of being requested by the electrical system and currently due to high incidence of vandalism.

This check until recently was done on grids of desenergized substations however nowadays its very difficult to release the plant for hours in order of testing on de-energized conditions.

Thus, studies have been performed to propose methods that allow the test of in safe, reliable and fast conditions, with the installation energized Several methods are in use around the world, however, many of them do not require a huge range of equipment, staff and logistics for a reliable execution.

This study aimed to compare methods in use and suggest a new methodology to check the continuity of the interconnections between equipment and the mesh of the grounding grid in substation under energized conditions, The propose method support the decision-making regarding the need for intervention in emergency or until scheduled maintenance. This work presents the basic theory of electrical grounding in electric utilities and the steps necessary to design a ground grid along with methods used in de-energized and energized conditions. Finally, we present examples of real applications, with motivations, actions and results.

TERMINOLOGIA:

Cabo Guarda ou cabo Para raios – cabos de alumínio, lançados ao topo das linhas de transmissão, que promove a blindagem sobre os cabos fase contra a incidência de raios.

Cabo Auxiliar – Cabo de valor de resistência ôhmica e comprimento conhecidos, utilizado na formação do circuito fechado para proporcionar condição de funcionamento conforme método de medição pelo Alicate – Terrômetro

Curto-Circuito (ou Falta) - Ligação intencional ou acidental entre dois ou mais pontos de um circuito elétrico através de uma baixa impedância e que compromete o funcionamento de um sistema ou equipamento elétrico.

Malha de terra – Gradeado constituído por cruzamentos perpendiculares de cabos de cobre, previamente dimensionado, posicionado 0,60 m abaixo da superfície do solo na área da subestação.

Ruído – são as interferências geradas durante a operação normal do sistema elétrico (regime permanente) ou durante as ocorrências de curto circuito no mesmo. Como exemplo de fontes de interferência pode-se citar o corona, o centelhamento em pequenos gaps e o radiofrequência.

Ponta de Prova – dispositivo de terminação posicionado na extremidade do Cabo, que interliga o instrumento ao ponto de interesse para medição

Terrômetro – instrumento para medição de resistências de aterramento e resistividade do solo.

Terra Remoto - Ligação intencional de um ponto distanciado da malha de aterramento que se deseja medir, que teoricamente atribui-se o valor de potencial nulo. Requisito para medição confiável.

1 Introdução

1.1 Relevância e Contexto da Investigação

Nos projetos de malhas de aterramento em subestações de energia elétrica, são realizadas simulações em programas computacionais para verificação dos parâmetros de segurança como tensão de toque e tensão de passo. Uma vez construídas, são realizados testes de medições de resistência ôhmica para conferência dos valores propostos pelos cálculos de engenharia. Porém, os parâmetros de segurança citados são conhecidos e avaliados somente nas simulações em fase de projeto.

Eventos de elevação de potencial em malhas de aterramento podem causar acidentes como danos de equipamentos, sejam estes do sistema de potência ou do sistema de controle como também acidentes com pessoas situadas nas áreas de abrangência dessa malha.

Para proporcionar confiabilidade de operação e segurança, principalmente em malhas já inseridas nos sistemas energizados, torna-se interessante avaliação através de testes.

Nos dias de hoje temos a necessidade de verificação das condições operativas dessas malhas de aterramento, cujos motivos são vários, como exemplos, cita-se abaixo:

- Exigências da norma NR10;
- Furto de cabos de cobre da malha de aterramento;
- Ampliação da subestação;
- Integridade das soldas de interligação dos cabos de cobre;

O segundo e o quarto exemplos acima alteram a configuração da malha de aterramento, modificando valores dos gradientes de tensões de toque e de passo, podendo resultar em condições de insegurança. Este fato requer a necessidade de avaliação através dos testes existentes.

Atualmente, como importante item de otimização dessa verificação, temos a necessidade de realização dos testes com o sistema de aterramento energizado.

Um método confiável e otimizado será de grande relevância e importância, tanto na conferência do projeto como na avaliação de segurança durante o funcionamento.

1.2 *Objetivo e Metodologia de Desenvolvimento*

O objetivo fundamental desta dissertação consiste em encontrar o melhor método de verificação dessas malhas de aterramento em subestações de energia elétrica, de forma confiável, segura e otimizada, sem necessidade de desligamento da subestação.

Para implementar tal objetivo adotou-se como metodologia o estudo dos procedimentos utilizados nos dias de hoje, com vistas a consolidar um método definitivo.

Todas as atividades realizadas terão como base a conservação dos requisitos técnicos mínimos estabelecidos pelas normas regulamentadoras, permitindo aos engenheiros e técnicos a aplicação de um dispositivo de confirmação de qualidade do projeto e de eficiência do sistema de aterramento após um longo período de funcionamento da subestação sob solicitações do sistema.

1.3 *Organização do Texto*

O texto desta monografia foi distribuído em 5 capítulos, incluindo a presente *Introdução*.

No *Capítulo 2* é realizada uma apresentação básica das etapas principais relativas ao projeto de malha de aterramento de uma subestação. De forma a tornar o texto mais didático, inicialmente serão apresentados sucintamente alguns aspectos teóricos principais, relativos aos aterramentos elétricos

No *Capítulo 3* são apresentados alguns tipos de ensaios direcionados para a conferência das condições das malhas de aterramentos em relação ao que foi projetado. Têm-se ensaios com a malha de aterramento em subestação desenergizada e energizada, possibilitando a comparação das logísticas apresentadas para as situações energizadas.

O *Capítulo 4* apresenta uma metodologia para execução de testes de continuidade em malhas de aterramento em condições energizadas, avaliando conexões enterradas entre cabos e conexões com as estruturas. A execução deste método, além de rápida e econômica, está em acordo com as normas de segurança.

As conclusões finais desta monografia, decorrentes das avaliações realizadas, assim como os possíveis desdobramentos relativos às propostas de continuidade, são apresentadas no *Capítulo 5*.

Ao final do texto são apresentadas as *Referências Bibliográficas* utilizadas.

2 Projeto de Malha de Aterramento de Subestação

2.1 Introdução

Este capítulo objetiva apresentar as etapas principais relativas ao projeto de malha de aterramento de uma subestação com base nas ações práticas e coleta de dados em campo, cálculos e aplicação de programas computacionais para simulação como o Alternative Transients Program e o EMTP – Eletromagnetic Transients Program.

De forma a tornar o texto mais didático, inicialmente serão apresentados sucintamente alguns aspectos principais, relativos aos aterramentos elétricos. Os conceitos, desenvolvimento e definições relativos a esse tema aqui apresentados são baseados na referência [Visacro, 2002].

2.2 Aspectos básicos relativos ao Aterramento Elétrico

Define-se aterramento elétrico como uma conexão elétrica proposital de um sistema físico ao solo. Basicamente o aterramento é constituído pelas conexões elétricas que conectam um ponto do sistema elétrico aos eletrodos, pelos eletrodos de aterramento (qualquer corpo metálico colocado no solo) e pela terra que envolve os eletrodos. A Figura 2.1 ilustra um sistema de aterramento.

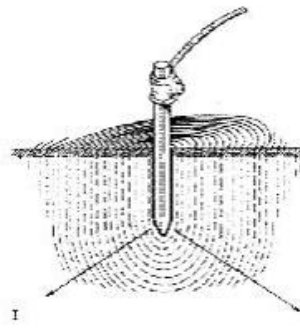


Figura 2.1 - Constituição de um aterramento [Visacro, 2002]

Para o correto funcionamento de um sistema elétrico com garantias de desempenho seguro da proteção, nível de segurança, escoando correntes atmosféricas e estáticas, é fundamental uma atenção especial para o quesito Aterramento.

O local para aterramento de um circuito elétrico pode possuir características diversas e sua variação depende da função desejada. Este pode ser o neutro da estrela de um transformador de potência, ou um terminal de um para raios, ou uma carcaça de um motor.

Para se avaliar a natureza dos aterramentos, deve ser considerado que, em geral, uma conexão a terra apresenta resistência, capacitância e indutância, cada qual influenciando na capacidade de condução de corrente para terra, como mostra a Figura 2.2

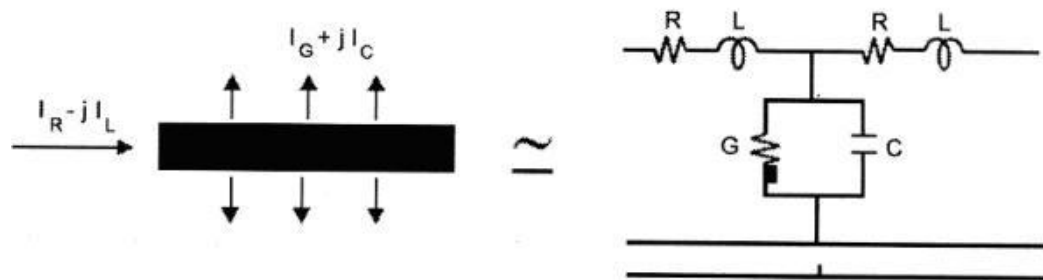


Figura 2.2 - Componentes de Corrente no solo [Visacro, 2002]

De acordo com a Figura 2.2, observa-se que a corrente para o solo é composta por quatro componentes. A corrente injetada no aterramento é dividida em duas partes.

Uma parcela é transferida perpendicular à superfície do condutor para o solo (corrente capacitiva) e a outra circula internamente pelo cabo (corrente indutiva). Essa ultima parcela provoca perdas internas ao condutor e um campo magnético é estabelecido em torno do condutor originada pela circulação dessa corrente, tanto no interior como no exterior do condutor. [Visacro, 2002]

A disposição geométrica dos eletrodos no solo depende da aplicação a que o aterramento é destinado. O mais comum é a utilização de hastes verticais, usadas principalmente quando as camadas mais profundas do solo têm menor resistividade.

O sistema de aterramento de subestações de energia elétrica é construído por malha de cabos de cobre posicionados perpendicularmente entre si, formando um gradeado denominado malha de aterramento. Esta malha está instalada sob o solo a uma profundidade definida nos resultados dos cálculos para o projeto. Nos casos mais comuns, esta profundidade varia entre 0,60 a 1m.

Para melhor entendimento sobre a importância da malha de aterramento no sistema elétrico, o diagrama da Figura 2.3 apresenta os caminhos percorridos pelas parcelas de corrente, resultado da divisão da corrente total de curto circuito, injetada na malha de aterramento, no instante em que ocorre a falta. As parcelas estão representadas por ICC (corrente de curto circuito total), a ICPR (correntes no cabos guarda) e as I_n 's (correntes nos neutros dos aterramentos dos postes de rede).

No caso apresentado, configura uma subestação onde já existem todos os elementos constituintes do sistema elétrico, como LT's fonte, LT's Carga e neutros da distribuição, todos esses já interligados à malha de aterramento. A parcela I_m (corrente de malha), é a responsável pela elevação de potencial na malha de aterramento.

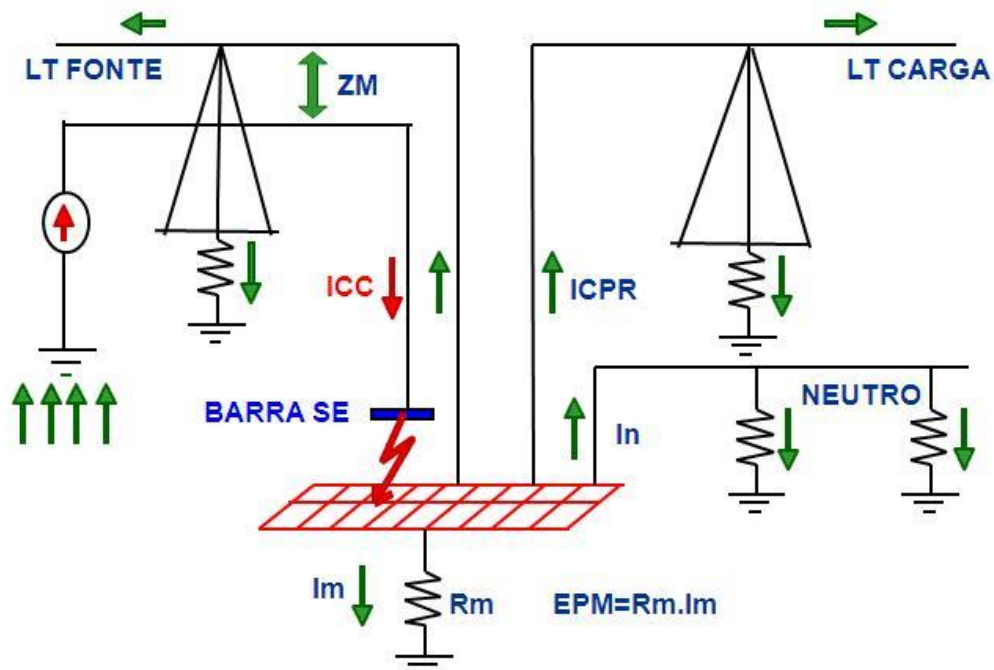


Figura 2.3 – Esquema de funcionamento do aterramento em um sistema elétrico.[Retirada da Apresentação sobre aterramento, CEMIG – outubro 2003]

A Figura 2.4 ilustra essas tensões como pode-se observar, aumentando-se as distâncias entre os cabos das malhas, os vales das curvas estarão mais profundos, consequentemente, maior será as diferenças entre os pés para o caso de tensão de passo e as diferenças entre as mãos e os pés para o caso de tensões de toque.

Potenciais de passo e toque

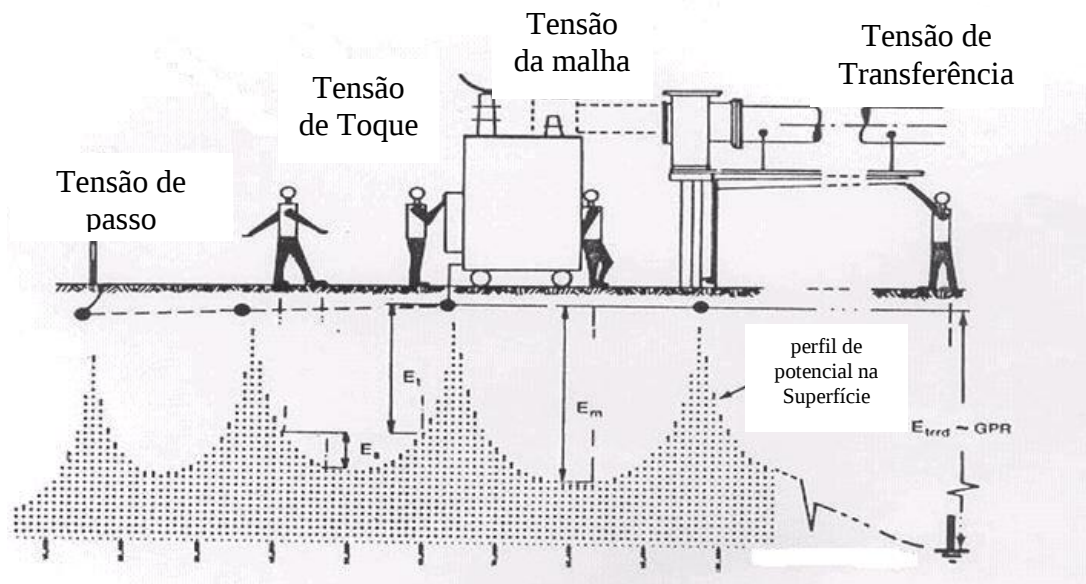


Figura 2.4 – Demonstração dos perfis da elevação de potencial na malha de aterramento.

[Adaptada da Apresentação sobre aterramento, CEMIG – outubro 2003]

Quando as partes do corpo humano são submetidas a uma diferença de potencial, o mesmo é percorrido por uma corrente elétrica, que pode resultar em diversos efeitos para o indivíduo, configurando-se como uma condição de risco. No que se refere ao aterramento elétrico, é possível caracterizar algumas dessas situações típicas quando flui corrente pelo mesmo, sendo usual classificá-las e referenciá-las como parâmetros de restrição nos projetos elétricos. Estes parâmetros são denominados tensão de passo, tensão de toque e tensão transferida. [Visacro, 2002].

2.2.1 Tensão de Passo

Se houver um indivíduo sobre a superfície dessa malha, seus pés que se encontram em posições diferentes, distanciadas de aproximadamente de 1m, estarão submetidos a uma diferença de tensão.

Essa diferença é denominada de tensão de passo. Conforme indicado na Figura 2.5.

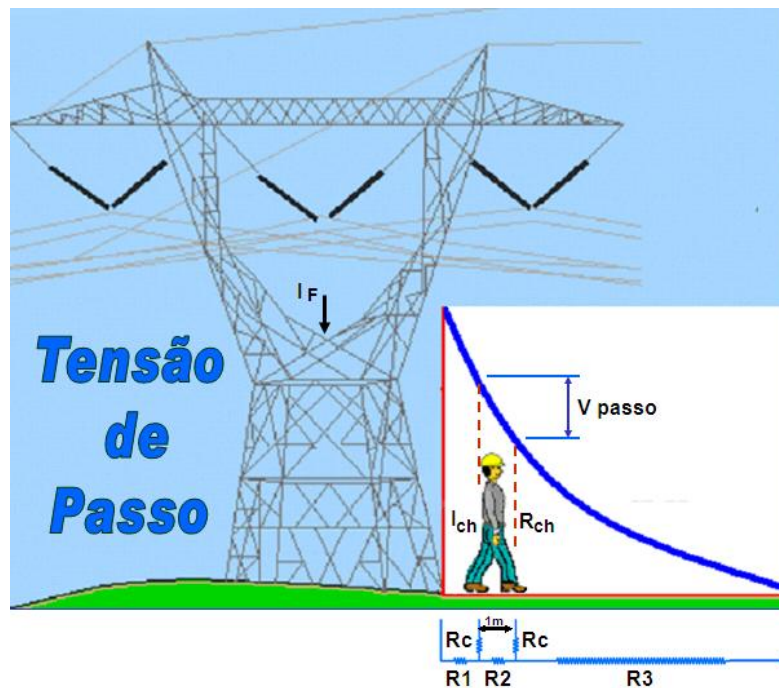


Figura 2.5 - indivíduo submetido a uma tensão de passo [Adaptada da Apresentação sobre aterramento, CEMIG – outubro 2003]

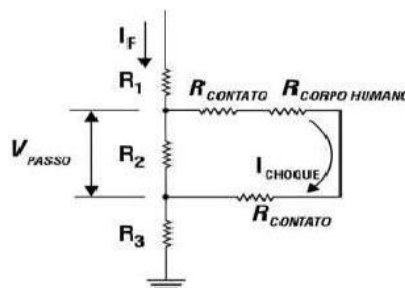


Figura 2.6 - Esquema elétrico para condição de tensão de passo [Kindermann, 1995]

A equação do potencial de passo é:

$$V_{passo} = (2R_c + R_{ch})I_{ch} \quad (2.1)$$

onde:

R_{ch} = resistência do corpo humano, considerada como $1000 \, \Omega$

R_c = resistência de contato, considerada como 3 vezes a resistividade superficial do solo

I_{ch} = corrente de choque pelo corpo humano

I_F = corrente de falha no sistema

R_1 , R_2 e R_3 são as resistências dos trechos de terra considerados.

2.2.2 Tensão de Toque

O equipamento por estar conectado à malha de aterramento, também terá uma energização igual ao potencial dessa malha. A superfície do solo da subestação também estará com uma elevação de potencial, porém serão valores menores ao da malha.

A diferença entre esses valores de tensão é denominada tensão de toque, conforme indicado Figura 2.7.

Se existir uma pessoa sobre a superfície do solo e tocando neste equipamento, estará sujeita a essa tensão que deverá ser limitada através das dimensões de quadriculados formadores da malha de aterramento, especificadas pelo projeto.

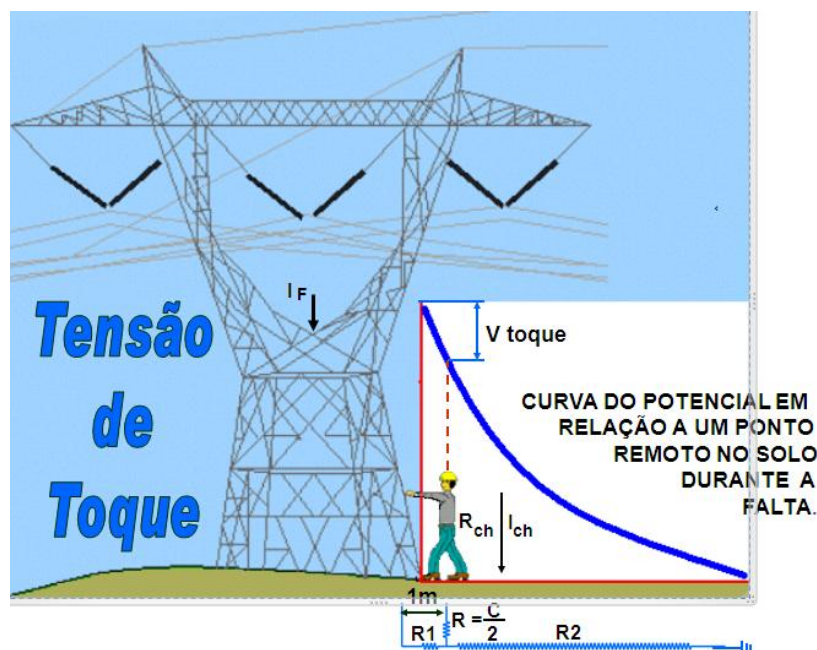


Figura 2.7 - Demonstração de um indivíduo submetido a uma tensão de toque [Adaptada da Apresentação sobre aterramento, CEMIG – outubro 2003]

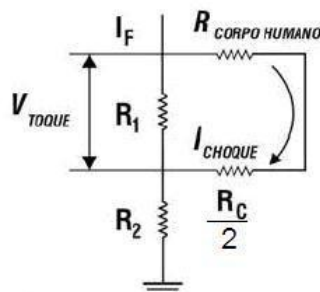


Figura 2.8 - Esquema elétrico para condição de tensão de toque [Kindermann, 1995]

A equação que nos dá o valor do potencial de toque é:

$$V_t = \left(R_{ch} + \frac{R_c}{2} \right) I_{ch} \quad (2.2)$$

onde:

R_{ch} = resistência do corpo humano, considerada como 1000Ω .

R_c = resistência de contato que pode ser considerada 3 vezes a resistividade superficial do solo.

I_{ch} = corrente de choque pelo corpo humano.

I_F = corrente de falha no sistema

R_1 e R_2 são as resistências dos trechos de terra considerados.

Com o embasamento proposto nesta primeira parte desse capítulo, será possível um melhor entendimento das etapas de projeto para a execução de uma malha de aterramento.

2.3 Projeto de Malha de Aterramento de Subestação

A realização de um projeto de um projeto de malha de aterramento de qualidade requer a determinação de variáveis como resistividade, profundidade, número de camadas do solo local, Valores das potências de curto circuito trifásicas e monofásicas, atuais e futuras, equivalentes das impedâncias dos componentes do sistema elétrico, além da avaliação das condições de risco associadas aos potenciais de toque e passo., geralmente, este conjunto de variáveis é determinado, com base no desenvolvimento de simulações utilizando programas computacionais. Dentre os diversos programas existentes, a seguir são citados alguns que as Companhias de eletricidade têm o rotineiro costume de utilização:

Ladpar: Lader dos paralelos dos neutros das saídas de 13,8 kV. Realiza o cálculo do paralelismo entre as resistências dos cabos utilizados e as resistências dos aterramentos dos postes. Realizado em todas as linhas, finalmente calcula-se o paralelo entre as linhas de distribuição, fornecendo assim o valor da resistência total desse circuito de saídas.

ATP ou EMTP: Alternative Transients Program ou Eletromagnetic Transients Program
Este é utilizado na simulação e todo o sistema interligado à malha em estudo. Através da linguagem de reconhecimento do software, são descritos todas as ligações existentes entre os componentes e seus devidos modelos elétricos. Assim, é possível verificar cada parcela de corrente que circulará no momento da falta e seus devidos trajetos. [ATPDRAW: Versão 4.0 p1, ano 1998 – 2003- Fabricante: Bonneville Power Administration – USA]

Malto [Versão 1.0, ano 1998, Fab. SES Safe Engineering Services e Tecnologias Ltda] ou SEGround [Versão 3.5, ano 2008, Fab. NSA Consultoria]. Ambos realizam as mesmas tarefas. A vantagem do SEGround em relação ao Malto é a versão brasileira. Isto favorece no preço e no

momento de assistência técnica, além de propiciar facilidades na aquisição de novos pacotes de inclusão.

Este software simula o gradeado definido em cálculos e idealizado em programas de desenho. Computacionalmente é realizada a injeção de corrente total de curto circuito na malha e demonstrado resultados em termos de valores, curvas de perfis de tensão sobre a superfície da malha. Desta forma, visualizam-se as áreas carentes de modificações devido aos valores indesejáveis de tensões de passo e toque encontrados.

2.3.1 Modelagem do solo: Determinação da resistividade e estratificação

O conhecimento do valor da resistividade do solo é fundamental no início da realização de um projeto de aterramento. [Mamede Filho, LTC, 2001]

A resistividade do solo (ρ) varia bastante de um local para outro e, às vezes, em pontos bem próximos são verificadas alterações razoáveis nos valores medidos.

Para a determinação da resistividade do solo, existem diversos métodos de medição.

Para o caso específico de subestações, as medições são usualmente realizadas após a execução de terraplenagem do local onde se instalará o pátio, já com o terreno na sua forma exigida pelo projeto.

Um método rápido de determinação da resistividade do solo baseia-se na medição da resistência de aterramento de um eletrodo vertical cravado no solo, cuja resistividade se deseja conhecer, através do método da queda de potencial. [Visacro, 2002].

O valor da resistência de aterramento de um eletrodo vertical de comprimento “l” e diâmetro “d”, pode ser determinado pela equação 2.3:

$$R = \frac{\rho_a}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} \quad (2.3)$$

onde:

ρ_a : resistividade aparente do solo no local de fixação da haste ($\Omega \cdot m$);

l: comprimento cravado da haste (m);

d: diâmetro da haste (m).

Consegue-se desta forma obter o valor de ρ_a na profundidade do eletrodo, uma vez medido o valor de R.



Figura A



Figura B

Figura 2.9 – Dois modelos de terrômetro convencionais: Na Figura A tem-se um a manivela modelo Null Balance fabricante Bidlle Instruments e na Figura B tem-se um eletrônico modelo GEOHM 2 fabricante GOSSEN, a baterias. [Propriedade CEMIG]

O método mais utilizado no âmbito das concessionárias é o método de Franklin Wenner. Este método consiste na utilização quatro hastes e um equipamento terrômetro, conforme modelos mostrados na Figura 2.9.

As 4 hastes são cravadas em distâncias iguais entre si e em mesma profundidade, que variando normalmente de 4 a 32 m, dependendo da área a ser medida.

A cada distância cravada realiza-se a medição e reiniciamos o processo de afastamento das hastes para o próximo espaçamento da tabela e assim por diante até completar a maior distância possível, conforme mostrado Figura 2.10.

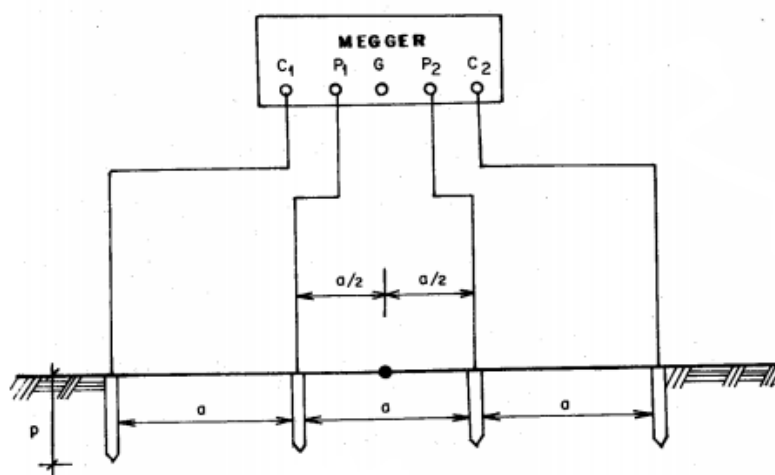


Figura 2.10 – Esquema de cravamento das hastes na utilização do método de Frank Wenner. [instrução de medição da ALSTOM – outubro 2003].

Essas cravações também devem ocorrer em diversos eixos previamente escolhidos por critérios que dividem o terreno em partes a fim de proporcionar maior abrangência das medições.

Ao se executar a medição, uma corrente elétrica é injetada na haste C1 e recuperada pela haste C2 que estão nas extremidades.

As hastes E1 e E2 que estão posicionadas entre C1 e C2, medem a queda de tensão criada pela corrente ao percorrer o solo, conforme mostrado Figura 2.11.

O instrumento converte os valores de corrente e tensão em R, indicando esse valor no mostrador.

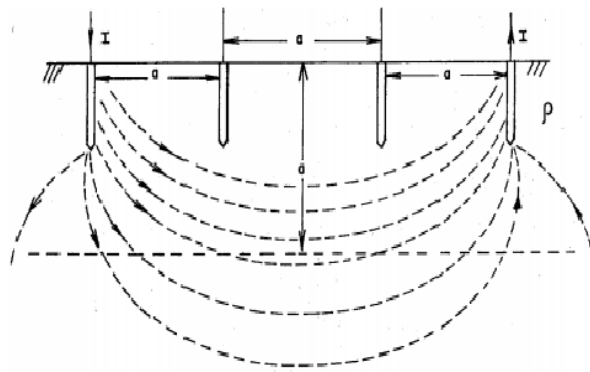


Figura 2.11 – Fluxo de corrente injetado pelo instrumento durante as medições [instrução de medição da ALSTOM – outubro 2003].

Os valores encontrados nessas medições são avaliados pela consistência entre eles e daí retirada a média que comporá um gráfico no qual são obtidos os valores de ρ_1 e ρ_2 , da seguinte forma.

ρ_1 será o valor onde o eixo y for interceptado pelo gráfico e ρ_2 será o valor onde o eixo y for interceptado pela assíntota traçada a partir do gráfico, conforme mostrado na Figura 2.12.

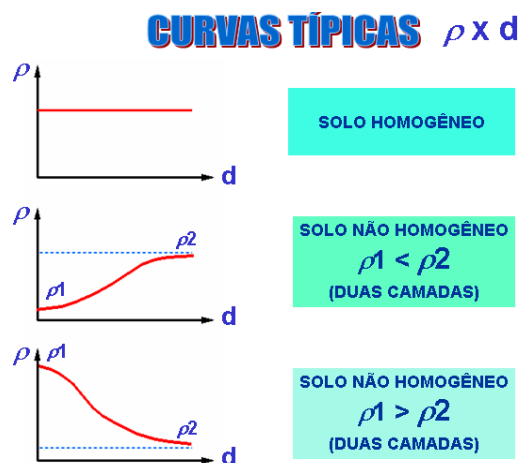


Figura 2.12 – Possíveis modelagens de solos mais comuns [Retirada da Apresentação sobre aterramento, CEMIG – outubro 2003]

Na figura 2.13, uma variável é demonstrada no próprio gráfico. É ela a profundidade da primeira camada que para ser calculada, executa-se o cálculo do M_0 utilizando os valores de ρ_1 e ρ_2 , logo após multiplica-se por ρ_1 e encontra-se o valor da espessura da primeira camada do solo.

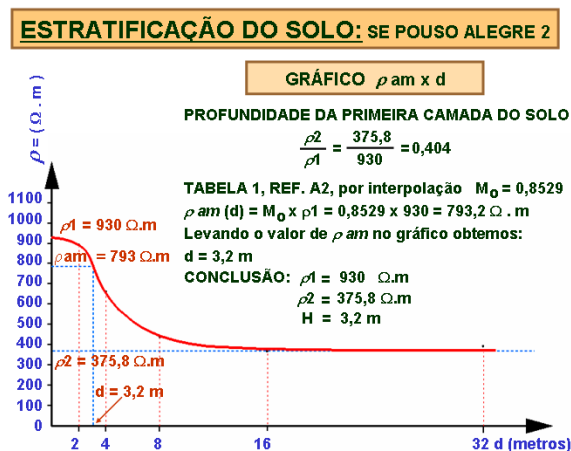


Figura 2.13 – Exemplo de caso real de uma modelagem na SE de Pouso Alegre, de propriedade da CEMIG [Retirada da Apresentação sobre aterramento, CEMIG – outubro 2003]

Outras formas de modelagem do solo como Método gráfico (utilizando curvas padrão), Método Utilizando Técnicas de otimização, Método Simplificado, Método de Pirson ou método Gráfico de Yokogawa, são utilizadas para melhor definição do terreno onde será instalada a malha de terra.

São muitas as técnicas para estratificação ou modelagem do solo, levando em consideração que, as variações dos valores de resistividade são muito menores que em relação as variações na direção vertical.[TAGG, 1964].

Na maioria dos casos, o solo é modelado por uma camada superior de profundidade (h) que é a resistividade (ρ_1), logo após está a segunda camada inferior de profundidade infinita e resistividade (ρ_2).

Estes parâmetros são fornecidos pelo gráfico de modelagem, como indica a Figura 2.13 que apresenta o gráfico de modelagem do solo da subestação de Pouso Alegre, de propriedade da CEMIG. Em algumas situações não é possível determinar a estratificação do solo somente em duas camadas como apresentado na Figura 2.14, necessitando realizá-la para mais camadas, mas através do mesmo procedimento, não é difícil essa etapa.

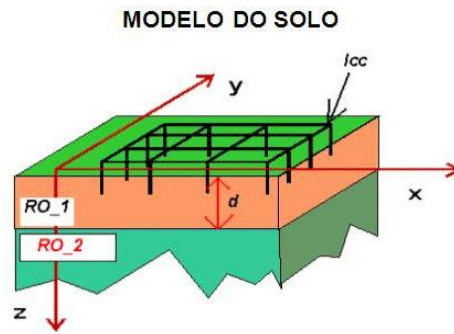


Figura 2.14 – Solo estratificado em duas camadas. [Retirada da Apresentação sobre aterramento, CEMIG, outubro 2003]

2.3.2 Características Técnicas das Linhas de Transmissão (LT's) e Linhas de Distribuição (LD's)

Aquisição dos valores característicos das impedâncias dos cabos das linhas de transmissão que são fontes de potência e das linhas de distribuição que saem da subestação, que servem como caminhos de saída da corrente.

De posse destes dados será possível modelar o sistema elétrico em programas de simulação para calcular a distribuição da corrente de curto.

2.3.3 Configuração do Sistema

Para a realização da simulação na qual será definida a parcela de corrente que provocará a elevação de potencial na malha de aterramento, é necessário representar o sistema elétrico no programa computacional escolhido, no caso o ATP (Alternative Transient Program).

LT's, LD's, Resistências das malhas, Resistências dos aterramentos dos pés de torres de transmissão, cabos para raios (Cabos guarda) e a malha de aterramento, são os elementos a serem representados no ATP.

2.3.4 Potência de Curto-circuito Atual e Futura

São os valores de potência que cada linha de transmissão entrega para a subestação a ser projetada.

São utilizados valores atuais e futuros para um período de uma década. Com esse critério o projeto considera as possíveis ampliações que venham acontecer no sistema durante esse período.

Porém se a ampliação for em relação ao número de linhas de distribuição, cuja cada duas saídas em 13,8 kV possuem um cabo neutro, conectado à malha, que é outro trajeto de saída de parcelas da corrente de curto circuito, a malha de aterramento estará sendo beneficiada, possuindo uma elevação de potencial da malha menor.

Isso porque, a cada duas saídas de 13,8 kV, um condutor neutro que acompanha as fases. Este condutor neutro será mais um caminho de desvio de uma das parcelas da corrente de curto circuito.

2.3.5 Estudo de Distribuição da Corrente de Curto-circuito (ATP)

Após a modelagem de todo o sistema elétrico em questão na linguagem do software, realiza-se a simulação, sendo possível saber o valor da parcela de corrente de curto circuito em cada elemento daquele sistema elétrico.

2.3.6 Determinação da Corrente Malha-solo.

É uma das respostas obtidas após a simulação. Trata-se do e é o valor da parcela de corrente que flui pela malha de aterramento responsável por sua elevação de potencial.

2.3.7 Calculo das Tensões de Toque e Passo de Segurança

A corrente que se propaga no cabo da malha de aterramento, provoca a elevação de potencial nessa malha. Por motivos relativos à operação de equipamentos e segurança de pessoas, o potencial de malha não deve extrapolar certos limites.

O cálculo das tensões de toque e passo permitidas considera a resistência elétrica e a suportabilidade à máxima corrente do corpo humano sem causar nenhum efeito desconfortável.

2.3.8 Definição da Configuração Básica da Malha (Reticulado)

Através de cálculos orientados pela IEEE80/2000 é definida uma configuração básica da malha de aterramento e iniciam-se as simulações.

2.3.9 Simulações e Verificação da Segurança (Programa Malto ou SE Ground)

Inseri-se o desenho da malha no programa Malto ou SE Ground, simulando a circulação do valor da corrente que foi definida pelo programa ATP, sobre essa malha. Assim pode-se visualizar através de perfis de tensão em curvas desenhadas na tela, os valores que melhor atendem os limites de segurança, conforme na Figura 2.15, 2.16, 2.17, que demonstram as telas exibidas pelo software.

Na Figura 2.15, tem-se a tela de uma simulação, cuja imagem demonstra a elevação de potencial total na malha de aterramento. No topo, a superfície composta por diversas ondulações pontiagudas, representa os pontos de interligações com soldas e o local dos cabos.

Os pequenos vales são os centros dos reticulados e o declive na periferia descreve a saída da malha de aterramento em direção aos pontos remotos.

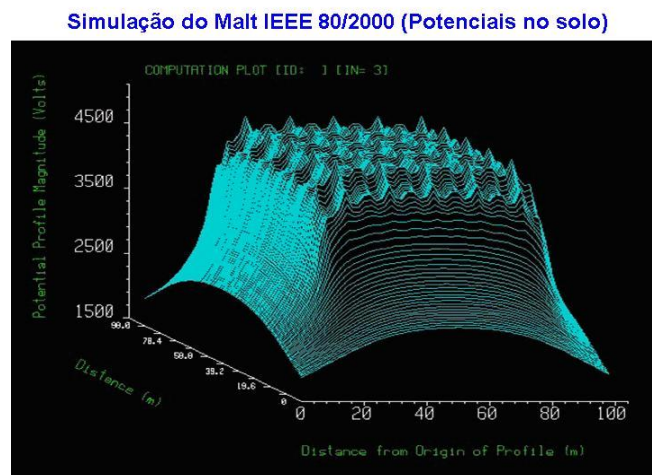


Figura 2.15 – Perfil de Elevação de Potencial da malha de aterramento [Retirada da Apresentação sobre aterramento, CEMIG – outubro 2003]

Na Figura 2.16, tem-se a tela de uma simulação, cuja imagem demonstra o gradiente da tensão de passo. É possível verificar através das cores que representam níveis da tensão na superfície.

Como pode-se verificar, as cores em tons de verde caracterizam os níveis mais baixos de tensão e, como é de se esperar, as situações críticas se encontram demonstradas na periferia, em cores em tons de vermelho.

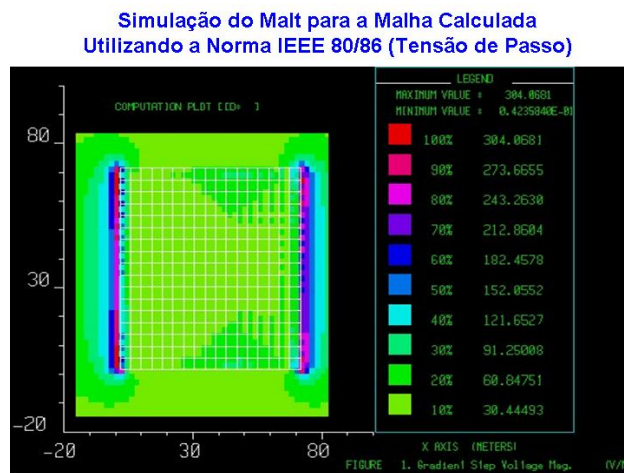


Figura 2.16 – Magnitude de elevação da Tensão de Passo [Retirada da Apresentação sobre aterramento, CEMIG – outubro 2003]

Na Figura 2.17, tem-se a tela de uma simulação, cuja imagem demonstra o gradiente da tensão de toque representado pelas linhas que nada mais são do que os perfis das tensões.

Nota-se que ao centro não temos nenhuma indicação. Porém este fato se dá aos valores limites de demonstração pedidos pelo projetista. Ou seja, tem-se tensões no centro, mas devido aos baixos valores e abaixo do limite solicitado ao software, não foram demonstrados. No caso apresentado, os níveis inaceitáveis estão na periferia, mas como é inexistente a presença de objetos para permitir a tensão de toque, então não se caracteriza como problema.

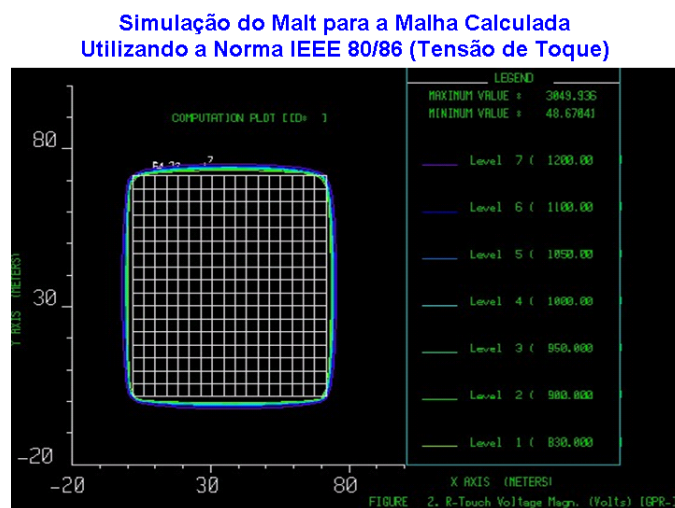


Figura 2.17 – Magnitude de elevação da Tensão de Toque [Retirada da Apresentação sobre aterramento, CEMIG – outubro 2003]

2.3.10 Projeto Executivo

De posse dos padrões de instalação e das dimensões escolhidas nas simulações, utilizando símbolos e marcações que representam além dos cabos de cobre a serem usados, os detalhes das

conexões dos pontos de aterramentos das estruturas e equipamentos, o projeto executivo é fornecido ao construtor. Figura 2.18

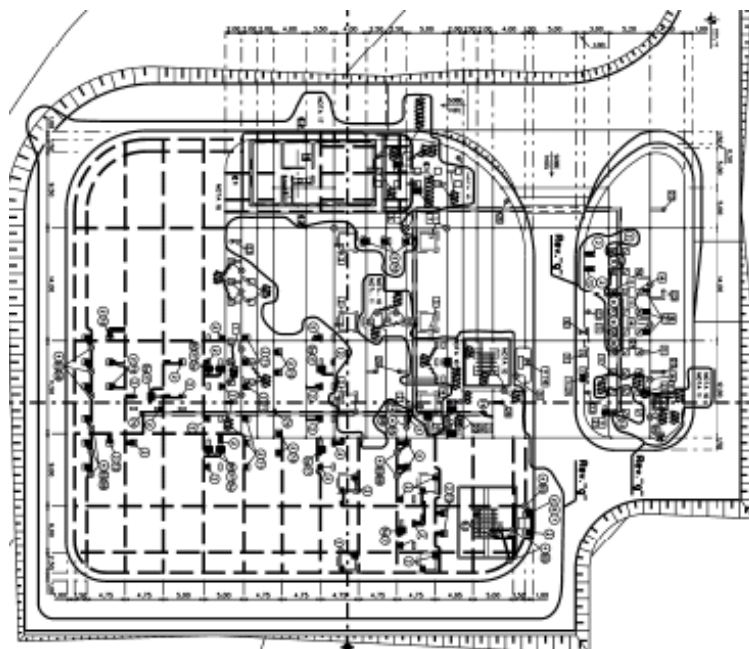


Figura 2.18 –Projeto subestação de Santa Vitoria [CEMIG D]

3 Métodos Práticos para Determinação das Condições de Malhas de Aterramento

3.1 Introdução

Existem diversos tipos de ensaios direcionados para a conferência das condições das malhas de aterramentos em relação ao que foi projetado. Porém, a grande maioria destes ensaios é realizada para o sistema desenergizado, além de desconsiderar a presença dos cabos guarda (cabos de blindagem da linha) para proporcionar um ensaio sem influências externas ao sistema (malha de aterramento) que se pretende analisar.

Em aplicações de baixa frequência, o que realmente interessa determinar é a chamada resistência de aterramento. Porém, no caso de frequências elevadas, deve-se conhecer a impedância de aterramento com suas componentes resistivas e reativas. As medições das grandezas resistência e impedância de aterramento requerem métodos distintos.

Este capítulo é dedicado aos métodos referentes à medição de resistência de aterramento.

Os medidores de resistências convencionais (também denominados terrômetros) só são capazes de medir a componente resistiva do aterramento. Sua aplicação para medição da impedância de aterramento não é recomendada.

A determinação da resistência de aterramento pode ser realizada por diversos métodos, devendo-se escolher, em cada caso aquele que apresentar as condições de aplicabilidade mais adequada.

Alguns exemplos de métodos utilizados são citados a seguir. Esses métodos consideram a injeção de correntes de baixo valor:

- Métodos da queda de potencial [Kindermann e Campagnolo – 2ªEd., 1992]
- Método da regra de 62% [G.F.Tagg., IEEE, volume III, nº12, Dezembro 1964]
- Método da interseção das curvas [G.F.Tagg., IEEE, 1969]

A determinação da resistência de aterramento é de extrema importância para os engenheiros procederem à coordenação de isolamento e a coordenação da proteção do sistema elétrico.

Até pouco tempo, esse era o único ensaio realizado para conferência das condições da malha, não sendo dada atenção à evolução das características da malha ao longo dos anos, sujeita a diversas solicitações pelas operações do sistema elétrico, sejam elas programadas conforme necessidades de manutenção preventiva ou não programadas como curto circuitos, descargas atmosféricas, dentre outras.

Em decorrência desse fato, atualmente, outros ensaios com a subestação energizada estão em aplicação por motivo de impedimento do desligamento do sistema elétrico.

3.2 Medição de Resistência de Aterramento com a Malha Desenergizada: Método da Queda de Potencial ou Método de Frank Wenner

Este método é o mais usado que consiste na aplicação de um equipamento terrômetro de quatro terminais, que é o mesmo utilizado para as medições de resistividade. Na Figura 3.1 é apresentada uma imagem do instrumento de manivelas.



Figura 3.1 Equipamento para medição de Resistência de Terra – Megger

A corrente injetada na malha de aterramento em teste é recebida em outro sistema de aterramento. Este sistema de aterramento auxiliar poderá ser constituído por uma haste, um conjunto de hastes ou uma malha de aterramento construída para esse fim. Este sistema auxiliar localiza-se a uma distância cujo potencial pode ser considerado nulo, chamado também de terra remoto. Teoricamente, devido à distância, esse sistema auxiliar não sofrerá nenhuma influência eletromagnética da malha principal, resultando em maior precisão no ensaio.

Basicamente são realizadas medições, variando-se a haste P2 ao longo da distância entre a malha auxiliar e a malha principal, conforme mostrado na Figura 3.2, cuja definição da resistência de aterramento é requerida.

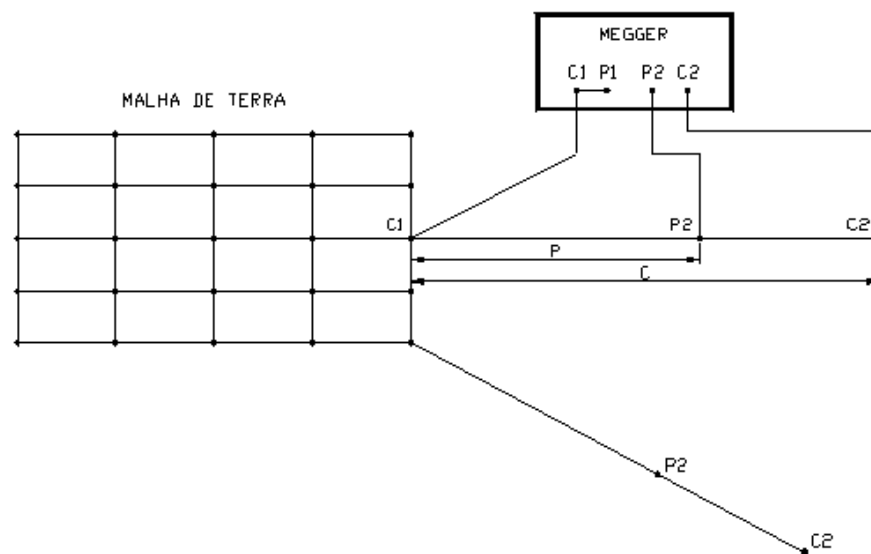


Figura 3.2- Esquema de Ligação e movimentação das hastes para medição de Resistência de Terra.

O valor da resistência é adquirido através da razão entre a tensão aplicada e a corrente que percorre esse circuito. É identificado um perfil caracterizado com mostrado na Figura 3.2, cujo patamar será o valor da resistência medida (Ω).

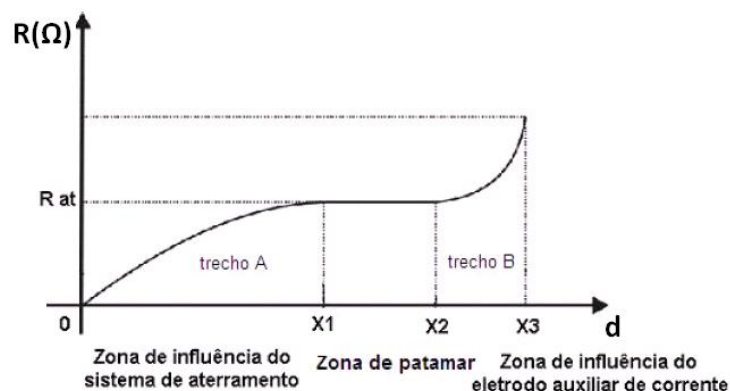


Figura 3.3- Curva de resistência aparente em função da distância. [Adaptada de Beltani, 2007].

Feito isso deve-se verificar a semelhança entre o valor de resistência medido e o valor proposto no projeto.

3.3 Testes de Injeção de Corrente em Malhas de Aterramento de Subestação Energizadas

3.3.1 Descrição do Método

Geralmente, a injeção de corrente para ensaios como o descrito no item anterior consideram as malhas das subestações desenergizadas e isoladas do sistema. Todavia, principalmente em decorrência da demanda do sistema que tem impedido a disponibilidade para desligamento, torna-se de grande valia a realização do ensaio com a instalação em situação energizada.

Devido ao grande interesse das concessionárias e para confirmar na prática as ideias sugeridas por um grupo de trabalho do GTMS e GCOI, a CEMIG foi convidada a realizar o ensaio de injeção de corrente em malhas de aterramento de subestações energizadas.

Após aceitar o desafio, a CEMIG, em parceria com a Universidade Federal de Minas Gerais programou e executou o ensaio, cujo relato e metodologia serão expostas de forma rápida e sucinta a fim de ilustrar diferenças de logística entre métodos existentes e o método do terrômetro que será destacado no próximo capítulo. Os detalhes principais referentes à metodologia a ser descrita neste item estão apresentados em [P.S.A.Rocha, XIV SNPTEE, 1997]. Os aspectos principais são descritos a seguir.

Este método consiste na medição das tensões de toque e passo que surgirão ao longo da superfície do solo da subestação devido à aplicação da corrente.

Para obter maior controle das variáveis geradas pela circulação da corrente na malha de aterramento, como tensão de passo e tensão de toque, no instante das medições, a situação de energização da subestação através do sistema elétrico ao qual está conectada, foi substituída por uma fonte independente em 60 Hz. Para tal foi utilizado um transformador abaixador 13,8 kV-440/254 - 220/ 127 V – 150 kVA, ligado à barra de 13,8 kV da subestação (SE).

Esta medida foi tomada por se tratar de um ensaio em avaliação, porém, atualmente, os profissionais utilizam a própria energização do sistema elétrico na subestação em teste.

Como em uma situação real é constante a presença de ruídos, a reprodução dessa situação considerou um gerador de sinal convencional acoplado a um amplificador de áudio de 200 W de saída.

No momento da simulação de curto circuito com a injeção de corrente, essas fluíram pelo cabo para raios das LT's e pelos neutros das LD's.

Essas correntes retornam em direção à sua fonte que as gerou e para isso, diversos caminhos são utilizados, inclusive o solo em cada ponto de aterramento. Esses pontos de aterramento são os pés

de torre das LT's e os aterramentos das LD's. Essas correntes provocarão a elevação de potenciais locais. O mesmo ocorre na malha principal de acontecimento da falta, quando a parcela da corrente flui da malha para o solo em direção à fonte.

No ensaio, a situação é diferenciada, pois se injeta a corrente na barra de 13,8 kV, simulando a energização do sistema, porém, essa corrente estará sendo injetada em outra malha de aterramento distanciada aproximadamente a 1,0 km da SE em teste.

Para propiciar a injeção de corrente nesta malha, tem-se um cabo provisório lançado sob posteação existente, cujo retorno à malha principal pelo solo provoca a elevação de potencial.

No momento do projeto da malha, é possível pelas simulações, identificar valores dos potenciais nos centros dos quadriculados. Estes valores serão utilizados como variável de avaliação do trabalho.

Utilizando-se pregos para fixação na superfície da brita e se ter acesso a uma determinada profundidade, mede-se a diferença entre uma estrutura e este ponto, caracterizando a tensão de toque ou a medição realizada entre dois pontos separados de 1 m de distancia entre si, caracterizando a tensão de passo.

Essas medições de elevação de potencial na malha e as medições na superfície do solo são realizadas através de dois osciloscópios com as entradas protegidas com centelhadores a gás, tensão disruptiva, em 60 Hz e utilizam-se voltímetros digitais convencionais nas medições diretamente no pátio da subestação.

No circuito montado tem-se Transformadores de Corrente (TC's) no auxílio da medição das correntes, amperímetros convencionais e de alicate, resistores nos secundários dos TC's proporcionaram medição simultânea para os osciloscópios, conforme indica a Figura 3.4.

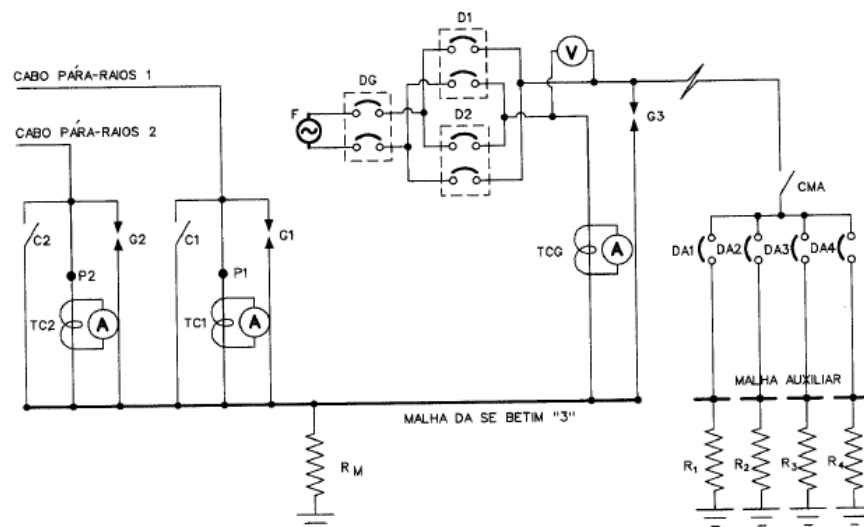


Figura 3.4- Diagrama esquemático do circuito de injeção de corrente[P.S.A.Rocha, XIV SNPTEE, 1997].

3.3.2 Segurança das Pessoas e Proteção dos Equipamentos

De acordo com o trabalho [P.S.A.Rocha, XIV SNPTEE, 1997], as situações mais críticas encontradas em ensaios de injeção de corrente em subestações, caracterizam-se nos possíveis acidentes causados pelas elevações de tensão (potenciais) que podem ocorrer durante uma falta para a terra, para aspectos de alta tensão durante as medições ou manuseios dos materiais utilizados.

É de extrema importância a utilização de equipamentos de segurança individuais como luvas e botas isolantes, outras precauções listadas a seguir.

Devido a condição de cabos para raios (guarda) desconectados em quase todos os ensaios, tem-se a grande possibilidade de valores de tensões nas superfícies da subestação de níveis perigosos. Como medida de segurança, dispositivo de ruptura (gaps) foram instalados nestas posições e no circuito de injeção de corrente. Estes dispositivos foram testados previamente em laboratório para os níveis de tensões disruptivas.

Estes gaps foram concebidos com chaves de 13,8 kV, cuja lâmina é soldada nas extremidades e seccionada na região central, formando um gap de ar de aproximadamente 2 mm, conforme mostra a Figura 3.5, retirada do trabalho [P.S.A.Rocha, XIV SNPTEE, 1997].

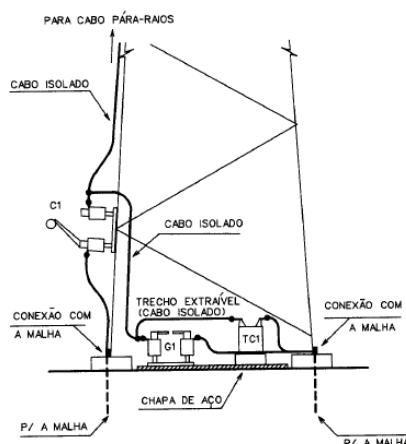


Figura 3.5- Interligação dos cabos para-raios. Retirado de [P.S.A.Rocha, XIV SNPTEE, 1997].

Para momentos de intervenção segura na área dos TC's e ao término do dia de trabalho, restabelecer a condição normal do sistema, seccionadoras interligando novamente o cabo para raios à malha foram instaladas.

Seccionadoras (C1 e C2) são acrescentadas com o objetivo de, quando fechadas, garantir uma região de trabalho segura na região dos TC's, bem como permitir uma conexão direta (sem passar pelos TC's), dos cabos pára-raios com a malha da SE, no final de cada dia de teste. Os cabos pára-raios (quando necessário) são seccionados através da abertura (com as seccionadoras C1 e C2

fechadas) dos jumpers para os TC's (pontos P1 e P2). As entradas dos osciloscópios devem ser protegidas com centelhadores a gás, tensão disruptiva, em 60 Hz, de 500 V.

Outro item de atenção referente à segurança é a malha auxiliar e o terra de referência por estarem fora da área da SE.

Devido ao funcionamento normal da subestação no sistema, ruídos estarão presentes simultaneamente com a corrente injetada na realização de ensaios desta natureza.

Conforme descrito em [P.S.A.Rocha, XIV SNPTEE, 1997], devido à frequência ser em 60 Hz, é possível a aplicação de dois procedimentos.

- a) Alta relação sinal/ruído;
- b) Processamento dos dados medidos para eliminação do ruído.

No primeiro caso, o procedimento adotado é injetar correntes elevadas na malha de aterramento de modo que os potenciais produzidos sejam muito superiores (acima de dez vezes) ao ruído existente, podendo ser desprezado. Dependendo do nível de ruído existente, pode ser muito difícil obter, sem riscos exagerados, uma alta relação sinal/ruído.

O segundo procedimento envolve algum processamento dos valores medidos para “limpeza” dosinal. O método mais utilizado é o da inversão da corrente injetada (MIC). Maiores detalhes são apresentados na referencia [P.S.A.Rocha, XIV SNPTEE,1997].

4 Testes de Continuidade das Interligações entre os equipamentos e a Malha de Aterramento Utilizando Terrômetro alicate

4.1 Introdução

Por diversos motivos que dentre eles pode-se citar, vandalismo, idade e conexões de baixa qualidade, tornou-se extremamente importante a verificação da continuidade das interligações entre as conexões de aterramento dos equipamentos e os cabos de malha. Como a dificuldade de inspeção

visual é inerente ao ambiente, a consolidação de um método que seja rápido, eficiente e seguro se faz necessária.

O objetivo deste capítulo é apresentar uma metodologia para execução de testes de continuidade entre as conexões de aterramentos dos equipamentos e a malhas de aterramento, avaliando conexões enterradas entre cabos e as conexões com as estruturas.

A execução deste método, além de rápida e econômica, está em acordo com as normas de segurança.

Este método foi desenvolvido em uma parceria entre o Lactec e a COPEL e é artigo integrante da revista “Eletricidade Moderna” de Abril de 2008 [Gamboa Lactec, Abril 2008].

Ao final do capítulo, serão apresentados resultados referentes à aplicação do método.

4.2 Princípio de Funcionamento do Terrômetro alicate

O instrumento se assemelha ao tradicional alicate amperímetro, sendo o círculo amarelo as garras que serão abertas para o envolvimento do cabo que se deseja testar a integridade. conforme mostra a Figura 4.1.



Figura 4.1 – Terrômetro alicate - Modelo POL-30 [Politerm, 2008]

O instrumento terrômetro utiliza em seu funcionamento o princípio do transformador de corrente de bucha ou janela, que no momento do teste, estarão envolvendo o cabo a ser testado. Figura 4.2.

Em suas garras de cor amarela estão instalados dois enrolamentos que executam tarefas diferentes. Ao se abrir as garras amarelas para então posicionar o Terrômetro alicate e realizar uma medição, esses dois enrolamentos estarão sendo movimentados simultaneamente e envolvendo o cabo na mesma condição mecânica e elétrica.

O primeiro enrolamento é alimentado através de um oscilador com tensão proveniente da fonte de alimentação do próprio terrômetro- Alicate. Em frequências de valor entre 1,5 a 2,5 kHz, ele provoca neste cabo, a circulação de uma corrente no circuito formado pelo trajeto fechado do cabo no

sistema de aterramento em teste, conforme mostra a Figura 4.2. O segundo enrolamento mede essa corrente que circula no mesmo cabo. Um circuito eletrônico de medição determina o valor de R com base na tensão aplicada e na corrente medida. O resultado é apresentado no mostrador digital.

No circuito eletrônico interno do Terrômetro alicate, esta presente um filtro que atua quando necessário, na eliminação das interferências ou harmônicos existentes no sinal. Esta atuação é limitada ao valor de 30 V para o caso de ensaios realizados em hastes de aterramento. [Manual do usuário – modelo POL-30, 2009].

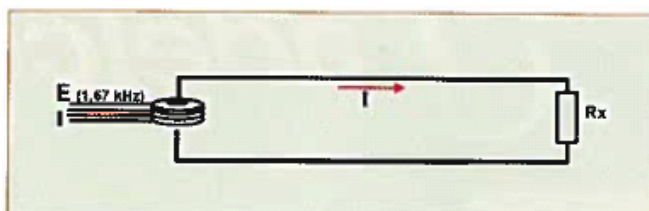


Figura 4.2 – Princípio de funcionamento do Terrômetro alicate - [Gamboa Lactec, Abril 2008].

4.3 Vantagens e Desvantagens na Utilização do Terrômetro alicate

A utilização desse instrumento tem demonstrado inúmeras vantagens em relação aos outros aplicados nos métodos já consolidados. As dimensões reduzidas associadas ao peso e a facilidade de manuseio e transporte são alguns dos atrativos citados pelos profissionais.

Porém, tecnicamente, sua aplicação em determinadas situações, requer entendimento da configuração e sensibilidade técnica para validação do resultado apresentado em seu mostrador digital.

Seu funcionamento é bastante coerente em sistemas de distribuição com características multiterradas. Isto devido ao alto número de aterramentos próximos um dos outros. Essa proximidade produzirá uma resistência de aterramento de valor relativamente reduzido quando comparada com a resistência de aterramento do poste em que se encontra o Terrômetro alicate, facilitando a medição de valores com porcentagem de erro muito reduzidos, tornando-se extremamente recomendado sua utilização neste caso.

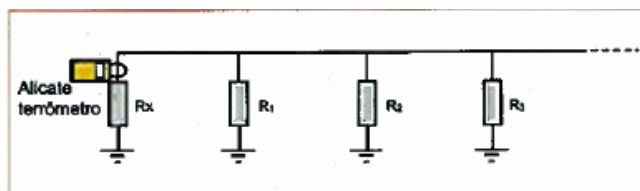


Figura 4.3 – Ligação dos resistores de mesmo valor - [Gamboa Lactec, Abril 2008].

Para o ambiente com redes de distribuição rural onde as distâncias entre postes (vão médio) são bem maiores que as padronizadas em redes urbanas (300 m x 30 m), torna-se mais difícil a aquisição de medidas com menor erro. Isto se deve aos longos vão entre os postes que são interligados por cabos neutros de grandes comprimentos (tamanho do vão).

Esses longos comprimentos tornam expressivos os valores de suas impedâncias e assim passam a influenciar na formação do paralelismo entre as resistências de aterramento, reduzindo a sensibilidade e prejudicando a precisão nas medições. Dessa forma, o instrumento poderá indicar leituras de resistências que não seja aquela que se deseja medir.

Para um melhor entendimento, foram realizadas medições com montagens de diversos paralelos com resistores iguais e o resultado referente aos erros encontrados mostrados conforme a Tabela 4.1. É possível verificar a exclusão do erro de acordo com o aumento do número de aterramentos.

Tabela 4.1 – Erros em medição de resistência – adaptada de [Gamboa -Lactec, Abril 2008].

Tab I - Erros na medição da resistência (global) em função do número de eletrodos													
Nº eletrodos	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50
Erro (%)	100	50	33,3	25	20	10,7	14,3	12,5	11,1	5,3	3,4	2,6	2

Neste caso apresentado, foram utilizados resistores com valores iguais ligados conforme Figura 4.3.

Para se medir a resistência de malhas de aterramento é necessária a instalação de eletrodo ou uma malha auxiliar em distância suficiente (Método da queda e potencial).

Para viabilizar a utilização do terrômetro, essa malha auxiliar deverá possuir um valor conhecido e extremamente reduzido para proporcionar condições de aplicabilidade do terrômetro alicate. Essas necessidades inviabilizam a aplicação por dificuldade em alcançar um valor de resistência da malha auxiliar, reduzido o suficiente a ponto de sensibilizar o instrumento.

Dentro do exposto também não se recomenda essa prática.

No entanto, em testes de continuidade de malhas de aterramento, com as adaptações realizadas como, por exemplo, a inserção do cabo auxiliar, o resultado alcançado é satisfatório, com descrito a seguir.

4.4 Metodologia de Medição

Diante das constantes modificações imputadas pela ação de corrosão, degradação, vandalismo e solicitações mecânicas, as malhas de aterramento têm recebido atenção especial no sentido de desenvolvimento de um método que proporcione diagnosticar, com segurança e em pouco tempo, as condições operativas deste elemento do sistema elétrico.

Este método foi proposto para permitir verificação das condições de integridade das interligações entre as conexões de aterramentos dos equipamentos e a malhas de aterramento, permitindo diagnosticar e atuar com a correção.

As verificações anteriormente realizadas com medidor de resistência de contato (microohmímetro) condicionaram descobertas de defeitos em pontos de aterramento visivelmente conferidos, mas devido ao paralelismo que constitui o gradeado da malha de aterramento, o método deixa a desejar. Isto acontece devido à característica da corrente aplicada por esse instrumento ser contínua e assim, estabelecendo indefinição do caminho percorrido pela corrente.

Com o desenvolvimento do método que utiliza o instrumento terrômetro no modelo alicate, as verificações se tornaram mais consistentes, permitindo diagnósticos confiáveis sobre a existência ou não do defeito e da necessidade de correção.

Não é possível a verificação com grau preciso sobre a atuação da corrosão, mas uma boa noção e posteriores condições de decisão em prol de uma necessidade de intervenção para manutenção corretiva é fornecida. A grande e principal vantagem está na aquisição rápida de informação referente ao estado das conexões enterradas, pertencentes aos equipamentos, coerente com padrões de segurança.

As medições de continuidade devem ser realizadas a cada duas conexões. Com base no projeto, escolhem-se as conexões a serem testadas e realiza-se o posicionamento do Terrômetro alicate em uma das conexões de aterramento, conforme ilustrado na Figura 4.4.



Figura 4.4 – Exemplo de pontos para medição de continuidade [adaptada da Apresentação CEMIG, Março 2008]

O procedimento de medição inicia-se, após a escolha do trecho a ser testado, com a interconexão das duas conexões de início e fim do trecho. Esta ligação é necessária para proporcionar a formação do circuito fechado, item condicionante ao funcionamento do instrumento neste método. Esta ligação é efetuada utilizando um cabo auxiliar, de comprimento e resistência ôhmica conhecidos, que deverá passar por dentro da garra do Terrômetro alicate, conforme indica a Figura 4.5.

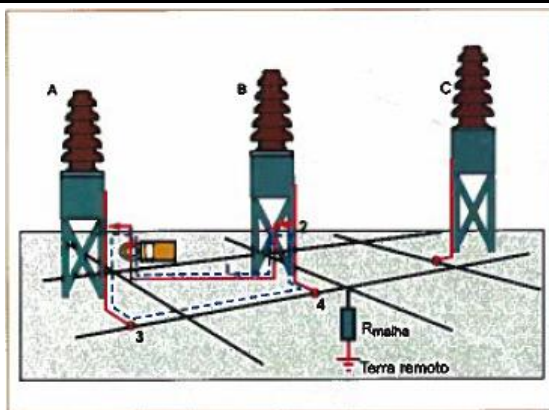


Figura 4.5 – Montagem do circuito fechado para medição utilizando terrômetro [Gamboa-Lactec, Abril 2008].

Seguindo pela Figura 4.5, podemos verificar que o valor da resistência medida será composto pelo somatório da resistência do cabo de medição e do cabo da malha, acrescido pelos valores das conexões nas estruturas e as conexões de solda entre os cabos enterrados (pontos 1, 2, 3 e 4).

A referência [Gamboa- Lactec, Abril 2008] descreve que para situações normais encontradas em diversas medições, o valor apresentado não ultrapassa 400 m Ω , mas ao subtrair o valor da impedância do cabo auxiliar, atingimos resultados menores que 100 m Ω . Sem descartar os possíveis erros dentro das tolerâncias, a admissão do valor acima de 1 Ω para propor a intervenção da equipe de manutenção é coerente, pois considera-se que existem problemas em no mínimo uma das conexões [Gamboa- Lactec, Abril 2008].

Para melhorar a logística nas execuções, recomenda-se após a primeira medida em equipamentos monofásicos, manter um dos terminais fixos e modificar a posição do outro, reduzindo tempo de intervenções.

Deve-se dispensar atenção especial para a posição do cabo auxiliar, utilizado nas interligações dos pontos de conexões em teste.

A verificação da resistência ôhmica deste cabo deverá ser medida em posição esticada conforme Figura 4.6a.

No momento do ensaio, este cabo não poderá estar em formato de espiras, ou seja, enrolado sobre o solo. Esta condição gera um acréscimo nas medições de aproximadamente 300 m Ω . Este fato deve-se à frequência da grandeza injetada pelo terrômetro, que é de 1 kHz, influenciando nos valores medidos por causa da indutância da bobina criada involuntariamente.

Na Figura 4.6b é demonstrada uma espécie de bobina formada por este cabo, o que provocará um aumento de aproximadamente 300 m Ω .

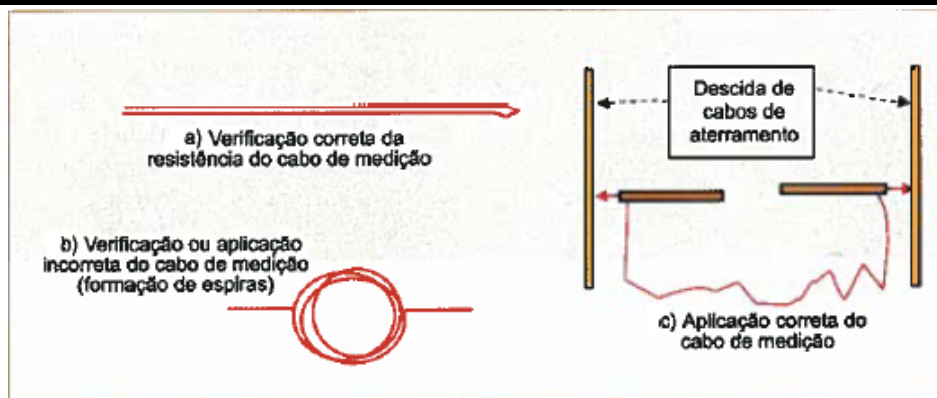


Figura 4.6 – a) Posição de medição da resistência do cabo de medição. b) Forma incorreta do condicionamento do cabo de medição na brita, durante a medição. c) Forma correta do condicionamento do cabo de medição na brita, durante a medição. [Gamboa- Lactec, Abril 2008].

4.5 Segurança

A realização das atividades requer atenção a fim de se evitar o toque em condutores, estruturas e carcaças aterradas, e necessita de coordenação junto aos setores responsáveis pelas manobras do sistema, precavendo contra acidentes durante a operação voluntária de equipamentos de manobra na SE. É necessária a execução dos trabalhos de medição em boas condições climáticas, associada à utilização de EPI's, dispositivos e acessórios específicos similares aos descritos neste artigo.

4.6 Análise e Interpretação de Resultados

Para um melhor controle das ações sobre as medições realizadas, criteriou-se que leituras com valores acima de $0,5 \Omega$ devem ser investigados. As primeiras verificações deverão estar focadas no circuito de medição, ou seja, calibração do instrumento, as condições das conexões deste circuito e as condições das conexões do cabo de interligação (cabo auxiliar).

Após constatação de que tudo está em condições requeridas para uma execução de ensaio confiável, repete-se a medição. Para a nova aquisição de valor, se este ainda permanece acima de $0,5 \Omega$, a intervenção corretiva deverá ser programada. Dentro do exposto no método de medição, as subtrações dos valores realizadas não deixam dúvida de que algo defeituoso está presente.

Os resultados devem compor um relatório a fim de permitir a consulta em anos posteriores.

Dessa forma é fácil monitorar as condições das conexões ao longo das solicitações do sistema elétrico.

A seguir serão apresentados alguns casos ocorridos na CEMIG de aplicação do método.

4.6.1 Subestação Joaquim Murtinho

Cita-se como exemplo o ocorrido na SE de Joaquim Murtinho, onde internamente aos relés de tensão, presenciavam-se pequenas faíscas. Esse evento, de forma intermitente, acontecia em momentos de manobra do banco de capacitor e às vezes, em troca de TAP do Trafo de 138 kV -13,8 kV. Estes relés possuem alimentação de amostra de tensão do Transformador de Potencial (TP) da barra de 13,8 kV.

Ao realizar-se as medições entre alguns pontos de aterramento no pátio de 13,8 kV e a casa de controle, verificou-se grande valor de resistência ôhmica, aproximadamente 13 Ω . Em alguns momentos, as faíscas foram presenciadas ao conectar-se as garras do cabo auxiliar.

Devido à urgência, neste caso, não procurou-se as conexões defeituosas, optou-se pelo lançamento de novos cabos de interligação dos pátio. [Relatórios de medição CEMIG].

4.6.2 Subestação Bonsucesso

Outro caso foi na SE de Bonsucesso onde houve a ação de vandalismo. Após a reconstituição dos cabos rompidos, alguns alarmes atuavam indevidamente.

Testes de continuidade foram realizados conforme este método e valores acima do estipulado foram encontrados nas barras de aterramento de alguns cubículos internos à casa de controle. Entre esses pontos e outros externos à casa também houve registro de valores não aceitáveis.

A CEMIG tem a rotina de, ao encontrar anormalidades dessa natureza, proceder ao lançamento de novo cabo. Essa ação reduz o tempo de pesquisa, nos caso de urgência e a necessidade de localização do ponto defeituoso é menos importante. Valores entre 1,8 Ω e 10 Ω foram registrados nessa atividade.

A medição, no formato apresentado, não demonstra dificuldades de execução para ações realizadas com critérios que proporcionam otimização e segurança.

4.6.3 Subestação Manga 5

Este item tem o objetivo de relatar uma das diversas vezes de aplicação do método para investigação de situações em que se atribuiu à malha de aterramento, a responsabilidade de mau funcionamento do sistema elétrico. Este teste foi realizado na subestação de Manga 5, de propriedade da CEMIG.

A subestação de Manga 5 estava em etapa de ampliação onde foi construído um novo pátio para comportar uma seção de chaveamento que secciona a Linha de Transmissão UTE São Judas

Tadeu /SADA e proporcionar fornecimento energia para outras empresas da região. Durante o comissionamento dessa LT, que se encontrava desenergizada, a equipe de trabalho verificou que existiam tensões nos dois secundários de cada TP, do vão 10 K (nomenclatura CEMIG para identificação do vão 10 de 138 kV (letra K)).

Diversas manobras foram realizadas no sentido de eliminar esta energização, sem sucesso e foram detectadas novas situações.

Retirando-se o fusível e desligando o disjuntor termomagnético do secundário da fase A, houve medição de tensão no valor de 20 V nos terminais do cabo de ligação do TP, instalado no painel de controle, na casa de comando.

Retirando-se o fusível e desligando o disjuntor termomagnético do secundário da fase B, houve medição de tensão no valor aproximado de 14 V nos terminais do cabo de ligação do TP, instalado no painel de controle, na casa de comando.

Retirando-se o fusível e desligando o disjuntor termomagnético do secundário da fase C acontece a desenergização.

Após análise criteriosa das possíveis causas dessa energização indesejável, decidiu-se pela verificação das condições de integridade das interligações entre as conexões de aterramentos dos equipamentos e a da malha de aterramento.

Utilizando-se o método do terrômetro, diversas medições foram realizadas a cada dois pontos. Por se tratar de uma subestação de dimensões reduzidas, os dados foram obtidos rapidamente.

Tabela 4.2 Registros de Medições

SE Manga 5	
Referências	Resultados da medição (Ω)
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte do para-raios - fases A/B)	0,11
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte do para-raios - fases B/C)	0,09
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte do para-raios - fases C/A)	0,16
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte do para-raios/suporte TP)	0,08
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte do TP - fases A/B)	0,08
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte do TP - fases B/C)	0,15
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte do TP - fases C/A)	0,21
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte TP/suporte TC)	0,20
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte do TC - fases A/B)	0,10
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte do TC - fases B/C)	0,71
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte do TC - fases C/A)	0,11
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte TP/suporte 10K5-10K5T)	0,31
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte do 10K5/10K5T - fases A/B)	0,23
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte do 10K5/10K5T - fases B/C)	0,23
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte do 10K5/10K5T - fases C/A)	0,15
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte 10K5/10K5T /suporte 10K4)	0,17
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte única do 10K4)	0,10
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte do 10K3 - fases A/B)	0,14
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte do 10K3 - fases B/C)	0,20
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte do 10K3 - fases C/A)	0,20
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte 10K4/suporte 10K3)	0,18
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura de encabeçamento da LT - fases A/B)	0,24
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura de encabeçamento da LT / 10K3)	0,26
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte de isoladores - fases A/B)	0,33
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte de isoladores - fases B/C)	0,15
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte de isoladores - fases C/A)	0,26
LT Manga 5/SADA 138 kV (Suporte de isoladores/encabeçamento LT)	0,25
OBS: Resistência ôhmica do cabo de interligação utilizado para executar as medições foi de: Cabo curto (15 m): 0,71 Ω	
Elaborado por: <u>Ronaldo Soares de Andrade</u> - Ass.: _____	
Data: 04/05/2011	
Aprovado por: <u>Romeu Fuscaldi Fonseca</u> - Ass.: _____	
Data: 11/05/2011	

Tabela 4.2 Registros de Medições – Continuação

SE Manga 5	
Referências	Resultados da medição (Ω)
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte 10K6 - fases A/B)	0,13
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte 10K6 - fases B/C)	0,18
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte 10K6 - fases C/A)	0,17
LT Manga 5/SADA 138 kV (Suporte 10K6/suporte coluna isoladores)	0,21
Barra de 138 kV (Estrutura suporte de interligação barra nova/antiga)	1,31
Barra de 138 kV (Estrutura suporte do vão novo para LT Janaúba - vão 4K)	0,37
Barra de 138 kV (Estrutura suporte do vão novo para seccionador 4K8)	0,52
Barra de 138 kV (Estrutura suporte parte velha vão 4K com 3K)	0,38
LT Manga 5/SADA 138 kV (Estrutura suporte TP parte nova para bobina de bloqueio da LT Janaúba - fase C)	0,59
Trafo T4 (medição executada nos 2 pontos de aterramento do Trafo)	2,02
Trafo T4 para estrutura de 138 kV do Trafo	0,23
Trafo T4 para barramento de 13,8 kV	0,43
Area de 13,8 kV alimentadores 513F/512F	0,20
Pátio de 13,8 kV para painéis na Sala de Controle	0,33
Haste de aterramento em frente à Sala de Controle para painéis	0,30
Entre painéis na Sala de Controle	0,03

Analisando os resultados, observou-se que do total de medições realizadas, somente 11% registraram valores acima do padronizado pelos critérios utilizados no método, que é 0,5 Ω , como pode ser verificado na Tabela 4.2.

Para verificação e posterior melhoria nas conexões, foi elaborado um plano de ação que culminou em manutenção preventiva em alguns pontos fragilizados, porém sem problemas efetivos. O valor limite de 0,5 Ω foi ultrapassado e em relação a alguns registros nota-se uma diferença expressiva. Para as conexões de aterramento com valores de 0,71 Ω , 0,52 Ω e 0,59 Ω foram sugeridas que a equipe de manutenção procedesse a desmontagem, limpeza com a escova de aço e a reconexão. Após essa ação, os novos valores ficaram abaixo do valor limite de 0,5 Ω . O problema encontrado era referente ao alto grau de atuação do zinabre que atua sobre o cabo de cobre.

Para a conexão de aterramento com valor de 2,02 Ω , além da desmontagem, limpeza, escovação e a reconexão, foi sugerido a escavação e verificação na conexão enterrada de um dos rabichos de aterramento da carcaça do transformador, o que resultou na reconexão e melhoria do contato a níveis abaixo do padronizado no método.

Para a conexão de aterramento com valor de 1,31 Ω , além da desmontagem, limpeza, escovação e a reconexão, foi sugerido o lançamento de novo cabo para mais uma interligação entre a malha antiga e a malha nova, tendo seu valor reduzido para 0,21 Ω .

Apesar das recomendações sugeridas para melhoria das interligações dos cabos de aterramento das estruturas com a malha de terra, lançamento de novos cabos entre as malhas, não se vê qualquer relação das tensões indevidas nos secundários do TP com o sistema de aterramento.

4.6.4 Subestação Sabará

Outro caso que merece ser destacado se refere à SE de Sabará, região metropolitana de Belo Horizonte, onde a proteção dos transformadores estava atuando indevidamente. A SE é constituída por dois transformadores de 138-69 kV e possui dois pátios de equipamentos distantes um do outro de aproximadamente 45 m, inclusive em níveis diferentes. Os surtos de tensão estavam sendo presenciados nos dois equipamentos de forma intermitente. Testes de continuidade foram realizados conforme este método e valores acima do estipulado foram encontrados nas medições referentes às interligações das malhas dos dois pátios.

Está medição é de extrema periculosidade, devido aos níveis diferentes de tensão que ambas as malhas podem se encontrar, tanto que no momento de conexão do cabo auxiliar houve o aparecimento de arco elétrico. Desta forma, assim com todas as outras medições, conforme método é indispensável os EPI's.

Valores altos de resistência ôhmica foram registrados nas medições de continuidades entre as malhas, confirmando o motivo da incidência de arcos. Assim, pelo plano de ação, foi realizadas novas conexões de interligação que culminou na resolução do problema da proteção dos transformadores de potência.

5 Conclusões e Propostas de Continuidade

5.1 Introdução

As malhas de aterramento das subestações de energia elétrica desempenham um papel extremamente importante tanto no funcionamento do sistema elétrico quanto na proteção dos equipamentos e pessoas que transitam sobre elas. Sendo assim torna-se indispensável saber como está a condição operativa devido às solicitações do sistema e atualmente, devido a grande incidência da ação de vandalismo.

Este trabalho teve como objetivo comparar métodos em aplicação sugerindo uma nova metodologia de fácil utilização para verificação da continuidade das interligações entre as conexões de aterramentos dos equipamentos e a da malha de aterramento de subestações em condições energizadas, subsidiando a tomada de decisões quanto a necessidade de intervenção nas manutenções programadas ou até emergenciais.

5.2 Conclusões

Nas empresas, como a CEMIG, que possuem grandes e inúmeras subestações de energia elétrica torna-se extremamente importante a existência de uma metodologia confiável e segura, além da rapidez e economicamente aplicável.

O método apresentado tem atendido às necessidades, demonstrando efetivamente que a técnica empregada, associada às devidas adaptações para atendimento ao ambiente de malha de aterramento, gera com segurança resultados coerentes.

O método indicado expõe que a utilização do terrômetro alicate tem demonstrado inúmeras vantagens em situações emergenciais, em relação aos outros aplicados nos métodos já consolidados.

Além da facilidade de aplicação, as dimensões reduzidas associadas ao peso e a facilidade de manuseio e transporte são alguns dos atrativos citados pelos profissionais.

Porém, tecnicamente, sua aplicação em determinadas situações, requer entendimento da configuração e sensibilidade técnica para validação do resultado apresentado em seu mostrador digital, devido a determinadas restrições.

5.3 Propostas de Continuidade

Como proposta para novos estudos, sugere-se a tentativa de melhoria das práticas, melhorando a sensibilidade do instrumento e precisão das leituras. A interação junto aos fabricantes dos equipamentos de medição é importante no âmbito de proporcionar o surgimento de equipamentos, embora portáteis como o apresentado, com maiores capacidades de injeção de correntes nos circuitos formados pelos elementos de aterramento. Dessa forma poderá se chegar a soluções inclusive para os sistemas rurais e as questões de medição de resistências de aterramento das malhas.

Referências

Bibliográficas

- Petorutti L.A. “Métodos para Medição da Resistência de Aterramento”, ARTIGO, , Megabras, Eletricidade Moderna, Outubro, 1992.
- Visacro, S., Livro “Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento”, S. São Paulo: Artliber, 2002.
- Gamboa, Luís R.A., Bachega Renata J, Ribas Rosane M “Avaliação de conexões de aterramento em subestações energizadas”, ARTIGO., Eletricidade Moderna, Abril, 2005.
- Rocha, P.S.A., Coutinho, R.M., Dart, F.C., Filho, J.C.S., Boaventura, W.C, Lopes, I.J., “Teste de Injeção de Corrente em Malhas de Aterramento de Subestações Energizadas”, XIV SNPTEE, 1997.
- Kindermann, G., Campagnolo, J.M., Livro Aterramentos elétricos: 3ª Edição SAGRA- DC LUZATTO, 1995.
- Beltani, Juliano, “Medição de Malha de Terra em Subestações Energizadas”, Dissertação de Mestrado, Ilha Solteira2007.
- MANUAL DE INSTRUÇÕES PROGRAMA MALTO, Fabricante: SES – Safe Enginneering Services & Technologies Ltda, Versão: 1.0, 1998.
- MANUAL DE INSTRUÇÕES PROGRAMA ATP, Alternative Transient Program, Fabricante: Bonneville Power Administration – USA, Versão: 4.0p1, 1998 – 2003.