



**GRUPO VIII
GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS - GSE**

PROTÓTIPO DE MEDIÇÃO DE MALHA DE TERRA EM SUBESTAÇÕES ENERGIZADAS

***Gerson A. C. Nonato**

-

Carlos Alberto Sotille

ENERSUL - Empresa Energética de Mato Grosso do Sul S/A

Fundação Paulista de Tec. e Educ.

RESUMO

O envelhecimento das malhas de terra de subestações, aliado ao grau cada vez maior de contato com pessoas qualificadas ou não para essa interação, impõe uma necessidade premente de avaliá-las periodicamente. As concessionárias brasileiras efetuam tal avaliação com o sistema malha – linha de distribuição / transmissão desenergizado (muitas das vezes somente no comissionamento da malha original). Esporadicamente uma ou outra Empresa buscou desenvolver técnicas de medições com as instalações energizadas, deparando-se, porém, com obstáculos que comprometiam a qualidade dos resultados de ensaios, quais sejam as interferências eletromagnéticas nos instrumentos utilizados e conseqüentemente nas leituras realizadas, exposição a riscos (segurança pessoal e aparelhos utilizados), bem como os longos tempos de execução dos ensaios.

A busca pela adequação dos processos às restrições de desligamentos do sistema de transmissão e distribuição, recebe a cada dia, mais e mais aliados, por razões de interesse das áreas técnica e comercial, passando sempre pelas questões regulatórias da Agência Nacional de Energia Elétrica.

Neste trabalho apresenta-se uma proposta de metodologia que propicia uma rápida avaliação da malha, sem prejudicar a qualidade do fornecimento e de forma segura. Na sua elaboração, procurou-se mesclar os procedimentos atualmente utilizados na medição de malhas de subestações desenergizadas com experimentos feitos em instalações energizadas por concessionárias e pesquisadores do país e de fora, acreditando assim, ter dado um passo, sabe-se discutível e ainda pequeno, mas para a frente, num tema que se mostra de interesse para o setor elétrico e para a comunidade em geral.

PALAVRAS-CHAVE

Subestação, Aterramento, Segurança, Tensão Permissível, Medição.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os procedimentos aplicáveis às avaliações em malhas de subestações no Brasil são encontrados ainda na forma de projeto de norma, nas refs. (1) e (2). Um dos métodos propostos é o da queda de potencial, que consiste em fazer circular uma corrente através do sistema de aterramento sob ensaio por intermédio de um eletrodo auxiliar de corrente e medir a tensão entre o sistema de aterramento e o terra de referência (terra remoto) por meio de um eletrodo auxiliar de potencial. Em determinadas situações torna-se muito difícil ou mesmo impossível a aplicação do método de queda de potencial conforme descrito. Entre estas situações destacam-se as seguintes:

- a) em instalações densamente povoadas, freqüentemente é impossível lançar-se os circuitos de corrente e potencial nas distâncias necessárias para se fazer uma medição confiável;

- b) em sistemas de aterramento de grandes dimensões, a dificuldade mais evidente é de se estender os circuitos de corrente e potencial à distâncias muito grandes, às vezes de vários quilômetros, o que dificulta enormemente a medição; outro aspecto importante é que estes sistemas apresentam, usualmente, resistências de aterramento inferiores a $1,0 \Omega$, o que traz incerteza quanto aos resultados obtidos em decorrência de fatores como acoplamento, impedâncias de circuito de ensaio, sensibilidade dos instrumentos e outros; além disso, a reatância não é desprezível quando comparada com a resistência, sendo mais adequado falar-se em impedância (que é função da frequência);
- c) em instalações energizadas ou próximas de regiões atravessadas por linhas de transmissão e alimentadores energizados.

Nos casos das limitações apresentadas nas alíneas a) e b) anteriores, existe a alternativa de se utilizar como circuito de corrente, uma linha de transmissão desenergizada que chegue à instalação e como circuito de potencial, um circuito de comunicação, ou mesmo uma outra LT cuja rota seja afastada do circuito de corrente.

Observe-se que o projeto de norma não cita qual(is) o(s) procedimento(s) para a situação da alínea c) relativa a instalações energizadas, deixando evidente a necessidade de se desenvolver metodologia para essa situação. Faz clara menção de que os cabos pára-raios de todas as linhas de transmissão que chegam à instalação devam ser desconectados do sistema de aterramento sob ensaio, bem como as blindagens dos cabos isolados, neutros de linhas de distribuição e contrapesos contínuos de linhas de transmissão. Argumenta ainda, que o efeito do acoplamento entre os cabos de interligação dos circuitos de corrente e potencial torna-se um fator importante nas medições de resistência de aterramento com valores muito baixos, particularmente envolvendo sistemas de aterramento de grande porte, que exigem grandes comprimentos de cabos de interligação.

Para a medição de potenciais na superfície do solo, bem como da impedância de um sistema de aterramento global envolvendo cabos pára-raios das linhas de transmissão, neutro de alimentadores e outros, o projeto de norma recomenda o método de injeção de corrente. Este, de forma semelhante ao método da queda de potencial, consiste em fazer circular uma corrente entre o sistema de aterramento sob ensaio e o solo, através de um eletrodo auxiliar de corrente, e medir os potenciais na superfície do solo bem como a resistência de aterramento (a partir da elevação de potencial do sistema) através de um eletrodo auxiliar de potencial. O eletrodo de corrente, de modo geral, é um trecho de uma linha de transmissão, uma malha de aterramento de subestação adjacente, ou uma malha auxiliar construída para este fim. Esse eletrodo deve ter uma resistência de valor compatível com o sistema de medição, baixa o suficiente de modo a não limitar demasiadamente a corrente injetada.

Para evitar distorções na dispersão de corrente pelo solo, a conexão do circuito de corrente com o eletrodo de corrente deve estar a uma distância (de 5 a 10 vezes a maior diagonal) do sistema de aterramento sob ensaio. O procedimento usual é utilizar como circuito de corrente as fases de uma LT desenergizada pertencente à instalação, ligando-as à estrutura (simulando um curto-circuito) a uma distância adequada do sistema de aterramento. Consiste o eletrodo de potencial de uma haste metálica cravada firmemente no solo, a qual deve ser deslocada a partir do sistema de aterramento sob ensaio, em intervalos regulares, fazendo-se a leitura da tensão com um voltímetro de alta impedância de entrada. O acoplamento entre circuitos de corrente e potencial pode ser evitado, deslocando-se o de potencial numa direção entre 90 graus e 180 graus em relação ao de corrente.

Observam-se assim, limitações de ordem técnica nas metodologias existentes, sem falar no alto custo do pessoal envolvido com o preparo das torres (tempo e quantidade de pessoas), associada à impossibilidade de se desligar as Linhas de Transmissão, nos dias de hoje.

Vislumbrou-se, portanto, um grande campo para futuros desenvolvimentos, motivo pelo qual objetivou-se com este trabalho, numa fase inicial:

- desenvolver uma metodologia de medição de malha de terra que aperfeiçoe a existente e propicie medições com a instalação energizada, de forma eficiente e segura e que forneça não só a resistência da malha como também sua impedância, tendo em vista o comportamento frente a fenômenos transitórios.
- identificar a existência de soluções semelhantes e desenvolver um equipamento capaz de atender os requisitos da metodologia proposta, contribuindo desta forma para a inovação tecnológica nesta área;
- servir como subsídio para transformar em Norma uma nova metodologia, em termos nacionais;
- identificar a existência de equipamento similar no mercado externo e / ou desenvolver no mercado interno;
- verificar aplicabilidade de campo da metodologia e do equipamento, através de medições amostrais em subestações dos mais variados arranjos, com alto grau de interferência com centros de distribuição;
- garantir a segurança operacional das subestações e comunidades circunvizinhas às subestações.

2.0 - DO PROTÓTIPO

O protótipo de MEDIÇÃO DE MALHA TERRA EM SUBESTAÇÕES ENERGIZADAS, a seguir identificado como MMTE, é um instrumento capaz de medir e avaliar a malha de terra de uma subestação energizada.

Ele opera com uma corrente elétrica (gerada em frequências diversas) injetada entre o sistema de aterramento e um eletrodo de terra auxiliar, medindo as diferenças de potenciais em pontos do solo nas proximidades do sistema de aterramento avaliado.

As medidas passam por um software que utiliza uma interface gráfica para receber, processar, armazenar e apresentar os dados.

O MMTE realiza as seguintes funções básicas:

- Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo em que se encontra a malha de terra;
- Medição de resistência de aterramento da malha de subestação, pelo método da queda de tensão;
- Medição e determinação da impedância da malha de terra de subestação, pelo método de estimação;
- Medição das tensões de passo, toque e transferidas, em qualquer ponto da subestação.
- Medição de continuidade elétrica entre elementos vinculados à malha de terra da subestação;

3.0 - DESCRIÇÃO DO SOFTWARE

O software do MMTE possui os seguintes módulos:

- O módulo de coleta de dados, responsável pela extração dos dados recebidos e digitalizados pelo hardware externo e armazenamento desses na memória do computador para pós-processamento;
- A interface homem-máquina que controla a operação do MMTE, fazendo a interação com os aplicativos para modelar o sistema de aterramento e obter dados adicionais tais como a localização dos eletrodos de potencial e de corrente, além de mostrar os potenciais de superfície medidos / calculados, bem como a resistência / impedância em função da frequência, oferecendo ao usuário os dados na forma gráfica.
- O módulo de estimativa da impedância de aterramento em função da frequência, com base nos dados medidos e no modelo estipulado para o aterramento.

A seguir, resumem-se as principais funções controladas pelo software do MMTE.

3.1 Função “Medição da Resistividade de Solo e Determinação da Estratificação do Solo”

Esta função, no modo convencional, é exatamente o método dos quatro eletrodos de Wenner. O MMTE extrai os dados dos eletrodos espaçados ao longo da superfície do solo, através do hardware de estratificação de solo. As medidas obtidas são processadas por um algoritmo para extrair o modelo de solo. A modelagem em duas camadas tem se adaptado perfeitamente às análises de malhas de Subestações da Enersul. Não está descartado, porém, o desenvolvimento de análises para solos na modelagem em multicamadas.

No modo não convencional de medição de resistividade de solo, o protótipo efetua uma extensão do método dos quatro eletrodos, prevendo a medição, através de hardware externo, em 02 baterias de 16 eletrodos ou 03 baterias de 10 eletrodos, de modo a se efetuar o estudo do solo até uma separação máxima de 36m entre eletrodos, proporcionando um espaço de medições compatível com profundidades de exploração da ordem de 50 m, característico dos solos da região de concessão da Enersul.

3.2 Função “Processamento do Aterramento”

O protótipo do MMTE utiliza um software de cálculo de aterramentos, concebido com modelagem de solo estratificado em duas camadas e com formulação baseada no método das sucessivas imagens. Desenvolveram-se algoritmos para serem processados utilizando método numérico de cálculo, envolvendo configurações elementares como hastes verticais, condutores horizontais, condutores em anel e associações destas, de forma a se conhecer valores de resistência de aterramento e potenciais na superfície do solo, variando-se a forma da configuração. A idéia básica é exprimir-se cada configuração elementar através de suas coordenadas, num sistema de eixos x, y e z, considerando-se a corrente constante em toda sua superfície.

Nesta fase do protótipo cabem algumas discussões relativas às concepções adotadas.

A. Quanto à modelagem de solos - a ref. (5) faz um resumo comparativo das modelagens de solo utilizadas para verificar o desempenho de sistemas de aterramento, em solos equivalentes de duas camadas e com múltiplas camadas. As comparações foram realizadas para as medidas de resistência de aterramento, potenciais de toque e de passo. Nas análises, 04 tipos de solos foram estudados, com variações de resistividades, quantidades e espessuras diferentes das várias camadas. Foram efetuadas várias simulações com o intuito de determinar qual a melhor opção para uma malha enterrada a 0,5 m com dimensões de 20m x 20 m, com 64 quadriculas.

A conclusão a que se chegou é de que o solo estratificado em duas camadas é sempre a melhor escolha, com a restrição de que em muitos casos é necessário recorrer a dois modelos de solos estratificados em duas camadas para representar um solo multicamadas, onde um modelo é utilizado para estimar a resistência de aterramento e o outro para o cálculo dos potenciais de toque e passo.

B. Resolver os problemas que surgem nas áreas de interferência eletromagnética, campos eletromagnéticos em sistemas de potência e aterramentos, tende a ser uma tarefa complexa, principalmente quando ocorre a interação destas três áreas, caso típico do sistema de aterramento de uma subestação de potência. Nela, deve-se ter conhecimento do tipo de solo onde será inserida a malha, da corrente de falta naquele ponto, e ainda para uma análise mais precisa do modelo teórico do aterramento, conhecer o acoplamento indutivo dos condutores aéreos da subestação com o sistema de aterramento. Uma análise computacional exaustiva será necessária também,

para prever o comportamento dos potenciais de toque e de passo nas proximidades da subestação, considerando-se a existência de elementos extras.

C. Vários são os métodos para análise de aterramento. A ref. (4) analisou os 03 métodos mais comuns, quais sejam, o método das imagens, que trata o sistema de aterramento como uma estrutura equipotencial, com precisão limitada à malhas não muito extensas e expostas a medidas de baixa frequência, o método que utiliza o conceito de tensão variável ao longo dos condutores, não considerando os acoplamentos capacitivos e indutivos entre os condutores, e o método da teoria de campos, o qual, sem considerar o conceito de estrutura equipotencial, utiliza-se do conceito de auto-impedância e impedância mútua entre os condutores do aterramento, além dos efeitos capacitivos de tais condutores.

Cita a ref.(4), testes de aplicação dos 03 métodos em malhas de pequena dimensão (40m x 60 m), média dimensão (140m x 280m) e grande dimensão (280m x 440m), chegando a discrepâncias entre os métodos da ordem de: 0,1% para potenciais de passo na superfície de malha de pequenas dimensões e inferiores a 3% para malha de dimensões médias; já para a malha de grande porte, constataram-se discrepâncias nos potenciais dos condutores da ordem de 25 %, entre o maior e o menor valor; na impedância de aterramento calculada para o método das imagens comparativamente aos demais, a diferença foi de 15%; a ref. (4) cita ainda que, a impedância apresentou um certo defasamento indutivo, ignorado pelo método das imagens.

Conclui-se, para fins do protótipo que, para malhas com dimensões pequenas e médias, o método das imagens pode ser utilizado, com a vantagem da simplicidade do algoritmo.

3.3 Função “Medição de Resistência de Aterramento”

O MMTE utiliza nesta função, o método tradicional da queda de tensão. A distância do eletrodo de corrente (que o próprio equipamento se incumbirá de fornecer ao operador) deve situar-se entre 3 e 5 vezes a maior dimensão do sistema de aterramento. A montagem para a obtenção da resistência da malha considerada ficará então, na dependência do posicionamento do eletrodo de potencial auxiliar. O software fornecerá ao operador, a distância do eletrodo de potencial em função das características do solo local, tendo em vista o fator de reflexão das várias camadas que o compõem, bem como da relação entre a espessura da camada equivalente desse solo e a distância prevista para o eletrodo de corrente. A não generalização da fixação do eletrodo de potencial no percentual de 62% faz com que o protótipo se torne mais adequado aos solos característicos da área de concessão da ENERSUL, extremamente não homogêneos (coeficientes de reflexão positivos e da ordem de 0,8).

3.4 Função “Medição e Determinação da Impedância de Malhas de Subestações”

O MMTE realiza a função tanto em malhas de aterramento de subestações energizadas como em desenergizadas. Esta função permite a determinação da impedância de aterramento do sistema constituído de todos os sistemas de aterramentos interconectados. A configuração para esta medição é similar à medição de resistência de aterramento de um sistema qualquer, com a particularidade de que, os pontos de fixação dos eletrodos de potencial serão nas regiões limítrofes da malha. Importante registrar que não será necessário especificar a quantidade e o tipo dos aterramentos dos sistemas interconectados, visto que, para a medição da resistência da malha, a alta frequência injetada garante o desacoplamento das demais instalações, e para o cálculo da impedância da malha, o software tratará destes elementos através do algoritmo de estimação.

3.5 Funções “Medição de Tensões de Passo e Toque”

Estas funções permitem a obtenção dos potenciais de passo e toque em pontos especificados pelo usuário, conhecidas a corrente de falta e a configuração da malha de aterramento.

3.6 Função “Medição de Transferência de Potenciais”

Esta função permite a obtenção dos potenciais transferidos em pontos especificados pelo usuário, conhecidas a corrente de falta e a configuração da malha de aterramento. A modelagem em 02 camadas assumida no aplicativo de cálculo de potenciais de superfície exerce nesta função um grande efeito.

3.7 Função “Medição de Continuidade Elétrica entre Elementos Vinculados à Malha da Subestação”

Esta função permite a medição da impedância entre dois pontos do sistema que engloba a malha de aterramento, mesmo na condição de sistema energizado; na opção de montagem exclusiva para continuidade, pode-se determinar as resistências vistas por esses 02 pontos, concluindo-se pela sua continuidade.

4.0 - DESCRIÇÃO DO HARDWARE DO MMTE

O equipamento opera com fonte de 120V / 220 V, na frequência de 60Hz.

A fiação para o eletrodo de corrente é em cabo blindado de 2,5 mm².

A fiação para os eletrodos de potencial é em cabo singelo 2,5 mm² e seu comprimento depende da posição e quantidade de eletrodos.

A fiação para os eletrodos de corrente e potencial, na medição de resistividade de solo, é em cabo singelo 2,5 mm² e seu comprimento depende da quantidade de baterias em que se fará os ensaios.

Um computador com processador Pentium III rodando no sistema operacional Microsoft Windows 2000, com porta serial RS 232, faz a operação do MMTE.

4.1 Da Medição em Alta Freqüência

A utilização de uma freqüência alta nas medições permite que se teste o aterramento numa condição mais parecida com aquela em que este será chamado para dissipar um surto tipo de chaveamento ou mesmo de descarga atmosférica. Para a freqüência usada no MMTE, a impedância indutiva do cabo pára-raios de uma LT acoplada à subestação, num vão de comprimento normal, é razoavelmente alta, o que permite reduzir o efeito dos aterramentos adjacentes ao que se está medindo. Para uma subestação da qual partem / chegam linhas de transmissão com seus cabos guarda ligados à malha de terra, estima-se, que um equipamento com tal freqüência, meça somente a resistência da malha de terra em estudo. Dessa forma, o valor obtido tende a ser mais real do que aquele obtido com equipamentos convencionais de baixa freqüência, para os quais se desacopla o cabo guarda das instalações.

Compensação da componente reativa: o MMTE possui um módulo que permite a introdução de capacitâncias com a finalidade de efetuar a compensação dos reativos presentes na medição.

4.2 Da Metodologia

4.2.1 Metodologia convencional reduzida - Essa metodologia se aplica a sistemas de aterramento, nas condições de energizados ou não, em locais com poucas e pequenas áreas disponíveis para colocação dos eletrodos de retorno de corrente e de potenciais, tais como áreas em regiões semi-urbanas ou rurais. Nessa metodologia de medição, se utiliza o método convencional da queda de tensão, aplicado, porém, a eletrodos de corrente posicionados "relativamente próximos" do sistema de aterramento em teste. Nessas medições utiliza-se a freqüência de 25 kHz. Testes iniciais em aterramentos isolados e subestações pré-selecionadas indicam que o posicionamento do eletrodo de corrente se dará a distâncias próximas de 1,25 vezes a maior dimensão do sistema de aterramento.

- Metodologia convencional reduzida aplicada a malhas com configuração definida e conhecida- O operador indica ao software a maior dimensão do sistema de aterramento. O software fornece o posicionamento dos eletrodos de corrente e de potencial. São feitas as leituras de 03 eletrodos de potencial; o software analisa os desvios entre as leituras e compara com um padrão estabelecido; se inferior, a medição estará completada; se superior, o software indica um novo posicionamento com acréscimo de 30% das distâncias, repetindo-se o processo, até obter-se desvios dentro do padronizado.
- Metodologia convencional reduzida aplicada a malhas com configuração desconhecida - O operador indica ao software um valor estimado para a maior dimensão do aterramento. A partir daí o procedimento é idêntico ao descrito para configuração conhecida. A velocidade do ensaio está ligada à qualidade do valor estimado.

4.2.2 Metodologia DDPprox (diferenças de potencial em pontos próximos ao sistema de aterramento): essa metodologia se aplica a sistemas de aterramento, energizados ou não, em locais com áreas disponíveis reduzidas (tais como áreas urbanas) para colocação de eletrodos de retorno de corrente e de potenciais. Nessas medições são utilizadas as freqüências de 270 Hz, 1470 Hz e 25 kHz.

Pretende-se fazer com que essa metodologia tenha seu ponto alto de aplicação, em sistemas energizados e localizados principalmente em áreas de nenhuma disponibilidade (densamente edificadas) para colocação dos eletrodos de corrente e potencial, a não ser aquela imediatamente adjacente à do sistema em teste.

Nessa metodologia não se utiliza o conceito da queda de potencial em relação a um ponto remoto, o que é feito convencionalmente, e que tem inviabilizado as medições notadamente de sistemas de aterramento de médias e grandes dimensões. São realizadas em espaços bem pequenos, medidas de diferença de potencial em pontos pré-determinados do sistema de aterramento, dependendo do grau de conhecimento que se tenha de sua configuração, relativamente ao ponto de injeção de corrente. A determinação dos parâmetros do aterramento é feita, então, por método de estimação.

- Metodologia DDPprox aplicada a malhas de aterramento com configuração conhecida - Informadas pelo operador as coordenadas limítrofes da configuração, o software indica o posicionamento do eletrodo de corrente e dos eletrodos de potencial em pontos notáveis como centro de maior e menor quadrícula, pontos de quina de periferia, etc., a partir de um ponto de referência (centro geométrico do sistema, neutro de um transformador, etc.). Feitas as medidas, o software fornece o valor da impedância do aterramento.

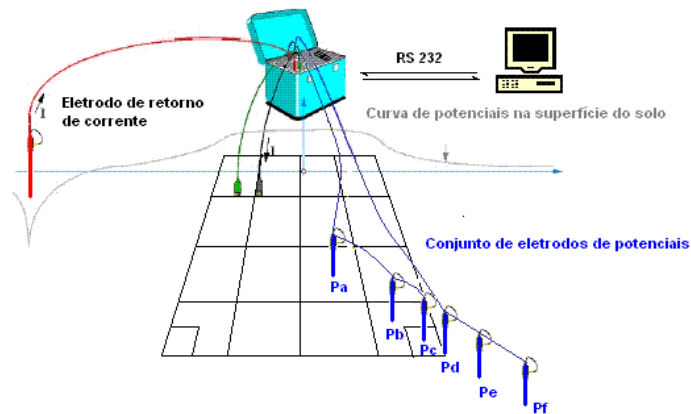


Figura 1: - Metodologia DDPprox aplicada a malhas de aterramento com configuração conhecida

- Metodologia DDPprox aplicada a malhas de aterramento com configuração desconhecida – quando não se dispuser de informações do sistema de aterramento (dimensões reais, tamanhos de quadrículas, profundidade de condutores, etc.), o operador informa as coordenadas do ponto de injeção de corrente escolhido (provavelmente o neutro de um transformador) e as coordenadas de um provável condutor periférico previsto a partir da presença de algum elemento (final de camada de brita, alambreado divisorio de área energizada, etc.); o operador efetua o posicionamento do eletrodo de corrente e dos eletrodos de potencial (em número e espaçamentos diferentes e aleatórios função das características da planta do local), independentemente de se conhecer a posição relativa do sistema de aterramento. Feitas as medidas, o software fornece o valor da impedância do aterramento, utilizando o algoritmo de estimação.

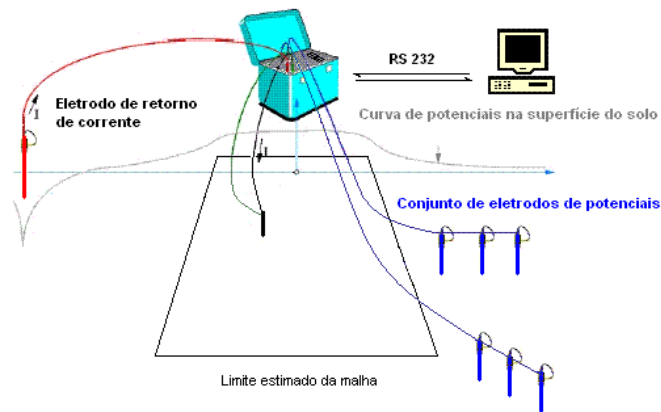


Figura 2: - Metodologia DDPprox aplicada a malhas de aterramento com configuração desconhecida

4.3 - DO HARDWARE DE MEDIÇÕES

Além do computador, o hardware de medições possui um módulo gerador de corrente, um módulo de aquisição de dados, um módulo de controle e o hardware externo.

4.3.1 Módulo gerador de corrente - O MMTE é composto de 02 geradores de corrente, alimentados por fonte de alimentação com carregador 110 / 220V e bateria recarregável 12 V - 2,3 Ah, um de baixa e outro de alta frequência. O de baixa é responsável pela geração das frequências 270 Hz e 1470 Hz com correntes de 3,5 mA. O de alta frequência gera um sinal de 25 kHz com nível de 100 mA, controlado por um cristal que dá estabilidade à frequência e permite aprimorar nos filtros, altamente seletivos, incluídos no protótipo para eliminar o efeito das correntes parasitas de frequência industrial presentes no solo.

4.3.2 Módulo de aquisição de dados - A aquisição e o armazenamento das informações são realizados pelo computador, o qual monitora a coleta dos sinais vindos dos eletrodos de tensão e de corrente.

4.3.3 Módulo de controle de dados - Nesse módulo efetua-se a correção de erros e redução de ruídos. Os sinais passam por um circuito de proteção contra sobretensão, são amostrados, digitalizados por um conversor analógico digital e armazenados, para pós-processamento e estimativa de aterramento, via software.

4.3.4 Hardware de estratificação - Na opção de 02 baterias de ensaio, o protótipo prevê 16 canais para permitir o espaçamento entre eletrodos de 1,2,3,4,6,9,12,18,27,36,81 e 108 m a partir do ponto de medição, para cada lado.

Na opção de 03 baterias de ensaio, o protótipo prevê 10 canais para permitir os mesmos espaçamentos.

4.3.5 Imunidade - O protótipo apresenta imunidade eletrostática segundo IEC 61000-4-2, imunidade a radiação eletromagnética segundo IEC 61000-4-3, EMC segundo IEC 61326-1 e proteção ambiental IP54.

5.0 – TESTES DE CAMPO

5.1 Metodologia Convencional Reduzida

Testou-se o protótipo com a frequência de 25 kHz, na malha de uma subestação 138 / 13,8 kV, 10-12,5 MVA, em solo com resistividade da camada equivalente 750 ohm.m, espessura da camada equivalente 3,61 m, resistividade da camada inferior 585 ohm.m, o que implica num coeficiente de reflexão $k = -0,12$.

Pelo memorial construtivo, a malha de aterramento da S / E é composta de 1761 m de cabo de cobre nú de secção 95 mm² dispostos numa área de 2484 m² (área energizada), com quadrículas de 3m x 3m (dimensões retangulares de 36 m x 69 m). Complementando a malha em pontos críticos (vértices e equipamentos) existem 63 hastes de aço cobreado de 3000 mm x 19 mm. A SE é alimentada por um vão de 50m derivando de uma LT 138 kV, com 02 cabos guarda ligados ao pórtico da SE. O processamento em computador forneceu para a malha com condutores superficiais e hastes verticais uma resistência de aterramento de 5,42 ohm. Na Tabela 1 e no gráfico da Figura 3 mostram-se os valores obtidos (com e sem compensação reativa) pelo deslocamento do eletrodo de potencial, a partir de um eletrodo de corrente instalado a 270 m do neutro de baixa tensão do transformador de potência (ponto de injeção da corrente de teste). Observa-se a tendência da curva com valores compensados em estabilizar no patamar próximo de 5,4 ohm.

EP (m)	Rsc (Ω)	Rcc (Ω)	Calculado (Ω)
170	5,50	13,0	5,4
160	5,30	12,2	5,4
150	5,40	11,6	5,4
130	5,70	11,2	5,4
120	5,80	11,4	5,4
110	5,20	10,0	5,4
100	3,90	9,2	5,4
90	3,20	8,4	5,4
80	3,30	8,5	5,4
70	2,80	8,2	5,4
60	2,60	7,4	5,4
50	2,40	7,0	5,4
40	2,20	6,5	5,4
35	1,90	6,0	5,4
30	1,75	5,6	5,4

Tabela 1

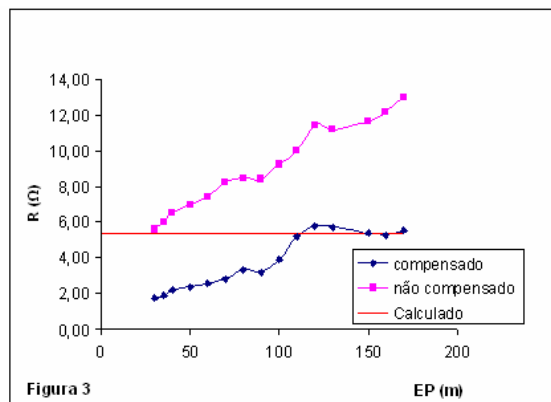


Figura 3

5.2 Metodologia DDpprox

Uma análise melhor deve ser feita com os valores não compensados (S/C). A expectativa é de que o valor mínimo da curva não compensada (obtido nas proximidades da malha) tenda ao valor da resistência da malha, enquanto que o valor mínimo da curva compensada (C/C) tenda ao valor da impedância do sistema, nessa situação estimado em 1,76 ohm. Como informação, para uma corrente de 0,17 A injetada na malha pelo neutro do transformador, mediu-se uma tensão de 0,30 V para um eletrodo remoto situado a 400m da subestação. A relação entre esses valores fornece os 1,76 ohm estimado. A metodologia DDpprox poderá ou não confirmar essa análise.

6.0 - CONCLUSÕES

6.1 É de suma importância o tratamento dos dados coletados, o que influencia diretamente nos resultados. No protótipo utiliza-se a modelagem de solo em duas camadas, que tem se mostrado eficiente, para as características das malhas testadas, tal como observado pela ref. (4).

6.2 Para casos de alta-freqüência, como a ocorrência de uma descarga atmosférica ou o chaveamento transitório de um equipamento, somente os métodos de tensão variável ao longo dos condutores e /ou da teoria de campos sem considerar o conceito de estrutura equipotencial, poderiam ser utilizados, residindo aqui, uma limitação do protótipo.

6.3 De modo a prever o acoplamento entre condutores da malha e elementos extras em suas proximidades, o método de modelagem do software de cálculo de parâmetros do aterramento através da teoria das imagens, utilizado no protótipo, não é aconselhável, pois não se aplica o conceito de equipotencialidade do elemento extra. Essa conclusão atinge basicamente a função de transferência de potenciais do MMTE, caso em que os resultados devem merecer melhor análise.

6.4 O método de estimação da impedância pelo tratamento das medidas de diferenças de potenciais entre pontos próximos da malha, em substituição à medição direta da queda de potencial em relação ao ponto remoto, apresenta um conceito que necessita de mais ampla confirmação em campo. Primeiramente, porque no protótipo, a estimação é feita, numa fase inicial de experimentos, com fontes discretas. Os resultados desses experimentos indicarão a necessidade ou não da utilização de uma fonte geradora de sinais randômicos aleatórios. Numa ou noutra situação, fica nítido que, se aprovado, o método será de grande utilidade na busca por uma avaliação rápida e segura de malhas de aterramento energizadas.

6.5 A definição sobre o posicionamento ideal dos eletrodos de corrente e de potencial, bem como das características finais do hardware destes, independentemente do tipo do solo, requer uma quantidade de ensaios maior, em tipos variados de configurações de malha e sistema; nota-se, no entanto, uma tendência de convergência de posicionamento para distâncias da ordem de 1,25 vezes a maior dimensão da malha, o que se traduz num ganho imediato se comparado com as dificuldades de medição convencional. O teste da metodologia convencional reduzida de 5.1 mostra essa tendência.

6.6 Uma análise melhor deve ser feita com os valores não compensados (S / C). Os valores estimados pela metodologia DDPprox poderão ou não confirmar as tendências das curvas compensadas e não compensadas, na obtenção da impedância da malha.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Projeto Norma 03:102.01-002, Medição da resistência de aterramento e dos potenciais na superfície do solo, ABNT – COBEI, São Paulo, BR, 1993.
- (2) Projeto Norma 03:102.01-004, Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo, ABNT – COBEI, São Paulo, BR, 1993.
- (3) Dawalibi, F. P., Analysis of Grounding systems in soil with finite volumes of different resistivities, IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, April, 2002.
- (4) Dawalibi, F. P., Ma, J., Modern computational methods for the design and analysis of power system grounding, IEEE, pp. 122-126, 1998.
- (5) Dawalibi, F.P., Southey, R. D., On the equivalence of uniform and two-layer soils to multilayer soils in the analysis of grounding systems, IEE Proc. Gener. Transm. Distr, Vol. 143, No. 1, pp. 49-55, January, 1996.
- (6) Dawalibi, F. P., Donoso, F., Integrated analysis software for grounding, EMF and EMI, IEEE Computer Applications in Power, pp. 19-24, April, 1993.
- (7) Abdallah, H., Cokkinides, G., Sakis Meliopoulos, A.P., A PC based ground impedance measurement instrument, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, July, 1993.
- (8) Dawalibi, F. P., Barbeito, N., Measurement and computations of the performance of grounding systems buried in multilayer soils, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, No. 4, October, 1991.
- (9) Lu, L.D., Shier, R.M., Application of a digital signal analyser to the measurement of power system ground impedances, IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, No. 4, pp. 1918-1922, April, 1981.
- (10) Lee, C.H., Sakis Meliopoulos, A.P., A comparison of IEC-479-1 and IEEE-STD80 on grounding safety criteria, Proceedings Natl.Sci.Council, Vol. 23, No. 5, pp. 612-621, 1999.
- (11) Rocha, P.S.A. e outros, Teste de injeção de corrente em malhas de aterramento de subestações energizadas, XIV SNPTEE, GSU 1, Belém, 1997.
- (12) Galindo, R.V., Moura, A.E., I SEMASE, A Experiência CELPE com os ensaios de corrente injetada em malhas de aterramento com subestações energizadas, XIII SNPTEE, GSU 08, Foz do Iguaçu, BR, 1995.
- (13) Siqueira, M.L.S., Ribeiro, J., Camargo, C.C.B., Figueiredo, D.D., Sobral, S.T., Leite, D.M., Medição rápida de parâmetros elétricos do sistema de aterramento de subestações da Eletrosul pelo método de injeção de alta corrente, X SNPTEE, Curitiba, BR, 1989.
- (14) ANSI/IEEE Std 81-part II, Measurement of impedance and safety characteristics of large, extended or interconnected grounding systems – “test current reversal method” – “safety practices”, ANSI/IEEE, pp. 29-31 and pp. 11-12, June, 1992.
- (15) IEEE – Std 81, IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance and earth surface potentials of a ground system, IEEE, New York, 1983.
- (16) IEEE 80, Guide for safety in alternating-current substation grounding, IEEE, 1961, 1971, 1976.