



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GSE - 06  
16 a 21 Outubro de 2005  
Curitiba - Paraná

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

**AValiação de Malhas de Terra em Subestações Energizadas através de Medições  
Seletivas em Frequência Diferente de 60 Hz**

**Lúcio Volnei Galvani   Dalvir Maguerroski   César Besen   Jorge Ribeiro**

**Empresa; Eletrosul – Centrais Elétricas do Sul do Brasil S. A.**

**RESUMO**

Devido à idade de algumas das subestações da Eletrosul, uma avaliação da integridade de suas respectivas malhas de terra se fez necessário, pois as mesmas devem conservar suas características de projeto pela sua grande importância para a segurança das instalações e principalmente para as equipes técnicas e operadores que desenvolvem suas atividades em pátios de subestações.

A ampliação de uma subestação, agregando parte de uma malha numa já existente, também constitui dificuldade nas avaliações de uma malha complexa.

As preocupações citadas se fundamentam no fato de que essas malhas de terra não permitem inspeção visual simples e estão em campo de influência das linhas e equipamentos energizados principalmente em SE's de 230 kV e 500 kV. Com o objetivo de definir um procedimento para ensaios preditivos, que não necessitasse desligamentos de instalações, acarretando na indisponibilidade de funções importantes do sistema de transmissão, o método de injeção de corrente com frequência diferente de 60Hz se mostrou como sendo a de melhor aplicabilidade. O método aplicado não necessita de fontes de altas potências e com alguns cuidados nas medições as interferências externas ao processo podem ser observadas e controladas. O trabalho a ser apresentado tem como objetivo a caracterização da metodologia experimentada para avaliação de malhas de terra de subestações em operação, além de contribuir com as empresas do setor elétrico brasileiro através do intercâmbio de profissionais da área, visando um aprimoramento da metodologia.

**PALAVRAS-CHAVE**

Seletividade, Potencial, Malha de terra, Passo, Toque, Interferência, Harmônicos, Retornos, Injeção de corrente.

**1 INTRODUÇÃO**

As malhas de subestações desempenham funções importantes para o sistema de transmissão assim como para a própria área física que envolve uma subestação específica. A literatura descreve como projetar, assim como softwares de cálculos e dimensionamentos que estão disponíveis no mercado. A seguir estão algumas considerações sobre uma malha.

**1.1 Funções principais da Malha de Terra**

- ✓ Conduzir de forma segura para o solo as correntes de falhas para terra;
- ✓ Drenar as correntes de descargas quando os pára-raios operam;

Tel.: (048) 231-7708 - e-mail: lgalvani@eletrosul.gov.br

**Eletrosul – Centrais Elétricas S.A**

- ✓ Drenar qualquer outro tipo de corrente estabelecida que atinja a terra;
- ✓ Limitar potenciais de toque e passo;
- ✓ Receber ligações equipotenciais de massas metálicas

## 1.2 Características e fatores de influência

- ✓ Reticulado formado por eletrodos horizontais e verticais;
- ✓ Área de cobertura;
- ✓ Comprimento dos eletrodos;
- ✓ Geometria dos eletrodos e da área da malha de terra;
- ✓ Resistividade do solo;
- ✓ Natureza do solo);
- ✓ Quantidade de linhas conectadas devido as interligações com os cabos de cobertura das linhas de transmissão;
- ✓ Modelo de linhas equipotencias de corrente;
- ✓ Interligações com malhas vizinhas(ex. usinas e subestações conjugadas).

## 1.3 Circuito de medição

### 1.3.1 Condições Preliminares

Recomendações úteis para aplicação do método, o que proporciona um bom andamento na execução das medidas.

- ✓ Programar os desligamentos envolvidos com o centro de operação do sistema;
  - ✓ Obter o diagrama unifilar atualizado;
  - ✓ Definir a malha complexa a ser avaliada quanto à área e sua maior diagonal;
  - ✓ Efetuar o levantamento das Linhas de transmissão quanto à direções, tensões e freqüência de transmissão;
  - ✓ Definir a posição do eletrodo remoto de injeção, com o aproveitamento de uma linha previamente escolhida cujo desligamento cause o menor impacto no sistema. No caso de ampliações já estaria disponível. Quando não for possível utilizar uma das linhas conectadas analisadas, lançar de cabo isolado convencional e conectá-lo ao eletrodo remoto para injeção de corrente de teste;
  - ✓ Orientar prévias para equipes de linhas quanto a medições de corrente de injeção no eletrodo distante de corrente de retorno nas linhas não desligadas;
  - ✓ Definir da direção e tipo de cabo a ser lançado para levantamento do perfil de potencial da malha de terra;
  - ✓ Providenciar meios de comunicação entre a equipe de medidas na SE e as equipes remotas de injeção de corrente remota e de potencial;
  - ✓ Com auxílio do diagrama unifilar da SE observar a distribuição física dos equipamentos no pátio visando definições de medidas de tensão de toque;
  - ✓ Montar o circuito de corrente a partir de freqüência diferente de 60Hz com gerador e limitador de corrente;
  - ✓ Obter instrumentos que permitam medir seletivamente e com sensibilidade necessária;
  - ✓ Efetuar a medição seletiva e analisar os harmônicos de tensão e corrente;
- Observação: Preparar previamente as planilhas de medidas;

## 2 DETALHAMENTOS DAS MEDIÇÕES

Análises e medições em malhas de terra com certeza já foram executadas em algum momento por profissionais que atuam no setor elétrico, seja de forma acadêmica nas instituições de ensino de formação técnica ou nas empresas que atuam.

### 2.1 Injeção de Corrente

Após definição da linha de transmissão para a de injeção de corrente e conhecido o comprimento da maior diagonal da malha é escolhido uma torre a uma distância de no mínimo cinco vezes o valor do comprimento desta diagonal e utilizada a própria torre como eletrodo remoto de injeção de corrente (Figura 01). Na torre escolhida como eletrodo remoto de corrente.é isolado o cabo cobertura. Após a conexão de uma das fases na torre (eletrodo remoto) e no gerador na extremidade da malha da SE, é injetado corrente e três medidas iniciais se fazem necessárias. A intensidade e a freqüência da corrente na saída do gerador, a intensidade de corrente na conexão da linha- torre e no segmento de linha que segue o circuito de torres que compõem o circuito de corrente. O esperado é que toda a corrente medida na saída do gerador esteja presente na torre de injeção. Estas medidas podem ser feitas através de alicates amperimétricos e com operações de ligar e desligar o gerador de corrente é

possível verificar o comportamento da torre como eletrodo de injeção de corrente. A comunicação é estabelecida através de rádio onde ações são tomadas para tratar os desvios verificados. Uma amostra da corrente é medida na saída do gerador para análise das componentes harmônicas da corrente gerada, uma vez que o gerador é projetado para 60 Hz nominal e o mesmo está sendo acelerado ou desacelerado para operar em frequência diferente de 60Hz, o que causa distorção harmônica e somente a componente fundamental deverá ser considerada no cálculo da resistência de aterramento da malha.(Figura 2)

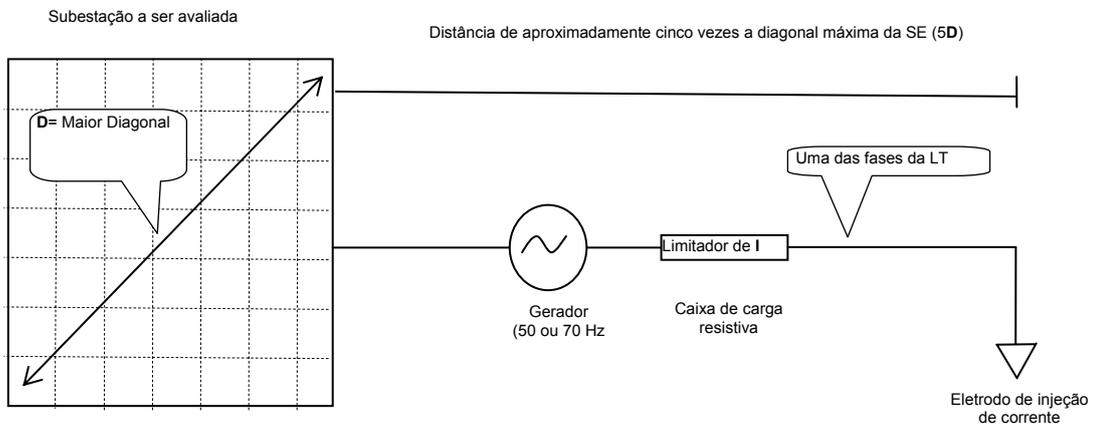


FIGURA 1 Circuito de injeção de corrente

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	69.664 Hz	126.38 V	100.000 %	0.0000	17.745 V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	139.33 Hz	887.90m V	0.703 %	63.506	122.67m V	0.691 %	135.85
Harmonic 3	208.99 Hz	22.317 V	17.659 %	-83.497	1.9071 V	10.747 %	88.903
Harmonic 4	278.66 Hz	471.92m V	0.373 %	-67.484	38.326m V	0.216 %	-110.66
Harmonic 5	348.32 Hz	2.9962 V	2.371 %	158.46	245.72m V	1.385 %	-79.296
Harmonic 6	417.98 Hz	266.09m V	0.211 %	-38.135	74.954m V	0.422 %	-108.35
Harmonic 7	487.65 Hz	551.81m V	0.437 %	-150.49	41.659m V	0.235 %	-167.09
Harmonic 8	557.31 Hz	152.20m V	0.120 %	6.8790	22.138m V	0.125 %	125.36
Harmonic 9	626.98 Hz	856.06m V	0.677 %	-176.39	67.526m V	0.381 %	-139.90
Harmonic 10	696.64 Hz	107.22m V	0.085 %	158.68	27.585m V	0.155 %	-14.787
Harmonic 11	766.31 Hz	595.60m V	0.471 %	22.591	43.477m V	0.245 %	-120.26
Harmonic 12	835.97 Hz	208.40m V	0.165 %	90.209	110.52m V	0.623 %	-108.57
Harmonic 13	905.63 Hz	234.64m V	0.186 %	-92.539	70.655m V	0.398 %	31.340

FIGURA 2 – Harmônicas

## 2.2 Medida seletiva do potencial

Tomando-se a direção de injeção de corrente distante, as medidas para levantamento do perfil de potencial são feitas em um ângulo igual ou maior que noventa graus, a cada cinqüenta ou cem metros. A haste de medição deve ser cravada no solo com pelo menos vinte centímetros de profundidade. Uma variação dos métodos convencionais é a utilização de fio cobre esmaltado de diâmetros menores de um milímetro como cabo de medição de potencial, o que propicia fácil manejo devido as pequenas dimensões do carretel. O ponto de conexão deve ser raspado para a medição de potencial e após cada medição isola-se o condutor com fita isolante comum. Outro ganho é que após a execução das medidas de potencial condutor poderá ser recolhido sem preocupação de reaproveitamento gerando um ganho em homem/hora de trabalho. A figura 3 descreve detalhes da medida de potencial.

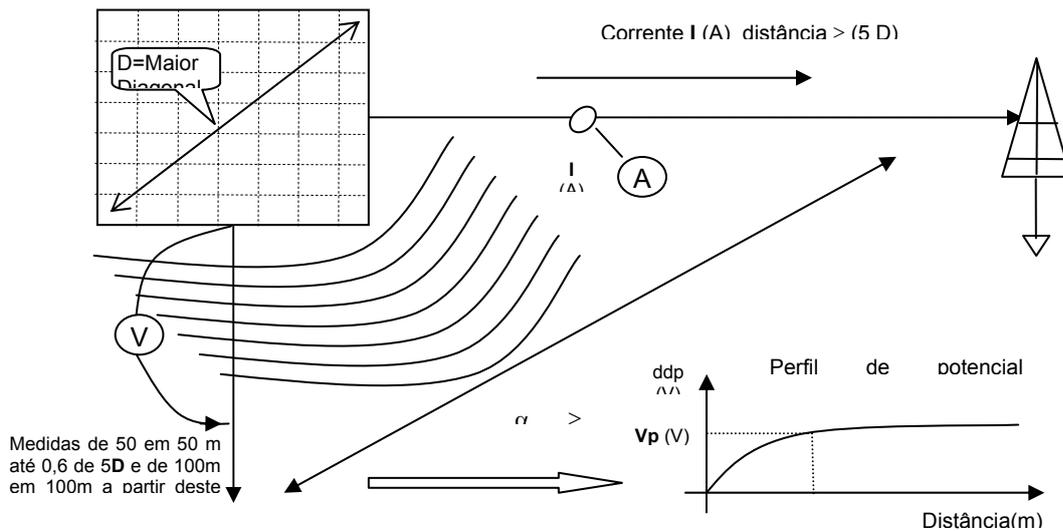


FIGURA 3 Direção da medição de potencial em relação a Injeção de corrente no eletrodo distante

As medidas de tensão de potencial são executadas na SE, através de um voltímetro de alta sensibilidade e seletividade. Um sistema de acoplamento para ampliar a impedância de entrada foi desenvolvido assim como terminações para facilitar as conexões dos cabos. A seletividade do voltímetro utilizado é de mais ou menos três hertz, logo, com uma banda passante de seis hertz, com rejeição de quarenta dB para sinais com frequência fora da faixa. Uma varredura no espectro de frequências (fundamental e harmônicas) fornece dados para avaliação do ambiente de interferências e uma escolha apropriada da frequência de injeção. Esta medição do espectro pode ser feita como uma medição de passo ou de toque sem a injeção de corrente, apenas com as correntes existente na malha da SE.

Através de um alicate amperimétrico mede-se todas as correntes de retorno nos cabos cobertura das linhas devem ser medidos. A operação que é realizada com auxílio de um eletricista de linha e um sistema de comunicação via rádio, sendo importante considerar a componente fundamental da corrente injetada em relação ao espectro de frequência corrente injetada pelo gerador.

### 2.3 Medidas de tensão de toque e passo

As medidas de tensão de toque e passo são executadas em pontos internos da malha, equipamentos, portões, e cercas de proteção e de limite de propriedade, sendo utilizado como medidor de tensão o mesmo voltímetro seletivo para determinação do perfil de potencial (Figura 04). Como os níveis são de baixa intensidade são utilizados lances de 50 metros de cabo coaxial de 50Ω ou 75 Ω terminados com conectores apropriados, o que facilita o manejo e a medição seqüencial de toque entre uma haste conectada na malha e a estrutura; e entre duas hastes a tensão de passo o que representa ganho considerável de tempo.

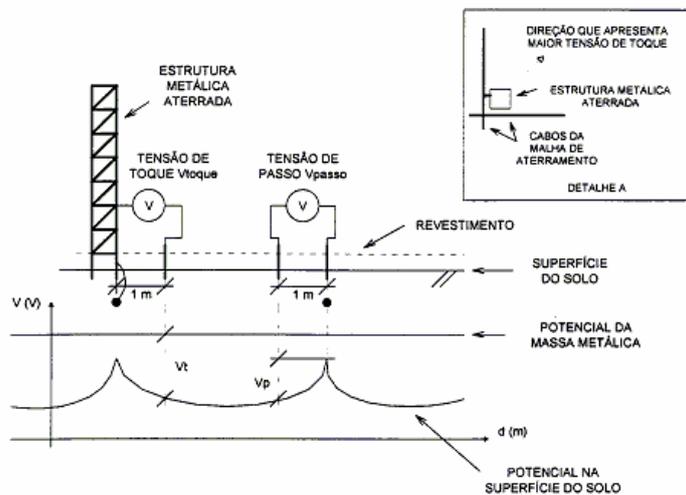


FIGURA 4- Tensão de toque e passo (SCM15<sup>[2]</sup>)

## 2.4 Cálculos

### 2.4.1 Valor da resistência de aterramento da malha

$$R_m = \left[ \frac{V_{patamar}}{I_{fundamental.injetada} - \sum_0^n I_{retorno.cabos.de.cobertura}} \right] (\Omega) \pm Um(\Omega)$$

$R_m$  – Resistência de aterramento medido;

$V_{patamar}$  – Tensão obtida no patamar do perfil de potencial;

$I_{fundamental\ do\ gerador}$  – Valor da fundamental da corrente injetada;

$$\sum_0^j I_{retorno.cabos.de.cobertura} = \text{Somatório do retorno de corrente pelos cabos de cobertura das "n" linhas conectadas;}$$

### 2.4.2 $U_m$ = Incerteza de Medição

Na avaliação metrológica da medição são consideradas as seguintes fontes de incerteza tipo B pois os instrumentos devem ter especificações que não necessitem correções na temperatura de umidade relativa em que são utilizados;

- ✓ "Accuracy" e resolução do Voltímetro seletivo;
- ✓ "Accuracy" e resolução dos alicates amperimétricos;
- ✓ "Accuracy" e resolução dos analisadores de espectro na medida da fundamental de corrente;

A incerteza tipo A, foi definida como o desvio experimental das "n" medidas no patamar de potencial;

O guia para cálculo da incerteza de medição foi o editado pelo INMETRO - "Guia para a Expressão da Incerteza de Medição".

### 2.4.3 Tensão de passo e toque

Conhecendo-se o valor da fundamental da corrente de teste e a máxima corrente de falta estimada pode-se estimar os potenciais de toque e passo para a pior condição dentre o valores medidos utilizando-se os valores de maior intensidade.

$$V_{passo} = \frac{V_{passo.máxima} I_{falta.máxima}}{I_{fundamental.do.gerador}} (V)$$

$$V_{toque} = \frac{V_{toque.máxima} I_{falta.máxima}}{I_{fundamental.do.gerador}} (V)$$

Exemplo de planilhas em testes executados na SE-Santa Rosa, Rio Grande do Sul, em maio de 2004, onde a corrente máxima de falta na ordem de 6kA, onde o pior caso foi de tensão de toque no pátio foi de 81,82V. A literatura define o tempo de falta não superior a 500 milisegundos.

TABELA 3- Tensão de Toque no Pátio				
PONTO DE MEDIÇÃO	IDENTIF. DO LOCAL	TENSÃO MEDIDA (mV)	Corrente Efetiva considerada (A)	TENSÃO EM CONDIÇÕES DE FALHA (V)
T 01	Pórtico - Sala	65,0	13,2	29,55
T 02	CS 89 C	53,0	13,2	24,09
T 03	Pórtico - Isolador	98,0	13,2	44,55
T 04	DJ 52	70,0	13,2	31,82
T 05	CS 89 D	53,0	13,2	24,09
T 06	CS 89 E	53,0	13,2	24,09
T 07	Pórtico Barra	98,0	13,2	44,55
T 08	Pórtico	54,0	13,2	24,55
T 09	Barra A	60,0	13,2	27,27
<b>T 10</b>	<b>PR - Fase B</b>	<b>180,0</b>	<b>13,2</b>	<b>81,82</b>

Exemplo para a mesma subestação para as tensões de passo onde o pior caso ocorreu próximo ao portão de entrada.

TABELA 2 – Tensão de Passo

PONTO DE MEDIÇÃO	TENSÃO MEDIDA (mV)	TENSÃO EM CONDIÇÕES DE FALHA (V)	IDENTIF. DO LOCAL
P 01 H	36,0	16,36	Portão de Entrada
<b>P 02 V</b>	<b>110,0</b>	<b>50,00</b>	<b>Portão de Entrada</b>
P 03	4,0	1,82	Lado Sala Relés
P 04	6,0	2,73	Frente Sala Relés
P 05	6,0	2,73	Sob Barra Sala Rele's
P 06	7,0	3,18	Lado Barra Sala Rele's
P 07	79,0	35,91	Lado Barra Sala Rele's
P 08	14,0	6,36	Painel DJ
P 09	5,0	2,27	Sob a CS Barra LT
P 10	2,6	1,18	Painel CS Barra LT

### 3 COMPARAÇÃO DE MÉTODOS

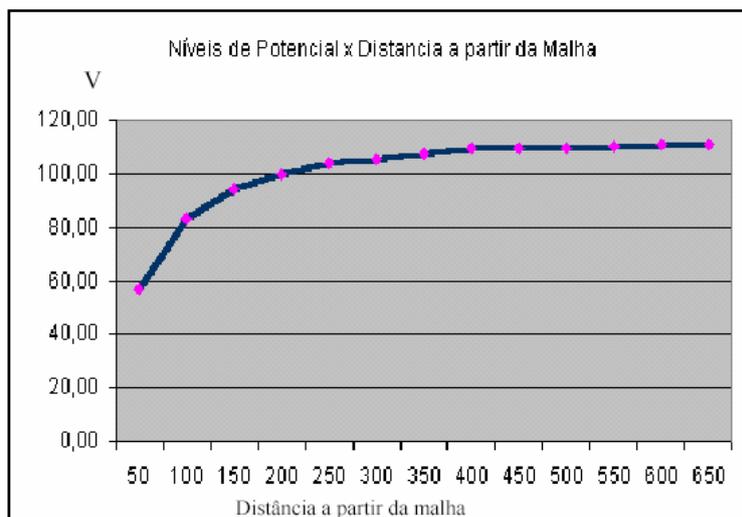
Medidas comparativas entre os dois métodos aplicados em uma mesma subestação em épocas diferentes (6 meses).

#### 3.1 Condição A

Método tradicional, com 60Hz, em Subestação isolada, nova, desenergizada e injeção alta corrente):

Ponto de medição	Distância(m)	Tensão medida(V)	Corrente aplicada(A)	Rm Medido( $\Omega$ )
1	50	57,20	78	0,73
2	100	83,00	78	1,06
3	150	94,40	78	1,21
4	200	100,00	78	1,28
5	250	104,00	78	1,33
6	300	105,60	78	1,35
7	350	107,50	78	1,38
8	400	109,30	78	1,40
9	450	109,50	78	1,40
10	500	109,50	78	1,40
11	550	110,20	78	1,41
12	600	110,80	78	1,42
13	650	110,80	78	1,42

#### Perfil do potencial da malha



### 3.2 Condição B

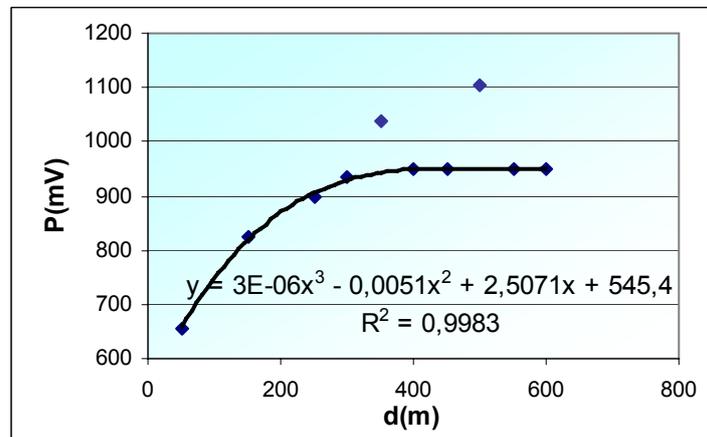
Medidas efetuadas aproximadamente seis meses após a subestação entrar em operação, com corrente de injeção de 50Hz, baixa corrente ( $\approx 1A$ ), medição seletiva e com influência das linhas.

Tabela de dados (janeiro de 2004)

Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d (m)	50	150	250	300	350	400	450	500	550	600
Pn (mV)	657	823	897,1	934,2	1038,4	949,7	949,7	1104,2	949,7	949,7
Corrente(A)	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95

$$R_m = \frac{0,9497}{0,95} = 0,99\Omega \pm 0,03\Omega$$

Perfil de potencial da Malha



## 4 MEDIDAS COMPLEMENTARES DE CONEXÕES DE EQUIPAMENTOS À MALHA DE TERRA

### 4.1 Introdução

A medição da resistência da Malha de Terra da Subestação pode ser vista como um sistema de aterramento relativamente complexo dependendo da distribuição geométrica da trama malha da SE, eletrodos das cercas de proteção e limite de propriedade, malhas de usinas quando conectadas na malha da subestação e o conjunto de eletrodos longos constituídos pelos cabos de cobertura das linhas que estão conectados na malha. Em condições normais torna-se muito difícil a medição da malha como um subsistema isolado, pois envolve custos de indisponibilidade, logística de infraestrutura e equipes de técnicos em frentes de trabalhos com coordenação sincronizada. A inspeção visual do estado das conexões de projeto é inviável, logo um procedimento de medição complementar é importante para avaliar o estado das conexões entre os equipamentos e as estruturas metálicas do pátio à malha complexa, cuja medição da resistência de aterramento foi efetuada como descrito no tópico anterior.

### 4.2 Instrumentos necessários

- Fonte de corrente DC com capacidade de até 100A, com compliance de aproximadamente de 2,5V;
- Alicates amperimétrico Digital ADC, com escala de 100 A;
- Multímetro digital de 4½ dígitos;
- 02 cabos para injeção de corrente com capacidade mínima de 100A com 10 metros de comprimento;
- 02 cabos para medição de potencial de aproximadamente 1,5 mm de diâmetro de mesmos comprimentos dos de injeção de corrente;
- Conectores adequados para uma boa conexão nos cabos de terra dos equipamentos em avaliação.

#### 4.3 Definição dos pontos de medição

Os módulos de operação devidamente identificados na SE, tem se mostrado uma boa opção para identificação e definição dos pontos a serem medidos. A referência pode ser um aterramento de um pórtico ou outro, preferencialmente que não seja de um equipamento. As medições são executadas a quatro fios, em blocos, cujos pontos de medidas estão relacionados a determinado módulo da SE. Uma linha e uma planilha de pontos pode ser elaborada, como o exemplo a seguir.

PONTO REFERÊNCIA	PONTO MEDIÇÃO	DISTÂNCIA (m)	TENSÃO (mV)	CORRENTE (A)	RESISTÊNCIA (mΩ)
PÓRTICO 69 kV ENTRE LI USJE E TF6	PR LI USJE	4,0	82	83	0,99
	CS 425 LI USJE	5,8	356	76	4,68
	TPC TELECOM LI USJE	7,0	600	69	8,70
	TP LI USJE	6,2	400	77	5,19
	TC LI USJE	7,5	420	76	5,53
	DJ 422 LI USJE	10,0	160	84	1,90
	CS 423 LI USJE	20,0	260	84	3,10
	CS 343 TF6	19,5	180	83	2,17
	CS 341 TF6	18,0	240	83	2,89
	DJ 342 TF6	9,5	170	85	2,00
	CS 345 TF6	6,7	200	84	2,38
	TC 69 kV TF6	4,4	250	82	3,05

#### 5 CONCLUSÕES

- ✓ O método de avaliação com frequência diferente de 60Hz não sofre interferência do sistema energizado, podendo ser tratado como um sistema isolado para medições e análises de engenharia;
- ✓ A ordem de grandeza da corrente injetada é bem inferior a que seria necessário para o método convencional, o que propicia equipamentos de menor volume para o manejo. Esta constatação representa uma grande vantagem prática para pesquisa e desenvolvimento de instrumentação aplicada a este processo.
- ✓ Medições periódicas da resistência de aterramento da malha com a SE energizada, se apresenta como uma boa opção para o acompanhamento preditivo;
- ✓ O método proporciona ganho no tempo de execução dos ensaios;
- ✓ A execução dos ensaios exige profissionais especializados;
- ✓ Os ensaios complementares de conexões descritos no item 5, entre os equipamentos e estruturas metálicas para a malha da subestação, permitem o acompanhamento preditivo das mesmas ao longo do tempo, assim como, determinar com eficiência as conexões degradadas.

#### 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Instruções técnicas e relatórios da Engenharia de manutenção da Eletrosul;
- (2) SCM 15 – Procedimentos, técnicas e critérios para recepção e manutenção de malhas de aterramento de subestações – 1997;
- (3) Visacro Filho, Silvério – “Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento” - Artiber Editora – 2002;
- (4) Leite, Carlos Moreira – “ Técnica de aterramentos elétricos: cálculos, projetos e softwares para aterramentos” – Oficina de Mídia Editora , 1996
- (5) “Guia para a Expressão da Incerteza de Medição”. 2a Edição brasileira em língua portuguesa. Rio de Janeiro - INMETRO, 1998.
- (6) Norma ANSI/IEEE 80 – “Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Inc, 1986;
- (7) Relatório de avaliações em Malha de Terra em Subestações da Eletrosul; 2003-2004