



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

GCQ 14  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

**GRUPO XIII  
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E  
QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA – GCQ**

**NOVA TÉCNICA DE AVALIAÇÃO DAS CONEXÕES DE ATERRAMENTO DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS  
EM SEs ENERGIZADAS PARA ATENDIMENTO DA NR-10**

**Luis R. Alfaro Gamboa \***

**Renata Jacyszyn Bachega**

**Rosane Maris Ribas**

**LACTEC– Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento    COPEL– Companhia Paranaense de Energia**

**RESUMO**

A integridade de uma malha de aterramento de SE pode ser afetada por processos de corrosão, solicitações mecânicas, montagem ou comissionamento inadequados e vandalismo. A degradação da malha não afeta sua resistência global, sem antes provocar falhas nas conexões enterradas, podendo ocasionar choque elétrico. O trabalho apresenta uma alternativa econômica e rápida para avaliar o estado das conexões de aterramento de equipamentos em SEs energizadas, além dos cuidados necessários e casos detectados. O método proposto permite atender a NR-10, que exige um prontuário com medições e não indica métodos adequados para casos como o das conexões enterradas de SEs energizadas.

**PALAVRAS-CHAVE**

Malha de Terra, Segurança, Equipamentos de Subestação.

**1.0 – INTRODUÇÃO**

O valor da resistência de aterramento de uma malha é basicamente determinado pela sua área e pela resistividade do solo em que está situada. Assim, a medição convencional de resistência de aterramento mostra-se ineficaz para detectar, com clareza, o estado de degradação de condutores e conexões enterradas. Os defeitos em conexões enterradas são pontuais. Alguns métodos tem sido tradicionalmente usados (microhmímetros) e, mais recentemente, outros (Sotille, 2005) baseados na verificação de potenciais anômalos no solo durante a injeção de corrente em SEs energizadas com fontes especiais de alta frequência.

Como consequência de relato de choque elétrico em estrutura de equipamento de SE de 138 kV mal aterrada, por que sua conexão enterrada estava interrompida, procurou-se um método fácil de verificar o estado de conexões de aterramento em SEs, de forma preventiva. No caso citado, as medições indicaram um valor de resistência de 14  $\Omega$  para a conexão de terra deste equipamento. A inspeção visual comprovou a falha mostrando vários centímetros de solo escurecido entre o cabo de terra interrompido do equipamento e a malha da SE.

A alternativa de medição encontrada procura atender a NR 10 (Ref. 1) que exige um prontuário de medições do sistema de proteção das instalações elétricas, porém sem especificar os métodos aplicáveis. Recentemente, além da longevidade da maioria das malhas em operação, o estado dos sistemas de aterramento de SEs tem sido agravado por fatores como o vandalismo, que tem merecido cuidados especiais. Assim, cresceu a necessidade de

se buscar alternativas de medição viáveis, especialmente em SE energizadas. Para a medição da resistência (global) de aterramento de malhas energizadas, métodos alternativos têm sido desenvolvidos. Ver Ref. 2 e 3.

O modelo básico que explica o aparecimento de sobretensões na carcaça de equipamentos ou em condutores de terra mal conectados (aterramento flutuante), é o acoplamento capacitivo entre os elementos energizados em AT (enrolamentos, contatos, terminais de AT) e a carcaça do equipamento através de uma propriedade intrínseca de qualquer isolamento: a capacitância do material dielétrico e a geometria empregada.

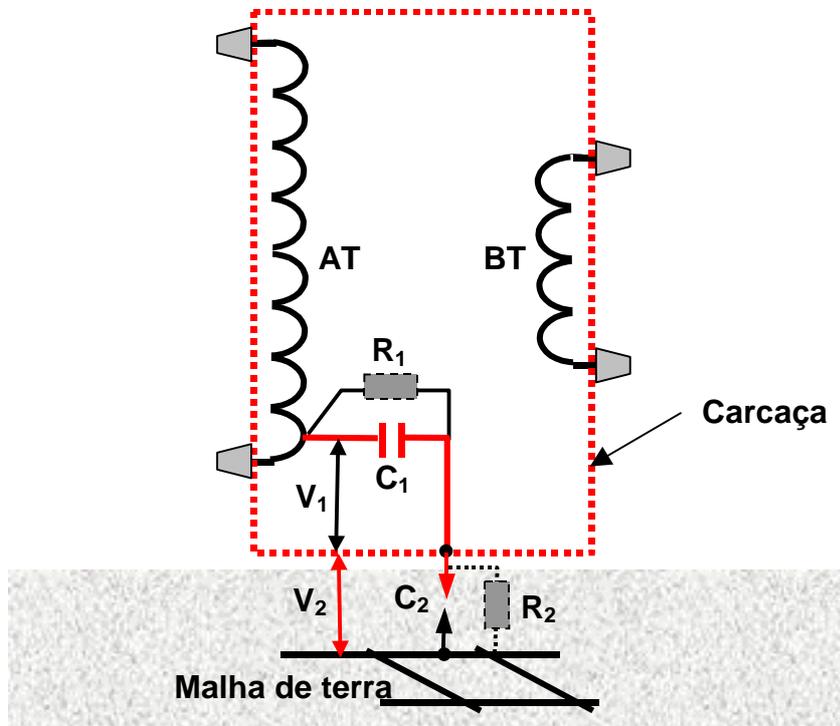


FIGURA 1 – TENSÃO  $V_2$  ENTRE CARCAÇA E MALHA POR FALHA NA CONEXÃO DE TERRA

A figura 1 mostra simplificada o circuito equivalente formado entre o lado de AT do equipamento energizado, com sua ligação de aterramento aberta, e a malha de terra. Nesta situação aparece um divisor de tensão formado pelas capacitâncias  $C_1$  (da isolamento AT) e  $C_2$  (do *gap* que representa a falha na conexão enterrada). Também são representadas as resistências  $R_1$  e  $R_2$  correspondentes a estas isolações. É importante notar que em termos de impedância limitadora (para 60 Hz) da corrente de fuga até a carcaça, o ramo de  $C_1$  (reatância  $X_{C1}$ ) representa um caminho muito mais fácil que  $R_1$ . Esta relação é da ordem de 50 a 200 vezes. Correntes capacitivas entre poucos mA e dezenas de mA são esperadas (e verificadas) em equipamentos energizados em função da reatância  $X_{C1}$ . Assim, dependendo da condição e do ponto da interrupção, pode haver risco fatal. Alguns acidentes fatais registrados durante furtos de cabos de aterramento em SEs já foram registrados no Paraná. Estes problemas são potencialmente mais graves quando o alvo do furto é o cabo terra do neutro de um equipamento, onde não há uma isolamento principal ( $X_{C1}$ ) limitando a corrente de fuga pela vítima.

As características do lado secundário do divisor apresentado são mais difíceis de determinar, especialmente se a conexão aberta está enterrada. Neste caso, para distâncias pequenas, a resistência  $R_2$  será muito menor que  $R_1$  e  $C_2$  também é inferior a  $C_1$ , de modo que o caminho resistivo predominará ( $R_2 \ll X_{C2}$ ). O contato manual com a carcaça será mais ou menos perigoso em função do valor de  $R_2$ , uma vez que a tensão  $V_2$  será proporcional a esta resistência. O valor da corrente que ocasiona o choque elétrico será máximo (limitado por  $X_{C1}$  e a resistência do corpo humano) se o condutor estiver interrompido acima da superfície do solo. Um caso particular pode ocorrer durante a manutenção terceirizada de SEs com cobertura de grama, em que o uso incorreto de máquinas de cortar grama provoca o seccionamento de cabos de aterramento de equipamentos no nível das lâminas de corte.

Quando a falha da conexão por degradação ocorre no aterramento do neutro de equipamentos ou de bancos trifásicos os efeitos são detectados, em regime, pelos próprios sistemas de proteção e de medição da SE ou mesmo por arcos elétricos no solo, observáveis durante operações de manobra.

## 2.0 – AVALIAÇÃO DAS CONEXÕES DOS EQUIPAMENTOS COM A MALHA DE TERRA DA SE

### 2.1 – Segurança

Devem ser coordenadas as atividades de modo a evitar o contato manual com condutores ou estruturas aterradas durante operações voluntárias de equipamentos de manobra da SE.

As medições devem ser realizadas em condições de tempo bom, usando-se EPIs e acessórios específicos similares aos descritos neste trabalho.

### 2.2 – Descrição do alicate terrômetro

O alicate terrômetro opera aplicando corrente como num TC de bucha ou de janela, com alimentação pelo secundário, e o primário fechado através da resistência sob teste,  $R_x$ . Por não ser um curto-circuito franco, a corrente induzida no circuito externo dependerá da resistência  $R_x$  (figura 2). Um segundo enrolamento é montado no núcleo magnético e fornece uma tensão  $E$ , proporcional ao valor da corrente  $I$ . No *display* o instrumento entregará o valor da resistência  $R$  a partir do quociente  $E/I$ . Ver referência 4.

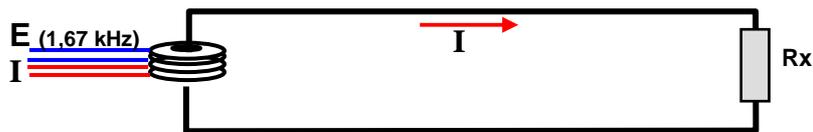


FIGURA 2 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO ALICATE TERRÔMETRO

A frequência empregada pelo oscilador interno destes instrumentos está na faixa de 1,5 a 2,5 kHz e inclui um filtro para atenuar a interferência de circuitos 60 Hz e seus principais harmônicos.

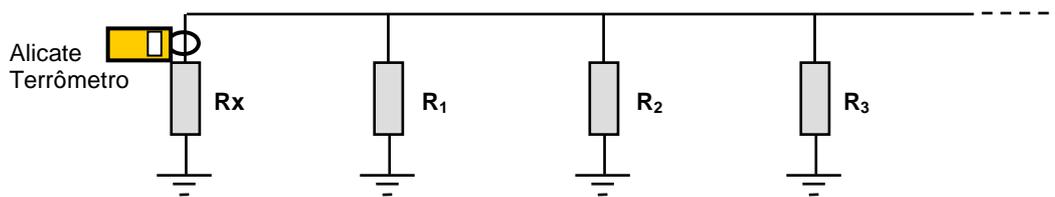


FIGURA 3 – MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO COM ALICATE TERRÔMETRO

**Importante.** Este método não se aplica à medição de resistências de malhas de terra de SEs. Sua aplicação é indicada para *loops* de resistência (sistemas multiaterrados), como em redes de distribuição, onde o neutro é aterrado em muitos pontos (e a cada consumidor). Neste caso, o erro de medição é minimizado, conforme mostra a tabela 1 para o caso de resistências de mesmo valor, interligadas de acordo com a figura 3. A tabela 1 mostra o erro do valor medido com relação à resistência sob teste,  $R_x$ , em função do número de eletrodos de terra em paralelo que completam o *loop* de resistência ( $R_1, R_2, R_3 \dots$ ) necessário para estabelecer a corrente de ensaio.

TABELA 1 – ERROS NA MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA (GLOBAL) EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE ELETRODOS

Nº de eletrodos	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50
Erro (%)	100,0	50,0	33,3	25,0	20,0	16,7	14,3	12,5	11,1	5,3	3,4	2,6	2,0

**Observação.** O problema principal para medição de resistências de malhas de SE com este método, é a necessidade de se aplicar um eletrodo (ou malha) auxiliar, suficientemente distante, e com resistência ( $R_{aux}$ ) de valor conhecido ou suficientemente baixo comparado com a resistência a ser medida para poder subtrair seu valor, por cálculo, do valor a ser medido ( $R_x + R_{aux}$ ) com uma resolução adequada. Num exemplo prático, uma malha de  $1 \Omega$  necessitaria de um valor extremamente baixo (50 vezes menor, algo impraticável) para a aplicação do método com boa precisão. Como alternativa, um sistema de eletrodos de terra com resistência de maior valor poderia ser empregado como  $R_{aux}$ , desde que determinado por um método preciso. Em algumas tentativas realizadas pelo Lactec e Copel com um sistema de dois eletrodos enterrados, medidos em série ( $2R_{aux}$ ) com alicate terrômetro, e aplicados em paralelo para se obter um valor menor ( $R_{aux}/2$ ), a certeza no cálculo desta associação ficou comprometida por razões práticas (contato não idêntico de cada haste com o solo, estratificação não homogênea do terreno próximo da SE, etc) e inviabilizou esta alternativa.

### 2.3 – Medição da resistência de conexões enterradas – método convencional

O método convencional mais direto para inspeção das conexões enterradas é a medição direta de resistência após a abertura de valetas. A medição de resistência é feita entre os dois lados da solda ou conector de cada conexão com um microhmímetro ou multímetro convencional. Condutores curtos e trançados dispensam maiores cuidados com relação à interferência. A limpeza dos pontos em contato com as pontas de prova é essencial. No caso dos microhmímetros (ou pontes do tipo *Wheatstone*) ajustes de corrente ou resistência são necessários para cada novo ponto medido. O procedimento usual costuma ser mais simplificado com a medição de conexões, duas a duas, a partir das descidas de cabos de aterramento, sendo assim desnecessário abrir valetas exceto para verificar e corrigir pontos suspeitos de defeito.

### 2.4 – Medições de resistência em conexões de aterramento com alicate terrômetro

#### 2.4.1 Aspectos gerais

O método proposto a seguir permite uma avaliação correta da condição de falha ou não do aterramento de equipamentos da SE, embora não indique com precisão o grau de corrosão de uma conexão que ainda esteja com boa continuidade. A principal vantagem é a obtenção rápida do estado das conexões enterradas de equipamentos, duas a duas, para fins de comissionamento ou manutenção, dispensando ajustes iniciais para cada leitura.

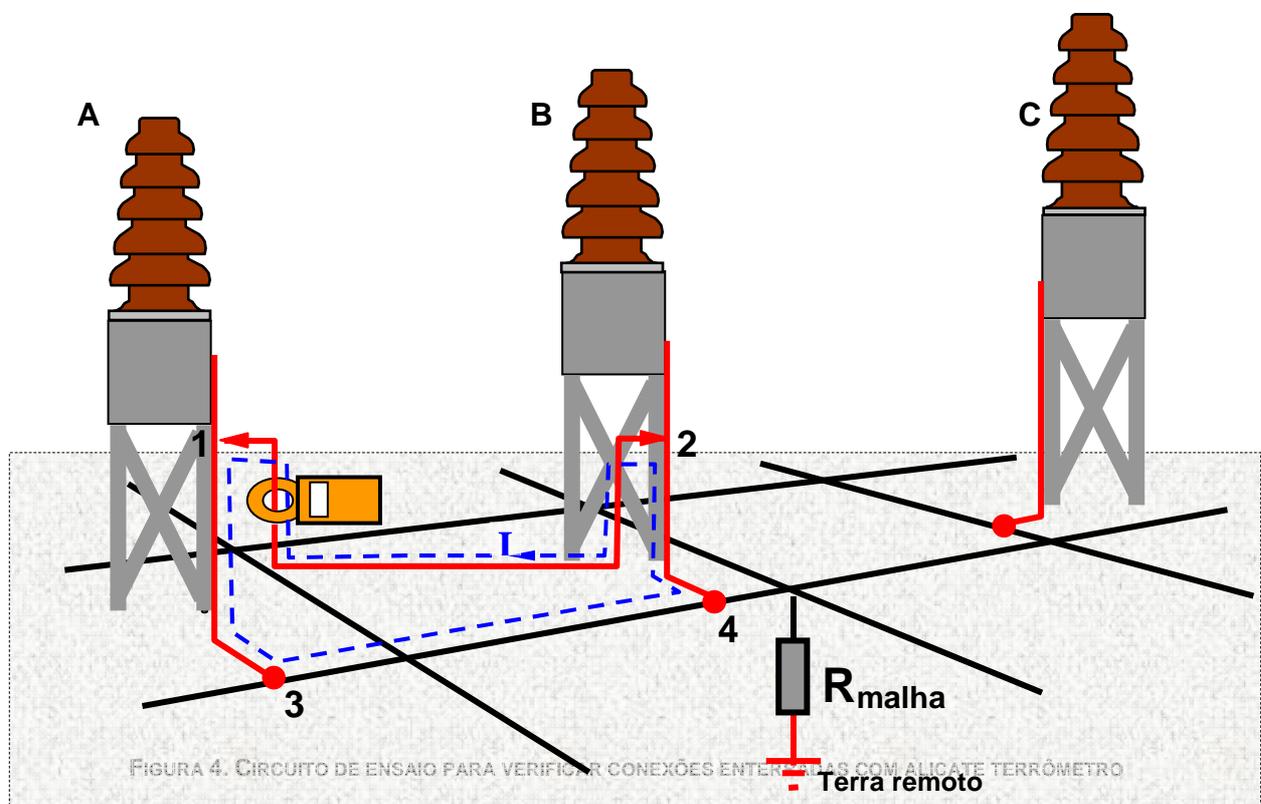


FIGURA 4. MÉTODO DE MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO COM ALICATE TERRÔMETRO

Para efetuar a medição de um par de conexões enterradas de dois equipamentos de AT é necessário curto-circuitar as descidas dos cabos de aterramento (figura 4). A resistência total medida pelo instrumento será o somatório da resistência do cabo de medição e da malha, mais as conexões de ensaio (1 e 2) e as conexões enterradas da malha (3 e 4).

No caso acima, a medição mostrará o estado das conexões de aterramento dos equipamentos das fases A e B. A resistência do circuito de medição (cabo mais conexões de ensaio) não ultrapassa 400 mΩ. A resistência dos cabos de terra e das duas conexões enterradas em boas condições costuma ser inferior a 100 mΩ. Desta forma, admitindo-se uma tolerância inerente a erros de medição, valores de resistências acima de 1 Ω são considerados como indicativos de defeito em pelo menos uma das duas conexões testadas.

#### 2.4.2 Procedimento de medição.

O procedimento de medição recomendado é apresentado a seguir:

- Verificar, com a operação, as condições de serviço para evitar manobras voluntárias no pátio da SE durante as medições, de modo a minimizar riscos de acidentes com potenciais de passo e toque;
- Dispor do desenho da malha de terra e de um esquema da SE. Identificar as conexões de aterramento para facilitar o registro de valores em planilha de ensaio;
- Ligar o alicate terrômetro na função  $\Omega$  e aguardar o fim da contagem regressiva de sua auto-calibração;
- Com o auxílio das resistências de calibração de 0,5 e 10  $\Omega$ , verificar se o alicate terrômetro opera normalmente, dentro de sua classe de exatidão. Estas resistências são parte integrante do instrumento. Ver detalhe na figura 5;



FIGURA 5. CALIBRAÇÃO DO ALICATE TERRÔMETRO (COM RESISTOR DE 0,5  $\Omega$ )

- Após vestir o jogo de luvas de 15 kV, conectar uma das pontas de corrente do cabo de interligação em cada uma das descidas das conexões de aterramento sob teste (figura 6). É importante espetar o cabo de aterramento contra a estrutura em que está fixado para garantir uma boa conexão com segurança. Para estas ligações também podem ser usadas garras de corrente, porém, na prática, “espetar” o cabo de aterramento é mais eficiente, especialmente porque em geral os cabos se encontram sujos ou corroídos, o que obriga a movimentar as garras para gastar a superfície do cabo e garantir uma boa conexão;
- Enlaçar o cabo de medição com o alicate terrômetro, aguardar a estabilização da leitura e registrar o valor da resistência (ver detalhe da figura 6). Anotar o valor em planilha;



FIGURA 6. MEDIÇÃO NAS DESCIDAS DE DOIS CABOS DE ATERRAMENTO (2 técnicos)

- Detalhes dos terminais atualmente empregados pela equipe da Copel são mostrados na figura 7. Observar que são usadas pontas duplas rígidas ou retráteis (estas últimas são melhores, por garantir mais rapidamente a estabilidade das leituras) para facilitar o encaixe firme com a superfície dos cabos ou plataformas metálicas de equipamentos de manobra. As pontas são montadas e adaptadas a segmentos de varas de manobra.

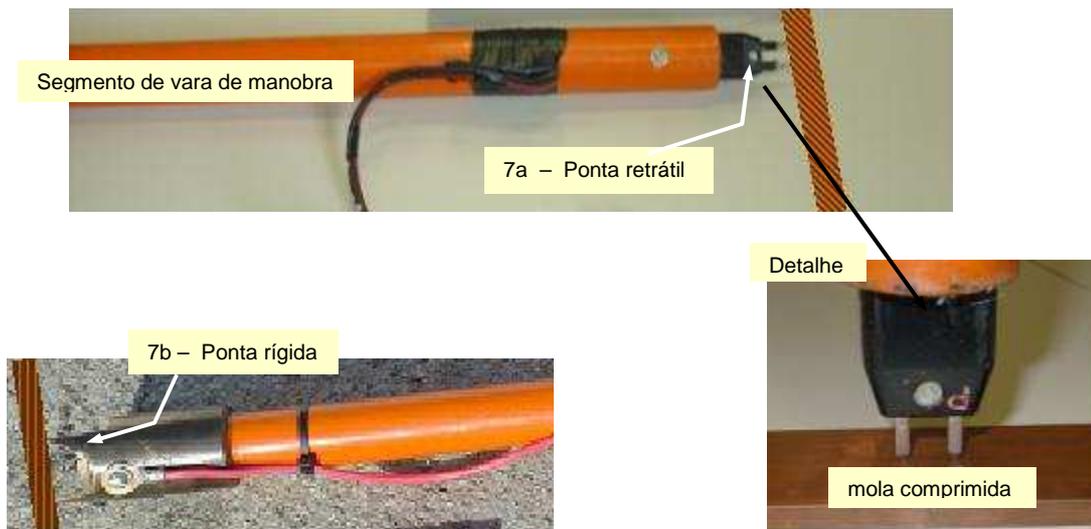


FIGURA 7 – DETALHE DAS PONTAS DE PROVA USADAS

- Repetir este procedimento para outro par de conexões enterradas até completar o conjunto de medições programado.

**Observação.** Para minimizar o número de medições em equipamentos monofásicos da mesma barra, como conjuntos de pára-raios e TIs, a seqüência mais prática é manter como referência a descida do cabo de aterramento da fase A e efetuar a medição contra cada uma das descidas das fases B e C ( $R_{A-B}$  e  $R_{A-C}$ ). Se nestas duas medidas for confirmada a continuidade (valor inferior ao limite de 1  $\Omega$ ) pode-se considerar que as três conexões enterradas estão corretas e assim dispensar a medição de  $R_{B-C}$ .

## 2.5 – Análise e interpretação dos resultados

### 2.5.1 – Valores limites

Para valores acima de 1  $\Omega$ , verificar o aperto das conexões do circuito de medição, a condição do cabo de interligação e a calibração do alicate terrômetro e repetir a medição. Se o valor medido após esta verificação se mantiver elevado, pode-se concluir que uma das conexões enterradas está comprometida. Vários casos podem ser encontrados e são descritos a seguir.

- a) Uma conexão aberta.

Neste caso, será necessário testar cada uma das descidas contra uma terceira para saber qual das conexões suspeitas está com defeito.

Por exemplo, num teste realizado na SE CCO, a equipe de manutenção verificou num conjunto de TCs uma medida de aproximadamente 14  $\Omega$  numa das medições. Após verificar as conexões de ensaio este valor foi repetido. Por comparação, verificou-se que uma destas conexões devia estar aberta. As medições feitas foram:  $R_{A-B} = 14 \Omega$ ;  $R_{A-C} = 150 \text{ m}\Omega$ ; e  $R_{B-C} = 14 \Omega$ .

A interpretação destes resultados é simples, uma vez que sempre que o cabo de aterramento da carcaça do TC da fase B esteve envolvido o valor da resistência medida foi elevado (14  $\Omega$ ), muito acima do limite recomendado (1  $\Omega$ ) enquanto que na medição que envolve as descidas dos cabos de aterramento dos TCs das fases A e C, o valor foi normal (150 m $\Omega$ ). Esta medição foi realizada com um cabo de interligação curto, de 8 metros. Atualmente a Copel usa um cabo de 16 metros para poder realizar medidas entre pontos distantes de malhas de SEs de 230 kV.

Outros dois casos foram verificados no aterramento de centelhadores de duas LTs de 230 kV. Os valores medidos foram de 3,5  $\Omega$  e 8,1  $\Omega$ , em cada um dos casos. A abertura de valetas confirmou que a conexão entre as hastes de terra envolvidas e a malha da SE não tinha sido executada pela empreiteira, embora fosse prevista no projeto. Nos demais centelhadores, com aterramento normal, os valores foram da ordem de 400 m $\Omega$ .

Um caso de conexão aberta no aterramento de uma plataforma metálica para manobrar seccionadora foi verificado, o valor da resistência foi de 4  $\Omega$ .

b) Mais de uma conexão aberta.

Se das três descidas de um determinado circuito duas conexões estiverem abertas, aparecerão dois valores superiores a  $1 \Omega$  e o terceiro de aproximadamente o somatório deles. Para confirmar é recomendado empregar como referência uma conexão próxima (que já tenha mostrado valor normal) e medir com relação a esta as três descidas do circuito suspeito.

c) Aterramento de estruturas metálicas com mais de uma descida.

É importante considerar que na SE pode haver estruturas com mais de uma descida de aterramento (pórticos, travessas metálicas de equipamentos, etc). Como as descidas estão interligadas via estrutura metálica comum, a medição feita com o instrumento enlaçando o cabo de interligação acusará um valor baixo, independentemente das conexões enterradas estarem danificadas ou abertas, uma vez que o circuito é fechado metalicamente acima das pontas de prova. Neste caso é necessário colocar o instrumento num dos dois cabos de aterramento numa posição abaixo da conexão com a ponta de prova. Esta solução nem sempre é fácil, porque a folga física para encaixar o terrômetro alicate na descida do cabo terra (abaixo da última braçadeira de fixação à estrutura metálica) obriga a forçar fisicamente o afastamento deste cabo.

Após verificar a existência de conexões enterradas deficientes será necessário programar uma inspeção visual da conexão enterrada para dimensionar o problema e programar uma manutenção corretiva.

## 2.6 – Observações e cuidados adicionais

**a) Ruído.** Em alguns locais das SEs, o campo eletromagnético pode ser muito intenso e gerar uma corrente induzida de 60 Hz circulando pelo cabo de medição. Dependendo do valor desta corrente induzida o alicate terrômetro poderá acusar uma mensagem de ruído excessivo (“noise” ou algo similar, conforme o modelo em uso). Isto inviabiliza a obtenção de um valor para a resistência, porém, indica algo muito importante em termos práticos: **o circuito está fechado.** Uma forma de minimizar este tipo de indução é tentar reduzir a área do *loop* formado pelo cabo de medição, descidas e a malha de terra. Na figura 8c esta idéia está implícita ao deixar o cabo de medição descer junto aos cabos de aterramento sob teste. O posicionamento das conexões do cabo de medição (1 e 2 da figura 4) pode o mais baixo possível. Nesta figura a altura destas conexões está exagerada. Ruídos elevados costumam ser encontrados nas proximidades de muflas e saída de cabos dos alimentadores de distribuição.

**b)** Para executar estas medições é importante empregar um fio de aproximadamente 16 metros. Observar que a resistência do fio é medida com o alicate terrômetro de acordo com a figura 8a, sem formação espiras. Desta forma, o valor de resistência de 16 metros de um fio de  $2,5 \text{ mm}^2$  é de aproximadamente  $150 \text{ m}\Omega$ . Entretanto, se ficar enrolado na forma de bobina (8b) podem aparecer mais de  $300 \text{ m}\Omega$ . Isto acontece por que o alicate terrômetro emprega mais de 1 kHz e assim a indutância da bobina criada involuntariamente passa a afetar o valor medido.

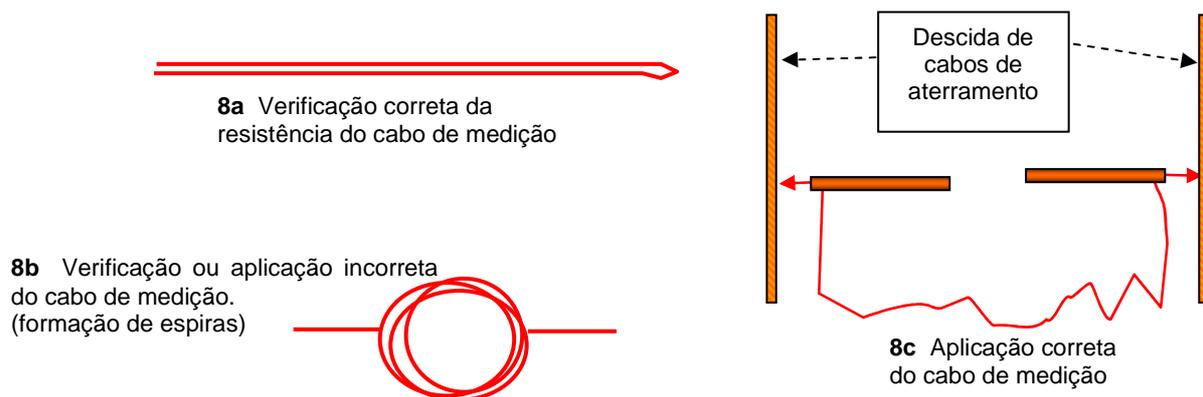


FIGURA 8 – MODO DE EMPREGAR O CABO DE ENSAIO

### **3.0 – RESULTADOS**

Mais de 8.000 conexões foram avaliadas em SEs energizadas com este método, até março de 2007, sendo a maioria em SEs da Copel.

Os resultados obtidos para as conexões normais, duas a duas, estão na faixa de 150 a 700 m $\Omega$ . Isto é função e da forma de lançar o cabo de interligação, sua bitola e comprimento, da altura em que se aplicam as pontas de prova, da qualidade das conexões de ensaio, da forma como o circuito é fechado no subsolo, uma vez que o reticulado da malha tem dimensões variadas e fecha mais de um caminho para a corrente aplicada pelo instrumento, além da condição de calibração do terrômetro.

Para conexões abertas, no solo, entre a descida do cabo de aterramento e a malha, os valores até agora encontrados e verificados estiveram sempre acima de 3  $\Omega$ .

### **4.0 – CONCLUSÕES**

Embora a medição de resistência com alicate terrômetro não se aplique às malhas de terra de SE, mesmo quando desenergizadas, pelas razões comentadas no item 2.2, este instrumento pode ser aplicado na manutenção preventiva ou corretiva de conexões de aterramento de equipamentos de AT, bastando interligar estas duas a duas a partir das descidas dos cabos de aterramento.

Um critério preliminar de valor limite de 1 ohm foi estabelecido – considerando-se as particularidades do circuito de ensaio e as incertezas do método descrito – para se concluir que a conexão suspeita merece verificação visual e manutenção corretiva.

### **5.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- (1) NR – 10, Segurança em instalações e serviços em eletricidade. Ministério do Trabalho e Emprego. Portaria nº 598, Dez/2004;
- (2) Protótipo de medição de malha de terra em subestações energizadas. SNPTEE, GSE – 05 Curitiba, Out./ 2005, Carlos Alberto Sotille e Gerson A. C. Nonato;
- (3) Avaliação de malhas de aterramento de SEs da Copel Transmissão. Relatório Lactec nº 101/06. Luis Alfa ro Gamboa. Curitiba, maio 2006;
- (4) Manual de instruções do alicate terrômetro ET-4300. Minipa. SP, Fev. 2000.