



**GRUPO VIII
GRUPO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS – GSE**

**MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE MALHAS DE TERRA ENERGIZADAS, EM SES 34,5/13,8 KV
E OBTENÇÃO DA RESISTIVIDADE DE SOLOS DE SES, EM LABORATÓRIO**

Luis R. A. Gamboa *

LACTEC

Jose M. Silva

LACTEC

Carlos E. Ribas

LACTEC

Rosane Maris Ribas

COPEL DISTRIBUIÇÃO

RESUMO

Este trabalho descreve medições de resistência em malhas de aterramento energizadas, realizadas em 07 SEs 34,5/13,8 kV, da Copel, empregando-se a corrente de seqüência zero do sistema, I_0 , como fonte. Também discute a aplicação do método para malhas de tensões maiores.

Após verificar, em osciloscópio, a correspondência entre a tensão da malha (V_m) e I_0 , a resistência da malha, R_m , é calculada simplesmente por: $R_m = V_m / I_0$.

A resistividade do solo é obtida no laboratório. Levanta-se a curva “Resistividade x Umidade” e calcula-se o “Ponto de retenção de umidade”, que fornece a resistividade do terreno em sua condição mais estável”.

PALAVRAS-CHAVE

Sistemas de Aterramento, Subestações, Resistividade do Solo, Resistência de Aterramento, Corrente de Seqüência Zero.

INTRODUÇÃO

O método de medição da resistência de malhas de terra de subestações energizadas pressupõe que tanto a corrente de seqüência zero, I_0 , como a tensão da malha, V_m , podem ser medidas em regime de operação da SE. Assim, a resistência da malha pode ser determinada por simples cálculo: $R_m = V_m / I_0$.

A corrente de seqüência zero é constituída de várias componentes. No caso das SEs 34,5 / 13,8 kV da Copel, as componentes de I_0 são as que circulam pelas ligações entre a malha de terra e as buchas de neutro “Ho” dos transformadores de força (TF), de serviço auxiliar (TSA) e do transformador de aterramento (TA). Outra componente de I_0 é a que circula pela ligação à terra do neutro do banco de capacitores. Quando se mede o somatório das componentes de I_0 , de forma simultânea (Figura 1), obtém-se a corrente “ I_0 líquida” que naquele instante está sendo injetada na malha.

2.0 MEDIÇÕES DE RESISTÊNCIA EM MALHAS ENERGIZADAS

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Numa primeira avaliação das tensões (V_m) os valores observados para as malhas das SEs de Tunas e Pinhal, com relação a um eletrodo de terra remoto, foram de 8 e 28 V, respectivamente. A ordem de grandeza destas tensões sugeriu que a as correntes I_0 estavam na faixa de amperes. Isto estimulou a idéia de se aproveitar a

*Centro Politécnico da UFPR – Jd. das Américas - CEP 81531-990 - Curitiba - PR - BRASIL
Tel.: (041) 361-6014 - Fax: (041) 266-3582 - e-mail: gamboa@lactec.org.br

corrente I , injetada na malha pelo desequilíbrio de correntes no sistema, e procurar instrumentação específica para somar instantaneamente suas componentes. O método foi desenvolvido visando minimizar problemas de segurança pessoal e dos instrumentos envolvidos.

2.2 FUNDAMENTOS DO MÉTODO DE MEDIÇÃO

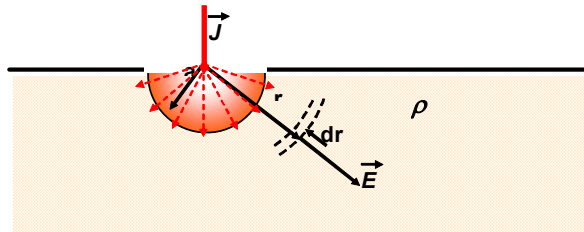


FIGURA 1 – Eletrodo semi-esférico

A Lei de Ohm, em sua forma pontual, estabelece uma relação entre o campo elétrico E e a densidade de corrente J num meio com resistividade ρ , dada por:

$$E = \rho \times J$$

Para uma semi-esfera, com $J = I / 2\pi r^2$, obtém-se (ρ em Ωm , I em ampères, r em metros):

$$E = \rho \cdot I / (2\pi r^2) \text{ [V/m]}$$

Para uma fonte de tensão U ligada entre o eletrodo hemisférico e um ponto muito distante, tem-se:

$$U = \int_a^{\infty} E \cdot dr \text{ [V]}$$

Onde U é a diferença de potencial aplicada pela fonte de tensão e dr o incremento da distância, em metros. Considerando uma fonte de corrente suficientemente distante, como acontece com as distâncias quilométricas entre as malhas de SEs de distribuição e das SEs fonte, quando r cresce suficientemente o potencial da malha tende para zero. Para um meio de resistividade uniforme, o potencial U , na direção r , varia de acordo com:

$$U = E \cdot r$$

Substituindo o valor achado de E , nesta expressão, obtém-se:

$$U = [(\rho \cdot I) / (2\pi r^2)] \cdot r = \rho \cdot I / (2\pi r)$$

Ou seja, U cai de forma inversamente proporcional à distância r , para uma corrente I injetada na malha. Como as malhas reais não são eletrodos hemisféricos, é necessário efetuar um ajuste entre a área de uma superfície retangular e a área de uma superfície semi-esférica equivalente. Este procedimento foi sugerido em "Proving the adequacy of Station Grounds" (Referência 3). A superfície retangular de uma malha de lados a e b pode ser expressa em termos de uma superfície circular equivalente de raio $r_{\text{ceq}} = (a \times b / \pi)^{1/2}$. Para a superfície de um hemisfério ser igual à superfície do círculo de raio r_{ceq} , o raio do hemisfério deverá ser: $r_{\text{heq}} = r_{\text{ceq}} / 2$.

Assim, o raio do eletrodo hemisférico a ser considerado para analisar o perfil de potenciais externos a uma malha de lados a e b será de:

$$r_{\text{heq}} = (a \cdot b / \pi)^{1/2} / 2$$

A Figura 2 ilustra esta simplificação.

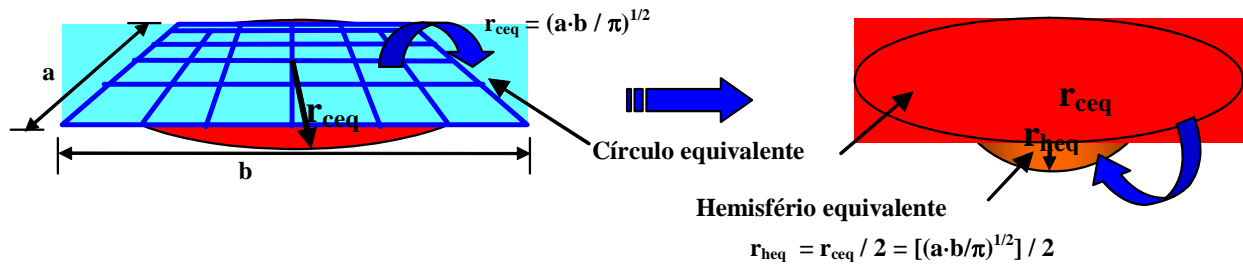


FIGURA 2 - Hemisfério equivalente para uma malha retangular

Esta simplificação introduz um erro grande para os potenciais calculados nas proximidades da malha. A Figura 3 mostra os potenciais do solo (linha tracejada), como um percentual da tensão da malha, V_m , calculados do modo usual, em unidades de r_{heq} , e também os potenciais calculados para um hemisfério equivalente (linha contínua).

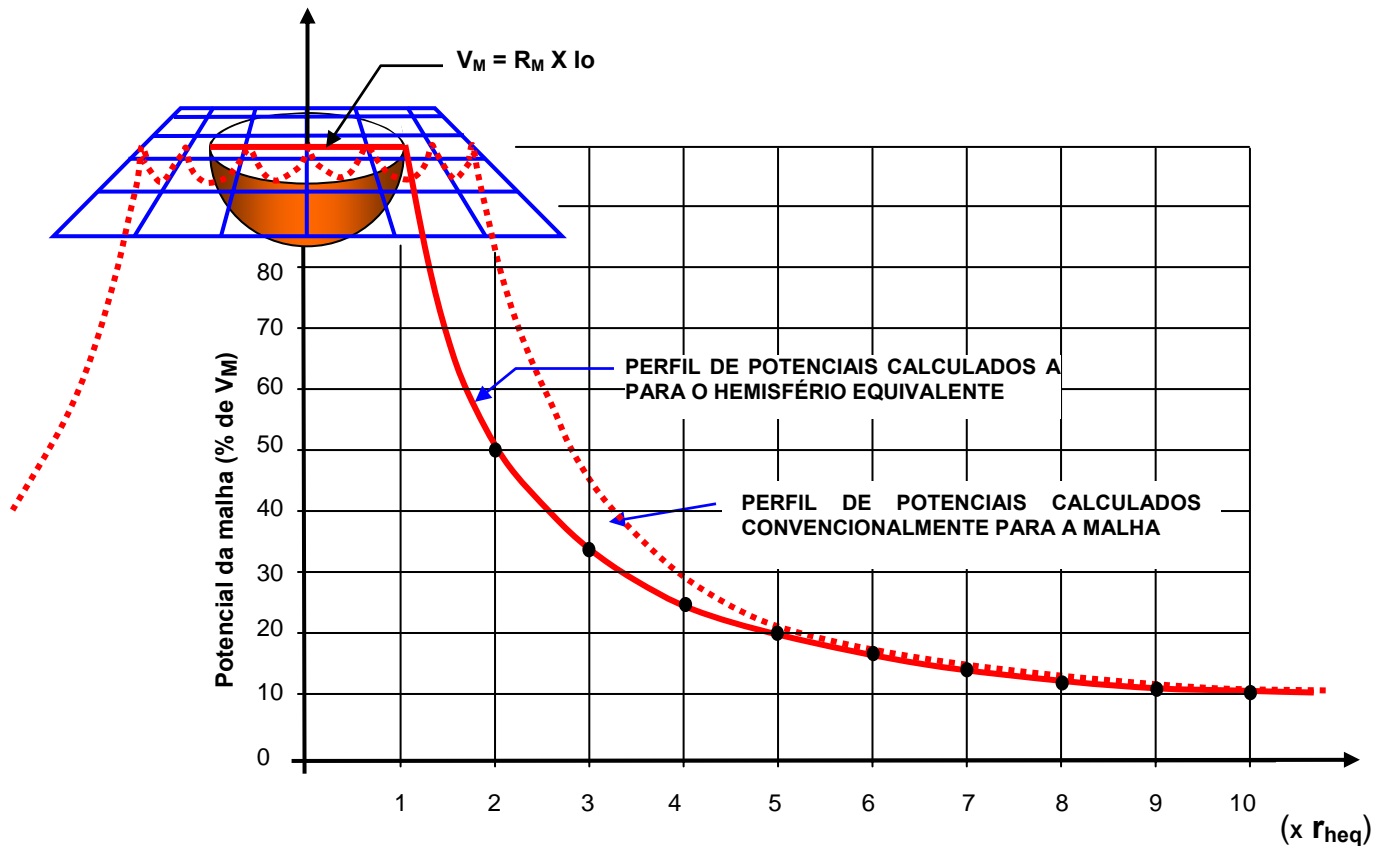


FIGURA 3 – Comparação de potenciais obtidos com o procedimento usual e com o hemisfério equivalente

A Figura 3 mostra discrepâncias grandes até uma distância de $4r_{heq}$. O método do hemisfério equivalente obviamente não se aplica ao cálculo de potenciais de passo e toque da SE. Entretanto, a partir de $5r_{heq}$, os dois métodos de cálculo fornecem resultados semelhantes para estimar a tensão da malha, V_m .

2.3 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO DA CORRENTE I_o

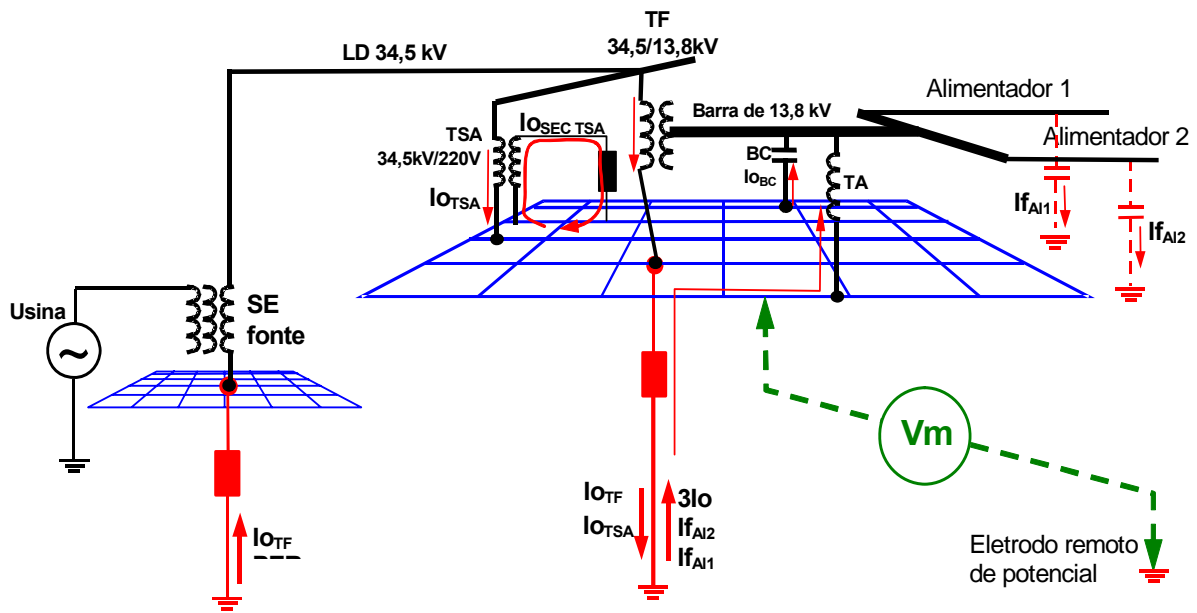


FIGURA 4 – Componentes de I_o das SEs 34,5/13,8 kV da Copel Distribuição

Nas SEs 34,5 / 13,8 kV da Copel, (Figura 4), as componentes de I_o são as que circulam pelas ligações entre a malha de terra e as buchas de neutro “Ho” de transformadores de força (TF), de serviço auxiliar (TSA) e do transformador de aterramento (TA), além da que circula pela ligação à terra do neutro dos bancos de capacitores e dos reguladores de tensão, ligados em estrela aterrada. Estas correntes compõem a corrente “ I_o líquida”.

O somatório é obtido pela interligação (série) dos sinais de saída de transdutores de tensão-corrente, com cabo tipo par trançado, $2 \times 0,14 \text{ mm}^2$.

Os transdutores de corrente empregados são do tipo alicate, 300 mV/A, na escala de 10 A. Antes de posicionar os transdutores de corrente é necessário investigar, além da ordem de grandeza das correntes de seqüência zero. Os arranjos físicos podem variar bastante de subestação para subestação.

Os transdutores devem ter impedância de saída compatível com a impedância de entrada dos medidores de tensão (osciloscópio ou multímetro digital). Transdutores usados em medição de qualidade de energia possuem impedância de saída da ordem de $5 \text{ k}\Omega$, compatível com a entrada de multímetros ou osciloscópios digitais.

Cuidado adicionais devem ser observados quanto ao fechamento dos transdutores. Ferrugem ou sujeira no entreferro comprometem o fechamento, diminuindo o ganho.

2.4 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO DA TENSÃO V_m

O eletrodo remoto de potencial é colocado a uma distância de $8r_{heq}$. Um fio isolado com comprimento adequado é ligado a este eletrodo de modo a servir de referência para a medição da tensão V_m , na SE. Em regime normal, este valor chega a dezenas de volts, mas pode atingir dezenas de kV, para um curto circuito fase-terra.

Para minimizar riscos de choque elétrico para o pessoal de manutenção foi desenvolvido um jogo de pontas de prova para alta tensão, dotado de pinos macho e fêmea, conforme mostram as figuras 5A e 5B. As pontas são constituídas por um cabo de alta tensão flexível para uso externo, com isolamento para 60 kV. Este cabo foi colocado no interior de um tarugo de nylon de 25 mm de diâmetro por 36 cm de comprimento.

Como pode ser observado na figura 5B, a conexão final é feita para colocar estas pontas, com uma delas conectada a um ponto do osciloscópio e a outra já conectada ao eletrodo remoto de potencial.

O procedimento completo recomendado considera que quem estende o fio já ligado ao eletrodo remoto de potencial segura a ponta de prova (já conectada a este fio) ao ingressar ao terreno da SE. O fio tem comprimento adequado para ser estendido até o centro da SE, onde normalmente se posicionam os instrumentos de ensaio, para registro.

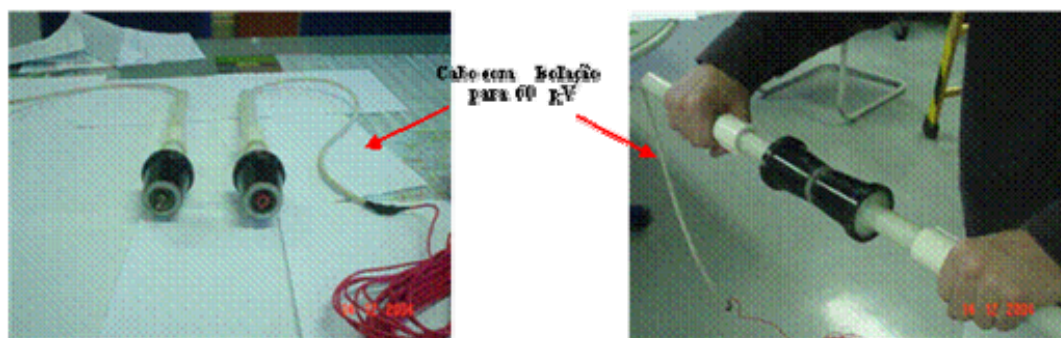


FIGURA 5 – Pontas de alta tensão para ligação do eletrodo remoto na SE

A função *hold* do osciloscópio é usada para garantir simultaneidade das leituras dos dois canais, I_o e V_m .

2.5 CUIDADOS NA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA R_m

Antes do cálculo da resistência da malha a partir dos valores de I_o e V_m , foram observadas as formas de onda destes sinais em osciloscópio. Em todos os casos os dois sinais apresentaram a mesma forma de onda, senoidal, distorcida e em fase. As figuras 6A, 6B e 6C mostram as formas de onda obtidas com osciloscópios digitais portáteis, nas SEs Wenceslau Bráz, Almirante Tamandaré e Reserva, respectivamente.

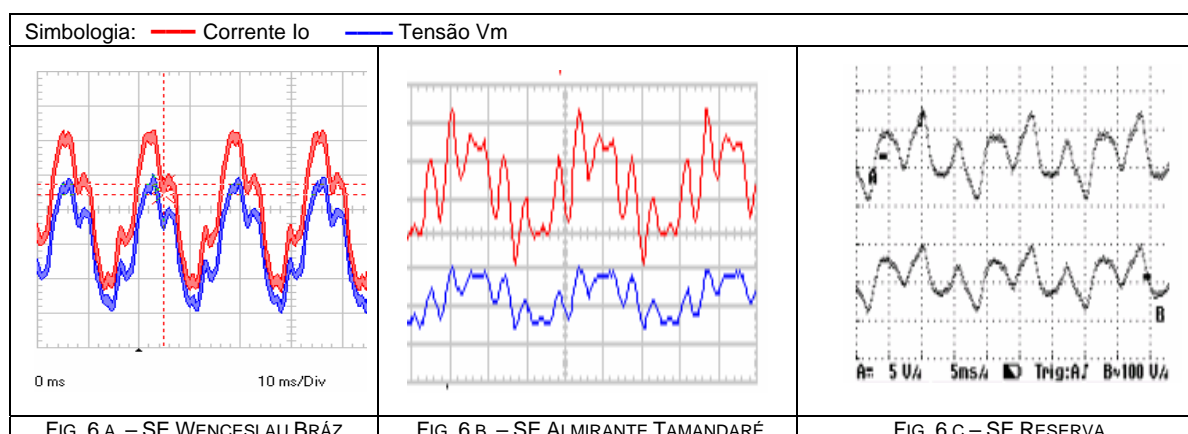


FIGURA 6 – Formas de onda de tensões V_m e correntes I_o , medidas em 3 SEs

A Figura 6 mostra sinais de I_o e V_m que correspondem a um circuito resistivo, justificando calcular $R_m = V_m / I_o$. Os valores eficazes lidos com osciloscópio ou multímetros digitais com função *true rms value*, são iguais.

2.6 RESULTADOS

2.6.1 MEDIÇÕES REALIZADAS

As medições de resistência de aterramento são apresentadas na tabela 1

TABELA 1 – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES REALIZADAS COM A CORRENTE I_0 INJETADA PELO SISTEMA

Subestação	Dados da malha			Medições					Rm (Ω) Método Usual	Comentários
	Área (m ²)	r_{heq} (m)	n° r_{heq} El. Remoto	$\square V$ (I_0) (mV)	I_0 (A)	Vm (V)	Rm (\square)			
							Vm/ I_0	Corrigido		
Pinhal	1.584	11,2	5	672	2,24	22,6	10,1	12,1	–	
Tunas	1.600	11,3	8	675	2,25	7,08	3,2	3,6	14,8	
Witmarsum	1.478	10,8	8	128	0,43	2,40	5,6	6,3	7,3	
Wenceslau Bráz	2.156	13,1	8	3.610	12,0	41,7	3,5	3,9	7,0	
Santana do Itararé	6.695	23,1	8	116	0,39	0,815	2,1	2,4	3,3	
Reserva	2.600	14,4	8	2.480	8,27	38,6	4,7	5,2	6,5	
Reserva- 2	420	5,8	8	2.420	8,07	42,4	5,3	6,0	–	Sem malha perimetral
Alm. Tamandaré	640	7,2	8	745	2,48	5,45	2,2	2,5	4,7	
Alm. Tamandaré - 2	3.300	129,6	8	1.070	3,57	4,75	1,3	1,5	2,9	Após ampliação

2.6.2 ANÁLISE DAS MEDIÇÕES REALIZADAS

A Tabela 1 mostra que o presente método fornece valores inferiores aos obtidos por método convencional. Estas diferenças são coerentes com a idéia de correntes de seqüência zero, em 60 Hz, retornando até a SE fonte por caminhos diferentes (provavelmente por regiões do solo mais profundas e de menor resistividade) ao das correntes injetadas pela fonte dos terrômetros usuais. O comprimento normal dos alimentadores também indica correntes de retorno pela terra, até a SE, distantes e profundas.

Considerando-se que a umidade afeta principalmente a superfície do terreno, o método presente deverá ter mais repetibilidade e estar mais de acordo com a situação real de operação, uma vez que lida com correntes maiores de 60 Hz, enquanto que os terrômetros trabalham com mA, kHz, e distâncias menores. A repetição de ensaios em malhas com as dimensões modificadas, como aconteceu com as malhas de Reserva e Almirante Tamandaré, mostrou resultados coerentes, conforme comentários da tabela 1.

2.6.3 ASPECTOS DE SEGURANÇA PARA REALIZAR AS MEDIÇÕES

Além dos cuidados normais recomendados pelas normas pertinentes para outros métodos de medição (ver Referência 4), como a aplicação de EPIs e de condições atmosféricas favoráveis, por exemplo, o método aqui apresentado requer o uso de pontas de prova adequadas para alta tensão (ver Figura 5).

2.6.4 CUIDADOS NECESSÁRIOS PARA APLICAR O MÉTODO EM SEs COM DIMENSÕES MAIORES

Em princípio, o método é aplicável a SEs com dimensões maiores que as de 34,5 / 13,8 kV. Alguns aspectos a serem considerados são:

- A distância para posicionar o eletrodo remoto de potencial será maior e demandará mais tempo para a execução do ensaio;
- Será necessário utilizar mais transdutores de corrente e avaliar com mais cuidado a ordem de grandeza das componentes de I_0 da SE antes de simplificar o número de transdutores necessários;
- Os cabos guarda das torres de transmissão devem ser interrompidos no pórtico da SE para minimizar erros provenientes de correntes induzidas no circuito fechado por estes cabos através das resistências das malhas da SE e do pé da torre mais próxima de cada uma das LTs ligadas à SE em estudo.

3. MEDIÇÕES DE RESISTIVIDADE DE SOLOS EM LABORATÓRIO

Várias são as vantagens de realizar medições de resistividade em amostras de solo em laboratório. A primeira é que a amostra de solo pode ser retirada com a SE energizada. Outra vantagem, detalhada a seguir, é que pode-se obter um valor que representa o comportamento mais estável do terreno ao longo do tempo.

3.1 CURVA DE RESISTIVIDADE EM FUNÇÃO DA UMIDADE DE SOLOS DE SUBESTAÇÃO

3.1.1 ASPECTOS GERAIS

Nas curvas de resistividade em função da umidade, verifica-se que quando o solo está seco, a resistividade é muito alta, decrescendo rapidamente com o aumento do conteúdo de água no solo até alcançar o ponto de saturação. Após o ponto de saturação a resistividade permanece constante. O decréscimo da resistividade está relacionado com a condutividade do material, que é função do teor de água, fator diretamente relacionado com a

solubilidade dos sais existentes. De acordo com a literatura, após o alcance da resistividade na umidade de saturação, essa curva poderá apresentar um aumento da resistividade. Caso a resistividade aumente com a porcentagem de água, o ponto em que a resistividade começa a aumentar seria o ponto em que o solo estaria se fragmentando em pedaços muito pequenos. Como consequência, a condutividade estaria diminuindo traduzindo-se em um leve aumento da resistividade. Com isto pode ser esperado um valor mínimo de resistividade no gráfico em questão. Este valor é característico para cada tipo de solo.

3.1.2 PROCEDIMENTO

O método consiste em coletar amostra do solo da SE, a uma profundidade de 70 cm. Seca-se o material numa estufa e pulveriza-se em moinho. O valor da resistividade é medido em caixa padrão "soil box" com voltímetro de alta impedância e fonte de corrente alternada. Adiciona-se água destilada à amostra, na proporção de 5% em volume, em relação ao volume do solo seco e mede-se novamente a resistividade. Efetuam-se adições sucessivas de água destilada com incremento de 5% ou 10%, medindo-se os valores de resistividade para cada teor de água. Plota-se um gráfico com os valores de resistividade assim obtidos, em função do teor de umidade.

3.2 CAPACIDADE DE RETENÇÃO DE ÁGUA

3.2.1 ASPECTOS GERAIS

A água está presente no solo nas seguintes formas: água livre, água gravitacional e água retida por capilaridade. A água gravitacional é proveniente das chuvas ou de fontes externas que tem acesso ao solo por infiltração. Esta infiltração está diretamente relacionada com a permeabilidade e com a porosidade dos solos. Uma camada de argila no solo pode agir como uma barreira resistente à infiltração de água. A água retida por capilaridade, relacionada com a capacidade de retenção de água, é grande nos solos com alto teor de argila e muito pequena em solos com alto teor de areia, a resistividade nesta condição é a verdadeira resistividade do solo.

3.2.2 PROCEDIMENTO

Enche-se um funil "buchner" de aproximadamente 5 cm de diâmetro e 2,5 cm de profundidade, coberto com um papel de filtro qualitativo, com amostra de solo, além da sua capacidade. Esta deve estar seca e peneirada previamente em peneira de malha de 2 mm. Compacta-se a amostra do solo, contida no funil, deixando-o cair três vezes, de uma altura de 1 cm em cima de uma superfície de madeira. Nivelam-se a superfície da amostra do solo com uma espátula. Coloca-se o funil cheio em um bécher com capacidade de 400 ml, retendo-o em posição para cima, pelas bordas do funil. Adiciona-se água ao bécher a uma altura ligeiramente superior ao do papel de filtro. Espera-se a amostra do solo ficar úmida por capilaridade de modo a evitar encapsulamento de ar na coluna. Quando a parte superior da amostra de solo apresentar sinais de umidade, adiciona-se mais água até seu nível aproximar-se do topo do funil. Cobre-se o bécher, deixando amostra do solo umedecida no mínimo por 12 horas. Cobre-se o funil com um pano úmido, no qual se coloca um copo invertido. Coloca-se o funil coberto em um frasco de sucção, que esteja conectado a um aspirador de água. Após 15 minutos, remove-se o funil do frasco de sucção, transferindo-se a amostra do solo a um recipiente previamente tarado e determina-se o teor de umidade em porcentagem.

3.3 RESULTADOS OBTIDOS PARA ALGUMAS SUBESTAÇÕES

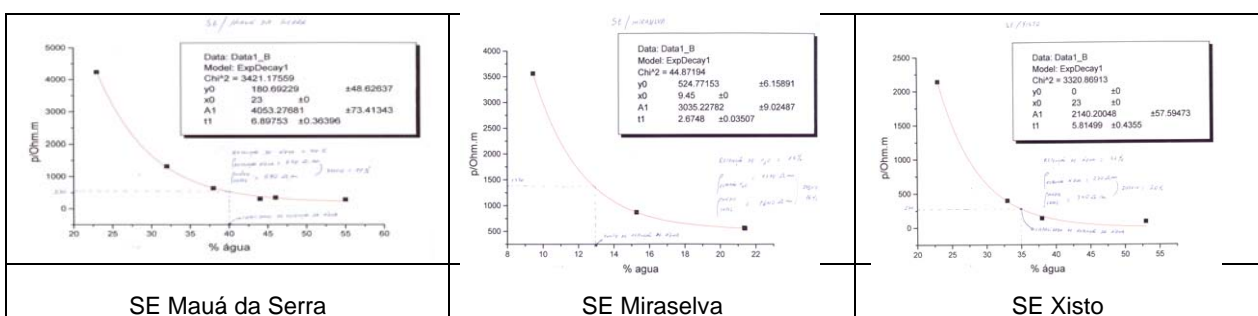


FIGURA 7 – Resistividade em relação à porcentagem de água para 3 subestações

A Figura 7 apresenta curvas de resistividade em função da porcentagem de água para várias subestações. Os valores encontrados pelo método apresentado e pelo método convencional (de Wenner), pela Copel, são resumidos na Tabela 2.

TABELA 2 – Comparação de valores de resistividade obtidos em laboratório e no campo

Grandeza medida	Mauá	Miraselva	Xisto	Reserva	Tunas	Alm. Tamandaré
ρ média obtida no campo (método de Wenner) [$\Omega \cdot m$]	590	1640	340	–	–	–
ρ obtida a partir da resistência da malha [$\Omega \cdot m$]	–	–	–	452	215	177
Capacidade de retenção de água [%]	40	13	35	31	44	20
ρ no ponto de retenção de água [$\Omega \cdot m$]	510	1370	270	960	186	360
Teor de água no ponto de saturação [%]	56	46	55	55	54	30
ρ mínima [$\Omega \cdot m$]	270	550	90	80	180	330
Desvio entre retenção e saturação [%]	28	71	36	45	20	30
Desvio entre a ρ na retenção e a ρ mínima [%]	47	59	66	92	3	8
ρ média entre a ρ na retenção e a ρ mínima [$\Omega \cdot m$]	–	1000	-	440	–	–
Desvio entre o método laboratorial e o de Wenner [%]	13,6	60	20,6	–	–	–
Desvio entre o método laboratorial e o obtido a partir da resistência da malha [%]	–	–	–	13,6	16,5	46

A partir dos valores de resistividades obtidos em laboratório (ver Tabela 2), o solo pode ser classificado como: solo de alta, média ou baixa resistividade.

O **solo de baixa resistividade** poderá ser aquele que apresenta uma baixa resistividade no ponto de retenção de água, juntamente com uma baixa resistividade no ponto de saturação de água, juntamente com um desvio percentual (entre a ρ na retenção e na saturação de água) menor ou igual a 30%. Os solos das SE's Tunas e Almirante Tamandaré podem ser classificados como solos de baixa resistividade e o valor a ser considerado seria o valor encontrado para a resistividade mínima.

O **solo de média a alta resistividade** poderá ser aquele que apresenta uma média a alta resistividade no ponto de retenção de água, juntamente com uma média a alta resistividade no ponto de saturação de água. Neste caso, quando o ponto de retenção de água estiver muito longe do ponto de saturação (desvio de umidade acima de 30% ou desvio de ρ acima de 60%), o valor a ser considerado seria uma resistividade média entre ρ na retenção e ρ mínima, como é o caso da SE Miraselva e da SE Reserva. Caso contrário, o valor a ser considerado seria a ρ no ponto de retenção de água. Como é o caso da SE Mauá e da SE Xisto.

4. CONCLUSÕES

4.1 SOBRE AS MEDIÇÕES DE RESISTÊNCIA COM A CORRENTE INJETADA PELO SISTEMA

Os valores encontrados com o método da corrente injetada pelo sistema são coerentes com o conceito de resistência de aterramento. O método apresenta boa repetibilidade e é recomendável para checar valores de projeto em SEs energizadas, desde que observados os cuidados apontados no item 2.

4.2 SOBRE AS MEDIÇÕES DE RESISTIVIDADE DO SOLO, EM LABORÁTÓRIO

Os valores da resistividade do solo, em laboratório, a partir do ponto de retenção de água em amostras com a subestação energizada, são coerentes com os encontrados pela Copel aplicando o método de Wenner. Diferenças entre 13 e 21% entre os dois métodos foram obtidas.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à equipe de Operação e Manutenção da Copel Distribuição e à equipe de ensaios da Unidade de Alta Tensão do Lactec pelas contribuições que possibilitaram a realização deste trabalho.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 – Hoffmann, J. N., Soncin A., “Manual de Aterramento”, Copel/DEC, 1990.
- 2 – Tagg, G. F., “Earth Resistences”, 1961. Pitman Publishig Corp.
- 3 – Elek, A. “Proving the Adequacy of Station Grounds”, AIEE, 1962.
- 4 – IEEE Std 81-1983, “Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System”.
- 5 – ANSI/IEEE Std 80 -1986, “Guide for Safety in AC Substation Grounding”.
- 6 – Copel/DOP, ITEE 039.001, “Medição de Resistência de Malha de Terra em Subestações”, 1990.
- 7 – Gamboa L., A.; Silva, Murilio; Ribas, R., M.; Relatório final de P&D Copel, Desenvolvimento de métodos alternativos de avaliação de sistemas de aterramento de SEs 34,5/13,8 kV. Curitiba, 2005.