



GRUPO - VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO- GSE

MEDIÇÃO DE PARÂMETROS DE MALHAS DE TERRA DE SUBESTAÇÕES UTILIZANDO ESPAÇAMENTOS REDUZIDOS ENTRE ELETRODOS: O MÉTODO 3MT APLICADO NO GRUPO CEEE

Telló, M.(*)
CEEE-D

Dias, G. A. D.
UFRGS

Bauer, G. A. T.
CEEE-D

Jitsukawa, J. A. M.
CEEE-D

RESUMO

Malhas de Terra de Subestações situadas em locais com restrição de espaço físico no seu entorno, apresentam dificuldade quando da necessidade de medição de parâmetros relacionados com o aterramento. Tal dificuldade caracteriza-se pela impossibilidade de estender os eletrodos dos circuitos de medição com os comprimentos indicados pelas normas e pela experiência (Curva “S”).

O Método de Medição de Malhas de Terra de SE's (**3MT**) foi desenvolvido para permitir a medição dos parâmetros citados, utilizando reduzidas distâncias entre os eletrodos, sem a ocorrência de erros apreciáveis nos resultados ou com valores medidos que venham a favor da segurança de seres humanos.

PALAVRAS-CHAVE

Método da Queda de Potencial, Potenciais de Toque e Passo, Resistência de Aterramento, Malhas de Terra

1.0 - INTRODUÇÃO

O **Método de Medição de Malhas de Terra de SE's (3MT)**, o qual é uma adequação do método de medição denominado Método da Queda de Potencial (MQP) (1), foi desenvolvido para permitir a medição dos parâmetros de interesse relacionados com malhas de terra de SE's, utilizando distâncias reduzidas entre os eletrodos.

O MQP é caracterizado pela existência de dois eletrodos auxiliares: um de corrente e outro de potencial. O eletrodo de potencial (**EP**) é colocado em várias posições entre a malha de terra sob teste e o eletrodo auxiliar de corrente (**EC**), o qual é fixo. No MQP, o valor da resistência de aterramento é obtido quando há a formação de um patamar na curva R x distâncias do **EP** (curva “S”). O método apresenta pequeno erro quando a distância entre a malha de terra e o **EC** for grande (o valor usual é de 10 x a maior diagonal da malha de terra). Isto posto, quando são utilizadas distâncias reduzidas entre eletrodos não há a formação do patamar citado impossibilitando a determinação da resistência da malha de terra da SE sob teste, bem como dos demais parâmetros de interesse (resistência de aterramento e gradientes de potencial).

O 3MT utiliza equações do eletromagnetismo e caracteriza-se, para determinar a resistência de aterramento da malha de terra sob teste, por aplicar um fator de “correção” a cada valor medido de resistência utilizando-se distâncias reduzidas entre eletrodos. Assim, obtêm-se duas curvas: uma curva medida e uma curva corrigida. O valor da resistência da malha de terra é obtido no ponto de intersecção entre as curvas citadas.

Preocupação adicional refere-se à “qualidade” dos valores medidos de potenciais de toque, de passo e de resistência de aterramento utilizando o 3MT. Assim, procedeu-se ao desenvolvimento de equações que

permitted to evaluate the error committed in the measurements of the parameters cited. The results obtained indicated that the values obtained applying the 3MT are conservative, or rather: in favor of safety.

2.0 - METODOLOGIA

Figure 1 illustrates the measurement scheme for the MTP, where the ground grid under test is represented by a semi-sphere of radius a , buried in a homogeneous soil with electrical resistivity ρ . In the figure cited, D is the distance between the current electrode (EC) and the ground grid and x is the distance between the free end of the potential electrode (EP) and the ground grid of the substation under test. The potential electrode (EP) moves between the electrode a (ground grid) and the current electrode (EC).

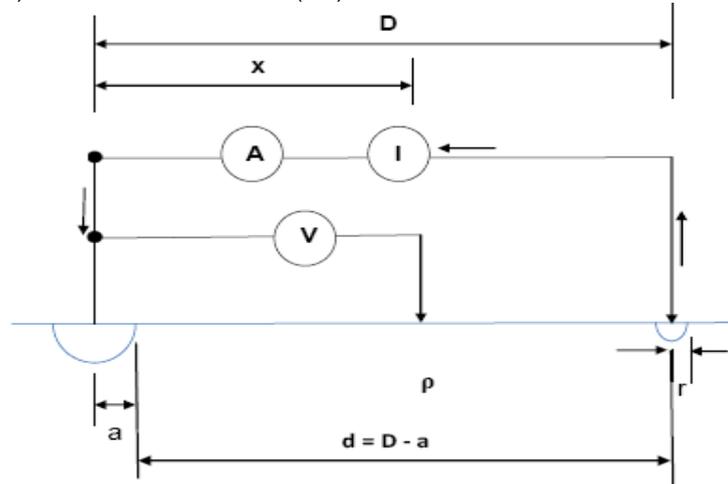


FIGURA 1 – MQP.

Figure 2 presents the potential profile, on the soil surface, when large distances between the electrodes are used in the measurements. In Figure 2, $R(x)$ is the resistance measured at a point x , on the soil surface, and GPR is the elevation of potential of earth (EPT) of the ground grid of the SE, in relation to the current electrode (EC).

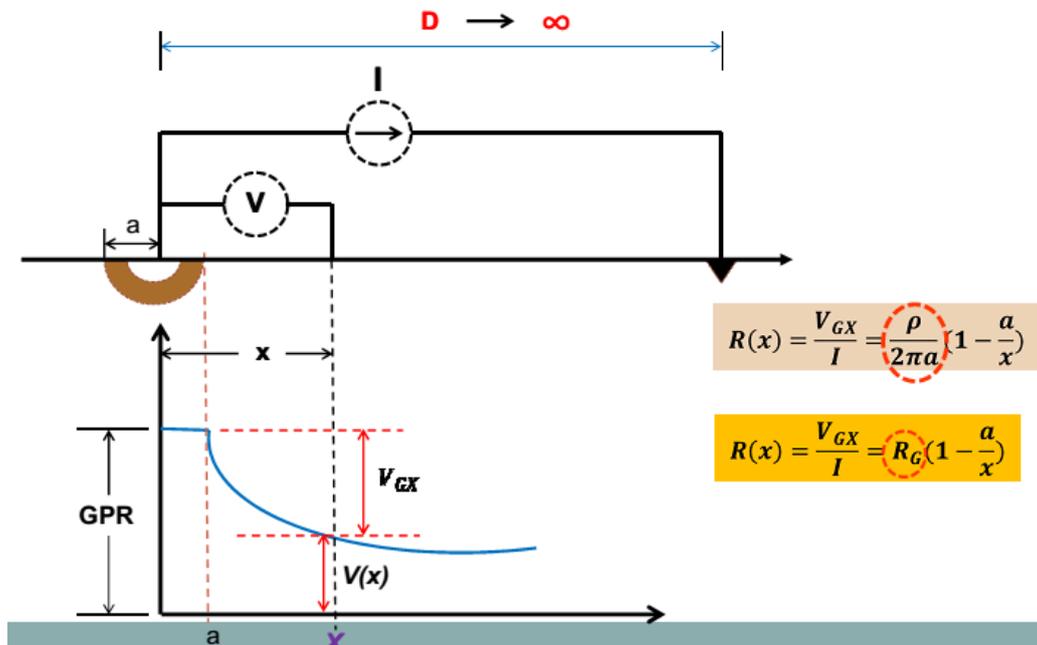


FIGURA 2 - Perfil de potencial, no solo, e equações válidas para grandes distâncias entre eletrodos.

Figure 3 presents the potential profile, on the soil surface, when the electrodes are close. In Figure 3, $R'(x)$ is the resistance measured at a point x , on the soil surface, and GPR' is the elevation of potential of earth of the ground grid under test, in relation to the current electrode, when the electrodes involved in the measurement are close.

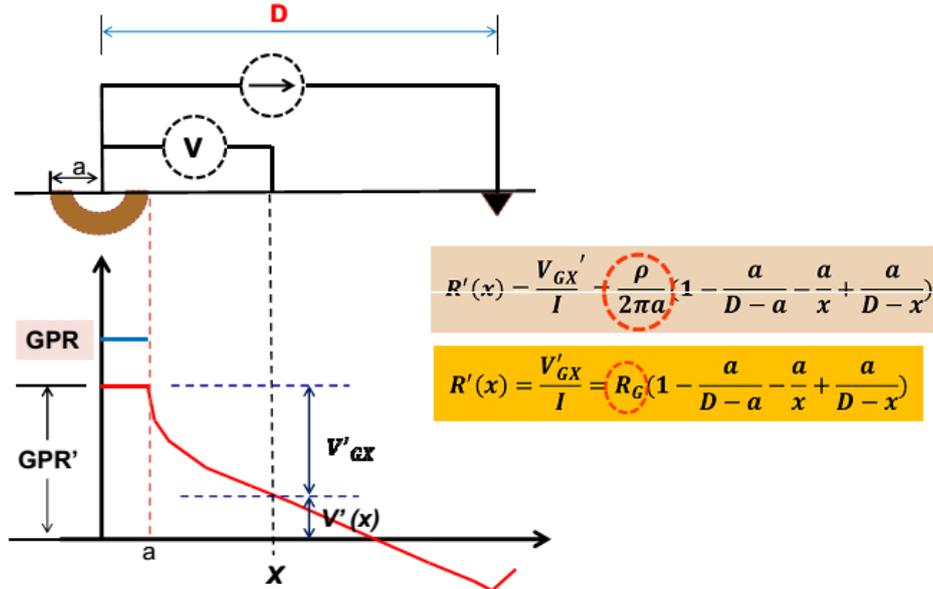


FIGURA 3 - Perfil de potencial, superfície do solo, e equações válidas para eletrodos próximos.

Nas equações constantes nas Figuras 2 e 3, o termo $\rho/2\pi a$ é a resistência da semi-esfera com raio a , ou seja: a resistência da malha de terra sob teste, R_G .

A Figura 4 representa, em um único gráfico, o perfil de potencial, na superfície do solo, estando os eletrodos afastados e próximos, bem como os potenciais medidos, na superfície do solo, em um ponto genérico x .

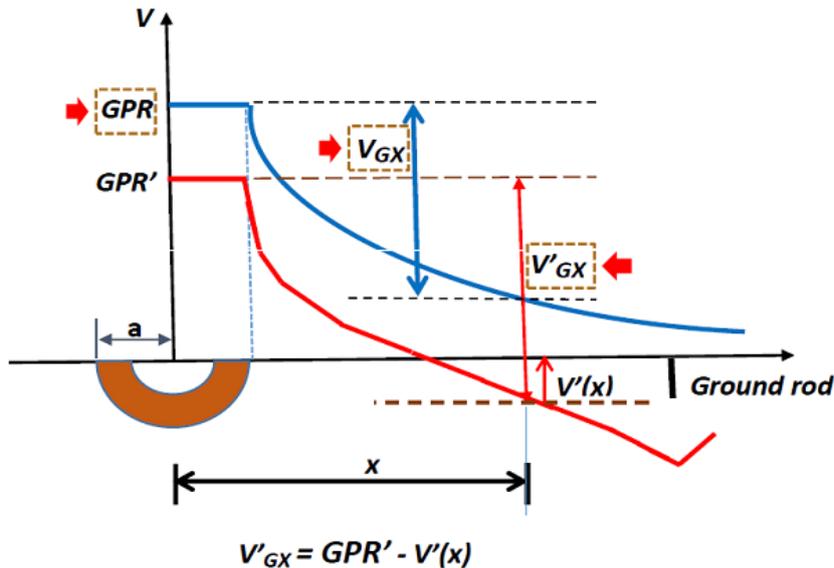


FIGURA 4 - Perfil de potencial em um ponto genérico x , no solo, para eletrodos próximos e afastados.

A partir das equações apresentadas na Figura 3, $R'(x)$ pode ser colocado na forma: $R'(x) = R_G k'(x)$. Assim, quando $k'(x)$ for igual a 1 tem-se: $R'(x) = R_G$. Ou seja: para $k'(x)=1$, o valor medido de resistência $R'(x)$, em um ponto x na superfície do solo, corresponde ao valor da resistência da malha de terra sob teste, R_G .

Uma relação útil a ser utilizada é:

$$R_G = R(x)k(x), \text{ onde } k(x) = [k'(x)]^{-1} \tag{A}$$

A Equação (A) indica que a cada valor medido de resistência na superfície do solo, $R(x)$, pode-se aplicar o fator de "correção" $k(x)$, significando que serão obtidas duas curvas: a curva medida [sem a aplicação de $k(x)$] e a curva corrigida [com a aplicação de $k(x)$]. O ponto de intersecção entre as curvas citadas, fornecerá o valor da resistência da malha de terra sob teste, R_G .

3.0 MEDIÇÕES

O 3MT foi comparado com resultados de medições realizados em uma malha de terra experimental, instalada em um campo de prova (2), possuindo dimensão de 10m x 10m, com quadrículas de 2,5m x 2,5m.

O MQP (3), com distância entre eletrodos de 10 x a diagonal da malha de terra experimental, foi aplicado para determinar a resistência da malha de terra instalada no campo de prova. O valor medido foi de 18,7Ω. Adicionalmente, varias medições de resistência da malha de terra experimental foram realizadas, considerando distâncias entre os eletrodos (malha de terra e **EC**) que variaram de 0,5D a 10D, onde **D** é a maior diagonal da malha de terra experimental.

O 3MT foi testado para as mesmas distâncias entre a malha de terra experimental e o eletrodo de corrente (**EC**), utilizando o MQP “convencional” (3). Especificamente, considerou-se o posicionamento do **EC**, em relação ao centro da malha de terra experimental, para distâncias que variaram de 0,5D; 0,75D; 1,0D; 1,25D; 1,5D; 2,25D; 3,25D; 4,25D; 5,25D e 10D. Para cada distância adotada, foram traçadas as curvas medida e corrigida.

A Figura 5 apresenta o resultado obtido, aplicando o 3MT, considerando que a distância entre o eletrodo de corrente e a malha de terra é de 10D (140m). Para 10D o acoplamento entre a malha de terra experimental e o eletrodo de corrente é desprezível.

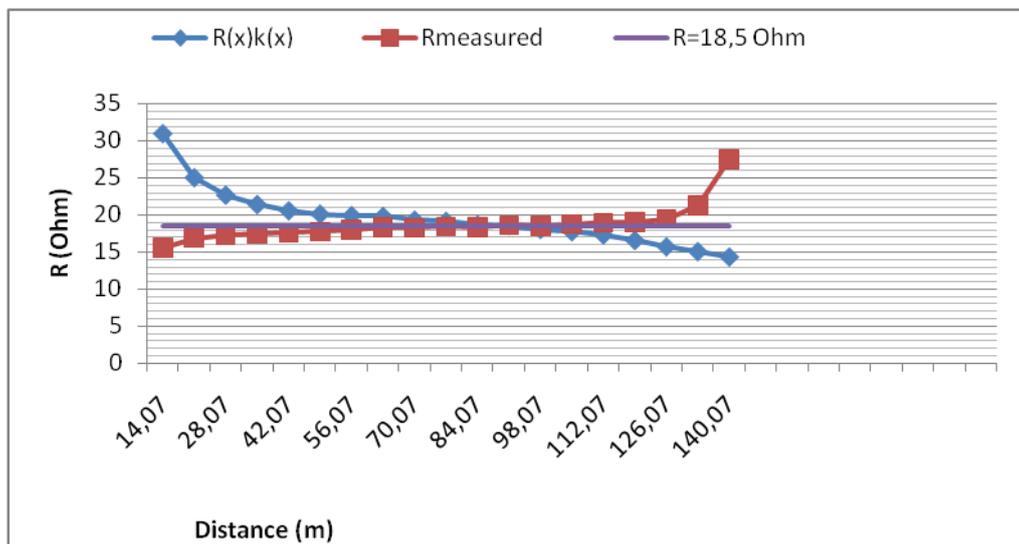


FIGURA 5 – 3MT: Resistências obtidas para eletrodo de corrente distante da malha de terra de 10 x diagonal da malha de terra experimental.

O 3MT forneceu para a malha de terra sob teste, o valor de 18,5Ω. Ou seja: 18,5Ω correspondem ao ponto de intersecção entre as curvas medida e corrigida, conforme apresentado na Figura 5.

A Figura 6 apresenta a aplicação do 3MT considerando que o **EC** está distante da malha de terra experimental de 1D (1 x a diagonal da malha de terra experimental).

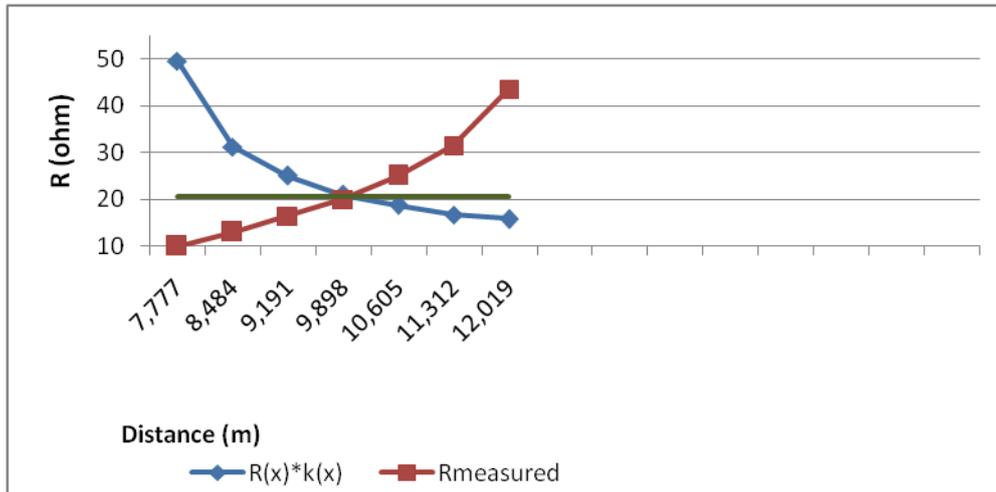


FIGURA 6 - Resistências obtidas aplicando o 3MT para eletrodo de corrente distante da malha de terra de 1 x diagonal da malha de terra experimental.

O valor de resistência obtido aplicando-se o 3MT foi, da ordem, de 21,5Ω.

4.0 - COMENTÁRIOS

O Método 3MT foi também comparado com dados disponíveis na literatura considerando, inclusive, malhas de terra instaladas em solo estratificados em mais de duas camadas com valores distintos de resistividade elétrica. Os resultados obtidos foram coerentes, comparando-se com os dados de medição apresentados. Adicionalmente, o método 3MT foi aplicado, até a presente data, em dezoito SE's existentes no parque elétrico da CEEE. Os resultados obtidos também foram coerentes, se comparados: com medições anteriormente realizadas utilizando métodos tradicionais ou com memoriais de cálculo disponíveis. Contudo, o método 3MT indica que os valores de resistência de aterramento das malhas de terra e os potenciais de toque e de passo medidos com distâncias reduzidas, são superiores aos valores obtidos quando a distância entre a malha de terra sob teste e o EC for de 10 x a maior diagonal da malha de terra (método tradicional). Ou seja: os parâmetros medidos com o 3MT são conservativos, se comparados com os métodos de medição tradicionais, significando que são a favor da segurança.

A Tabela a seguir apresenta o erro entre o 3MT, obtido para diversos valores de **D**, e o valor medido de resistência da malha de terra considerando que a distância entre os eletrodos é de 10 x a diagonal da malha de terra experimental (10**D**). Tal valor corresponde a 18,7Ω e foi obtido aplicando-se o MQP tradicional.

Tabela 1 – Comparação de resultados.

Distância entre a Malha de Terra e o EC	3MT (Ω)	Erro (%)
0,75D	23,1	23,53
1,0D	21,5	14,97
1,5D	19,0	1,8
10D	18,5	2,3

Ainda, a partir da relação: $\mathbf{k}(\mathbf{x}) = [\mathbf{k}'(\mathbf{x})]^{-1}$ pode-se estimar o ponto **x**, na superfície do solo, onde ocorrerá a intersecção das curvas medida e corrigida. A equação que fornece uma estimativa para o ponto de intersecção entre as curvas citadas é:

$$\mathbf{x} = \mathbf{a} \left[(1 - n) + \sqrt{n(5n - 4) + 1} \right], \quad n = D/2a \quad (\text{B})$$

No procedimento de medição utilizando o 3MT, optou-se por obter as curvas medida e corrigida, ao invés de realizar a uma única medição posicionando o eletrodo de potencial no ponto **x**, dado pela equação (B). Tal critério deve-se ao fato de que, a priori, não se conhece a estrutura do solo no entorno da SE sob teste. Assim, por exemplo, se entre a malha de terra sob teste e o EC houver uma rocha o ponto de intersecção das curvas será deslocado para um ponto diferente do obtido aplicando-se a equação (B).

Outra questão pertinente refere-se aos potenciais (toque e passo) medidos utilizando distâncias reduzidas entre eletrodos. Especificamente, a questão que se impõe é: tais potenciais serão sempre conservativos (a favor da segurança)?

Para responder a questão formulada determinou-se o erro relativo entre os potenciais indicados na Figura 4. Especificamente, na Figura 4, V'_{Gx} é o potencial medido em um ponto x , na superfície do solo, quando distâncias reduzidas entre eletrodos são utilizadas e V_{Gx} é o potencial, também em um ponto x na superfície do solo, quando a distância entre a malha de terra e o **EC** é tal em que não há acoplamento entre os eletrodos citados. Assim, o erro ε é dado por:

$$\varepsilon = \frac{V'_{Gx} - V_{Gx}}{V_{Gx}} \text{ (p. u.)} \quad (C)$$

Se:

- $V'_{Gx} > V_{Gx}$, implica que $\varepsilon > 0$: indicando que os potenciais de toque e passo medidos são conservativos;
- $V'_{Gx} < V_{Gx}$, implica que $\varepsilon < 0$: indicando que os potenciais de toque e passo medidos não são conservativos.

A Figura 7 apresenta o erro calculado para diferentes posições do eletrodo de potencial x , considerando diferentes distâncias D entre a malha de terra sob teste e o **EC**. Na Figura 7, D está em função do raio a da malha de terra sob teste.

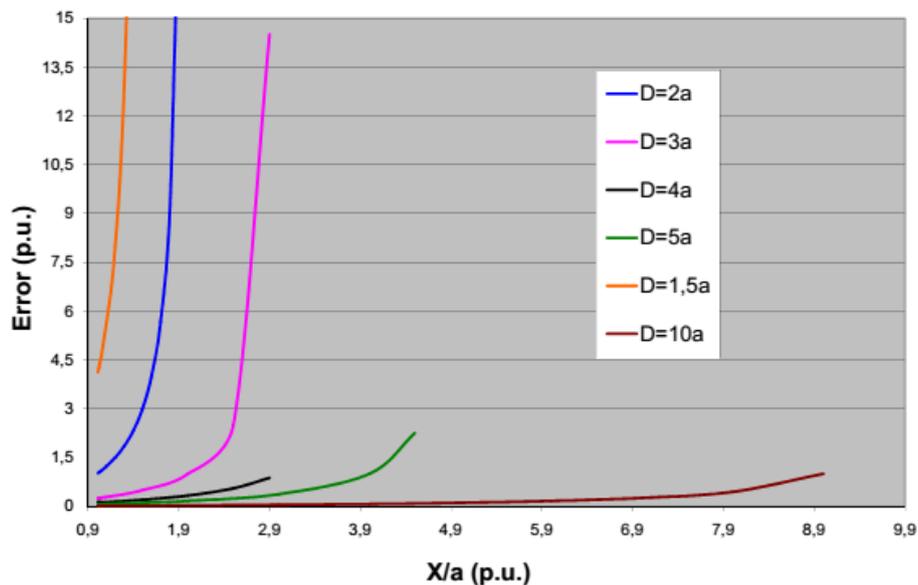


FIGURA 7 - Erro relativo para diferentes posições do EP (ponto x) e diferentes distâncias D .

A Figura 7 indica que o erro é positivo, quando distâncias reduzidas entre eletrodos são utilizadas. Ou seja: os valores medidos são conservativos (a favor da segurança). O fato de os potenciais medidos serem conservativos, utilizando distâncias reduzidas entre eletrodos, deve-se ao acoplamento existente entre a malha de terra sob ensaio e o **EC**.

Outra questão importante: No processo de medição há um divisor de tensão entre a malha de terra sob teste e o **EC**. Assim, dependendo da relação entre a resistência do **EC** e da resistência da malha de terra, bem como da distância entre esses eletrodos, quase toda a tensão da fonte poderá ficar aplicada sobre o **EC**, ao invés de ser aplicada sobre a resistência da malha de terra sob teste. Isto posto, quando a medição utiliza distância reduzida entre eletrodos, há uma redução no valor da corrente que circula entre a malha de terra sob teste e o **EC**. Tal redução deve-se ao acoplamento existente entre a malha de terra sob ensaio e o **EC**. Este fato (redução no valor da corrente de ensaio) fez com que fosse pesquisada a utilização do **EC** envolto em material de baixo valor de resistividade elétrica (**MBVR**). A utilização do **EC** envolto em **MBVR** faz com que os valores de corrente que circulam entre a malha de terra da SE sob teste e o **EC** aumentem de magnitude, fato este altamente desejável.

A Figura 8 mostra simulações realizadas com o objetivo de avaliar o efeito de envolver o **EC** com diferentes materiais possuindo baixos valores de resistividade elétrica. Especificamente, os dados da Figura 8, referem-se a hastes de aterramento verticais com 2,0m de comprimento, instaladas em furos possuindo diferentes diâmetros ϕ (10cm, 15cm e 20cm, respectivamente). Os furos, no solo, são preenchidos com materiais possuindo diferentes valores de resistividade elétrica, ρ_c (Ωm). Ainda, na Figura 8, os furos verticais estão instalados em um solo homogêneo o qual possui resistividade elétrica de 600 Ωm . Na Figura 8, R_{vgr} é o valor da resistência da haste de aterramento vertical instalada no solo de 600 Ωm .

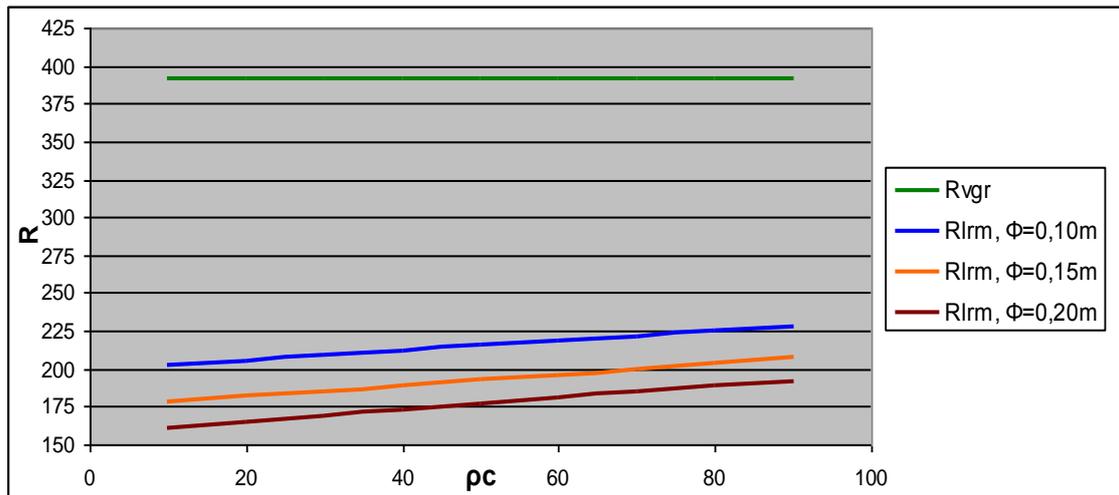


FIGURA 8 - Resistência de haste de aterramento vertical envolta em MBVR.

5.0 CONCLUSÃO

O método 3MT está sendo utilizado para avaliar a segurança proporcionada pelo sistema de aterramento de SE's instaladas no parque elétrico da CEEE, pois foi comprovado que os parâmetros de interesse apresentam resultados conservativos. Adicionalmente, a utilização do EC envolta em MBVR contribuiu para o aumento dos valores de corrente que circulam entre a malha de terra sob teste e o EC. O método 3MT foi aplicado em SE's energizadas e confere à metodologia de medição redução de custo e de tempo na execução dos testes em malhas de terra de SE's que apresentam restrições de espaço no seu entorno.

6.0- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Telló, M. et ali., "Aterramento Elétrico Impulsivo em Baixas e Altas Freqüências. Com Apresentação de Casos". EDIPUCRS, 2007 – Porto Alegre, RS.
- (2) Projeto de P&D realizado entre CEEE-GT/UFSC intitulado: "Desenvolvimento de Metodologia para a Medição de Potenciais em Malhas de Terra se SE's Urbanas", contrato CEEE 9945213, 2014.
- (3) IEEE Std 81-2012: IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of Grounding Systems.

7.0 – DADOS BIOGRÁFICOS

Marcos Telló, nasceu em Ijuí, RS, em 1956. Graduiu-se em Engenharia Elétrica (PUCRS (1981), possui mestrado (UFSC 1996) e Doutorado (UFRGS 2000). É Professor Titular da Faculdade de Engenharia da PUCRS/Departamento de Engenharia Elétrica. Também atua como Engenheiro Eletricista na CEEE-D, no Departamento de Projeto de Subestações da Transmissão/Divisão de Obras. É autor principal de 03 livros, na sua área de interesse, bem como possui artigos publicados no Power System Research e no IEEE Transactions on Magnetics, entre outros. Participa de vários grupos de pesquisa, no Brasil.

Guilherme A. D; Dias, nasceu em Porto Alegre, RS, em 1950. Graduiu-se em Engenharia Elétrica (1975) e obteve os títulos de Mestre (1996) e Doutor (2001) todos pela UFRGS. Atualmente, realiza Pós-Doutorado na UFRGS. Foi Professor Titular da PUCRS, por mais de 30 anos, bem como Engenheiro Eletricista do Grupo CEEE, também por mais de 30 anos. Atualmente é diretor da DDIAS Assessoria Empresarial e realiza consultoria principalmente nas áreas relacionadas com aterramento elétrico, descargas atmosféricas e Subestações de AT e EAT.

Guilherme André Tomasi Bauer, nasceu em Florianópolis, SC, em 1985. Em 2009 graduou-se em Engenharia Elétrica pela UFSC e ingressou como Engenheiro Eletricista, na CEEE Distribuição. Na CEEE atua na área de

projetos de subestações estando, atualmente, lotado no Departamento de Projetos da Transmissão/Divisão de Obras/CEEE-D.

Jorge André Meneghel Jitsukawa, nasceu em Porto Alegre, RS, em 1982. Em 2010 graduou-se em Engenharia Elétrica pela UFRGS e em 2012 ingressou como Engenheiro Eletricista, na CEEE Distribuição. Na CEEE atua na área de projetos de subestações estando, atualmente, lotado no Departamento de Projetos da Transmissão/Divisão de Obras/CEEE-D.