



XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica
SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro
Rio de Janeiro - RJ - Brasil

David Carvalho	Gilvan Junior
ENERGISA PARAIBA DISTRIBUIDORA DE ENERGIA S/A	Universidade Federal de Campina Grande
david.carvalho@energisa.com.br	gilvan@eletroquality.eng.br

Avaliação de malhas de aterramento - Caso Subestação Santa Rita

Palavras-chave

Aterramento
Curto-circuito
Potenciais
Repotencialização
Resistência
Subestação

Resumo

Neste trabalho são apresentados os resultados da avaliação das condições elétricas da malha de aterramento, no que concerne aos níveis de tensão de segurança no pátio e em suas instalações internas, da Subestação Santa Rita, pertencente à Energisa Paraíba. Os resultados são compostos por insumos coletados no campo e dados obtidos através de simulações computacionais em software desenvolvido em projeto de P&D entre a concessionária e a UFCG e no TecAt.

A necessidade dessa avaliação foi observada, pois atualmente não existem na Energisa Paraíba registros confiáveis dos projetos de subestações mais antigas do sistema elétrico do estado, o que impossibilita precisar as reais condições da malha de aterramento. Essa imprecisão ocasiona na não garantia da suportabilidade da malha de aterramento para um aumento de potência demandada ou alterações nos valores da impedância equivalente da topologia de rede que a subestação se encontra, o que ocasiona variações nos níveis de curto circuito.

Com a avaliação e de posse do resultado esperava-se embasar tecnicamente a tomada de decisão de reformar a malha de aterramento da Subestação Santa Rita. O trabalho foi parametrizado a partir de normas técnicas do IEEE e na NR-10 – 2004.

1. Introdução

Em malhas de aterramento é comum o desgaste de suas conexões devido à corrosão causada pela exposição natural dos condutores que formam a malha às diversas condições de solo e intempéries. Este desgaste tende a diminuir a confiabilidade da malha, que é representada pela capacidade do dispositivo em escoar para o solo as correntes de curto circuito, de impulsos atmosféricos e a corrente de desequilíbrio do transformador. A redução dessa capacidade pode provocar o surgimento de potenciais de risco na superfície do solo, trazendo riscos às pessoas, animais e equipamentos que estejam dentro do alcance desses potenciais.

O mesmo fenômeno dos potenciais de risco pode ocorrer quando da repotencialização da subestação em questão, que poderá injetar correntes de maior amplitude na malha, tanto em regime permanente quanto em regime transitório, exigindo que a malha esteja em condições de dispersar o fluxo de corrente para camadas profundas e não na superfície do solo.

Isso posto, a análise de uma malha de aterramento de subestação é fundamental para avaliar como as correntes irão se propagar no solo e se os equipamentos ligados a malha estão seguros quando da ocorrência de curtos circuitos ou de descargas atmosféricas.

2. Desenvolvimento

A avaliação da malha de aterramento da subestação Santa Rita ocorreu com o sistema energizado. Dessa forma, existem diversos riscos inerentes à execução do serviço, tendo sido, portanto, adotado todas as medidas de segurança conforme disposto na NR-10.

Para avaliação da malha de aterramento da Subestação Santa Rita foram consideradas, na realização das atividades as seguintes premissas:

- A malha de aterramento é composta por hastes de cobre individualizadas, fincadas à superfície do solo;
- As conexões entre cabos e hastes são feitas por abraçadeiras e em alguns pontos por solda exotérmica;
- O solo é do tipo argiloso (massapé), o que pode favorecer o escoamento das correntes através da malha;
- As medições na superfície e na malha de terra foram realizadas em dia com umidade relativa do ar de 64% e o solo encontrava-se com baixa umidade devido à ausência de chuvas nos dias anteriores às medições;
- De acordo com a norma IEEE Std 80, para avaliação das tensões de segurança foi considerado a massa média do corpo humano de 70 kg para os operadores dentro do pátio da SE SRT e 50 kg para áreas fora dos limites da subestação;
- A espessura da camada de brita observada no pátio da subestação foi de 0,1 metros;
- Os níveis de curto circuito utilizados na avaliação foram fornecidos para o período antes e após a repotencialização dos transformadores, conforme a tabela 1.

Tipo de Curto-Circuito	Malha atual	Malha após a Repotencialização
		Franco

I_{CC1} (kA)	11,2	14,6
-----------------------------	-------------	-------------

Tabela 1: Correntes de curto circuito monofásico da Subestação Santa Rita

- Para análise dos potenciais presentes no solo, foram realizadas as medições em campo com o equipamento digital e software desenvolvidos no P&D da Energisa em parceria com a UFCG: “*Avaliação das Condições de Malha de Aterramento em Instalações Energizadas*”;
- Foi utilizado também, para levantar as características da resistividade do solo e resistência da malha de aterramento, o Terrômetro Digital 6472 da AEMC Instruments devidamente calibrado, juntamente com a pinça amperimétrica modelo SR182. O uso da pinça amperimétrica do terrômetro é essencial para realizar a medição, já que o sistema se encontrava energizado e as correntes que circulam na malha podem provocar interferências ao equipamento, além de gerar falsos resultados quando se utiliza os termômetros convencionais e que não são baseados em microprocessadores;
- O mapeamento dos potenciais do solo ocorreu dentro, nas bordas e fora da área da malha de aterramento (área britada);
- No estudo foi realizado um comparativo simulado para a situação atual da malha de aterramento e após a expansão da malha com a construção do novo Bay de 69 kV e repotencialização dos transformadores.

Com a definição das premissas foram efetuadas as medições. Para a medição da resistividade do solo utilizou-se um terreno baldio adjacente ao muro da Subestação. Isso foi necessário para evitar que a massa metálica da própria subestação interferisse nos resultados da medição de resistividade do solo. O método de Wenner para a medição de resistividade foi adotado conforme apresentado na figura 1, estando de acordo com a recomendação das normas NBR 7117 e IEEE Std 81.

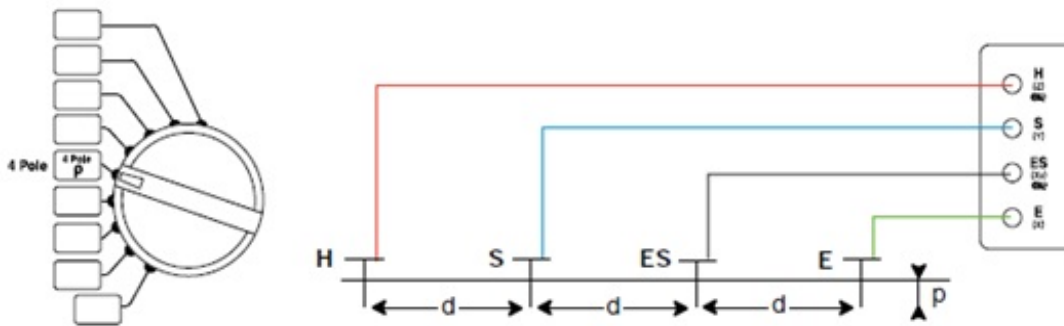


Figura 1: Esquema da medição de resistividade do solo pelo método de Wenner

Com os dados de medição de resistividade do solo foi possível, com o auxílio do software TecAt Plus 5.2, ajustar o cálculo e gerar a estratificação do solo da subestação Santa Rita em camadas, conforme a figuras 2 e 3.

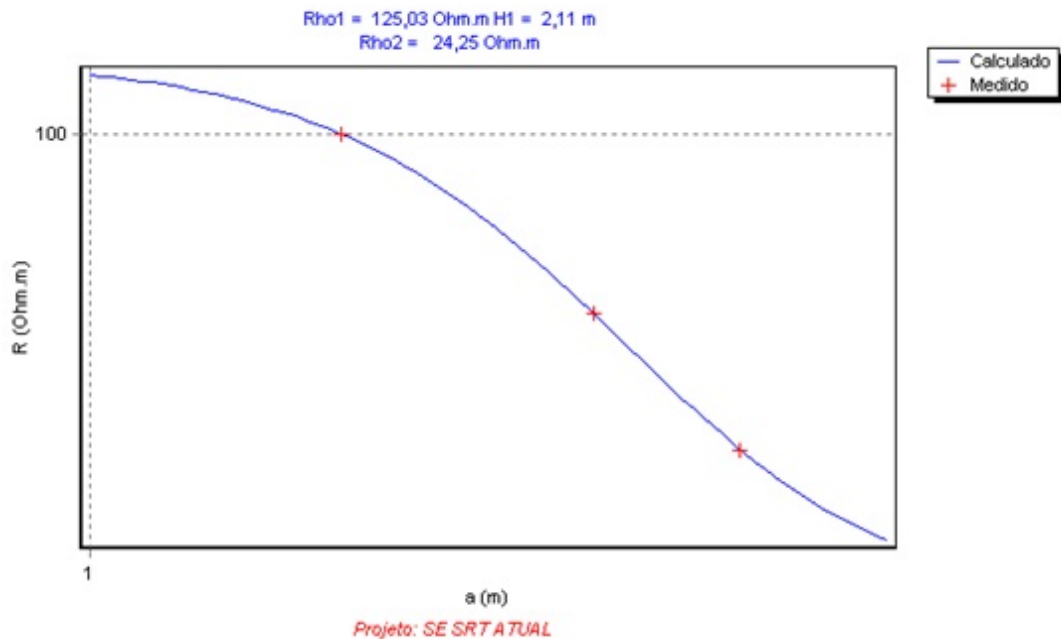


Figura 2: Gráfico de ajuste de cálculo da resistividade do solo

Diagrama:

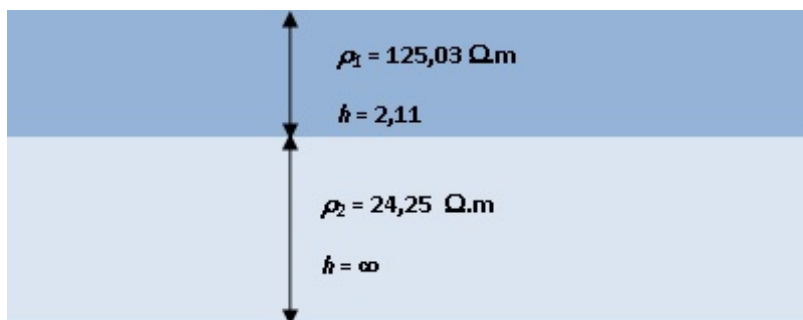


Figura 3: Modelo do solo estratificado em duas camadas da Subestação Santa Rita

Na situação apresentada acima se observou que as duas camadas apresentam valores bem abaixo de $1k\Omega.m$, o que implica em um solo de baixa resistividade que permite um bom escoamento das correntes da subestação analisada.

Após o estabelecimento dos valores de resistividade do solo no qual a subestação foi construída foram realizados simulações das condições da malha via TecAt. A partir das escavações efetuadas no pátio da subestação, dentro das normas da NR-10, verificou-se que há um reticulado de aproximadamente 3,5 m na horizontal e vertical, juntamente com alguns pontos de corrosão e rupturas de cabos, com essas informações foi levantado o reticulado atual da malha de aterramento, conforme figura 4. Também foram observadas que algumas conexões feitas por conectores de pressão e nos demais pontos de conexão foram detectadas soldas exotérmicas. Nas inspeções realizadas em campo observou-se que a cabeça da malha está a uma profundidade de aproximadamente 20 cm da superfície do solo, o que caracteriza uma malha rasa.

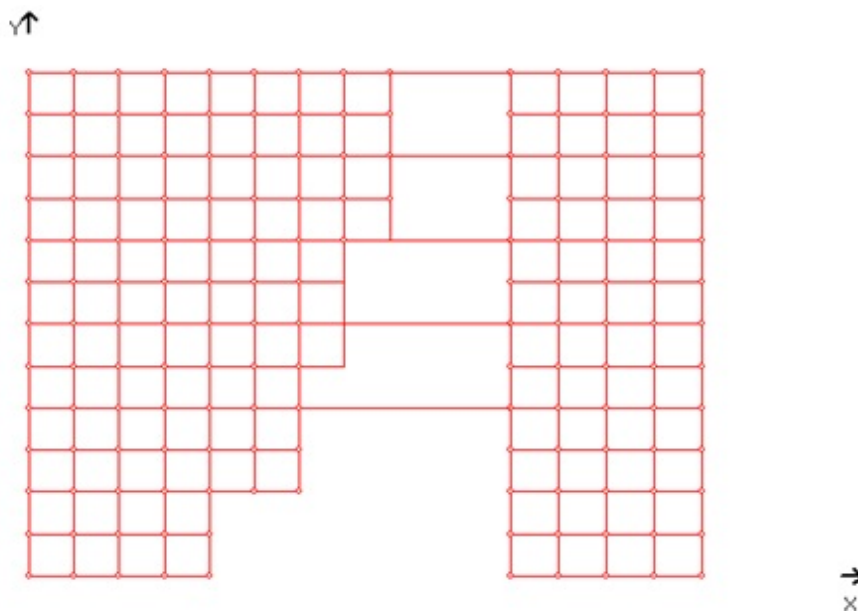


Figura 4: Planta atual da malha de aterramento da subestação Santa Rita

Com esses dados e o auxílio do TecAt obteve-se os seguintes valores de resistência da malha antes da ampliação da Subestação:

- Resistência da malha: 0,28 ?
- Máximo potencial da malha: 3230 V para uma corrente de curto monofásico de 14,16 kA na barra de 13,8 kV.

O valor obtido através de simulação foi comparado com os resultados obtidos através de medições em diversos pontos do pátio da Subestação, conforme a tabela 2.

Ponto	Local	Resistência (?)
1	Caixa de inspeção (bay 13,8 kV)	0,274
2	Caixa de inspeção (bay 13,8 kV)	1,955
3	Caixa de inspeção (bay 13,8 kV)	0,278
4	X0 do transformador	0,278
5	Cabo exposto	0,967
6	Chave de manobra	0,271

7	Chave de manobra	0,313
8	Chave de manobra	0,328
9	Chave de manobra	0,308
10	Chave de manobra	0,407
11	Chave de manobra	0,310
12	Chave de manobra	0,311
13	Chave de manobra	0,345
14	Chave de manobra	0,334
15	Banco de capacitores	0,266
16	Banco de capacitores	0,271
17	Caixa de inspeção (bay 69 kV)	0,419
18	Caixa de inspeção (bay 69 kV)	0,567
19	Caixa de inspeção (bay 69 kV)	0,698
20	Caixa de inspeção (bay 69 kV)	0,437

Tabela 2: Medições de resistência de aterramento em diferentes pontos da subestação

Observa-se na tabela que diversos valores se aproximaram muito do valor de resistência de malha obtido através da simulação no TecAt, a pequena variação que ocorre é devido as conexões dos cabos de aterramento a malha da subestação.

Após as medições de resistência de aterramento foram medidos e avaliados os potenciais da malha de aterramento. Inicialmente foi feita simulação utilizando o software TecAt, e posteriormente em campo foi efetuado as medições de toque, passo e superfície com o auxílio do analisador SAPS (Software de Análise

de Potenciais de Superfície). Esse analisador é o produto final do P&D desenvolvido entre a Energisa Paraíba e a UFCG.

O produto do P&D é composto de um equipamento coletor das medições de toque, passo e superfície, conforme mostrado na figura 5, e de um software que analisa os resultados e gera gráficos das equipotenciais.



Figura 5: Equipamento de medição dos potenciais de superfície

A malha foi simulada para os curtos mais fortes da subestação que podem chegar a 14,16 kA no barramento de 13,8 kV. Os potenciais chegam a ultrapassar em alguns casos os níveis recomendados pela norma IEEE 80 e 81, que são de 590,42 V e 1869,52 V, respectivamente para passo e toque dentro da subestação para uma pessoa de 50 kg. Nesses casos destaca-se o alto risco na região fora da subestação, nas proximidades do transformador de potência e no barramento de 13,9kV.

Nas medições realizadas com o SAPS, observou-se o valor real obtido em pontos distintos na área da subestação e em suas proximidades. Em todos os casos também foi avaliado as condições em curto-circuito, adotando-se o valor máximo de 14,16 kA para faltas monofásicas no barramento de 13,8 kV.

Para uma maior eficiência do método, foram realizadas as medições dos potenciais de superfície, onde foram indicados com precisão os pontos com maior potencial no solo. Nestes pontos foram realizadas as medições dos potenciais de passo e toque, mostrando de forma mais realista os locais de maior risco na área da subestação. Essa informação é interessante para diagnosticar a necessidade pontual de intervenção na malha de aterramento.

Conforme mostrado na figura 6, as hastes foram fincadas dentro e fora da área da caixa de brita da subestação com espaçamentos de 7 m na horizontal e vertical. Os pontos medidos ilustrados totalizam 42 medições para mapeamento dos potenciais de superfície.

Para se avaliar as reais condições da malha de aterramento, os valores obtidos em campo foram colocados para as condições de curto-circuito da subestação, para isso utilizou-se o software do SAPS. Nesse

modelamento observou-se que os potenciais tiveram maior intensidade nas regiões próximas ao transformador e próximas ao término da malha. A região próxima ao transformador é caracterizada pela injeção da corrente de desequilíbrio advinda do X0 do transformador. Verificou-se também que as chaves de manobra e disjuntores estão situadas dentro desta região de maior potencial. Os potenciais na saída da malha também são mais elevados, dando-se um destaque especial à sala de comando da subestação, que por estar fora da malha de aterramento, é afetada pelos potenciais advindos do solo.

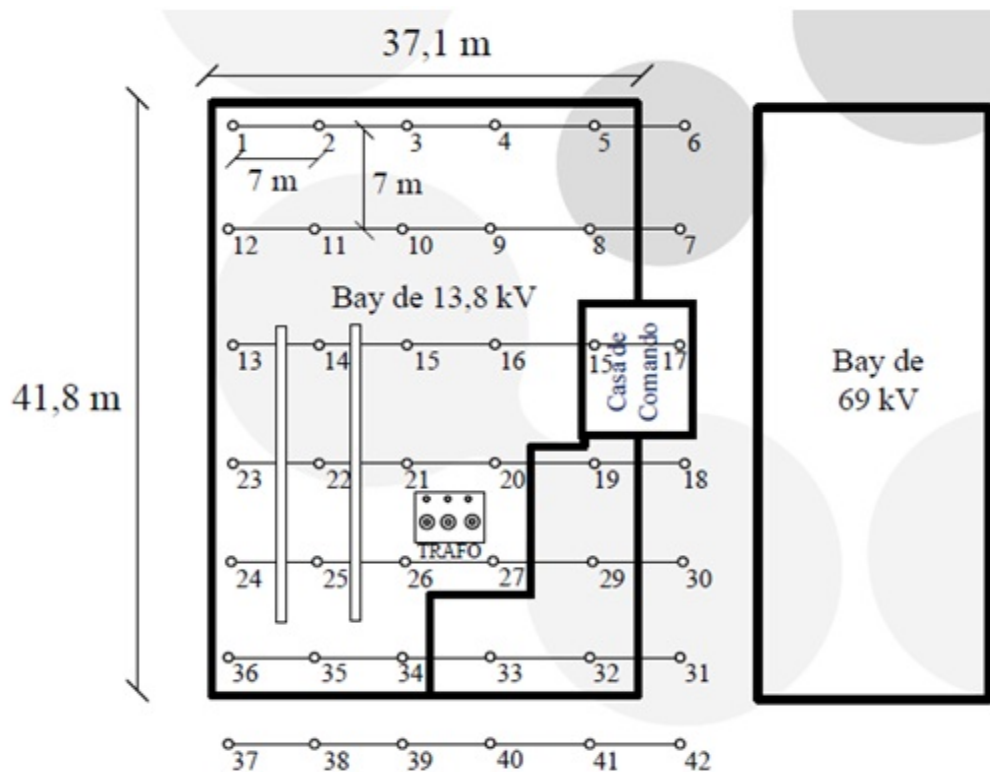


Figura 6: Esboço dos pontos de medição dos potenciais de superfície

Nessas observações foi detectado que os potenciais de transferência podem ultrapassar 3 kV, o que pode danificar equipamentos que estejam próximos a subestação. Cita-se como exemplo equipamentos eletrônicos para comando e controle e também dispositivos de telecomunicações.

A partir da análise das medições de potenciais de superfície, realizaram-se as medições dos potenciais de passo e toque nas regiões que obtiveram maior potencial de superfície. Essas regiões com maior potencial se destacam por oferecer maiores riscos aos operadores da subestação.

As medições dos potenciais de passo foram realizadas com o uso de dois eletrodos concretados de 50 kg cada um em paralelo com uma resistência de 1 k Ω , simulando uma pessoa que esteja em pé no solo da subestação. Nas medições foram selecionados os pontos críticos e com maior potencial observados na análise de potenciais de superfície feita com o apoio do SAPS. As áreas em questão foram a zona próxima ao transformador, as chaves de manobra e a casa de comando. Em campo os eletrodos foram dispostos no solo, sobre duas flanelas embebidas em solução salina a 5%.

A partir das medições de toque e passo foram avaliadas as condições em regime permanente e em curto-circuito conforme descrito na tabela 3.

Local	Tensão em regime permanente (mV)	Tensão em curto circuito (V)
-------	----------------------------------	------------------------------

Transformador (passo)	32	78,1
Chaves (passo)	30	73,2
Casa de comando (passo)	20	48,8
Transformador (toque)	396	966,8
Chaves (toque)	262	639,6
Casa de comando (toque)	300	732,4

Tabela 3: Maiores valores obtidos nas medições de toque e passo na subestação Santa Rita

De acordo com os dados obtidos, demonstrados na tabela acima, observa-se que os potenciais de passo na subestação estão bem abaixo dos valores normativos que é de **1869,56**. No entanto, para os potenciais de toque nos três setores críticos analisados o limite normativo de **590,42 V**, foi transgredido para as condições de curto-circuito de 14,16 kA, trazendo riscos aos operadores que tocarem nesses equipamentos durante um curto circuito.

Com todas as medições e simulações da subestação na condição atual efetuadas, ou seja, sem ampliação, foi feito um extrapolação das informações, em software, para as condições do novo curto circuito devido à repotencialização da subestação. Dessa forma foi possível avaliar se a malha de aterramento suportaria a ampliação prevista.

Após a ampliação e reforma a configuração malha da subestação Santa Rita ficaria conforme a figura 7.

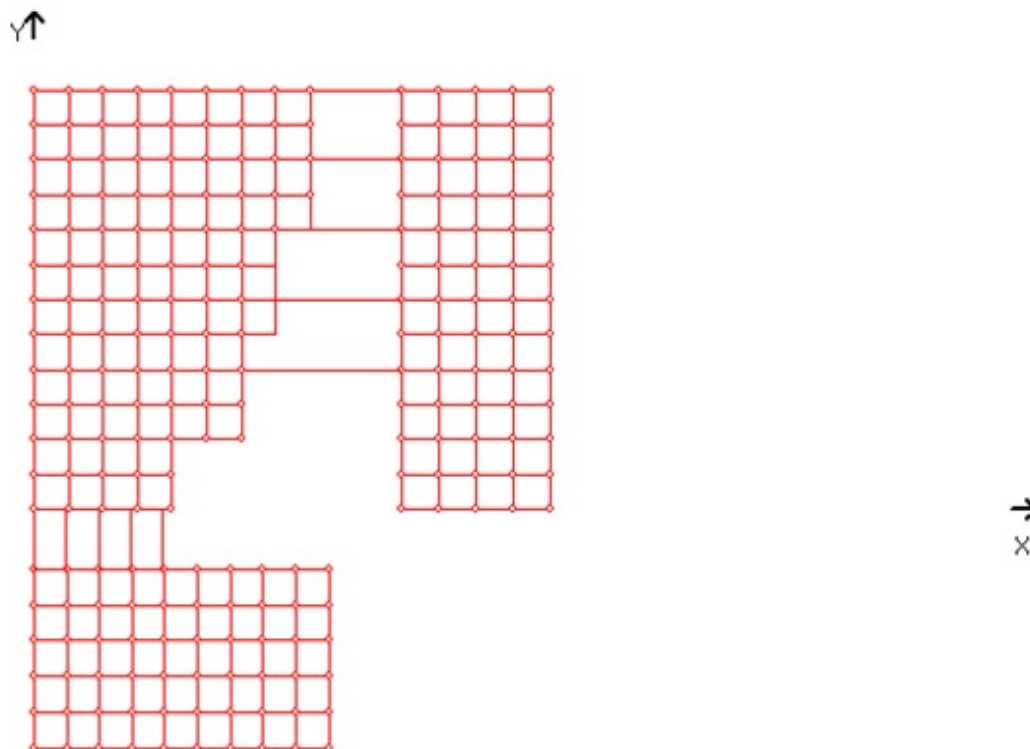


Figura 7: configuração futura da malha da subestação Santa Rita

Com essa configuração de malha espera-se que a impedância caia para próximo de $0,25 \Omega$, o que caracteriza uma boa condição para o funcionamento da malha de aterramento. Com o apoio dos softwares TecAt e SAPS foram simuladas os potenciais de toque, passo e superfície na nova configuração de malha e nível de curto circuito. Nessas simulações verificou-se que em diversos pontos da subestação os valores normativos de potenciais estavam fora dos limites estabelecidos.

3. Conclusões

Como mostrado no desenvolvimento, na malha de aterramento da SE STR observou-se que as instalações de aterramento estavam subdimensionadas para a repotencialização que era planejada para aquela Subestação. Esse subdimensionamento causaria uma extrapolação dos limites de potenciais permitidos pela norma.

Com essas informações foi feita uma sugestão de reforço da malha de aterramento para o departamento responsável, conforme mostrado na figura 8. Esse reforço deveria ser feito antes da reforma prevista de ampliação da subestação Santa Rita.

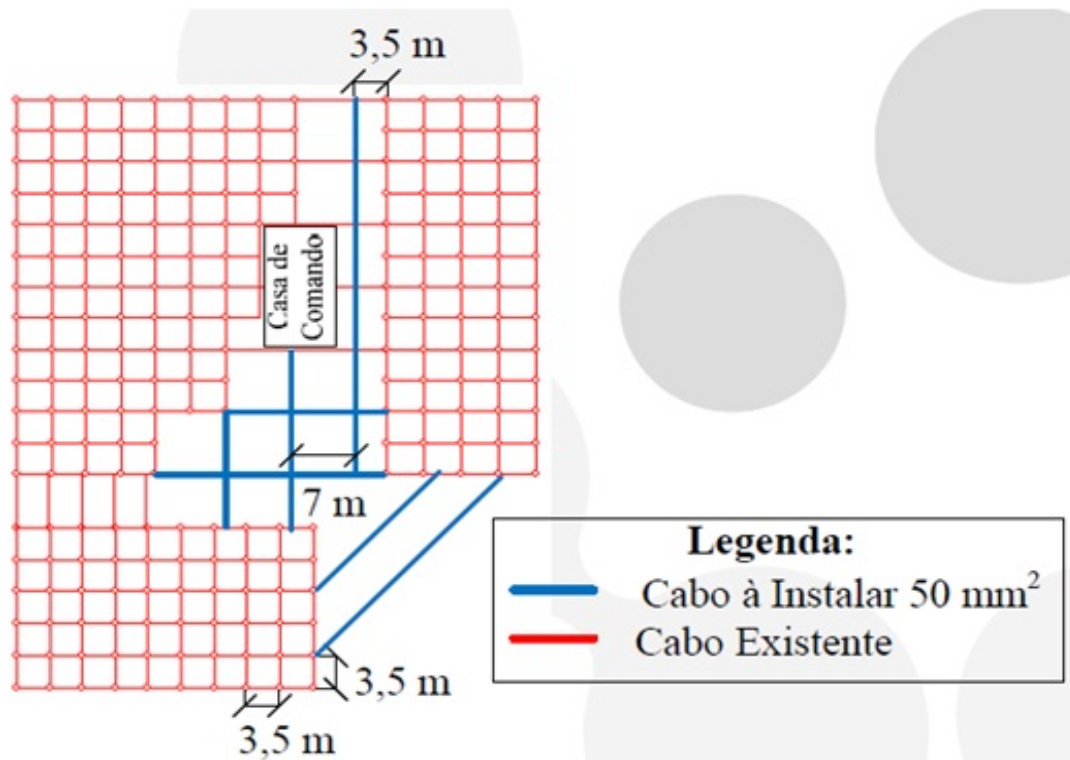


Figura 8: Sugestão de reforço na malha de aterramento para redução dos potenciais

A configuração de malha proposta foi submetida às mesmas simulações descritas. Nessa nova condição verificou-se que os valores de potenciais estavam abaixo dos valores recomendados pela norma IEEE 80 e 81. Porém observou-se que os valores dos potenciais se aproximam muito do normativo em alguns pontos da subestação, o que sugere uma situação de risco para equipamentos e operadores da subestação para potenciais acima da prevista pela repotencialização. Pelas medições realizadas em campo, observou-se que em alguns setores da subestação poderão se aproximar do limite de potencial estabelecido pelas normas, para estes pontos deverá ser obrigatório o uso dos EPIs recomendados, principalmente nas proximidades do transformador, nas proximidades das chaves de manobra e religadores do barramento de 13,8 kV e na casa de comando.

Conclui-se, finalmente, que é possível que a mesma situação observada na subestação Santa Rita possa estar acontecendo em outras subestações do sistema elétrico da concessionária. É necessário, desse modo, que seja feita essa mesma avaliação para se garantir a possibilidade de repotencialização das subestações, e mais importante, garantir a segurança dos operadores e dos equipamentos internos e externos à subestação.

4. Referências bibliográficas

Normas Técnicas:

- IEEE Std 80 - 2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding;
- IEEE Std 81 - 1983, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System;
- IEEE Std 81.2 - 1992, IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems;
- NR-10 - 2004, Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade;

Livros:

- LEITE, C. M.; PEREIRA FILHO, M. L., Malhas de Terra: Técnicas de Aterramentos Elétricos, Oficina de Mydia Editora Ltda, São Paulo, Brasil, 2007.
- MATTOS, M. A., Técnicas de Aterramento, Okime Eletromagnetismo Aplicado Ltda, Campinas, Brasil, 2004.
- VISACRO FILHO, S., Aterramentos Elétricos: Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação e Filosofias de Aterramento, Artliber Editora Ltda, São Paulo, Brasil, 2005.

Artigos Técnicos:

- KOSZTALUK, R.; MUKHEDKAR, D.; GERVAIS, Y., Field Measurements of Touch and Step Voltages, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, no. 11, November 1984.
-